

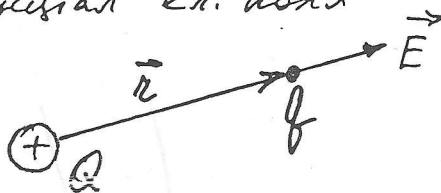
Рух в електричному та магнітному полях Матвеев, Тл. 12

$$\vec{F}_k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} \quad \text{сила Кулона (закон Кулона)}$$

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad \text{напруженість ел. поля}$$

$$\varphi = \frac{A_{100}}{q} \quad \text{потенціал ел. поля}$$

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$$



Рівняння руху
в електр. полі

$$\boxed{m\vec{a} = q\vec{E}}$$

$$W_n = q \cdot \varphi \quad \text{— потенц. енергія взаємодії заряду } q \text{ з даним полем}$$

$$F_x = -\frac{\partial W_n}{\partial x} = -q \frac{\partial \varphi}{\partial x}$$

Рух зарядів в магнітному полі.

B — індукція магн. поля (силова х-ка)

$$\text{Сила Лоренца} \quad \boxed{\vec{F}_l = q [\vec{v} \vec{B}]}$$

$$\vec{F}_l \perp \vec{v} !! \quad (\vec{F}_l \perp d\vec{r})$$

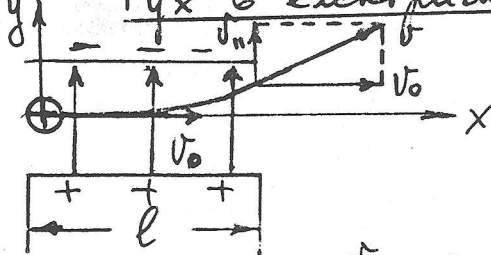
$$\text{Робота магн. сили Лоренца } dA_m = \vec{F}_l \cdot d\vec{r} = 0$$

Магн. сила (сила Лоренца) не змінює кінет. ен. заряду $\equiv$ не змінює модуля швидкості, а змінює лише напрям швидкості.

Рівняння руху електр. заряду

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q(\vec{E} + [\vec{v} \vec{B}])$$

Рух в електричному однорідному полі



$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = 0 \quad \Leftarrow \quad v_x = v_0 = \text{const}$$

$$a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{eE}{m}$$

$$v_{||} = a_y \cdot t = \frac{eE}{m} \cdot t = \frac{eEl}{m v_0}$$

Закон збереження енергії при русі в електричному полі

$$\frac{mv^2}{2} + eU = \text{const} \quad (E_k + W_n = \text{const})$$

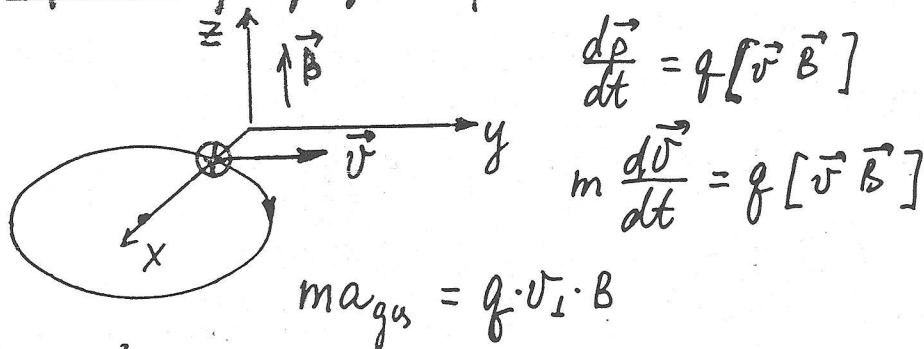
U - різниця потенціалів $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$

Для $U = 1 \text{ В}$ та $q = -1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$

$$\frac{mv^2}{2} = eU \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2eU}{m}} = 600 \frac{\text{км}}{\text{с}}$$

Рух електричних зарядів - рух релятивістський

Рух в однорізному магнітн. полі



$$\frac{mv_{\perp}^2}{R} = q v_{\perp} B \Rightarrow R = \frac{mv_{\perp}}{qB} = \frac{v_{\perp}}{\frac{q}{m} \cdot B} \sim \frac{1}{B}; \quad R \sim v_{\perp};$$

(e/m) - питомий заряд (заряд, що припадає на одиницю маси)

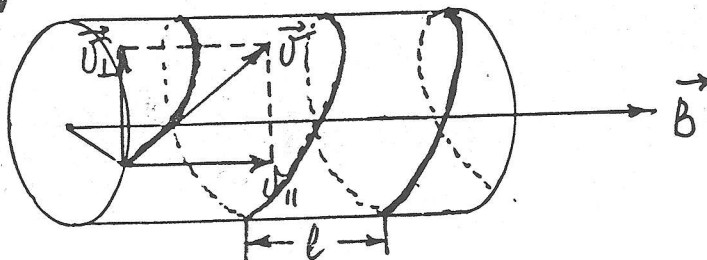
$$R \sim \frac{1}{q}$$

Якщо ел. частинка - електрон, то $q = e$.

$$T = \frac{2\pi R}{v_{\perp}} = \frac{2\pi}{v_{\perp}} \cdot \frac{v_{\perp}}{\frac{e}{m} B} = \frac{2\pi}{\frac{e}{m} B} \sim \frac{1}{B}$$

кутова частота обертання $\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{eB}{m} \sim B$

Напрям обертання залежить від знаку заряду. Для негативного заряду (ел-н) напрямки $\vec{B}$ та $\vec{\omega}$ збігаються за правилом правої гвинта.



Частинка влітає в ел. поле під кутом до $\vec{B}$

Рух по спіралі, крок якої $l = v_{\parallel} \cdot T =$

$$= \frac{2\pi v_{\parallel}}{\frac{e}{m} \cdot B} = \frac{2\pi v_{\parallel}}{\omega}$$

Приклади:Гіроскопічна частота

$$B = 10 \text{ кГс}$$

Для ел-ка: $\omega = \frac{eB}{m_e} \approx \frac{(5 \cdot 10^{-10}) \cdot 10^4}{10^{-27} \cdot 3 \cdot 10^{10}} \text{ с}^{-1} \approx$

$$\approx \frac{5 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^{-17}} \text{ с}^{-1} \approx 2 \cdot 10^{11} \text{ Гц}$$

$$f_H = \frac{\omega}{2\pi} \approx 3 \cdot 10^{10} \text{ Гц} = 30 \text{ ГГц}$$

$$\lambda_H = \frac{c}{f_H} \approx \frac{3 \cdot 10^{10}}{3 \cdot 10^{10}} \text{ см} = 1 \text{ см}$$

Для протона: $\frac{m_p}{m_e} = \frac{1836}{1}$

$$\omega_p = \frac{m_e}{m_p} \cdot \omega_e \approx 10^8 \text{ Гц}$$

Напрямок обертання протилежний ($q_e = -q_p$)

Гіроскопічний радіус

$$v = 10^8 \text{ см/с}, \quad B = 10 \text{ кГс}$$

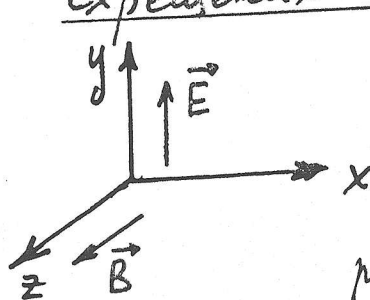
$$R = \frac{v}{\omega} \approx \frac{10^8}{2 \cdot 10^{11}} \text{ см} \approx 5 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 5 \text{ мкм}$$

Для протона — в 1836 раз більший:

$$R \approx (5 \cdot 10^{-4}) \cdot (2 \cdot 10^3) \text{ см} \approx 1 \text{ см}$$

Дрейф заряджених частинок в схрещених ел. і магнітному полях

3



Припускаємо, що:

$$1) \vec{E} \perp \vec{B}$$

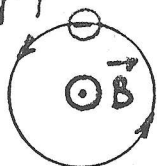
2) Величина полів така, що радіус кривизни траєкторії частинки (R) $\ll$ м. обл.

руху, тобто поле $|\vec{B}|$ велике, тобто частинка в обл. руху здійснює велику кількість обертів.

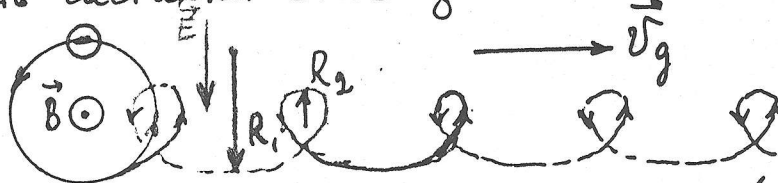
а) У відсутності ел. поля

$$|\vec{E}| = 0$$

$$e < 0$$



б) При накладанні ел. поля $\vec{E} \perp \vec{B}$ швидкість частинки стає змінною:



швидкість зростає, а радіус кривизни (R_1) збільшується (нижні півкола). Коли частинка зміщується в напрямі, протилежному дії ел. поля, - навпаки.

Рух з малим радіусом кривизни відбувається на меншій ділянці траєкторії, в результаті чого за один повний оберт частинка зміщується в напрямі, перпендикулярному як до електр., так і до магнітного поля. Цей рух наз. дрейфом.

$$\vec{v}_d \parallel \vec{Ox}$$

Дрейф можна уявити собі як рух по колу навколо центру, який зміщується з шв. $\vec{v}_d$.

Можна показати (див. Матвеев, с. 240),

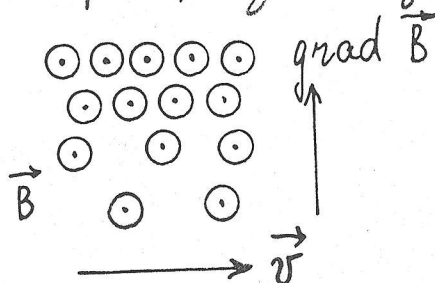
$$\text{що } |\vec{v}_d| = B^{-2} \cdot |[\vec{E} \vec{B}]| = \frac{E}{B}$$

За напрямом $\vec{v}_d \perp \vec{B}$ та $\vec{v}_d \perp \vec{E}$

Величина v_d не залежить від m, q , знаку заряду

Питання: яка складається з протил. ел. м.б., рухається у іт. не розглядаються електрично!

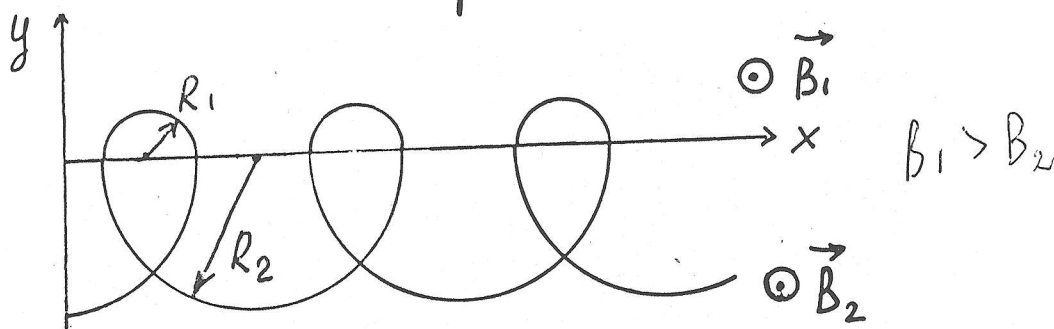
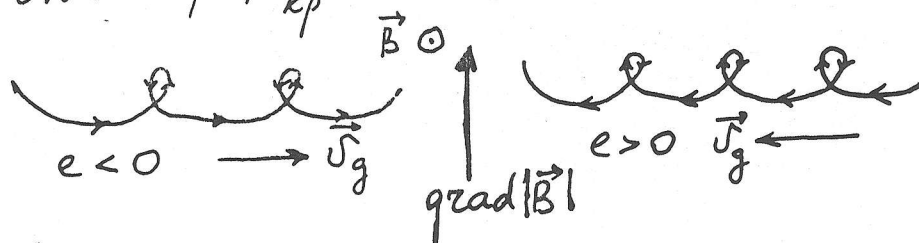
Дрейф у неоднорідному магнітному полі



Через неоднорідність магн. поля радіус кривизни траєкторії під час руху змінюється: Там, де поле

Сильше, $R_{кр}$ менше і навпаки:

$$R = \frac{\gamma}{\frac{e}{m} \cdot B} \sim \frac{1}{B}$$



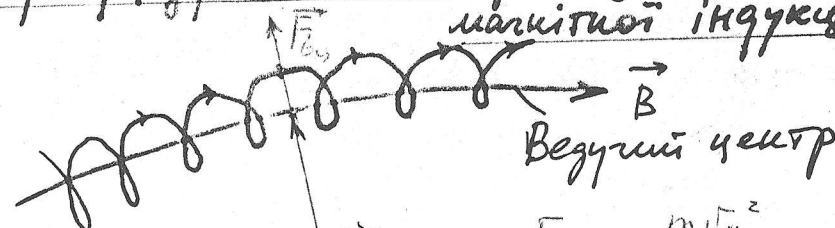
$$v_g = \frac{2}{\pi} v \left(\frac{B_1 - B_2}{B_1 + B_2} \right)$$

Для невеликих $grad B$ (зміна $|B|$ на відстанях $\sim R_{кр}$ мала порівняно з $|B|$).

$$v_g = \frac{E_k}{eB^2} \cdot \frac{\partial B}{\partial y}, \text{ де } E_k = \frac{mv^2}{2}$$

$$\vec{v}_g = \frac{E_k}{eB^2} \left[\frac{\vec{B}}{B} \times grad \vec{B} \right]$$

Дрейф, зумовлений кривизною лінії магнітної індукції



Везучий центр

$$E_{эф} = \frac{F_{ц}}{e}$$

$$F_{ц} = \frac{mv_{||}^2}{R} = e E_{эф}$$

$$v_g = \frac{E_{эф}}{B} = \frac{mv_{||}^2}{eBR} = \frac{v_{||}^2}{\omega R}$$

Рух частинки нагадує в схрещених полях: $E_{эф}$ та B

Магнітний момент зарядженої частинки 5

Для колового струму
силою I магн. мом $M = I \cdot S$

де S - площа, яку обтікає струм.

Для частинки: $M = \frac{I \hbar}{2m} \cdot \pi R^2$

$$T = \frac{2\pi R}{v_{\perp}} ; \quad R = \frac{\hbar}{m v_{\perp}} \leftarrow (\text{див. вище})$$

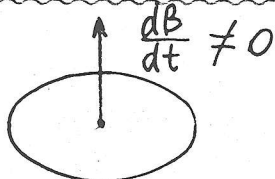
$$\text{Тоді } M = \frac{m v_{\perp}^2}{2B} = \frac{E_{k\perp}}{B}$$

де $E_{k\perp}$ - кін. ен., яка віднобиться складовій шв. в перпенд. до B площині.

Адіабатична інваріантність магн. мом.

- 1) адіабатичне $\equiv$ повільне;
- 2) інваріантність $\equiv$ збереження значення в ш. полях, які повільно змінюються або в часі, або в просторі.

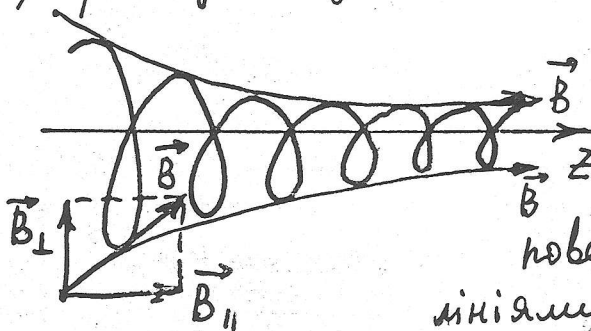
а) Зміна ш. поля в часі



Можна показати (див. Матвеев, с. 243), що

$$M = \text{const}$$

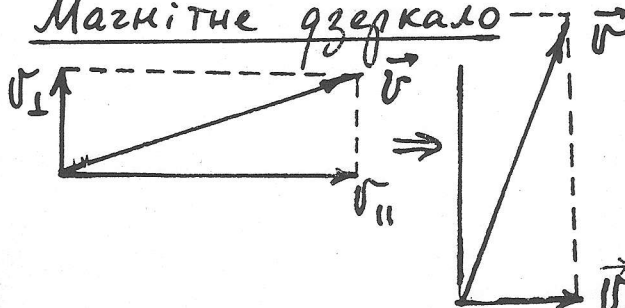
б) Просторова зміна магн. поля



Частинка рухається по поверхні магнітної трубки - поверхні, утвореної лініями магнітної індукції

Див. Матвеев, с. 224-225: $M = \text{const}$

Магнітне дзеркало



$$1) |\vec{v}| = \text{const}$$

$$2) M = \text{const}; \quad M = \frac{m v_{\perp}^2}{2B}$$

$$3) v_{\perp} \uparrow, \text{ а } v_{\parallel} \downarrow$$

Частинка гальмується

аж до $v_{\parallel} = 0$

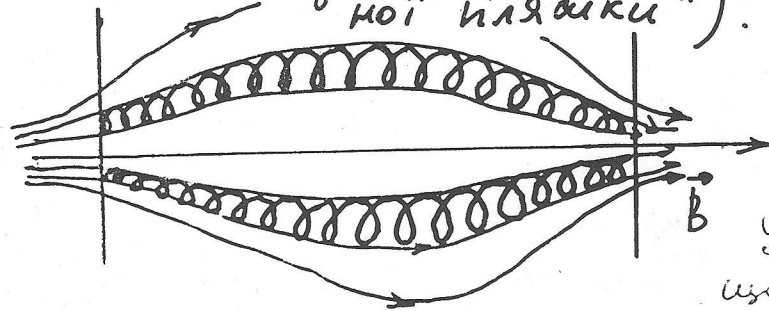
Рух частинки відбувається в області зростаючого магнітного поля.

Швидкість частинки уздовж пол. зменшується:

$$v_{\parallel} \downarrow$$

$$B \uparrow \Rightarrow v_{\perp} \uparrow$$

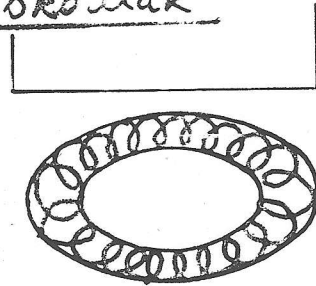
Магнітні ловушки ("Пробки магнітної пляшки").



Проблема високорисання в керуванні термояд. синтезу - тривалий (визначений) час).

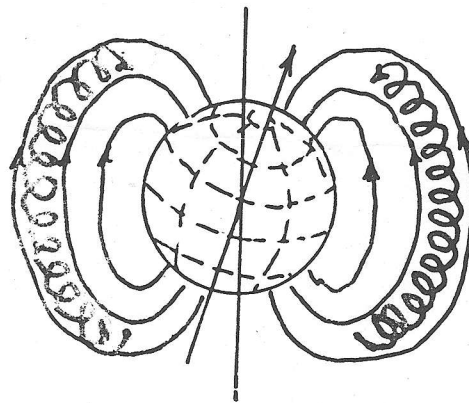
Ускладнення гідру те що частинки взаємодіють між собою.

"Токомак"



Тороїдальне магнітне поле утримує заряджену частинку

Радіаційні пояси Землі



Біля полюсів Землі відбувається згущення магнітних силових ліній. Тоді - підсилення B . На полюсах - ефект магнітних дзеркал.

1. Елементи електронної оптики (електронне дзеркало, заломлення та фокусування ел-ного променя, електронний мікроскоп, магнітне фокусування)
2. Лінійний резонансний прискорювач
3. Циклотрон
4. Електростатичний генератор
5. Рух заряджених частинок у змінних електричному та магн. полях
6. Циклотронний резонанс