



Електромагнітна взаємодія. Закон Кулона

Курс із фізики для вивчення основ електростатики та взаємодії заряджених тіл. Розглянемо теоретичні аспекти закону Кулона та практичне застосування через розв'язання задач різної складності.

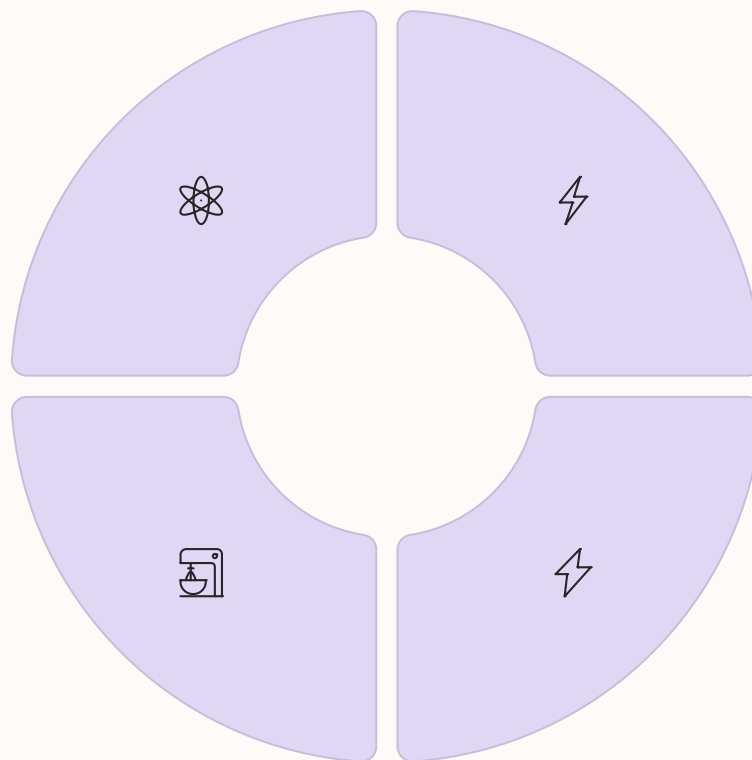
Частина 1: Вступ до електромагнітної взаємодії

Фундаментальна сила

Одна з чотирьох фундаментальних взаємодій у природі, поряд із гравітаційною, сильною та слабкою ядерними взаємодіями

Поширення

Здійснюється через електромагнітне поле зі швидкістю світла



Прояви

Проявляється у вигляді електричних і магнітних явищ, які є різними аспектами однієї взаємодії

Взаємодія зарядів

Відповідає за взаємодію між зарядженими частинками – притягання різноіменних і відштовхування однойменних зарядів

Що таке електромагнітна взаємодія?

Електромагнітна взаємодія – це фундаментальна сила природи, яка визначає:

- Взаємодію між електрично зарядженими частинками
- Роботу всіх електричних пристроїв
- Хімічні зв'язки між атомами
- Більшість явищ у нашому повсякденному житті

Вона проявляється через **притягання різнойменних** і **відштовхування однойменних** зарядів, має нескінченний радіус дії, але слабшає з відстанню за законом обернених квадратів.



Історія відкриття закону Кулона

У 1785 році французький фізик [Шарль Огюстен Кулон](#) провів революційні експерименти з електростатики:

- Винайшов крутильні терези для точного вимірювання електричних сил
- Провів серію експериментів із зарядженими кульками різних розмірів
- Змінював відстань між зарядами та вимірював силу взаємодії
- Математично описав залежність між зарядами, відстанню та силою

Кулон був першим, хто кількісно довів, що сила взаємодії зарядів обернено пропорційна квадрату відстані між ними.

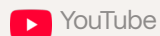
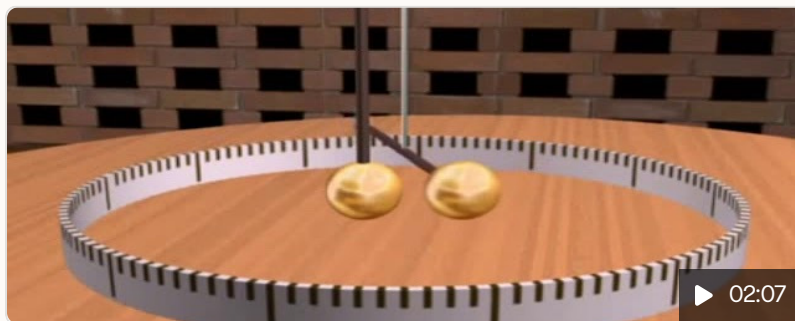


Шарль Огюстен Кулон (1736-1806)



Крутильні терези Кулона

Крутильні терези Кулона — перший інструмент для точного вимірювання електростатичних сил. Принцип дії базується на крутильній деформації тонкої нитки, на якій підвішена заряджена кулька. За кутом закручування нитки Кулон визначав силу взаємодії між зарядженими тілами, що дозволило йому встановити залежність сили від величини зарядів та відстані між ними.



01 Крутильні терези



Закон Кулона: формулювання

Закон Кулона математично описує силу взаємодії між точковими зарядами:

$$F = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

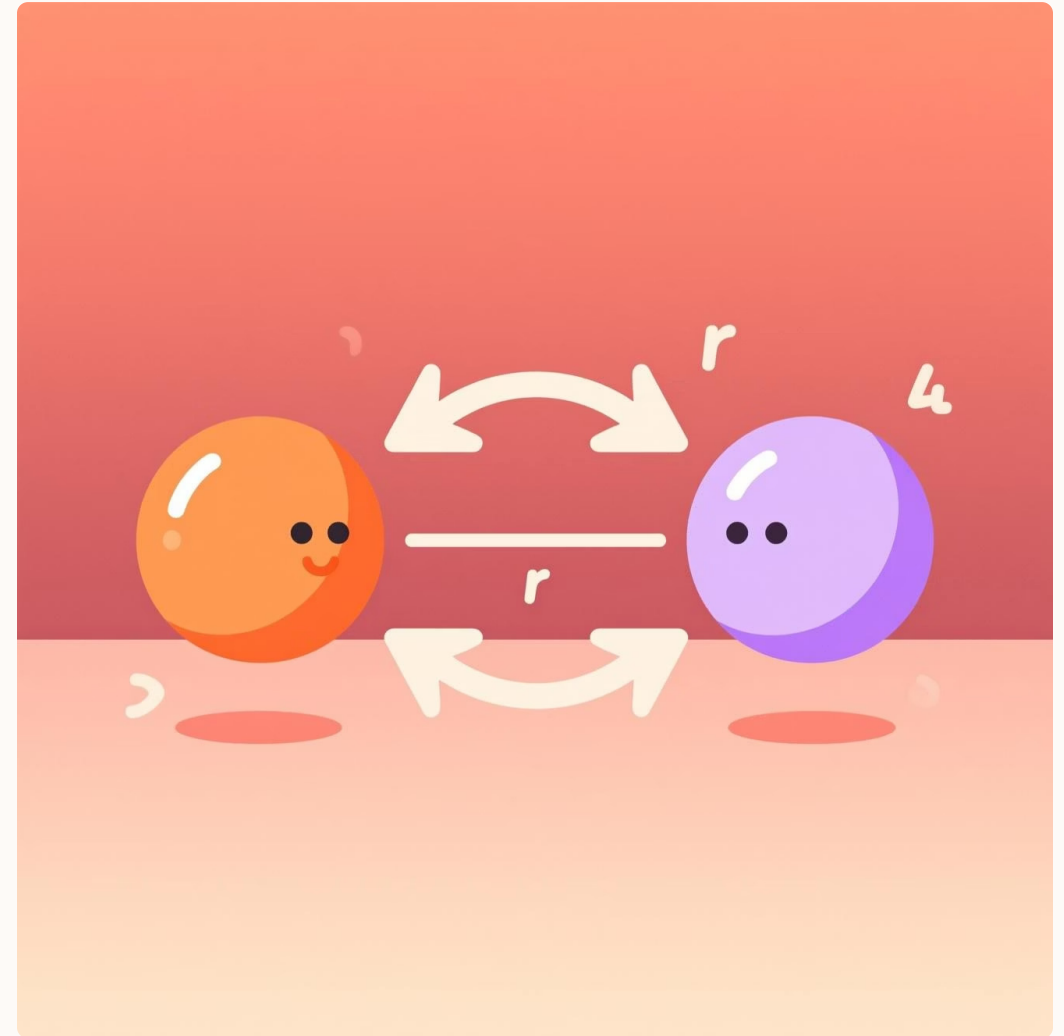
де:

- F — сила взаємодії між зарядами (Н)
- k — електрична стала ($k = 9 \times 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$)
- q_1, q_2 — величини зарядів (Кл)
- r — відстань між зарядами (м)

Коефіцієнт k також можна записати як:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

де ϵ_0 — електрична стала вакууму.



Сила взаємодії зарядів спрямована вздовж прямої, що з'єднує заряди, і залежить від квадрата відстані між ними.

Експеримент: Взаємодія заряджених кульок

Проведемо простий експеримент для демонстрації електростатичної взаємодії та залежності сили від відстані та величини заряду:

Візьміть дві повітряні кульки та підвісьте їх на нитках на деякій відстані одна від одної. Одну з них наелектризуйте, потерши об папір, а другу — об шерстяну тканину чи хутро.

Проведіть спостереження, як залежить сила притягання або відштовхування між кульками від відстані між ними та від величини електричного заряду, накопиченого на кожній кульці. Зауважте, що кульки, натерті різними матеріалами, можуть набути різнойменних зарядів і притягуватися, тоді як натерті однаковим матеріалом – відштовхуватися.

Напрямок сили Кулона



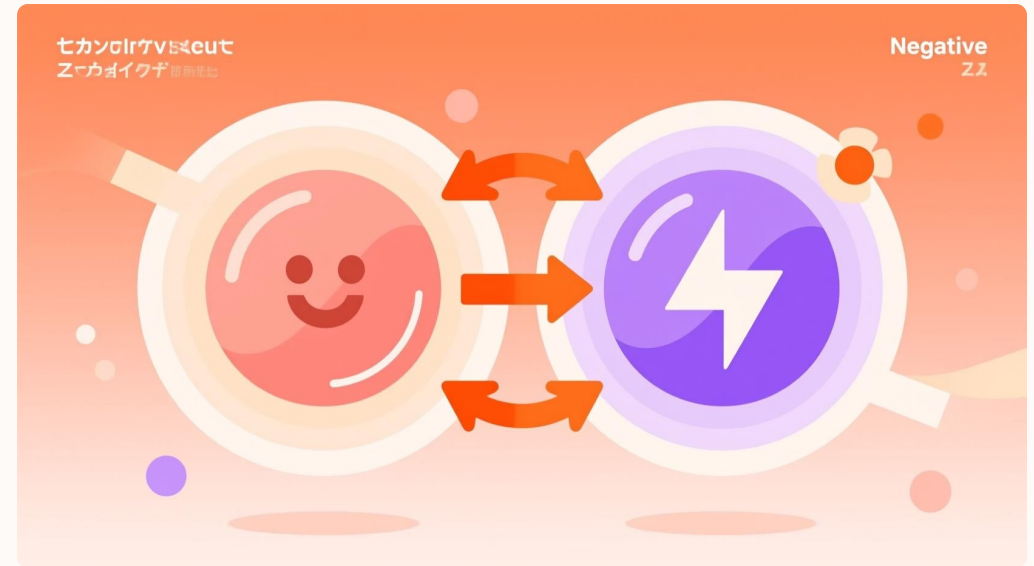
Однйменні заряди

Сила **відштовхування** спрямована від іншого заряду



Різнойменні заряди

Сила **притягання** спрямована до іншого заряду



Напрямок сили завжди діє вздовж прямої, що з'єднує центри зарядів. Якщо знаки зарядів однакові ($++$ або $--$), сила відштовхує заряди один від одного. Якщо знаки різні ($+-$ або $-+$), сила притягує заряди один до одного.

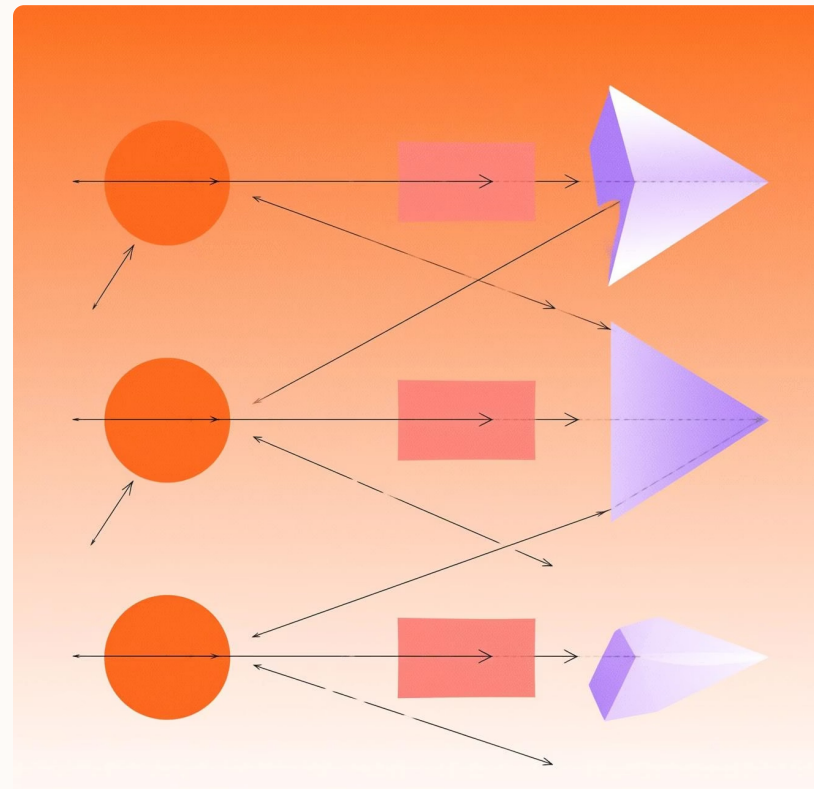
Принцип суперпозиції сил

При взаємодії системи з кількох зарядів діє **принцип суперпозиції**:

- Сила взаємодії між будь-якими двома зарядами не залежить від наявності інших зарядів
- Результируюча сила, що діє на заряд з боку всіх інших зарядів, дорівнює векторній сумі сил, створюваних кожним зарядом окремо

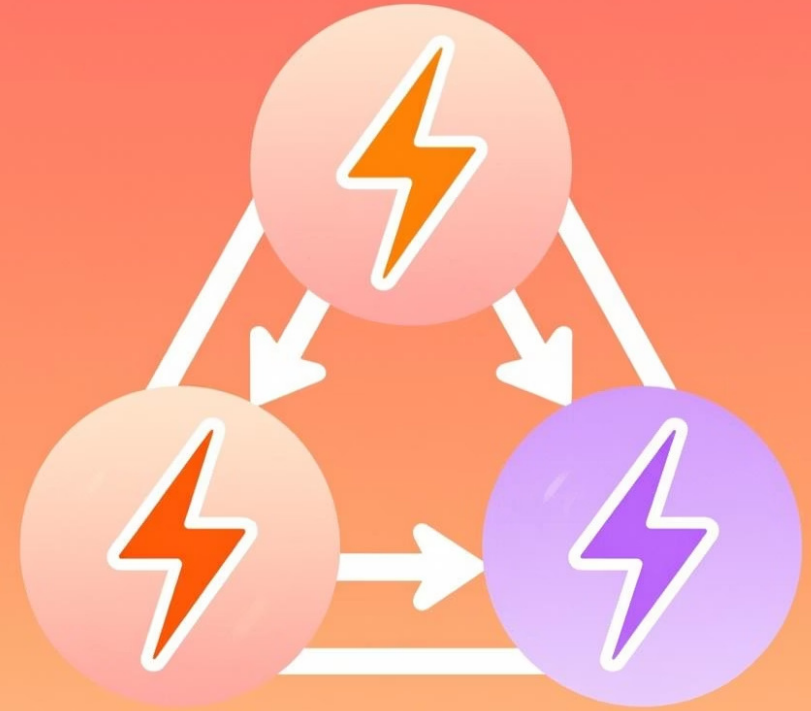
$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i$$

Кожну силу обчислюємо за законом Кулона, а потім додаємо як вектори, враховуючи напрямки.



Принцип суперпозиції сил

Принцип суперпозиції електростатичних сил: результуюча сила, що діє на заряд q_3 , є векторною сумою сил F_{13} та F_{23} , які створюються зарядами q_1 і q_2 відповідно. Кожна сила обчислюється за законом Кулона, а напрямок визначається знаками зарядів. При розв'язанні задач важливо правильно врахувати напрямок кожної сили та виконати їх векторне додавання.



Частина 2: Розв'язання задач на Закон Кулона

Пряма задача

Знаходження сили взаємодії між відомими зарядами на відомій відстані

Обернена задача

Визначення величини зарядів або відстані за відомою силою взаємодії

Суперпозиція сил

Розрахунок рівнодійної сили від кількох зарядів

Рівновага зарядів

Пошук умов рівноваги заряджених тіл у системі



Задача 1: Сила між двома зарядами

Умова задачі:

Визначити силу взаємодії між двома точковими зарядами $q_1 = 5 \times 10^{-9}$ Кл і $q_2 = -3 \times 10^{-8}$ Кл, розташованими на відстані 10 см один від одного.

Розв'язання:

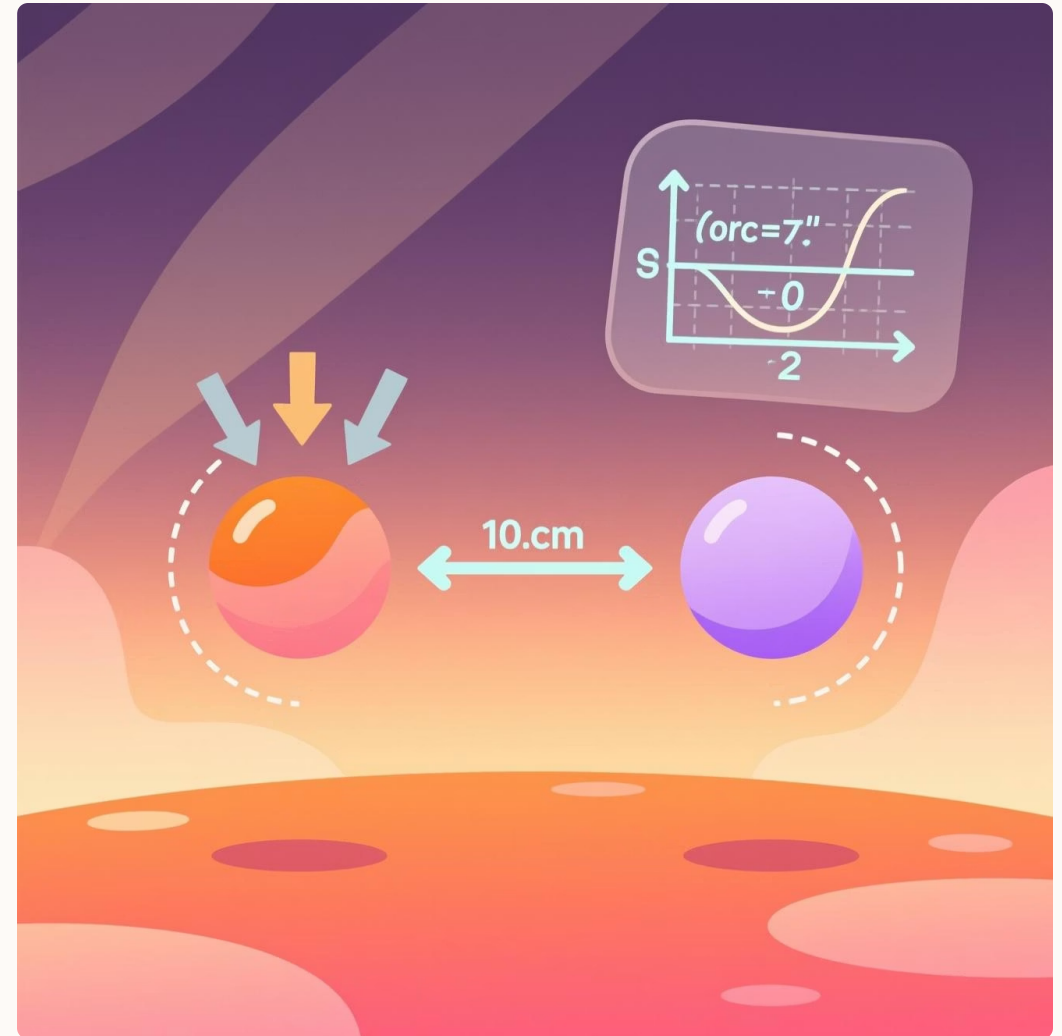
Застосуємо формулу закону Кулона:

$$F = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

Підставимо значення:

$$F = 9 \times 10^9 \times \frac{|5 \times 10^{-9} \times (-3 \times 10^{-8})|}{0.1^2}$$

$$F = 9 \times 10^9 \times \frac{15 \times 10^{-17}}{0.01} = 1.35 \times 10^{-4} \text{ Н}$$



Відповідь: Сила взаємодії дорівнює 1.35×10^{-4} Н. Оскільки заряди різнойменні (позитивний і негативний), вони **притягуються** один до одного.

Задача 2: Визначення зарядів за відомою силою

Умова задачі:

Два точкові заряди розташовані на відстані 5 см один від одного. Сила взаємодії між ними становить 3 мН. Відомо, що один заряд у 3 рази більший за інший. Визначити величини зарядів.

Розв'язання:

Нехай $q_1 = 3q_2$. Підставимо в закон Кулона:

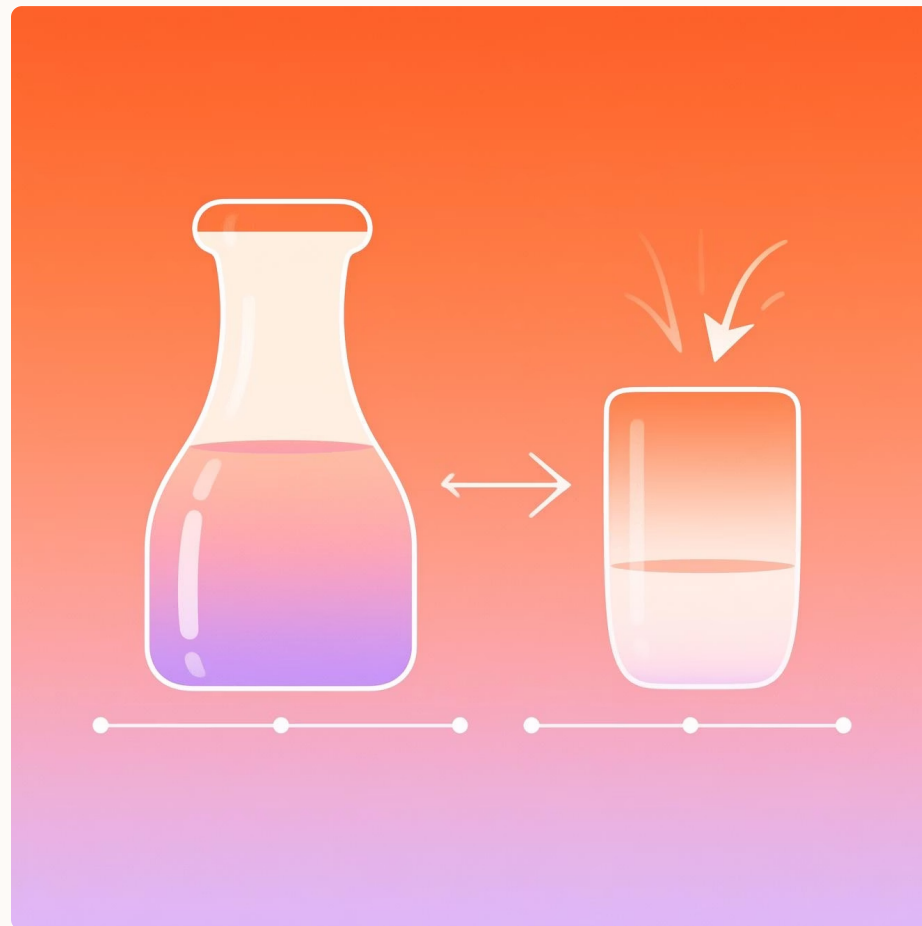
$$F = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2} = k \frac{|3q_2 \cdot q_2|}{r^2} = 3k \frac{q_2^2}{r^2}$$

Звідси:

$$q_2^2 = \frac{F \cdot r^2}{3k}$$

$$q_2 = \sqrt{\frac{F \cdot r^2}{3k}} = \sqrt{\frac{3 \times 10^{-3} \times (5 \times 10^{-2})^2}{3 \times 9 \times 10^9}} = 2 \times 10^{-7} \text{ Кл}$$

$$q_1 = 3q_2 = 6 \times 10^{-7} \text{ Кл}$$



Відповідь: $q_1 = 6 \times 10^{-7} \text{ Кл}$, $q_2 = 2 \times 10^{-7} \text{ Кл}$.

Задача демонструє, як можна визначити невідомі заряди, якщо відома сила взаємодії та співвідношення між зарядами.

Задача 3: Векторна сила у системі трьох зарядів

Умова задачі:

Три точкові заряди $q_1 = 2 \times 10^{-6}$ Кл, $q_2 = -3 \times 10^{-6}$ Кл і $q_3 = 1 \times 10^{-6}$ Кл розташовані у вершинах прямокутного трикутника з катетами 3 см і 4 см. Визначити силу, що діє на заряд q_3 .

Розв'язання:

Знайдемо силу F_{13} від заряду q_1 до q_3 :

$$F_{13} = k \frac{|q_1 q_3|}{r_{13}^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{2 \times 10^{-6} \times 10^{-6}}{(3 \times 10^{-2})^2} = 20 \text{ Н}$$

Знайдемо силу F_{23} від заряду q_2 до q_3 :

$$F_{23} = k \frac{|q_2 q_3|}{r_{23}^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{3 \times 10^{-6} \times 10^{-6}}{(4 \times 10^{-2})^2} = 16.9 \text{ Н}$$

- $q_1 > 0, q_3 > 0 \rightarrow$ відштовхування, сила F_{13} від q_1 спрямована від q_1 .
- $q_2 < 0, q_3 > 0 \rightarrow$ притягання, сила F_{23} спрямована до q_2 .

Якщо взяти систему координат:

- x-вісь – уздовж катета між q_3 і q_1 (3 см)
- y-вісь – уздовж катета між q_3 і q_2 (4 см)

Тоді:

$$F_{13} = 20 \text{ Н уздовж } +x$$

$$F_{23} = 16.875 \text{ Н уздовж } +y$$

Векторна сума:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{20^2 + 16.875^2}$$

$$F = \sqrt{400 + 284.77} = \sqrt{684.77} \approx 26.17 \text{ Н}$$

Визначимо напрямки сил:

- F_{13} — відштовхування (однакові знаки)
- F_{23} — притягання (різні знаки)

Використаємо теорему Піфагора для знаходження гіпотенузи (відстані між q_1 і q_2):

$$r_{12} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ см}$$

Результуючу силу F знаходимо як векторну суму F_{13} і F_{23} , з урахуванням їх напрямків.





Векторний розбір задачі

При розв'язанні задачі з трьома зарядами необхідно врахувати векторний характер сил. Сила F_{13} напрямлена від заряду q_1 до q_3 (відштовхування), а сила F_{23} — від заряду q_3 до q_2 (притягання). Результуюча сила F визначається як векторна сума цих сил.

Для знаходження модуля і напрямку результуючої сили використовуємо правило паралелограма або розкладаємо сили на **компоненти за осями координат** і складаємо відповідні проекції. Врахування напрямку сил є критичним для отримання правильного результату.

Типові помилки при розв'язанні задач

1

Неврахування знаків зарядів

При розрахунку сили за законом Кулона використовуйте модулі зарядів, але не забувайте, що знаки зарядів визначають напрямок сили: однойменні заряди відштовхуються, різнойменні — притягуються.

2

Помилки у визначенні відстані

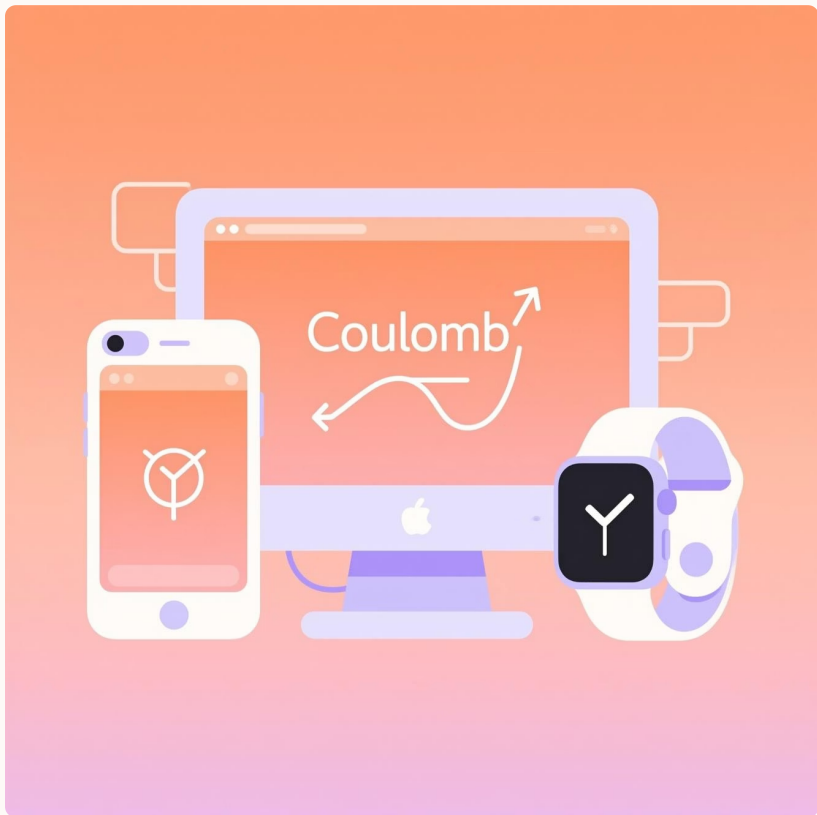
Переконайтеся, що відстань між зарядами виражена в метрах, а не в сантиметрах чи інших одиницях. Помилка в переведенні одиниць може призвести до результату, що відрізняється в сотні разів.

3

Ігнорування векторного характеру

Сила Кулона — векторна величина. При розрахунку результуючої сили від кількох зарядів необхідно правильно визначити напрямок кожної сили і виконати векторне додавання.

Практичне значення закону Кулона



Закон Кулона має широке практичне застосування в багатьох галузях науки та техніки:

- **Електроніка:** проектування конденсаторів, мікросхем та інших електронних компонентів
- **Медицина:** електрокардіографія, дефібриляція, електротерапія
- **Промисловість:** електростатичні фільтри, фарбування, сепарація матеріалів
- **Безпека:** громовідводи, системи захисту від статичної електрики
- **Наукові дослідження:** вивчення структури атома, властивостей матеріалів

Розуміння закону Кулона є фундаментальним для проектування всіх сучасних електричних та електронних пристроїв.

Підсумки частини 1 і 2



Електромагнітна взаємодія

Одна з чотирьох фундаментальних сил природи, відповідальна за більшість явищ нашого повсякденного життя



Принцип суперпозиції

Результуюча сила від кількох зарядів є векторною сумою сил від кожного заряду окремо



Закон Кулона

Математичний опис взаємодії між зарядами: $F = k|q_1q_2|/r^2$, де сила прямо пропорційна добутку зарядів і обернено пропорційна квадрату відстані



Методика розв'язування задач

Алгоритм розв'язання задач: аналіз умови, запис формул, визначення напрямків сил, обчислення, перевірка розмірності



Частина 3: Додаткові задачі для самостійної роботи

Для закріплення матеріалу пропонуємо розв'язати наступні задачі самостійно:

1. Два однакові точкові заряди розташовані на відстані 10 см один від одного. З якою силою вони взаємодіють, якщо сила взаємодії між ними становить 0,1 Н?
2. Три однакові точкові заряди розташовані у вершинах рівностороннього трикутника зі стороною 5 см. Знайти силу, що діє на кожен із зарядів.
3. Два заряди $q_1 = 2$ нКл і $q_2 = -8$ нКл розташовані на відстані 3 см один від одного. У якій точці напруженість електричного поля дорівнює нулю?
4. Визначити відношення електричної сили до гравітаційної між електроном і протоном в атомі водню.

Висновок

Закон Кулона є одним із фундаментальних законів електростатики, який описує взаємодію між зарядженими тілами:

- Він визначає силу взаємодії між точковими зарядами як пропорційну добутку модулів зарядів і обернено пропорційну квадрату відстані між ними
- Напрямок сили залежить від знаків зарядів: однойменні заряди відштовхуються, різнойменні — притягуються
- Принцип суперпозиції дозволяє знаходити результуючу силу від кількох зарядів

Розуміння та вміння застосовувати закон Кулона має величезне значення для фізики, інженерії та технологій. Регулярна практика розв'язування задач дозволить вам розвинути інтуїцію та глибше зрозуміти електромагнітні явища.



Продовжуйте вивчати електромагнітну взаємодію! У наступних заняттях ми розглянемо електричне поле, потенціал та енергію взаємодії зарядів.