บทที่ 5
สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

เรือยามาโมโต้ 1 เป็นเรือซึ่งใช้พลังงานขับเคลื่อนจากแม่เหล็กไฟฟ้าลำแรกของโลก เนื่องจากต้องใช้สนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงมาก จึงต้องอาศัยตัวนำยวดยิ่งสร้างสนามแม่เหล็ก หลักการมีง่ายๆ ดังนี้ น้ำทะเลจะไหลเข้าไปะหว่างขั้วไฟฟ้า เกิดแรงทางแม่เหล็กผลักให้น้ำทะเลพุ่งออกมาทางด้านหลัง จากกฎข้อที่สามของนิวตัน เมื่อมีแรงกระทำไปทางด้านหลังจะทำให้เรือพุ่งไปทางด้านหน้าด้วยแรงขนาดที่เท่ากัน แต่ทิศทางตรงกันข้าม ข้อดีของเรือแม่เหล็กลำนี้คือไม่มีเสียงที่เกิดจากเครื่องยนต์ความร้อนเลย อ่านต่อครับ

5-1 ความเป็นมาเรื่องสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

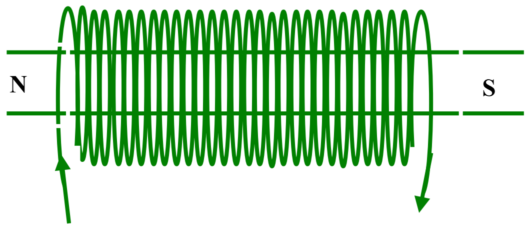
มนุษย์รู้จักอำนาจแม่เหล็กจากแม่เหล็กธรรมชาติซึ่งเป็นสารประกอบประเภทแมกเนไทต์ (Fe_3O_4) สามารถดูดเศษเหล็กได้ นำไปใช้ประโยชน์ในการบอกทิศ เพราะเมื่อให้แท่งเหล็กหมุนได้อย่างอิสระ มันจะวางตัวในแนวเหนือใต้ แท่งแม่เหล็กสามารถดูดเหล็กชิ้นเล็ก ๆ ขั้วแม่เหล็กชนิดเดียวกันจะผลักกัน ขั้วแม่เหล็กต่างชนิดกันจะดูดกัน

บทความออนไลน์

เข็มทิศ

เข็มทิศทำไมจึงชี้ไปทางทิศเหนือเสมอ และไปเกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กโลกได้อย่างไร ฟิสิกส์ราชมงคลจะตอบปัญหานี้ให้กับคุณ พร้อมกับแนะนำการสร้างเข็มทิศอย่างง่าย คลิกครับ

ค.ศ. 1819 ฮันส์ คริสเตียน เออร์สเตด (Hans Christian Oersted) พบว่าเมื่อนำเข็มทิศมาวางขนานกับเส้นลวดตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านจะทำให้เข็มของเข็มทิศเบนไปจากเดิม แสดงว่าเมื่อนำกระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวดทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ต่อมาเออร์สเตดได้ทำการทดลองเพื่อหาลักษณะของสนาม แม่เหล็กโดยนำเส้นลวดที่ยาวมากมาขดเป็นขดลวดโซเลนอยด์แล้วผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไป ปรากฏว่าเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นภายในแกนของขดลวดโซเลนอยด์ ดังรูป 5-1



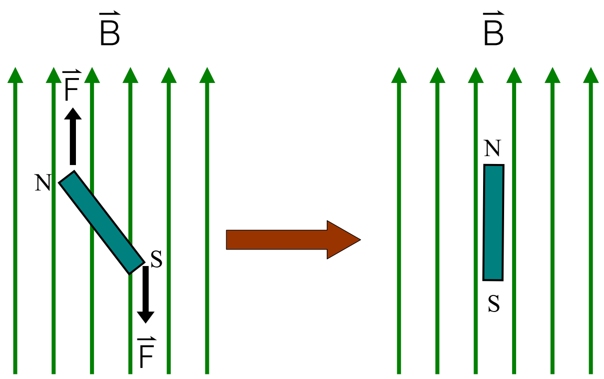
รูป 5-1 การทดลองของเออร์สเตด

สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายแม่เหล็กถาวร คือมีขั้วเหนือและขั้วใต้ ถ้านำแท่งแม่เหล็กถาวรเข้ามาใกล้ ๆ ก็จะเกิดแรงกระทำต่อแท่งแม่เหล็กนั้น เป็นที่เชื่อกันในปัจจุบันว่า ปรากฏการณ์ต่างๆ ของสนามแม่เหล็กนั้นเกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าทั้งสิ้น

แท่งแม่เหล็กหรือตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะมีอำนาจแม่เหล็กรอบๆ เรียกบริเวณที่แท่งแม่เหล็กหรือตัวนำสามารถแสดงอำนาจแม่เหล็กว่า **สนามแม่เหล็ก** (Magnetic Induction, $\overline{B}$) ซึ่งเป็นปริมาณที่บ่งบอกแรงกระทำบนประจุที่กำลังเคลื่อนที่ สนามแม่เหล็กเป็นปริมาณเวกเตอร์และ มีทิศพุ่งจากขั้วเหนือไปยังขั้วใต้

สนามแม่เหล็กสามารถใช้เส้นแรงแม่เหล็ก (Line of Induction) บอกทิศและขนาดของสนามแม่เหล็กได้ สนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็น เวเบอร์ต่อตารางเมตรหรือ เทสลา (Tesla) สนามแม่เหล็ก 1 เทสลา หมายถึงความเข้มของสนามที่ทำให้เกิดแรง 1 N บนประจุ 1 C ที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1 m/s ในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กที่มีค่าสูงสุดที่สร้างได้ในห้องปฏิบัติการประมาณ 10 w/m^2 สนามแม่เหล็กโลกมีค่าประมาณ 10^{-5} W/m^2 เท่านั้น

ถ้าเรานำแท่งแม่เหล็กถาวรไปวางไว้ในสนามแม่เหล็ก จะทำให้แม่เหล็กหมุนอยู่ในสนามแม่เหล็ก ดังรูป 5-2 ซึ่งแสดงว่ามีทอร์กกระทำกับแท่งแม่เหล็ก เป็นการบอกว่ามีสนามแม่เหล็ก โดยสนามแม่เหล็กมีทิศอยู่ในแนวเหนือใต้



รูป 5-2 การนำแท่งแม่เหล็กมาวางในสนามแม่เหล็ก

5-2 แรงแม่เหล็กกระทำต่อประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก

เมื่อวางประจุไฟฟ้า q ที่ตำแหน่งใด ๆ ในปริภูมิ ถ้ามีแรง $\overline{F}$ กระทำกับประจุนั้น กล่าวได้ว่า บริเวณนั้นมีสนามไฟฟ้า $\overline{E}$ แรงที่สนาม $\overline{E}$ กระทำกับประจุ q คือ

$$\overline{F} = q\overline{E} \qquad (5\text{-}1)$$

ถ้าประจุ q เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $\bar{v}$ ในบริเวณใด ๆ แล้วมีแรงภายนอกกระทำกับประจุ กล่าวได้ว่าบริเวณนั้นมีสนามแม่เหล็ก $\overline{B}$ พบว่าแรงที่สนามแม่เหล็กกระทำกับประจุนั้นทีทิศตั้งฉากกับความเร็ว และตั้งฉากกับทิศของสนามแม่เหล็กดังรูป 5-3 โดยแรงมีขนาดแปรตามขนาดของความเร็ว และขนาดของสนามแม่เหล็ก แรงแม่เหล็กที่กระทำบนประจุเขียนได้เป็น

$$\overline{F} = q\bar{v} \times \overline{B} \qquad (5\text{-}2)$$

โดยขนาดของแรงแม่เหล็กคือ $\qquad |F| = qvB\sin\theta$

F มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

v มีหน่วยเป็น เมตร/วินาที (m/s)

q มีหน่วยเป็น คูลอมบ์ (C)

B มีหน่วยเป็น นิวตัน/(คูลอมบ์-เมตร/วินาที) (N.s/C.m) หรือ กิโลกรัม/วินาที-คูลอมบ์ (kg/s.C) หรือ เทสลา (T)

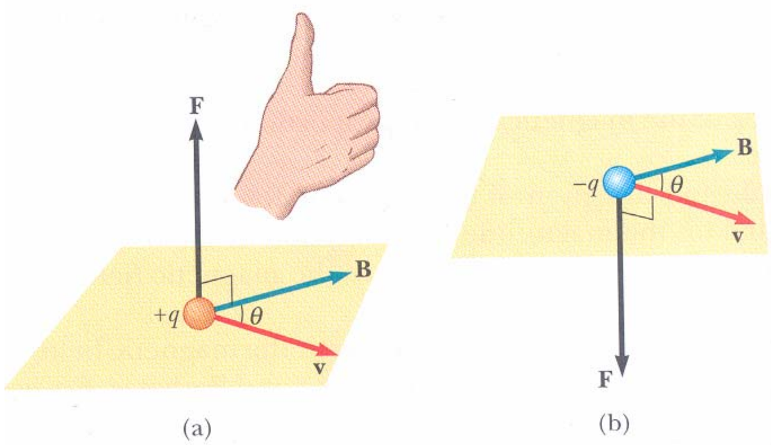
θ คือมุมระหว่าง v และ B

ถ้า θ เท่ากับ 0 องศา หรือ 180 องศา เป็นกรณีความเร็ว v มีทิศทางขนาน (หรือขนานตรงกันข้าม) กับทิศทางของ B ปรากฏว่าไม่เกิดแรงแม่เหล็ก

ถ้า θ เท่ากับ 90 องศา เป็นกรณีที่ v ตั้งฉากกับ B จะได้ขนาดของแรงแม่เหล็กเท่ากับ qvB

ถ้า θ เป็นมุมอื่นๆ ขนาดของแรงแม่เหล็กเท่ากับ $qvB\sin\theta$

พึงสังเกตว่า $B\sin\theta$ คือการฉาย ของ B ในทิศทางที่ตั้งฉากกับ v หรือ $v\sin\theta$ ก็คือ การฉายของ v บนแนวทิศทางที่ตั้งฉากกับ B



รูป 5-3 ทิศของแรงที่กระทำกับประจุในสนามแม่เหล็ก

จากสมการ 5-2 สามารถให้คำนิยามสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ ได้ โดยกำหนดให้ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ตั้งได้ฉากกับสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ จะได้

$$\overline{B} = \frac{\overline{F}}{qv}$$

ถ้าประจุเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่มีทั้งสนามไฟฟ้าและ สนามแม่เหล็ก แรงทั้งหมดจะเป็นผลรวมของแรงที่กระทำโดยสนามไฟฟ้าและแรงที่กระทำโดยสนามแม่เหล็ก

$$\overline{F} = q\overline{E} + (q\bar{v} \times \overline{B}) \qquad (5\text{-}3)$$

เรียกแรงนี้ว่า **แรงโลเร็นตซ์ (Lorentz force)**

ตัวอย่าง 5-1 โปรตอน 1 ตัวเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กโลกในแนวตั้งฉากกับทิศของสนามด้วยความเร็ว 10^7 m/s ความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกที่เส้นศูนย์สูตรประมาณ 10^9 T จงหาแรงที่กระทำบนโปรตอนโดยสนามนี้ และเปรียบเทียบกับขนาดของแรงโน้มถ่วง

หลักการคำนวณ

แรงแม่เหล็กที่กระทำบนโปรตอน $= qvB\sin\left(\frac{\pi}{2}\right)$

$= (1.6\times10^{-19})(10^{7})(10^{-5})$

$= 1.6\times10^{-17}$ N

แรงโน้มถ่วงบนโปรตอน $= mg$

$= (1.6\times10^{-27})(9.81)$

$= 1.6\times10^{-26}$ N

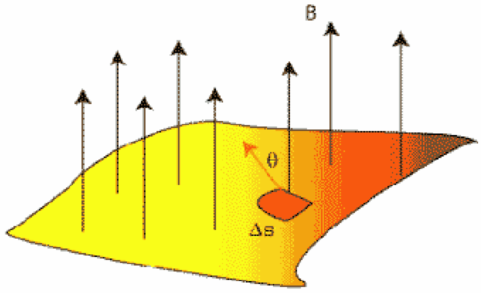
แรงแม่เหล็กมีค่าประมาณ 10^9 เท่าของแรงโน้มถ่วง

5-3 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กและความเข้มสนามแม่เหล็ก

เพื่อให้สามารถมองสภาพแม่เหล็กให้เป็นรูปธรรม จึงใช้เส้นแรงแม่เหล็กบอกขนาดและทิศของสนามแม่เหล็ก เส้นแรงแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กมีความสัมพันธ์กันดังนี้

1. เส้นสัมผัสกับเส้นแรงแม่เหล็กที่จุดใด จะเป็นทิศของสนามแม่เหล็กที่จุดนั้น
2. ขนาดของสนามแม่เหล็กเป็นสัดส่วนตรงกับจำนวนเส้นแรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่ตั้งฉากกับเส้นแรงนั้น

ฟลักซ์แม่เหล็ก คือจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งออกตั้งฉากกับพื้นผิว A ใดๆ



รูป 5-4 เส้นแรงแม่เหล็กพุ่งผ่านพื้นที่ที่กำหนดให้

ถ้าเปรียบเทียบระหว่างสนามแม่เหล็กสถิตกับสนามไฟฟ้าสถิต จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าสถิตเกิดจากประจุไฟฟ้าอยู่นิ่ง สนามแม่เหล็กสถิตเกิดจากประจุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ในไฟฟ้าสถิตได้กำหนดความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า $\overline{D}$ มีความสัมพันธ์กับความเข้มสนามไฟฟ้า $\overline{E}$ ตามสมการ

$$\overline{D} = \varepsilon\overline{E}$$

ในตัวกลางสุญญากาศ $$\overline{D} = \varepsilon_0\overline{E}$$

สำหรับสนามแม่เหล็กกำหนดความหนาแน่นฟลักซ์เป็น $\overline{B}$ และความเข้มสนามแม่เหล็กเป็น $\overline{H}$ ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\overline{B} = \mu\overline{H} \qquad (5\text{-}4)$$

ในตัวกลางสุญญากาศ $$\overline{B} = \mu_0\overline{H}$$

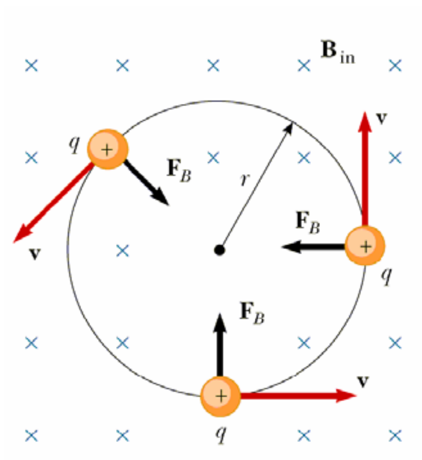
μ เป็นค่าคงตัวสำหรับตัวกลาง เรียกว่าสภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก (magnetic permeability) ของตัวกลาง

μ_0 เรียกว่าสภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก (magnetic permeability) ของสุญญากาศ

$$\mu_0 = 4\pi\times10^{-7} \text{ H/m}$$

5-4 การเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าในสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ

เมื่อประจุเคลื่อนที่เข้าไปในสนามแม่เหล็กด้วยความเร็วต้นตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก พบว่า ประจุจะเคลื่อนที่เป็นวงกลมในระนาบที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ดังรูป 5-5



รูป 5-5 ประจุบวกเคลื่อนที่เป็นวงกลมในสนามแม่เหล็ก

ประจุเคลื่อนที่เป็นวงกลม แรงแม่เหล็กที่กระทำบนประจุ จะต้องเท่ากับแรงเข้าสู่ศูนย์กลาง

$$qvB = \frac{mv^2}{R} \qquad (5\text{-}5)$$

หรือ

$$R = \frac{mv}{qB} \tag{5-6}$$

รัศมีเป็นสัดส่วนโดยตรงกับโมเมนตัม และเป็นสัดส่วนผกผันกับสนามแม่เหล็ก

ความถี่เชิงมุม

$$\omega = \frac{v}{R} = \frac{qB}{m} \tag{5-7}$$

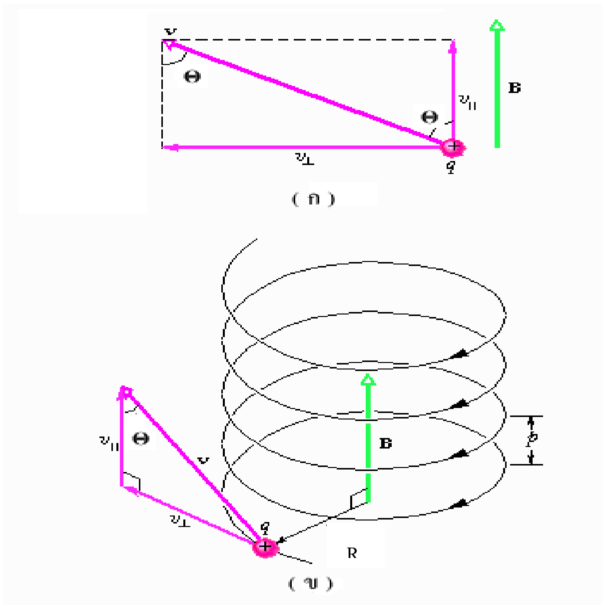
คาบของการหมุน

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{qB} \tag{5-8}$$

จากสมการ จะเห็นว่าความถี่เชิงมุม และ คาบไม่ขึ้นอยู่กับอัตราเร็ว และ รัศมีวงโคจร ความถี่ $\omega / 2\pi$ เรียกว่าความถี่ไซโคตรอน (cyclotron frequency)

เมื่อประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ทำมุม θ กับสนามแม่เหล็ก

เมื่อประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ทำมุม θ ใดๆ ที่ไม่เท่ากับ 90 องศา กับสนามแม่เหล็ก เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะเป็นเกลียวดังรูป 5-6



รูป 5-6 ประจุเคลื่อนที่เป็นเกลียวในสนามแม่เหล็ก เมื่อความเร็วของประจุทำมุมใด ๆ กับสนามแม่เหล็ก

การเคลื่อนที่เป็นเกลียวในสนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นในกรณีที่ทิศของความเร็วทำมุม θ ใด ๆ กับทิศของสนามแม่เหล็ก ความเร็วจะถูกแตกออกเป็นสองส่วน คือความเร็วย่อยในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะทำให้ประจุเคลื่อนที่เป็นวงกลม และความเร็วย่อยในแนวขนานกับสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะทำให้ประจุเคลื่อนที่ไปในทิศขนานกับสนามแม่เหล็ก ประจุจึงเคลื่อนที่เป็นเกลียว รัศมีของเกลียว R หาได้จาก

$$R = \frac{mv\sin\theta}{qB} \quad (5\text{-}9)$$

คาบของการเคลื่อนที่เป็นเกลียวครบ 1 รอบ หาได้จาก

$$T = \frac{2\pi R}{v}$$

$$= \frac{2\pi}{v\sin\theta}\left(\frac{mv\sin\theta}{qB}\right)$$

$$= \frac{2\pi m}{qB}$$

(5-10)

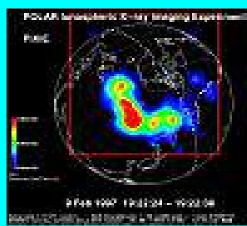
แสดงว่าคาบของการเคลื่อนที่ของอนุภาคดังกล่าวเป็นสัดส่วนผกผันกับสนามแม่เหล็ก

p เป็นระยะห่างระหว่างเกลียวหาได้จาก

$$p = (v\cos\theta)T$$

$$p = \frac{(v\cos\theta)(2\pi m)}{qB} \quad (5\text{-}11)$$

วีดีโอเพื่อการศึกษา



คลิกที่นี่เพื่อชมวีดีโอ แสงเหนือแสงใต้

ตัวอย่าง 5-2 อิเล็กตรอนตัวหนึ่งวิ่งด้วยความเร็ว 10^6 m/s เข้าไปในสนามแม่เหล็กคงที่ 10^{-3} T โดยทำมุม 53^o ต่อกัน

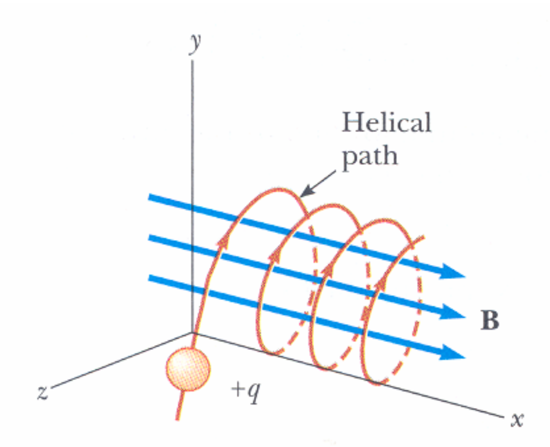
ก) จงอธิบายลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน

ข) หารัศมีการเคลื่อนที่

ค) หาระยะระหว่างเกลียว

หลักการคำนวณ

ก) เมื่ออิเล็กตรอนวิ่งเข้าสู่สนามแม่เหล็กโดยทำมุม 53^o ทางเดินจะเป็นเกลียวดังรูป 5-7

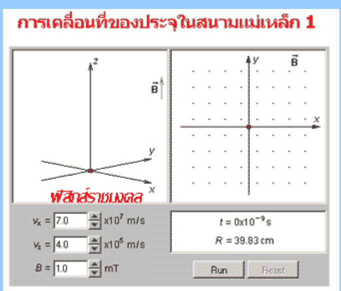


รูป 5-7 ประจุเคลื่อนที่เป็นเกลียวในสนามแม่เหล็ก เมื่อความเร็วของประจุทำมุม 53^o กับสนามแม่เหล็ก

ข)
$$R = \frac{mv\sin\theta}{qB}$$
$$= \frac{9\times10^{-31}\times10^{6}}{1.6\times10^{-19}\times10^{-3}}\times\frac{4}{5}$$
$$= 4.5\times10^{-3} \text{ m}$$

ค)
$$p = (v\cos\theta)T$$
$$= (v\cos 53^o)\left(\frac{2\pi m}{qB}\right)$$
$$= 10^{6}\times\frac{3}{5}\times2\times\frac{22}{7}\times\frac{9\times10^{-31}}{1.6\times10^{-19}\times10^{-3}}$$
$$= 2.12\times10^{-2} \text{ m}$$

การทดลองเสมือนจริง



ในห้องทดลองนี้แสดงการเคลื่อนที่ของประจุลบ ในสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางอยู่บนแกน $+Z$ และ $-Z$
กดที่นี่เพื่อเข้าสู่การทดลอง

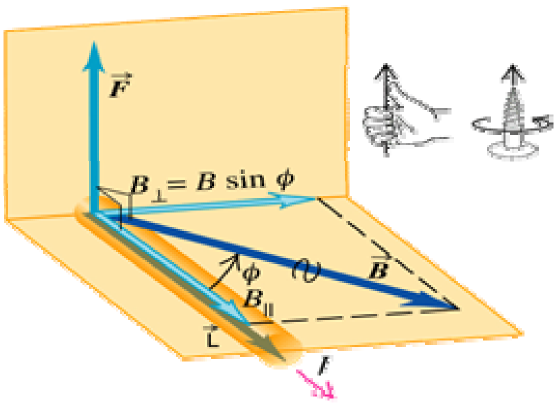
5-5 แรงแม่เหล็กกระทำบนลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้า

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำ แสดงว่าประจุไฟฟ้ามีการเคลื่อนที่ ดังนั้นสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงกระต่อประจุเหล่านี้ พิจารณาเส้นลวดยาว l มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน และวางอยู่ในสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ $\overline{B}$ ทำให้เกิดแรงแม่เหล็กกระทำต่ออิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่อยู่ในลวดตัวนำนั้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นคือ

$$\begin{aligned} \overline{F} &= q\vec{v} \times \overline{B} \\ &= q\left(\frac{\overline{l}}{t} \times \overline{B}\right) \\ &= IlB\sin\theta \end{aligned} \qquad (5\text{-}12)$$

โดยที่ θ คือมุมระหว่าง $\overline{l}$ (ทิศตามกระแส I) ทำกับสนามแม่เหล็ก $\overline{B}$

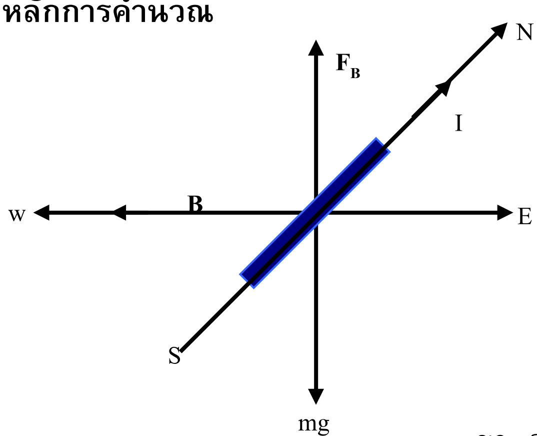
ทิศของแรงแม่เหล็กที่กระทำบนเส้นลวดตัวนำหาได้โดยใช้กฎมือขวา โดยให้นิ้วทั้งสี่มีทิศตามกระแสไฟฟ้า จากนั้นวนนิ้วทั้งสี่เข้าหาสนามแม่เหล็ก โดยที่มุม θ มีค่า $0^o < \theta \le 180^o$ นิ้วหัวแม่มือจะแสดงทิศแรงแม่เหล็กที่กระทำบนเส้นลวดตัวนำ



รูป 5-8 เส้นลวดตัวนำที่มีกระแสไหลผ่าน

ตัวอย่าง 5-3 เมื่อลวดตัวนำยาว 10 cm มวล 0.05 kg มาวางในแนวเหนือใต้ ซึ่งบริเวณนั้นมีสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอในแนวตะวันออกตะวันตก เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าขนาด 25 A เข้าไปในขดลวดตัวนำจากทิศใต้ไปทิศเหนือ ปรากฏว่าลวดตัวนำนี้สามารถลอยนิ่งอยู่ในสนามแม่เหล็ก จงหาขนาดและทิศทางของสนามแม่เหล็กนี้

หลักการคำนวณ



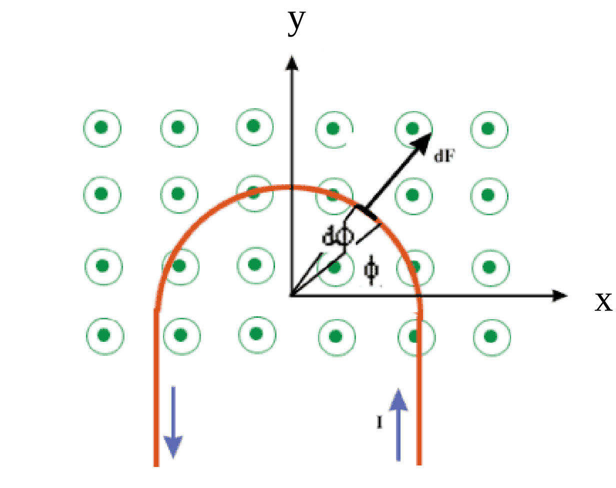
$$\begin{aligned} \sum F &= 0 \\ F_B &= mg \\ B &= \frac{mg}{Il} \\ &= \frac{0.05 \times 9.81}{25 \times 0.1} \\ &= 0.2 \text{ T} \end{aligned}$$

มีทิศจากตะวันออกไปตะวันตก

ตัวอย่าง 5-4 ลวดตัวนำรูปตัว U มีกระแส I ไหลผ่าน วางในแนวที่ระนาบของลวดตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ค่าสม่ำเสมอ B ดังรูป 5-9 ส่วนที่เป็นครึ่งวงกลมมีรัศมี R จงหาแรงแม่เหล็กที่กระทำบนลวดตรงส่วนที่เป็นครึ่งวงกลม

หลักการคำนวณ

สนามแม่เหล็กพุ่งออกจากกระดาษตั้งฉากกับทิศของกระแส Idl แรงบนส่วนย่อย ๆ ของขดลวดคือ dF มีทิศพุ่งออกในแนวรัศมี



รูป 5-9 ขดลวดรูปตัว U มีกระแสไหลผ่าน

แตกแรง dF ไปในแนวแกน x และ y จะได้

$$dF_x = dF\cos\phi = IBdl\cos\phi$$

$$dF_y = dF\sin\phi = IBdl\sin\phi$$

หาแรงทั้งหมดบนขดลวดครึ่งวงกลม ϕ แปรค่าตั้งแต่ 0 ถึง π ส่วนเล็ก ๆ $dl = Rd\phi$ จะได้

$$F_x = IRB\int_0^{\pi}\cos\phi d\phi$$

$$= IRB(\sin\pi - \sin 0)$$

$$= 0$$

$$F_y = IRB\int_0^{\pi}\sin\phi d\phi$$

$$= -IRB(\cos\pi - \cos 0)$$

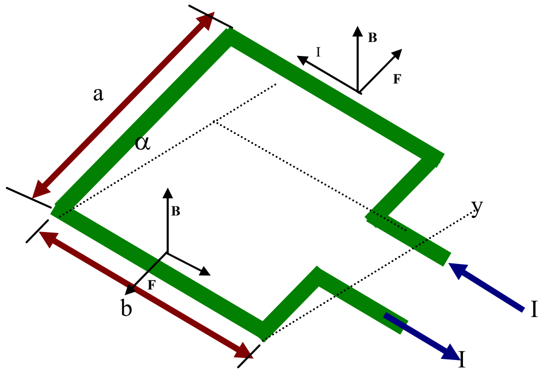
$$= 2IRB$$

แรงแม่เหล็กทั้งหมดที่กระทำบนลวดมีขนาด $\sqrt{F_x^2 + F_y^2} = 2IRB$ มีทิศตามแนวแกน y

5-6 ทอร์กบนโครงลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

ทอร์ก หรือโมเมนต์ เป็นผลหมุนหรือการหมุน แต่จะมีผลหมุนได้จะต้องมีแรงกระทำในลักษณะที่ทำให้เกิดการหมุน เราจึงควรพิจารณา ทอร์กของแรง โดยแรงที่กล่าวถึงคือแรงแม่เหล็ก

เมื่อขดลวดที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก ทอร์กที่กระทำต่อขดลวดสามารถทำให้ขดลวดหมุนรอบแกนอันหนึ่ง หลักการอันนี้เป็นพื้นฐานการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าและกัลวานอมิเตอร์



รูป 5-10 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโครงลวดตัวนำ

พิจารณารูป 5-10 โครงลวดตัวนำซึ่งกว้าง a ยาว b มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน และอยู่ในสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ ขนาดของแรงแม่เหล็ก คือ

$$F = IbB$$

ขนาดทอร์กแม่เหล็ก

$$\begin{aligned} \tau &= Fa\sin\alpha \\ &= IB(ab)\sin\alpha \\ &= IAB\sin\alpha \end{aligned}$$

เวกเตอร์ของทอร์กแม่เหล็ก

$$\vec{\tau} = I(\bar{A} \times \bar{B})$$

ถ้าใช้ขดลวด N รอบ

$$\vec{\tau} = IN(\bar{A} \times \bar{B})$$

ตัวอย่าง 5-5 ขดลวดสม่ำเสมอมี 225 รอบและมีพื้นที่ของระนาบขดลวดเท่ากับ 0.45 m^2 วางอยู่ในสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอขนาด 0.21 T ทอร์กสูงสุด (เนื่องจากสนามแม่เหล็ก) ที่กระทำต่อขดลวดมีค่าเท่ากับ 8.1×10^{-3} N.m

ก) จงหากระแสที่ไหลในขดลวด

ข) ถ้าทำขดลวด 225 รอบเป็นขดลวดเดียวที่มีรูปร่างเดิม เพียงแต่มีพื้นที่มากขึ้น ถามว่ากระแสเปลี่ยนแปลงหรือไม่

หลักการคำนวณ

ก) จาก $\tau = NIAB\sin\alpha$

ทอร์กสูงสุดเมื่อ $\sin\alpha = 1$

ดังนั้น $\tau = NIAB$

แทนค่า $8.1\times10^{-3} = 225\times I\times0.45\times0.21$

ได้ $I = 3.81\times10^{-4}$

ข) $A = 0.45\ \text{m}^2 = \pi r^2$ ได้ $r = 0.378$

หาความยาวทั้งหมด l ของขดลวด 225 รอบ จะได้

$$l = N(2\pi r)$$

$$= 225\times2\pi\times0.378 = 535\,\text{m}$$

หารัศมี r ของขดลวดที่มีเส้นรอบวง 535 m

$$2\pi r = 535$$

ได้ $r = 85.2\ \text{m}$

จาก

$$\tau = INAB$$

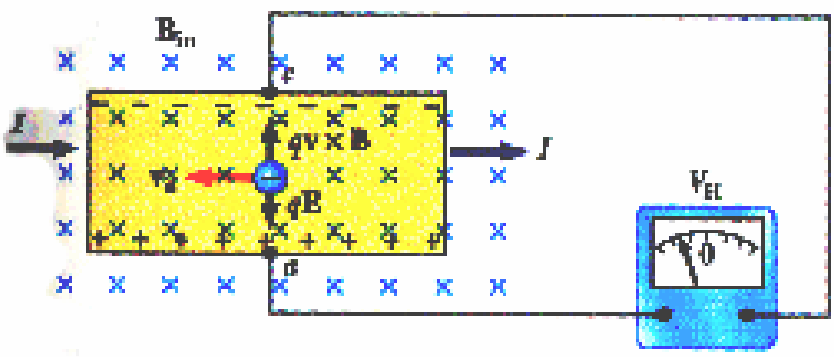
$$8.1\times10^{-3} = 1\times I\times\pi(85.2)^2\times0.21$$

$$I = 1.69\times10^{-6}$$

กระแสลดลงเป็นอัตราส่วนของจำนวนรอบของขดลวดเท่ากับ $1/225$

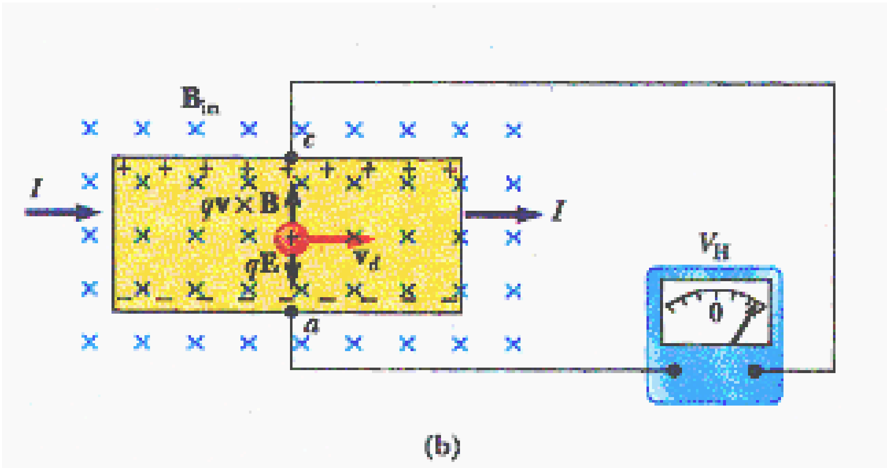
5-7 ปรากฏการณ์ฮอลล์

ฮอล์ล (Edwin Hall, 1879) ค้นพบว่าตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านที่ถูกวางในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กจะมีความต่างศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้นในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของกระแสและสนามแม่เหล็ก ทั้งนี้เป็นเพราะมีพาหะประจุเบนไปทางด้านหนึ่งของตัวนำ อันเป็นผลจากแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ปรากฏการณ์ฮอล์ล (Hall effect)” ปรากฏการณ์ฮอล์ลทำให้เราทราบว่าพาหะประจุที่ไหลในตัวนำเป็นบวก (โปรตอน) หรือลบ(อิเล็กตรอน) และยังสามารถหาค่าความหนาแน่นพาหะประจุได้



(ข)

พิจารณารูป 5-12 a กรณีพาหะเป็นประจุลบ แรงแม่เหล็ก $(q\vec{v}\times\vec{B})$ ที่เกิดขึ้น จะทำให้ประจุลบหรืออิเล็กตรอนเบนไปสะสมอยู่ที่ขอบบน และทำให้ขอบล่างของแผ่นตัวนำมีประจุบวกเกิน ในขณะที่เกิดการเบนของอิเล็กตรอน นั้น จะมีสนามไฟฟ้าสถิตเป็นผลตามมาอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งแรงไฟฟ้า $(q\vec{E})$ สมดุลกับแรงแม่เหล็กดังกล่าว อิเล็กตรอนก็จะไม่เบนอีกต่อไป เข็มของโวลต์มิเตอร์ที่คร่อม ac ไว้จะกระดิกไปด้านหนึ่งจึงอ่านค่าความต่างศักย์เป็นโวลต์ฮอลล์ (V_H)



รูป 5-12 ปรากฏการฮอลล์

พิจารณารูป 5-12 b กรณีพาหะเป็นประจุบวก แรงแม่เหล็ก ซึ่งกระทำกับประจุบวกก็ยังคงมีทิศทางขึ้นตามแกน z ดังกล่าว จึงทำให้ประจุบวกเบนขึ้นไปสะสมอยู่ที่ขอบบนของแผ่นตัวนำ ในขณะที่ขอบล่างมีประจุลบเกิน แล้วเกิดสนามไฟฟ้า มีแรงไฟฟ้า จนสมดุลกับแรงแม่เหล็กดังกล่าวนั้น เช่นเดียวกัน เข็มของโวลต์มิเตอร์ก็จะกระดิก แต่ไปคนละทางกับกรณีอิเล็กตรอน เราก็ทราบค่าความต่างศักย์เป็นโวลต์ฮอลล์ได้

เราจะพบว่าปรากฏการณ์ฮอล์ลเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นชั่วขณะกล่าวคือเมื่อถึงจุดหนึ่งแรงเนื่องจาก สนามไฟฟ้าเนื่องจากปรากฏการณ์ฮอล์ลจะมีค่าเท่ากับแรงแม่เหล็กทำให้พาหะประจุเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงผ่านไปไม่โค้งไปรวมกันอยู่ข้างบนหรือลงข้างล่างอีกดังนั้นเมื่อสมดุลแรงไฟฟ้าเท่ากับ แรงแม่เหล็ก

หรือ $$qE_H = qv_dB$$

ดังนั้น $$E_H = v_dB$$

ถ้าความกว้างของแถบตัวนำเป็น d จะได้

$$V_H = dE_H = v_dBd$$

แต่ความเร็วลอยเลื่อน $v_d = 1/nqA$ แทนค่าจะได้

$$V_H = \frac{IBd}{nqA}$$

สมมติแผ่นตัวนำมีความหนาเป็น t จะได้ $A = td$ ดังนั้น

$$V_H = \frac{IBd}{nqtd}$$

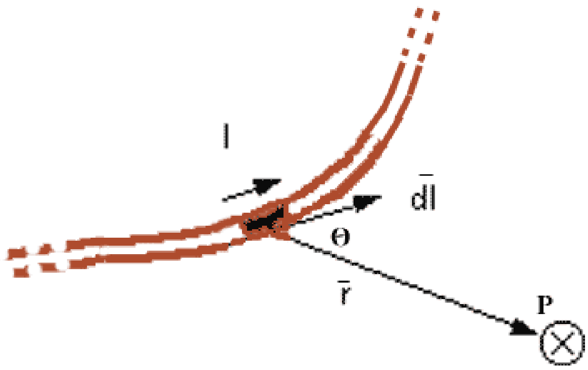
ให้ $R_H = 1/nq$ เป็นสัมประสิทธิ์ของฮอล์ลดังนั้น

$$V_H = R_H \frac{IB}{t} \qquad (5\text{-}13)$$

สมการ 5-13 เป็นสมการที่ใช้หาค่าของปริมาณต่างๆ ในปรากฏการณ์ฮอล์ล จะพบว่าหากสัมประสิทธิ์ของฮอล์ลมีค่าเป็นบวกพาหะประจุคือโปรตอนแต่ถ้าสัมประสิทธิ์ของฮอล์ลเป็นลบพาหะประจุจะเป็นอิเล็กตรอน

5-8 กฎของบิโอต์ ซาวาร์ต

หลังจากที่เออร์เสตดได้ทดลองนำเข็มทิศไปวางไว้ใกล้ ๆ ตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านพบว่าสนามแม่เหล็กจากลวดตัวนำทำให้เข็มทิศเบี่ยงเบนไปในแนวเหนือใต้ นักวิทยาศาสตร์อีกหลายคนได้ทดลองแบบเดียวกัน แต่ใช้ตัวนำที่มีลักษณะแตกต่างกันออกไป ผู้ที่สรุปผลการทดลองนำมาเขียนเป็นสมการที่สามารถใช้ในการคำนวณขนาดและทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากวงจรรูปใด ๆ คือ บิโอต์ และซาวาร์ต



รูป 5-13 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากตัวนำยาว dl กระแสไหล I

พิจารณาสนามแม่เหล็กที่เกิดจากตัวนำยาว l กระแสไหล I แบ่งเส้นลวดออกเป็นส่วนเล็ก ๆ ขนาด dl ซึ่ง dl เป็นปริมาณเวกเตอร์มีทิศเดียวกับทิศการไหลของกระแสไฟฟ้า สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไหลผ่านตัวนำ dl ที่จุด P มีค่าน้อย ๆ เท่ากับ dB ซึ่งมีทิศตั้งได้ฉากกับ dl เสมอ ขนาดของ dB จะเป็นสัดส่วนตรงกับขนาดของกระแส และแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างจุด p กับ dl ในที่นี้ให้เป็น r แปรผันตรงกับ $\sin\theta$ เมื่อ θ คือมุมระหว่าง dl กับ ทิศของ r เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} d\bar{B} &= \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Idl\sin\theta}{r^2} \\ &= \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Id\bar{l}}{r^2} \times \hat{r} \end{aligned} \qquad (5\text{-}14)$$

เมื่อ μ_0 คือค่าสภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็กของสุญญากาศ (permeability constant for vacuum)

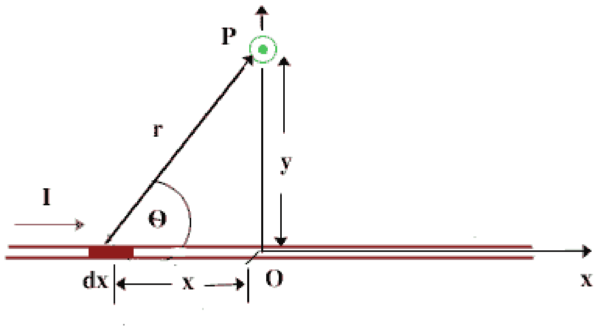
$\mu_0 / 4\pi = 10^{-7}$ T. m / A

กฎของบิโอต์-ซาวาร์ตมีส่วนคล้ายกับสูตรการหาสนามไฟฟ้าคือขนาดของสนามแม่เหล็กจะแปรผันกับ $1/r^2$ เช่นกัน กระแสไฟฟ้า $Id\bar{l}$ จะเป็นตัวให้กำเนิดสนามแม่เหล็ก ขณะที่ q เป็นแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้า สิ่งที่ต่างกันคือ $d\bar{E}$ จะมีทิศในแนว $\bar{r}$ ขณะที่ $d\bar{B}$ จะมีทิศตั้งฉากกับระนาบที่เกิดจาก $Id\bar{l}$ และ $\hat{r}$ ประจุสามารถมีประจุอิสระเป็นบวกหรือลบได้ แต่กระแสจะมีการไหลจากปลายหนึ่งไปยังอีกปลายหนึ่ง การหา $\bar{B}$ ต้องอินทิเกรตไปตามเส้นทางที่กระแสไหลผ่าน ดังนั้น กฎของบิโอต์-ซาวาร์ตของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำทั้งเส้น คือ

$$\bar{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\int_L \frac{Id\bar{l}}{r^2}\times\hat{r} \quad (5\text{-}15)$$

สนามแม่เหล็กเนื่องจากจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำ

ตัวอย่าง 5-6 จงหาขนาดของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากเส้นลวดตรงยาวอนันต์ ตรงตำแหน่ง y ใด ๆ เมื่อ y วัดจากเส้นลวดตัวนำในแนวตั้งฉาก



รูป 5-14 แสดงการหาสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแส I ในเส้นลวดตรงยาวอนันต์

หลักการคำนวณ

ให้เส้นลวดตัวนำมีกระแสไฟฟ้าไหลขนาด I วางอยู่ในแนวแกน x ตำแหน่งที่ต้องการหาสนามอยู่ห่างจากเส้นลวดเป็นระยะ y แบ่งเส้นลวดตัวนำออกเป็นส่วนเล็ก ๆ ขนาด dl ซึ่งในตัวอย่างนี้คือ $dl = dx$ นั่นเอง จุด p อยู่ห่างจากชิ้นส่วนของตัวนำเล็ก ๆ นี้เป็นระยะ r มุมระหว่าง r กับ dx คือ θ ทิศของ dB มีทิศพุ่งออกจากหน้ากระดาษ ดังรูป 5 -14

จากกฎของบิโอต์-ซาวาร์ต ความเข้มของสนามแม่เหล็กย่อยที่เกิดจากกระแสตัวนำในช่วง dx คือแทนค่า dx และ r ในเทอมของมุม θ โดยอาศัยจากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$-x = y\cot\theta$$

จะได้

$$dx = y\csc^2\theta$$

และ

$$r = y\csc\theta$$

แทนค่า r และ dx จะได้

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Iy\csc^2\theta d\theta}{(y\csc\theta)^2}$$

ต้องการหาสนามแม่เหล็กที่เกิดจากตัวนำทั้งเส้นที่จุด p

$$B = \mu_0 \frac{I}{4\pi y}\int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin\theta d\theta$$

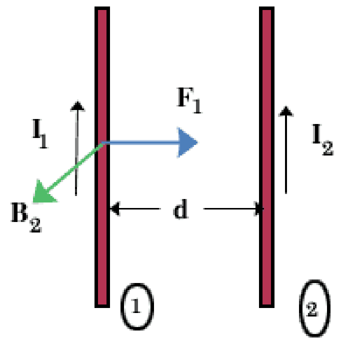
$$= \frac{\mu_0 I}{4\pi y}(\cos\theta)_{\theta_1}^{\theta_2}$$

$$= \frac{\mu_0 I}{4\pi y}(\cos\theta_1 - \cos\theta_2)$$

จะหา B ได้ถ้ารู้มุม $\theta_1,\ \theta_2$

พิจารณากรณีลวดตรงมีความยาวอนันต์ ในกรณีนี้ $\theta_1 = 0,\ \ \theta_2 = \pi$ ดังนั้น

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi}(\cos 0 - \cos\pi) = \frac{\mu_0 I}{2\pi y} \qquad (5\text{-}16)$$



รูป 5-15 ตัวนำ 2 เส้นยาวเส้นละ L วางห่างกันเป็นระยะ d

เมื่อนำเส้นลวดตัวนำสองเส้นยาวเส้นละ L วางห่างกันเป็นระยะ d มีกระแสไฟฟ้าไหล I_1 และ I_2 ตามลำดับโดยให้กระแสไหลไปในทิศเดียวกัน ดังรูป 5 -15

แรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ตัวนำเส้นที่ 1 อันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กของตัวนำเส้นที่ 2 หาได้จาก

$$F_1 = I_1 L B_2 \sin 90^o$$

แทนค่า B_2 จากสมการ 5-16 จะได้

$$F_1 = \frac{\mu_o L I_1 I_2}{2\pi d}$$

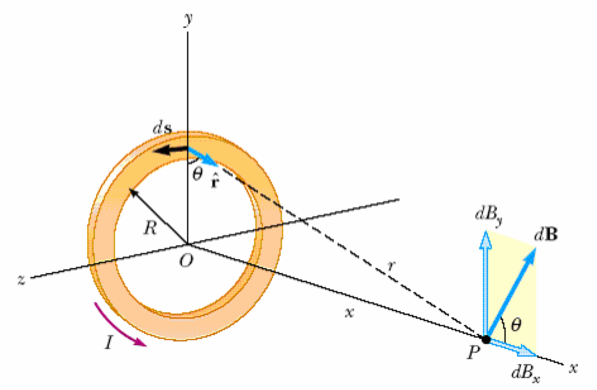
แรงแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยความยาว เขียนได้เป็น

$$\frac{F_1}{L} = \frac{\mu_o I_1 I_2}{2\pi d}$$

ทิศของ F_1 จะมีทิศพุ่งเข้าหา ตัวนำตัวที่ 2 (หาได้โดยใช้กฎมือขวา) ในทำนองเดียวกันทิศของ F_2 จะมีทิศไปทางด้านซ้ายมือ หรือมีทิศตรงกันข้ามกับ F_1 ดังนั้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากลวดตัวนำที่วางขนานกันมีกระแสไหลไปในทิศเดียวกันจึงเป็นแรงดึงดูด ถ้าให้ตัวนำทั้งสองมีกระแสไฟฟ้าไหลในทิศสวนทางกัน ทิศของแรงแม่เหล็กจะเป็นแรงผลักกัน

ตัวอย่าง 5-7 จงหาสนามแม่เหล็กเนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำวงกลมรัศมี R อยู่ในระนาบ yz และมีกระแสสม่ำเสมอ I ไหลผ่านดังรูป 5-16

หลักการคำนวณ



รูป 5-16 กระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำวงกลมรัศมี R

จากรูปจะได้ว่าทุกๆ $d\vec{s}$ ตั้งฉากกับ $\vec{r}$ และห่างจากจุด P เป็นระยะทาง r เท่ากัน โดย $r^2 = x^2 + R^2$ ขนาดของ $d\vec{B}$ เนื่องจาก $d\vec{s}$ คือ

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi}\frac{d\vec{s}}{r^2}\times\hat{r} = \frac{\mu_0 I}{4\pi}\frac{ds\sin 90^0}{r^2}$$

ทิศของ $d\vec{B}$ เนื่องจาก $d\vec{s}$ ตั้งฉากกับระนาบที่ประกอบด้วย $\vec{r}$ และ $d\vec{s}$ เวกเตอร์ $d\vec{B}$ สามารถแยกเป็น 2 ส่วนประกอบคือ dB_x, dB_y จากลักษณะสมมาตรพบว่า ส่วนประกอบที่ตั้งฉากกับแกน x เมื่อรวมตลอดทั้งวงกลม จะได้ผลลัพธ์เป็นศูนย์ ดังนั้นจึงเหลือแต่ส่วนประกอบตามแนวแกน x ขนาดของสนามรวมที่จุด P หาได้โดยการอินทิเกรต $dB_x (= dB\cos\theta)$ ทิศของ $\vec{B}$ ชี้ไปในทาง $+x$

$$B = \int dB_x = \int \cos\theta dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi}\int\frac{\cos\theta ds}{x^2+R^2}$$

เนื่องจาก θ, x, R คงที่ และเนื่องจาก $\cos\theta = \frac{R}{(x^2+R^2)^{1/2}}$ ดังนั้น

$$B = \frac{\mu_0 IR}{4\pi\left(x^2+R^2\right)^{3/2}}\int_0^{2\pi R} ds = \frac{\mu_0 IR^2}{2\left(x^2+R^2\right)^{3/2}} \qquad (5\text{-}17)$$

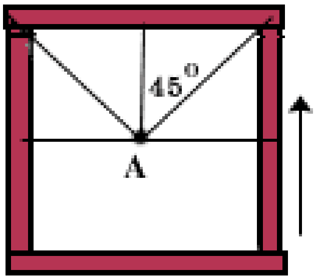
ที่จุดศูนย์กลางของวงกลม $(x=0)$ จะได้

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

ที่จุดไกลจากตัวนำวงกลมมากๆ หรือ $x >> R$ ตัดเทอม R^2 ทิ้งได้

$$B \approx \frac{\mu_0 IR^2}{2x^3}$$

ตัวอย่าง 5-8 ลวดตัวนำขดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสยาวด้านละ a มีกระแสไฟฟ้าไหลในทิศทวนเข็มนาฬิกา จงหาสนามแม่เหล็กที่จุดกึ่งกลางของขดลวด



รูป 5-17 ตัวนำรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสยาวด้านละ a

หลักการคำนวณ

จุด A เป็นจุดกึ่งกลางของสี่เหลี่ยมจัตุรัส สนามแม่เหล็กที่เกิดจากเส้นลวดตัวนำแต่ละเส้นหาได้จากสมการในตัวอย่าง 5-6

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi y}(\cos\theta_1 - \cos\theta_2)$$

ในที่นี้ $\theta_1 = 45^o$, $\theta_2 = 135^o$, $y = a/2$ ความเข้มของสนามแม่เหล็กของแต่ละเส้นที่จุด A จะมีค่าเท่ากันและมีทิศพุ่งออกจากกระดาษ ดังนั้นสนามแม่เหล็กที่จุด A จึงมีค่าเป็นสี่เท่าของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากลวดตัวนำด้านใดด้านหนึ่ง

$$B_A = \frac{4\mu_0 I}{4\pi(a/2)}(\cos 45^o - \cos 135^o)$$

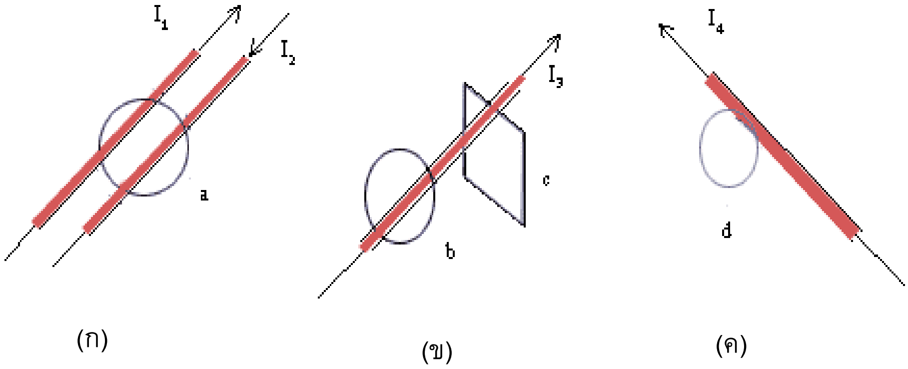
$$= \frac{2\sqrt{2}\mu_0 I}{\pi a}$$

5-9 กฎของแอมแปร์

กฎแอมแปร์เป็นกฎที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำ มีประโยชน์มากสำหรับคำนวณหาสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสสม่ำเสมอโดยที่การกระจายของกระแสมีลักษณะสมมาตร กฎนี้กล่าวว่า “อินทิกรัลเชิงเส้นของ B รอบเส้นปิดใด ๆ จะมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าตรงค่าสุทธิที่ถูกปิดล้อมโดยเส้นปิดนั้น”

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 I \qquad (5\text{-}18)$$

ตัวอย่างเส้นปิดที่ปิดล้อมตัวนำได้แสดงไว้ในรูป 5-18 อินทิกรัลเชิงเส้นของ $\vec{B}$ รอบเส้นปิด a มีค่าเท่ากับ $I_1 - I_2$ อินทิกรัลเชิงเส้นของ $\vec{B}$ รอบเส้นปิด b และ c มีค่าเท่ากับ I_3 และอินทิกรัลเชิงเส้นของ $\vec{B}$ รอบเส้นปิด d มีค่าน้อยกว่า I_4 เพราะเส้นปิดไม่ได้ปิดล้อมตัวนำทั้งหมด



รูป 5-18 แสดงเส้นปิดที่ล้อมรอบตัวนำในลักษณะต่างๆ

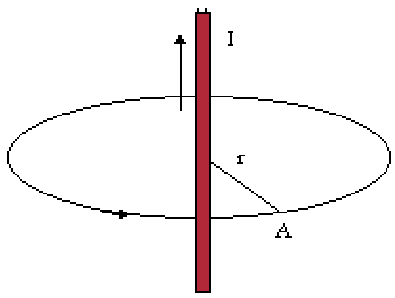
สิ่งที่จะต้องคำนึงถึงในการใช้กฎของแอมแปร์ คือ

1) กฎของแอมแปร์เทียบเท่ากับกฎของเกาส์ในเรื่องไฟฟ้าสถิต มีเงื่อนไขในการใช้ที่คล้ายกันคือ ต้องรู้ทิศทางของ $\overline{B}$
2) ผลลัพธ์การอินทิเกรตไม่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของเส้นปิด
3) สามารถเลือกรูปร่างของเส้นปิดได้ตามใจชอบ แต่ควรเป็นเส้นปิดที่มีลักษณะสมมาตร $\overline{B}$ กับ $d\overline{l}$ ควรทำมุม 0^{o} หรือ 90^{o} เพื่อหลีกเลี่ยงความยุ่งยากทางคณิตศาสตร์
4) ควรเลือกเส้นปิดที่ขนาดของ B บนเส้นทางที่มีค่าคงที่

ตัวอย่าง 5-9 จงใช้กฎของแอมแปร์หาสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านตัวนำเส้นตรงยาวอนันต์

หลักการคำนวณ

ต้องการหาสนามที่จุด A ซึ่งอยู่ห่างจากลวดตัวนำเป็นระยะ r เลือกเส้นปิดรูปวงกลม รัศมี r เพราะทราบว่าขนาดของ B มีค่าคงที่บนเส้นรอบวงนี้ ทิศของ $d\overline{l}$ และ $\overline{B}$ มีทิศเดียวกัน



รูป 5-19 การใช้กฎของแอมแปร์หา B ที่เกิดจากตัวนำตรงยาวอนันต์

$$\int_{\phi} \overline{B} d\overline{l} = \mu_0 I$$

มุมระหว่าง $\overline{B}$ กับ $d\overline{l}$ มีค่าเป็นศูนย์

$$B\int_{\phi} d\overline{l} \quad = \quad \mu_0 I$$

เพราะ $dl \;=\; rd\phi$

$$B_\phi \int_0^{2\pi} rd\phi \quad = \quad \mu_0 I$$

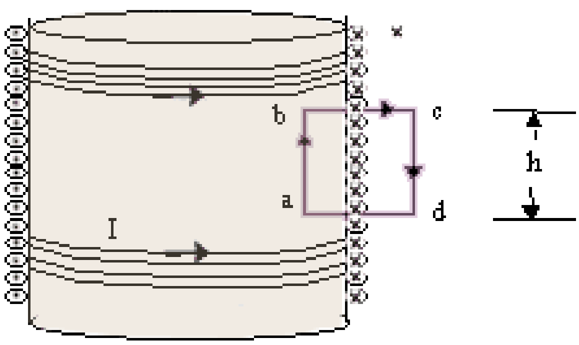
$$B_\phi \quad = \quad \mu_0 \frac{I}{2\pi r}$$

จะได้ขนาดของสนามแม่เหล็กเหมือนกับวิธีของบิโอต์-ซาวาร์ต ถ้ากลับทิศของกระแส I ในที่นี้ จะได้มุมระหว่าง $\overline{B}$ กับ $d\overline{l}$ เท่ากับ 180^o จะได้ขนาดของ B เป็นค่าลบ ซึ่งหมายถึงการอินทิเกรตเชิงเส้นกระทำในลักษณะที่สวนทิศกับสนามแม่เหล็ก

ตัวอย่าง 5-10 ขดลวดโซลินอยด์ยาว l รัศมี a จำนวนขดลวด N ขด มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ขดลวดเท่ากับ I ถ้า $l >> a$ จงใช้กฎของแอมแปร์หาขนาดของ $\overline{B}$ ภายในขดลวด

หลักการคำนวณ

ขดลวดโซลินอยด์ยาวมาก ๆ จะมีสนามแม่เหล็กเฉพาะภายในขดลวดเท่านั้น ทิศของสนามแม่เหล็กขนานกับแกนของขดลวด



รูป 5-20 การสร้างเส้นปิดปิดล้อมบางส่วนของขดลวด

เส้นปิดที่เหมาะสมสำหรับปัญหานี้คือ เส้นปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า $abcd$ กระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดของเส้นปิดคือ NhI/l

$$\oint \overline{B}d\overline{l} \quad = \quad \mu_0 \frac{NhI}{l}$$

$$\int_a^b \overline{B}d\overline{l} + \int_b^c \overline{B}d\overline{l} + \int_c^d \overline{B}d\overline{l} \quad = \quad \mu_0 \frac{NhI}{l}$$

ค่าอินทิกรัลเทอมที่ 2 และเทอมที่ 4 มีค่าเป็นศูนย์เพราะเส้นทางการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับทิศของ $\vec{B}$ เทอมที่ 3 มีค่าเป็นศูนย์เพราะสนามแม่เหล็กนอกขดลวดโซลินอยด์มีค่าเป็นศูนย์

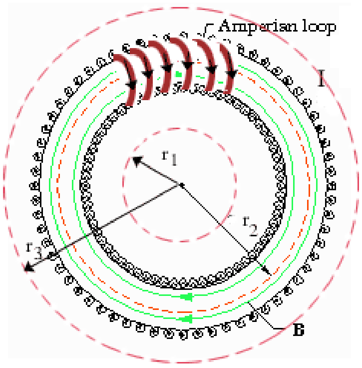
$$\int_a^b \vec{B}d\vec{l} = \mu_0 \frac{NhI}{l}$$

$$B = \mu_0 \frac{NI}{l}$$

ให้ n เป็นจำนวนรอบของขดลวดต่อหนึ่งหน่วยความยาว $= N/l$

$$B = \mu_0 NI$$

ตัวอย่าง 5-11 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดทอรอยด์ (Toriod) ที่มีจำนวนขดลวด n รอบมีกระแสไหลผ่าน I



รูป 5-21 แสดงเส้นปิดที่ระยะต่าง ๆ ของขดลวดทอรอยด์

หลักการคำนวณ

ก) หาสนามแม่เหล็กที่ระยะ r_1

$$\oint \vec{B}d\vec{l} = \mu_0 I$$

กระแสไฟฟ้าสุทธิภายในวงกลมรัศมี r_1 มีค่าเท่ากับ 0

ดังนั้น $$\left|\vec{B}\right| = 0$$

ข) หาสนามแม่เหล็กที่ระยะ r_2

ถ้าขดลวดมีจำนวน n รอบ กระแสไฟฟ้าสุทธิในเส้นปิด คือ $= nI$

$$\oint \vec{B}d\vec{l} = \mu_0 nI$$

$$B = \frac{\mu_0 nI}{2\pi r_2}$$

$\left|\vec{B}\right|$ ในขดลวดทอรอยด์จะไม่คงที่เพราะแปรผันตาม $1/r$

ค) หาสนามแม่เหล็กที่ระยะ r_3 ซึ่งเป็นระยะนอกขดลวดทอรอยด์ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดแต่ละรอบจะมีขนาดเท่ากัน ทิศตรงข้ามกัน กระแสไฟฟ้าสุทธิภายในวงกลมรัศมี r_3 จึงมีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือ $B = 0$

บรรยายลงในกระดาษฟิสิกส์ราชมงคล

ถ้าคุณอยู่ภายนอกบ้านยามค่ำคืน ที่บริเวณซีกโลกด้านเหนือหรือใต้ คุณจะได้เห็นแสงออรอรา หรือบางครั้งเรียกว่า ม่านปีศาจ ลักษณะของแสงเหมือนกับเป็นม่านที่พลิ้วลงมาจากท้องฟ้าหรือสรวงสวรรค์ แสงออรอราอยู่สูงจากพื้นประมาณ 100 กิโลเมตร และยาวหลายพันกิโลเมตร พาดเป็นทางโค้งอยู่บนท้องฟ้า แต่น่าแปลกใจที่ว่า มีความหนาเพียง 1 กิโลเมตร ทำไมแสงนี้จึงหนาเพียงนิดเดียว ? ให้นักศึกษาบรรยายว่าเกิดอะไรขึ้นลงในกระดาษฟิสิกส์ราชมงคล ถ้าไม่เข้าใจดูทฤษฎีก่อน คลิกครับ จากนั้นบรรยายลงใน กระดาษฟิสิกส์ราชมงคล

ทดสอบก่อนและหลังเรียน

วิธีทำ ให้ ใส่ชื่อ สกุล เลือกวิชาที่สอบ และจำนวนข้อ แต่ต้องไม่เกินจากที่กำหนดไว้ เช่น กำหนดไว้ 10 ข้อ เวลาเลือกจำนวนข้อ ให้เลือก 5 และ 10 ข้อไม่เกินจากนี้ เป็นต้นเมื่อทำเสร็จสามารถดูคะแนนจากรายละเอียดผู้ทำข้อสอบได้ทันที

เรื่องสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

คลิกเข้าสู่ การทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียนค่ะ

วีดีโอเพื่อการศึกษา

จากการค้นพบการลอยของแม่เหล็กในคริสตวรรษที่ 19 ทำให้นักประดิษฐ์สามารถสร้างรถไฟแม่เหล็กได้สำเร็จ รถไฟทั้งคันสามารถลอยอยู่บนรางได้โดยไม่สัมผัสกับราง จึงไม่มีแรงเสียดทานในการเคลื่อนที่ คลิกครับ

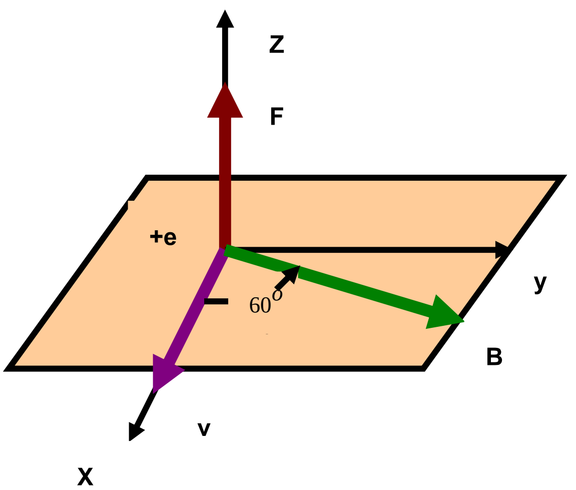
แบบฝึกหัดเรื่องสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

1. ลวดเส้นหนึ่งยาว 100 mm มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน 5 A วางไว้ในสนามแม่เหล็กแห่งหนึ่งปรากฏว่ามีแรงสูงสุดกระทำต่อเส้นลวดเส้นนั้นเท่ากับ 2×10^{-4} N จงคำนวณหาขนาดความเข้มของสนามแม่เหล็กดังกล่าว [ตอบ 4×10^{-4} T]

2. อิเล็กตรอนถูกยิงเข้าไปในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กความเข้ม 10 W/m^2 ด้วยความเร็ว 3×10^{7} m/s จงหาแรงที่เกิดกับอิเล็กตรอนนั้น และถ้าจะรักษาให้แนวทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเป็นแนวเส้นตรงต่อไป จะต้องใส่สนามไฟฟ้าความเข้มเท่าใดในทิศใด
   [ตอบ 4.8×10^{-11} N , 3×10^{8} ทิศของแรงแม่เหล็ก]

3. อิเล็กตรอนในหลอดโทรทัศน์มีพลังงาน 12 keV เคลื่อนที่จากทิศใต้ไปทิศเหนือ บริเวณนั้นมีสนามแม่เหล็กโลกในแนวดิ่ง (พุ่งลงดิน) 5.5×10^{-5} T จงหา
   ก) ทิศที่อิเล็กตรอนเบี่ยงเบนไป [ตอบทิศตะวันออก]
   ข) ความเร่งของอิเล็กตรอน [ตอบ 6.28×10^{4} m/s^2]
   ค) ระยะที่เบี่ยงเบนไป ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในหลอดได้ระยะทาง 20 cm
   [ตอบ ประมาณ 3 mm]

4. โปรตอนเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 8×10^{6} m/s ตามแนวแกน x เข้าไปในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กขนาด 2.5 T ในทิศทำมุม 60^o กับแกน x และอยู่ในระนาบ xy ดังรูป จงคำนวณหา
   ก) แรงที่กระทำต่อโปรตอน [ตอบ 2.8×10^{-12} N]
   ข) ความเร่งของโปรตอน [ตอบ 1.7×10^{-15} m/s^2]



5. อิเล็กตรอนและโปรตอนอย่างละ 1 ตัว เคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กที่มีค่าคงที่ จงเปรียบเทียบรัศมีและคาบของวงโคจร ถ้าเริ่มต้นอนุภาคทั้งสองมีพลังงานจลน์เท่ากัน กำหนดให้มวลของอิเล็กตรอน 9.11×10^{-31} kg มวลของโปรตอน = 1.67×10^{-27} kg
[ตอบ $R_p/R_e = 42.8$, $T_p/T_e = 1831$]

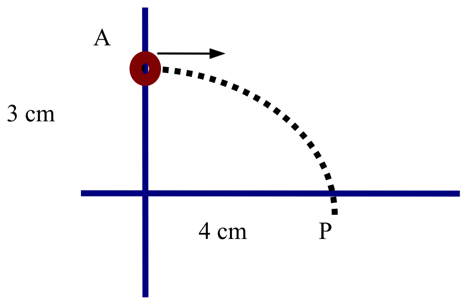
6. อิเล็กตรอนถูกเร่งจากจุดหยุดนิ่งผ่านความต่างศักย์ 3500 v และวิ่งเข้าไปในสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ T ซึ่งตั้งฉากกับความเร็วของอิเล็กตรอน จงคำนวณหาความเร็วและรัศมีของเส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ทั้งนี้กำหนดให้อิเล็กตรอนมีประจุเท่ากับ 1.6×10^{-19} C และมีมวล 9.1×10^{-31} kg [ตอบ 3.508×10^{7} m/s, $r = 20\,\mathrm{m}$]

7. ดิวเทอรอน มีมวล 2 U เคลื่อนที่เป็นวงกลมรัศมี 450 mm ในสนามแม่เหล็กที่มีความเข้ม 2.5 จงคำนวณหา ความเร็วของดิวเทอรอน ระยะเวลาเดินทางครบหนึ่งรอบ และ ความต่างศักย์ในการเร่งดิวเทอรอนให้มีความเร็วดังกล่าว [ตอบ 5.42×10^{7} m/s, 5.22×10^{-8} s, 30.5×10^{6} V]

8. โปรตอนตัวหนึ่งเคลื่อนที่เข้าไปในสนามแม่เหล็กขนาด 2.6×10^{-4} ในทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ปรากฏว่าเกิดความถี่ในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมเท่ากับ 4000 รอบต่อวินาที จงคำนวณหามวลของโปรตอน [ตอบ 1.66×10^{-27} kg]

9. สนามแม่เหล็กโลกที่เส้นศูนย์สูตรมีค่าประมาณ 7×10^{-5} T ในแนวขนานกับพื้นโลกชี้ไปทางทิศเหนือ
   ก) โปรตอนต้องมีความเร็วเท่าใด จึงจะทำให้โปรตอนโคจรรอบโลกได้พอดี (ไม่ต้องคิดแรงดึงดูดระหว่างมวล) [ตอบ 0.999978 เท่าของความเร็วแสง]
   ข) การตัดแรงดึงดูดระหว่างมวลทิ้งเหมาะสมหรือไม่

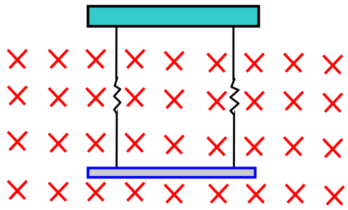
10. โปรตอนเคลื่อนที่จากจุด A จากซ้ายไปขวาด้วยความเร็ว $v = 5 \times 10^{6}$ m/s
   ก) จงหาขนาดสนามแม่เหล็กในทิศทางตั้งฉากกับความเร็ว ทำให้โปรตอนกระทบจุด P
   [ตอบ 1.25×10^{-4} T พุ่งออกจากกระดาษ]
   ข) จงหาความเร็วของโปรตอนขณะที่กระทบจุด P [ตอบ 5×10^{6} m/s]



11. ลวดเส้นหนึ่งยาว 1.0 m มีกระแสไหลผ่าน 10 A และทำมุม 30° กับสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีขนาด $1.5\ W/m^{2}$ จงหาขนาดและทิศทางของแรงที่เกิดขึ้นบนเส้นลวด [ตอบ 7.5 N]

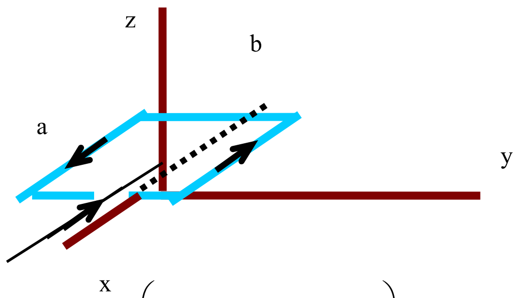
12. โปรตอนตัวหนึ่งถูกยิงเข้าไปในสนามแม่เหล็กแห่งหนึ่งด้วยความเร็ว $\vec{v} = 30\times10^5\hat{i} + 4\times10^5\hat{j}$ m/s และสนามแม่เหล็ก $\overline{B} = 0.03$ T จงคำนวณวงโคจรของโปรตอนและระยะเกลียว
[ตอบ 0.139 m, 0.655 m]

13. ลวดเส้นหนึ่งยาว 60 cm มีมวล 10 g ห้อยอยู่บนตัวนำที่ยืดหยุ่นได้มีสนามแม่เหล็ก 0.40 W / m ^{2} ผ่านในทิศดังรูป จงหาขนาดและทิศทางของกระแสที่จะทำให้แรงตึงในตัวนำเป็นศูนย์



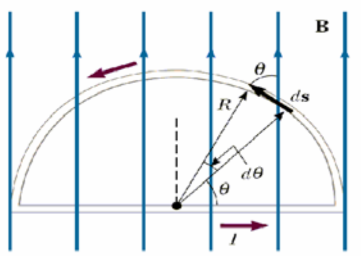
14. ลวดตัวนำตรง 2 เส้น มีกระแสไหล 5 A วางขนานกับแกน y ที่ตำแหน่ง x = 2 และ z = -2 m จงหาความเข้มสนามแม่เหล็กที่จุดกำเนิด [ตอบ $\frac{0.281}{\sqrt{2}}(\hat{i}+\hat{k})$ A / m]

15. ขดลวดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง a ยาว b วางอยู่ในระนาบ $z = 0$ มีกระแส I ไหลผ่าน จงหาสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดที่จุดใด ๆ บนแกน z



[ตอบ $B = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{ab}{\sqrt{z^2+\left(\frac{a^2+b^2}{4}\right)}}\times\left(\frac{1}{z^2+\frac{a^2}{4}}+\frac{1}{z^2+\frac{b^2}{4}}\right)$]

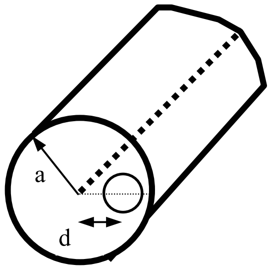
16. ขดลวดปิดรูปครึ่งวงกลมรัศมี R ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน โดยลวดวางอยู่ใน สนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ ดังรูป จงหาขนาดและทิศทางของแรงที่กระทำกับลวดส่วนที่เป็นเส้นตรง F_1 และส่วนที่เป็นเส้นโค้ง F_2 [ตอบ ขนาดของแรง $F_1 = 2IRB$, $F_2 = 2IRB$ มีทิศพุ่งออกตั้งฉากกับหน้ากระดาษและพุ่งเข้าตั้งฉากกับหน้ากระดาษ ตามลำดับ]



17. พื้นที่หน้าตัดของขดลวดโซลินอยด์เป็นรูปสี่เหลี่ยมจตุรัส จำนวน N รอบ ขดลวดมีความยาว L มีกระแสไหล I ถ้า $L >> a$ จงหาสนามแม่เหล็กที่จุดศูนย์กลางของโซลินอยด์

18. ทรงกระบอกตัน รัศมี a มีกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดอย่างสม่ำเสมอ จงใช้กฎของแอมแปร์แสดงว่าสนามแม่เหล็กที่จุดใด ๆ คือ $B = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{Ir}{a^2}$

19. ทรงกระบอกตัน รัศมี a ถูกเจาะให้เป็นท่อกลวง รัศมีของรูมีขนาด b จุดศูนย์กลางของรูที่เจาะอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของทรงกระบอกเป็นระยะ d โดย $d + b < a$ มีกระแสไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดทรงกระบอกอย่างสม่ำเสมอ

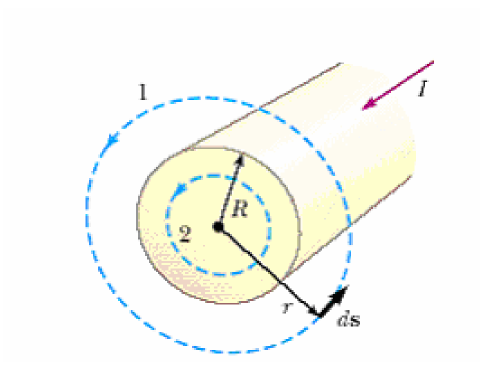


จงใช้กฎของแอมแปร์และหลักการของ Superposition หาขนาดสนามแม่เหล็กภายใน บริเวณรูปกลวง [ตอบ $\frac{Id}{2(\pi a^2 - \pi b^2)}$ A / m]

20. ลวดตัวนำรูปทรงกระบอกมีรัศมี R และยาวมาก มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำอย่างสม่ำเสมอเท่ากับ I_0 จงใช้กฎของแอมแปร์คำนวณหาสนามแม่เหล็กรอบลวดตัวนำโดยพิจารณาที่ตำแหน่งดังนี้

ก) ที่ตำแหน่งวัดในแนวรัศมี r ใดๆ เมื่อ $r < R$ [ตอบ $\frac{\mu_0 r I_0}{2\pi R^2}$]

ข) ที่ตำแหน่งวัดในแนวรัศมี r ใดๆ เมื่อ $r > R$ [ตอบ $\frac{\mu_0 I_0}{2\pi r}$]



หนังสืออิเล็กทรอนิกส์	
ฟิสิกส์ 1(ภาคกลศาสตร์(	ฟิสิกส์ 1 (ความร้อน)
ฟิสิกส์ 2	กลศาสตร์เวกเตอร์
โลหะวิทยาฟิสิกส์	เอกสารคำสอนฟิสิกส์ 1
ฟิสิกส์ 2 (บรรยาย(	แก้ปัญหาฟิสิกส์ด้วยภาษา c
ฟิสิกส์พิศวง	สอนฟิสิกส์ผ่านทางอินเตอร์เน็ต
ทดสอบออนไลน์	วีดีโอการเรียนการสอน
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	
การประดิษฐ์แขของโลก	ผู้ได้รับโนเบลสาขาฟิสิกส์
นักวิทยาศาสตร์เทศ	นักวิทยาศาสตร์ไทย
ดาราศาสตร์พิศวง	การทำงานของอุปกรณ์ทางฟิสิกส์
การทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ	

การเรียนการสอนฟิสิกส์ 1 ผ่านทางอินเตอร์เน็ต	
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
การเรียนการสอนฟิสิกส์ 2 ผ่านทางอินเตอร์เน็ต	
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
การเรียนการสอนฟิสิกส์ทั่วไป ผ่านทางอินเตอร์เน็ต	
1. จลศาสตร์)kinematic)	2. จลพลศาสตร์ (kinetics)
3. งานและโมเมนตัม	4. ซิมเปิลฮาร์โมนิก คลื่น และเสียง
5. ของไหลกับความร้อน	6.ไฟฟ้าสถิตกับกระแสไฟฟ้า
7. แม่เหล็กไฟฟ้า	8. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับแสง
9. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ อะตอม และนิวเคลียร์	

ฟิสิกส์ราชมงคล