

Заняття (практичне) № 19

Тема: ЕЛЕКТРОДИНАМІКА. Сила Лоренца.

Усі ви чули про Великий адронний колайдер, розташований на кордоні Швейцарії і Франції на глибині 100 м. Великий — тому що довжина його основного кільця становить близько 27 км; *колайдер* (англ. *collide* — зіштовхуватися) — тому що основне його завдання — розганяти *адрони* (а саме протони) та йони до швидкостей, які наближаються до швидкості світла, і влаштовувати їхні зіткнення. Як прискорити заряджені частинки, чому прискорювач має форму кільця і до чого тут магнітне поле?

Як визначити силу Лоренца

Магнітне поле діє на провідник зі струмом із певною силою — силою Ампера: $F_A B l = \sin \alpha$. Оскільки електричний струм — це напрямлений рух заряджених частинок, виникнення сили Ампера є результатом дії магнітного поля на окремі заряджені частинки, що рухаються в провіднику.

Силу, з якою магнітне поле діє на рухому заряджену частинку, називають силою Лоренца.

Ця сила названа на честь нідерландського фізика *Гендріка Антона Лоренца* (1853–1928), який вивів формулу для її обчислення. Для визначення модуля сили Лоренца (див. рис. 12.1) знайдемо силу Ампера, яка припадає на кожен із заряджених частинок, що створюють струм у провіднику: $F_L = \frac{F_A}{N} = \frac{B l \sin \alpha}{N}$.

Кількість N частинок дорівнює добутку їх концентрації n на об'єм V провідника:

$N = nV = nSl$. Силу струму в провіднику можна визначити за формулою $I = |q| nvS$.

Отже, $F_L = \frac{B \cdot |q| \cdot n \cdot v \cdot S \cdot l \sin \alpha}{nSl}$. Після скорочення на nSl отримуємо **формулу для визначення модуля сили Лоренца:**

$$F_L = |q| B v \sin \alpha$$

де α — кут між напрямком руху частинки та напрямком магнітної індукції магнітного поля.

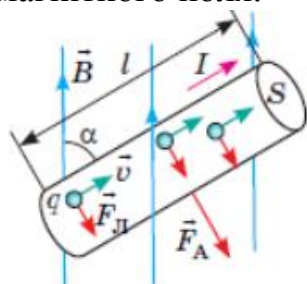


Рис. 12.1. До визначення модуля сили Лоренца: q — заряд частинки; \vec{v} — швидкість руху частинки; \vec{F}_L — сила Лоренца; S — площа поперечного перерізу провідника; l — довжина провідника

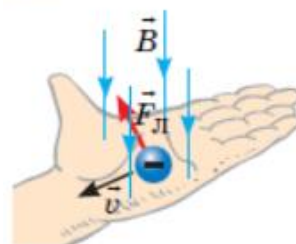
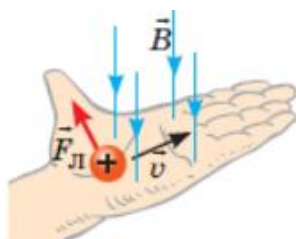
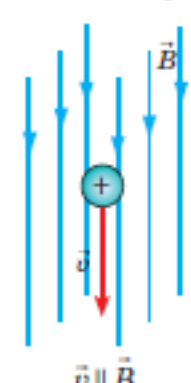
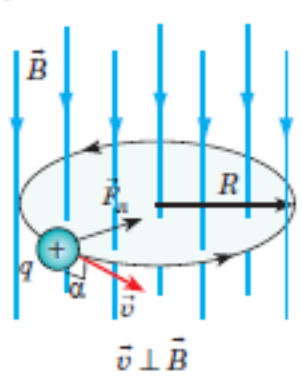
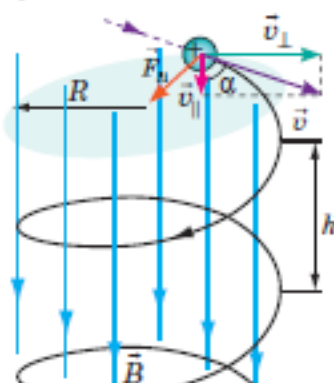


Рис. 12.2. Визначення напрямку сили Лоренца за допомогою лівої руки

Напрямок сили Лоренца визначають за правилом лівої руки: лінії магнітної індукції «ловимо» в долоню, чотири витягнуті пальці спрямовуємо за напрямком руху позитивно зарядженої частинки (або протилежно до руху негативно зарядженої), і тоді відігнутий на 90° великий палець вкаже напрямок сили Лоренца (рис. 12.2).

Як рухаються заряджені частинки під дією сили лоренца

Сила Лоренца завжди перпендикулярна до швидкості руху частинки, тому вона не виконує роботу і не змінює кінетичну енергію частинки, — під дією сили Лоренца заряджена частинка рухається рівномірно. Проте траєкторія руху частинки буде різною — залежно від того, під яким кутом частинка влетіла в магнітне поле і чи є магнітне поле однорідним.

Можливі випадки руху зарядженої частинки в однорідному магнітному полі		
<p>1. Частинка влітає в магнітне поле паралельно лініям магнітної індукції.</p>  <p style="text-align: center;">$\vec{v} \parallel \vec{B}$</p>	<p>2. Частинка влітає в магнітне поле перпендикулярно до ліній магнітної індукції.</p>  <p style="text-align: center;">$\vec{v} \perp \vec{B}$</p>	<p>3. Частинка влітає в магнітне поле під деяким кутом α до ліній магнітної індукції.</p> 
<p>У цьому випадку кут α між вектором швидкості \vec{v} і вектором магнітної індукції \vec{B} дорівнює нулю (або 180°).</p> <p>Оскільки $\sin \alpha = 0$, то дорівнює нулю і сила Лоренца:</p> $F_{\text{Л}} = q Bv \sin \alpha = 0.$ <p>Отже, магнітне поле не діє на частинку, тому, якщо немає інших сил, частинка рухатиметься рівномірно прямолінійно вздовж ліній магнітної індукції.</p>	<p>У цьому випадку $\alpha = 90^\circ$ ($\vec{v} \perp \vec{B}$), тому $F_{\text{Л}} = q Bv$, адже $\sin \alpha = 1$. Частинка рухається рівномірно по колу перпендикулярно до ліній магнітної індукції, а сила Лоренца надає частинці доцентрове прискорення $\vec{a}_{\text{дц}}$. За другим законом Ньютона: $F_{\text{Л}} = ma_{\text{дц}}$, тому</p> $ q Bv = m \frac{v^2}{R}.$ <p>Звідси визначимо радіус R траєкторії руху частинки і період T її обертання:</p> $R = \frac{mv}{ q B}; \quad T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{ q B}.$ <p>Період обертання частинки не залежить від швидкості її руху та радіуса траєкторії.</p>	<p>У цьому випадку швидкість \vec{v} руху частинки можна розкласти на дві складові: перша складова \vec{v}_{\parallel} паралельна лініям магнітної індукції поля, вона забезпечує рух частинки вздовж цих ліній; друга складова \vec{v}_{\perp} перпендикулярна до ліній магнітної індукції поля, і поле змушує частинку рухатися по колу з періодом</p> $T = \frac{2\pi R}{v_{\perp}}.$ <p>Таким чином, траєкторія руху частинки — гвинтова лінія, крок h (відстань між сусідніми витками) якої визначається складовою \vec{v}_{\parallel}: $h = v_{\parallel}T$, а радіус витка — складовою \vec{v}_{\perp}: $R = \frac{mv_{\perp}}{ q B}$.</p>

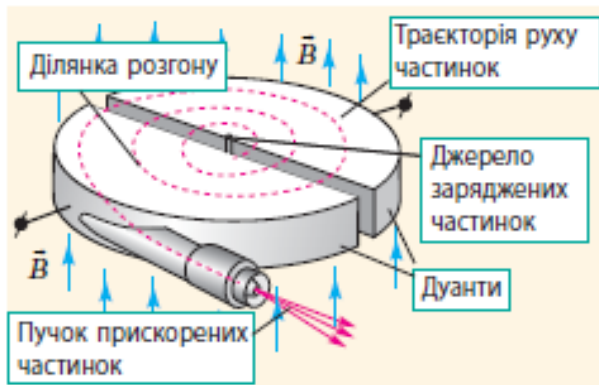


Рис. 12.3. Будова і принцип дії циклотрона — прискорювача важких заряджених частинок (протонів, йонів)

- Частинки, які випромінює джерело, потрапляють усередину дуантів і рухаються по півколах під дією сили Лоренца.
- У проміжку між дуантами частинки розганяються електричним полем.
- Що швидше рухається частинка, то більше півкола вона описує: $R = \frac{mv}{|q|B}$, проте час проходження півкола $t = \frac{T}{2} = \frac{\pi m}{|q|B}$ зі збільшенням швидкості не змінюється.
- Якщо періодично змінювати напругу на дуантах, то частинки, яким «пощастило» потрапити в резонанс, щоразу будуть прискорюватися.

Де застосовують силу Лоренца

Той факт, що період обертання зарядженої частинки в однорідному магнітному полі не залежить ані від швидкості її руху, ані від радіуса траєкторії, використовують у *циклотронах* (рис. 12.3). По суті циклотрон являє собою вакуумну камеру, розміщену між полюсами сильного електромагніту. У камері розташовано два порожнисті металеві півциліндри (дуанти). На дуанти подається змінна напруга, яка періодично прискорює частинки. Період зміни напруги дорівнює періоду обертання частинки в магнітному полі.

На русі зарядженої частинки в однорідному магнітному полі базується дія *мас-спектрометрів* — пристроїв, з а допомогою яких можна виміряти питомий заряд частинки $\frac{|q|}{m}$, а потім її ідентифікувати (див. нижче приклад розв'язування задачі).

Приклад розв'язування задачі

Задача 1. Вузкий пучок позитивно заряджених частинок потрапляє в *селектор швидкостей*, в якому створені взаємно перпендикулярні електричне і магнітне поля (див. рисунок, ділянка 1). Напруженість електричного поля — 10 кН/Кл, магнітна індукція магнітного поля — 40 мТл.

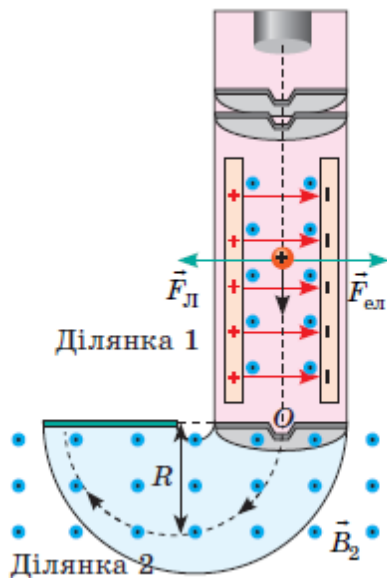
1) З якою незмінною швидкістю повинна рухатися частинка, щоб вийти із селектора через отвір *O*? Для чого, на вашу думку, призначений селектор швидкостей?

2) Потрапивши в магнітне поле *мас-спектрометра* і ндукцією 0,1 Тл, ч астинка описала коло радіусом 52 мм (ділянка 2). Яка це частинка?

Аналіз фізичної проблеми.

1) Щоб вийти із селектора через отвір *O*, частинка повинна рухатися ділянкою 1 рівномірно прямолінійно. Це відбудеться у випадку, коли сили, що діють на частинку, будуть скомпенсовані.

2) У камеру мас-спектрометра частинка влітає перпендикулярно до ліній магнітної індукції і рухається лише під дією сили Лоренца, тому траєкторією руху частинки є коло, а сила Лоренца надає частинці доцентрового прискорення. Скориставшись другим законом Ньютона ($F_{\text{Л}} = ma_{\text{дц}}$) і формулою для визначення сили Лоренца, знайдемо питомий заряд частинки і дізнаємося, що це за частинка (див. Таблицю нижче).



Питомий заряд деяких частинок

Частинка	Питомий заряд $\frac{q}{m}$, $\frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$
Електрон	$1,759 \cdot 10^{11}$
Протон	$9,578 \cdot 10^7$
α -частинка	$4,822 \cdot 10^7$

Дано:

$$E = 10 \cdot 10^3 \text{ Н/Кл}$$

$$B_1 = 40 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$$

$$B_2 = 0,1 \text{ Тл}$$

$$R = 52 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$v - ?$$

$$\frac{q}{m} - ?$$

Пошук математичної моделі, розв'язання.

1) На ділянці 1 на частинку діють дві сили: $F_{\text{ел}} = qE$ — з боку електричного поля; $F_{\text{Л}} = qB_1v$ — з боку магнітного поля.

Ці сили скомпенсовані: $F_{\text{ел}} = F_{\text{Л}}$, тому $qE = qB_1v \Rightarrow v = \frac{E}{B_1}$.

Бачимо, що через отвір O вийдуть тільки ті частинки, швидкість яких відповідає умові $v = \frac{E}{B}$, решта відхилиться. Отже, селектор швидкостей «відбирає» частинки певної швидкості.

2) На ділянці 2: $F_{\text{Л}} = ma_{\text{дц}}$, де $F_{\text{Л}} = qB_2v$; $a_{\text{дц}} = \frac{v^2}{R}$.

Отже, $qB_2v = m \frac{v^2}{R} \Rightarrow \frac{q}{m} = \frac{v}{B_2R}$, де $\frac{q}{m}$ — питомий заряд частинки.

Перевіримо одиниці, знайдемо значення шуканих величин:

$$[v] = \frac{\text{Н}}{\text{Кл} \cdot \text{Тл}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{А} \cdot \text{м}}{\text{Кл} \cdot \text{Н}} = \frac{\text{А} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{с}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad v = \frac{10 \cdot 10^3}{40 \cdot 10^{-3}} = 2,5 \cdot 10^5 \text{ (м/с)};$$

$$\left[\frac{q}{m} \right] = \frac{\text{м}}{\text{с} \cdot \text{Тл} \cdot \text{м}} = \frac{\text{А} \cdot \text{м}}{\text{с} \cdot \text{Н}} = \frac{\text{А} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{с} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}} = \frac{\text{А} \cdot \text{с}}{\text{кг}} = \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}, \quad \frac{q}{m} = \frac{2,5 \cdot 10^5}{0,1 \cdot 52 \cdot 10^{-3}} \approx 4,8 \cdot 10^7 \text{ (Кл/кг)}.$$

За таблицею Додатку 1 бачимо, що це α -частинка.

Відповідь: 1) $v = 250 \text{ км/с}$; 2) α -частинка.