

Яблочкова К.С.

"Фізика з основами геофізики"

Конспект лекцій для студентів географічного
факультету.

Цей посібник є конспектом лекцій, що читаються в межах курсу "Фізика з основам геофізики" для студентів географічного факультету – 12 академічних годин лекцій і 24 академічні години практичних занять. Метою курсу є ознайомлення студентів з основними ідеями фізики, даючи одночасно певне поняття про роль математики у описах цих ідей, та про застосування законів фізики у геофізичних дослідженнях.

Зміст

Лекція 1: Вступ. Вимірювання у фізиці. Кінематика.....	4
Лекція 2: Закони Ньютона. Сили в природі. Закони збереження. ..	17
Лекція 3: Молекулярна фізика	35
Лекція 4: Електрика.....	49
Лекція 5: Магнетизм та електромагнетизм	58
Лекція 6: Оптика.....	71
Лекція 7: Фізика атома.....	83

Лекція 1: Вступ. Вимірювання у фізиці. Кінематика.

Академічний тлумачний словник української мови визначає фізику як "науку про будову, загальні властивості та закони руху матерії". Що при цьому мається на увазі? Фізика вивчає Всесвіт: з чого він складається, як його можна описати, як він себе поводить. Фізика намагається відповісти на велику кількість питань.

- Як почався Всесвіт?
- Як рухаються планети?
- Чому виникає веселка?
- Чому метал проводить струм, а дерево – ні?
- Яка найменша можлива часточка речовини?

Як ми дізнаємося відповіді на ці питання? Це можливо лише шляхом проведення наукового дослідження. Кожне наукове дослідження складається з наступних кроків.

- 1) Спостереження. Спостереження навколишнього світу. Визначення чогось, про що науковці хочуть дізнатися більше.
- 2) Пошук. Огляд наявних на даний час робіт інших дослідників.
- 3) Постановка питання. Науковці формулюють питання, на які можна відповісти за допомогою експерименту.
- 4) Формулювання гіпотези. Гіпотеза – це твердження, яке може бути перевірено за допомогою експерименту.
- 5) Планування експерименту. Воно включає в себе вибір методів і матеріалів, визначення різних видів змінних, планування стадій експерименту.
- 6) Збір даних. На цьому етапі проводиться експеримент, виміри обов'язково проводяться декілька разів.
- 7) Формулювання висновків. Науковці аналізують данні. Вони вирішують: підтвердилася гіпотеза чи ні. Якщо ні, має бути висунута нова гіпотеза.

8) Комунікація. Результати дослідження і процедура його проведення мають бути презентовані так, щоб інші вчені могли повторити експеримент і порівняти отримані результати.

Якщо гіпотеза підтверджується багатократно, ми називаємо її **правилом** чи **законом**. Наприклад, відомі вам зі школи закони Ньютона – результат узагальнень багатьох експериментальних даних. Сукупність законів в певній області можуть бути узагальнені в **теорію**.

Як формуються закони? Іноді їх можна сформулювати якісно, словами. Наприклад, закон Бера стверджує, що "Всі річки, що течуть в меридіональному напрямі, в Північній півкулі підмивають правий берег, а в Південній — лівий." Однак такий опис природи недосконалий. Як сильно підмивається річка? Які річки швидше підмивають берег? – на ці питання закон Бера не дає нам відповіді. Тому фізики користуються мовою математики. Це дозволяє сформулювати закон коротко і кількісно. Ось вираз для сили \vec{F} , що діє на річку маси m , яка рухається зі швидкістю \vec{v} по поверхні Землі, яка, в свою чергу, обертається з кутовою частотою $\vec{\omega}$:
$$\vec{F} = 2m[\vec{\omega} \times \vec{v}].$$

Як бачите, для формулювання фізичних законів необхідно бути знайомим з математичним поняттям «вектор» і «векторний добуток». Деякі закони ще більш складні: для їх математичного опису необхідно використовувати елементи вищої математики, диференційне чи інтегральне числення. Наприклад, як знайти масу об'єкта, чия густина в різних частинах об'єму – різна? Замість відомого зі школи виразу $m = \rho \times V$, необхідно просумувати добутки малих часток об'єкта об'ємами dV , кожна, з яких має свою густину $\rho(V)$: $m = \int \rho dV$.

Світ навколо нас неймовірно різноманітний і складний, тому для його опису фізики користуються моделями – тобто спрощеними уявленнями про реальність.

Візьмемо, наприклад, поняття матеріальної точки. **Матеріальна точка** – об'єкт, розмірами якого нехтують. Так, можна вважати, що автомобіль, що рухається по дорозі від Києва до Одеси, – матеріальна точка, бо розміри автомобіля малі по відношенню до відстані між містами. Навіть великі об'єкти, такі як планета Земля, в певних умовах можуть вважатися матеріальними точками (якщо ми розглядаємо, наприклад, рух Землі навколо сонця).

Особливо важливою задачею є коректне представлення результатів дослідження. Уявимо, що декілька студентів проводило вимірювання довжини одного і того ж зошиту лінійками і отримали такі значення: 22,1 см, 22,0 см, 22,0 см та 22,3 см. Як записати довжину лінійки? 22,0 см – бо це найчастіше отримане значення? [22,0; 22,3] см? Якою ж є довжина зошита насправді?

Інструменти і органи чуття людини недосконалі, а отже треба оцінювати точність вимірів. Так, у 1999 році Національне Географічне Товариство США за допомогою системи GPS оцінило висоту Евересту як $8.850 \text{ м} \pm 2 \text{ м}$. У 2005 урядом Китаю була оприлюднена інша оцінка, $8.844,43 \pm 0,21 \text{ м}$. В обох випадках виміряна величина подається з урахуванням похибки вимірювання.

Ось як можна оцінити похибку вимірювання.

Нехай x – істинне значення вимірюваної величини, а x_m – виміряне значення цієї ж величини. Введемо поняття **абсолютної похибки вимірювання** $\Delta x = x - x_m$

Та відносної похибки вимірювання $\delta x = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% = \frac{x - x_m}{x_m} \times 100\%$.

Похибка прямих вимірювань має дві складові: систематичну і випадкову.

Систематична складова пов'язана, в тому числі, з недосконалістю вимірювальних пристроїв. Оцінити її дуже просто:

$$\Delta x_c = \frac{\text{ціна поділки}}{2}.$$

Так, ціна поділки звичайної лінійки складає 1 мм, отже систематична похибка вимірювання довжини лінійкою складає 0.5 мм.

Випадкова похибка пов'язана з випадковим характером фізичних процесів, а також випадковими змінами умов вимірювань (людський фактор, шуми, вібрації). Для оцінки випадкової похибки необхідно провести наступні дії.

Нехай в результаті серії дослідів отримані результати $x_1, x_2 \dots x_n$.

Середнє арифметичне цих вимірів можна розрахувати як $\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$.

Випадкову похибку вимірювання можна розрахувати як

$$\Delta x_e = t_{\alpha, n} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \left[(x_1 - \langle x \rangle)^2 + (x_2 - \langle x \rangle)^2 + \dots + (x_n - \langle x \rangle)^2 \right]}.$$

Параметр $t_{\alpha, n}$ має назву «коефіцієнт Стюдента» і є довідковою величиною. $\alpha = 0,95$ означає, що з ймовірністю 95% виміряна величина лежить у межах розрахованої похибки.

Знаючи систематичну і випадкову складові похибки, можна знайти її величину:

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta x_e)^2 + (\Delta x_c)^2}.$$

На жаль, в більшості випадків, ми вимушені визначати досліджувані величини непрямым шляхом. Нехай величина f , похибку якої необхідно оцінити, знаходиться як добуток аргументів x , y та z , абсолютні похибки яких вже визначені (Δx , Δy , Δz).

Тоді відносна похибка вимірювання f знаходиться за формулою:

$$\delta f = \delta x + \delta y + \delta z = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y} + \frac{\Delta z}{z}.$$

Тобто, якщо ви дізналися, що похибка вимірювання довжини зошита складає 1%, а похибка ширини і товщини – по 2% кожна, ви зможете знайти об'єм зошита з похибкою $1\% + 2\% + 2\% = 5\%$.

Механіка

Розділ фізики, який вивчає рух тіл, називається **механікою**. Якщо вас цікавить, чому саме тіла рухаються, ви маєте вивчати динаміку, а якщо цікавить лише те, як вони рухаються, то ви маєте вивчати кінематику.

Що мається на увазі під питанням "як тіла рухаються"? По-перше, ми маємо знати де в певний момент часу знаходиться тіло. Для цього нам необхідно вибрати систему відліку. **Система відліку** – це сукупність нерухомих тіл, відносно яких розглядається рух тіла, та годинник для вимірювання часу.

Системи відліку можуть бути найрізноманітнішими. Так, наприклад, коли хтось говорить "На світанку корабель знаходився в одній милі від берега", вони використовують берег як тіло, відносно якого задається положення корабля, а цикл день-ніч у якості годинника. В іншій системі відліку ми могли б сказати, що в момент часу $t = 0$ с корабель знаходився в точці з координатами $x = 0.0$ м, $y = 1852.0$ м.

Нам також може бути цікава **траєкторія** тіла, тобто лінія, яку це тіло описує в просторі під час руху. Математично, траєкторію руху в площині в декартовій системі координат можна описати за допомогою рівняння $y(x)$. Наприклад, траєкторію тіла, що рухається по колу одиничного радіуса, можна описати як $x^2 + y^2 = 1$.

Для спрощення, будемо розглядати рух тіла лише вздовж однієї прямої. Тоді **положення** тіла (тобто те, де воно знаходиться в певний момент часу) можна задати лише однією координатою $x = x_1$.

Задачею механіки є визначення положення тіла в будь-який момент часу. Іншими словами, ми маємо скласти рівняння руху тіла, залежність його положення x від t (кажемо, що положення – це функція часу). Ось приклад рівняння руху: $x = 2 + 3t$. Підставляючи різні значення часу, можемо дізнатися, де саме знаходилося тіло в цей момент.

Якщо тіло не стоїть на місці, а здійснює рух, воно здійснює переміщення $\Delta x = x_2 - x_1$. **Переміщення** завжди – це різниця між кінцевим і початковим положенням тіла.

Довжина траєкторії тіла – шлях. Якщо тіло перемістилося з точки з координатою $x = 1$ м в точку з координатою $x = 11$ м, і потім знову повернулося в точку з координатою $x = 1$ м, то її шлях складає 20 метрів, а переміщення – 0 метрів. Переміщення може бути як додатнім, так і від'ємним, шлях – завжди додатня величина.

Щоб зрозуміти, наскільки швидко рухалося тіло, необхідно ввести поняття швидкості. Середня швидкість тіла v_x – це його переміщення за певний проміжок часу: $\langle v_x \rangle = \frac{\Delta x}{\Delta t}$. Швидкість вимірюється в метрах на секунду (м/с).

Але **середня швидкість** не дає нам зрозуміти, як швидко рухається тіло в даний момент (тобто яке мале переміщення воно здійснює за дуже маленький проміжок часу), ми не знаємо миттєву швидкість тіла. На порятунок приходить диференційне числення:

$$v_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} = x'.$$

Миттєва швидкість тіла – це похідна від положення тіла як функції часу.

Якщо швидкість тіла постійна, такий рух називається рівномірним. Ми можемо отримати рівняння руху тіла при рівномірному русі зі сталою швидкістю u .

$$\frac{dx}{dt} = v_x = u$$

Розділяючи змінні: $dx = u dt$

Інтегруємо від початкового положення тіла x_0 в момент часу $t = 0$ до положення тіла x в момент часу t .

$$\int_{x_0}^x dx = \int_0^t u dt$$

Отримуємо

$$x - x_0 = ut$$

Кінцевий вираз, який дозволяє нам отримати значення x для будь-якого t має вигляд:

$$x = x_0 + ut$$

Випадків руху тіла зі сталою швидкістю небагато: швидкість руху тіла з часом може змінюватися. Для опису руху тіла зі змінною швидкістю використовуємо поняття прискорення.

За аналогією, **середнє прискорення** тіла a_x – це зміна його швидкості за певний проміжок часу: $\langle a_x \rangle = \frac{\Delta v_x}{\Delta t}$. Прискорення вимірюється в метрах в секунду в секунду, тобто в м/с^2 .

Миттєве прискорення, за аналогією можна ввести як

$$a_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v_x}{\Delta t} = v_x' = x''.$$

Миттєве прискорення тіла – це похідна від швидкості тіла як функції часу та одночасно друга похідна від положення тіла як функції часу.

Якщо тіло рухається зі сталим прискоренням, такий рух називають рівноприскореним. Ми можемо отримати рівняння руху тіла при рівноприскореному русі зі початковою швидкістю u і сталим прискоренням a .

$$a = \frac{dv_x}{dt}$$

Розділяючи змінні

$$dv_x = a dt$$

Інтегруємо від початкової швидкості в момент часу $t = 0$ до швидкості тіла v_x в момент часу t .

$$\int_u^{v_x} dv_x = \int_0^t a dt$$

Отримуємо

$$v_x - u = at$$

$$v_x = u + at$$

Згадуємо, що

$$\frac{dx}{dt} = v_x$$

Тобто

$$\frac{dx}{dt} = v_x = u + at$$

Розділяємо змінні.

$$dx = (u + at)dt$$

Інтегруємо від початкового положення тіла x_0 в момент часу $t = 0$ до положення тіла x в момент часу t .

$$\int_{x_0}^x dx = \int_0^t (u + at)dt$$

Отримуємо після інтегрування

$$x - x_0 = ut + \frac{1}{2}at^2$$

або

$$x = x_0 + ut + \frac{1}{2}at^2$$

Ми знову отримали рівняння руху тіла, тобто спосіб визначити положення рівноприскореного тіла в будь-який момент часу.

Рух тіла може відбуватися і зі змінним прискоренням. В цьому випадку, рівняння руху тіл буде більш складне. Наприклад, можна впевнитися, що рівняння руху тіла, що підвішене до вертикальної пружинки і здійснює коливання, можна виразити як $x = A \cos(\omega t)$. Тут A і ω – сталі додатні константи. Можна переконатися, взявши першу і другу похідні, що і швидкість, і прискорення такого тіла теж змінюються з часом: $v_x = -A\omega \sin(\omega t)$ і $a_x = -A\omega^2 \cos(\omega t)$.

Прямолінійний рух – найпростіший вид руху. Можна розглядати рух і в декількох напрямках одночасно, тобто рух з більш складною траєкторією. В такому випадку положення тіла, його переміщення, швидкість і прискорення задаються векторами. Всі рівняння зберігають свою силу, але тепер крім виразів для x , v_x , a_x додаються вирази, що описують рух в інших напрямках: y , v_y , a_y та z , v_z , a_z .

Математично ми кажемо, що положення, переміщення, швидкість і прискорення – це вектори, у них є величина і напрямок. Записувати вектори зручно за допомогою їх координат. Так, положення тіла можна записати як $\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j}$, тут \vec{i} та \vec{j} – одиничні вектори у горизонтальному і вертикальному напрямках. Такий вектор, чий початок знаходиться на початку координат, а кінець – в точці (x, y) називають **радіус-вектором тіла**.

Рух вздовж різних вісей незалежний один від одного. Так, тіло може рухатися рівномірно вздовж одного з напрямків, і рівноприскорено – вздовж іншого. Наприклад, тіло, що кинули під кутом до горизонту поблизу поверхні землі, рухається рівномірно вздовж горизонтального напрямку і рівноприскорено у вертикальному напрямку. Результируюча траєкторія руху такого тіла представляє собою параболу.

Розглянемо рух тіла по колу зі сталим модулем швидкості.

Використання таких величин як переміщення, швидкість та прискорення у тому вигляді, в якому вони були введені для опису поступального руху, не є зручним.

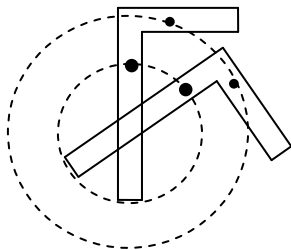


Рис. 1 Обертальний рух.

Як видно з рисунку 1, за один і той же час різні точки тіла переміщуються на різну відстань з різною швидкістю. Однак, очевидно, що за один і той же проміжок часу вони замітають один і той же кут. Тому для опису обертального руху використовують поняття кутового положення.

Кутове положення – кут, який радіус-вектор матеріальної точки складає з додатнім напрямком

вісі x . Одиниця вимірювання – радіан. $1 \text{ рад} = \left(\frac{180}{\pi} \right)^\circ \approx 57^\circ$

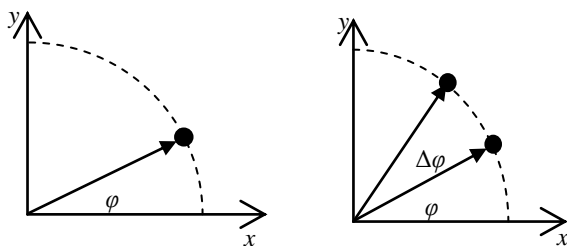


Рис. 2 Кутове положення і кутове переміщення тіла

Тіло здійснює **кутове переміщення** за певний час. Зміну кутового положення тіла з часом характеризує кутова швидкість.

Середня кутова швидкість тіла: $\langle \omega \rangle = \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}$. (рад/с)

Кутова швидкість тіла – це вектор. Він визначається за правилом правого гвинта (див. рис. 3)

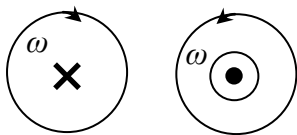


Рис. 3 Напрямок вектора ω .

Якщо тіло обертається рівномірно, час одного оберту є сталою величиною. Час одного оберту називається **періодом обертання** T (с). Величина обернена до періоду, **частота**, показує скільки обертів тіло здійснює за секунду.

$$f = \frac{1}{T}, \text{ одиниця виміру } \text{с}^{-1} \text{ або Герц.}$$

Можна показати, що $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$

Для нерівномірного обертального руху, тобто такого руху, при якому за однакові проміжки часу тіло обертається на різні кути,

можна ввести поняття кутового прискорення: $\beta = \frac{d\omega}{dt}$ (рад/с²).

Але чи є у тіла прискорення якщо воно рівномірно обертається? Прискорення – це векторна величина, вона характеризується як величиною так і напрямком. При обертанні тіла *величина* вектора швидкості може залишатися сталою, але його *напрямок* весь час змінюється. Тому навіть якщо тіло обертається рівномірно, воно

має так зване нормальне прискорення. Його величина визначається з наступного виразу:

$$a_n = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R$$

Тут R – радіус кола, за яким обертається тіло.

Лекція 2: Закони Ньютона. Сили в природі. Закони збереження.

Сила – міра взаємодії між тілами. Простими словами: коли тіло щось штовхає чи тягне, на нього діє сила. Сила є причиною зміни руху: причина початку руху, його кінця, зміни напрямку руху. Сила – це векторна величина, вимірюється вона в ньютонках. 1 ньютон – сила, з якою діє на вашу руку середнього розміру яблуко, яке ви тримаєте в руках. Сили можуть діяти при контакті між тілами, а можуть – і на відстані.

Основою динаміки є три закони Ньютона, сформульовані англійським вченим Ісааком Ньютоном у роботі "Математичні начала матеріальної філософії" в 1687 році. Сформулюємо ці закони.

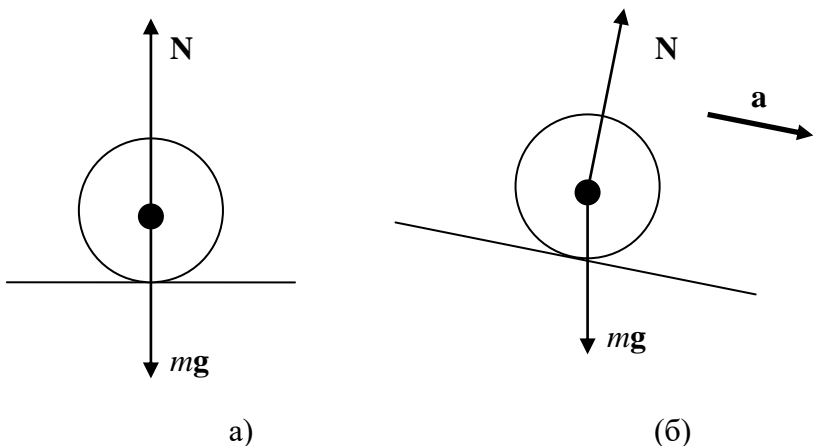


Рис. 4 Силкові діаграми: (а) нерухома куля на горизонтальній поверхні, (б) куля, що прискорюється вздовж похилої площини.

Перший закон Ньютона: існують такі системи відліку, в яких тіло, на яке не діють сили, рухається рівномірно і прямолінійно, поки дія інших тіл не змусить його змінити свій стан. Математично, цей закон часто записується як $\sum \vec{F} = 0$ (Сума сил, що діє на тіло, дорівнює нулю).

Куля, що лежить на горизонтальній поверхні, знаходиться під дією двох сил, чия векторна сума дорівнює нулю (рис. 4а). Куля буде залишатися у стані спокою, поки на неї не буде діяти ще одна сила. Якщо куля вже ковзає по поверхні з певною швидкістю, вона буде продовжувати ковзати з цією ж швидкістю за відсутності сил, які б змушували її зупинитися.

Системи, в яких виконується 1й закон Ньютона, – **інерціальні**. Це системи, що не рухаються відносно системи, зв'язаної з тілом, або рухаються рівномірно.

Другий закон Ньютона: прискорення тіла прямо пропорційне силі, що діє на тіло, і обернено пропорційне масі тіла. Математично, цей закон часто записується як $\sum \vec{F} = m\vec{a}$ (Сума сил, що діє на тіло, дорівнює добутку маси тіла на його прискорення).

Куля, що ковзає вниз по схилу, знаходиться під дією двох сил – сили тяжіння і нормальної реакції – чия векторна сума не дорівнює нулю (рис 4б). Куля буде ковзати схилом з постійним прискоренням.

Третій закон Ньютона: сили, з якими тіла діють одне на одне, є рівними за величиною і протилежними за напрямком.

Математично, цей закон часто записується як: $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$ (Сила з якою перше тіло діє на друге, дорівнює силі, з якою друге тіло діє на перше, але протилежна за напрямком). Коли ви вдаряєте рукою по стіні, ви дієте на неї з силою. Водночас, стіна діє на вашу руку з такою ж за величиною силою. Чим сильніше ви вдарите стіну, тим сильніше вона вдарить вас.

Розглянемо деякі приклади сил, що існують в природі.

Сила гравітації – сила, що діє між будь-якими двома тілами, що мають масу. Згідно з законом всесвітнього тяжіння, сила, що діє між двома тілами, прямо пропорційна масі цих тіл і обернено пропорційна відстані між ними.

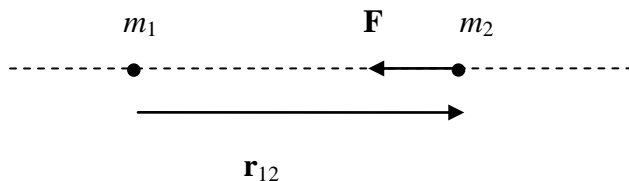


Рис. 5 Щодо напрямку сили гравітаційної взаємодії.

$$\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r_{12}^3} \vec{r}_{12} \text{ або для модуля сили } F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Тут $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ Н.м}^2.\text{кг}^{-2}$ – це константа, гравітаційна стала.

Коли йдеться про величину сили всесвітнього тяжіння між тілом біля поверхні Землі та Землею, використовують спрощений вираз,

а саму силу називають «сила ремного тяжіння» чи просто «сила тяжіння».

$$F = G \frac{mM_z}{R^2} = m \left(\frac{GM_z}{R^2} \right) = mg$$

Бачимо, що одиниці величини g – м/с^2 , тож це є прискорення вільного падіння, тобто прискорення, з яким падає тіло, випущене над поверхнею Землі.

В середньому, значення прискорення вільного падіння приблизно дорівнює 9.8 м/с^2 . Однак в різних місцях земної кулі воно має різне значення. Відстань від центру Землі до різних точок поверхні, як відомо, менша на полюсах, тож відповідне значення g досягає 9.83 м/с^2 . На екваторі його значення зменшується до 9.78 м/с^2 . Крім форми Землі на значення g впливають і інші фактори: обертання Землі та вміст надр нашої планети.

Прискорення вільного падіння також зменшується при віддаленні тіла від поверхні землі. Так, на Міжнародній Космічній Станції, на висоті 300 км, прискорення вільного падіння складає приблизно 8 м/с^2 .

Вимірювання прискорення вільного падіння в різних точках земної кулі є важливим геофізичним методом. Різні значення g допомагають встановити розподіл маси у земній корі. Знати цей розподіл дуже важливо з багатьох причин. Наприклад, це дає можливість встановити рельєф місцевості, що схований під товщею льоду. Наявність гравітаційних аномалій також може свідчити про залягання певних порід під поверхнею землі.

Яким чином вимірюється g ? За допомогою гравіметра. Найпростіший гравіметр вимірює час падіння малої маси в вакуумі зі сталої висоти.

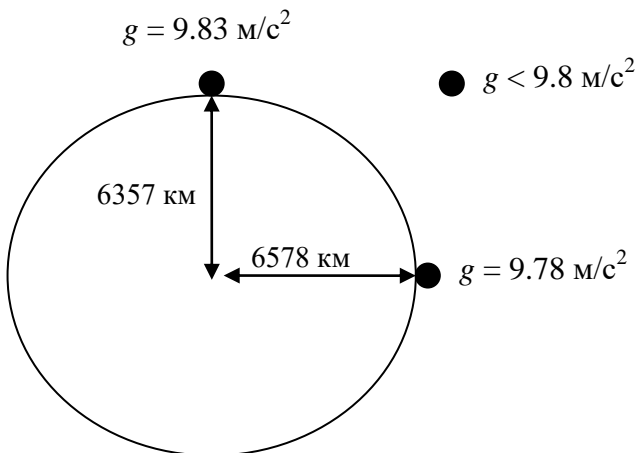


Рис. 6 Прискорення вільного падіння в різних точках Земної кулі.

Карти прискорення вільного падіння в різних точках земної кулі складають також за допомогою дослідження орбіти супутників Землі. Через неоднорідне розташування маси по планеті Земля, орбіта супутника трохи відрізняється від ідеально колової. Форму орбіт вимірюють за допомогою лазерних дальномірів. Потужний лазер стріляє у спеціально запущений супутник, вкритий дзеркальцями. Приймач лазерного випромінювання фіксує відбитий від супутника промінь, дозволяючи виміряти час, за який світловий сигнал пройде шлях до супутника і назад. Такі дослідження проводять, в тому числі, 48 лабораторій під керівництвом НАСА (в Україні таких лабораторій 4: у Києві,

Львові, Сімеїзі та Кацівелі) у проєкті International Laser Ranging Service.

Сили пружності – це сили, що виникають при пружній деформації тіл. Сили пружності опираються деформації і намагаються повернути тілу його початкову форму.

Нехай струна мала довжину l_0 і була видовжена до довжини l . Назвемо $\Delta l = l - l_0$ абсолютною деформацією тіла.

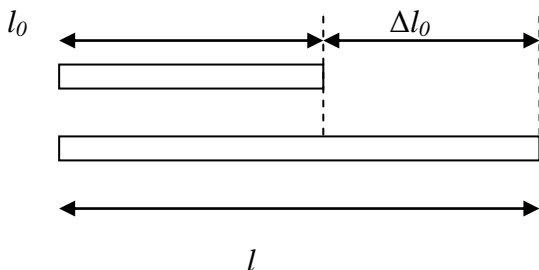


Рис. 7 Деформація стержня

Англійський вчений Роберт Гук встановив, що пружні сили прямо пропорційні деформації тіл.

Математично $F = k\Delta l$.

Коефіцієнт пружності k різний для різних об'єктів, навіть таких, що виготовлені з одного і того ж матеріалу. Тому зручніше оперувати поняттями механічної напруженості (сила, прикладена до одиниці площі) $\sigma = \frac{F}{S}$ та відносної деформації $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$

Закон Гука стверджує, що $\sigma = E\varepsilon$, де E – константа, що характеризує пружність даного матеріалу, модуль Юнга.

Модуль Юнга – це таблична величина, її значення відоме як для промислових матеріалів, так і для гірських порід. Наприклад, для сталі він складає 200 гігапаскалів (ГПа), базальту – 73 ГПа, граніту 10-70 ГПа, а для піщанного ґрунту 10-50 ГПа.

На жаль, закон працює тільки у випадку невеликих деформацій (таких, при яких тіло повернеться до початкової форми, як тільки сила зникне). Насправді графік залежності механічної напруженості від відносної деформації виглядає так, як показано на рис. 8.



Рис. 8 Залежність механічної напруженості від відносного видовження тіла у широких межах.

Знаючи величину деформації певної породи (порода залягає складками), можна дізнатися про величини сил, що на них діють. Маючи невідомий матеріал, і стискаючи його певною силою, можна дізнатися про його склад. Знаючи матеріал, можна також

оцінити, які сили призведуть до розриву породи в сейсмічно активних зонах.

Нормальна реакція опори – сила, що діє з боку опори на предмет, не дозволяючи йому проникнути вглиб опори. «Нормальний» – означає «перпендикулярний», ця сила завжди діє перпендикулярно до опори.

Сили опору, тертя – сили, що діють у напрямку, протилежному від напрямку руху тіла, на границі тіло-оточення.

Тертя – це опір з боку твердих тіл.

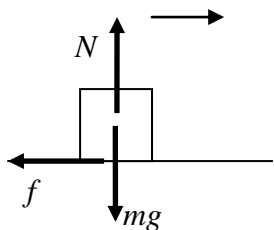


Рис. 9 Сила нормальної реакції N і сила тертя f .

Якщо тіло не рухається, то сила тертя є меншою за силу нормальної реакції опори.
 $f \leq \mu_{cn} N$, μ_{cn} – коефіцієнт тертя спокою.

Якщо тіло рухається з невеликою швидкістю, то сила тертя стала і пропорційна силі нормальної реакції опори.

$f = \mu_d N$, де μ_d – коефіцієнт

тертя ковзання (динамічний коефіцієнт тертя). І μ_{cn} , і μ_d залежать від комбінації матеріалів, що взаємодіють, і знаходяться з таблиць.

Сила Архімеда

Будь-яке тіло, що занурене у рідину, відчуває на собі виштовхуючу силу, що називають силою Архімеда. Чисельно, для тіла об'ємом V , зануреного у рідину густини ρ сила Архімеда дорівнює:

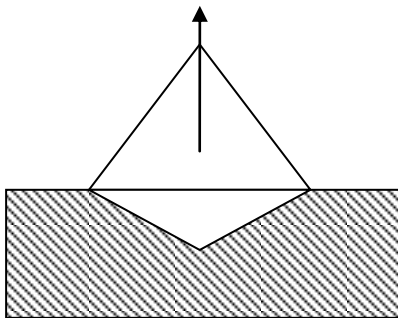
$$F = \rho g V.$$


Рис. 10 Сила Архімеда виштовхує занурене тіло

Породи Землі, хоч і тверді, теж характеризуються певною плинністю. Розрахунок сили Архімеда допомагає оцінити, як буде поводити себе гора (просідати чи знаходитися у рівновазі), якщо вона оточена породою іншої густини.

Сили інерції (сили в неінерціальних системах відліку)

Якщо система відліку рухається з прискоренням, спостерігач всередині механічної системи відчуває сили, що діють на нього. Так, маятник підвішений до стелі автомобіля, відхиляється назад, коли автомобіль прискорюється.

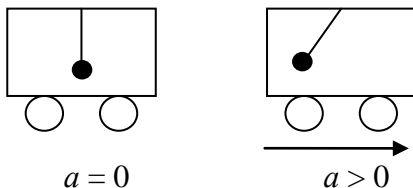


Рис. 11 Маятник відхиляється, коли автомобіль прискорюється.

Планету Землі не завжди можна вважати інерціальною системою відліку, оскільки вона обертається як навколо Сонця, так і навколо своєї вісі.

Сила Коріоліса – одна з сил інерції, що існує в системі відліку, що обертається, і виявляється при русі в напрямі під кутом до осі

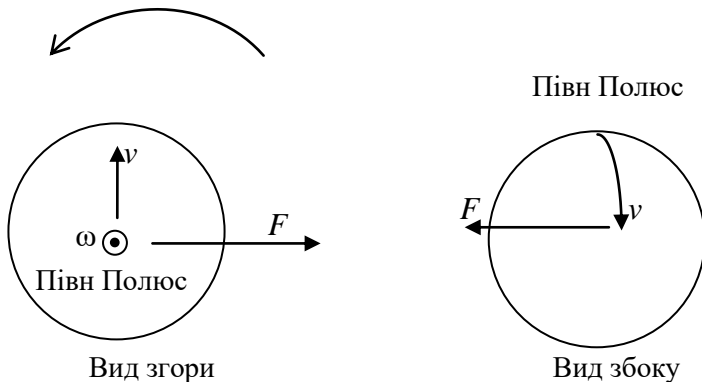


Рис. 12 Сила Коріоліса

обертання. Якщо ω – кутова швидкість обертання Землі, v – швидкість руху тіла маси m по поверхні Землі, α – кут між вектором швидкості тіла та віссю обертання Землі, то сила Коріоліса знаходиться за формулою $F = 2m\omega v \sin \alpha$.

Внаслідок дії сили Коріоліса, один з берегів річок завжди підмитий. За, так званим, правилом Бера: ріки, що протікають в Північній півкулі, підмивають правий берег, а ті, що протікають в Південній, – лівий.

Для опису здатності сили до обертання вводять величину, що називається моментом сили. **Момент сили** – векторна величина, що характеризує здатність сили спричинювати зміну обертального руху.

Моментом сили називають векторний добуток сили на її плече (вектор, що має початок в точці, навколо якої відбувається обертання, і кінець у точці, до якої прикладена сила):

$$\vec{M} = [\vec{r} \times \vec{F}], \text{ тут } \vec{M} - \text{момент сили, } \vec{r} - \text{плече, } \vec{F} - \text{сила.}$$

Модуль моменту сили дорівнює $M = F \cdot r \cdot \sin \alpha$, де α – кут між векторами \vec{r} та \vec{F} .

Напрямок моменту сили (як і напрямок результату будь-якого іншого векторного добутку двох векторів) можна встановити за правилом правої руки. Якщо загинати чотири пальці правої руки від напрямку першого вектору в добутку (\vec{r}) до напрямку другого вектору в добутку (\vec{F}), то відставлений великий палець цієї руки вкаже у напрямку результату добутку векторів. На рисунку 13 можна впевнитися, що якщо ви виставите долоню правої руки так, щоб пальці вказували вправо, як вектор \vec{r} , і загнете їх вниз за напрямком вектора \vec{F} , то великий палець цієї руки буде направлений перпендикулярно площині малюнку, в її глиб.

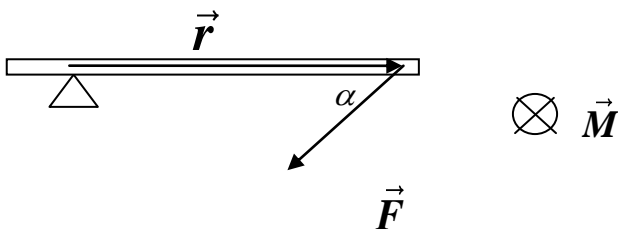


Рис. 13 Момент сили.

Знаючи про обертальний момент сил, можна пояснити явище гальмування обертання Землі. Експериментально порівнюючи часи Сонячних і місячних затемнень, що збереглися з часів давнього Вавилону, було підтверджено факт гальмування обертання Землі. Швидкість гальмування Землі становить 2.4 мілісекунди на століття.

Через гравітаційну дію Місяця, рівень води у Світовому Океані підвищується одночасно з двох боків планети (явище припливів). Через сили тертя, вісь, що з'єднує максимуми припливів, не збігається з вісю Земля-Місяць, а складає з нею кут 2.9° .

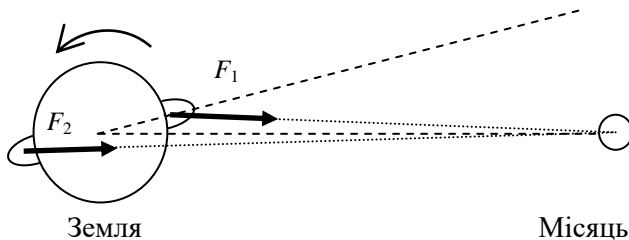


Рис. 14 Явище уповільнення обертання Землі.

В результаті, сила з боку припливу F_1 створює обертальний момент за годинниковою стрілкою, а менша за величиною сила з боку припливу F_2 – у протилежний бік. Сумарно ці сили створюють момент за годинниковою стрілкою, тобто у бік протилежний до напрямку обертання Землі як цілого, гальмуючи її.

Величина, що характеризує інертні властивості тіла при обертанні – **момент інерції**. Ця величина пропорційна масі тіла, і залежить від того, як саме тіло розташовано відносно вісі обертання.

Для матеріальної точки масою m , що обертається навколо нерухомої вісі на відстані r від неї, момент інерції становить $I = mr^2$. Для видовжених тіл вираз для моменту інерції може бути розрахований математично.

Дія моменту сили \vec{M} на тіло, що характеризується моментом інерції I , призводить до пришвидшення чи сповільнення обертання цього тіла, тобто до руху тіла з кутовим прискоренням $\vec{\beta}$.

Співвідношення $I\vec{\beta} = \vec{M}$ визначає зв'язок між цими величинами і носить назву **основного рівняння динаміки обертального руху**.

Закони збереження у фізиці

З одним зі законів збереження – законом збереження маси (Лавуазьє, Ломоносов) ви вже знайомі. «Маса речовин, що вступають в реакцію, завжди дорівнює масі речовин, які утворюються в результаті реакції». Познайомимось з іншими законами збереження та величинами, що зберігаються, тобто числення залишається сталим в часі.

Закони збереження працюють лише у замкнених системах: тобто ми розглядаємо взаємодію лише між певною кількістю тіл, які взаємодіють між собою, але не з оточенням.

1. Імпульс. Закон збереження імпульсу.

Імпульс – векторна величина, що чисельно дорівнює добутку маси тіла на його швидкість,

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

Одиниця вимірювання імпульсу [кг.м/с, Н.с]

За допомогою цієї величини можна сформулювати другий закон

Ньютона: $\vec{F} = m\vec{a} \Leftrightarrow \vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} \Leftrightarrow \vec{F} = \frac{d(m\vec{v})}{dt}$

$$\vec{F} = \frac{d(\vec{p})}{dt}$$

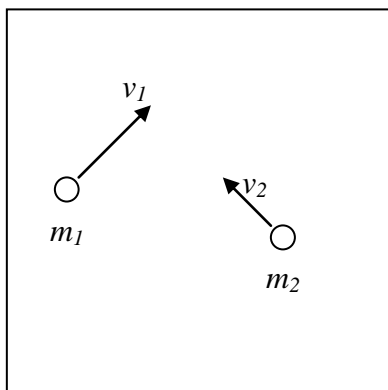


Рис. 15 До закону збереження імпульсу.

Візьмемо замкнену систему, що складається з двох тіл. Замкнена система – це система, що не взаємодіє з будь-якими іншими тілами.

Нехай ці тіла зіткнулись. Запишемо 2й закон Ньютона для кожного зіткнення:

$$\vec{F}_{12} = \frac{d\vec{p}_2}{dt} \text{ і } \vec{F}_{21} = \frac{d\vec{p}_1}{dt}$$

Склавши обидва рівняння отримуємо:

$$\vec{F}_{12} + \vec{F}_{21} = \frac{d\vec{p}_2}{dt} + \frac{d\vec{p}_1}{dt}$$

Але, за Третім законом Ньютона $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$

Таким чином $\frac{d\vec{p}_2}{dt} + \frac{d\vec{p}_1}{dt} = 0$ або $\sum_i \frac{d\vec{p}_i}{dt} = 0$.

Тобто, не дивлячись на те, що імпульси кожного з тіл змінюються при зіткненні, сума цих імпульсів з часом не змінюється, вона залишається сталою. Фізики кажуть, що така величина зберігається.

Можна показати, що останній вираз справедливий не тільки для двох тіл, а і для будь-якої кількості тіл в замкненій системі.

Вираз $\sum_i \frac{d\vec{p}_i}{dt} = 0$ або $\sum_i \vec{p}_i = \text{const}$ має назву закону збереження імпульсу. Він стверджує, що повний імпульс замкнутої системи тіл зберігається.

Які ж приклади закону збереження імпульсу в природі?

Закон збереження імпульсу можна відчувати як віддачу зброї, з якої вилітає куля. Оскільки початковий імпульс системи куля-зброя дорівнює нулю, після вистрілу він також має залишатися нулем, а отже зброя має почати рух у напрямку протилежному від руху кулі.

2. Робота і енергія. Закон збереження енергії

Енергія – універсальна міра різних форм руху і взаємодії.

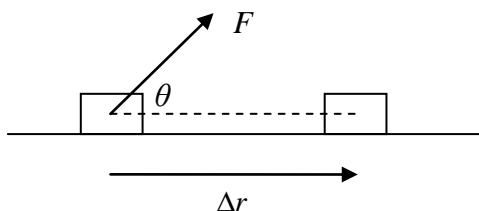


Рис. 16 Сила, в результаті дії якої тіло переміщується, виконує роботу.

Коли тіла обмінюються енергією, в них відбувається певна зміна. Енергія може передаватися між тілами, може перетворюватися з одного виду в інший. Наприклад, хімічна енергія їжі перетворюється людиною у енергію руху. Ця енергія, в свою чергу, передана м'ячу, що починає рухатися.

Кількісна характеристика міри обміну тілами енергією – робота.

Робота, що виконується силою \vec{F} по переміщенню тіла $\Delta\vec{r}$, кут між якими θ , дорівнює:

$$A = \vec{F} \cdot \Delta\vec{r} = F(\Delta r) \cos \theta$$

Одиниця вимірювання роботи [Н.м = Дж]

Робота – скалярна величина, але може приймати додатні і від’ємні значення. Якщо $\theta < 90^\circ$, тіло отримує енергію в процесі виконання роботи і $A > 0$. Якщо $\theta > 90^\circ$, тіло втрачає енергію в процесі виконання роботи і $A < 0$.

Кінетична енергія – енергія, що тіло має завдяки руху. Вираз $\frac{mv^2}{2}$ називаємо кінетичною енергією тіла.

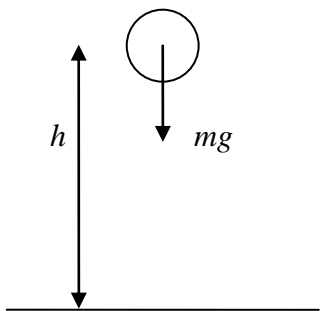


Рис. 17 До виведення виразу для потенціальної енергії сили тяжіння.

Потенціальна енергія – механічна енергія системи тіл, яка визначається їх взаємним розташуванням. Робота над тілом призводить до вивільнення (зменшення) потенціальної енергії:

$$A = -\Delta U$$

Не усі види взаємодії

можуть надавати тілу потенціальну енергію. Про потенціальну енергію можна говорити тільки в тих видах взаємодії, де діють консервативні сили. Консервативні сили – сили, що залежать лише від положення тіла в просторі і не залежать від швидкості тіла. Приклади консервативних сил: сила тяжіння, електростатичні сили, пружні сили. Сили тертя не є консервативними. Система, в якій діють лише консервативні сили, називається консервативною.

Вирази для потенціальної енергії різної взаємодії знаходять, розраховуючи роботу сил цієї взаємодії. Наприклад, знайдемо вираз для потенціальної енергії сили тяжіння.

Нехай тіло масою m підняли з землі на висоту h .

$$\Delta U = -A = -\int \delta A = -\int F dr ;$$

$$\Delta U = -\int_0^h (-mg) dr = (mg \times h - mg \times 0) = mgh \quad \text{Приріст енергії}$$

склав mgh . Вираз $U_g = mgh$ називаємо потенціальною енергією сили тяжіння.

Суму потенціальної і кінетичної енергій тіла чи систем тіл називають **механічною енергією**.

Закон збереження механічної енергії стверджує, що механічна енергія консервативної системи тіл залишається постійною в процесі руху системи.

Лекція 3: Молекулярна фізика

Молекулярна фізика – розділ фізики, що вивчає речовину на рівні атомів та молекул.

Ідею про те, що речовина складається з окремих неділимих елементів, висловлювали ще давні греки (її приписують Демокриту). Пізніше ця ідея була забута, але все більша і більша кількість експериментальних даних нарешті змусила науковців повернутися до неї.

Згідно сучасних уявлень, будь-яка речовина складається з атомів та молекул, які перебувають в постійному і хаотичному русі. На підтвердження хаотичності руху можна привести такі приклади як Броунівський рух (дрижання невеликих частинок, таких як частини диму чи пилку рослин, через штовхання з боку оточуючих молекул) або дифузія у газах (поступове поширення одного газу крізь інший).

Розмір атома складає порядку 10^{-10} метра. Маса атомів дуже мала, тому вимірювати її в кілограмах незручно. Одиниця маси – відносна атомна маса (відносні атомні одиниці) – показує у скільки разів маса даного атома є більшою за масу найлегшого з атомів – атому гідрогену.

Кількість атомів/молекул вимірюється не в десятках, і навіть не в мільйонах. Вона вимірюється в молях, де один моль містить $N_a = 6.02 \times 10^{23}$ штук, або число Авогадро штук атомів/молекул. Корисною є ще одна фізична величина – **молярна маса**, або маса одного молю речовини.

$\mu = m_0 N_a$, де m_0 – маса одної молекули у грамах (кг/моль).

Матерія може перебувати у різних станах: газоподібному, рідкому чи твердому. Різниця між цими станами – у взаємному положенні частинок речовини та середній швидкості їх руху.

Так, атоми у газоподібному стані неупорядковані, вони вільно і хаотично рухаються, знаходяться далеко один від одного, та займають весь доступний об'єм.

У рідкому стані речовина зберігає об'єм, але займає форму посудини. Частинки рідини притягуються одна до одної, але достатньо рухливі – вони можуть переміщуватись, перестрибуючи з одного положення рівноваги, в інше.

У твердому стані речовина зберігає як форму, так і об'єм. Атоми в твердому тілі можуть лише коливатися навколо положень рівноваги.

Деякі властивості газів

Описувати гази ми будемо за допомогою наступних величин:

- ✓ Об'єм газу V (м³) – тобто місткість посудини, в якій газ знаходиться;
- ✓ Тиск газу p (Па) – сила на одиницю площі, тиск виникає через зіткнення молекул зі стінками.
- ✓ Температура T (°C, K) – це така властивість матерії, що якщо тіла не обмінюються енергією, вони мають однакову температуру. Одна з одиниць вимірювання температури – градус Цельсія. Якщо при атмосферному тиску 100 кПа

приписати температурі тіла, що знаходиться у рівновазі з льодом, який тане, T_0 (0°C), а температурі тіла, що знаходиться у рівновазі з водою, яка кипить, T_{100} (100°C), то $1^\circ\text{C} = \frac{T_{100} - T_0}{100}$. В молекулярній фізиці частіше використовують іншу одиницю температури – кельвіни. Щоб перевести градус Цельсія в кельвіни додайте до градусу Цельсія 273: $T_K = t_C + 273\text{ K}$

Сукупність інформації про тиск, об'єм, температуру газу називається його **станом**. Ми вивчаємо так званий рівноважний стан системи, тобто коли всі її частини мають одну і ту ж температуру і тиск. Такий стан можна зобразити точкою на координатній площині (p, V) (p, T) (V, T) .

Експериментальне вивчення поведінки розріджених газів привело до встановлення таких законів:

1. Закон Бойля-Маріотта

Для певної маси газу, при сталій температурі добуток тиску на об'єм газу залишається сталим. $pV = \text{const}$; або $p \sim \frac{1}{V}$.

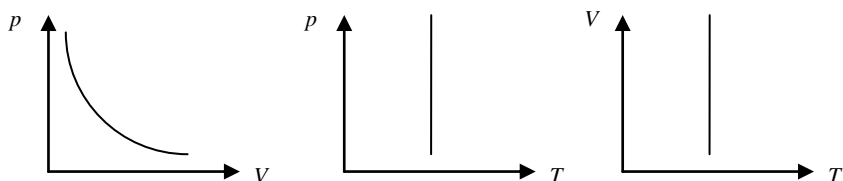


Рис. 18 Діаграми стану для ізотермічного процесу

Процес, при якому температура залишається сталою, – ізотермічний.

2. Закон Шарля

Для певної маси газу, при сталому об'ємі, відношення тиску газу до його температури залишається сталим. $\frac{P}{T} = const$; або $p \sim T$.

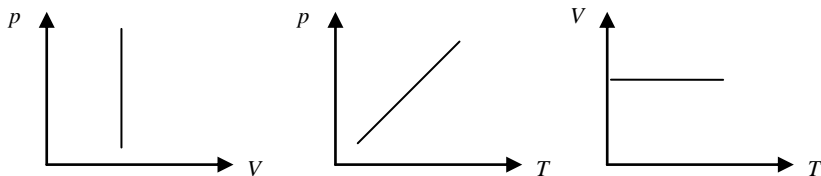


Рис. 19 Діаграми стану для ізохоричного

Процес, при якому об'єм залишається сталим, – ізохоричний.

3. Закон Гей-Люсака

Для певної маси газу, при сталому тиску, відношення об'єму газу до його температури залишається сталим. $\frac{V}{T} = const$; або $V \sim T$.

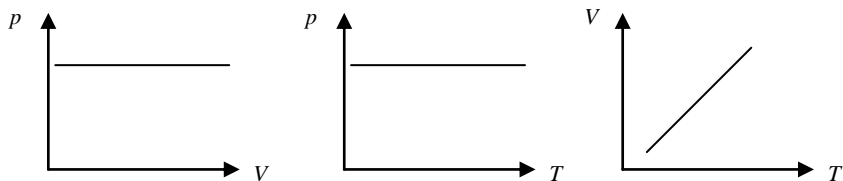


Рис. 20 Діаграми стану для ізобаричного процесу

Процес, при якому тиск залишається сталим, – ізобаричний.

4. Рівняння Менделєєва-Клапейрона

Усі три попередні рівняння можна зв'язати в одне рівняння, що визначає усі три термодинамічні параметри системи.

$$pV = \mu RT$$

Тут $R = 8.31$ Дж/К.моль універсальна газова стала, а μ – молярна маса частинки.

Поведінка газів при низьких температурах і високому тиску відрізняється від поведінки, передбаченої рівнянням Менделєєва-Клапейрона. Найкраще описує поведінку реальних газів рівняння Ван-дер-Ваальса. Нижче воно сформульоване для 1 моля речовини:

$$\left(p + \frac{a}{V^2} \right) (V - b) = RT$$

Тут $\frac{a}{V^2}$ – доданок, що характеризує внутрішній тиск у газі через сили притягання між молекулами; b – доданок, що характеризує власний об'єм молекул речовини. Значення констант a і b визначені для різних газів і є табличними величинами.

Властивості тіл, що можна виміряти безпосередньо (тиск, об'єм, температура), або їх макро-властивості, можна пояснити через рух окремих молекул, або їх мікро-властивості (швидкість руху молекул, здійснення ними коливань чи обертання).

Можна показати, що тиск і швидкість молекул зв'язані наступним чином: $p = \frac{1}{3}nm\langle v^2 \rangle$, тут n – концентрація газу, m – маса атомів газу, $\langle v^2 \rangle$ – середнє значення квадратів швидкостей молекул в газі. Даний вираз носить назву **основного рівняння кінетичної теорії газів**.

Як зв'язана швидкість молекул газу з температурою? Порівняємо основне рівняння кінетичної теорії газів з рівнянням Мендєєва-Клапейрона, записаного для 1 моля речовини:

$$\begin{cases} pV = RT \\ pV = \frac{2}{3}N_a E_k \end{cases} \Rightarrow E_k = \frac{3}{2} \frac{R}{N_a} T \text{ або } E_k = \frac{3}{2} kT,$$

де $k = 1.38 \times 10^{-23}$ Дж/К.моль константа Больцмана

Вираз $E_k = \frac{3}{2} kT$ показує, що температура є мірою середньої кінетичної енергії атомів в речовині.

Хоч всім молекулам газу можна приписати середнє значення

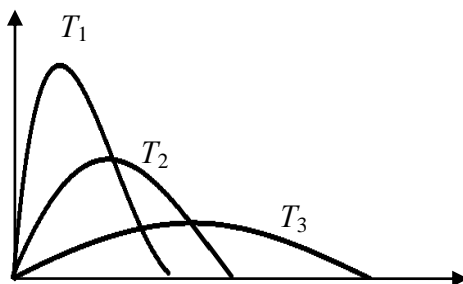


Рис.22 Розподіл Максвелла для газів різних температур, $T_3 > T_2 > T_1$

швидкість, швидкість різних молекул газу дуже сильно відрізняється. Експериментально, розподіл молекул за швидкостями було знайдено в досліді Штерна. Вузький промінь, сформований швидкими атомами срібла, падав на екран, що обертався. Атоми, втративши свою кінетичну енергію, осідали на екрані, формуючи шар певної товщини. Атоми з різними швидкостями осідали в різних частинах екрану.

Таким чином було встановлено, що молекули мають різні швидкості – мала їх частина рухається дуже швидко, мала частина – дуже повільно, а більшість – з якимись проміжними швидкостями.

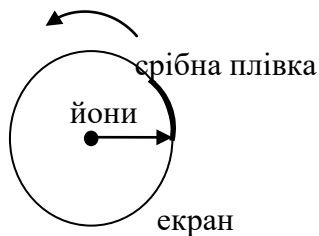


Рис. 21 До досліді Штерна

Форму цього розподілу, тобто те, яка частка (відсоток) атомів газу f має швидкості в інтервалі від v до $v + dv$, було описано теоретично англійським вченим Джеймсом Максвелом. Цей вираз має назву розподілу Максвела:

$$f(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} dv$$

T – температура газу, m – маса атомів газу, k – константа Больцмана. Графіки розподілу при різних температурах показані на

Рис. 22. Видно, що чим більша температура, тим більше у газі швидких молекул. Цей результат узгоджується з отриманим раніше виразом для кінетичної енергії молекули як функції її температури.

У рівноважному стані газу хаотичний тепловий рух його молекул призводить до того, що газ рівномірно розподіляється по всьому об'єму, який він заповнює, тобто в кожній одиниці об'єму в середньому міститься однакове число молекул. Однак, якщо газ знаходиться під дією зовнішніх сил, то розподіл його молекул по заповненому об'єму може бути і неоднорідним. Так, сила тяжіння діє на всі атоми газу. Чи буде кількість молекул газу, що розташована на різних висотах, однаковою?

Згідно з розподілом Больцмана, кількість частинок в одиниці об'єму (концентрація частинок) n , що мають потенціальну енергію U , порівняно з кількістю частинок з одиниці об'єму, чия потенціальна енергія дорівнює нулю, n_0 пов'язані як:

$$n = n_0 e^{-\frac{U}{kT}}$$

Тут k константа Больцмана, T – температура.

Концентрація частинок впливає на тиск, що спричинюється ними. Як змінюється атмосферний тиск з висотою?

Запишемо тиск повітря на висоті h над поверхнею землі. Тиск – це сила на одиницю площі. Сила, з якою молекули повітря діють на поверхню землі, – сила тяжіння, mg . З таких міркувань можна отримати вираз для тиску стовпа повітря густиною ρ і висотою h :

$$p = \rho gh.$$

На більшій висоті тиск складає $p - \Delta p = \rho gh - \rho g \Delta h$

Якщо вибраний шар повітря є нескінченно малим, то різниця тисків між цими шарами $dp = -\rho g dh$

За означенням, густина

тіла – $\rho = \frac{m}{V}$, отже

$$dp = -\frac{m}{V} g dh$$

З рівняння Менделєєва-Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{\mu} RT \quad \text{або} \quad \frac{m}{V} = \frac{p\mu}{RT}$$

Підставляючи, отримуємо диференціальне рівняння

$$dp = -\frac{p\mu g}{RT} dh$$

Розділяємо змінні:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{\mu g}{RT} dh$$

Інтегруємо по всіх можливих висотах:

$$\int_{p_0}^p \frac{dp}{p} = -\int_0^h \frac{\mu g}{RT} dh,$$

$$\ln p - \ln p_0 = -\frac{\mu g}{RT} h$$

$$\text{Або } p = p_0 e^{-\frac{\mu g h}{RT}}, \quad p = p_0 e^{-\frac{m g h}{kT}}$$

Цей вираз має назву барометричної формули, і дає можливість розрахувати тиск на будь-якій висоті.

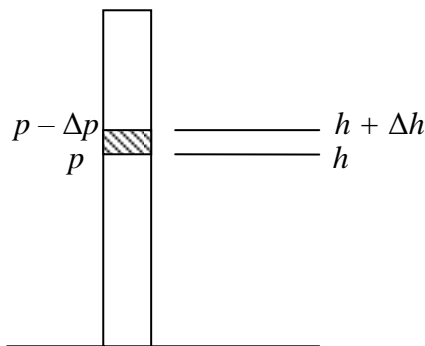


Рис. 23 До виведення барометричної формули

Деякі властивості рідин

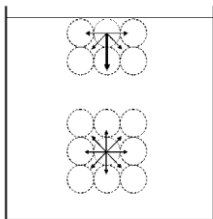


Рис. 24 До пояснення механізму виникнення сили поверхневого натягу

Між молекулами рідин існують доволі суттєві за величиною сили притягання. Ці ж сили діють і на молекули речовин, що дотикаються до рідини. З цим пов'язані явища поверхневого натягу і капілярний ефект. Прояви сил поверхневого натягу відомі усім – краплі води завжди приймають сферичну форму, мокре волосся, яким би

пухким воно не було в сухому стані, злипається, коли стає мокрим.

Пояснимо явище поверхневого натягу: молекула у товщі рідини оточена іншими молекулами з усіх боків. Рівнодіюча сил, з якими кожна з них діє на обрану молекулу, дорівнює нулю. Інша ситуація спостерігається для молекули рідини з приповерхневого шару. Рівнодіюча сил, з якими її оточення діє на дану молекулу, не дорівнює нулю і направлена вниз. Отож молекули, що розташовані на поверхні, відчувають силу, що втягує їх вглиб рідини.

В результаті дії сил поверхневого натягу тиски під пласкою поверхнею і вигнутою поверхнею рідини – різні. Зменшення тиску під викривленою поверхнею призводить, в тому числі, до появи так званих капілярних явищ – піднімання рівня рідини в тонких трубках. Утворення випуклих форм на поверхні землі, при замерзанні рідини, що піднімається ґрунтом як капіляром, носить назву **морозного пучення**. Гідролаколіти, або пінго, – це маси

грунтового льоду, що утворюються в зоні багаторічної мерзлоти і досягають висоти 80 метрів.

Елементи термодинаміки

Науковців цікавить питання: як системи, що складаються з атомів, можуть обмінюватись енергією? Як вони поглинають її, як віддають? Узагальнена поведінка систем описується законами термодинаміки.

Щоб сформулювати закони термодинаміки необхідно ввести певні поняття.

- ✓ **Теплотою** будемо називати енергію, яка спонтанно перетікає між тілами різної температури.

Поняття теплоти легше зрозуміти, познайомившись з поняттям теплоємності: **теплоємність** – це кількість теплоти, яку треба надати тілу, щоб збільшити його температуру на один градус.

$$C = \frac{dQ}{dT}$$

Для різних процесів теплоємність газу може складати різні значення. Це залежить від того, чи змінюються кінетичні енергії частинок газу, та чи розширюється при цьому газ. Іншими словами, перебіг термодинамічних процесів визначають ще дві величини: внутрішня енергія газу і робота, яку він виконує.

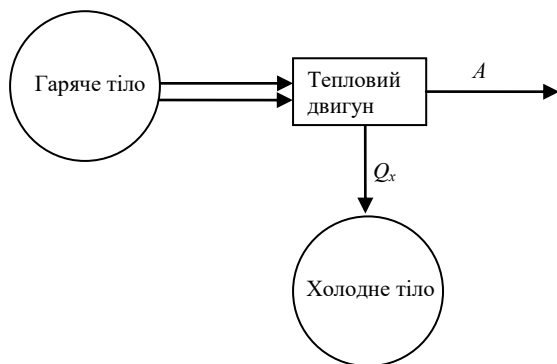
- ✓ **Внутрішня енергія** – це сума кінетичних і потенціальних енергій частинок системи. Якщо нехтувати притяганням між атомами, а також наявністю енергії, що зберігається у міжатомних зв'язках молекул, один моль одноатомних газів

містить таку кількість внутрішньої енергії: $U = \frac{3}{2}RT$, тут

R – універсальна газова стала, T – температура у кельвінах.

Внутрішня енергія двох- і багато- атомних молекул більша,

бо такі молекули можуть мати енергію, пов'язану з їх обертанням і коливанням.



✓ **Робота**, що виконується системою при зміні її об'єму:

$$A = \int p dV . \quad \text{В}$$

залежності від того, чи змінюється тиск під час процесу, і як саме

при цьому тиск залежить від об'єму, вираз для роботи може бути різним

Рис. 25 Тепловий двигун.

Сформулюємо і дослідимо три закони (начала) термодинаміки.

Нульовий закон: якщо дві системи знаходяться в стані теплової рівноваги з третьою системою, то вони знаходяться в стані теплової рівноваги і між собою. Всім цим трьом тілам можна приписати однакову температуру.

Перший закон термодинаміки описує, за рахунок чого може змінюватися внутрішня енергія системи: зміна внутрішньої енергії відбувається за рахунок надання системі теплоти та здійснення

роботи над нею. Або, теплота, надана системі, йде на збільшення її внутрішньої енергії і здійснення нею роботи.

$$Q = \Delta U + A$$

Другий закон термодинаміки описує оборотні циклічні процеси. **Оборотний процес** – такий процес, що можна провести в оберненому напрямку. Наприклад, газ в закритій посудині можна нагріти на 10 градусів, а потім на стільки ж охолодити. Це оборотний процес. Однак не можна випустити газ з посудини у більшу посудину, а потім зібрати його назад. Такий процес – необоротний. **Циклічний процес** – це процес, після закінчення якого система повертається а початковий стан.

Тепловий двигун – машина по перетворенню тепла в роботу.

Ефективність переведення машиною тепла в роботу визначається коефіцієнтом корисної дії теплової машини, він показує, яка частка теплоти, наданої тепловій машині, була перетворена на корисну роботу.

$$\eta = \frac{A}{Q} \times 100\%$$

ККД реальних теплових двигунів є значно меншим за 100%. Наприклад ефективність дизельних двигунів складає 35% – 40%. Експериментально відомо, що жодний тепловий двигун не має ефективності у 100%, а також що завжди існує втрата енергії в навколишнє середовище.

Ці експериментальні факти допомогли сформулювати **другий закон термодинаміки**: Неможливо побудувати теплову машину, що

працює циклічно, єдиним результатом якої було б перетворення тепла в роботу.

Третій закон термодинаміки оперує поняттям ентропії. Ентропія системи – міра безладу, хаосу в системі.

Ентропія визначається формулою Больцмана: $S = k \ln \Omega$, де Ω число мікроскопічних станів, які реалізують даний макроскопічний стан. Цю величину можна розуміти, наприклад, як кількість можливих варіантів станів (швидкостей) атомів, які б призводили до однієї і тієї ж температури, об'єму і тиску газу.

За третім законом термодинаміки, ентропія системи прямує до нуля при абсолютному нулі температур. Інше формулювання третього начала термодинаміки – абсолютний нуль температур недосяжний.

Для того, щоб забрати усю кінетичну енергію у атомів, поставити їх у положення "струнко", необхідно було б витратити нескінченно велику кількість енергії. Всесвіт опирається порядку. На даний час, найменша температура, яку досягнуто в лабораторії, 100 піко- ($\times 10^{-12}$) кельвінів. Європейське космічне агентство пропонує повторити досліди у відкритому космосі, аби досягти температури порядку фемпто- ($\times 10^{-15}$) кельвінів.

Лекція 4: Електрика

Електрика – розділ фізики, що вивчає взаємодію між зарядженими тілами та проходження електричного струму.

Електростатика

Було помічено, що у деяких тіл є властивість, яку ми називаємо електричним **зарядом**. Тіла, що володіють зарядами, можуть притягуватись, або відштовхуватись. Зарядів буває два типи, ми називаємо їх додатними і від'ємними зарядами. Однойменні заряди відштовхуються, а різнойменні притягуються. Надати тілу заряд можна, наприклад, потерши одне тіло об інше. Якщо ви натрете скло об шовк, скло отримає додатний заряд, а шовк – від'ємний.

Поверхня Землі несе слабкий від'ємний заряд, а атмосфера Землі – слабкий додатний заряд. В цілому планета Земля містить однакову кількість додатних і від'ємних зарядів, тобто вона нейтральна.

Одиниця вимірювання заряду – кулон (Кл). Заряд *квантується*, тобто може бути переданий лише порціями. Найменша порція заряду – заряд одного електрона, що дорівнює 1.6×10^{-19} Кл.

Заряджені об'єкти можуть взаємодіяти на відстані. Сила між двома зарядами, що знаходяться у вакуумі, прямо пропорційна величині точкових зарядів і обернено пропорційна квадрату відстані між ними. Це експериментально підтверджене твердження носить назву **закону Кулона**.

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

або у векторній формі

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$$

Константа ϵ_0 – діелектрична проникність вакууму $\epsilon_0 = 8,9 \times 10^{-11}$ Ф/м, q – заряди, r – відстань між ними.

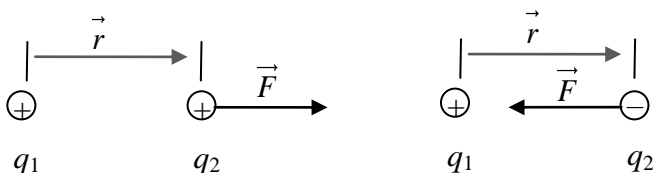


Рис. 26 Сила між точковими зарядами.

Заряди змінюють простір навколо себе. Іншими словами, вони створюють навколо себе електричне поле. Щоб показати, наскільки потужне електричне поле здатний утворити певний заряд, використовують величину, що має назву **напруженості електричного поля**.

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$$

або у векторній формі

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$$

Одиниці вимірювання напруженості електричного поля – Н/Кл.

Поле можна зобразити за допомогою ліній напруженості електричного поля. Лінії напруженості показують, куди діє сила, що діє на додатній заряд, вміщений в це поле. Лінії напруженості починаються на додатньому заряді і закінчуються на від'ємному.

Чим щільніше знаходяться лінії напруженості, тим більшою є напруженість електричного поля в цій області.

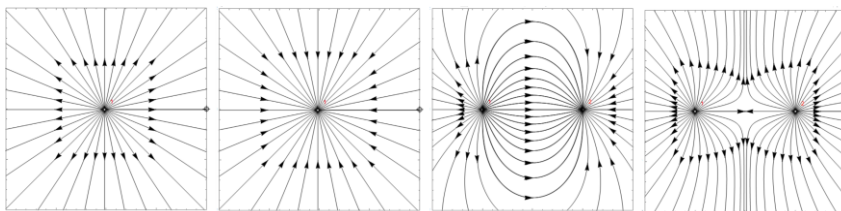


Рис 27 Зліва направо: поле додатнього заряду, поле від'ємного заряду, поле протилежно заряджених тіл, поле однойменно заряджених тіл.

Для електричних полів виконується принцип суперпозиції: тобто, якщо у певній точці простору діють поля \vec{E}_1 і \vec{E}_2 , то загальне поле у цій точці дорівнює $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$. Таким чином, щоб знайти у довільній точці величину поля неточкового, протяжного джерела, можна в уяві розбити його на маленькі частки і скласти усі поля, що створює кожна з часточок у цій довільній формі, інтегруванням.

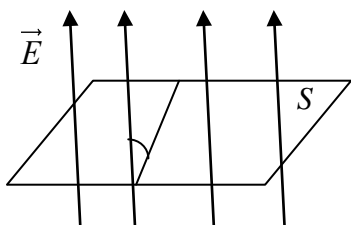


Рис. 28 Потік вектора E через поверхню.

Взяття інтегралів може бути складною справою, і тоді на допомогу приходить теорема Гауса.

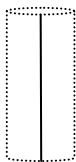
Введемо таке поняття як потік вектора через поверхню. В найпростішому випадку, коли

лінії напруженості перпендикулярні до обраної поверхні,
 $\Phi_E = \int E_n dS$.

Згідно з **теоремою Гауса**, потік вектора напруженості електричного поля через замкнену поверхню прямо пропорційний до заряду, що міститься під цією поверхнею. Математично:

$$\oint E_n dS = \sum \frac{q_i}{\epsilon_0}$$

При розв'язку задач обирають таку форму поверхні, щоби напруженість поля була б однакою в усіх точках цієї поверхні, а лінії напруженості поля – перпендикулярні до неї. Тоді інтеграл $\int E_n dS$ перетворюється просто на добуток ES .



Наведемо приклад: чому дорівнює напруженість електричного поля на відстані r від довгого провідника довжиною l , лінійна густина заряду якого, $\lambda = \frac{q}{l}$.

Очевидно, що з симетрійних властивостей, поверхня, на якій напруженість поля однакова, – циліндр. Площа бічної поверхні циліндра дорівнює $S = 2\pi r l$, тоді потік вектора \vec{E} через таку поверхню дорівнює $\oint E_n dS = E 2\pi r l$

За теоремою Гауса, $E 2\pi r l = \sum \frac{q_i}{\epsilon_0} = \frac{\lambda l}{\epsilon_0}$, звідси $E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}$.

Будь-яка сила може виконувати роботу. Отримаємо вираз для роботи по переміщенню додатнього заряду.

$$A = \int F dr = \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} dr = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_1} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_2}$$

Величину $U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r}$ назвемо **потенціальною енергією електричного поля**. За домовленістю, потенціальна енергія електричного поля для зарядів, що нескінченно віддалені один від одного, – нуль.

Для того, щоб характеризувати кількість потенціальної енергії, що нею володіє одиничний додатній заряд у полі певного заряду, використовують фізичну величину, яка носить назву **потенціалу** поля.

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

Для зображення поля іноді використовують **еквіпотенціальні**

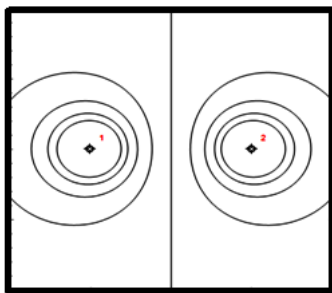


Рис 29 Еквіпотенціальні поверхні системи двох протилежно заряджених точкових зарядів.

лінії, тобто такі області, де потенціал поля однаковий.

Напруженість поля – векторна величина, а потенціал – скалярна, однак між ними існує зв'язок.

$$\vec{E} = - \frac{d\varphi}{dr} \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$$

Наведені до цього часу формули працюють для опису взаємодії між зарядженими тілами у вакуумі. Як же буде вести себе поле у речовині? Це буде залежати від того, до якого класу речовин вона відноситься – до провідників чи діелектриків.

Діелектрики – це речовини, від'ємні заряди яких (електрони) прив'язані до відповідних атомів чи молекул. Внаслідок взаємодії з зовнішнім електричним полем, молекули можуть поляризуватися (розвертатися так, щоб компенсувати зовнішнє поле). В результаті, всередині діелектрика зовнішнє електричне поле послаблюється в ϵ разів, де ϵ – константа, **діелектрична проникність речовини**. Тоді, якщо два заряджених тіла взаємодіють в такій речовині, сила між ними в ϵ разів менше, ніж аналогічна сила у вакуумі.

$$F' = \frac{F_{\text{вакуум}}}{\epsilon} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

Провідники – це речовини у яких деякі заряди не зв'язані з відповідними атомами (такі незв'язані заряди називають вільними). Якщо провідник внести в зовнішнє електричне поле, вільні заряди розподіляються таким чином, щоби повністю компенсувати зовнішнє електричне поле.

Електричний струм

Вільні заряди в провіднику рухаються, коли вони вміщені в зовнішнє електричне поле. Розділом електрики, що вивчає рух зарядів у провідниках, є електродинаміка.

Рух вільних зарядів виникає тоді, коли на кінцях провідника створюється різниця потенціалів. Направлений рух зарядів називають **електричним струмом**. За домовленістю, струм

направлений від точки з більшим потенціалом до точки з меншим потенціалом.

Якщо за час t провідником протікає заряд q , кажуть, що сила струму в цьому провіднику дорівнює $I = \frac{q}{t}$. Сила струму вимірюється в амперах $A = Кл/с$.

Іноді зручно використовувати не силу струму, а **густину струму** – тобто силу струму на одиницю площі перерізу провідника:

$$\vec{j} = \frac{I}{S} \vec{e}, \text{ тут } \vec{e} - \text{одиничний вектор в напрямку струму.}$$

Величина \vec{j} пропорційна дрейфовій швидкості руху вільних зарядів в провіднику та концентрації носіїв заряду.

Як змусити заряди рухатися через провідник швидше? Для цього треба створити більшу різницю потенціалів. Різницю потенціалів часто називають **напругою**, V . Іншими словами, $I \sim V$. Коефіцієнт пропорційності між цими двома величинами – **опір**, R , вимірюється в омах. Опір – величина, яка показує, наскільки певний зразок опирається протіканню крізь нього струму. $R = \rho \frac{l}{S}$,

де ρ – питомий опір, характеристика речовини при певній температурі, l – довжина провідника, S – площа його перерізу. Опір провідників зростає з температурою, оскільки тепловий рух носіїв заряду заважає їх направленому руху.

Вираз $I = \frac{V}{R}$ носить назву **закону Ома для ділянки кола**.

Для того, щоб сформулювати закон Ома для повного кола, необхідно ввести нові означення. Підтримувати струм неможливо без джерела енергії – батареї. Носії заряду спонтанно (через відштовхування однойменних зарядів) течуть від її одного терміналу до іншого. Однак для того, щоб змусити їх пройти через батарею, треба виконати над ними роботу. Така робота по переміщенню зарядів крізь батарею називається **електрорушійною силою** Е.Р.С., позначається літерою ε .

Різниця потенціалів V , яку можна досягнути між полюсами батареї з Е.Р.С. ε , дорівнює $V = \varepsilon - Ir$, де r – внутрішній опір провідника.

Вираз $I = \frac{\varepsilon}{R + r}$ носить назву **закону Ома для повного кола**.

Різноманітні елементи, підключені до електричного кола, в змозі перетворювати хімічну енергію, що зберігається у батареї в теплову чи механічну енергію. Ці елементи можна підключати у різних комбінаціях – послідовно чи паралельно.

Для розрахунку падінь напруги і струмів крізь різні елементи електричних кіл використовують так звані правила Кірхгофа.

Правило 1: У будь-якому вузлі сума струмів дорівнює нулю.

$$\sum I_i = 0$$

Правило 2: Для будь-якого замкненого кола Е.Р.С. дорівнює сумі добутків струму через кожну ділянку на опір цієї ділянки.

$$\sum \varepsilon_i = \sum I_j R_j$$

Електричні методи у георозвідці

Електричні методи знаходять своє застосування у георозвідці. Наша Земля – провідник. Різні її породи мають різний питомий опір. Питомі опори різних порід відомі і можуть бути використані, в тому числі, для їх ідентифікації в процесі георозвідки. Так, питомий опір граніту складає від 10^{-2} до 10^{-4} Ом.м., а глини від 0,1 до 10^{-2} Ом.м.

Технологія *mise-a-la-massé* використовується в гірничодобувній промисловості з 1920-х років для визначення електропровідних порід у надрах. Електрод, по якому тече струм, поміщається в провідне тіло (або встромляється в поверхню Землі, або опускається у свердловину) там, де необхідно провести дослідження, другий електрод зі струмом (що замикає електричне коло) встромляється у землю на достатньо великій відстані. Це призводить до створення електричного поля на всій досліджуваній поверхні. Еквіпотенціальні лінії цього поля можуть бути візуалізовані за допомогою вольтметра та двох мобільних зондів. Форма цих еквіпотенціальних ліній, як правило, повторює форму провідного тіла, яке знаходиться під поверхнею. Такий метод можна застосовувати, в тому числі, для мапування провідних (іонних) виток свердловини, затоплених гірських виробок та мінералізованих зон розлому.

Лекція 5: Магнетизм та електромагнетизм

Термін магнетизм вживають для опису сукупності явищ і властивостей, пов'язаних з існуванням магнітного поля. Якісно, існування магнітного поля і певних магнітних властивостей можна спостерігати у таких дослідах: магніти можуть притягуватися та відштовхуватися, в залежності від того, якими своїми полюсам вони обернені, сили, з якими магніти притягують один одного, спадають з відстанню, магніти змінюють орієнтацію стрілки компасу, піднесеного до них.

Природа магнітної взаємодії

Але яка ж є природа магнітної взаємодії? Підказка лежить у тому, що аналогічну до перерахованих дій може спричиняти рамка зі струмом. Тобто потік електричного струму через провідник створює навколо себе магнітне поле.

Найпростіший спосіб переконатися у цьому – відтворити дослід Ерстеда. Для цього треба зібрати просту електричну схему, що складається з довгого прямого дроту, джерела струму та вимикача. Якщо тепер розмістити компас безпосередньо над дротом, його стрілка розвернеться в бік перпендикулярний до дроту (а). Перемістивши компас під дріт, стрілка розвернеться в протилежний бік (див. Рисунок 30).

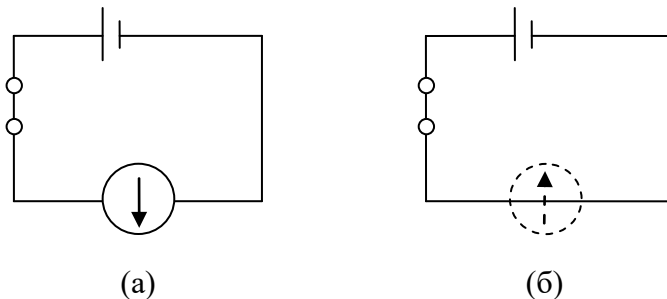


Рис. 30 Дослід Ерстеда.

За напрямок магнітного поля ми можемо вважати той напрямок, який приймає стрілка компасу, вміщена в це поле. А як формально визначити величину цього поля?

Для його характеристики будемо використовувати фізичну величину, що має назву **вектора магнітної індукції**, \vec{B} . Його означення дещо незвичне: величина поля визначається силою, що діє на рухомий заряд, вміщений в це поле.

Якщо заряд q рухається зі швидкістю v перпендикулярно до напрямку магнітного поля, на нього діє сила F , так що $\left| \vec{B} \right| = \frac{F}{qv}$.

Одиниця вимірювання магнітної індукції – тесла (Тл). Як видно з наведеної вище формули, $\text{Тл} = \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{Кл} \cdot \text{м}}$. В геофізичних дослідженнях часто використовують позасистемну одиницю гаус (Гс): $1 \text{ Гс} = 10^{-4} \text{ Тл}$.

Магнітна індукція побутових магнітів складає порядку 0.1 Тл, величина магнітного поля Землі – 10^{-4} Тл, найпотужніше магнітне поле, створене в лабораторних умовах, – 45 Тл.

Сила Лоренца

Сила, що діє на заряд, який рухається у магнітному полі, носить назву сили Лоренца:

$\vec{F} = q[\vec{v} \times \vec{B}]$. Модуль сили Лоренца дорівнює $F = qvB\sin\alpha$, де α

– кут між векторами \vec{v} та \vec{B} . Її напрямок можна визначити за допомогою правила правої руки, описаного в попередніх розділах.

Напрямок сили Лоренца обов'язково перпендикулярний до напрямку вектора швидкості частинки, що рухається. В результаті такої взаємодії з полем, частинку "загортає" по коловій траєкторії (рис 31). Радіус цієї траєкторії визначається зарядом частинки, її швидкістю, а також масою.

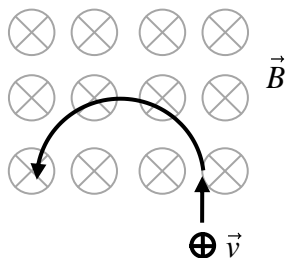


Рис. 31 Траєкторія руху заряду в магнітному полі

Останній факт дозволяє використовувати даний ефект для побудови мас-спектрометру. Якщо йони різних атомів відхиляються по траєкторіях різних радіусів, то за тим, де саме "приземлилася" заряджена частинка, можна визначити її масу, а значить і хімічну ідентичність. Мас-спектрометрія широко застосовується для аналізу складу органічних

сполук у ґрунтах, реєстрації органічного забруднення вод та визначення складу нафт і їхніх фракцій.

Яким чином можна створити магнітне поле необхідної величини і напрямку?

Експериментально встановлено, яке саме поле утворює мала ділянка провідника довжиною dl , по якому тече електричний струм i на відстані r від провідника (див. Рис 32). Цей експериментальний факт відомий як закон Біо-Савара-Лапласа.

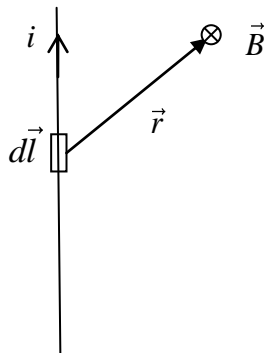


Рис. 32 До закону Біо-Савара-Лапласа.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i \left[d\vec{l} \times \vec{r} \right]}{r^3}.$$

Тут μ_0 – магнітна проникність вакууму, стала, яка в СІ дорівнює $4\pi \times 10^{-7} \text{ Н/А}^2$.

Магнітне поле струмів

Закон Біо-Савара-Лапласа можна використовувати для визначення магнітного поля протяжними об'єктами, по яких тече струм (нескінченно довгий провідник, колова рамка зі струмом, соленоїд), підсумувавши магнітні поля, які утворюють кожна з ділянок провідника, за допомогою інтегрування

$$\vec{B} = \int d\vec{B} = \int \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i \left[d\vec{l} \times \vec{r} \right]}{r^3}$$

Якщо інтегрування викликає певні труднощі, для знаходження магнітної індукції поля протяжного об'єкта можна застосувати **закон Ампера** для циркуляції магнітного поля. Він стверджує, що інтеграл по замкненому контуру від магнітної індукції пропорційний силі електричного струму, що протікає через площу, обмежену контуром. Або:

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 i$$

Використання цього закону дозволяє суттєво спростити задачу про знаходження магнітного поля симетричного об'єкту. Якщо з міркувань симетрії вибрати замкнений контур такої форми, що величина індукції магнітного поля в кожній його точці однакова, тоді інтеграл перетворюється на добуток величини індукції поля та довжини цього контуру.

Отримаємо вираз для індукції магнітного поля на відстані x від довгого провідника, що несе струм i . З симетрійних міркувань очевидно, що його магнітне поле однакове на цій відстані з усіх боків провідника. Виберемо замкнутий контур у формі кола.

Довжина цього контуру дорівнює $2\pi x$, і тому $\oint \vec{B} d\vec{l} = B \times 2\pi x$.

Застосовуючи закон Ампера для циркуляції магнітного поля, отримуємо кінцевий вираз:

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi x}.$$

Змінне електричне поле також є джерелом, що породжує магнітне поле. З його врахуванням, можна узагальнити закон Ампера і представити його у наступній формі:

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \left(i + \int \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} d\vec{S} \right), \text{ де } S - \text{ площа контуру, за яким}$$

береться інтеграл зліва, а E – напруженість змінного електричного поля в даний момент часу t .

Магнітне поле у речовині

Досі ми розглядали магнітні поля, утворені струмами. Чому ж деякі речовини також можуть демонструвати магнітні властивості? В принципі, будь-яка речовина є магнетиком, тобто здатна під дією магнітного поля набувати магнітний момент (намагнічуватися) і таким чином змінювати зовнішнє поле, створене струмами. Намагнічена речовина створює магнітне поле \vec{B}' , яке накладається на обумовлене струмами поле \vec{B}_0 , так що результуюче поле є їх сумою: $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$.

Для пояснення намагнічування тіл Ампер припустив, що в молекулах речовини циркулюють колові струми. Кожний такий струм має власний магнітний момент і створює у оточуючому просторі магнітне поле. За відсутності зовнішнього поля молекулярні струми орієнтовані невпорядковано, внаслідок чого результуюче магнітне поле дорівнює нулю. Внаслідок хаотичної орієнтації магнітних моментів окремих молекул сумарний магнітний момент тіла також нуль. Під дією зовнішнього поля магнітні моменти молекул можуть набувати переважну орієнтацію

в певному напрямку, внаслідок чого магнетик намагнічується, тобто його сумарний магнітний момент стає відмінним від нуля. Магнітні поля окремих молекулярних струмів у цьому випадку вже не компенсують одне одного.

Явище електромагнітної індукції

Як було вказано вище, струм чи змінне електричне поле можуть породжувати магнітне поле. А чи можливий обернений процес: чи може магнітне поле генерувати струм?

Поклавши магніт біля провідної рамки з чутливим амперметром, ви не побачите жодної реакції вимірювального пристрою. Але варто різко відсунути магніт від рамки, чи навпаки різко посунути його до рамки, як амперметр покаже короткоплинний імпульс струму, що пробіжить колом. Чим швидше наближати чи віддаляти магніт від рамки, тим більшою буде значення максимального струму в імпульсі. Це явище отримало назву **електромагнітної індукції**. З описаного вище експерименту випливає, що величина генерованого чи індукованого струму в рамці пропорційна не самому магнітному полю, а швидкості його зміни.

Введемо поняття потоку вектора магнітної індукції через поверхню площею S перпендикулярною до вектора індукції: $\Phi = \int B \cdot dS$.

Е.Р.С., що генерується у контурі, який знаходиться у змінному магнітному полі, дорівнює:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt}.$$

Що означає знак мінус у попередньому виразі, і як визначити напрямок індукованого у контурі струму? Відповідь на це дає **правило Ленца**: індукційний струм у замкненому контурі має такий напрям, що створюваний цим струмом власний магнітний потік протидіє тим змінам зовнішнього магнітного потоку, які збуджують індукційний струм.

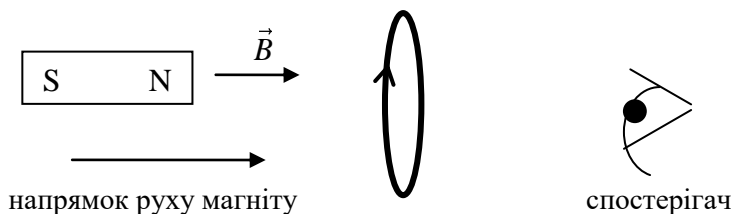


Рис. 33 Ілюстрація до правила Ленца

Проілюструємо це правило Рисунком 33. Якщо магніт наближається до контуру північним полюсом, вектор магнітної індукції, і магнітний потік через контур зростають. Згідно з правилом Ленца, це має призвести до появи в контурі такого струму, чиє магнітне поле протидіяло такому зростанню. Тобто, контур має генерувати магнітне поле, що направлено в протилежний бік, вліво. Це можливо, якщо в контурі протікатиме струм за годинниковою стрілкою (як видно спостерігачу, що знаходиться за контуром.)

Магнітне поле Землі

Магнітне поле Землі подібно до поля стрижневого магніту, нахиленого на 11 градусів відносно осі обертання Землі. Його середня індукція має порядок 10^{-5} Тл. Найбільш прийняте

пояснення механізму виникнення магнітного поля Землі – так зване магнітне динамо. Рідке залізо, провідник, з якого складається зовнішнє ядро Землі, знаходиться в постійному русі і, таким чином, створює електричний струм. Цей струм створює магнітне поле.

Магнітне поле Землі періодично переключається (тобто магнітний компас, який вказує на північ, вказує на південь, і навпаки), і ці зміни є симетричними (тобто нормальний і зворотній напрямки поля точно антипаралельні). Вищезгадане припущення використовується для реконструкції положень прадавніх континентів за напрямком стародавнього магнітного поля, зафіксованого феромагнітними часточками гірських порід.

Магнітне поле Землі захищає життя від сонячного вітру. Сонячний вітер – це потік швидких заряджених частинок, що виділяється із сонячної корони у навколишній простір у всіх напрямках. Магнітне поле Землі служить їй щитом, перенаправляючи потік рухомих заряджених частинок навколо планети до її магнітних полюсів.

Методи георозвідки

За допомогою методів, що засновані на явищі електромагнітної індукції, можна досліджувати безліч об'єктів. Можна проводити розвідку мінералів, обстеження підземних вод, дослідження геотермальних ресурсів, виявляти наявність геологічних та штучних порожнин, і т.д.

Електромагнітні (ЕМ) методи використовують відгук Землі на поширення в ній магнітного поля. Змінне магнітне поле може бути згенеровано шляхом пропускання змінного струму через малий

сердечник, складений з багатьох витків провідників. Для геофізичних застосувань частота первинного змінного поля зазвичай становить сотні чи одиниці тисяч Гц (циклів на секунду). Змінне магнітне поле генератора може породжувати у земній товщі струми. Ці струми, в свою чергу, також створюють магнітне поле. Це магнітне поле можна зафіксувати за допомогою ще одного електричного контуру, в якому також буде генеруватися електричний струм. Електричний струм, згернерований таким чином, є меншим за амплітудою, ніж первинний струм і також зміщений відносно нього у часі.

Основною перевагою методів, що засновані на електромагнітній індукції, є те, що вони не потребують прямого контакту з землею, як у випадку електричних методів постійного струму. Тому такі вимірювання можна проводити швидше, ніж вимірювання методами постійного струму.

Рівняння Максвела

Рівняння Максвела – це рівняння, що описують, як заряджені частинки призводять до появи електричних та магнітних полів. Разом з рівнянням, що описує силу Лоренца, чотири рівняння Максвела забезпечують все, що потрібно для розрахунку руху класичних частинок в електричному та магнітному полях.

$$\oint E_l dl = - \int_S \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right)_n dS ,$$

$$\oint_S B_n dS = 0 .$$

Перше з них пов'язує значення \vec{E} з і змінами в часі вектора \vec{B} і є виразом закону електромагнітної індукції. Друге рівняння демонструє, що лінії індукції магнітного поля замкнуті, або також те, що магнітного монополя (наприклад північного поля магніту, відокремленого від південного полюсу) не існує. Другу пару рівнянь складають рівняння :

$$\oint H_l dl = \int_s j_n dS + \oint_s \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right)_n dS ,$$

$$\oint_s D_n dS = \int_v \rho dV ,$$

тут j – густина струму, струм на одиницю площі перерізу провідника, ρ – об'ємна густина заряду, електричний заряд одиниці об'єму.

Перше рівняння встановлює зв'язок між струмами провідності та зміщення та породженого ними магнітним полем. Друге рівняння вказує на те, що лінії вектора \vec{D} починаються та закінчуються на зарядах або те, що джерелом електричного поля є електричний заряд.

Для розв'язку рівнянь використовують ту обставину, що між величинами, які в них входять існують наступні співвідношення

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E} ,$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H} ,$$

Величину \vec{D} називають індукцією електричного поля, а \vec{H} – напруженістю магнітного поля.

Отож, змінне магнітне поле породжує змінне електричне поле, а змінне електричне поле породжує змінне магнітне поле. Таким

чином, якщо в якійсь точці простору відбулося "збурення" поля, то таке "збурення" може поширюватися у просторі. Його ми називаємо електромагнітною хвилею.

Математично, хвиля описується за допомогою наступного рівняння:

$$E = E_0 \cos\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{\lambda}x\right)$$

Це рівняння допомагає знайти значення напруженості електромагнітного поля E в будь-якій точці x в будь-який момент часу t . Оскільки косинус – періодична функція, різні точки простору можуть мати однакове значення E в певний момент часу. Так само в одній і тій же точці простору, з часом значення E гармонічно змінюється. Відстань між двома послідовними точками, у яких напруженість електричного поля має однакову величину і напрямок називається довжиною хвилі (λ), одиниця вимірювання метри. Час, за який напруженість поля у певній точці повертається до попереднього значення, – період хвилі (T), одиниця вимірювання секунди. Також для опису хвилі використовують і обернену до періоду величину, частоту хвилі.

В залежності від довжини хвилі, різні електромагнітні хвилі мають різні назви:

Радіохвилі: Типові довжини хвиль: від 30 см до 500 м. Радіохвилі покривають величезну смугу частот, а їхні довжини хвиль варіюються від десятків сантиметрів для високочастотних хвиль до сотень метрів. Використовуються для передачі радіо- та теле-сигналів. *Мікрохвильове випромінювання:* Використовується для обробки їжі в мікрохвильових печах, але також для передачі

інформації в радіолокаційному обладнанні. Типові довжини хвиль: 15 см. *Інфрачервоне випромінювання*: Хоча ми і не можемо бачити такий тип електромагнітних хвиль, але можемо відчутися його як тепло. Типові довжини хвиль: 0.01 мм. *Видиме світло*: світло, яке ми можемо побачити, – це всього лише крихітний шматочок електромагнітного спектра, з довжинами хвиль від 400 нм до 700 нм. *Ультрафіолетове випромінювання*: має довжину хвилі коротшу, ніж довжина хвилі фіолетового світла, яку наші очі можуть виявити. Сонце є потужним джерелом ультрафіолетового випромінювання. *Рентгенівські промені*: дуже корисний тип хвиль високої енергії, широко використовується в медицині та безпеці. Характерна довжина хвилі 0,1 нанометра (діаметр атома). *Гамма-промені*: це найбільш енергійна і небезпечна форма електромагнітних хвиль. Гамма-промені виділяються з ядер деяких радіоактивних елементів, і через високу енергію можуть пошкодити біологічні організми. Типові довжини хвиль: 0.000001 нанометрів (діаметр атомного ядра).

Не дивлячись на різноманітність, всі електромагнітні хвилі мають одну природу і поширюються у вакуумі з однією і тією ж швидкістю: $c = 299\,792\,458 \text{ м/с} \approx 3 \times 10^8 \text{ м/с}$. Докладніше явища, пов'язані з поширенням електромагнітних хвиль, ми розглянемо в наступній лекції.

Лекція 6: Оптика

Оптика – це розділ фізики, що вивчає природу видимого електромагнітного випромінювання (світла), досліджує закони його поширення в різних середовищах і взаємодію з речовиною. Оптика вивчає різноманітні аспекти поведінки світла: геометрична оптика вивчає закони розповсюдження світлових променів, хвильова – ті властивості світла, що обумовлені його хвильовою природою, а квантова оптика – частинкові властивості світла.

Геометрична оптика

Геометрична оптика вивчає закони поширення в просторі **світлових променів** – прямих, вздовж яких переноситься енергія електромагнітних хвиль.

Світлові промені поширюються у вакуумі зі швидкістю c , а в речовині в n разів меншою швидкістю $v = \frac{c}{n}$. Характеристику речовини, позначену n , називають **показником заломлення** речовини. Так для води показник заломлення складає 1,33, для скла 1,50, для алмазу – 2,42. Показник заломлення повітря за нормальних умов складає 1,000277.

Основними законами геометричної оптики:

1. **Закон прямолінійного поширення світла.** В однорідному середовищі світло поширюється прямолінійно. Однорідне середовище – середовище, у всіх частинах якого показник заломлення однаковий.

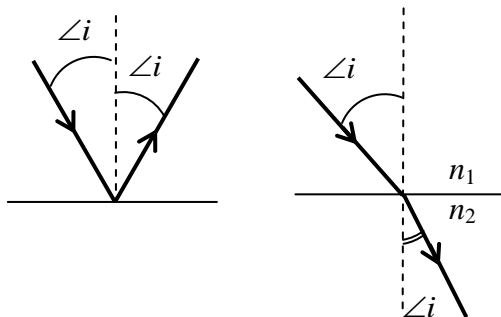


Рис.34 Закони геометричної оптики

2. Закон відбивання світла. Промінь падаючий, промінь відбитий і нормаль до поверхні в точці падіння, лежать в одній площині, а кут падіння світлового промені дорівнює куту відбивання. Тут кут падіння – це кут між нормаллю і падаючим променем, а кут відбивання – кут між нормаллю і відбитим променем.

3. Закон заломлення світла (також відомий як закон Снеліуса) Промінь падаючий, промінь заломлений і нормаль до поверхні в точці падіння лежать в одній площині. При будь-якому куті падіння відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення є величиною, сталою для двох певних середовищ, і дорівнює відношенню показника заломлення другого середовища до показника заломлення першого середовища. Тут кут падіння – це кут між нормаллю і падаючим променем, а кут заломлення – кут між нормаллю і заломленим променем.

Математично:
$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Показник заломлення середовища залежить від частоти світла. Як правило, показник заломлення зменшується при збільшенні довжини хвилі, тобто у прозорій речовині синє світло рухається повільніше, ніж червоне світло. Залежність показника заломлення середовища від частоти світла називають **дисперсією світла**. Дисперсія – явище, завдяки якому призма розкладає біле світло на компоненти. Різні компоненти білого світла заломлюються склом на трохи різні кути і, таким чином, розділяються у просторі. Пояснення явища дисперсії лежить у взаємодії електронів у атомах з зовнішнім електричним полем.

Атмосферні явища, пов'язані з заломленням світла

Звернемо увагу, що коли друге середовище більш оптично густе, тобто має більший показник заломлення, то заломлений промінь лежить ближче до нормалі, ніж падаючий промінь. Коли ж друге середовище менш оптичне густе, заломлений промінь лежить від нормалі далі, ніж падаючий промінь. В граничному випадку, при достатньо великому куті падіння, кут заломлення може стати 90° , тобто світло не зможе потрапити у друге середовище взагалі. Кут падіння, при якому кут заломлення прямий, має назву критичного кута. Якщо падаючий кут більший за критичний, світло не може потрапити у друге середовище. Це явище отримало назву **повного внутрішнього відбивання**.

Явище повного внутрішнього відбивання дозволяє пояснити утворення міражів. Нижній міраж можна спостерігати над гарячою автострадою: здається, що на поверхні асфальту розлиті калюжі. Однак при наближенні до них виявляється, що асфальт сухий.

Міраж виникає, коли світло заломлюється у шарах повітря, що мають різні температури. Холодне повітря щільніше, ніж тепле повітря, і тому має більший показник заломлення. Це означає, що, коли світло проходить з прохолодного шару у гарячіший шар повітря, воно відхиляється вгору у бік більш щільного

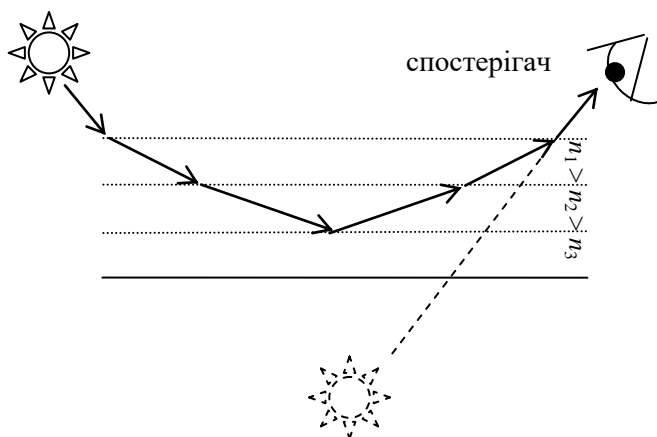


Рис.35 Міраж.

повітря, далі від землі (див. рисунок 35).

Для спостерігача промені, здається, йдуть з землі. Це виглядає так само, як відбиття неба на поверхні води, що і створює ілюзію "мокрого" асфальту.

Ще одним атмосферним явищем, пов'язаним із заломленням світла у атмосфері, є явище рефракційного подовження

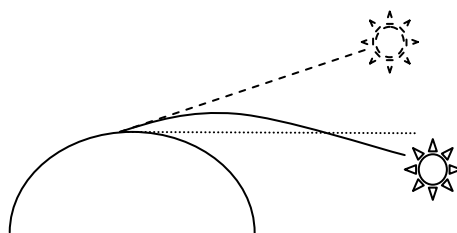


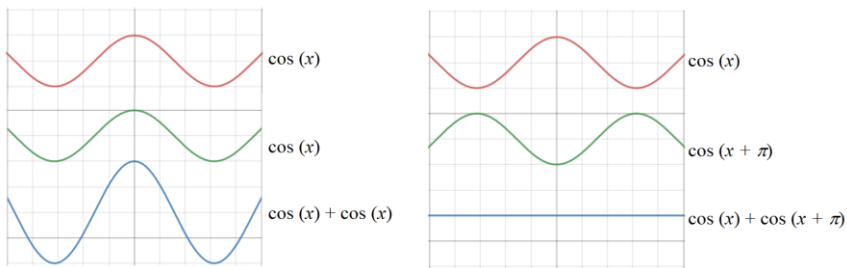
Рис. 36 Рефракційне подовження дня.

дня. Атмосфера Землі має різну щільність на різних висотах, отже світло від сонця може заломлюватися в атмосфері землі (див. рисунок 36). В результаті відбувається уявне зміщення небесного світила. Сонце насправді вже зайшло за горизонт, а ми все ще його бачимо. Для середніх широт рефракційне подовження дня складає порядку 10 хвилин, але на широті 89° таке подовження триває 3 години 42 хвилини. На полюсах завдяки рефракційному подовженню дня полярний день довший за полярну ніч на 14 діб.

Хвильова оптика

Як було зазначено в попередній лекції, світло – це хвиля. Для нього характерні такі явища як інтерференція, дифракція та дисперсія. Розглянемо ці явища.

Світлова чи електромагнітна хвиля – це розповсюдження коливань вектора напруженості електричного і магнітного полів в просторі і часі. Для цих полів виконується принцип суперпозиції: результуюче поле в точці дорівнює сумі полів, що діють в ній. Коли дві або більше хвилі накладаються, результуюче поле в будь-якій точці і в будь-який момент часу є сумою миттєвих значень полів, які були б присутніми в цій точці, якщо кожне з них діяло б окремо.



(a)

(б)

Рис. 36 Результат інтерференції двох хвиль. (а) хвилі зсунуті одна від одної на 1 довжину хвилі, або на 0 радіан. Результат – конструктивна інтерференція, (б) хвилі зсунуті одна від одної на половину довжини хвилі або на π радіан. Результат – деструктивна інтерференція.

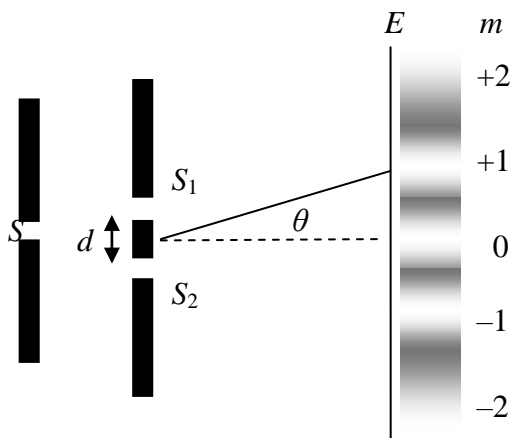


Рис. 37 Двопроменева інтерференція. Хід променів і вигляд інтерференційної картини.

Якщо джерела узгоджені – в даний момент час в певну точку будуть прибувати хвилі з певним запізненням. Такі узгоджені хвилі називають **когерентними**.

Хвилі, що випускаються двома різними джерелами світла, не узгоджені між собою. Однак, ми можемо взяти хвилі, що випускаються одним джерелом, і змусити їх пройти через два отвори, як показано на Рисунку 37. Хвилі, що вийшли з отворів, можуть накладатися одна на одну.

Якщо хвилі від двох або більше джерел приходять в точку у фазі, вони підсилюють одна одну: амплітуда результуючої хвилі є сумою амплітуд окремих хвиль. Для цього різниця у відстані, що проходять точки має бути кратною довжині хвилі.

$$r_1 - r_2 = m\lambda$$

Хвилі можуть бути суміщеними і іншим чином: якщо різниця ходу між ними кратна половині довжини хвилі, то в певній точці хвилі завжди будуть у протифазі – пік одної хвилі суміщатиметься з

мінімумом другої хвилі. $r_1 - r_2 = \frac{\lambda}{2}$ (рис. 36). В результаті,

амплітуда результуючої хвилі в такій точці завжди дорівнюватиме нулю.

Розглянемо результат двопроменевої інтерференції досліду Юнга, Рис. 37. Світло довжиною хвилі λ проходить через вузьку щілину S, а далі через дві щілини S_1 і S_2 , розташовані досить близько одна до одної на відстані d , що складає долі міліметра. Ці щілини слугують когерентними джерелами світла. Інтерференція спостерігається в області, в якій хвилі від цих джерел перекриваються. На екрані E ми бачимо чергування смуг з максимумом і мінімумом інтенсивності світла – тобто світлих і

темних смуг. Центральна смуга ($m = 0$) – світла. Для m -ї за номером яскравої смуги, що спостерігається під кутом θ від центральної смуги, виконується наступне співвідношення:

$$d \sin \theta = m\lambda, \text{ де } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Для m -ї за номером темної смуги, що спостерігається під кутом θ від центральної смуги, виконується наступне співвідношення:

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda, \text{ де } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

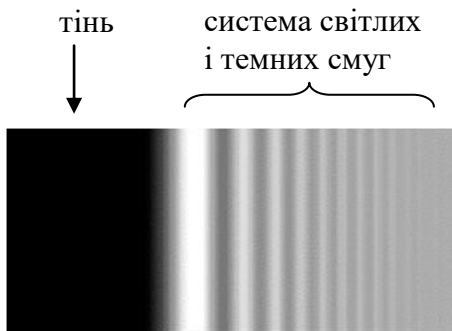


Рис. 38 Дифракція на косинці.

Всі звикли до того, що звук огинає кути. Якщо звук не поведився би таким чином, ви б не могли почути людину, що стояла б за рогом будівлі. Світло теж може огинати кути. Коли світло від монохроматичного точкового джерела падає на косинець і кидає тінь, край тіні не буде ідеально гострим. Натомість на краю

тіні чергуються яскраві та темні смуги (Рис. 38). Світло, що виходить з отвору, не веде себе точно згідно з прогнозами геометричної оптики.

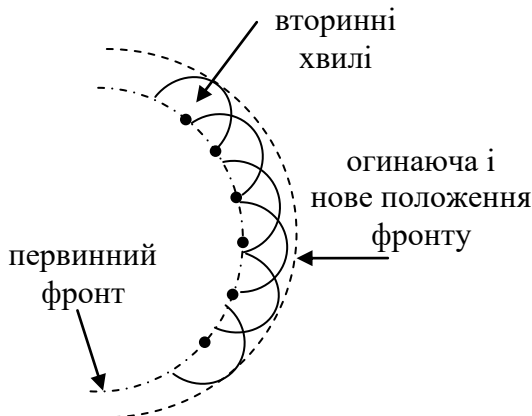


Рис. 39 Принцип Гюйгенса-Френеля

Пояснити це явище можна за допомогою **принципу Гюйгенса-Френеля**: кожна точка фронту хвилі (поверхні, до якої розповсюдилася хвиля) є джерелом нової вторинної хвилі. Вторинні хвилі накладаються одна на одну, і огинаяча їх поверхонь показує нове положення хвильового фронту (Рис. 39). Цей принцип дозволяє визначати напрямок руху світлової хвилі, будувати хвильові поверхні в різних випадках.

Чому ж на краю тіні виникає система смуг? Вторинні хвилі є когерентними джерелами одна для одної. Відповідно, в результаті їх накладання утворюється інтерференційна картина – система світлих і темних смуг! Положення цих смуг залежить від параметрів системи – ширини щілини, кількості щілин, що продукують вторинні хвилі, відстані на якій спостерігається **дифракційна** (а, по-суті, інтерференційна) картина.

Розглянемо окремий випадок дифракції, отриманої за допомогою дифракційної ґратки. **Дифракційна ґратка** – це система плоских щілин однакової ширини, що знаходяться на однакових відстанях одна від одної (d). Щілини тонкі і знаходяться дуже близько одна від одної – 1–10 мкм.

Для m -ї за номером яскравої смуги, що спостерігається під кутом θ від центральної смуги, виконується наступне співвідношення:

$$d \sin \theta = m\lambda, \text{ де } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Умова максимумів інтенсивності – положень яскравих смуг – така ж, як і у експерименті інтерференції на двох щілинах. Проте кутовий поділ максимумів, отриманих за допомогою дифракційної ґратки, як правило, набагато більший, оскільки відстань між щілинами дифракційної ґратки дуже мала.

Максимуми дифракційної картини для різних компонент білого світла – різні, тому дифракційну ґратку можна використовувати для розкладання білого світла на компоненти.

Квантова оптика

Не усі явища, пов'язані зі світлом, можна пояснити за допомогою хвильової теорії світла. Розглянемо, наприклад, явище фотоефекту.

Якщо на металеву пластинку направити промінь світла, з її поверхні можна вибити електрони. Лабораторні установки по вивченню фотоефекту дозволяють оцінити кінетичну енергію цих електронів, та струм, який утворюється потоком вибитих електронів.

Хвильова модель світла передбачає, що збільшення амплітуди світла збільшувало б кінетичну енергію випромінюваних електронів, а збільшення частоти призводило би до збільшення швидкості випромінюваних електронів, тобто до збільшення вимірюваного струму.

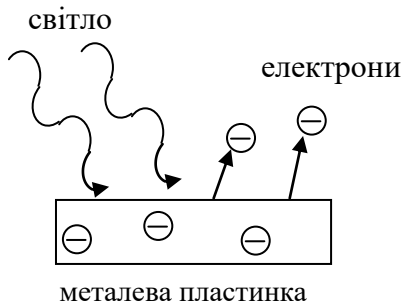


Рис. 40 Явище фотоелекту.

Але на практиці відбувається зовсім протилежне! Експерименти показали, що збільшення частоти світла збільшує кінетичну енергію фотоелектронів, а збільшення амплітуди світла збільшує струм. Більше того, електрони зовсім не вибиваються з поверхні металу навіть дуже потужним джерелом, коли частота цього світла була менше певної величини.

На основі цих висновків Альбертом Ейнштейном було запропоновано наступне пояснення: світло поводить ся як потік частинок (що називають фотонами), кожна з яких переносить енергією, пропорційну частоті світла, що утворює цей потік: $E = h\nu$, де ν – частота світла, а $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ м}^2\text{кг/с}$.

Отже світло має і хвильову, і корпускулярну (частинкову) природу! Якщо світло-хвиля має корпускулярну природу, то чи мають об'єкти, які ми вважаємо частинками, хвильову природу. Чи хвиля електрон? Атом? Молекула? Так! Будь-якому об'єкту, що рухається, можна приписати довжину хвилі, що визначається як

$\lambda = \frac{h}{mv}$, де h – стала Планка, m – маса частинки, v – її швидкість.

Експериментально спостерігалася інтерференція і дифракція електронів, атомів натрію, а також дифракція фулеренів – наночастинок, що складаються з 60 атомів карбону.

Лекція 7: Фізика атома

Будова атому

Матерія побудована з атомів. Але з чого складається сам атом? І як про це дізналися вчені? В кінці 19го століття найкращою моделлю атому, якою послуговувалися вчені, була так звана модель Томсона або модель "сливового пудингу". Вважалося, що атом складається з позитивно зарядженої речовини "пудингу", в якій рівномірно розподілені від'ємно заряджені "сливи".

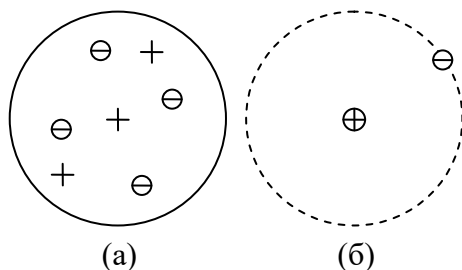


Рис. 41 Модель атома (а) Томпсона (б) Резерфорда

Для того, щоб підтвердити або спростувати цю модель експериментально, англійський вчений Ернест Резерфорд спрямував пучки альфа-частинок (які є ядрами атомів гелію і, отже, є позитивно зарядженими частинками) на тонку

золоту фольгу, і спостерігав, як саме альфа-частинки будуть розсіюватися на фользі. Розсіюватися – означає змінювати напрям руху. То як повели себе альфа-частинки? Скільки з них пролетіло скрізь фольгу, не змінюючи напрямку руху, скільки відхилилося на певний кут?

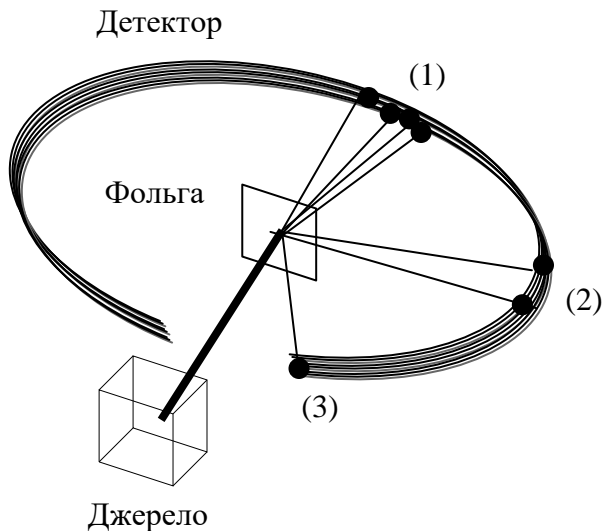


Рис 42 Дослід Резерфорда.

Резерфорд зробив 3 спостереження (Рис.42): Більшість швидких, заряджених альфа-частинок проходили просто наскрізь через фольгу (1). Якщо б вірною була модель сливового пудинга, то так мали б себе вести абсолютно всі частинки. Деякі альфа-частинки відхилялись, відхиляючись після проходження крізь фольгу на великі кути (2). Це вже було неочікувано. Нарешті дуже мала кількість альфа-частинок відхилялася просто назад (3)! Такий результат був точно несумісним з моделлю Томпсона. Резерфорд пізніше зауважив: "Це було так само неймовірно, як якщо б ви вистріли 15-дюймовим снарядом в аркуш паперу, і снаряд би відстрибнув назад, прямо на вас!"

Результати експерименту, однак, можна пояснити, якщо припустити інший склад атому. У цій моделі позитивно заряджена речовина сконцентрована у невеликій, але масивній області, названій ядром. Для завершення цієї моделі треба було б розташувати від'ємно заряджені частинки (електрони) навколо ядра так, щоб не дозволити атому проникнути в простір вже зайнятий сусідніми атомами. Наведена нижче діаграма допоможе вам зрозуміти результати експерименту. На жаль, її не можна зобразити в правильному масштабі, адже розмір ядра приблизно у тисячу разів перевищує розмір атома. Так, якщо б ядро було розміром з горіх, то розмір атома був би розміром з футбольний стадіон.

Оскільки маси ядер різних елементів різні, Резерфорд висловив припущення, що ядро складається з певної кількості позитивно заряджених частинок – протонів. Причому кількість протонів у нейтральному атомі завжди дорівнює кількості нейтронів. Резерфорд також постулював, що в ядрі атомів, крім заряджених частинок містяться також нейтральні масивні частки. Цей висновок був зроблений внаслідок невідповідності між атомним числом елемента (кількість протонів чи кількість електронів у атомі) та його атомною масою (що зазвичай перевищує масу протонів). Було виявлено, що берилій, коли його бомбардують альфа-частинками, випускає дуже енергійний потік випромінювання. Причому промінь цього випромінювання, спрямований на речовину, багату протонами, наприклад, на парафін, вибиває з нього потік протонів. У 1932 Чадвік запропонував, що потік випромінювання, що вибивається з берилію є тим самим нейтроном, який був передбачений Резерфордом. Використовуючи закони кінематики, Чадвік зміг визначити швидкість протонів, вибитих з парафіну. Потім, застосувавши закон збереження

імпульсу, він зміг визначити, що маса нейтронів майже точно така ж, як і у протонів.

Явище радіоактивності. Властивості альфа-, бета- та гама частинок

В ядрах з однією і тією ж кількістю протонів може знаходитися різна кількість нейтронів. Атом з певним набором протонів та нейтронів – нуклід. Ізотопом називають нукліди з однією і тією ж кількістю протонів та різною кількістю нейтронів. Експериментально встановлено, що певні нукліди не тримаються до купи. Явище спонтанного перетворення нестійкого ізотопу хімічного елементу в інший ізотоп називають **радіоактивністю**. В результаті радіоактивного розпаду ядра ізотопів розпадаються на декілька фрагментів, випускаючи з себе так звані альфа, бета чи гама-частинки.

Коротко опишемо властивості цих частинок. **Альфа частинки** представляють собою ядра гелію-4. Вони позитивно заряджені, масивні і мають швидкість 5% від швидкості світла. Через малу швидкість та великий заряд, вони пролітають невелику відстань: через менше метра польоту в повітрі вони іонізують сусідні атоми (відривають електрони у навколишніх нейтральних атомів), стаючи нейтральними атомами гелію. Оскільки альфа-частинки є зарядженими, вони відхиляються магнітним полем.

Бета частинки – це електрони. Їхня маса значно менша за масу альфа-частинок, вони від'ємно заряджені. Радіоактивні атоми випускають бета частинки, що мають швидкість порядку 90% від швидкості світла. Така комбінація властивостей дозволяє бета

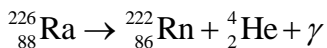
частинками пролетіти в повітрі довшу відстань – до 5 м. Бета частинки заряджені, отже теж відхиляються магнітним полем, але в протилежний бік, ніж це роблять альфа-частинки.

Нарешті, **гама-частинки** – це кванти електромагнітного випромінювання, фотони. Їхня маса, як і заряд – 0. Вони рухаються зі швидкістю світла. Зупинити потік гама частинок важко – 5 мм свинцю зможе поглинути лише 90% фотонів у потоку.

Назви типів розпаду збігаються з типами частинок, що випускає атом, який-розпадається. Це може бути альфа-частинок чи бета-розпад. Під час будь-якого з типів розпаду, зарядове число (число протонів у атомі) і масове число (число протонів та нейтронів у атомі) частинок мають зберігатися. Нижче приведені два приклади радіоактивних розпадів.

Альфа-розпадом називають спонтанний розпад атомного ядра на ядро-продукт і альфа-частинку. Альфа-розпад є властивістю важких ядер з масовим числом, що перевищує 200. Дочірнє ядро, що утворилося в результаті альфа-розпаду, часто також виявляється радіоактивним. Процес радіоактивного розпаду відбувається доти, поки в результаті не з'явиться стабільне, нерадіоактивне ядро.

Нижче показане рівняння розпаду ізотопу радію з утворенням радону, альфа-частинки та гамма-частинки. Верхнім індексом біля кожного елементу показана загальна кількість у них протонів і нейтронів, нижнім – кількість протонів/електронів.



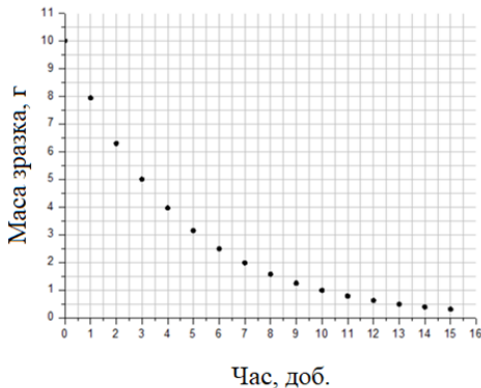
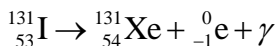


Рис. 43 Залежність маси радіоактивного зразка від часу.

В результаті бета-розпаду атомне ядро спонтанно розпадається на ядро-продукт і бета частинку. Нижче приведені рівняння радіоактивного розпаду радіоактивного ізотопу йоду з утворенням атома ксенону, бета-частинки та гамма-частинки.



Закон радіоактивного розпаду

Активність зразка – це середнє число розпадів в секунду, одиниця вимірювання активності – беккерель (Бк). Один беккерель – це один розпад у секунду. Активність радіоактивного зразка спадає з часом за законом радіоактивного розпаду, що визначає активність зразка A в будь-який момент часу t по відношенню до початкової активності A_0 :

$$A = A_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$$

Період напіврозпаду $T_{1/2}$ визначається як час, протягом якого активність зразка зменшується вдвічі.

Аналогічний вираз можна записати і для маси радіоактивного зразка, що змінюється з часом (рис. 43). Якщо початкова маса

зразка m_0 , тоді в довільний момент часу t :
$$m = m_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$$

Радіоізотопне датування

На законі радіоактивного розпаду засновані методи радіоізотопне датування, що дозволяють встановити вік утворення певного зразку. Радіовуглецевий аналіз є різновидом радіоактивного датування, який можна застосувати до матерії, яка була колись живою і знаходилася в рівновазі з атмосферою, приймаючи вуглекислий газ з повітря для фотосинтезу. Космічні промені вибивають з нейтральних атомів іоносфери нейтрони, які, у свою чергу, бомбардують атоми азоту, головну складову атмосфери Землі. Це бомбардування нейтронами призводить до формування радіоактивного ізотопу карбону-14. Радіоактивний карбон-14 з киснем утворюють вуглекислий газ, що включений у цикл живих істот.

Атоми карбону-14 утворюються зі сталою швидкістю, тож, вимірюючи активність колись живої речовини та порівнюючи її активність з рівноважним рівнем активності живих істот, можна виміряти проміжок часу, що пройшов з того моменту, як ця жива істота загинула. Період напіврозпаду карбону-14 складає 5730 ± 30 років, тому радіоактивне датування може бути використане для датування артефактів віком до 50-60 тисяч років. Для датування більш давніх об'єктів, а також датування неорганічних зразків використовують і інші методи, наприклад рубідій-стронцієве датування. В результаті розпаду у гірській породі ^{87}Rb , формується

ізоотоп ^{87}Sr . Природний вміст цього ізоотопу відомий і достатньо малий, біля 7%, тому порівнюючи відношення вмісту в породі ізоотопів ^{87}Sr і ^{86}Sr можна визначити вік зразка.