الفصل الرابع

المغناطيسية الساكنة

مقدمة

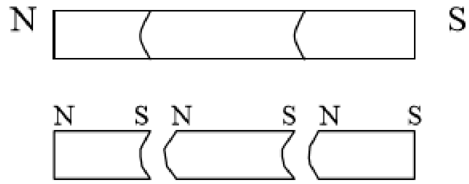
إن الظاهرة المغناطيسية اكتشفت منذ أمد بعيد حيث اكتشف علماء الاغريق الحجر المغناطيسي أو ما يسمى بالمغناطيس الطبيعي في مدينة مغنيسيا في آسيا صغرى و الذي كان يتميز بجذب القطع الصغيرة من الحديد الصلب إليه. ترجع دراسة الظاهرة المغناطيسية بصورة تجريبية إلى العالم أرستد Œrsted سنة 1820 حيث لاحظ أن مرور تيار كهربائي في سلك على مقربة من إبرة ممغنطة يجعلها تنحرف, مما يدل على أن هناك قوى مغناطيسية ناتجة عن التيار الكهربائي. أثبتت هذه التجربة أن سلكا يعبره تيار كهربائي يكتسب خصائص مغناطيسية مماثلة لتلك التي يتميز بها مغناطيس طبيعي. و أول دراسة للخواص المغناطيسية للمواد تمت بدلك قضيب من الحديد بقطعة من المغناطيس الطبيعي حيث اكتسب القضيب الخاصية المغناطيسية و سمي المغناطيس في هذه الحالة بالمغناطيس الصناعي الدائم.

اقتصرنا في الفصول السابقة على دراسة الشحنات الكهربائية الساكنة و الشحنات الكهربائية المتحركة. أما الفصل الاخير فسنتطرق إلى المغناطيسية الساكنة. المغناطيسية الساكنة، هي دراسة الحقول المغناطيسية في الحالة المستقرة، وهي الحالة التي يكون فيها الحقل المغناطيسي مستقلاً عن الزمن؛ أي الحالة التي تكون فيها قيمته وجهته في نقطة معينة ثابتتين، ولا تتعلقان إلا بموضع تلك النقطة.

1. خواص المغناطيس

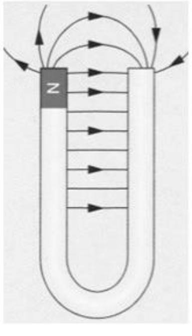
بشكل عام تتمتع المغانط الدائمة بمجموعة خواص نلخصها بما يلي:

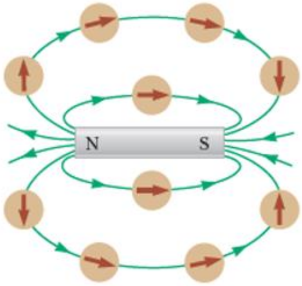
- يبقى لكل مغناطيس, مهما بالغنا في تجزئته قطبان الاول شمالي N (يتجه نحو القطب الشمالي للأرض) و آخر جنوبي S (يتجه نحو القطب الجنوبي للأرض)



- القطبان المتماثلان يتنافران و القطبان المختلفان يتجاذبان
- خطوط الحقل المغناطيسي خطوط مغلقة, و هي موجهة بحيث تخرج من القطب N و تدخل عبر S

نتمكن من مشاهدة أهداب أو خطوط الحقل بنشر برادة الحديد حول المغناطيس, نلاحظ خطوطا تشبه خطوط الحقل لثنائي القطب الكهربائي.





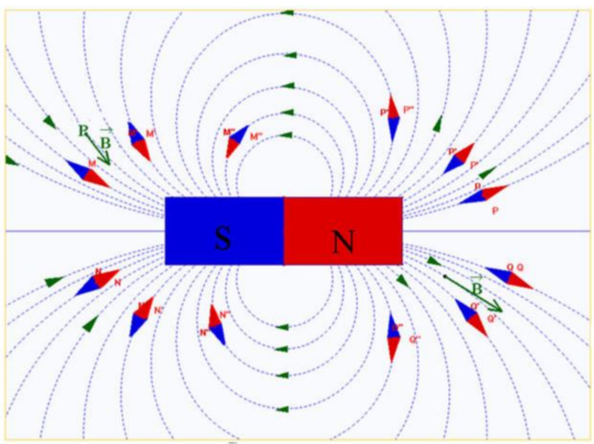
2. الحقل المغناطيسي

ينشأ الحقل المغناطيسي عن مغناطيس أو تيار كهربائي أو عن شحنات متحركة ، ويكون مستقراً في جوار المغناطيس الدائم أو التيار الكهربائي المستمر الذي يجري في ناقل، ويدعى بالحقل المغناطيسي الساكن. ويؤثر هذا الحقل المغناطيسي بقوى مغناطيسية في شحنات كهربائية متحركة ونواقل تجري فيها تيارات كهربائية، مثلما يؤثر الحقل الكهربائي الساكن في الشحنات الكهربائية.

إن الفضاء المحيط بالمغناطيس يتميز بحقل يدعى الحقل المغناطيسي يرمز له ب $\vec{B}$, اتجاهه هو الذي تؤشر عليه البوصلة, و هو مماسي في أي نقطة لخطوط الحقل المغناطيسي.

إن للحقل المغناطيسي شدة و حامل و جهة، حيث خصائصه في نقطة M من الفضاء هي:

- نقطة التطبيق: هي النقطة المعتبرة M .
- الحامل: هو حامل الإبرة المغناطيسية الموضوعة في تلك النقطة .
- الجهة: من جنوب الإبرة نحو شمالها .
- الشدة : تقاس بوحدة تسلا Tesla رمزها $T = Ns/Cm$



إذا أثرت عدة حقول مغناطيسية على شحنة كهربائية في حالة حركة أو على إبرة ممغنطة فإن الحقل المغناطيسي المكافئ $\vec{B}$ يساوي المجموع الشعاعي لكافة الحقول المؤثرة (مبدأ تراكب صالح):

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \cdots \ldots \ldots \ldots + \vec{B}_n$$

3. القوة المغناطيسية المؤثرة على شحنة كهربائية متحركة (قانون لورنتز)

في نهاية القرن التاسع عشر، أعطى الفيزيائي الهولندي هندريك لورنتز عبارة القوة $\vec{F}$ المطبقة على شحنة نقطية كهربائية q متحركة بسرعة $\vec{v}$ داخل حقل كهربائي $\vec{E}$ وحقل مغناطيسي $\vec{B}$ معا

$$\vec{F} = \vec{F}_C + \vec{F}_m = q\vec{E} + q.\vec{v} \wedge \vec{B} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

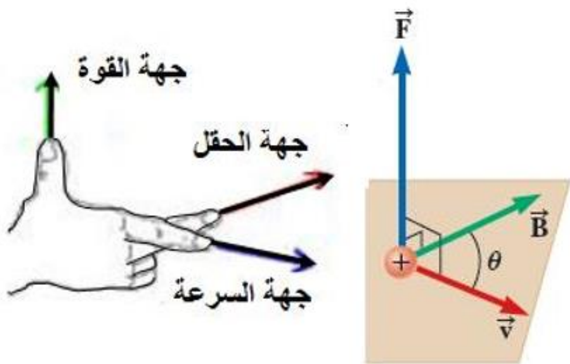
في حالة وجود حقل مغناطيسي فقط حيث $\vec{E} = \vec{0}$, فإن قوة لورنتز تصبح,(أنظر للشكل مقابل):

$$\vec{F} = \vec{F}_m = q(\vec{v} \wedge \vec{B})$$

حيث تعطى طويلة القوة في هذه الحالة:

$$F = qvB \sin(\vec{v}, \vec{B}) = qvB \sin\theta$$

- القوة المغناطيسية $\overrightarrow{F_m}$ متعامدة في آن واحد مع شعاع السرعة و شعاع المغناطيسي.
- لتعيين الاتجاه نطبق قاعدة اليد اليمنى.
- تبلغ القوة المغناطيسية قيمتها العظمى عند $\theta = \frac{\pi}{2}$, أي $F_m = qvB$



<u>مثال</u>

احسب F_m القوة المغناطيسية المؤثرة على بروتون شحنته $q = +e = 1.6 \times 10^{-19} C$ عند دخوله حقل مغناطيسي منتظم شدته $B = 2\,T$ بسرعة $v = 5 \times 10^6 m/s$ و ذلك من أجل زاوية $\widehat{(\vec{v};\vec{B})} = \theta = \frac{\pi}{6} rad$.

بفرض أن كتلة البروتون $m_e = 1.67 \times 10^{-27} Kg$, احسب قوة الجاذبية الارضية F_g المؤثرة عليه علما أن تسارع الجاذبية الارضية $g = 9{,}8\, m/s^2$ و قارنها مع القوة المغناطيسية.

<u>الاجابة</u>

نطبق العلاقة:

$$F_m = q.v.B \sin\theta = 1.6 \times 10^{-19} \times 5 \times 10^6 \times \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) = 8 \times 10^{-13}\, N$$

نحسب قوة الجاذبية الارضية F_g

$$F_g = m_e.g = 1.67 \times 10^{-27} \times 9.8 \approx 16.4 \times 10^{-27} N$$

نقارن القوتين :

$$\frac{F_m}{F_g} = \frac{8 \times 10^{-13}}{16.4 \times 10^{-27}} \approx 0.5 \times 10^{14} \Rightarrow F_m \gg F_g$$

نستنتج أن قوة الثقل F_g مهملة بالمقارنة مع القوة المغناطيسيةF_m

4. القوة المغناطيسية المؤثرة على تيار كهربائي

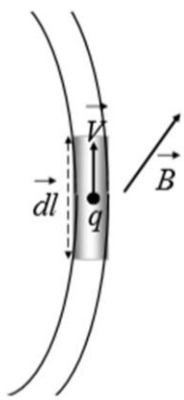
1.4قانون لابلاص

ليكن سلك ناقل، يجتازه تيار كهربائي I، في مجال مغناطيسي $\vec{B}$, فإن كل حجم عنصري dV للناقل طوله $\overrightarrow{dl}$ و مقطعه S

كل شحنة تخضع لقوة مغناطيسية مقدارها: $q.\vec{v}\wedge\vec{B}$
و منه n شحن تخضع للقوة مغناطيسية

$$\vec{f} = nq\vec{v}\wedge\vec{B}$$

نعلم أن كثافة التيار:



$$\vec{J} = nq\vec{v}$$

$$\vec{f} = nq\vec{v}\wedge\vec{B} = \vec{J}\wedge\vec{B}$$

و شدة التيار تساوي:

$$\vec{I} = S.\vec{J} = nqS\vec{v}$$

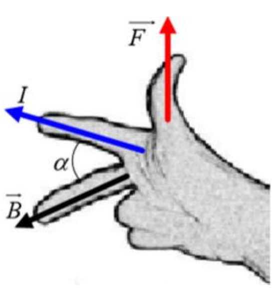
القوة الكلية المؤثرة على عنصر الطول:

$$\overrightarrow{dF} = \vec{f}.dV = \vec{f}.S.dl = S.dl.\vec{J}\wedge\vec{B} = I\overrightarrow{dl}\wedge\vec{B}$$

إذن القوة الكلية:

$$\vec{F} = I.\int_{\text{طول ناقل}} \overrightarrow{dl}\wedge\vec{B}$$

هذه القوة متعامدة على المستوى الذي يشكله المجال مغناطيسي $\vec{B}$ وعنصر $\overrightarrow{dl}$ من السلك



إذا كانت α الزاوية بين الناقل المستقيم و شعاع الحقل المغناطيسي فإن:

$$F = B.I.l.\sin\alpha$$

هذه العبارة هي قانون لا بلاص.

للحصول على الحامل و الاتجاه نستعمل قاعدة اليد اليمنى, يشير الابهام إلى اتجاه

و منحى التيار الكهربائي , و نمدد السبابة وفق منحى $\vec{B}$, في هذه الحالة

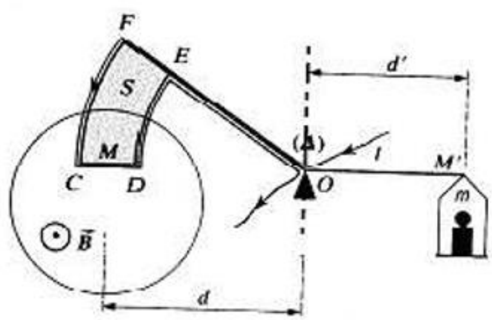
تشير الوسطى إلى $\vec{F}$ بعد تسريحها عموديا على المستوي المحدد من طرف الموصل و $\vec{B}$.

2.4. تطبيق (ميزان كوتون)

قبل وجود التسلامتر , كان ميزان كوتون يلعب دوره حيث كان يستعمل لقياس شدة الحقل المغناطيسي. يتكون هذا الميزان من ساقين. على طرف الأول, نعلق كفة يمكن أن نضع بها كتلا. الساق الثانية محاطة بسلك ناقل, جزء مستقيم من هذا الناقل CD

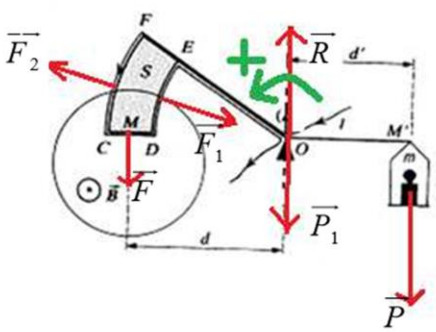
وضع عموديا على الحقل المغناطيسي المنتظم المراد قياس شدته. عندما لا يمر أي تيار بالسلك الناقل $(I = 0)$ و لا تكون أي كتلة على الكفة, يكون الميزان في حالة توازن

عندما نمرر تيارا كهربائيا في الناقل الامي وفي منحى ملائم, يختل التوازن تحت تأثير قوة لا بلاص. نعيد التوازن بإضافة كتل معلومة وزنها على الكفة و نضبط شدة التيار الكهربائي في الناقل.



1. مثل اتجاه الثقل $\vec{P}$ للكتل و قوة لا بلاص $\vec{F}$ المطبقة على الجزء المستقيم ذي الطول $CD = l$. أعط عبارة عزم كل منهما بالنسبة للمحورΔ .
2. بين أن عزم كل من قوى لا بلاص المطبقة على الضلعين ED و FD منعدم.
3. علما أن $l = 3\ cm$, $d = 10\ cm$ و $d' = 3\ cm$ و $g = 9{,}8\ m/s^2$, يعاد التوازن بوضع كتلة $m = 10\ g$ على الكفة و ضبط التيار على القيمة $I = 6{,}8\ A$. أحسب قيمة شدة الحقل المغناطيسي B.

الإجابة



1. عبارة عزم الثقل $\vec{P}$:

$$M_\Delta(\vec{P}) = -mgd'$$

عبارة عزم قوة لا بلاص المطبقة على الجزء المستقيم CD :

$$\vec{F} = I\overrightarrow{CD} \wedge \vec{B} \Rightarrow F = I.CD.B$$

$$M_\Delta(\vec{F}) = +I.CD.B \times \left(d - \frac{CD}{2}\right)$$

2. $\vec{F}_1$ و $\vec{F}_2$ تمثلان على التوالي قوى لا بلاص المطبقتين على الضلعين الدائريين ED و FC .

اتجاه كل منهما يتقاطع مع محور الدوران بالنقطة O. نستنتج أن $M_\Delta(\vec{F}_1) = M_\Delta(\vec{F}_2) = 0$

3. عندما يكون الميزان في حالة توازن, مجموع عزوم القوى المطبقة عليه بالنسبة للمحورΔ منعدم:

$$\sum M_\Delta(\vec{F}) = 0$$

$$M_\Delta(\vec{P}) + M_\Delta(\vec{F}) + M_\Delta(\overrightarrow{F_1}) + M_\Delta(\overrightarrow{F_2}) + M_\Delta(\overrightarrow{P_1}) + M_\Delta(\vec{R}) = 0$$

حيث $\overrightarrow{P_1}$ ثقل الميزان في غياب الكتلة m

اتجاه كل من $\overrightarrow{P_1}$ و $\vec{R}$ يتقاطع مع المحور Δ إذن

$$M_\Delta(\overrightarrow{P_1}) + M_\Delta(\vec{R}) = 0$$

نستنتج:

$$M_\Delta(\vec{P}) + M_\Delta(\vec{F}) = 0 \Rightarrow -mgd' + I.CD.B\left(d - \frac{CD}{2}\right) = 0$$

$$\Rightarrow B = \frac{mgd'}{I.CD\left(d - \frac{CD}{2}\right)}$$

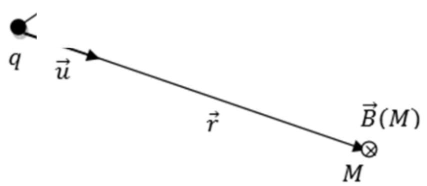
تطبيق عددي:

$$\frac{{}^3 \times 9.8 \times 10.10^{-2}}{0^{-2} \times (10 - 1.5)10^{-2}} \Rightarrow B = 1.1T$$

5. الحقل المغناطيسي الناتج عن مجموعة من الشحنات النقطية المتحركة

الحقل المغناطيسي الناتج عن شحنة نقطية q تتحرك بسرعة $\vec{v}$ في النقطة

M يعطى بالعلاقة التالية:



$$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{q\vec{v} \times \vec{u}}{r^2}$$

حيث الثابت μ_0 النفاذية المغناطيسية في الفراغ

يساوي: $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}\ T.m.A^{-1}$

ليكن لدينا N شحنة نقطية q_i تتحرك بسرعة $\vec{v}_i$, بتطبيق مبدأ التراكب, يكون الحقل المغناطيسي الناتج في النقطة M نتيجة لهذه الشحن هو المجموع الشعاعي للحقول:

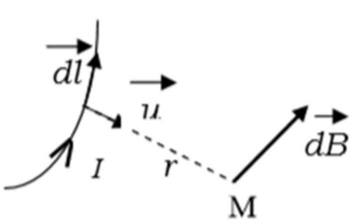
$$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi}\sum_{i=1}^{N}\frac{q_i\vec{v}_i \times \vec{u}_i}{r_i^2}$$

6. الحقل المغناطيسي الناتج عن تيار كهربائي

1.6 قانون بايوت و سافارت

في عام 1820 وضع بايوت و سافارت قانونا لا يجاد شدة الحقل المغناطيسي عند نقطة ما في محيط ناقل يحمل تيارا مستمر.

ليكن لدينا عنصر طول من الدارة dl متميز بالمتجه $\vec{dl}$, يولد هذا العنصر في نقطة M حقلا مغناطيسيا عنصريا $\overrightarrow{dB}$ يعطى بقانون بايوت و سافارت:

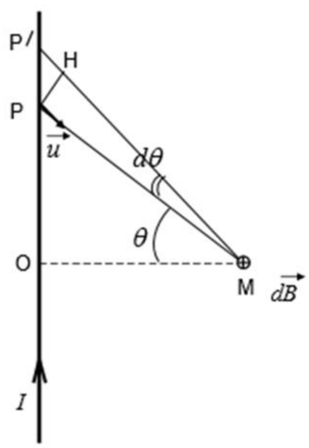


$$d\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Id\vec{l} \times \vec{u}}{r^2}$$

و يعطى الحقل الكلي $\vec{B}$ في النقطة M الناشئ عن كل الدارة:

$$\vec{B}(M) = \int d\vec{B}\,(M) = \frac{\mu_0}{4\pi}\int \frac{Id\vec{l} \times \vec{u}}{r^2}$$

2.6. الحقل المغناطيسي الناتج عن تيار مستقيم لا متناهي الطول



يمثل الشكل المقابل سلكا لا متناهي الطول, يجتازه تيار كهربائي شدته I .

نريد تعيين عبارة الحقل المغناطيسي الناتج عن كل السلك في النقطة M الواقعة على المحور Oy.

الحقل المغناطيسي $d\vec{B}$, الناتج عن الجزء العنصري $PP' = dl$ للسلك في النقطة M يعطى بالعبارة:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\,dl \wedge \vec{u}}{r^2}$$

حيث: $r = PM$

هذا الحقل متعامد في النقطة M على المستوى الذي يشكله $\vec{u}$ وعنصر $\vec{dl}$ من السلك. اتجاهه يعطى بقاعدة اليد اليمنى , أما شدته فهي:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\,dl\cos\theta}{r^2}$$

من خلال الشكل لدينا:

$$r = \frac{a}{\cos\theta}; \qquad PH = r\,d\theta$$

$$\Rightarrow dl = \frac{r\,d\theta}{\cos\theta}$$

إذن:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I}{a}\cos\theta\,d\theta$$

$$B = \frac{\mu_0\,I}{4\pi\,a}\int_{-\pi/2}^{+\pi/2}\cos\theta\,d\theta \;\Rightarrow B = \frac{\mu_0\,I}{2\pi\,a}$$