

§ 12. 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, ви зрозумієте, ознайомившись із матеріалом цього параграфа.

1 Як визначити силу Лоренца

Магнітне поле діє на провідник зі струмом із певною силою — силою Ампера: $F_A = BIl \sin \alpha$. 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 кожну із заряджених частинок, що створюють струм у провіднику: $F_{\text{Л}} = \frac{F_A}{N} = \frac{BIl \sin \alpha}{N}$.

Кількість N частинок дорівнює добутку їх концентрації n на об'єм V провідника: $N = nV = nSl$. Силу струму в провіднику можна визначити за формулою $I = |q|nvS$ (див. § 5). Отже, $F_{\text{Л}} = \frac{B \cdot |q|nvS \cdot l \cdot \sin \alpha}{nSl}$. Після скорочення на nSl отримуємо **формулу для визначення модуля сили Лоренца**:

$$F_{\text{Л}} = |q|Bv \sin \alpha,$$

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

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](#)).

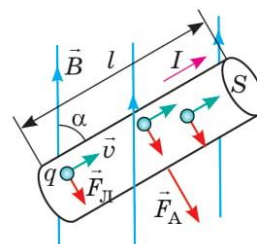


Рис. 12.1. До визначення модуля сили Лоренца: q — заряд частинки; $\vec{v}$ — швидкість руху частинки; $\vec{F}_{\text{Л}}$ — сила Лоренца; S — площа поперечного перерізу провідника; l — довжина провідника

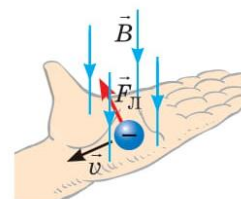
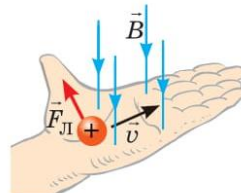


Рис. 12.2. Визначення напрямку сили Лоренца за допомогою лівої руки

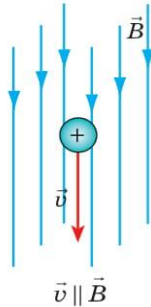
Як ви вважаєте, чому чотири витягнуті пальці спрямовують за напрямком руху позитивно зарядженої частинки, але протилежно до напрямку руху негативно зарядженої частинки.

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

1. Частинка влітає в магнітне поле паралельно ліній магнітної індукції.



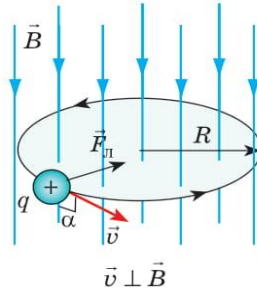
У цьому випадку кут α між вектором швидкості $\vec{v}$ і вектором магнітної індукції $\vec{B}$ дорівнює нулю (або 180°).

Оскільки $\sin \alpha = 0$, то дорівнює нулю і сила Лоренца:

$$F_L = |q| B v \sin \alpha = 0.$$

Отже, магнітне поле не діє на частинку, тому, якщо немає інших сил, частинка рухатиметься рівномірно прямолінійно вздовж ліній магнітної індукції.

2. Частинка влітає в магнітне поле перпендикулярно до ліній магнітної індукції.



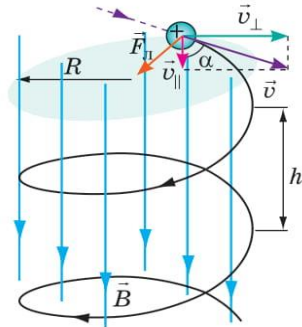
У цьому випадку $\alpha = 90^\circ$ ($\vec{v} \perp \vec{B}$), тому $F_L = |q| B v$, адже $\sin \alpha = 1$. Частинка рухається рівномірно по колу перпендикулярно до ліній магнітної індукції, а сила Лоренца надає частинці доцентрового прискорення $\vec{a}_{\text{дц}}$. За другим законом Ньютона: $F_L = m a_{\text{дц}}$, тому $|q| B v = m \frac{v^2}{R}$.

Звідси визначимо радіус R траєкторії руху частинки і період T її обертання:

$$R = \frac{mv}{|q|B}; \quad T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{|q|B}.$$

Період обертання частинки не залежить від швидкості її руху та радіуса траєкторії.

3. Частинка влітає в магнітне поле під деяким кутом α до ліній магнітної індукції.



У цьому випадку швидкість $\vec{v}$ руху частинки можна розкласти на дві складові:

перша складова $\vec{v}_{\parallel}$ паралельна ліній 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

$$T = \frac{2\pi R}{v_{\perp}}.$$

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 $\vec{v}_{\perp}$: $R = \frac{mv_{\perp}}{|q|B}$.

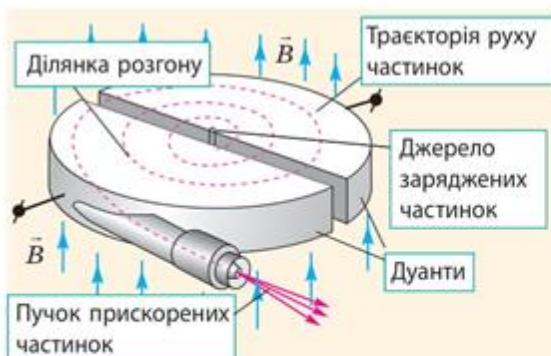


Рис. 12.3. Будова і принцип дії циклотрона — прискорювача важких заряджених частинок (протонів, йонів)

- 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.

3 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.

? Ознайомтесь із принципом дії циклотрона (див. рис. 12.3). Поясніть, чому заряджена частинка прискорюється щоразу, коли рухається у проміжку між дуантами.

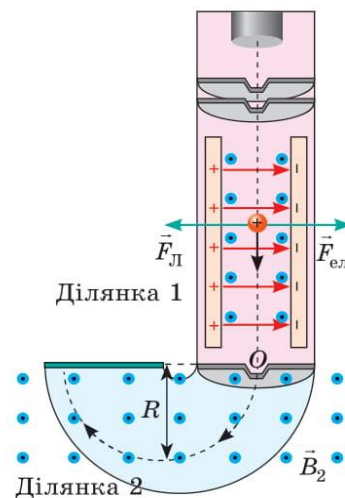
На русі зарядженої частинки в однорідному магнітному полі базується дія *мас-спектрометрів* — пристроїв, за допомогою яких можна виміряти питомий заряд частинки $\frac{|q|}{m}$, а потім її ідентифікувати (див. нижче приклад розв'язування задачі).

4 Учимось розв'язувати задачі

Задача 1. Вузький 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* індукцією 0,1 Тл, частинка 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 ($F_L = ma_{\text{дц}}$) і формулою для визначення сили Лоренца, знайдемо питомий заряд частинки і дізнаємося, що це за частинка (див. Додаток 1).

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; $F_L = qB_1v$ — з боку магнітного поля.

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

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.

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

$$\text{Отже, } qB_2v = m \frac{v^2}{R} \Rightarrow \frac{q}{m} = \frac{v}{B_2 R}, \text{ де } \frac{q}{m} \text{ — питомий заряд частинки.}$$

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.



Підбиваємо підсумки

- Силу, з якою магнітне поле діє на рухому заряджену частинку, називають силою Лоренца. Модуль цієї сили визначають за формулою $F_L = |q|Bv\sin\alpha$, напрямок — за правилом лівої руки.
- В однорідному магнітному полі заряджена частинка рухається рівномірно: якщо початкова швидкість руху частинки напрямлена паралельно лініям магнітної індукції поля, то частинка рухається рівномірно прямолінійно; якщо перпендикулярно до цих ліній — рівномірно по колу радіусом $R = \frac{mv}{|q|B}$; якщо під кутом — рухається рівномірно гвинтовою лінією.



Контрольні запитання

- Дайте означення сили Лоренца. За якою формулою її визначають? Виведіть цю формулу.
- Як визначити напрямок сили Лоренца, яка діє на позитивно заряджену частинку? на негативно заряджену частинку?
- Як рухатиметься заряджена частинка в магнітному полі, якщо її початкова швидкість

направлена паралельно лініям магнітної індукції? перпендикулярно до ліній магнітної індукції? під кутом до ліній магнітної індукції? 4. Виведіть формули для визначення радіуса траєкторії руху та періоду обертання зарядженої частинки в магнітному полі, якщо швидкість її руху перпендикулярна до вектора магнітної індукції поля. 5. Наведіть приклади застосування сили Лоренца.



Вправа № 12

- У циклотронах на заряджену частинку діють і електричне поле, і магнітне поле. Яке поле «відповідає» за збільшення швидкості руху частинки? Яке поле «керує» рухом частинки по колу?
- Визначте: напрямок руху частинки (рис. 1); знак заряду частинки (рис. 2); напрямок магнітного поля, в якому рухається частинка (рис. 3).

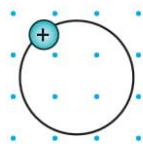


Рис. 1

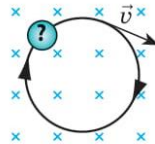


Рис. 2

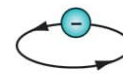


Рис. 3

- Чому дві однойменно заряджені нерухомі частинки завжди відштовхуються, а ті самі частинки, розігнані до величезних швидкостей, можуть як відштовхуватися, так і притягуватися?
- В однорідне магнітне поле індукцією 5,6 мТл протон влітає зі швидкістю $3 \cdot 10^6$ м/с перпендикулярно до ліній магнітної індукції поля. Визначте силу, яка діє на протон, і радіус його траєкторії.
- Електрон починає рух зі стану спокою, проходить прискорювальну різницю потенціалів 125 В і потрапляє в однорідне магнітне поле індукцією 5,0 мТл, де рухається по колу. Визначте радіус цього кола.
- Електрон влітає в однорідне магнітне поле під кутом 60° до ліній магнітної індукції і рухається гвинтовою лінією діаметром 10 см. Визначте швидкість руху електрона, магнітну індукцію поля та крок гвинтової лінії, якщо період обертання електрона 60 мкс.
- Початок космонавтики ознаменувався низкою відкриттів, одним із яких було відкриття радіаційних поясів Землі (рис. 4). Поясніть, чому магнітне поле Землі є «пасткою» для заряджених частинок — частинки ніби накручуються на магнітні лінії планети.

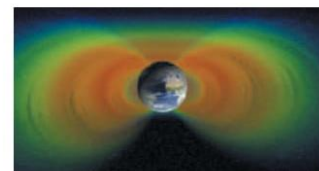


Рис. 4