



ระดับ
มหาวิทยาลัย

ฟิสิกส์ 2

ระดับมหาวิทยาลัย

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เข้าใจง่าย • ใช้ได้จริง • เห็นภาพชัดเจน • ครบถ้วนทุกเนื้อหา



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

c = อัตราเร็วแสงในสุญญากาศ
 μ_0 = สภาพซึมผ่านแม่เหล็กของสุญญากาศ
 ϵ_0 = สภาพยอมไฟฟ้าของสุญญากาศ



เนื้อหาครบถ้วน
สรุปเข้มข้น



สูตรสำคัญ
เข้าใจง่าย
จำได้จริง



ตัวอย่างโจทย์
พร้อมเฉลย
ละเอียด



เหมาะสำหรับ
นักศึกษาระดับ
มหาวิทยาลัย

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในธรรมชาติ

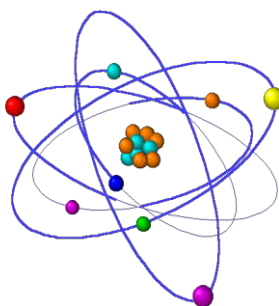


การประยุกต์ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในชีวิตประจำวัน



ราคา
99
บาท

เรียบเรียงโดย
ผศ.สุชาติ สุภาพ



ฟิสิกส์ ๒ ระดับมหาวิทยาลัย

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ผศ.สุชาติ สุภาพ

พิมพ์และจำหน่ายโดย

สุชาติ สุภาพ

133/471 หมู่ ๒ (ติดกับ สนง. ที่ดินบางบัวทอง) ต.พิมลราช อ.บางบัวทอง จ.นนทบุรี

E-mail suchart11111@hotmail.com

พิมพ์ที่ หจก.สปส 1999 ม.เพชรอนันต์ เขตคันนายาว กรุงเทพฯ ๑ 10230

คำนำ

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นปรากฏการณ์ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งทั้งในด้านทฤษฎีและการประยุกต์ใช้งานในชีวิตประจำวัน โดยครอบคลุมตั้งแต่แสงที่ตามองเห็น ไปจนถึงคลื่นวิทยุ ไมโครเวฟ อินฟราเรด รังสีเอกซ์ และรังสีแกมมา ความเข้าใจธรรมชาติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไม่เพียงช่วยอธิบายพฤติกรรมของแสงและการสื่อสารไร้สายเท่านั้น แต่ยังเป็นรากฐานของเทคโนโลยีใหม่ เช่น การสื่อสารผ่านดาวเทียม โทรศัพท์มือถือ การแพทย์ ฯลฯ หนังสือเล่มนี้จัดทำขึ้นเพื่ออธิบายแนวคิดพื้นฐานของการกำเนิดและการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างเป็นระบบ โดยเริ่มจากสมการของแมกซ์เวลล์ รวมถึงลักษณะสำคัญของคลื่น เช่น ความเร็ว การโพลาไรซ์ ทิศทางการแผ่ และพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า นอกจากนี้ยังกล่าวถึงสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า การส่งสัญญาณ และการประยุกต์ใช้งานในเทคโนโลยีสมัยใหม่ ผู้เขียนมุ่งหวังให้หนังสือเล่มนี้เป็นแหล่งเรียนรู้สำหรับนักศึกษา โดยเชื่อมโยงทฤษฎีทางฟิสิกส์กับการใช้งานจริง พร้อมตัวอย่างโจทย์ เพื่อเสริมสร้างความเข้าใจและทักษะในการวิเคราะห์ระบบที่เกี่ยวข้องกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างมั่นใจ

สำหรับท่านที่อยากได้ไฟล์ PDF. ของหนังสือนี้ เพื่อจะได้สามารถปริ้นท์เอกสารได้ สามารถสั่งซื้อได้ที่ ไลน์หรือ facebook ของผม



ถ้านักเรียนสนใจหนังสือในรูปแบบ E-BOOK ก็มีจำหน่ายที่เว็บไซต์ ร้านนายอินทร์ , MEB , อุกปี, ซีเอ็ด , hystexts , ศูนย์หนังสือจุฬาฯ และ DDebook

สำหรับท่านที่สนใจหนังสือของกระผมแต่หาซื้อตามร้านหนังสือทั่วไปไม่ได้ สามารถซื้อออนไลน์ที่แอปต่าง ๆ โดยสแกน QR โค้ดข้างล่างนี้ (ที่ช้อปปีมีหนังสือมากที่สุด)



SHOPEE



Lazada



TikTok

สุชาติ สุภาพ มือถือ 083-920-3825

บทที่ 12

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ในโลกของฟิสิกส์ พลังงานสามารถเดินทางจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้หลากหลายวิธี หนึ่งในวิธีที่สำคัญและพบได้บ่อยในชีวิตประจำวันคือการเดินทางในรูปของ “คลื่น” โดยเฉพาะ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นคลื่นที่สามารถแพร่กระจายได้โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง **คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือการสั่นร่วมกันของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกัน** และทั้งสองสนามยังตั้งฉากกับทิศทางของการเคลื่อนที่ของคลื่นอีกด้วย ลักษณะเช่นนี้ทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นตามขวาง และมีคุณสมบัติพิเศษที่สามารถเดินทางในสุญญากาศได้ ในหัวข้อนี้ ทุกคนจะได้เรียนรู้ถึงธรรมชาติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แหล่งกำเนิดคลื่น การเคลื่อนที่ ความเร็ว และ สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ตั้งแต่คลื่นวิทยุที่มีความถี่ต่ำ ไปจนถึงรังสีแกมมาที่มีความถี่สูง รวมถึงการประยุกต์ใช้งานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในชีวิตประจำวัน เช่น การสื่อสารไร้สาย การตรวจทางการแพทย์ และการถ่ายภาพทางดาราศาสตร์

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เกิดจากการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการทำให้สนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก หรือถ้าสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงก็จะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นตามขวาง ประกอบด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกัน เป็นคลื่นเคลื่อนที่ไปในที่ต่าง ๆ ได้โดยไม่ต้องมีตัวกลาง ดังนั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงเป็นคลื่นชนิดเดียวที่เคลื่อนที่ผ่านสุญญากาศได้

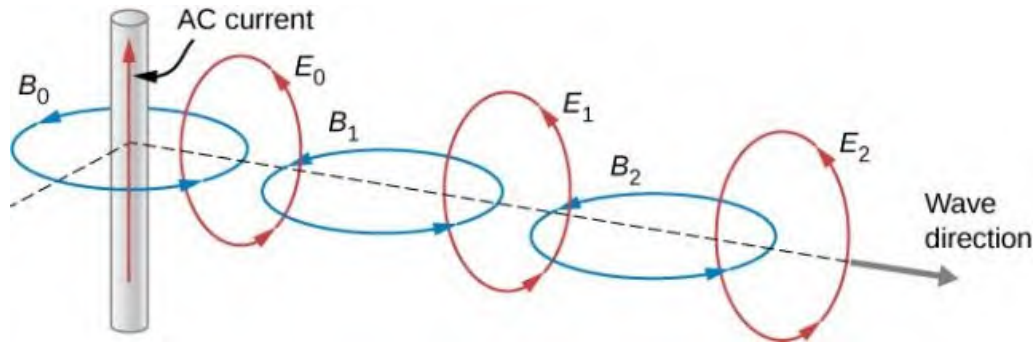
คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีอยู่รอบตัวเรามีทั้งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากธรรมชาติ และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มนุษย์ทำให้เกิดขึ้นมาก ทั้งที่ตั้งใจและไม่ตั้งใจ

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มนุษย์ตั้งใจทำให้เกิดขึ้นมาได้แก่ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากเสาอากาศเครื่องส่งวิทยุ หรือโทรทัศน์ โทรศัพท์มือถือ ฯลฯ ส่วนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มนุษย์ไม่ได้ตั้งใจทำให้เกิดขึ้นมาได้แก่ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสายไฟฟ้าที่มีกระแสไฟฟ้าไหลทุกชนิด หรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากเครื่องใช้ไฟฟ้าทุกเครื่อง เป็นต้น

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้นได้อย่างไร

แหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่คนทั่วไปรู้จักก็คือ สายอากาศของสถานีวิทยุ/โทรทัศน์ และตัวการที่ทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่ออกไปก็คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายอากาศ เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ถ้าไฟฟ้ากระแสสลับที่ไหลในสายอากาศมีความถี่เท่าใด คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาก็จะมีความถี่เท่านั้น

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เกิดจากการเหนี่ยวนำสลับกันอย่างต่อเนื่องระหว่างสนามแม่เหล็กกับสนามไฟฟ้า โดยการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไม่อาศัยตัวกลาง แต่อาศัยการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีเฟสตรงกัน ทิศของสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามทั้งสอง เราสามารถเขียนแผนภาพการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดังนี้



รูป 12.1 ลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกจากสายอากาศ

12.1 กฎต่าง ๆ ของแม่เหล็กและไฟฟ้า

ในโลกของฟิสิกส์ แม่เหล็กและไฟฟ้าเป็นปรากฏการณ์ที่มีความเกี่ยวข้องกันอย่างลึกซึ้ง ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีที่สำคัญมากมาย ตั้งแต่การผลิตกระแสไฟฟ้า การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า ไปจนถึงระบบส่งพลังงานและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ความเข้าใจปรากฏการณ์เหล่านี้จำเป็นต้องอาศัยกฎพื้นฐานหลายข้อที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก ได้อย่างเป็นระบบ กฎสำคัญที่เกี่ยวข้องกับแม่เหล็กและไฟฟ้าได้แก่

1. กฎของคูลอมบ์ อธิบายแรงไฟฟ้าระหว่างประจุไฟฟ้าสองจุด
2. กฎของโอห์ม แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กระแส และความต้านทานในวงจรไฟฟ้า
3. กฎของเกาส์ อธิบายการกระจายของสนามไฟฟ้าในพื้นที่ล้อมรอบประจุ
4. กฎของไฮสเตด แสดงว่ากระแสไฟฟ้าสามารถสร้างสนามแม่เหล็กได้
5. กฎของแอมแปร์ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบตัวนำ
6. กฎของฟาราเดย์ อธิบายการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็ก
7. กฎของเลนซ์ ระบุทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในทิศทางที่ต้านการเปลี่ยนแปลง
8. กฎของเคอร์ชอฟฟ์ ใช้วิเคราะห์กระแสและแรงดันในวงจรไฟฟ้าซับซ้อน
9. กฎของบีโอด-ซาวาร์ต อธิบายการเกิดสนามแม่เหล็กจากองค์ประกอบของกระแสไฟฟ้า

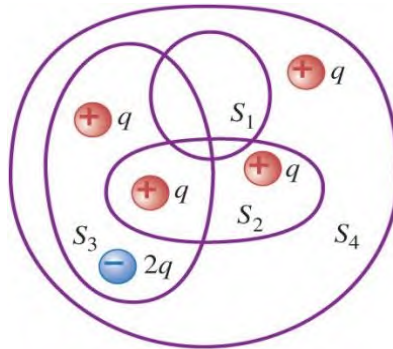
แมกซ์เวลล์พบว่ากฎเหล่านี้ มี 4 กฎ ที่มีความเกี่ยวข้องกับ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ได้แก่

- 1) กฎของเกาส์สำหรับสนามไฟฟ้า
- 2) กฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็ก
- 3) กฎของฟาราเดย์
- 4) กฎของแอมแปร์-แมกซ์เวลล์

กฎของเกาส์สำหรับสนามไฟฟ้า เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (12-1)$$

สมการ (12 - 1) มีความหมายว่าถ้ามีประจุไฟฟ้าอยู่ในผิวปิดใดๆ ฟลักซ์ไฟฟ้าที่พุ่งผ่านผิวปิดจะมีค่าขึ้นอยู่กับประมาณประจุไฟฟ้าที่อยู่ในผิวปิดนั้น

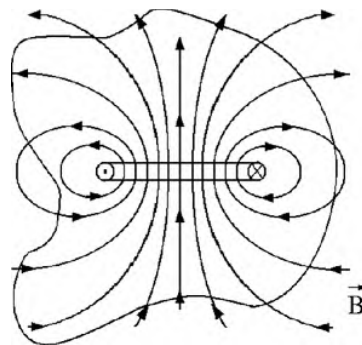
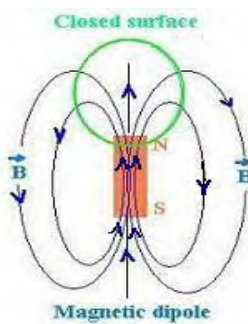


รูป 12.๑ ประจุไฟฟ้าที่อยู่ในผิวปิดต่างๆ

กฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็ก เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0 \quad (12 - 2)$$

สมการ (12 - 2) มีความหมายว่าถ้าภายในผิวปิดใดๆ มีแท่งแม่เหล็ก หรือไม่มีเลย ฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งผ่านผิวปิดนั้นจะมีค่าเป็นศูนย์



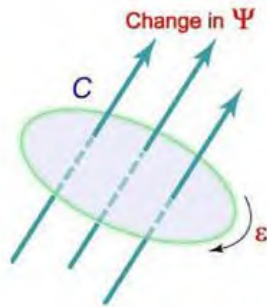
รูป 12.๒ ผิวปิด กับฟลักซ์แม่เหล็ก

สมการ (12 - ๒) มีความหมายเป็นว่า แท่งแม่เหล็กชั่วคราวไม่มี

กฎของฟาราเดย์ เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{\partial \phi_B}{\partial t} \quad (12 - 3)$$

สมการ (12 - ๓) มีความหมายว่า ถ้าฟลักซ์แม่เหล็กเปลี่ยนแปลง จะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้ารอบ ๆ ฟลักซ์แม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงนั้น (ถึงแม้ว่าบริเวณนั้น จะไม่มีอะไรอยู่เลย)



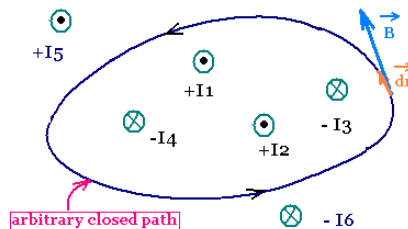
รูป 12.4 สนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นรอบๆ ฟลักซ์แม่เหล็ก

กฎของแอมแปร์-แมกซ์เวลล์

กฎของแอมแปร์ เป็นกฎที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็ก เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I$$

มีความหมายว่า ถ้ามีกระแสไฟฟ้าไหลในเส้นลวดตัวนำใดๆ จะมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นรอบ ๆ เส้นลวดตัวนำนั้น



รูป 12.5 แสดงกระแสไฟฟ้า และเส้นขอบเขต

กฎของแอมแปร์ ใช้ได้เฉพาะกรณีที่กระแสไฟฟ้ามีค่าคงตัว หรือกล่าวง่ายๆ ได้ว่ากฎของแอมแปร์ใช้คำนวณหาสนามแม่เหล็กที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสตรงได้ แต่ถ้าไฟฟ้าที่ไหลในเส้นลวดเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ กฎของแอมแปร์ก็ใช้ไม่ได้

เมื่อกฎของแอมแปร์มีข้อจำกัดดังกล่าว แมกซ์เวลล์จึงได้นำเอากฎของแอมแปร์มาปรับปรุงใหม่ให้ใช้ได้กว้างขวางขึ้น และเรียกกันว่าเป็น กฎของแอมแปร์ - แมกซ์เวลล์ และเขียนเป็นสมการได้ว่า

$\left. \begin{aligned} \oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} &= \mu_0 (I + i_d) \\ \oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} &= \mu_0 \left(I + \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt} \right) \end{aligned} \right\}$	(12 - 4)
---	-----------------

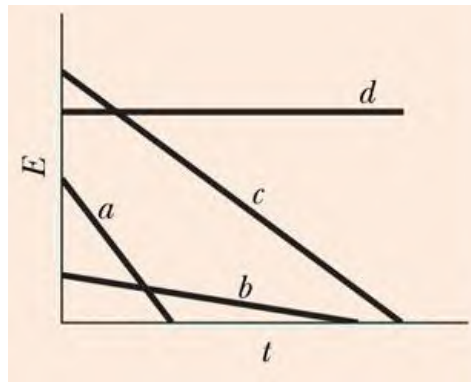
$$\text{เมื่อ } i_d = \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt}$$

สมการ (12 - 4) มีความหมายว่า เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในเส้นลวดตัวนำ หรือมีการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ไฟฟ้า ก็จะมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นรอบๆ เส้นลวดตัวนำ หรือรอบๆ การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ไฟฟ้านั้น หรือกล่าวได้ว่า เราสามารถทำให้มีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นมา ได้ ๒ วิธีคือ

1) ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในเส้นลวดตัวนำ

๒) ทำให้สนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง

ถ้าไม่มีกระแส I สมการ (12 - 4) ก็จะคล้ายกับกฎของฟาราเดย์มาก และถ้ามีแม่เหล็กขั้วเดียวสมการ (12 - 4) ก็จะคล้ายกับกฎของฟาราเดย์มากขึ้น และจากพิจารณาสมการทั้ง 4 ก็จะพบว่าเป็นสมการของสนามไฟฟ้า ๑ สมการ และสมการของสนามแม่เหล็ก ๑ สมการ โดยสมการของสนามทั้งสองมีลักษณะใกล้เคียงกัน และสมการทั้ง ๒ ชุด จะเหมือนกันไม่ได้ เพราะว่าในกรณีไฟฟ้ามีประจุไฟฟ้าได้เสมอ แต่ในกรณีแม่เหล็กไม่มีขั้วเหนือเดียว หรือขั้วใต้เดียว ตัวอย่าง กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสนามไฟฟ้าเมื่อเทียบกับเวลาเป็นดังรูป อยากรู้อะไรบ้างบริเวณใดมีความเข้มสนามแม่เหล็กมากที่สุด



วิธีทำ จากสมการของแมกซ์เวลล์

$$\oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt}$$

$$\oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{dEA}{dt}$$

$$\oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \epsilon_0 A \frac{dE}{dt}$$

ซึ่งมีความหมายว่าบริเวณใดมีการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้ามาก บริเวณนั้นก็จะมีสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มมาก ดังนั้นจะได้ว่า $B_a > B_c > B_b > B_d = 0$ ตอบ

12.2 สมการแมกซ์เวลล์

ในโลกของฟิสิกส์คลาสสิก มีเพียงไม่กี่สมการที่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ทางธรรมชาติได้อย่างครอบคลุมและลึกซึ้ง หนึ่งในนั้นคือ “สมการแมกซ์เวลล์” ซึ่งถือเป็นรากฐานสำคัญของทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า และเป็นหนึ่งในสมการที่เปลี่ยนโฉมหน้าของวิทยาศาสตร์ยุคใหม่แมกซ์เวลล์ นักฟิสิกส์ชาวสกอตแลนด์ ได้รวมกฎพื้นฐานของไฟฟ้าและแม่เหล็กเข้าด้วยกันเป็นระบบสมการที่งดงามและทรงพลัง 4 สมการ ซึ่งสามารถอธิบายทุกสิ่งที่เกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า และการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างครบถ้วน สมการแมกซ์เวลล์ช่วยเปิดเผยว่า แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง และทำให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย วิทยุ โทรทัศน์ เรดาร์ ไปจนถึงอินเทอร์เน็ตไร้สายในปัจจุบัน นอกจากนี้ยังเป็นพื้นฐานที่นำไปสู่การปฏิวัติทางฟิสิกส์ในศตวรรษที่ 20 เช่น ทฤษฎีสัมพัทธภาพของไอน์สไตน์ ในหัวข้อนี้ทุกท่านจะสำรวจเนื้อหาของ สมการทั้ง 4 ของแมกซ์เวลล์ เข้าใจความหมายทางฟิสิกส์ของแต่ละสมการ ความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก รวมถึงผลลัพธ์อันน่าทึ่งที่ตามมา เช่น การกำเนิดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และการอธิบายธรรมชาติของแสงอย่างเป็นระบบ

แมกซ์เวลล์ เป็นนักวิทยาศาสตร์คนแรกที่หลอมรวมเรื่องของกระแสไฟฟ้า และเรื่องของสนามแม่เหล็กเข้าด้วยกัน เพราะว่า ๑ เรื่องนี้มันคือสิ่งเดียวกัน และจากแนวความคิดของแมกซ์เวลล์ที่ สามารถหลอมรวมกฎเกณฑ์ทางไฟฟ้า และกฎเกณฑ์ทางแม่เหล็กเข้าด้วยกันได้สำเร็จ ทำให้ในปัจจุบัน นักวิทยาศาสตร์ก็พยายามที่จะหลอมรวมกฎเกณฑ์ของแรงต่าง ๆ ในธรรมชาติทั้ง 4 ประเภทเข้าด้วยกัน แต่ยังไม่สามารถหลอมรวมได้

สมการแมกซ์เวลล์เป็นสมการเป็นพื้นฐานสำหรับอธิบายปรากฏการณ์ทางแม่เหล็ก - ไฟฟ้า มี 4 สมการด้วยกัน โดยสมการทั้ง 4 สามารถเขียนได้ ๒ รูปแบบ คือ รูปของอินทิกรัล และรูปเชิงอนุพันธ์ รูปเชิงอนุพันธ์เป็นรูปที่นำไปใช้ได้ง่ายกว่า

รูปของอินทิกรัล	รูปเชิงอนุพันธ์
1. $\oint_s \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$	$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$
2. $\oint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$
3. $\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$
4. $\oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0(I + \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt})$	$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$

โดยทั่วไปแล้วสมการทั้ง 4 นิยมเขียนในรูปเชิงอนุพันธ์ เพราะรูปอนุพันธ์ใช้ได้ง่ายกว่า

ต่อไปนี้จะเป็นการแปลงกฎต่างๆ ทั้ง 4 กฎให้อยู่ในรูปเชิงอนุพันธ์ ดังนี้

จากกฎของเกาส์สำหรับสนามไฟฟ้า $\oint_s \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$

ใช้ทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์ กับทอมซัสมีอ และเปลี่ยนรูปประจุไฟฟ้าให้อยู่ในรูปของความหนาแน่นประจุคูณกับปริมาตร จะได้