

26.01.2023

Група 22

Фізика і астрономія

Урок 45-46

Тема: Сила Ампера. Сила Лоренца

Мета:

- Повторити теоретичний матеріал; узагальнити, систематизувати та поглибити знання учнів із теми; застосувати знання з фізики під час розв'язування прикладних задач; формувати уяву про процеси у природі;
- розвивати в учнів пізнавальний інтерес, уміння використовувати набуті знання, навички й уміння в нових ситуаціях; підвищити інтерес до вивчення фізики та астрономії; розвивати абстрактне та логічне мислення;
- виховувати у учнів повагу та зацікавленість до вивчення фізики та астрономії, старанність у навчанні; сприяти розширенню кругозору учнів.

### Матеріали до уроку:



Якщо рамку зі струмом розташувати між полюсами магнітів, рамка повернеться і встановиться перпендикулярно до ліній магнітної індукції поля, створеного магнітами. А як змусити рамку обертатися? Як створити електричний двигун, який, до речі, був винайдений на півсторіччя раніше, ніж двигун внутрішнього згоряння? Чому магнітне поле чинить на рамку зі струмом орієнтувальну дію? Згадаємо і дізнаємося нове.

#### 1 Сила Ампера

Восени 1820 р. А. Ампер, досліджуючи дію магнітного поля на провідники різних форм і розмірів, отримав формулу для визначення сили, що діє на окрему невелику ділянку провідника (на елемент струму). Зараз цю силу називають *силою Ампера*.

**Сила Ампера** — це сила, з якою магнітне поле діє на провідник зі струмом.

Якщо провідник прямолінійний, а магнітне поле, в якому він перебуває, однорідне, то модуль сили Ампера визначають за формулою:

$$F_A = BIl \sin \alpha,$$

де  $B$  — магнітна індукція поля, в якому перебуває провідник;  $I$  — сила струму в провіднику;  $l$  — довжина активної частини провідника;  $\alpha$  — кут між вектором магнітної індукції і напрямком струму (рис. 11.1).

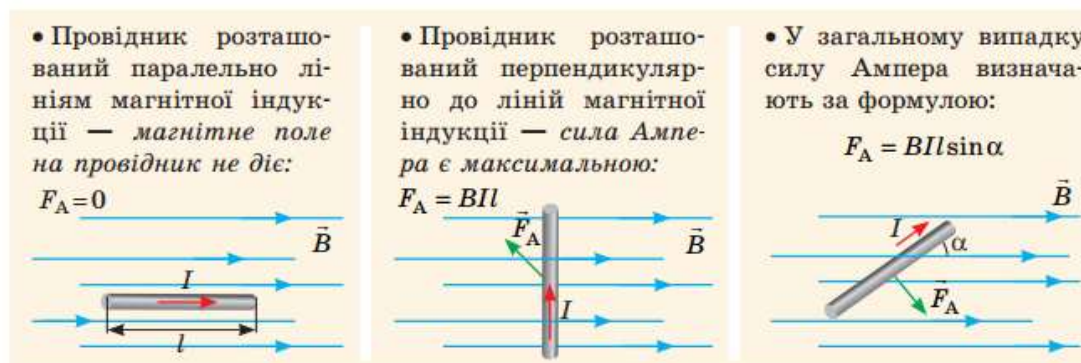


Рис. 11.1. Залежність значення сили Ампера від орієнтації провідника в магнітному полі

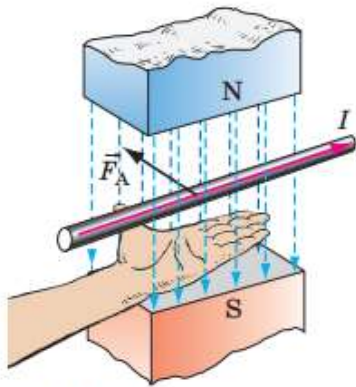


Рис. 11.2. Визначення напрямку сили Ампера за правилом лівої руки

Напрямок сили Ампера визначають за правилом лівої руки (рис. 11.2):

Якщо ліву руку розташувати так, щоб лінії магнітної індукції входили в долоню, а чотири витягнуті пальці вказували напрямок струму в провіднику, то відігнутий на  $90^\circ$  великий палець укаже напрямок сили Ампера.

*Зверніть увагу:* якщо провідник не прямий і (або) магнітне поле неоднорідне, то можна визначити сили Ампера, які діють на невеликі ділянки провідника, а потім геометричним додаванням обчислити силу Ампера, що діє на провідник у цілому.

## 2 Момент сил Ампера, які діють на рамку зі струмом

Візьмемо легку прямокутну рамку зі сторонами  $a$  і  $b$ , яка складається з одного витка дроту, помістимо її в однорідне магнітне поле так, щоб вона могла легко обертатися навколо горизонтальної осі, і пропустимо в рамці струм (рис. 11.3, а). Погойдавшись, рамка установиться перпендикулярно до ліній магнітної індукції (рис. 11.3, б). Знайдемо момент сил Ампера, що діють на рамку в деякий момент часу (рис. 11.3, в). Для цього визначимо напрямок, модуль і плече кожної із сил, що діють на сторони рамки. Бачимо:

1) сили Ампера  $\vec{F}_3$  і  $\vec{F}_4$  не повертають, а лише розтягують рамку — моменти цих сил дорівнюють нулю.

2) сили Ампера  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  повертають рамку проти ходу годинникової стрілки — створюють *обертальний момент*  $M$ :  $M = M_1 + M_2 = F_1 d_1 + F_2 d_2$ . Тут  $F_1 = F_2 = BIa$ , де  $I$  — сила струму,  $a$  — довжина сторони  $AK$  (і  $CD$ );  $d_1 = d_2 = \frac{b}{2} \sin \alpha$ , де  $b$  — довжина сторони  $KC$ ,  $\alpha$  — кут між вектором  $\vec{B}$  магнітної індукції і нормаллю  $n$  до рамки (рис. 11.3, з).

Отже:  $M = BIa \frac{b}{2} \sin \alpha + BIa \frac{b}{2} \sin \alpha = BIS \sin \alpha$ , де  $S = ab$  — площа рамки.

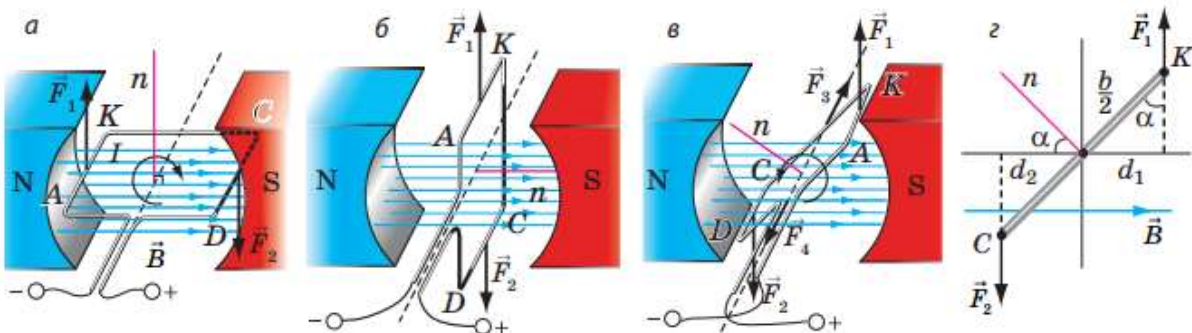


Рис. 11.3. Дослідження дії магнітного поля на рамку зі струмом: а — сили Ампера  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  повертають рамку  $AKCD$  за ходом годинникової стрілки; б — у положенні рівноваги сили Ампера не повертають рамку, а розтягують; в — сили Ампера повертають рамку проти ходу годинникової стрілки

**Момент сил Ампера**, які діють на плоский замкнений контур, розташований в однорідному магнітному полі, дорівнює добутку модуля магнітної індукції поля, сили струму в контурі, площі контуру і синуса кута  $\alpha$  між вектором магнітної індукції та нормаллю до площини контуру:

$$M = BIS \sin \alpha$$

*Зверніть увагу:*

1) якщо *рамка розташована паралельно лініям магнітної індукції* ( $\alpha = 90^\circ$ ), то обертальний момент найбільший ( $\sin \alpha = 1$ ):  $M_{\max} = BIS$  (див. [рис. 11.3, а](#)); якщо *рамка розташована перпендикулярно до ліній магнітної індукції* ( $\alpha = 0$ ), то обертальний момент дорівнює нулю ( $\sin \alpha = 0$ ), — це положення стійкої рівноваги рамки (див. [рис. 11.3, б](#)).

2) якщо *рамка містить  $N$  витків дроту*, обертальний момент розраховують за формулою:

$$M = NBIS \sin \alpha$$

### 3 Де застосовують силу Ампера

Обертання рамки зі струмом у магнітному полі використовують в **електричних двигунах** — пристроях, в яких *електрична енергія перетворюється на механічну*.

Повернемося до [рис. 11.3](#). Бачимо, що сили Ампера спочатку повертають рамку в одному напрямку ([рис. 11.3, а](#)), а після проходження положення рівноваги — в протилежному ([рис. 11.3, в](#)). Тому рамка дуже швидко зупиняється в положенні рівноваги. Щоб рамка не зупинялась і оберталась в одному напрямку, застосовують **колектор** — пристрій, який *автоматично змінює напрямок струму в рамці* ([рис. 11.4](#)). Півкільця колектора обертаються разом із рамкою, а щітки залишаються нерухомими, тому після проходження положення рівноваги до щіток притискаються вже інші півкільця. Напрямок струму в рамці змінюється на протилежний, а напрямок обертання рамки не змінюється.

Зрозуміло, що обертальний момент, який створюють сили Ампера в рамці, зображеній на [рис. 11.4](#), є дуже малим, тому потужність такого «двигуна» незначна.

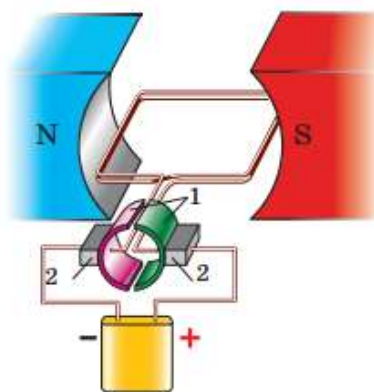
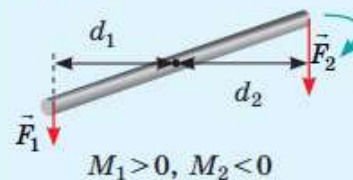
### Нагадаємо

• **Момент сили  $M$**  — це фізична величина, яка характеризує обертальний ефект сили і дорівнює добутку сили  $F$  на плече  $d$  сили:

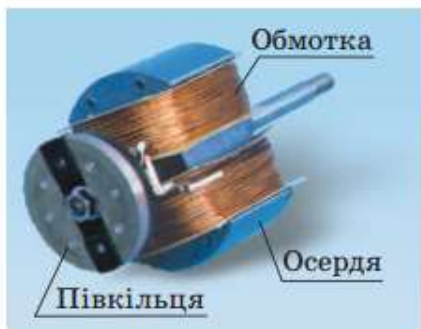
$$M = F \cdot d; [M] = \text{Н} \cdot \text{м}.$$

• **Плече сили  $d$**  — це відстань від осі обертання до лінії дії сили.

• Момент сили вважають *додатним*, якщо сила повертає (або намагається повернути) тіло проти ходу годинникової стрілки, і *від'ємним*, якщо сила повертає тіло за ходом годинникової стрілки.



**Рис. 11.4.** Колектор являє собою два провідних півкільця (1), до кожного з яких притиснута металева щітка (2); щітки з'єднані з полюсами джерела струму



**Рис. 11.5.** Ротор двигуна (від латин. *rotare* — обертатися), який містить одну обмотку

Для збільшення обертового моменту ( $M = NBIS \sin \alpha$ ) у реальних електродвигунах:

1) *обмотку* обертової частини двигуна — *ротора* (від латин. *rotare* — обертатися) — виготовляють із великої кількості витків дроту, які вкладають у спеціальні пази на бічній поверхні *осердя* — циліндра, виготовленого з листів магнітноякої сталі (рис. 11.5);

2) використовують кілька обмоток, які намотують на одне осердя; колектор такого двигуна має низку мідних дугоподібних контактних пластин, закріплених на ізолюваному барабані, і кожна обмотка з'єднана з однією парою пластин;

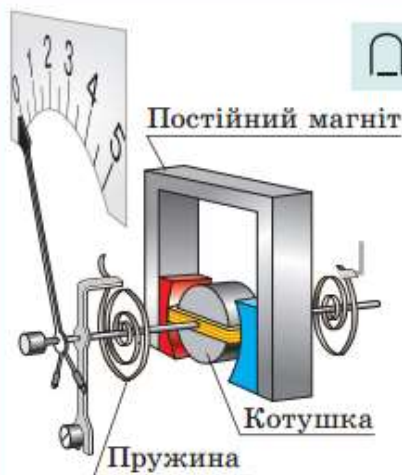
3) замість постійного магніту використовують електромагніт, який становить одне ціле з корпусом електродвигуна та слугує *статором* (від латин. *stator* — той, що стоїть нерухомо). Обмотка статора підключена до того самого джерела струму, що й обмотка ротора.

#### Електровимірювальні прилади магнітоелектричної та електродинамічної систем

У цих приладах використовують залежність обертового моменту, створеного силами Ампера, від сили струму в рамці.

Коли прилад вмикають у коло, в рамці починає йти струм і внаслідок дії сил Ампера рамка повертається в магнітному полі магніту. Разом із рамкою повертається стрілка й одночасно закручуються спіральні пружини. Коли момент сил Ампера зрівноважується моментом сил пружності, рух стрілки припиняється, проте вона залишається відхиленою. Чим більша сила струму в рамці, тим на більший кут відхилиться стрілка.

У приладах *електродинамічної системи* замість постійного магніту застосовують *електромагніт*.

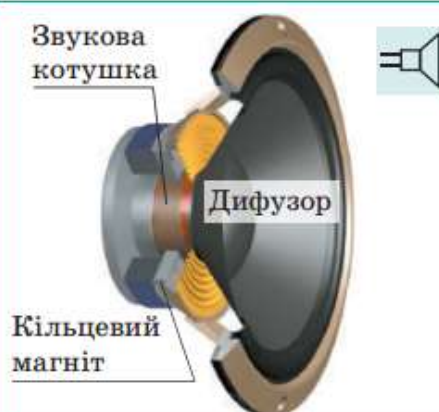


Вимірювальний механізм приладів магнітоелектричної системи

#### Електродинамічний гучномовець (динамік)

У динаміку сила Ампера, що діє на витки котушки, змушує котушку втягуватись у кільцевий магніт. Коли сила струму в котушці змінюється зі звуковою частотою, так само змінюється й сила Ампера — котушка коливається в такт зміні сили струму. Разом із котушкою коливається і прикріплений до неї дифузор, який «штовхає» повітря, створюючи звукову хвилю, — гучномовець випромінює звук.

До речі, поширені зараз *наушники* — це саме *електродинамічні випромінювачі звуку*.



#### 4 Учимся розв'язувати задачі

**Задача.** Щоб визначити магнітну індукцію магнітного поля, створеного підковоподібним магнітом, учні за допомогою проводів підвісили між полюсами магніту алюмінієвий провідник завдовжки 8 см і масою 6 г (див. рис. 1). Коли в провіднику йшов струм силою 3 А, провідник відхилився на кут  $45^\circ$  від вертикалі. Який результат отримали учні? Магнітне поле на ділянці, де розташований провідник, вважайте однорідним і вертикальним.

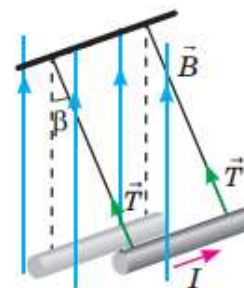


Рис. 1

**Аналіз фізичної проблеми.** Провідник відхиляється внаслідок дії сили Ампера, напрямком якої визначимо за правилом лівої руки. Провідник горизонтальний, а магнітне поле вертикальне, тому кут  $\alpha$  між напрямком струму та вектором магнітної індукції становить  $90^\circ$ . Зважаючи на те що сили, які діють на провідник, скомпенсовані, визначимо магнітну індукцію поля.

Дано:

$$l = 8 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$m = 6 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$I = 3 \text{ А}$$

$$\beta = 45^\circ$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$B = ?$

**Пошук математичної моделі, розв'язання.**

На провідник діють чотири сили: сила тяжіння, дві сили натягу проводів і сила Ампера (рис. 2). Запишемо рівняння другого закону Ньютона у векторному вигляді та в проекціях на осі координат:

$$\vec{F}_A + m\vec{g} + 2\vec{T} = 0;$$

$$\begin{cases} OX: F_A - 2T \sin \beta = 0, \\ OY: 2T \cos \beta - mg = 0, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 2T \sin \beta = F_A, \\ 2T \cos \beta = mg. \end{cases}$$

Поділивши перше рівняння системи

$$\text{на друге, маємо: } \frac{\sin \beta}{\cos \beta} = \frac{F_A}{mg}, \text{ або } \operatorname{tg} \beta = \frac{F_A}{mg},$$

де  $F_A = BIl \sin \alpha = BIl$ , оскільки  $\alpha = 90^\circ$ .

$$\text{Отже, } \operatorname{tg} \beta = \frac{BIl}{mg} \Rightarrow B = \frac{mg \operatorname{tg} \beta}{Il}.$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[B] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м/с}^2}{\text{А} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = \text{Тл}; \quad B = \frac{6 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot \operatorname{tg} 45^\circ}{3 \cdot 8 \cdot 10^{-2}} = 0,25 \text{ (Тл)}.$$

**Відповідь:**  $B = 0,25 \text{ Тл}$ .

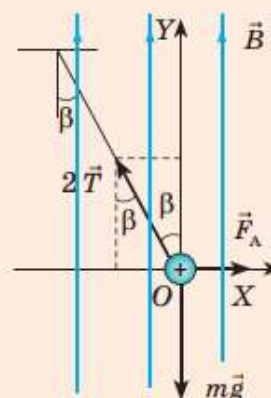


Рис. 2

## 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:

$$F_L = \frac{F_A}{N} = \frac{BIl \sin \alpha}{N}.$$

Кількість  $N$  частинок дорівнює добутку їх концентрації  $n$  на об'єм  $V$  провідника:  $N = nV = nSl$ . Силу струму в провіднику можна визначити за формулою

$$I = |q|nvS \text{ (див. § 5)}. \text{ Отже, } F_L = \frac{B \cdot |q|nvS \cdot l \cdot \sin \alpha}{nSl}.$$

Після скорочення на  $nSl$  отримуємо **формулу для визначення модуля сили Лоренца**:

$$F_L = |q|Bv \sin \alpha,$$

де  $\alpha$  — 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  $90^\circ$  великий палець вкаже напрямок сили Лоренца (рис. 12.2).

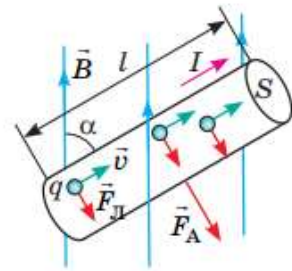


Рис. 12.1. До визначення модуля сили Лоренца:  $q$  — заряд частинки;  $\vec{v}$  — швидкість руху частинки;  $\vec{F}_L$  — сила Лоренца;  $S$  — площа поперечного перерізу провідника;  $l$  — довжина провідника

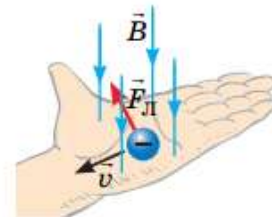
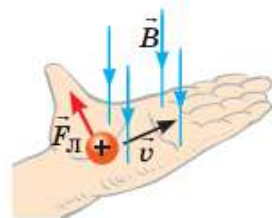


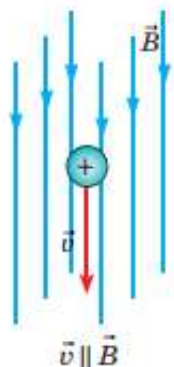
Рис. 12.2. Визначення напрямку сили Лоренца за допомогою лівої руки

## 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 лініям магнітної індукції.



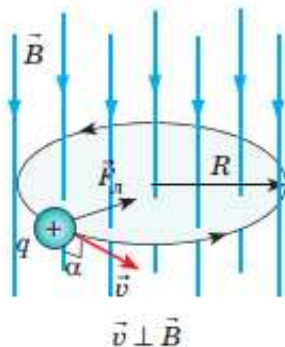
У цьому випадку кут  $\alpha$  між вектором швидкості  $\vec{v}$  і вектором магнітної індукції  $\vec{B}$  дорівнює нулю (або  $180^\circ$ ).

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

$$F_L = |q|Bv\sin\alpha = 0.$$

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.



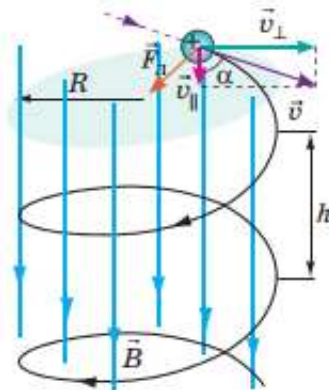
У цьому випадку  $\alpha = 90^\circ$  ( $\vec{v} \perp \vec{B}$ ), тому  $F_L = |q|Bv$ , адже  $\sin\alpha = 1$ . Частинка рухається рівномірно по колу перпендикулярно до ліній магнітної індукції, а сила Лоренца надає частинці доцентрового прискорення  $\vec{a}_{\text{дц}}$ . За другим законом Ньютона: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

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  $\alpha$  до ліній магнітної індукції.



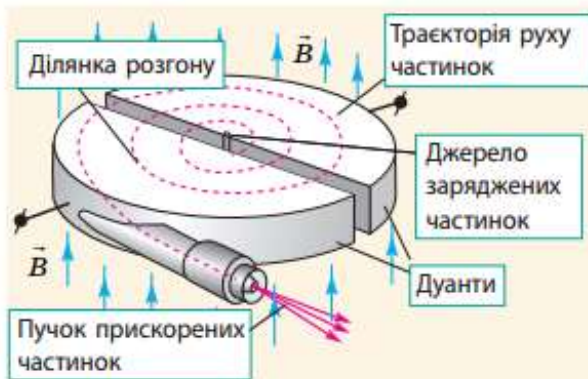
У цьому випадку швидкість  $\vec{v}$  руху частинки можна розкласти на дві складові:

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

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

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 ні від швидкості її руху, ні 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).

**Домашнє завдання:** надіслати відповіді на запитання

### Контрольні запитання

1. Дайте означення сили Ампера. За якою формулою її розраховують? Як визначають її напрямок?
2. Виведіть формулу для визначення моменту сил Ампера, що діють на рамку зі струмом з боку магнітного поля. За якого положення рамки момент сил дорівнює нулю? є максимальним?
3. Опишіть принцип дії електричного двигуна постійного струму.
4. Опишіть будову та принцип дії вимірювальних приладів магнітоелектричної системи; електродинамічного гучномовця.

**Зворотній зв'язок:**

**E-mail** [t.anastasia.igorivna@gmail.com](mailto:t.anastasia.igorivna@gmail.com)