الدرس الثاني : فعل الحقل المغناطيسي في التيار الكهربائي

➢ القوة المغناطيسية (قوة لورنز)

سؤال نظري في تجربة قمت بدراسة تأثير الحقل المغناطيسي على حزمة إلكترونية متحركة كما في تجربة الأشعة المهبطية :

1. ما شكل مسار الحزمة الالكترونية ، وهل يبقى مسارها على حاله عند تقريب أحد قطبي مغناطيس مستقيم منها ؟
2. ماذا تستنتج من التجربة ؟
3. أكتب العوامل المؤثرة في شدة القوة المغناطيسية ؟

الحل :

1. شكل مسار الحزمة الإلكترونية : مستقيم
عند تقريب أحد قطبي مغناطيس مستقيم يتغير مسار الحزمة الالكترونية أي تنحرف عن مسارها المستقيم .
2. نستنتج من التجربة أن الحقل المغناطيسي يؤثر في الجسيمات المشحونة المتحركة ضمنه بقوة مغناطيسية تعمل على تغيير مسارحركة الجسيمات المشحونة ، ويتم تغيير جهة انحراف المسار بتغيير جهة الحقل المغناطيسي المؤثر.
3. شدة القوة المغناطيسية **تتناسب طرداً** مع :
q : مقدار الشحنة بالقيمة المطلقة وواحدتها الكولوم
v : سرعة الشحنة المتحركة وواحدتها متر في الثانية
B : شدة الحقل المغناطيسي وواحدته التسلا
$sin\theta$: حيث θ هي الزاوية بين شعاع سرعة الشحنة وشعاع الحقل المغناطيسي $\theta = (\widehat{\vec{v},\vec{B}})$

$$\boldsymbol{F_{\text{لورنز}} = q\,v\,B\,sin\theta}$$

سؤال نظري : أكتب العبارة الشعاعية للقوة المغناطيسية ؟ وحدد بالكتابة والرسم عناصر شعاع القوة المغناطيسية ، ثم بيّن متى تكون شدة القوة (عظمى - معدومة) (دورة 2021)

✓ **العبارة الشعاعية للقوة المغناطيسية :** $\boxed{\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}}$

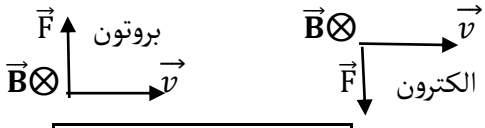
✓ **عناصر شعاع القوة المغناطيسية :**

❖ **نقطة التأثير:** الشحنة المتحركة.

❖ **الحامل**: عمودي على المستوي المحدد بشعاع السرعة وشعاع الحقل المغناطيسي .

❖ **الجهة**: حسب قاعدة اليد اليمنى : $(q\vec{v}, \vec{B}, \vec{F})$ تحقق ثلاثية مباشرة

- نجعل اليد اليمنى موازية لشعاع سرعة الشحنة المتحركة
- الأصابع بجهة $\vec{v}$ إذا كانت الشحنة موجبة وبعكس جهة $\vec{v}$ إذا كانت الشحنة سالبة
- يخرج شعاع الحقل المغناطيسي من راحة الكف
- فيشير الابهام إلى جهة $\vec{F}$ القوة المغناطيسية.



❖ **الشدة:** $\boxed{F_{\text{مغناطيسية}} = q\,v\,B\,sin\theta}$

✓ **تكون شدة القوة المغناطيسية (قوة لورنز):**

عظمى: $\vec{q} \perp \vec{B}$ او $\theta = \frac{\pi}{2} rad$ **معدومة:** $\vec{q} // \vec{B}$ او $\theta = 0$

سؤال نظري: في تجربة يدخل الكترون بسرعة $\vec{v}$ إلى منطقة يسودها حقل مغناطيسي منتظم $\vec{B}$ ناظمي على شعاع السرعة $\vec{v}$ فيصبح مسار الالكترون دائري في منطقة الحقل ، **المطلوب :**

1. برهن أن حركة الإلكترون ضمن منطقة الحقل المغناطيسي المنتظم دائرية منتظمة ؟
2. استنتج نصف قطر المسار الدائري لحركة الإلكترون ؟
3. استنتج دور حركة هذا الإلكترون ؟
4. ماذا تتوقع أن تكون حركة الإلكترون بعد خروجه من منطقة الحقل $\vec{B}$ ؟
5. كيف يكون شكل مسار الالكترون إذا دخل بسرعة $\vec{v}$ توازي $\vec{B}$

1. الجملة المدروسة: الإلكترون يتحرك سرعته $\vec{v} \perp \vec{B}$

القوى الخارجية المؤثرة: المغناطيسية $\vec{F} = e\vec{v} \wedge \vec{B}$

يهمل ثقل الإلكترون W_e لصغره امام قوة لورنز

المغناطيسية $\vec{F} = m_e.\vec{a}$ ⇨ $\sum \vec{F} = m.\vec{a}$

$$e\vec{v} \wedge \vec{B} = m_e.\vec{a} \Rightarrow \boxed{\vec{a} = \frac{e\vec{v} \wedge \vec{B}}{m_e}}$$

من خواص الجداء الشعاعي نجد أن $\vec{a} \perp \vec{v}$

$\vec{a}$ تسارع ناظمي (جاذب مركزي) أي **أن الحركة دائرية منتظمة**

2. استنتاج نصف قطر المسار الدائري لحركة الإلكترون

القوة الجاذبة المركزية $F = F_c$ المغناطيسية

المغناطيسية $\vec{F} = m_e.\vec{a}$ ⇨ $\sum \vec{F} = m.\vec{a}$

$$e\ v\ B\ sin\theta = m_e.a_c$$

التسارع الناظمي $a_c = \frac{v^2}{r}$ ، $sin\theta = Sin\frac{\pi}{2} = 1$

$$\Rightarrow e.v.B = m_e\frac{v^2}{r} \xrightarrow{\text{نختصر}} \Rightarrow e.B = m_e\frac{v}{r} \xrightarrow{\text{نعزل } r}$$

علاقة نصف قطر المسار الدائري الذي يسلكه الإلكترون ضمن منطقة الحقل المغناطيسي : $\boxed{r = \frac{m_e v}{eB}}$

3. استنتاج دور حركة الإلكترون: من العلاقة :

$$T_{\text{الدور}} = \frac{2\pi}{\omega_{\text{السرعة الزاوية}}}$$

ولكن : $v = \omega.r \Rightarrow \omega = \frac{v}{r} \xrightarrow{\text{نعوض في علاقة الدور}} T = \frac{2\pi}{\frac{v}{r}}$

علاقة الدور : $\boxed{T = \frac{2\pi r}{v}}$

4. تصبح حركة الإلكترون مستقيمة منتظمة لأن : بعد خروج الإلكترون من منطقة الحقل يكون $B = 0 \Rightarrow F_{\text{مغناطيسية}} = 0$

أي أن : $F_{\text{مغناطيسية}} = m.a = 0 \Rightarrow a = 0$

تسارع الإلكترون معدوم أي حركته عندئذ مستقيمة منتظمة .

5. .....

سؤال نظري في تجربة هلمهولتز لدينا ملفين دائريين متوازيين لهما المحور نفسه ، نمرر فيهما تيارين متساويين وبنفس الجهة **والمطلوب :**

1. ماذا تلاحظ عند إمرار التيارين في الملفين ؟
2. عند تمرير حزمة الكترونية مستقيمة مسرّعة ناظمية على شعاع الحقل المغناطيسي بين الملفين ماذا تلاحظ معللاً إجابتك ؟

الحل :

1. بتولد حقل مغناطيسي منتظم $\vec{B}$ بين الملفين.
2. نلاحظ أن الحزمة الإلكترونية انحرفت عن مسارها المستقيم ليصبح مسارها دائري . لأن الحقل المغناطيسي يؤثر في الحزمة الإلكترونية بقوة مغناطيسية تكون دائماً عمودية على شعاع سرعتها أي أنها تكتسب تسارع ثابت يعامد شعاع السرعة $\vec{v}$ وبالتالي تكون حركتها دائرية منتظمة لأنها خضعت لتسارع جاذب مركزي أي حدث تغيير في حامل وجهة شعاع سرعة الحزمة لا في قيمته .

المسألة 14 عامة

نخضع إلكترونا يتحرك بسرعة $8 \times 10^3\ km.s^{-1}$ إلى تأثير حقل مغناطيسي منتظم **ناظمي** على شعاع سرعته شدته $B = 5 \times 10^{-3}T$ ، **المطلوب:**

1. وازن بالحساب بين شدة ثقل الإلكترون وشدة القوة المغناطيسية المؤثرة فيه، ماذا تستنتج.
2. برهن أن حركة الإلكترون ضمن المنطقة التي يسودها الحقل المغناطيسي هي حركة دائرية منتظمة ثم استنتج العلاقة المحددة لنصف القطر المسار الدائري واحسب قيمته.
3. احسب دور الحركة.

علماً أن : $(e = 1.6 \times 10^{-19}\ , m_e = 9 \times 10^{-31}kg)$

الاجوبة : $(1)\ w_e \ll F_{\text{لورنز}}$

$(2)\quad r = 9 \times 10^{-3}m \qquad (3) T = \frac{9\pi}{4} \times 10^{-9}sec$

➢ القوة الكهرطيسية (قوة لابلاس) وتطبيقاتها الأربعة

مدخل للقوة الكهرطيسية

أي عند حركة الإلكترونات الحرة داخل السلك المعدني بسرعة ثابتة ستخضع لقوة مغناطيسية ، فتكون القوة الكهرطيسية مساوية جداء عدد الإلكترونات N في القوة المغناطيسية

$$F_{\text{كهرطيسية}} = N_{\text{عدد الإلكترونات الحرة في السلك}} \times F_{\text{مغناطيسية}}$$

(بفرض أن طول السلك L، ومساحة مقطعه s، و الكثافة الحجمية للإلكترونات الحرة فيه n، يكون عدد الإلكترونات الحرة N=nsL.)

$$n = \frac{N}{V} = \frac{N}{s.L} \Rightarrow N = nsL$$

سؤال نظري: انطلاقاً من العلاقة

$$F_{\text{كهرطيسية}} = N_{\text{عدد الإلكترونات الحرة في السلك}} \times F_{\text{مغناطيسية}}$$

1. **استنتج العلاقة المعبرة عن شدة القوة الكهرطيسية**
2. **ما العوامل المؤثرة في شدة القوة الكهرطيسية**

الحل :

1. $F_{\text{كهرطيسية}} = N_{\text{عدد الإلكترونات الحرة في السلك}} \times F_{\text{مغناطيسية}}$

ولكن : $F_{\text{مغناطيسية}} = e\ v\ B\ sin\theta$

$\Rightarrow F_{\text{كهرطيسية}} = Ne\ v\ B\ sin\theta$

نعوض $\left(v = \frac{L}{\Delta t}\right)$ ... ... $(Ne = q)$ في المعادلة السابقة :

$$F_{\text{كهرطيسية}} = q.\frac{L}{\Delta t}\ B\ sin\theta$$

نعوض $\left(I = \frac{q}{\Delta t}\right)$ في العلاقة السابقة نجد :

شدة القوة الكهرطيسية : $\boxed{F_{\text{كهرطيسية}} = IL\ B\ sin\theta}$

2. العوامل المؤثرة في شدة القوة الكهرطيسية:

تتناسب شدة القوة الكهرطيسية طرداً مع :

I : شدة التيار الكهربائي المار في السلك الناقل .

B : شدة الحقل المغناطيسي المنتظم .

L : طول الجزء من الناقل المستقيم الخاضع للحقل المغناطيسي المنتظم

$sin\theta$: حيث θ هي الزاوية بين $\vec{IL}$ وشعاع الحقل المغناطيسي $\vec{B}$

$$\theta = (\widehat{\vec{IL}, \vec{B}})$$

ملاحظة :

شدة القوة الكهرطيسية من أجل N لفة:

$$\boxed{F_{\text{كهرطيسية}} = NIL\ B\ sin\theta}$$

سؤال نظري : أكتب العبارة الشعاعية للقوة الكهرطيسية . ثم حدد بالكتابة والرسم عناصر شعاع القوة الكهرطيسية ثم بيّن متى تكون شدة القوة (عظمى – معدومة)

✓ **العبارة الشعاعية للقوة الكهرطيسية** $\boxed{\vec{F} = I\vec{L} \wedge \vec{B}}$

✓ **عناصر شعاع القوة الكهرطيسية :**

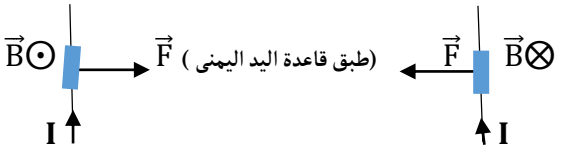
❖ **نقطة التأثير:** منتصف الجزء من الناقل المستقيم الخاضع للحقل المغناطيسي المنتظم.

❖ **الحامل:** عمودي على المستوى المحدد بالناقل المستقيم وشعاع الحقل المغناطيسي المنتظم

❖ **الجهة:** حسب قاعدة اليد اليمنى تحقق $(I\vec{L}, \vec{B}, \vec{F})$ ثلاثية مباشرة

- نجعل اليد اليمنى موازية للناقل المستقيم :
- يدخل التيار الكهربائي من الساعد ويخرج من أطراف الأصابع
- يخرج شعاع الحقل المغناطيسي من راحة الكف .
- يشير الإبهام إلى جهة $\vec{F}$ القوة الكهرطيسية

❖ الشدة: $\mathbf{F = I.L.B.\sin\theta \quad \theta: (\vec{IL}, \vec{B})}$

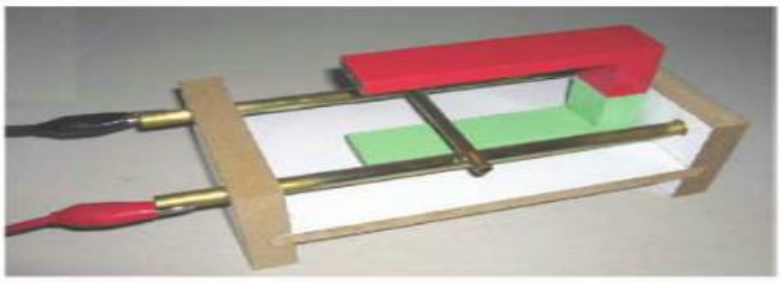


✓ **تكون شدة القوة الكهرطيسية**

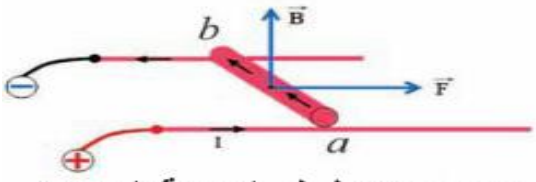
عظمى: $\theta = \frac{\pi}{2} rad \quad , \vec{IL} \perp \vec{B}$

معدومة: $\theta = 0 \quad , \vec{IL} // \vec{B}$

1 تجربة السكتين الكهرطيسية

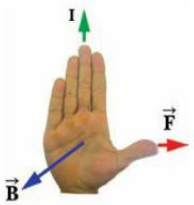


(a) تجربة السكتين الكهرطيسية



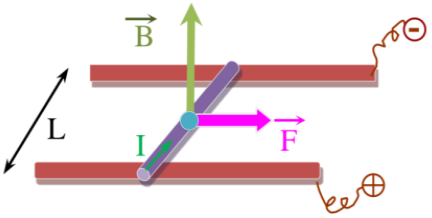
(b) رسم تخطيطي لتجربة السكتين الكهرطيسية

سؤال نظري: في تجربة السكتين الكهرطيسية تستند ساق نحاسية متجانسة إلى سكتين معدنيتين أفقيتين ، ويؤثر حقل مغناطيسي منتظم شاقولي على الساق بكاملها ، نمرر تياراً كهربائياً متواصلاً في الدارة **والمطلوب**



1. اشرح ماذا يحدث عند إغلاق الدارة ثم أرسم شكلاً توضيحياً تبيّن فيه جهة كل من الأشعة $(\vec{IL},\vec{B},\vec{F})$
2. اقترح طريقة لزيادة سرعة تدحرج الساق
3. ماذا تتوقع أن يحدث عند زيادة شدة التيار الكهربائي المار في الساق أو زيادة شدة الحقل المغناطيسي ؟
4. ماذا تتوقع أن يحدث عند عكس جهة التيار الكهربائي أو جهة المغناطيسي ؟
5. بيّن تحولات الطاقة في التجربة وما المبدأ التي عملت به ؟
6. ماذا تتوقع أن يحدث إذا خضعت الساق إلى حقل مغناطيسي أفقي منتظم ؟

الحل :

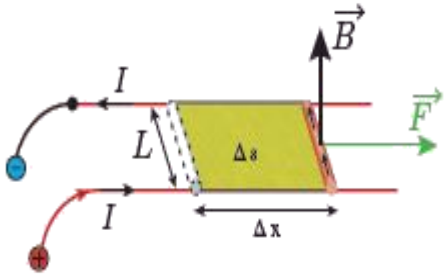


1. تتحرك الساق على السكتين تحت تأثير قوة كهرطيسية تعمل على تحريك الساق وفق حاملها وجهتها بسرعة ثابتة .
2. نستطيع زيادة سرعة تدحرج الساق بزيادة شدة التيار الكهربائي أو زيادة شدة الحقل المغناطيسي .لأن شدة القوة الكهرطيسية تتناسب طرداً مع $(I \cdot B)$ وفق العلاقة : $\boxed{F_{\text{كهرطيسية}} = IL\,B\,sin\theta}$
3. توقع زيادة سرعة تدحرج الساق لأنه بزيادة شدة التيار أو شدة الحقل المغناطيسي سوف تزداد شدة القوة الكهرطيسية فتزداد الاستطاعة الميكانيكية للساق أي زيادة في سرعتها
4. أتوقع انعكاس جهة حركة الساق لأنه عند عكس جهة التيار الكهربائي أو جهة الحقل المغناطيسي سوف تنعكس جهة القوة الكهرطيسية فنلاحظ تدحرج الساق النحاسية باتجاه معاكس للجهة الأصلية .
5. تتحول الطاقة من طاقة كهربائية إلى طاقة ميكانيكية (حركية) وفق مبدأ (المحرك الكهربائي)
6. .....

سؤال نظري: استنتج عبارة عمل القوة الكهرطيسية في تجربة السكتين الكهرطيسية ، ثم أكتب نص نظرية مكسويل

تنتقل نقطة تأثير القوة الكهرطيسية وفق حاملها وجهتها مسافة ΔX فتنجز عملاً محركاً (موجباً) $W > 0$

$$\mathbf{W_{\text{العمل}} = F_{\text{القوة}} \cdot \Delta x_{\text{الانتقال}}}$$



$$W = ILB\sin\theta\,.\,\Delta x$$

ولكن : $\sin\theta = \sin\frac{\pi}{2} = 1$

Δs: السطح الذي تمسحه الساق : $\Delta s = L.\Delta x$

فيصبح العمل : $W = IB.\Delta s$

فيتغير التدفق أي أنه يزداد : $\Delta\phi = B.\Delta s > 0$

(عمل مكسويل) : $\boxed{\mathbf{W = I.\Delta\phi > 0}}$

نص نظرية مكسويل: عندما تنتقل دارة كهربائية أو جزء من دارة كهربائية مغلقة في منطقة يسودها حقل مغناطيسي منتظم فإن عمل القوة الكهرطيسية المسببة لذلك الانتقال يساوي جداء شدة التيار في الدارة في تزايد التدفق المغناطيسي الذي يجتازها.

شرط التوازن الإنسحابي: $\sum\vec{F} = \vec{0}$ نعوض بعد إسقاط الأشعة على محور موا

$$\text{الاستطاعة } P = \frac{\text{العمل } W}{\text{الزمن } t}$$

في جميع المسائل $(4\pi = 12.5.\ \pi^2 = 10\ .g = 10m.s^{-2})$

المسألة الأولى (درس)

في تجربة السكتين الكهرطيسية، تستند ساق نحاسية كتلتها $16g$ إلى سكتين أفقيتين حيث يؤثر على $4cm$ من الجزء المتوسط منها حقل مغناطيسي منتظم شاقولي شدته $10^{-1}T$ ويمر بها تيار شدته $40A.$ المطلوب:

1- **حدد بالكتابة و الرسم عناصر شعاع القوة الكهرطيسية، ثم احسب شدتها.**
2- **احسب قيمة العمل الذي تنجزه القوة الكهرطيسية عندما تنتقل الساق مسافة $15\ cm.$**
3- **<u>إضافي</u> : أحسب الاستطاعة الميكانيكية الناتجة خلال $2sec$**
4- **احسب قيمة الزاوية التي يجب إمالة السكتين بها عن الأفق حتى تتوازن الساق والدارة مغلقة (بإهمال قوى الاحتكاك).**

الاجوبة : (1) $F = 16 \times 10^{-2}N$ (2) $W = 24 \times 10^{-3}J$ **إضافي** (3) $\mathrm{p} = 12 \times 10^{-3}watt$ (4) $\alpha = \frac{\pi}{4}\ rad$

1. **عناصرشعاع القوة الكهرطيسية :**

❖ **نقطة التأثير**: منتصف الجزء من الناقل المستقيم الخاضع للحقل المغناطيسي المنتظم.

❖ **الحامل:** عمودي على المستوى المحدد بالناقل المستقيم وشعاع الحقل المغناطيسي المنتظم

❖ **الجهة:** حسب قاعدة اليد اليمنى تحقق $(\vec{IL},\vec{B},\vec{F})$ ثلاثية مباشرة
- نجعل اليد اليمنى موازية للناقل المستقيم :
- يدخل التيارالكهربائي من الساعد ويخرج من أطراف الأصابع
- يخرج شعاع الحقل المغناطيسي من راحة الكف .
- يشير الإبهام إلى جهة $\vec{F}$ القوة الكهرطيسية

❖ **الشدة:** $\boxed{F = I.L.B.\sin\theta \quad \theta: (\vec{IL},\vec{B})}$

الرسم :

حساب شدة القوة :

مسألة خارجية (دورات) (شبيه دورة 1993 – 1998 – 2015 الأولى والثانية – 2021 أولى)

نجري تجربة السكتين الكهرطيسية حيث يبلغ طول الساق النحاسية المستندة إلى السكتين الأفقيتين **(L=8cm)** تخضع **بكاملها** لتأثير حقل مغناطيسي منتظم شاقولي ، شدته ($B=10^{-2}\ T$) ، ويمر فيها تيار كهربائي متواصل ، شدته (**20A**) .

1- احسب شدة هذه القوة وضح بالرسم كلاً جهة كل من (جهة التيار ، $\vec{B}$ ، $\vec{F}$) ،.

2- احسب عمل القوة الكهرطيسية لو انتقلت الساق بسرعة ثابتة ($0.2m.s^{-1}$) خلال **(2s)** ، واحسب الاستطاعة الميكانيكية الناتجة .

3- نميل السكتين على الأفق بزاوية ، مقدارها (**0.1 rad**) ، احسب شدة التيار الواجب تمريره في الدارة لتبقى الساق ساكنة علماً أن كتلتها (**40g**) (بإهمال قوى الاحتكاك) ، ثم احسب قيمة فرق الكمون المطبق على الدارة إذا كانت مقاومتها (**R = 0.5Ω**) .

الاجوبة : (1) $F = 16 \times 10^{-3} N$ (2) $W = 64 \times 10^{-4} J,\ \mathbf{p} = 32 \times 10^{-4} watt$ (3) $\mathbf{I} = 50\ A, U = 25\ Volt$

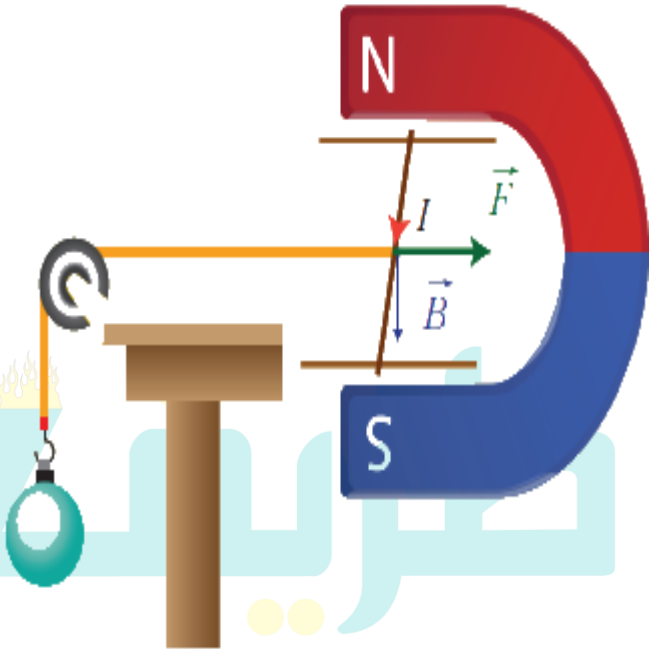
المسألة 12 عامة :

في الشكل المجاور تستند ساق نحاسية طولها $10cm$ وكتلتها $20\ g$ على سكتين نحاستين أفقيتين وتخضع بكاملها لحقل مغناطيسي منتظم شاقولي شدته $B = 8 \times 10^{-2}\ T$ ويمر ها تيار كهربائي متواصل شدته $25\ A$ ولحفاظ على **توازن** هذه الساق نعلق في مركز ثقلها خيط لا يمتط كتلته مهملة مربوط بكتلة،

المطلوب حساب:

1- كتلة الجسم المعلق.

2- شدة قوة رد فعل السكتين على الساق.



المعطيات :

الحل:

1- القوى الخارجية المؤثرة: في مركز عطالة الساق :

$\overrightarrow{W}$: ثقل الساق.

$\vec{R}$: رد فعل السكتين

$\vec{F}$: القوة الكهرطيسية.

$\overrightarrow{T_1}$: قوة توتر الخيط.

بسبب توازن الساق $\sum \vec{F} = \vec{0}$

$$\overrightarrow{W} + \vec{F} + \overrightarrow{T_1} + \vec{R} = \vec{0}$$

بالإسقاط على محور أفقي موجه بجهة القوة الكهرطيسية.

$$F - T_1 = 0$$

$$T_1 = F \ldots (1)$$

القوى الخارجية المؤثرة: في الكتلة المعلقة m'

$\overrightarrow{W'}$: ثقل الكتلة ، $\overrightarrow{T_2}$: قوة توتر الخيط.

بسبب توازن الكتلة: $\sum \vec{F} = \vec{0}$

$$\overrightarrow{W'} + \overrightarrow{T_2} = \vec{0}$$

بالإسقاط على محور شاقولي وموجه نحو الأسفل:

$$W' - T_2 = 0$$

$$\Longrightarrow T_2 = w' \ldots (2)$$

ولكن : للخيط نفسه قوى التوتر نفسها من الجانبين $T_1 = T_2$

بالمقارنة بين : (2) و (1) نجد : $F = W'$

$$\Longrightarrow ILB\ sin\frac{\pi}{2} = m'g$$

$$m' = \frac{ILB}{g} = \frac{25\times10^{-1}\times8\times10^{-2}}{10} = 2 \times 10^{-2}kg$$

وهي كتلة الجسم المعلق : $\boxed{m' = 2 \times 10^{-2}kg}$

2- بسبب توازن الساق $\sum \vec{F} = \vec{0}$

$$\vec{F} + \overrightarrow{T_1} + \vec{R} + \overrightarrow{W} = \vec{0}$$

بالإسقاط على محور شاقولي موجه نحو الأعلى :

$$0 + 0 + R - W = 0$$

$$\rightarrow R = W$$

$$R = W = mg = 2 \times 10^{-2} \times 10$$

$$\boxed{R = 0.2\ N}$$

المسألة 13 عامة :

تيار كهربائي شدته $20\ A$ يمر في سلك مستقيم طوله $10Cm$ فإذا وضع الشلك كاملاً في حقل مغناطيسي شدته $2 \times 10^{-3}T$ وكان يصنع السلك مع خطوط الحقل المغناطيسي زاوية $30°$ **احسب شدة القوة الكهرطيسية المؤثرة في السلك.**

الاجوبة : $F = 2 \times 10^{-3}N$

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

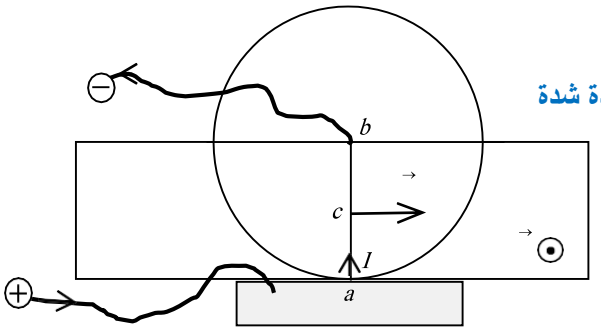
.....

.....

➢ 2 تجربة دولاب بارلو

دولاب بارلو : هو عبارة عن قرص شاقولي خفيف من النحاس يمكنه الدوران حول محور أفقي مار من مركزه ، ونجعل نهايته السفلية تلامس زئبقاً موضوع في حوض ، ثم نمرر في الدولاب تياراً كهربائياً متواصلاً ونخضع نصف قرصه السفلي إلى تأثير حقل مغناطيسي أفقي منتظم ،فيدور الدولاب بسرعة زاوية ثابتة ويحول الطاقة الكهربائية المقدمة له إلى طاقة حركية كما مبدأ (المحرك الكهربائي)

سؤال نظري قمت بدراسة تجريبية لتأثير الحقل المغناطيسي المعامد لدولاب بارلو والذي يمر فيه تيار متواصل والمطلوب :



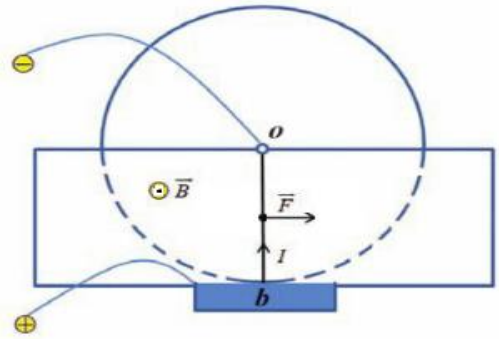
1. ماسبب دوران الدولاب ،
2. اقترح طريقة لزيادة سرعة الدوران
3. ماذا تتوقع أن يحدث عند زيادة شدة التيار الكهربائي المار في الدولاب أو زيادة شدة الحقل المغناطيسي ؟
4. ماذا تتوقع أن يحدث عند عكس جهة التيار الكهربائي أو جهة المغناطيسي ؟
5. ماذا تتوقع لو خضع الدولاب بكامله لتأثير الحقل المغناطيسي المنتظم

الحل :

1. سبب دوران الدولاب هو عزم القوة الكهرطيسية المؤثرة في الدولاب .
2. نستطيع زيادة سرعة الدوران بزيادة شدة التيار الكهربائي أو زيادة شدة الحقل المغناطيسي لأن شدة القوة الكهرطيسية تتناسب طرداً مع $(I \ ، \ B)$ وفق العلاقة : $\boxed{F_{\text{كهرطيسية}} = Ir\,B\,sin\theta}$
3. أتوقع زيادة سرعة دولاب الدولاب لأنه بزيادة شدة التيار أو شدة الحقل المغناطيسي سوف تزداد شدة القوة الكهرطيسية ويزداد عزمها فتزداد الاستطاعة الدورانية للدولاب أي زيادة في سرعته
4. أتوقع انعكاس جهة دوران الدولاب لأنه عند عكس جهة التيار الكهربائي أو عكس جهة الحقل المغناطيسي سوف تنعكس جهة القوة الكهرطيسية فلاحظ دوران الدولاب باتجاه معاكس للجهة الأصلية
5. .....

سؤال نظري: في تجربة دولاب بارلو أكتب العبارة الشعاعية للقوة الكهرطيسية ثم حدد بالكتابة والرسم عناصر شعاع القوة الكهرطيسية المؤثرة في الدولاب

- ✓ **العبارة الشعاعية للقوة الكهرطيسية** $\boxed{\vec{F} = I\vec{r} \wedge \vec{B}}$
- ✓ **عناصر شعاع القوة الكهرطيسية المؤثرة في الدولاب :**
- ❖ **نقطة التأثير:** منتصف نصف القطر الشاقولي السفلي الخاضع للحقل المغناطيسي المنتظم
- ❖ **الحامل:** عمودي على المستوي المحدد بنصف القطرالسفلي لشاقولي وشعاع الحقل المغناطيسي المنتظم .
- ❖ **الجهة:** حسب قاعدة اليد اليمنى
  - نضع اليد اليمنى موازية لنصف القطر السفلي الشاقولي
  - يدخل التيار من الساعد ويخرج من رؤوس الأصابع
  - يخرج شعاع الحقل المغناطيسي $\vec{B}$ من باطن الكف
  - فيشير الإبهام إلى جهة $\vec{F}$ بحيث الأشعة $(I\vec{r}، \vec{B}، \vec{F})$ ثلاثية قائمة.



- ❖ **الشدة :** لكن: $L = r$ $\boxed{F = IrB.Sin\theta}$

تطبيق خارجي : في دولاب بارلو عزم القوة الكهرطيسية **0.1 m.N**

ويدور الدولاب بسرعة تقابل $\frac{10}{\pi}$ دورة بالثانية⇦ أحسب استطاعته الدورانية

.....

المسألة الرابعة (درس) :

دولاب بارلو قطره $20cm$ ، يمر فيه كهربائي متواصل I، ويخضع نصف القرص السفلي لحقل مغناطيسي أفقي منتظم شدته $B = 10^{-2}T$، فيتأثر الدولاب بقوة كهرطيسية شدتها $F = 4 \times 10^{-2}N$ ، **المطلوب:**

1- بين بالرسم جهة كل من $(\vec{F}, \vec{B}, \vec{Ir})$.
2- احسب شدة التيار المار في الدولاب.
3- احسب عزم القوة الكهرطيسية المؤثرة في الدولاب.
4- احسب قيمة الكتلة الواجب تعليقها على طرف نصف القطر الأفقي للدولاب لمنعه عن الدوران.

الأجوبة : (2) $I = 40\ A$ (3) $\Gamma = 2 \times 10^{-3} m.N$
(4) $m' = 2 \times 10^{-3} kg$

الرسم :

مسألة خارجية دورات : (دورة 2013- 2009)

دولاب بارلو نصف قطر قرصه (r=10 cm) نمرر فيه تياراً كهربائياً ، شدته (I=5A) ، ونخضع نصف القرص السفلي لحقل مغناطيسي أفقي منتظم ، شدته $(B = 2 \times 10^{-2}T)$ **والمطلوب**

1- احسب شدة القوة الكهرطيسية .التي يخضع لها الدولاب
2- احسب عزم القوة الكهرطيسية المؤثرة في الدولاب .
3- احسب الاستطاعة الميكانيكية الناتجة عندما يدور الدولاب بسرعة تقابل $\frac{5}{\pi} Hz$
4- احسب عمل القوة الكهرطيسية بعد مضي 4s من بدء حركة الدولاب ، وهو يدور بالسرعة الزاوية السابقة
5- إضافي : ماقيمة الكتلة الواجب إضافتها لطرف نصف القطر الأفقي للدولاب حتى يبقى ساكناً ؟

الأجوبة: (1) $F = 10^{-2}N$ (2) $\Gamma = 5 \times 10^{-4} m.N$
(3) $p = 5 \times 10^{-3}\ watt$ (4) $W = 2 \times 10^{-2}J$
(5) $m' = 5 \times 10^{-4} kg$

➢ 3 تجربة انحراف السلك

المسألة الثانية (درس) :

نعلق سلكاً نحاسياً ثخيناً طوله $60\ cm$ وكتلته $50g$ من طرفه العلوي شاقولياً، ونغمس طرفه السفلي في حوض يحتوي الزئبق. نمرر تياراً كهربائياً متواصلاً شدته $10A$، حيث يؤثر حقل مغناطيسي منتظم أفقي شدته $B = 3 \times 10^{-2}T$ على قطعة منه، طولها $4cm$ يبعد منتصفها عن نقطة التعليق $50cm$.

والمطلوب :

استنتج العلاقة المحددة لزاوية انحراف السلك عن الشاقول بدلالة أحد نسبها المثلثية، ثم احسبها. (موضحاً بالرسم)

الأجوبة : $\alpha = 4 \times 10^{-2} rad$

الرسم :

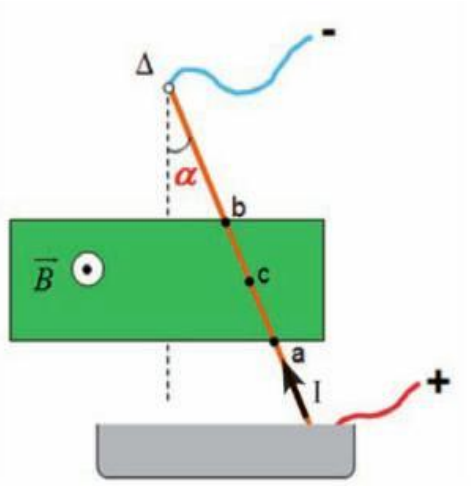
مسألة خارجية

لدينا في التجربة الموضحة في الشكل المجاور :

ساق نحاسية متجانسة شاقولية كتلتها $m=50\ g$ معلقة من نهايتها العلوية بمحور Δ أفقي يمكن أن تدور حوله بحرية . نغمس نهايتها السفلية في زئبق موضوع في حوض ، ونمرر فيه تياراً كهربائياً متواصلاً شدته I ، و يؤثر حقل مغناطيسي منتظم أفقي شدته $(B=5\times10^{-2}\ T)$ في الجزء $(ab=L=2\ cm)$ في القسم المتوسط من الساق . **المطلوب: حدد على الرسم القوى المؤثرة في الساق ،و استنتج العلاقة المحددة للتيار الواجب امراره في الساق حتى تنحرف عن وضع الشاقول بزاوية** $\alpha = 0.1rad$ **ثم تتوازن ، واحسب شدته .**

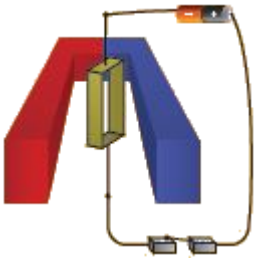
الأجوبة

$\mathbf{I = 50\ A}$



➢ 4 تجربة المقياس الغلفاني ذو الاطار المتحرك

سؤال نظري : صِف الإطار المتحرك ضمن حقل مغناطيسي منظم وماهو مبدأ عمله ؟ واكتب نص قاعدة التدفق الأعظمي .



- **الوصف** : ملف على شكل اطار مستطيل مؤلف من N لفة يتصل أحد طرفيه بسلك معدني رفيع شاقولي ثابت فتله K والطرف الآخر بسلك لين عديم الفتل. ويمكن للإطار الدوران حول محور شاقولي ماراً من مركزه داخل حقل مغناطيسي لمغناطيس نضوي محيطاً بنواة حديد ويكون مستوى الاطار يوازي $\vec{B}$ عندما $\theta = \frac{\pi}{2}$ (بين ناظم الإطار وخطوط الحقل)
- **مبدأ عمله**: دوران دارة كهربائية في منطقة يسودها حقل مغناطيسي منتظم بحيث يزداد التدفق المغناطيسي الذي يجتازها من وجهها الجنوبي (تحقيق قاعدة التدفق الأعظمي)

عمله: لحظة إمرار التيار الكهربائي في الاطار ينشأ قوى كهرطيسية في أضلاعه الأربعة

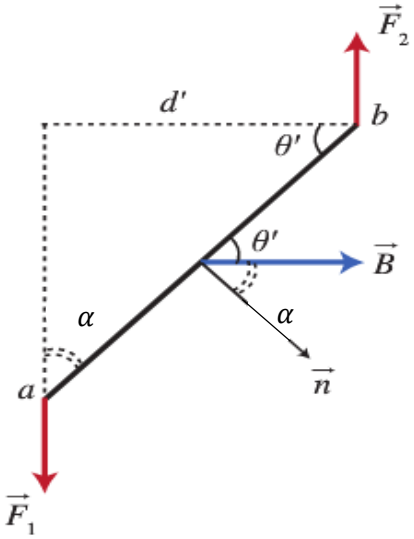
في الضلعين الأفقيتين : تكون شدة القوة الكهرطيسية معدومة لأن : $I\vec{L} \;//\; \vec{B}$

في الضلعين الشاقولتين : تكون شدة القوة الكهرطيسية عظمى لأن : $I\vec{L} \perp \vec{B}$

فتنشأ قوتين كهرطيسيتين متوازيتين حاملاً متعاكسيتين جهةً متساويتين شدةً تسمى المزدوجة الكهرطيسية تعمل على تدوير الإطار لتحقيق قاعدة التدفق الأعظمي

نص قاعدة التدفق الأعظمي : إذا أثر حقل مغناطيسي في دارة كهربائية مغلقة حركة الحركة ، تحركت الدارة بحيث يزداد التدفق المغناطيسي الذي يجتازها من وجهها الجنوبي وتستقر في وضع التدفق المغناطيسي الأعظمي .

سؤال نظري استنتج عبارة عزم المزدوجة الكهرطيسية:



$\Gamma_{\Delta_{\text{عزم المزدوجة الكهرطيسية}}} = d'_{\text{ذراع المزدوجة}} \cdot F_{\text{إحدى القوتين}}$

d': **ذراع المزدوجة** (البعد العمودي بين حاملي القوتين)

ولكن من المثلث المجاور:

$$\sin\alpha = \frac{d'_{(\text{ذراع المزدوجة})}}{ab_{(\text{نفسه عرض الإطار})}} \Rightarrow d' = ab\sin\alpha$$

وأيضاً : $F = NILB\sin\frac{\pi}{2}$

نعوّض الذراع والقوة فنجد : $\bar{\Gamma}_\Delta = d.\sin\alpha\ NILB$

$$\Rightarrow \bar{\Gamma}_\Delta = NILBd\sin\alpha$$

ولكن مساحة الإطار S تساوي الطول L ضرب العرض d : $S = L.d$

عزم المزدوجة الكهرطيسية : $\bar{\Gamma}_\Delta = NISB\sin\alpha$: $\alpha = (\vec{B},\vec{n})$

سؤال نظري أكتب عبارة شعاع العزم المغناطيسي ثم حددعناصره وكيف تصبح عبارة عزم المزدوجة الكهرطيسية شعاعياً

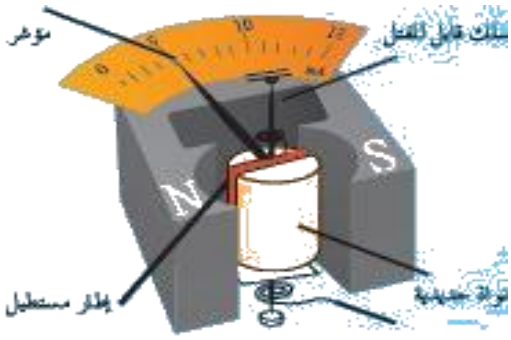
✓ العبارة الشعاعية : $\vec{M} = NI\vec{S}$ ❖ **نقطة التأثير** : مركز الملف - **الحامل** : ناظم الملف ❖ **الجهة** : بجهة إبهام يد يمنى تلتف أصابعها بجهة التيار ❖ **الشدة** : $M = NIS$	✓ **عزم المزدوجة الكهرطيسية** : $\bar{\Gamma}_\Delta = NISB\sin\alpha$ $\xrightarrow{M=NIS} \bar{\Gamma}_\Delta = M.B\sin\alpha$ **العبارة الشعاعية لعزم المزدوجة الكهرطيسية** : $\vec{\Gamma_\Delta} = \vec{M} \wedge \vec{B}$

ملاحظة بتعليق الإطار بسلك فتل يصبح مقياس غلفاني ينشأ فيه عزم مزدوجة الفتل

(عزم إرجاع : يحاول إرجاع الإطار إلى وضعه السابق) : $\bar{\Gamma}' = -k\theta'$ ثابت فتل السلك وَ θ' زاوية دوران الإطار

(المقياس الغلفاني : جهاز يقيس شدات التيارات الصغيرة بدلالة زاوية دوران صغيرة)

سؤال نظري انطلاقاً من العلاقة $\bar{\Gamma}_{\Delta}$ مزدوجةكهرطيسية $+ \bar{\Gamma}'$ مزدوجة فتل $= 0$ استنتج زاوية دوران إطار θ' للمقياس الغلفاني بدلالة التيار الكهربائي/ ، وكيف تزيد حساسية المقياس ؟ (دورة 2015 الثانية)



شرط التوازن الدوراني : المجموع الجبري لعزوم القوى معدوم $\sum \bar{\Gamma}_{\vec{F}} = 0$

$$\bar{\Gamma}_{\Delta} \text{ مزدوجةكهرطيسية} + \bar{\Gamma}' \text{ مزدوجة فتل} = 0$$

ولكن : $\bar{\Gamma}' = -k\theta'$ وَ $\bar{\Gamma}_{\Delta} = NISB\sin\alpha$

نعوض العزوم فنجد : $NISB\sin\alpha - k\theta' = 0$

$$NISB\sin\alpha = k\theta'$$

ولكن: $\alpha + \theta' = \frac{\pi}{2}$ متتامتان

$$\sin\alpha = \cos\theta'$$

بفرض θ' صغيرة بالتالي: $\cos\theta' \approx 1$

$$NISB = k\theta'$$

$$\Rightarrow \boxed{\theta' = \frac{NBS}{k} I}$$ زاوية دوران الإطار :

$\theta' = GI$ حيث $\boxed{G = \frac{NBS}{k}}$ ثابت المقياس الغلفاني

نتيجة: ولزيادة حساسية الجهاز (المقياس) يجب زيادة G وذلك بإنقاص ثابت فتل سلك الفتل k وذلك باستبدال سلك الفتل بسلك أرفع منه من المادة نفسها

ملاحظات لحل مسائل الإطار

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

المسألة 16 عامة:

ملف مستطيل مساحته $200\ cm^2$ يتكون من 100 لفة يمر فيه تيار شدّته $3A$ ، وضع في حقل مغناطيسي منتظم شدّته $0.1T$ أحسب عزم المزدوجة الكهرطيسية المؤثرة عليه عندما يكون مستوى الملف يصنع زاوية 60° مع خطوط الحقل المغناطيسي .

$$\alpha + \theta' = 90^0 \Rightarrow \alpha = 90^0 - 60^0 = 30^0$$

$$\Gamma_{\Delta} = NIBs\ \sin\alpha$$

$$\Gamma_{\Delta} = 100 \times 3 \times 10^{-1} \times 200 \times 10^{-4} \times \frac{1}{2}$$

$$\boxed{\Gamma_{\Delta} = 3 \times 10^{-1}\ m\,.N}$$

المسألة الثالثة (درس) : إطار مستطيل الشكل يحتوي **100 لفة** من سلك نحاسي معزول مساحته $4\pi cm^2$.

a. نعلق الإطار بسلك عديم الفتل شاقولي، ونخضعه لحقل مغناطيسي منتظم أفقي شدته $B = 4 \times 10^{-2}\ T$، خطوطه توازي مستوي الإكار الشاقولي، نمرر في الإطار تياراً شدته $\frac{1}{10\pi} A$ **المطلوب حساب :**

1. عزم المزدوجة الكهرطيسية التي يخضع لها الإطار لحظة إمرار التيار.
2. عمل المزدوجة الكهرطيسية عندما يدور الإطار من وضعه السابق إلى وضع التوازن المستقر.

b. **نقطع التيار** ونستبدل سلك التعليق بسلك فتل شاقولي ثابت فتله K، بحيث يكون مستوي الإطار **يوازي** خطوط الحقل المغنطيسي السابق، ونمرر تياراً شدته $2mA$، فيدور الإطار زاوية $30°$، **ثم يتوازن**.

المطلوب:

1. احسب التدفق المغناطيسي في الإطار عندما يتوازن.
2. استنتج العلاقة المحددة لثابت فتل سلك التعليق انطلاقاً من شرط التوازن الدوراني، ثم احسب قيمته. (يهمل تأثير الحقل المغناطيسي الأرضي).

الاجوبة : **(a)** (1) $\emptyset = 8\pi \times 10^{-4} we$ (2) $W = 16 \times 10^{-5} J$

(b) (1) $\bar{\Gamma}_{\Delta} = 16 \times 10^{-5} m.N$ (2) $k = 96\sqrt{3} \times 10^{-7} m.N.rad^{-1}$

MY Way طريقي مع أنس أحمد

المسألة 15 عامة :

لدينا إطار مربع الشكل مساحة سطحه ($S=25cm^2$) يحوي 50 **لفة** من سلك نحاسي معزول نعلقه بسلك رفيع **عديم الفتل** وفق محوره الشاقولي ونخضعه لحقل مغناطيسي منتظم خطوطه أفقية شدته ($B=10^{-2}\ T$) بحيث يكون مستوي الإطار يوازي منحى الحقل $\vec{B}$ عند عدم مرور التيار ، نمرر في الإطار تياراً كهربائياً شدته ($I=5A$) **والمطلوب :**

1- احسب شدة القوة الكهرطيسية المؤثرة في كل من الضلعين الشاقوليين لحظة مرور التيار .

2- احسب عزم المزدوجة الكهرطيسية المؤثرة في الإطار لحظة إمرار التيار السابق .

3- احسب عمل المزدوجة الكهرطيسية عندما ينتقل الإطار من وضعه السابق إلى وضع التوازن المستقر .

4- نستبدل سلك التعليق **بسلك فتل** ثابت فتله K لنشكل مقياساً غلفانياً ونمرر بالإطار تياراً كهربائياً شدته ثابتة ($2mA$) فيدور الإطار بزاوية ($0.02\ rad$) **ويتوازن** . استنتج بالرموز علاقة ثابت فتل السلك k واحسب قيمته ، ثم احسب قيمة ثابت المقياس الغلفاني G .
(يهمل تأثير الحقل المغناطيسي الأرضي)

5- نزيد حساسية المقياس 10 **مرات** من أجل التيار نفسه ، احسب ثابت فتل سلك التعليق بالوضع الجديد .

الاجوبة : (1) $F = 125 \times 10^{-3} N$ (2) $\overline{\Gamma}_{\Delta} = 625 \times 10^{-5} m.N$ (3) $W = 625 \times 10^{-5} J$

(4) $k = 125 \times 10^{-6} m.N.rad^{-1}$ (5) $k' = 125 \times 10^{-7} m.N.rad^{-1}$

MY Way طريقي مع أنس أحمد

مسألة خارجية : إطار مستطيل الشكل يحوي (100 **لفة**) من سلك نحاسي معزول طوله *(8cm)* وعرضه *(2cm)*

A- نعلق الإطار بسلك عديم الفتل شاقولي ونخضعه لحقل مغناطيسي منتظم أفقي شدته (*B=0.06T*) خطوطه **توازي** مستوى الإطار الشاقولي ، نمرر في الإطار تياراً شدته (*0.1A*) **والمطلوب حساب :**

1– أحسب شدة القوة الكهرطيسية المؤثرة في أضلاعه الأربعة لحظة مرور التيار .

2- أحسب شدة القوة الكهرطيسية المؤثرة في أضلاعه الأربعة عندما يدور الإطار بزاوية 30^0 .

B- **نقطع التيار** ونستبدل سلك التعليق بسلك فتل شاقولي ثابت فتله ($k=8\times10^{-5}\ m.N.rad^{-1}$) بحيث يكون مستوي الإطار يوازي خطوط الحقل المغناطيسي السابق ، نمرر في الإطار تياراً شدته (*1mA*) فيدور الإطار **بزاوية صغيرة** (θ') **ويتوازن**

1- استنتج بالرموز العلاقة المحددة لزاوية الانحراف (θ') انطلاقاً من **شرط التوازن** واحسب قيمتها .

2- نجعل طول سلك الفتل **ربع** ماكان عليه أحسب ثابت المقياس الغلفاني*G* وأحسب زاوية الدوران حينئذٍ .

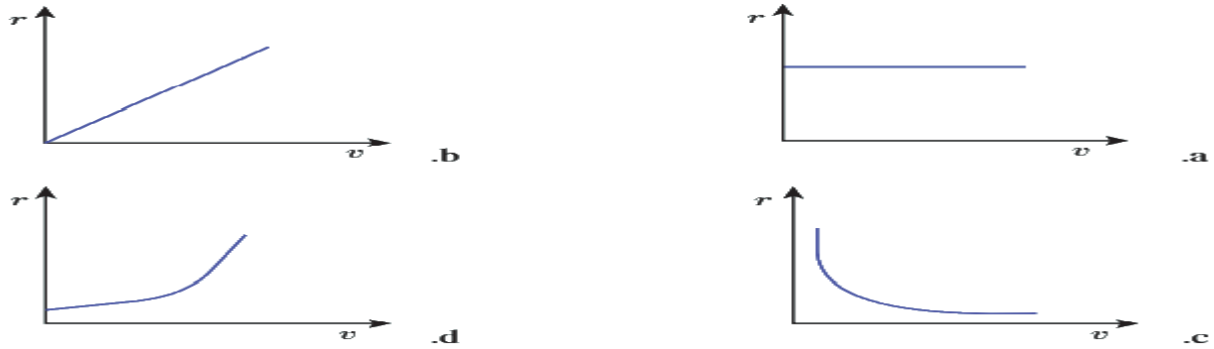
الاجوبة : (A) $\left(F_{\text{الضلعين الأفقيتين}}=0\right)$ $\left((1)\ F_{\text{الضلعين الشاقوليتين}}=48\times10^{-3}N\ ،\ F_{\text{الأفقيتين}}=6\times10^{-3}N\right)$ $\left((2)\ F_{\text{الشاقوليتين}}=48\times10^{-3}N\right)$

(B) $(1)\ \theta'=12\times10^{-2}rad$ $\left((2)\ G=30\ rad\ A^{-1}\ ،\ \theta'=3\times10^{-2}rad\right)$

اختبر نفسي

أولاً: اختر الإجابة الصحيحة فيما يأتي:

1- جسيمات مشحونة لها الكتلة نفسها و الشحنة نفسها، أدخلت منطقة يسودها حقل مغناطيسي منتظم بسرعة تعامد خطوط الحقل. فإن الشكل الذي يمثل العلاقة بين نصف قطر المسار الدائري r وسرعة الجسيمات المشحونة v.



الإجابة الصحيحة: b)

توضيح اختيار الإجابة: $r = \frac{m}{qB}v \Rightarrow r = const\ v$ معادلة مستقيم يمر بالمبدأ ميله $\frac{m}{qB}$

2- إن واحدة قياس النسبة $\frac{E}{B}$ هي:

a. $m.s^{-1}$ b. $m.s^{-2}$ c. m d. s

توضيح اختيار الإجابة :

3- عندما يدخل الإلكترون في منطقة يسودها حقل مغناطيسي منتظم بسرعة $\vec{v}$ ، تعامد خطوط الحقل المغناطيسي (بإهمال ثقل الإلكترون) فإن حركة الإلكترون داخل الحقل هي:

a. دائرية متغيرة بانتظام. **b. دائرية منتظمة.** c. مستقيمة منتظمة. d. مستقيمة متغيرة بانتظام.

توضيح الاختيار الإجابة: $\vec{a} = \frac{e}{m}\vec{v}\Lambda\vec{B} \xrightarrow{\text{جداء شعاعي}} \vec{a} \perp \vec{v} \xrightarrow{\text{التسارع الكلي هو تسارع ناظمي}} a = a_c$

4- عندما يدخل جسم مشحون في منطقة يسودها حقل مغناطيسي منتظم، فإن شعاعاً سرعته $\vec{v}$:

a. يتغير حامله وشدته b. يتغير حامله فقط c. تتغير شدته فقط **d. تبقى شدته ثابتة**

توضيح الاختيار الإجابة: الحركة دائرية منتظمة بسرعة متغيرة الحامل والجهة وثابتة الشدة

5- عندما تتدحرج الساق في تجربة السكتين الكهرطيسية تحت تأثير القوة الكهرطيسية، فإن التدفق المغناطيسي:

a. يبقى ثابتاً **b. يزداد** c. يتناقص d. ينعدم

توضيح الاختيار الإجابة: $W > 0 \Rightarrow \Delta\Phi > 0$ ، $W = I.\Delta\Phi$

ثانياً: أجب عن الاسئلة الآتية:

1- ادرس التأثير المتبادل بين سلكين نحاسيين شاقوليين طويلين يمر بهما تياران متواصلان لهما الجهة نفسها واستنتج عبارة القوة الكهرطيسية المؤثرة في أحد السلكين نتيجة وجود السلك الآخر

يولد التيار المستقيم I_1 في كل نقطة من الجزء L_2 من السلك المستقيم الثاني حقلاً مغناطيسياً شدته: $B_1 = 2\times10^{-7}\frac{1}{d}I_1$

يؤثر هذا الحقل في الجزء L_2 بقوة كهرطيسية لها محصلة شدتها: $F_{1\to2} = I_2L_2B_1sin\frac{\pi}{2}$

$$F_{1\to2} = I_2L_2\left(2\times10^{-7}\frac{1}{d}I_1\right)sin\frac{\pi}{2} \Rightarrow \boxed{F_{1\to2} = 2\times10^{-7}\frac{I_1I_2}{d}L_2}$$

وبدراسة مماثلة نجد للسلك الأول : $\boxed{F_{2\to1} = 2\times10^{-7}\frac{I_1I_2}{d}L_1}$

2- استنتج عبارة شدة الحقل المغناطيسي المؤثرة في شحنة كهربائية تتحرك في حقل مغناطيسي منتظم بسرعة $\vec{v}$ تعامد $\vec{B}$ ثم عرف التسلا.

$$F_{\text{المغناطيسية}} = qv\,B\sin\frac{\pi}{2} \xrightarrow{\text{نعزل } B} \boxed{B = \frac{F}{qv}}$$

التسلا: شدة حقل مغناطيسي منتظم إذا تحركت ضمن المنطقة التي يسودها شحنة كهربائية مقدارها كولوم واحد بسرعة $1\ m.s^{-1}$ تعامد خطوط هذا الحقل تأثرت بقوة مغناطيسية تساوي نيوتن واحد.

3- بين كيف يتم قياس شدة التيار في المقياس الغلفاني، ثم استنتج العلاقة بين شدة التيار I وزاوية دوران الإطار (0)، وكيف تتم زيادة حساسية المقياس الغلفاني عملياً من أجل التيار نفسه. (الحل ذاته في النظري ص 27)