

# Лекція № 8

## Електростатика

1. Значення фізичних знань з електромагнетизму для майбутньої професійної діяльності інженера-будівельника
2. Електричний заряд. Закон Кулона
3. Електричне поле. Напруженість електростатичного поля, принцип суперпозиції електростатичних полів
4. Потік вектора напруженості електростатичного поля
5. Теорема Гауса. Електричне поле заряджених нескінченних нитки та площини
6. Потенціал електростатичного поля. Різниця потенціалів
7. Циркуляція напруженості електростатичного поля
8. Зв'язок напруженості з потенціалом

# 1. Значення фізичних знань з електромагнетизму для майбутньої професійної діяльності інженера-будівельника

Вивчення розділу “Електрика і магнетизм” у курсі фізики студентами вищих будівельних навчальних закладів спрямоване на подальше сприйняття і засвоєння основ електротехніки, електроніки, мікропроцесорної техніки, автоматизованих систем управління у будівництві тощо.

Викладання цих дисциплін, окрім отримання студентами знань фундаментально-базового характеру, направлене на вивчення процесів, що відбуваються в електричних колах постійного і змінного струму та здійснення електричних вимірювань у них;

вивчення більшості електротехнічних пристроїв, таких як електротрансформатори, електричні апарати і машини постійного і змінного струму, електровимірювальні прилади та ознайомлення з характерними режимами їх роботи; вивчення напівпровідникових приладів та електронної схемотехніки, що є складовими різноманітних електронних пристроїв; вивчення систем автоматизованого контролю і алгоритмів управління процесами у виробничій та експлуатаційній сфері будівельної галузі; вивчення систем електроживлення виробничого, транспортного, монтажного і побутового призначення.

Інженер-будівельних має розуміти особливості будови, принцип роботи і способи експлуатації електрообладнання будівельних машин та майданчиків, підприємств будівельної індустрії, інженерних систем будівель та питань електробезпеки. Окреслимо основні *складові частини, елементи та види електрообладнання будівельних машин, майданчиків, підприємств і будівель*, які є досить різноманітними за своїм призначенням і межами застосування:



- вимірювання фізичних величин з високою точністю у ручному і автоматичному режимах забезпечують *електровимірювальні прилади* (ампер-метри, вольтметри, ватметри, омметри, електро-лічильники тощо), *вимірювальні перетворювачі* (шунти, дільники напруги, вимірювальні транс-форматори, терморезистори, термопари, тензоре-зистори, ємнісні й індуктивні перетворювачі та ін.), *електровимірювальні установки та вимі-*



- для перетворення електричної енергії одного класу напруги або струму на інший клас напруги або струму використовують *трансформатори*, для взаємоперетворення механічної та електричної енергії – *електричні машини* (генератори та електродвигуни);



- засобами автоматизації і контролю виробничих процесів виступають напівпровідникові прилади, які мають широке застосування у різних пристроях, зокрема в системах керування електроприводами будівельних машин і механізмів (регулювання швидкості у димососах котелень, ліфтах, підйомних і транспортних механізмах тощо). До напівпровідникових приладів відносяться напівпровідникові діоди, тиристори і транзистори, що застосовуються у випрямлячах, підсилювачах, інверторах,



- ручне або автоматичне зварювання контактним або електродуговим методом у повітряному чи інертногазовому середовищах забезпечує електрообладнання зварювальних установок;





- у будівництві та на підприємствах будівельної індустрії найбільш часто використовують *вантажопідйомні машини*, до яких відносяться стрілові, баштові, козлові, мостові й інші види кранів, а також підйомники різного призначення:



- серед *електричних ручних машин*, що використовуються у будівництві розрізняють свердлильні, шліфувальні машини, машини для розпилювання деревини, гайко- та шуруповерти, машини ударної дії, вібратори;



- при виготовленні залізобетонних виробів важливе місце займають *електропрогрів бетону і ґрунту* електродним, індукційним, інфрачервоним або непрямим методами теплової обробки та метод електропропарювання;



- *електроосвітлювальні установки* (лампи розжарювання, газорозрядні, люмінесцентні та ртутні лампи, освітлювальна арматура, світильники) забезпечують організацію електричного освітлення на будівельному майданчику та відіграють істотне значення при виконанні будівельно-монтажних робіт, особливо в осінньо-зимовий період та нічний



- ефективна експлуатація промислово-житлових об'єктів забезпечується *електрообладнанням інженерних систем будівель*. Сучасні житлові, громадські та промислові будинки насичені такими основними компонентами інженерних систем будинків як електро-, тепло- і водопостачання, водопідготовка, каналізація, вентиляція, кліматичне обладнання, установки кондиціювання, електрообігрівання, охоронно-пожежні системи, установки очистки стоків, іонізація та очистка повітря, освітлення тощо;

- найсучаснішими системами устаткування приватного житла є системи типу “розумний будинок”, які передбачають системи утримання будинку за допомогою програмовано-автоматизованих систем керування освітленням, опаленням, кондиціюванням, вентиляцією, водопостачанням холодної та гарячої води, водовідведенням, охоронними і



За такої електрифікації усіх сфер будівельної індустрії, виробничо-монтажні та експлуатаційні процеси у будівництві мають бути забезпечені великим ступенем електробезпеки. Практичне вирішення цього завдання забезпечується технічними способами і засобами (захисне заземлення, вирівнювання потенціалів, ізоляція струмоведучих частин, попереджуюча сигналізація, блокування, знаки безпеки, засоби захисту тощо). Освоєння застосування усього різноманіття будівельного обладнання і техніки є необхідною умовою успішної професійної діяльності інженера будівельної галузі.

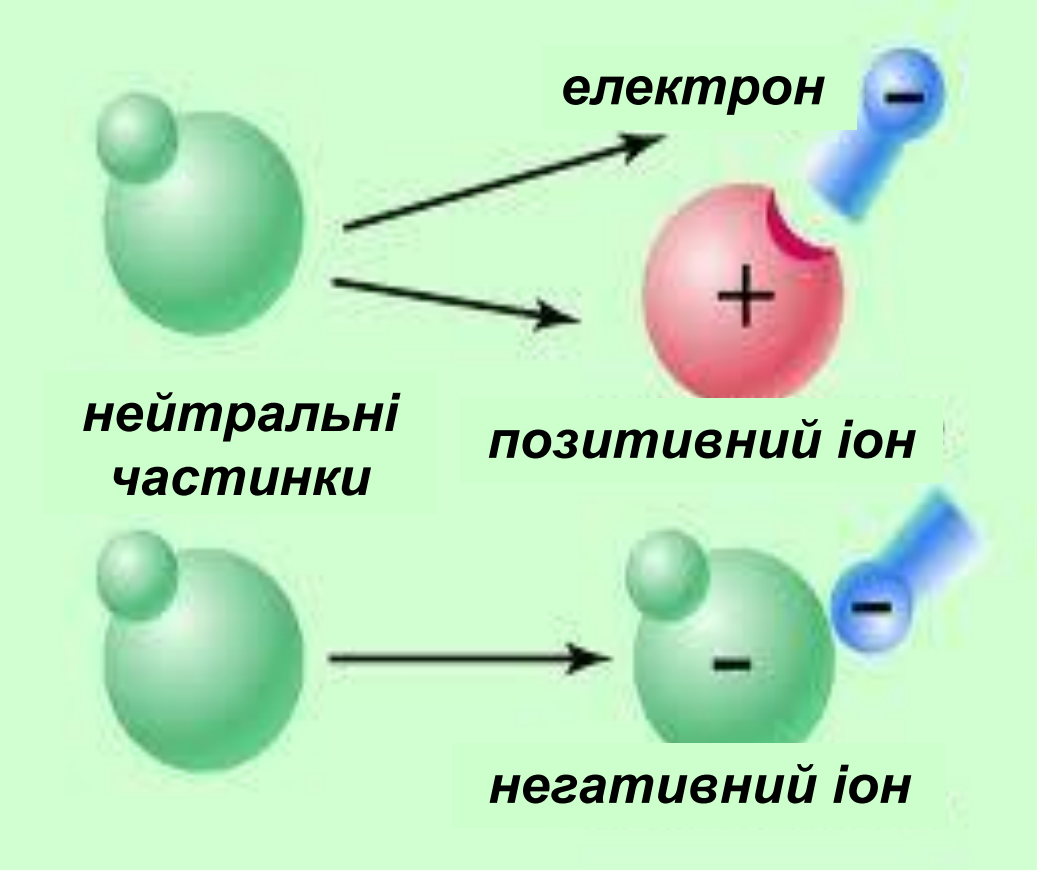
## 2. Електричний заряд. Закон Кулона

*Електричний заряд* – одна із фундаментальних властивостей матерії, що не існує окремо від носіїв заряду та кількісно характеризує здатність носіїв заряду вступати в електромагнітні взаємодії.

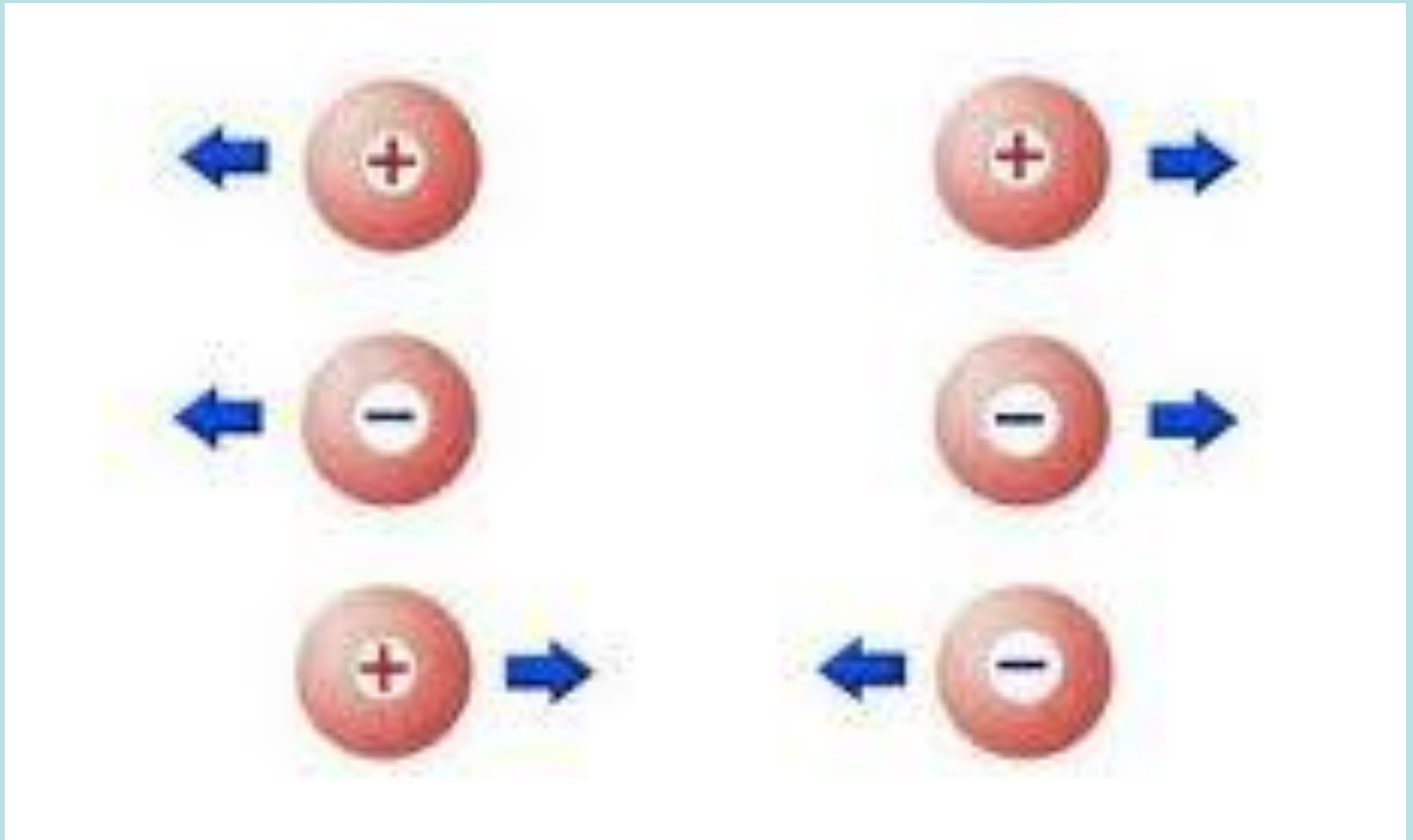


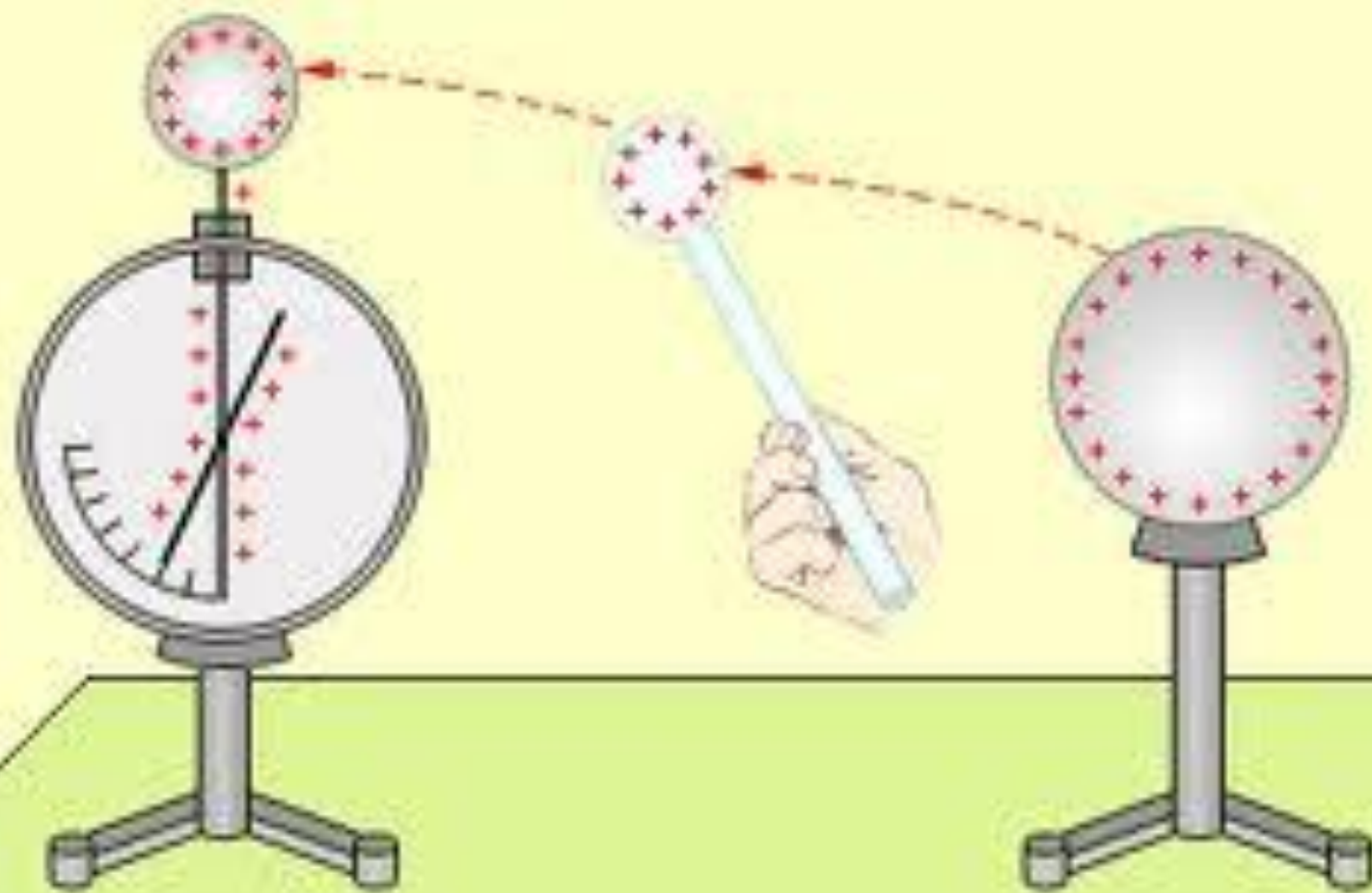
Експериментально встановлено, що в природі існує всього два види електричних зарядів – *позитивні* та *негативні*.



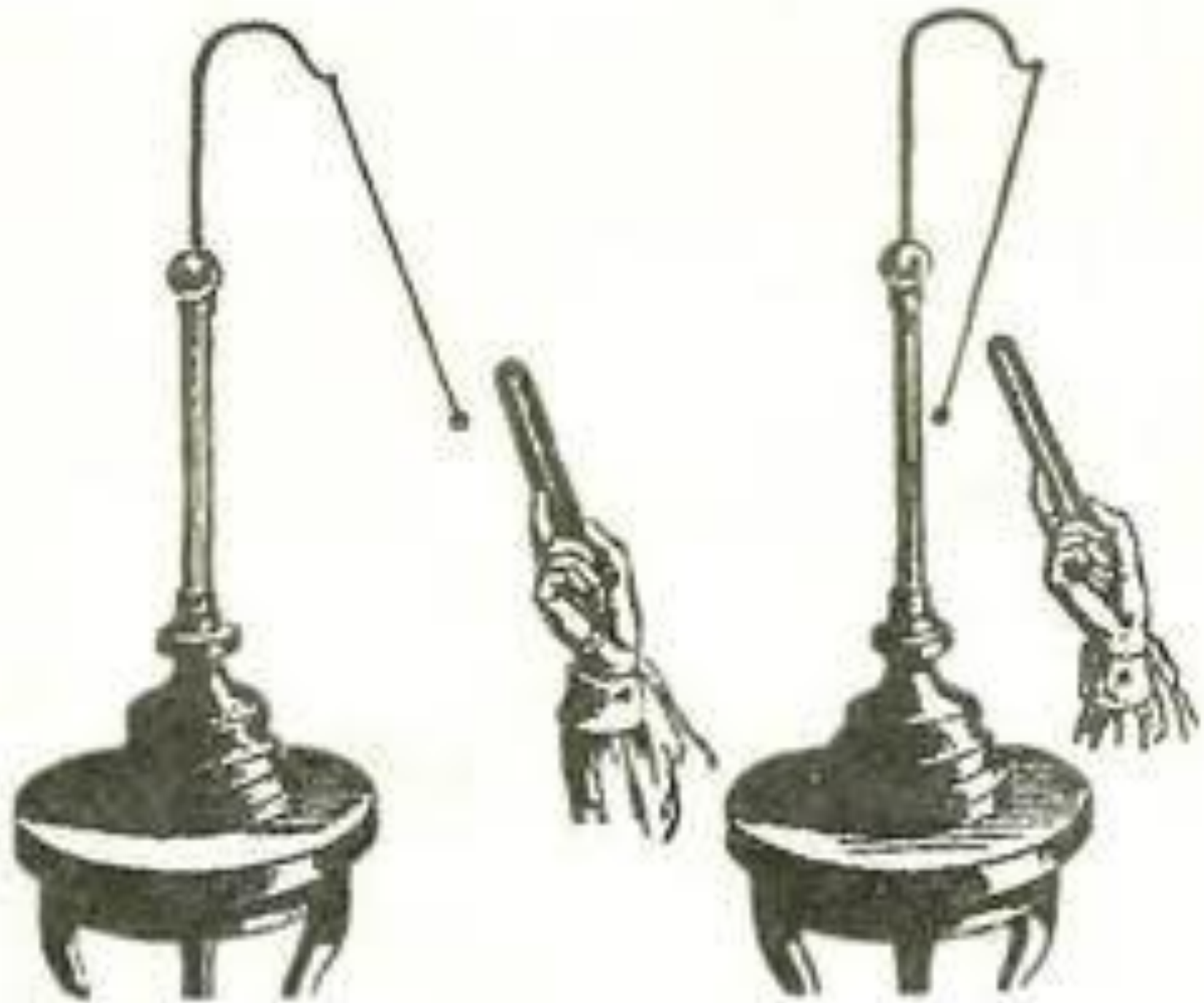


Одноименні заряди відштовхуються, а різноименні притягуються.

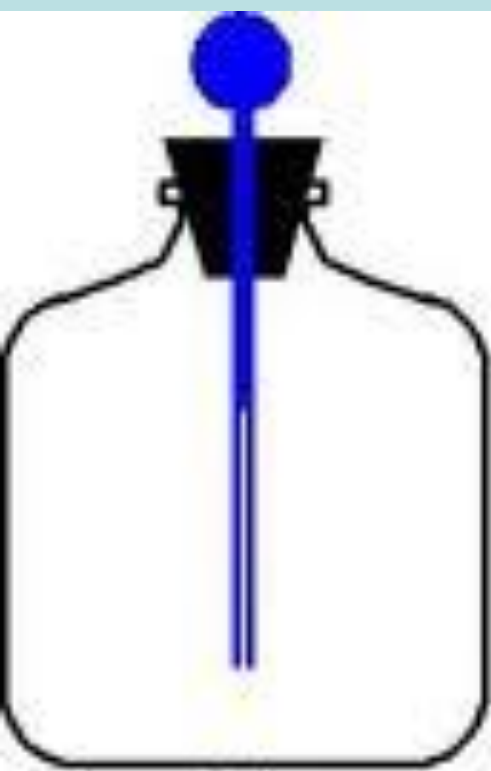




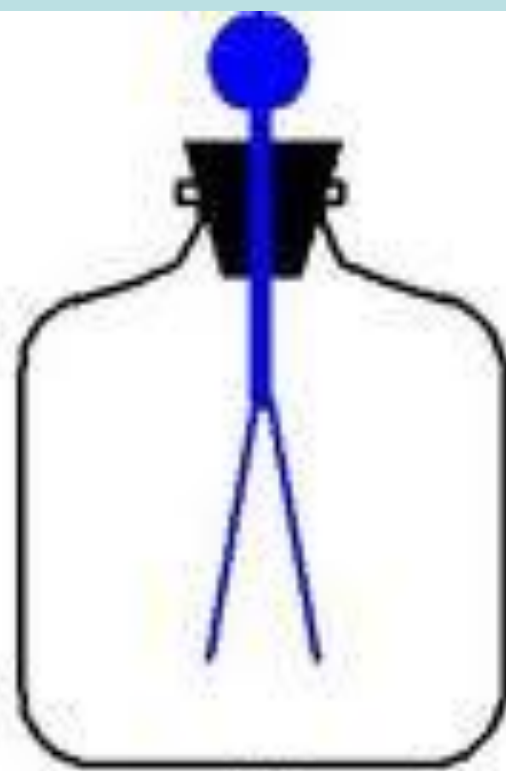




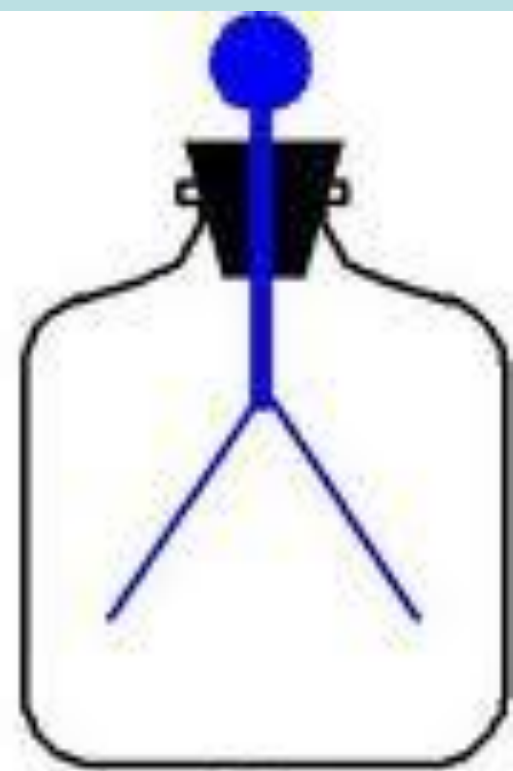




(a)



(b)



(c)









Носієм найменшого негативного елементарного заряду, є одна з найпоширеніших елементарних частинок, – електрон  $e$ , а найменшого позитивного – протон  $p$ .



Величина найменшого елементарного заряду  $|q_e| = |q_p| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  встановлена дослідями Р. Міллікеном.

Одиниця електричного заряду в СІ – кулон,  
 $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}$ .

Однією з важливих властивостей елементарного заряду є незалежність його числового значення від стану інерціальних систем відліку, в яких він визначається – *інваріантність елементарного заряду*.

Спостереження і експериментальні дослідження свідчать, що в усіх процесах взаємоперетворень повний електричний заряд замкненої системи є величиною постійною і дорівнює алгебраїчній сумі її позитивних та негативних зарядів — **закон збереження електричного заряду** — це твердження, вперше висловив Б. Франклін і сформулював М. Фарадей. У теоретичній фізиці закон збереження заряду є наслідком інваріантності рівнянь електродинаміки.

Експериментальні дослідження взаємодії двох нерухомих точкових зарядів виконали незалежно один від одного Г. Кавендліш у 1772 р., результати досліджень якого були опубліковані лише у 1879 р., і Ш. Кулон у 1785 р.

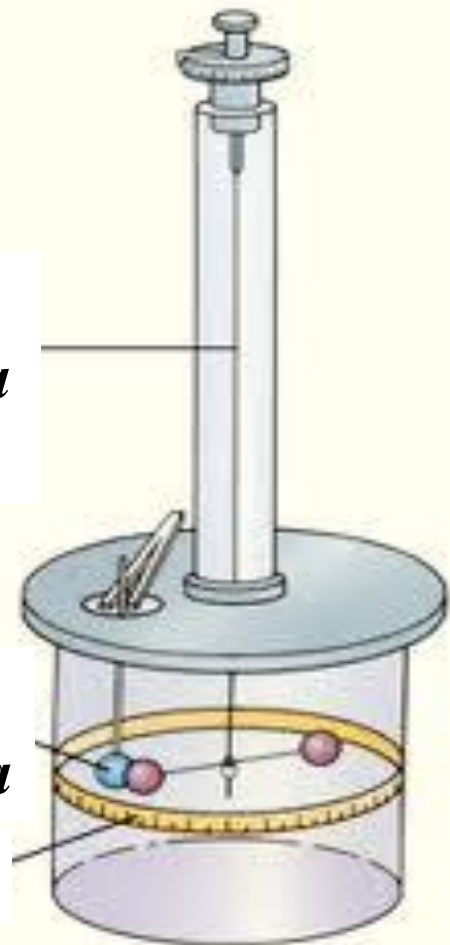
## Шарль Огюстен де Кулон



*тонка  
кварцова  
нитка*

*зарядже  
на кулька*

*шкала*



Закон взаємодії нерухомих точкових зарядів у вакуумі називається **законом Кулона**: сила взаємодії двох нерухомих точкових зарядів у вакуумі прямо пропорційна добутковій величині цих зарядів  $q_1$  і  $q_2$ , обернено пропорційна квадратів відстані  $r$  між ними та направлена вздовж прямої, що сполучає ці заряди:

$$F_0 = k \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності, в СІ

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2},$$

$$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}} \text{ – електрична стала.}$$



При вміщенні двох точкових зарядів у будь-яке непровідне середовище, сила їх взаємодії зменшується через явище поляризації діелектричного середовища. Явище поляризації полягає у відносному зміщенні заряджених частинок атомів молекул (електронів та ядер) під дією електричного поля зарядів, вміщених у діелектричне середовище.

Кількісний вплив середовища на взаємодію між зарядами враховують введенням *відносної діелектричної проникності середовища*  $\varepsilon$  – величини, що показує в скільки разів сила взаємодії точкових електричних зарядів у вакуумі більша, ніж сила їх взаємодії у середовищі:

$$\varepsilon = \frac{F_0}{F}.$$

Діелектрична проникність є величиною безрозмірною.

Закон Кулона для взаємодії двох точкових зарядів у середовищі у загальній векторній формі має вигляд:

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

де  $\vec{r}$  – радіус-вектор, проведений до того заряду, на який визначається дія з силою  $F$ .

### 3. Електричне поле. Напруженість електростатичного поля, принцип суперпозиції електростатичних полів

Експериментально встановлено, що взаємодія між нерухомими зарядами здійснюється не миттєво (теорія далекодії), а зі скінченною швидкістю  $3 \cdot 10^8$  м/с згідно концепції близькодії через особливий вид матерії – електричне поле.

*Електричне поле* – особливий вид матерії, що є складовою загального електромагнітного поля, зумовлене зарядженими частинками і тілами або змінним у часі магнітним полем, через який відбувається електрична взаємодія.

*Електростатичне поле* – це електричне поле, що створюється нерухомими зарядами, тобто не змінюється з часом.

Має дві характеристики:

- силову – напруженість  $\vec{E}$ ,
- енергетичну – потенціал  $\varphi$ .

**Напруженість електростатичного поля** – векторна фізична величина, що є *силовою характеристикою електричного поля*, чисельно рівна силі, з якою електричне поле у даній точці простору діє на одиничний позитивний пробний заряд:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0},$$

Одиницею вимірювання напруженості є  $[E] = \frac{В}{м}$  це свідчать такі перетворення:

$$1 \frac{Н}{Кл} = 1 \frac{Н \cdot м}{Кл \cdot м} = 1 \frac{Дж}{Кл \cdot м} = 1 \frac{В}{м}$$

*Пробним зарядом* називають позитивний точковий досить малий заряд, значення якого не буде спотворювати початкового характеру поля своїм власним полем.



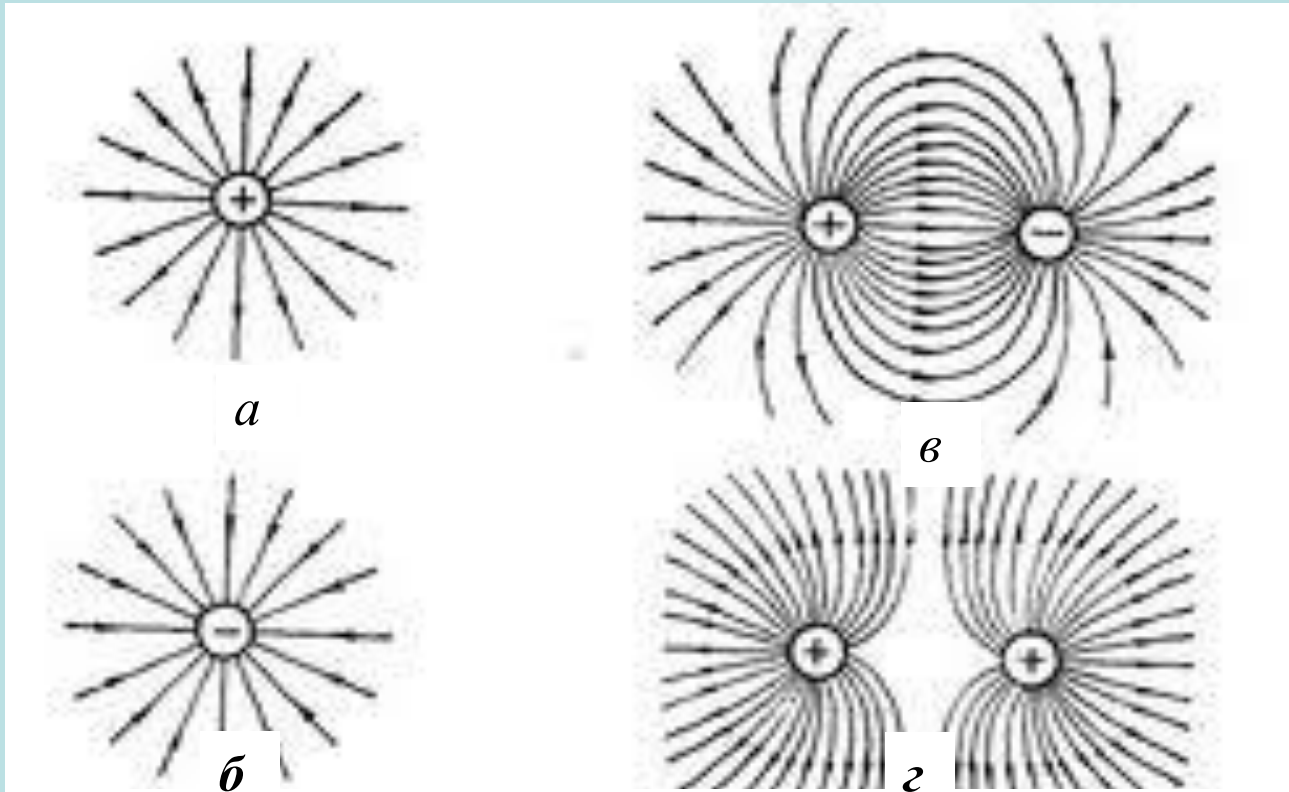
Виходячи із закону Кулона та означення напруженості, одержимо формулу напруженості поля електростатичного поля точкового заряду  $q$  на відстані  $r$ :

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

де  $\vec{r}$  – радіус-вектор, проведений від заряду  $q$  в дану точку простору.

Для графічного зображення картини поля, що оточує заряд чи систему зарядів, використовують *силові лінії* (або *лінії напруженості*) *електростатичного* поля – лінії, дотичні до яких у кожній точці  $\Delta$  збігаються з напрямком вектора напруженості  $\vec{E}$ , їх густина характеризує модуль  $|\vec{E}|$ .

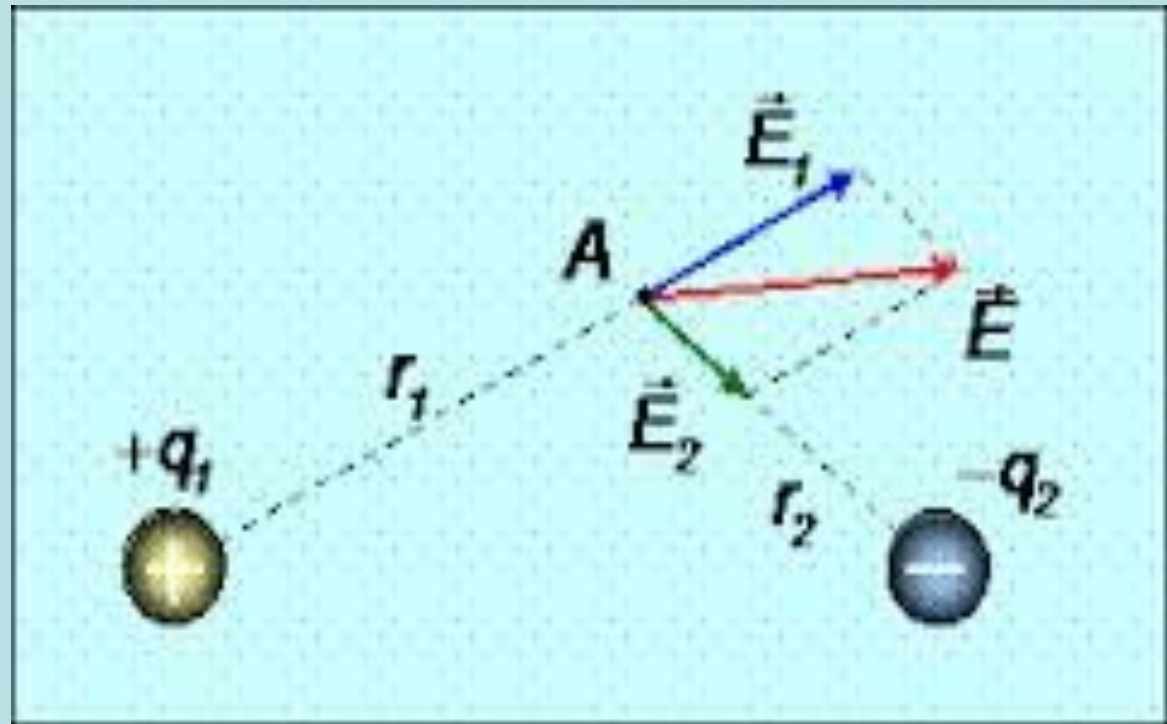
Найпростіший вигляд має картина силових ліній електростатичного поля точкових зарядів, силові лінії завжди беруть початок на позитивних зарядах і закінчуються на негативних, та системи двох точкових рівновеликих зарядів, різних за знаками:

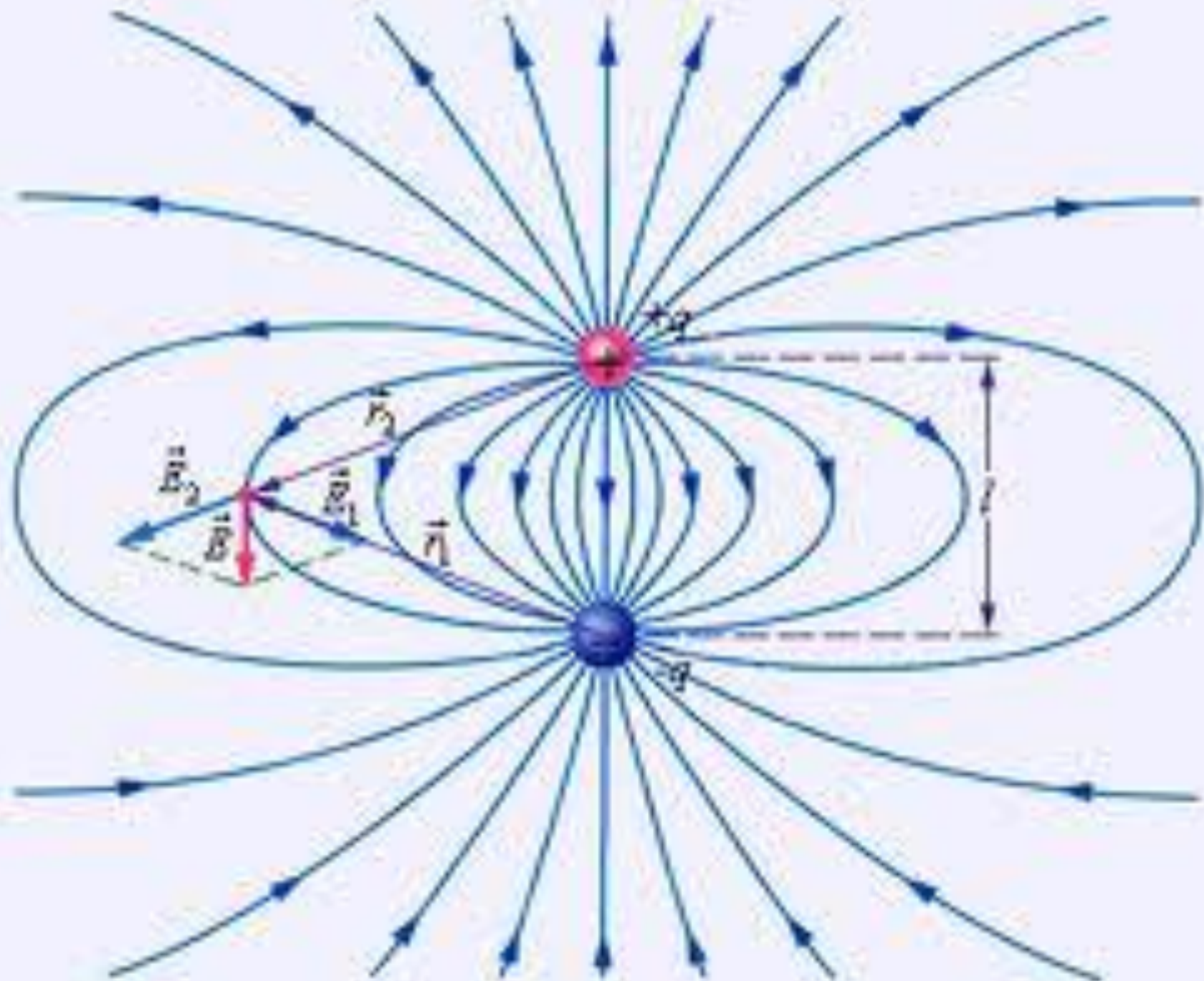


Силові лінії електричного поля окремих позитивного (а) і негативного (б) зарядів та систем зарядів – різнойменних (в) і однойменних (г)

Для визначення конфігурації та напруженості електростатичного поля системи точкових нерухомих зарядів використовують **принцип суперпозиції електростатичних полів**: напруженість електростатичного поля системи зарядів дорівнює векторній сумі напруженостей, створених у цій точці поля окремими точковими зарядами системи:

$$\vec{E}_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i.$$

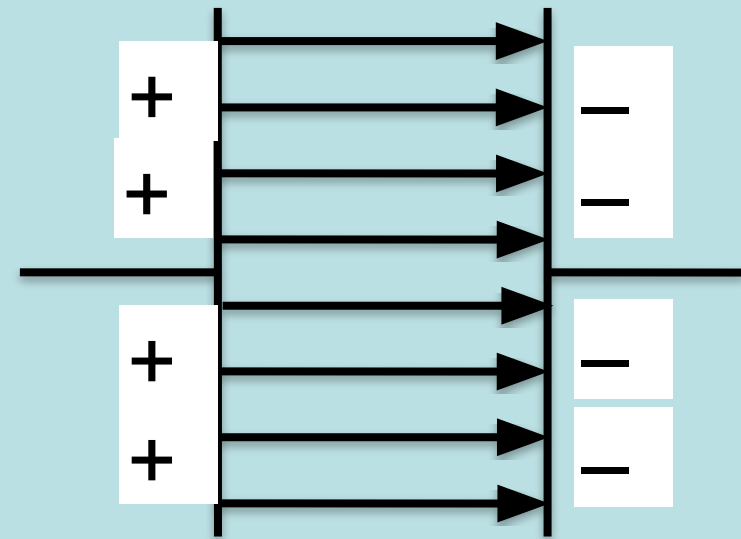




Окремим випадком електростатичного поля є *однорідне електростатичне поле* – поле, величина й напрям вектора напруженості якого  $E$  однакові в кожній точці поля, тобто  $E = const$ .

Прикладом однорідного електростатичного поля є поле плоского зарядженого конденсатора, картина силових ліній якого має вигляд паралельних прямих.

Густина ліній напруженості електростатичного однорідного поля стала, якщо вони прямі та паралельні.

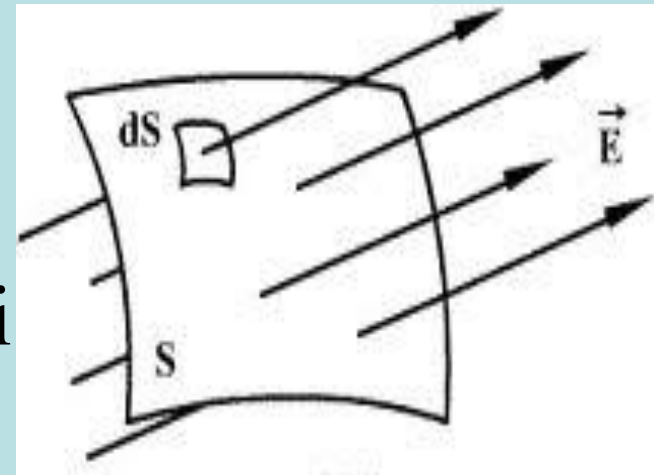


## 4. Потік вектора напруженості електростатичного поля

*Потоком вектора напруженості електростатичного поля  $d\Phi_E$  через елементарну поверхню  $dS$  називають скалярну фізичну величину, чисельно рівну скалярному добутку вектора напруженості на елемент цієї поверхні :*

$$d\Phi_E = (\vec{E} \cdot d\vec{S}) = E \cdot dS \cdot \cos(\angle E, \vec{n}),$$

де  $\vec{n}$  – одиничний вектор нормалі до поверхні  $dS$ .



Якщо поле неоднорідне і поверхня не плоска, то її уявно розбивають на елементи  $dS$ , які наближено можна вважати плоскими, а поле в її межах — однорідним. Тоді повний потік вектора  $\vec{E}$  через поверхню  $S$  обчислюється як поверхневий інтеграл:

$$\Phi_E = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} \cdot \cos(\angle \vec{E}, \vec{n}) = \int_S E_n \cdot dS$$

де  $E_n$  — проекція вектора напруженості  $\vec{E}$  на нормаль  $\vec{n}$ .



## 5. Теорема Гауса. Електричне поле заряджених нескінченних нитки та площини

Іноді, застосування принципу суперпозиції для визначення напруженості електростатичного поля системи великої кількості точкових нерухомих зарядів, вимагає громіздких математичних розрахунків, у таких випадках доцільно використовувати *теорему Гауса*: потік вектора напруженості електростатичного поля через довільну замкнену поверхню дорівнює алгебраїчній сумі електричних зарядів, обмежених цією поверхнею, поділеній на  $\epsilon\epsilon_0$ :

$$\Phi_E = \oint_S (\vec{E} \cdot d\vec{S}) = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=1}^N q_i.$$

Найчастіше теорема Гаусса застосовується для розрахунку напруженості  $E$  систем зарядів з певною симетрією у їх відносному розташуванні. Розглянемо кілька прикладів розрахунку напруженості електростатичного поля  $E$  із застосуванням теореми Гаусса.

**Йоганн Карл Фрідрих Гаусс**

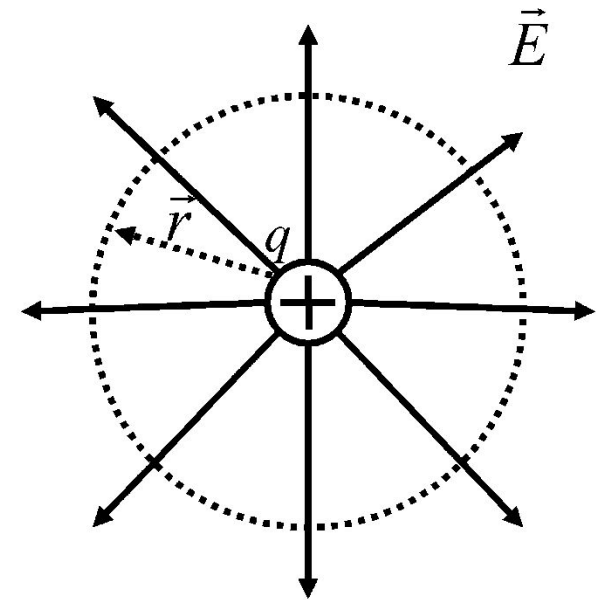
**1777 — 1855**



mtalamu.ru

## Електричне поле точкового заряду. Для

обчислення  $\vec{E}$  із застосуванням теореми Гаусса, в електричному полі необхідно обрати таку замкнену поверхню, щоб задача розв'язувалась найпростіше. Як видно з рис., для поля точкового заряду такою поверхнею є сфера. Обрана сферична поверхня радіуса  $\vec{r}$  із центром у точці розміщення заряду охоплює заряд  $q$ . Потік вектора напруженості  $\vec{E}$  через сферичну поверхню:



$$\Phi_E = \oint_S (\vec{E} \cdot d\vec{S}) = E(r) \oint_{4\pi r^2} dS = 4\pi r^2 E(r)$$

За теоремою Гаусса

$$\Phi_E = \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0} \sum_{i=1}^N q_i = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0} .$$

Прирівняємо праві частини останніх рівнянь:

$$4\pi r^2 E(r) = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0} .$$

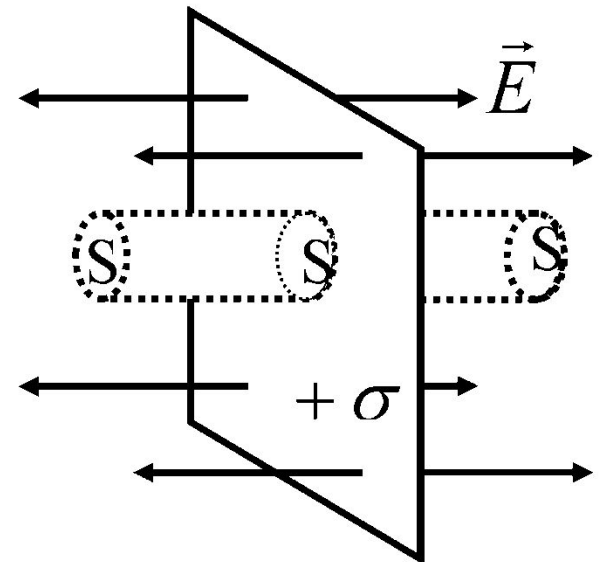
Звідси напруженість поля точкового заряду  $q$  на відстані  $r$  :

$$E(r) = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2} ,$$

що збігається з виразом, обчисленим за означенням.

**Електричне поле рівномірно зарядженої нескінченної площини.** Площину можна вважати нескінченною, якщо відстанню від точки в якій визначають напруженість електростатичного поля, до площини можна нехтувати порівняно з її геометричними розмірами. Нехай дана площина заряджена рівномірно з поверхневою густиною заряду

$\sigma = \frac{dq}{dS}$ . Для обчислення  $\vec{E}$  за теоремою Гаусса, раціонально обрати замкнену поверхню у вигляді прямого циліндра, розміщеного симетрично відносно зарядженої площини з основами площею  $S$  паралельними їй (рис.).



Потік вектора напруженості  $\vec{E}$  через циліндричну поверхню:

$$\Phi_E = \oint_S (\vec{E} \cdot d\vec{S}) = \underbrace{\oint_{S_{\text{бічн. пов.}}} EdS \cos(\vec{E}, \vec{n})}_{=0} + 2 \underbrace{\oint_{S_{\text{основи}}} EdS \cos(\vec{E}, \vec{n})}_{=1} = 2ES .$$

За теоремою Гаусса

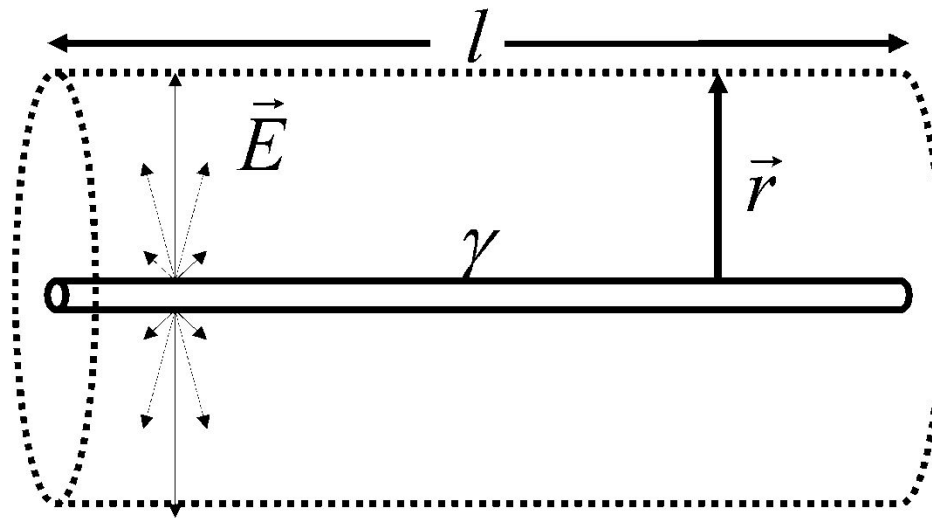
$$\Phi_E = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=1}^N q_i = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0} = \frac{\sigma S}{\epsilon\epsilon_0} .$$

Прирівняємо праві частини останніх рівнянь:

$2ES = \frac{\sigma S}{\epsilon\epsilon_0}$ . Звідси напруженість поля поблизу рівномірно зарядженої нескінченної площини:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0} .$$

**Електричне поле рівномірно зарядженого нескінченного провідника.** Нехай даний нескінченний провідник заряджений рівномірно з лінійною густиною заряду  $\gamma = \frac{dq}{dS}$ . Для обчислення напруженості поля  $\vec{E}$  провідника, оберемо замкнену поверхню у вигляді прямого циліндра довжиною  $l$  і радіусом  $r$ , розміщеного концентрично відносно зарядженого провідника (рис. ).



Потік вектора напруженості  $\vec{E}$  через циліндричну поверхню:

$$\Phi_E = \oint_S (\vec{E} \cdot d\vec{S}) = \int_{S_{\text{бічн. пов.}}} EdS \underbrace{\cos(\vec{E}, \vec{n})}_{=1} + 2 \int_{S_{\text{основи}}} EdS \underbrace{\cos(\vec{E}, \vec{n})}_{=0} = ES_{\text{бічн. пов.}} = E \cdot 2\pi r l .$$

За теоремою Гаусса

$$\Phi_E = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=1}^N q_i = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0} = \frac{\gamma l}{\epsilon\epsilon_0} .$$

Прирівняємо праві частини останніх рівнянь:

$2\pi r l E = \frac{\gamma l}{\epsilon\epsilon_0}$  . Напруженість поля на відстані  $r$  від рівномірно зарядженого нескінченного провідника:

$$E = \frac{\gamma}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r} .$$



## 6. Потенціал електростатичного поля.

### Різниця потенціалів

*Потенціалом* називають скалярну фізичну величину, що є енергетичною характеристикою електростатичного поля, чисельно рівну потенціальній енергії одиничного позитивного заряду, розміщеного в даній точці поля:

$$\varphi = \frac{W_n}{q_0}.$$

Практичне використання цієї формули ускладнене невизначеністю потенціальної енергії, але якщо зумовити вибір нуля потенціальної енергії на нескінченності  $W_n(\infty) = 0$ , то отримаємо більш практичне визначення.

*Потенціал* у даній точці поля  $\varphi(r)$  чисельно дорівнює роботі сил поля при переміщенні пробного одиничного позитивного заряду із даної точки поля у нескінченність:

$$\varphi(r) = \frac{W_n(r) - W_n(\infty)}{q_0} = \frac{A_{r\infty}}{q_0}.$$

Відповідно до визначення потенціалу за одиницю його вимірювання прийнято 1 В (вольт):  
 $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж}/1 \text{ Кл}.$

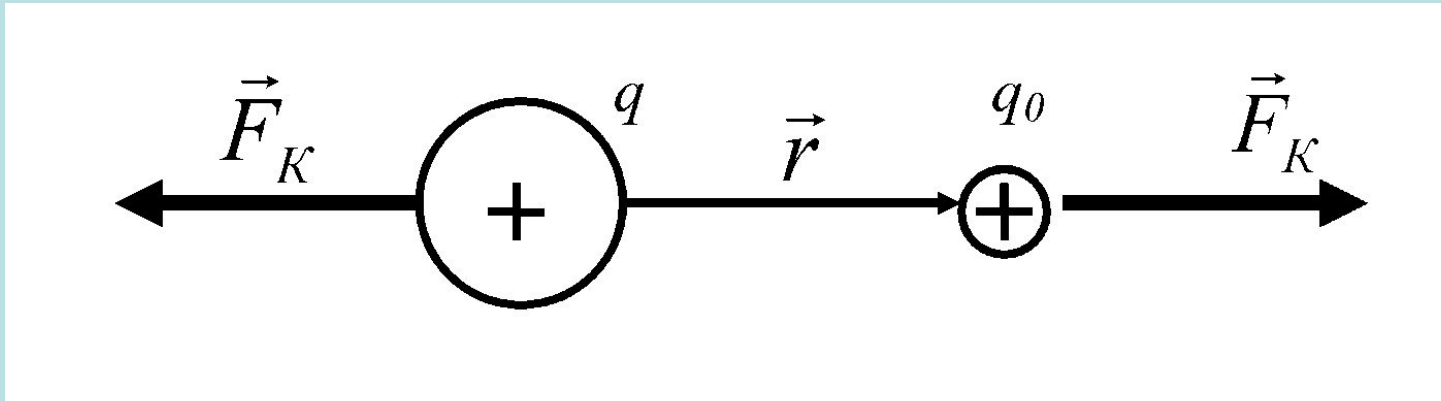
*Потенціал* – величина *адитивна*, тобто потенціал поля, створеного системою зарядів, дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів, створених у цій точці кожним зарядом окремо:

$$\varphi = \sum_{i=1}^N \varphi_i.$$

*Різниця потенціалів* між двома точками поля *1* і *2* визначається роботою сил цього поля по переміщенню пробного одиничного позитивного заряду між ними:

$$\Delta\varphi_{12} = \frac{A_{12}}{q_0}.$$

Визначимо потенціал поля точкового позитивного заряду  $q$  на відстані  $r$  від нього. Згідно визначення, помістимо в точці на відстані  $r$  від заряду  $q$  позитивний пробний заряд  $q_0$  і визначимо роботу сил кулонівського відштовхування зарядів вздовж радіус-вектора  $\vec{r}$ :



$$A_{r\infty} = \int_r^{\infty} (\vec{F}_K \cdot d\vec{r}) = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \int_r^{\infty} \frac{dr}{r^2} = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left( -\frac{1}{r} \right) \Big|_r^{\infty} = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}$$

Оскільки  $\varphi_r = \frac{A_{r\infty}}{q_0}$ , потенціал поля точкового позитивного заряду  $q$  на відстані  $r$  від нього:

$$\varphi_r = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}$$

тобто потенціал поля точкового заряду залежить від відстані і величини заряду, а також діелектричних властивостей середовища.

Різниця потенціалів між двома точками 1 і 2 поблизу точкового заряду буде відповідно дорівнювати:

$$\Delta\varphi_{12} = \frac{A_{12}}{q_0} = \frac{A_{1\infty} - A_{\infty 2}}{q_0} = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

З цієї формули випливає, що різниця потенціалів не залежить від форми траєкторії переміщення заряду силами поля між точками 1 – 2, а визначається лише початковим і кінцевими положенням точок.

Таку властивість мають *потенціальні поля* – тобто такі, робота сил яких не залежить від форми траєкторії. До таких полів можна віднести гравітаційне і електростатичне поля. Електростатичне поле – потенціальне.

Графічно картину електростатичного поля можна зобразити за допомогою системи еквіпотенціальних поверхонь.

*Еквіпотенціальною поверхнею* називають геометричне місце точок поля, потенціали яких є однаковими:

$$\varphi = \text{const}$$

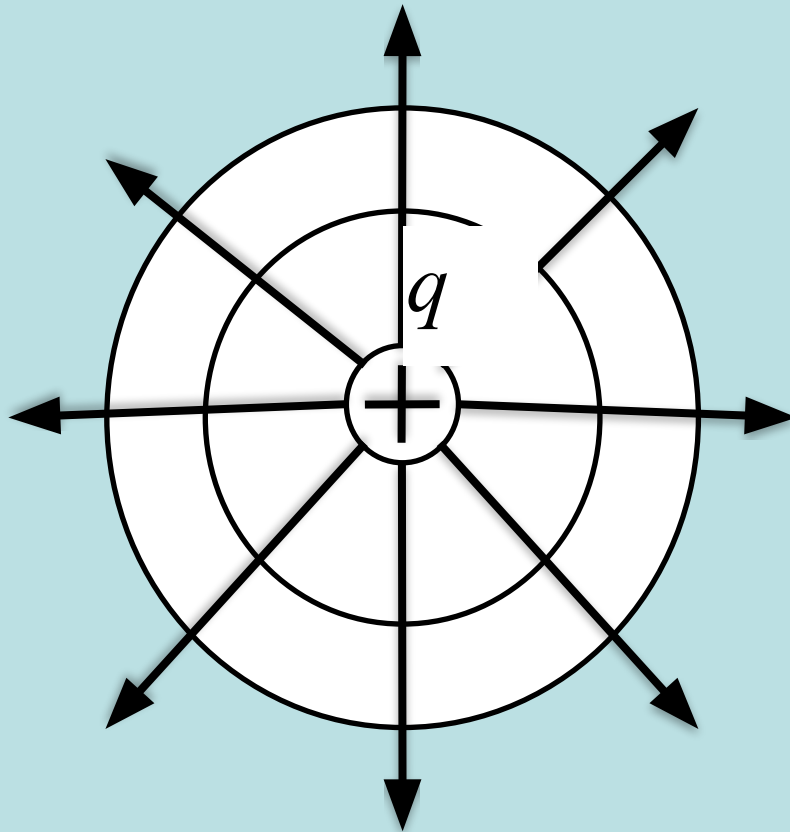
Для прикладу розглянемо найпростіший випадок – електростатичне поле точкового заряду

$$\varphi(r) = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} = \text{const},$$

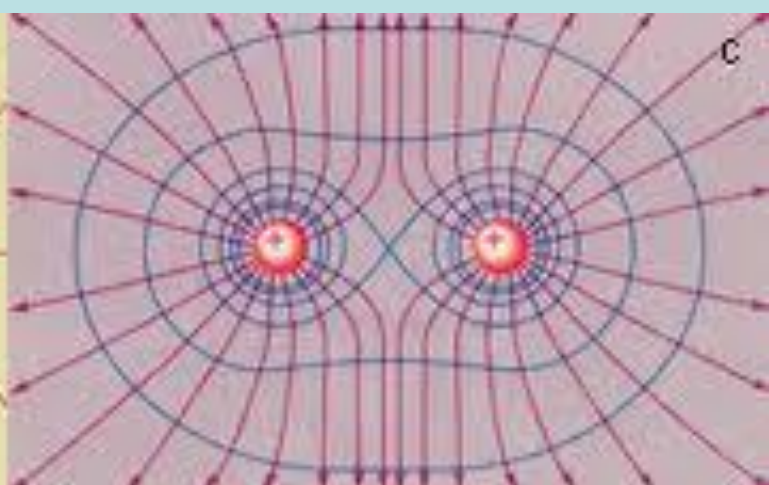
тобто  $r = \text{const}$ .



Таким чином, еквіпотенціальними поверхнями точкового заряду є концентричні сфери з центром у точці розміщення заряду. Силові лінії напруженості завжди перпендикулярні до еквіпотенціальних поверхонь.



$$\varphi(r) = \text{const.}$$



## 7. Циркуляція напруженості електростатичного поля

З рівняння повної роботи на шляху 1 – 2

$$A_{12} = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

випливає, що при переміщенні точкового заряду в електричному полі по довільному замкненому контуру ( $r_1=r_2$ ) робота дорівнює нулеві. Математично цю умову, на основі означення роботи електричного поля, можна записати як:

$$A = \oint_L (\vec{F}_K \cdot d\vec{r}) = \oint_L q_0 E \cdot d\vec{l} \cos \alpha = q_0 \oint_L E dl \cos \alpha = 0$$

$$A = \oint_L (\vec{F}_K \cdot d\vec{r}) = \oint_L q_0 E \cdot d\vec{l} \cos \alpha = q_0 \oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0$$

Оскільки  $q_0 \neq 0$ , то

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0$$

Лінійний інтеграл  $\oint_L \vec{E} d\vec{l}$ , обчислений за довільним замкненим контуром  $L$ , називають **циркуляцією вектора напруженості  $E$  електричного поля**.

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0$$

Цей запис потенціальності електростатичного поля є одним із фундаментальних рівнянь електростатики, яке відображає той факт, що силові лінії електростатичного поля є незамкненими: вони починаються на позитивних зарядах і закінчуються на негативних або йдуть у нескінченність (для позитивних зарядів) чи з нескінченності (для негативних). При переміщенні пробного точкового заряду в такому полі по замкненому контуру на одних ділянках шляху виконана робота буде додатною, на інших – від'ємною, але повна робота завжди дорівнюватиме нулеві.

*Умова потенціальності електростатичного поля (теорема про циркуляцію вектора напруженості електричного поля):* векторне поле напруженістю  $\vec{E}$  називається потенціальним, якщо циркуляція вектора  $\vec{E}$  по довільно замкненому контуру дорівнює нулеві.

## 8. Зв'язок напруженості з потенціалом

Оскільки напруженість і потенціал є різними за фізичним змістом характеристиками тих самих точок поля, між ними має існувати зв'язок. Для цього визначимо роботу по перенесенню пробного заряду  $q_0$  між точками 1 і 2 однорідного електростатичного поля двома різними способами.

З одного боку, робота  $A_{12}$  по переміщенню заряду  $q_0$  визначається різницею потенціалів:

$$A_{12} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2) \text{ або } dA_{12} = -q_0 \cdot d\varphi,$$

з іншого боку напруженістю поля:

$$dA_{12} = F_K \cdot dr = q_0 E \cdot dr.$$

Прирівнявши праві частини останніх рівнянь

$$-q_0 \cdot d\varphi = q_0 E \cdot dr,$$

матимемо:

$$E = -\frac{d\varphi}{dr} \text{ або у векторному вигляді: } \vec{E} = -\overrightarrow{grad}\varphi,$$

$$\text{де } grad = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \text{ – оператор градієнта.}$$

Знак мінус вказує на те, що вектор напруженості електростатичного поля направлений у бік зменшення потенціалу.



Для однорідного поля напруженість за абсолютним значенням визначається:

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} = \frac{U}{d},$$

де  $d$  – відстань між точками з потенціалами  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$ .

# Лекція № 7. Електростатичне поле у вакуумі та в речовині

1. Значення фізичних знань з електромагнетизму для майбутньої професійної діяльності інженера-будівельника.
2. Електричний заряд. Закон Кулона.
3. Електричне поле. Напруженість електростатичного поля, принцип суперпозиції електростатичних полів
4. Потік вектора напруженості електростатичного поля.
5. Теорема Гауса. \*Електричне поле заряджених нескінченних нитки та площини.
6. Потенціал електростатичного поля. Різниця потенціалів.
7. Циркуляція напруженості електростатичного поля.
8. Зв'язок напруженості з потенціалом.