

31.03.2023

Група 24

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; α — кут між вектором магнітної індукції і напрямком струму (рис. 11.1).

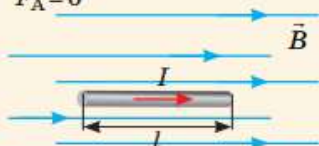
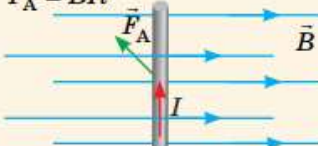
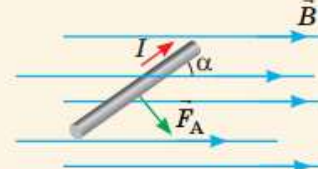
<ul style="list-style-type: none">• Провідник розташований паралельно лініям магнітної індукції — магнітне поле на провідник не діє: $F_A = 0$ 	<ul style="list-style-type: none">• Провідник розташований перпендикулярно до ліній магнітної індукції — сила Ампера є максимальною: $F_A = BI l$ 	<ul style="list-style-type: none">• У загальному випадку силу Ампера визначають за формулою: $F_A = BIl \sin \alpha$ 
---	--	--

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

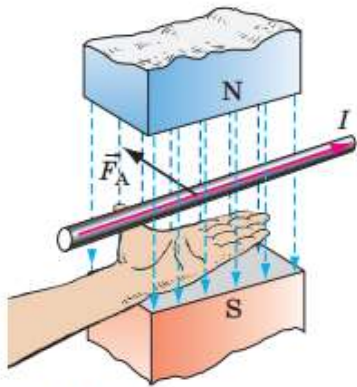


Рис. 11.2. Визначення напрямку сили Ампера за правилом лівої руки

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° 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 $F_1 = F_2 = B I a$, де I — сила струму, a — довжина сторони AK (і CD); $d_1 = d_2 = \frac{b}{2} \sin \alpha$, де b — довжина сторони KC , α — кут між вектором \vec{B} магнітної індукції і нормаллю n до рамки (рис. 11.3, г).

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

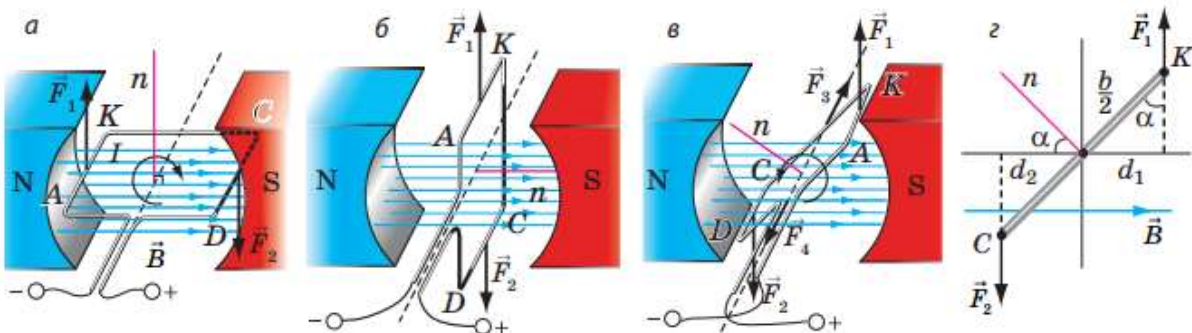


Рис. 11.3. Дослідження дії магнітного поля на рамку зі струмом: а — сили Ампера \vec{F}_1 і \vec{F}_2 повертають рамку $AKCD$ за ходом годинникової стрілки; б — у положенні рівноваги сили Ампера не повертають рамку, а розтягують; в — сили Ампера повертають рамку проти ходу годинникової стрілки

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 α 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 притискуються 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.

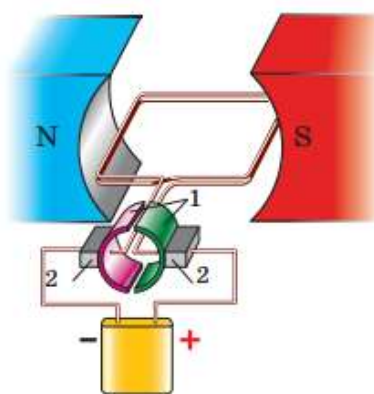
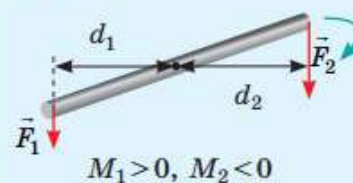


Рис. 11.4. Колектор являє собою два провідних півкільця (1), до кожного з яких притиснута металева щітка (2); щітки з'єднані з полюсами джерела струму

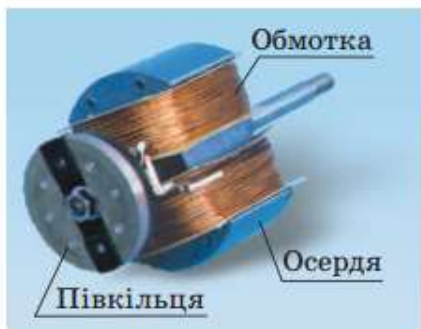


Рис. 11.5. Ротор двигуна (від латин. *rotare* — обертатися), який містить одну обмотку

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 магнітної сталі (рис. 11.5);

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

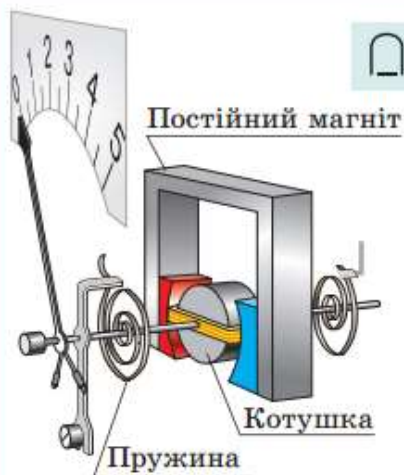
3) замість постійного магніту використовують електромагніт, який становить одне ціле з корпусом електродвигуна та слугує *статором* (від латин. *stator* — той, що стоїть нерухомо). Обмотка статора підключена до того самого джерела струму, що й обмотка ротора.

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*.

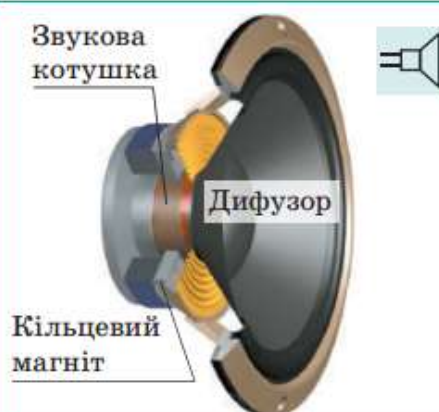


Вимірювальний механізм приладів магнітоелектричної системи

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° від вертикалі. Який результат отримали учні? Магнітне поле на ділянці, де розташований провідник, вважайте однорідним і вертикальним.

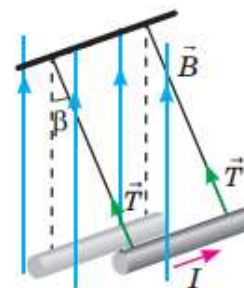


Рис. 1

Аналіз фізичної проблеми. Провідник відхиляється внаслідок дії сили Ампера, напрямком якої визначимо за правилом лівої руки. Провідник горизонтальний, а магнітне поле вертикальне, тому кут α між напрямком струму та вектором магнітної індукції становить 90° . 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: $B = 0,25 \text{ Тл}$.

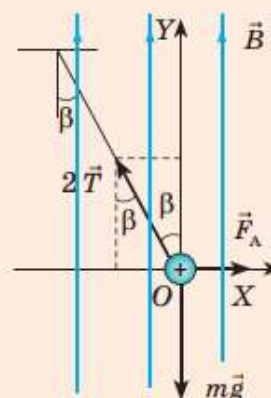


Рис. 2

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 рухоми 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 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).

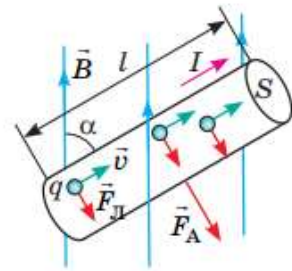


Рис. 12.1. До визначення модуля сили Лоренца: q — заряд частинки; \vec{v} — швидкість руху частинки; \vec{F}_L — сила Лоренца; S — площа поперечного перерізу провідника; l — довжина провідника

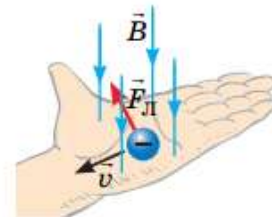
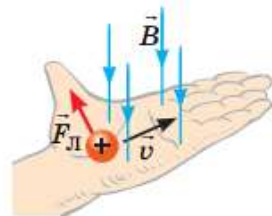


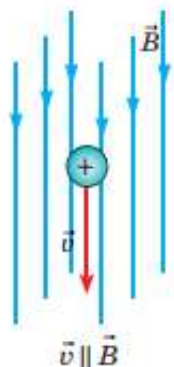
Рис. 12.2. Визначення напрямку сили Лоренца за допомогою лівої руки

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.



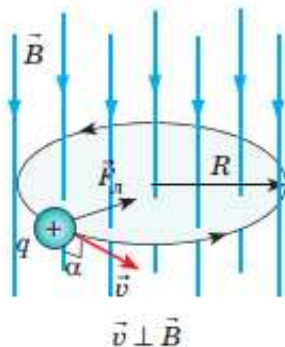
У цьому випадку кут α між вектором швидкості \vec{v} і вектором магнітної індукції \vec{B} дорівнює нулю (або 180°).

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

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

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.



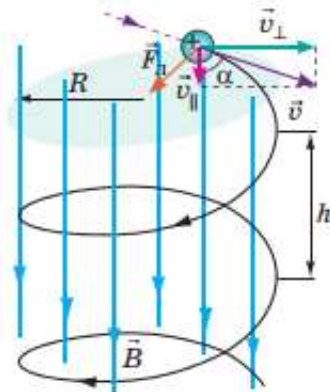
У цьому випадку $\alpha = 90^\circ$ ($\vec{v} \perp \vec{B}$), тому $F_L = |q|Bv$, адже $\sin\alpha = 1$. Частинка рухається рівномірно по колу перпендикулярно до ліній магнітної індукції, а сила Лоренца надає частинці доцентрового прискорення $\vec{a}_{\text{дц}}$. За другим законом Ньютона: $F_L =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

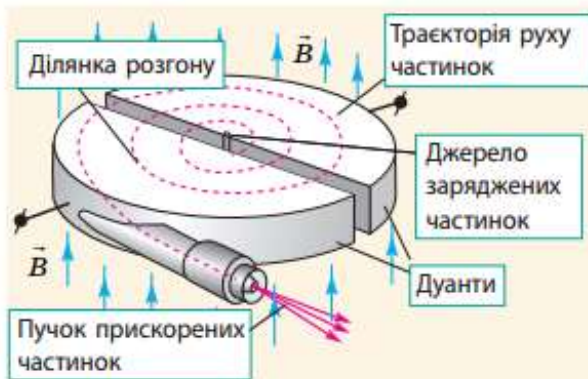


Рис. 12.3. Будова і принцип дії циклотрона — прискорювача важких заряджених частинок (протонів, йонів)

- 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 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).

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