



ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ

Електронний курс лекцій

Укладач: Данилов
А.Б.

• Лекція *14*

**Електростатичне
поле
у вакуумі**

План лекції

- Фундаментальні взаємодії.
- Електричний заряд. Властивості та закон збереження електричних зарядів.
- Закон Кулона для точкових і розподілених зарядів. Принцип суперпозиції.
- Електростатичне поле. Напруженість електричного поля. Лінії напруженості.
- Поле диполя.

Лекція 14

Електростатичне поле у вакуумі

Фундаментальні взаємодії

Вид	Радіус дії, м	Переносник взаємодії	Місце взаємодії	Відносна інтенсивність
Гравітаційна	Нескінченно великий	Гравітони	Між тілами, що володіють масою	1
Електромагнітна	Нескінченно великий	Фотони	Між тілами, що володіють зарядом	10^{36}
Ядерна (сильна)	1 фм (фемтометр)	Глюони	Між нуклонами, зарядженими частинками	10^{38}
Слабка	1 ам (аттометр)	Векторні бозони	Між кварками?	10^{32}

Лекція 14
Електростатичне поле
у вакуумі

Електричний заряд
та його властивості

Електричний заряд – внутрішня характеристика деяких елементарних матеріальних частинок, яка проявляється в їхній взаємодії на відстані, або під час дії на них зовнішніх електромагнітних полів.

Лекція 14
Електростатичне поле
у вакуумі

Дослід Міллікена



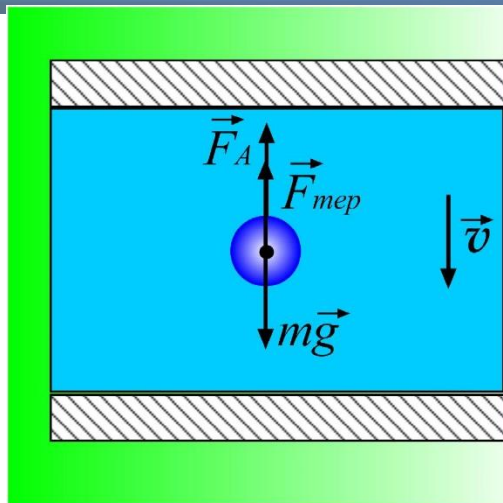
Роберт Міллікен
(1868-1953)

з Чиказького університету з високою точністю виміряв заряд електрона. Це дослідження принесло йому Нобелівську премію 1923 року. Відомий роботами з перевірки квантової теорії фотоефекту Ейнштейна. Встановив числове значення сталої Планка.

Лекція 14

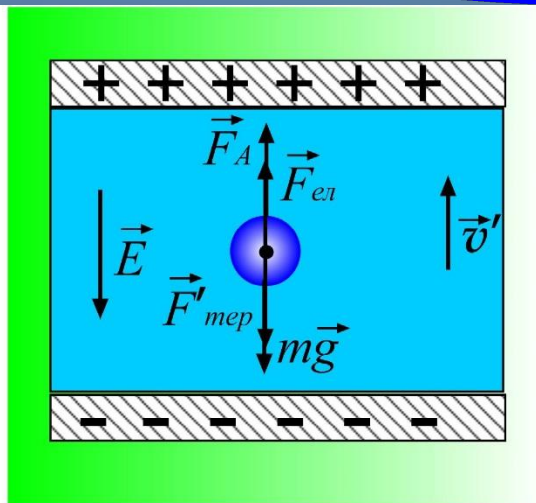
Електростатичне поле у вакуумі

Дослід Міллікена



$$mg = F_A + F_{\text{опору}}$$

Рух наелектризованої краплини олії між обкладками незарядженого конденсатора.



$$mg + F'_{\text{опору}} = F_A + F_{\text{ел}}$$

Рух краплини між обкладками зарядженого конденсатора.

Заряд краплини

$$q = \frac{mg + kv' - F_A}{E}$$

Висновок з дослідів: Заряд будь-якого макроскопічного фізичного тіла, чи елементарних мікроскопічних частинок складається з окремих дискретних зарядів, однакових за абсолютним значенням і рівних заряду електрона.

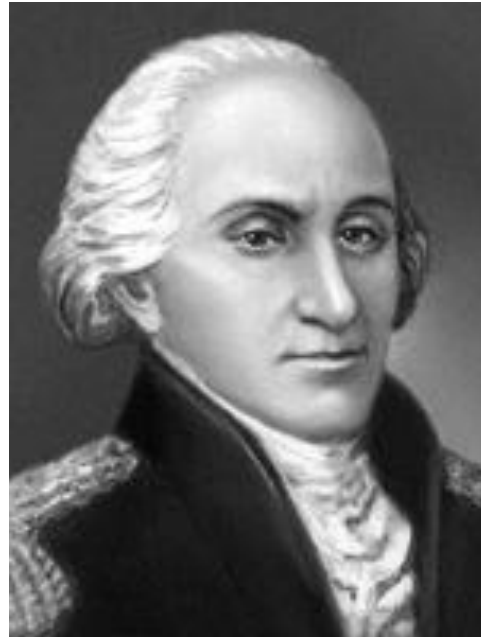
Лекція 14
Електростатичне поле
у вакуумі

Властивості
електричних
зарядів

1. *Існують заряди двох типів -- додатні та від'ємні.*
2. *Як від'ємні, так і додатні заряди володіють властивістю дискретності. Найменшою порцією заряду за абсолютним значенням є величина*
$$e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$
3. *У природі відсутні дробові заряди у вільному стані.*
4. *Рівність від'ємних і додатних елементарних зарядів з точністю до 10^{-21}*
5. *У всіх процесах з участю заряджених тіл виконується закон збереження заряду: Повний заряд замкненої системи зберігається і дорівнює алгебричній сумі її позитивних і негативних зарядів. Заряди в системі народжуються і анігілюють парами – додатні і від'ємні одночасно.*
6. *Інваріантність елементарного заряду.*

Лекція 14
Електростатичне поле
у вакуумі

Закон Кулона



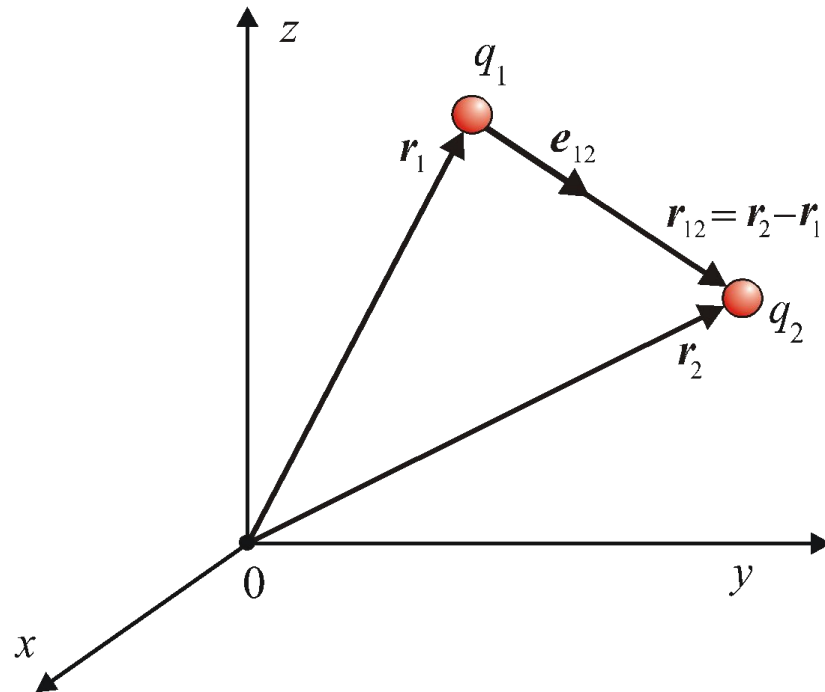
Шарль Огюстен де Кулон
(1736-1806)

Французський інженер і фізик, один із засновників електростатики. Винахідник крутильних ваг. Дослідив деформацію кручення ниток і встановив закони сухого тертя. У 1785 році відкрив закон взаємодії точкових зарядів.

**Закон взаємодії точкових
електричних зарядів:**

Сила електростатичної взаємодії двох точкових електричних зарядів у вакуумі прямо пропорційна добутку зарядів і обернено пропорційна квадрату відстані між ними:

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \vec{e}_{12}$$

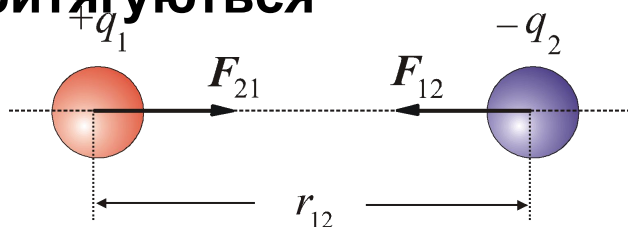


Лекція 14
Електростатичне поле
у вакуумі

Взаємодія
точкових зарядів

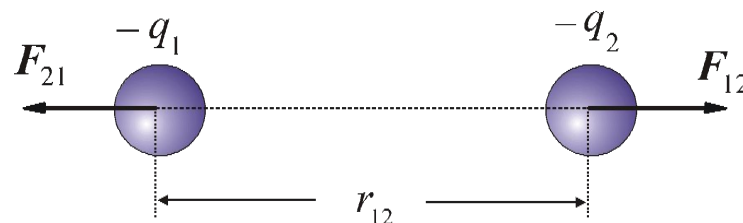
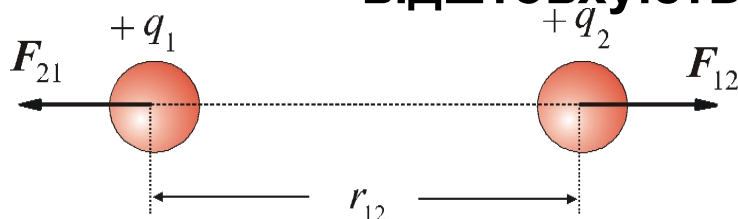
Електростатична взаємодія є центральною

Різнайменні заряди
притягуються



$$F_{12} = -F_{21}$$

Одноіменні заряди
відштовхуються



Лекція 14
Електростатичне поле
у вакуумі

Взаємодія
точкових зарядів

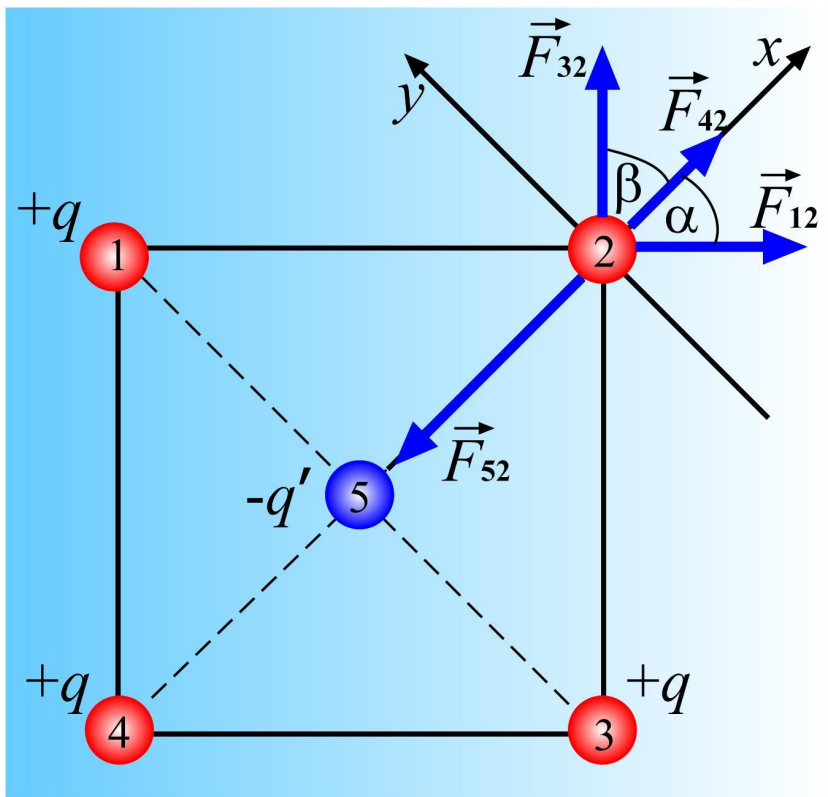
- Сила взаємодії двох точкових зарядів не зміниться, якщо поблизу знаходяться інші заряди.
- **Принцип суперпозиції:** Сила, що діє на точковий заряд з боку інших точкових зарядів, дорівнює векторній сумі сил, що діють на нього з боку кожного з точкових зарядів зокрема.

$$\mathbf{F} = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_0 q_i}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|^2} \frac{\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|}$$

Лекція 14

Електростатичне поле у вакуумі

Приклад 1



$$\vec{F}_{12} + \vec{F}_{32} + \vec{F}_{42} + \vec{F}_{52} = 0$$

$$F_{12} \cos \alpha + F_{32} \cos \beta + F_{42} - F_{52} = 0$$

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{a^2} \quad F_{42} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{2a^2}$$

$$F_{52} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2qq'}{a^2}$$

$$F_{12} \cos \alpha + F_{32} \cos \beta = 2F_{12} \cos \alpha = \sqrt{2}F_{12}$$

$$\frac{\sqrt{2}}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{a^2} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{2a^2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2qq'}{a^2} = 0$$

$$q' = q \left(\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{1}{4} \right)$$

Лекція 14

Електростатичне поле у вакуумі

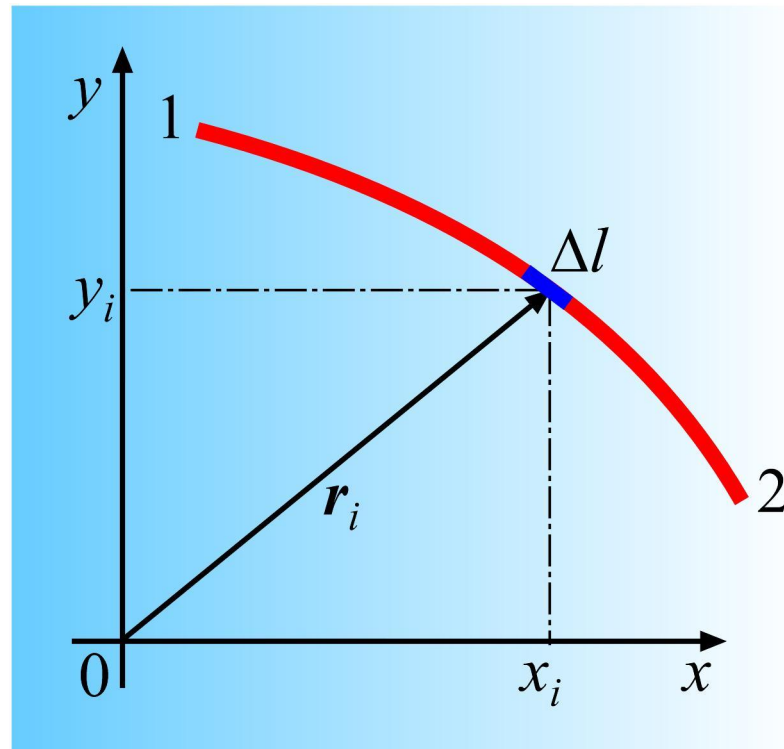
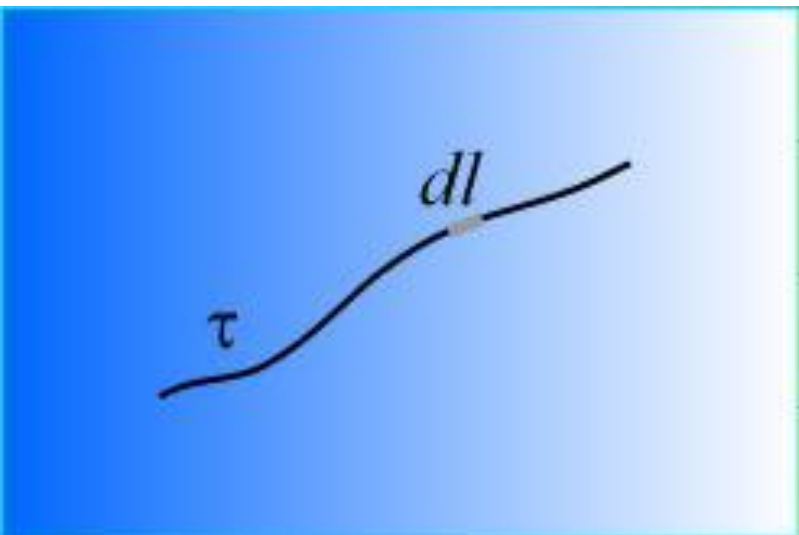
Неперервний розподіл заряду

- Лінійна густина заряду

Повний заряд лінії довжини l

$$\tau(l) = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta l}$$

$$q = \int_l \tau(l) dl$$



Лекція 14

Електростатичне поле у вакуумі

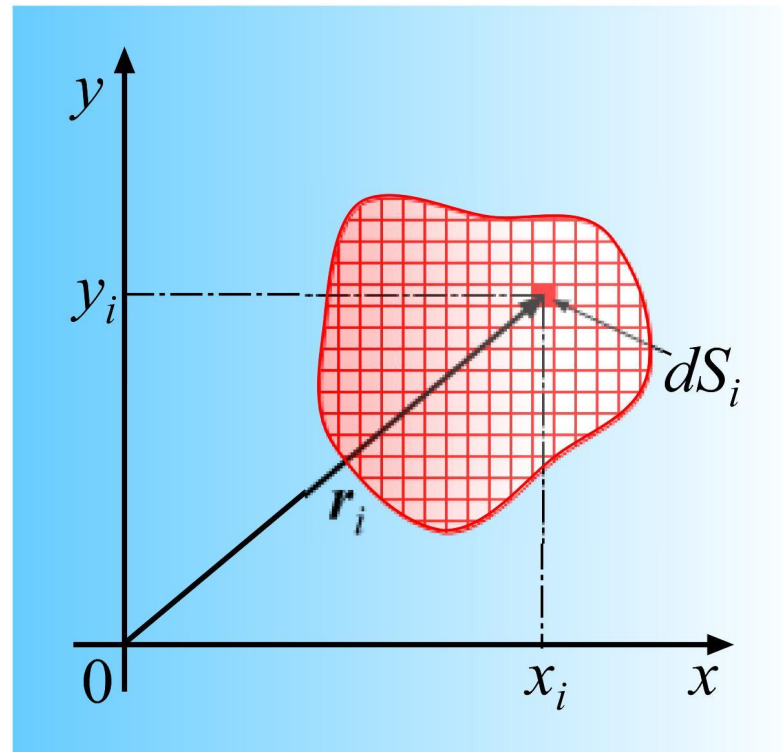
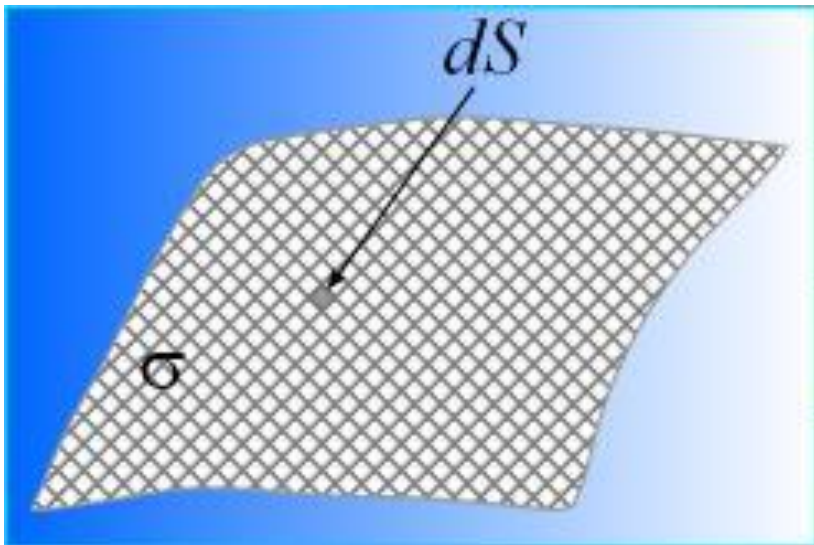
Неперервний розподіл заряду

- Поверхнева густина заряду

Повний заряд поверхні

$$\sigma(x, y) = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta S}$$

$$q = \int_S \sigma(x, y) dS$$



Лекція 14
Електростатичне поле
у вакуумі

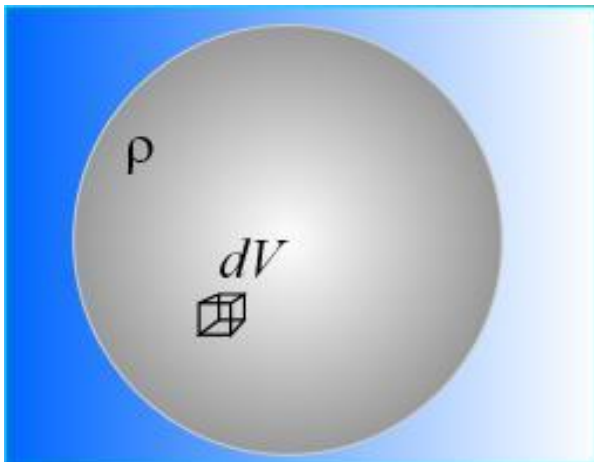
Неперервний
розподіл заряду

Об'ємна густина заряду

Повний заряд, тіла об'ємом V

$$q = \int_V \rho(x, y, z) dV$$

$$\rho(x, y, z) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta V}$$



Лекція 14
Електростатичне поле
у вакуумі

Закон Кулона для
розподіленого
заряду

$$dF_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 dq_i}{(r_0 - r_i)^2} \frac{r_0 - r_i}{r_0 - r_i}$$

Лекція 14
Електростатичне поле
у вакуумі

Напруженість
електростатичного
поля

Електростатичне поле - це поле, що створюється сукупністю електричних зарядів, нерухомих у просторі відносно спостерігача і незмінних у часі.

Напруженість електричного поля чисельно дорівнює силі, яка діє на одиничний додатний точковий заряд, розміщений в даній точці поля.

Напруженість поля точкового заряду q_0 на відстані r від нього у вакуумі

$$E = \frac{1}{q_0} F$$

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

Лекція 14
Електростатичне поле
у вакуумі

Напруженість
електростатичного
поля

Принцип суперпозиції електростатичного поля:

Напруженість поля довільної системи точкових зарядів дорівнює векторній сумі напруженостей полів, що створюється кожним зарядом зокрема.

$$E = \sum_{i=1}^n E_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{|r - r_i|^2} \frac{r - r_i}{|r - r_i|}$$

На випадок довільно розподілених у просторі зарядів:

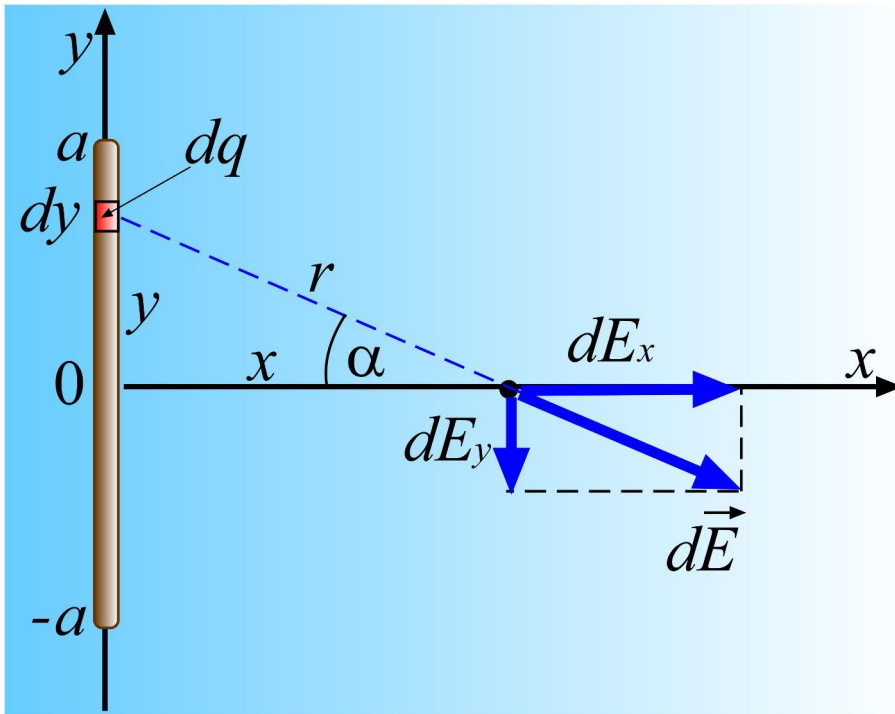
$$\vec{E}(x) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\tau(x') dx'}{r^3}$$

$$E(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iint_S \frac{\rho(x', y')}{|r - r'|^2} \frac{r - r'}{|r - r'|} dx' dy'$$

$$E(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iiint_V \frac{\rho(x', y', z')}{|r - r'|^2} \frac{r - r'}{|r - r'|} dx' dy' dz'$$

Лекція 14
Електростатичне поле
у вакуумі

Приклад 2



$$\tau = dq / dy = q / (2a)$$

$$dE = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{dy}{2a(x^2 + y^2)}$$

$$dE_x = dE \cos \alpha$$

$$dE_y = -dE \sin \alpha$$

$$dE_x = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{x dy}{2a(x^2 + y^2)^{3/2}}$$

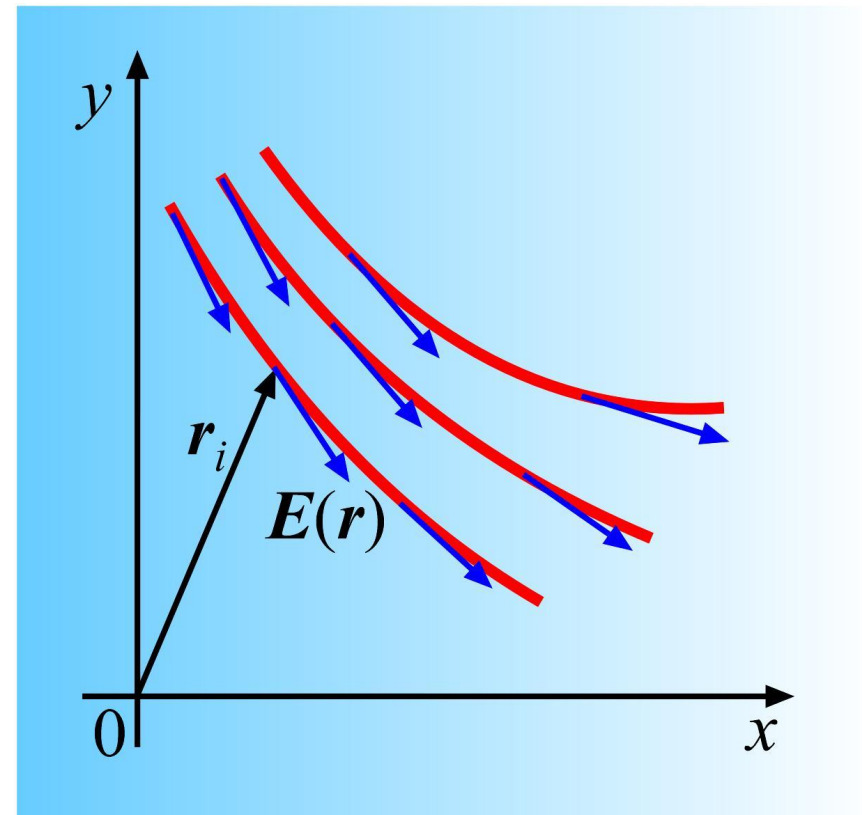
$$dE_y = -\frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{y dy}{2a(x^2 + y^2)^{3/2}}$$

$$E_x = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{x\sqrt{x^2 + a^2}}$$

Лекція 14
Електростатичне поле
у вакуумі

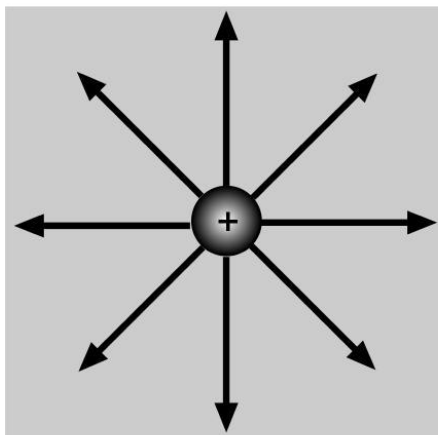
Графічне
представлення поля

- **Силовою лінією поля** або **лінією напруженості електричного поля** називається така лінія, *напрямок якої у кожній точці збігається з напрямком вектора напруженості поля*

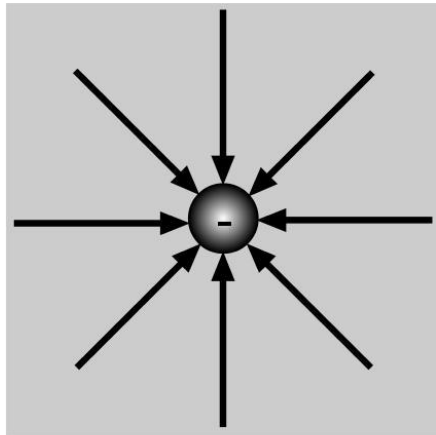


Лекція 14
Електростатичне поле
у вакуумі

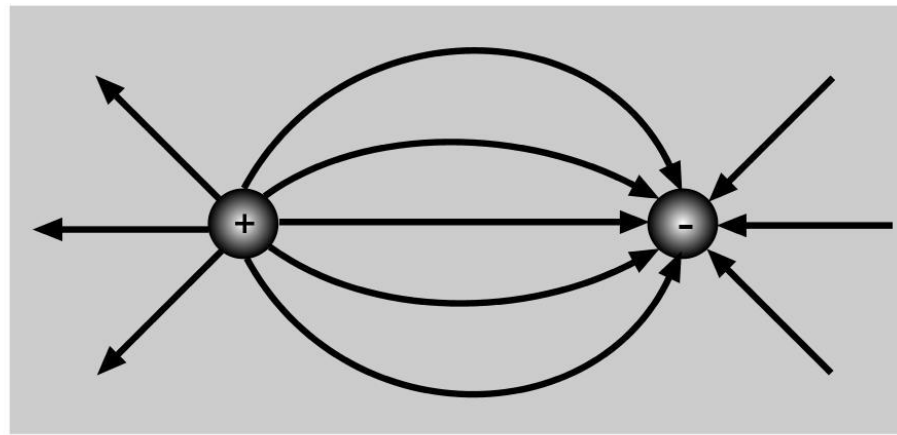
Графічне
представлення поля



a)



б)



в)

Силіві лінії поля точкових зарядів та системи двох різнойменних зарядів

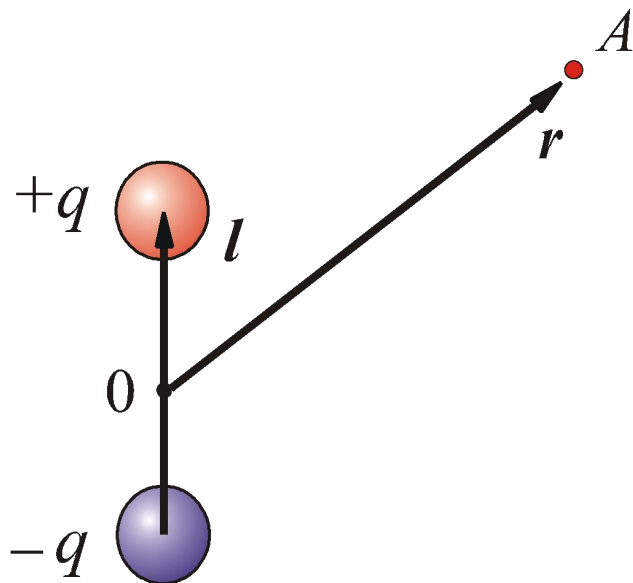
- Лінії напруженості поля напрямлені від додатного до від'ємного заряду, виходять з додатного і входять у від'ємний, або можуть іти у нескінченність.
- Чим густіше розташовані силіві лінії у просторі, тим більша в даній ділянці простору напруженість поля.
- Силіві лінії не перетинаються, оскільки в одній точці не може бути двох значень напруженості електричного поля

Лекція 14

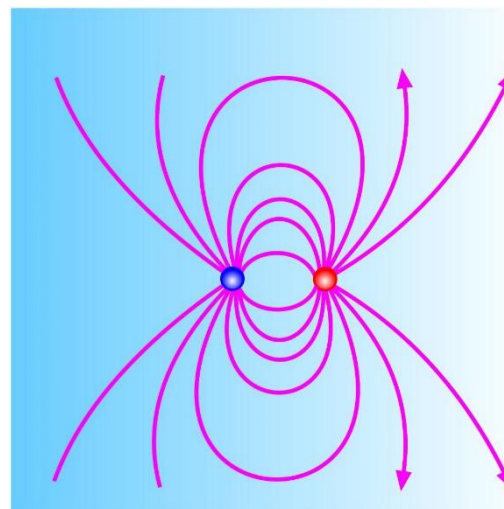
Електростатичне поле у вакуумі

Електричний диполь

- **Електричний диполь** - система двох точкових зарядів, однакових за величиною заряду та протилежних за знаками, що розташовані на відстані один від одного

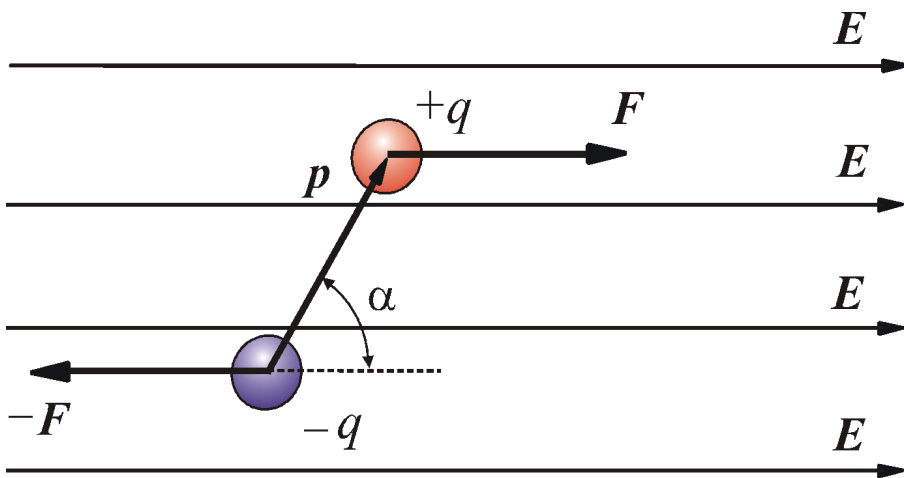


Основна характеристика диполя – електричний **дипольний момент** – вектор, що чисельно дорівнює добутку заряду на плече, і напрямлений від негативного до позитивного заряду: $\mathbf{p} = q\mathbf{l}$



Лекція 14
Електростатичне поле
у вакуумі

Диполь в
електричному полі



Дія пари сил
характеризується
моментом сили:

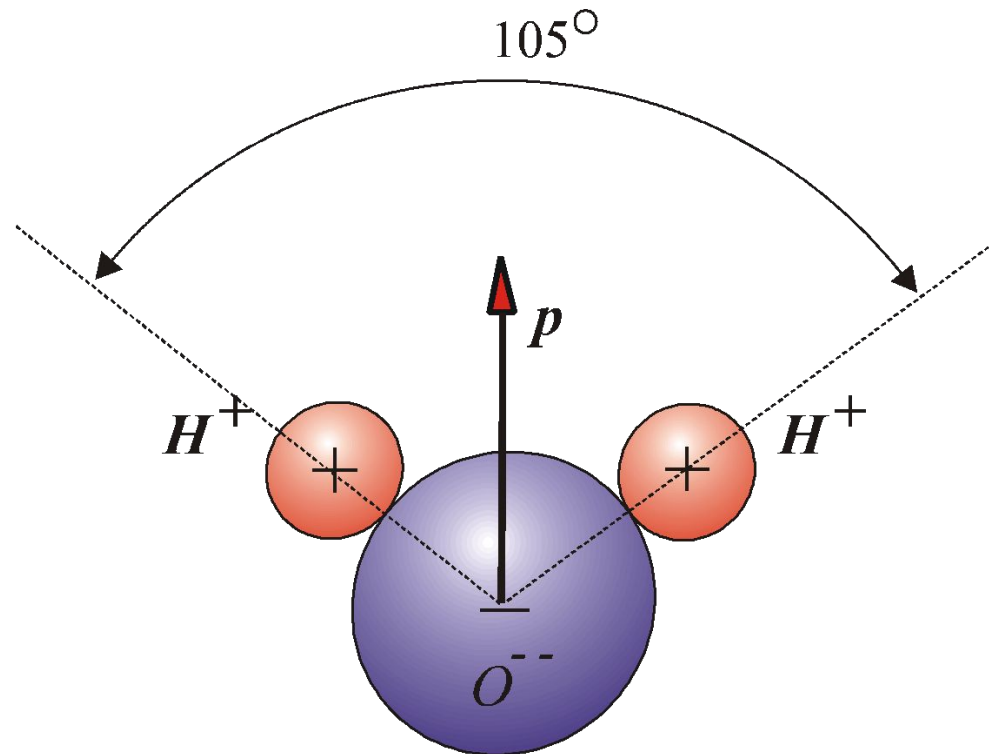
$$M = [p \times E]$$

Момент сили намагається
повернути диполь так, щоб
зменшити кут між p і E .

Існує два положення рівноваги диполя:

- диполь паралельний до електричного поля (*стійка рівновага*),
- диполь антипаралельний до електричного поля (*нестійка рівновага*).

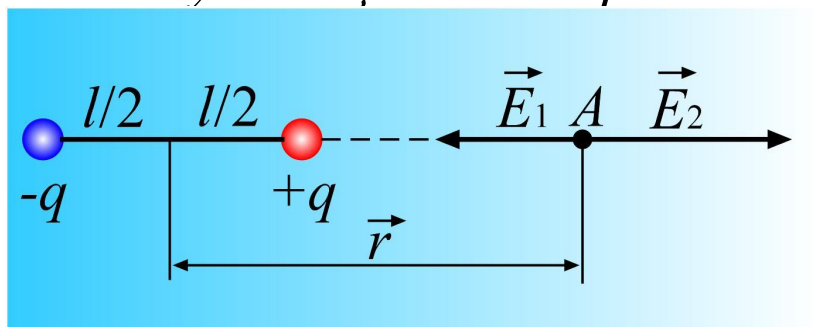
Дипольна модель молекули води



Лекція 14
Електростатичне поле
у вакуумі

Приклад 3
Диполь в електричному
полі

- Знайти вирази для напруженості поля електричного диполя у точці спостереження, яка лежить на осі диполя.



$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

$$E = E_2 - E_1$$

$$E_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(r + l/2)^2}$$

$$E_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(r - l/2)^2}$$

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{(r - l/2)^2} - \frac{1}{(r + l/2)^2} \right) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{2rl}{(r^2 - l^2/4)^2} =$$

$$= \frac{2rp}{4\pi\epsilon_0(r^2 - l^2/4)^2}$$

За
УМОВИ

$$r \gg l$$

$$\vec{E} = \frac{2}{4\pi\epsilon_0 r^3} \vec{p}$$



•Прокідайтеся! Лекція завершилася!!!