

บรรยาย 10 ปรัชญาการไฟฟ้า
และวงจรอิเล็กทรอนิกส์
ทพชท122 ภาคต้น ปีการศึกษา 2564-65

อุดม รอบคอบ, ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ ม.มหิดล

14 มกราคม 2565

หัวข้อ

1. ประจุ และแรงไฟฟ้า
2. สนามไฟฟ้าจากจุดประจุ
3. แรงไฟฟ้าบนอนุภาคที่มีประจุ
4. พลังงานศักย์ไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้า
5. ตัวเก็บประจุ และความจุประจุไฟฟ้า
6. กระแส และความต้านทานไฟฟ้าในลวดตัวนำ
7. วงจรไฟฟ้ากระแสตรง

1 ประจุและแรงไฟฟ้า

- ▶ เรารู้จักประจุไฟฟ้า จากไฟฟ้าสถิตย์



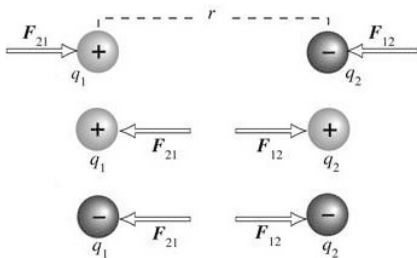
- ▶ ประจุมีอยู่สองชนิด ถูกกำหนดให้เป็น ประจุบวก +Q และประจุลบ -Q ประจุที่เล็กที่สุด คือประจุของอิเล็กตรอน (e) และโปรตอน (p) ในอะตอม ซึ่งมีค่าดังนี้

$$Q_e = -e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ [Coulomb : C]}, \quad Q_p = +e$$

- ▶ ชาร์ล คูลอมบ์ ได้ทำการศึกษาแรงระหว่างประจุไฟฟ้า พบว่า แรงระหว่างประจุจะเป็นแรงผลักจากประจุนิดเดียวกัน และเป็นแรงดึงดูดระหว่างประจุต่างชนิดกัน ขนาดของแรงมีค่าเท่ากับ

$$F_{12} = K \frac{Q_1 Q_2}{r_{12}^2}, \quad K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \text{ N/m}^2 \cdot \text{C}^2$$

การกระทำของแรงเป็นลักษณะของแรงกิริยา-แรงปฏิกิริยา

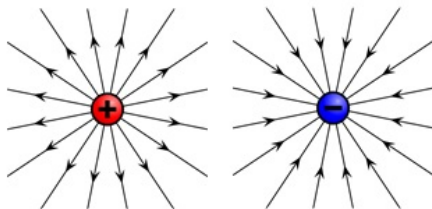


2 สนามไฟฟ้าจากจุดประจุ

- ▶ ภายใต้แนวคิดแบบ action at a distance เรากำหนดให้ $Q_1 = Q$ เป็นประจุแหล่งกำเนิด และ $Q_2 = +q$ เป็นประจุทดสอบ ดังนั้นแรงคูลอมบ์จะปรากฏในรูป

$$\vec{F} = K \frac{Qq}{r^2} \hat{r} = q\vec{E} \rightarrow \vec{E} = \frac{KQ}{r^2} \hat{r}$$

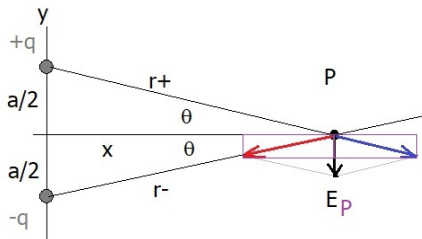
โดยที่ \vec{E} ถูกเรียกว่า สนามไฟฟ้า ทิศทางของสนามไฟฟ้า จากประจุกำเนิด $\pm Q$ เป็นไปตามรูป



- ▶ แนวคิดแบบนี้ มีความสะดวกในการคำนวณแรงไฟฟ้า เพราะเราแยกคำนวณสนามไฟฟ้า \vec{E} จากประจุกำเนิดก่อน แล้วค่อยคำนวณแรงไฟฟ้าบนประจุทดสอบ
- ▶ สนามไฟฟ้าจากหลายประจุกำเนิด ณ ตำแหน่งใดๆ คำนวณจากผลรวมแบบมีทิศทาง จากแต่ละประจุกำเนิด ณ ตำแหน่งนั้น

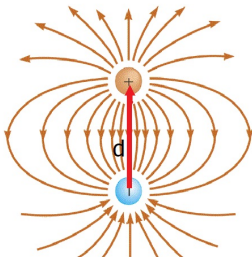
$$\vec{E}_P = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots$$

- ▶ ตัวอย่างเช่น สนามไฟฟ้าจากประจुकู่ขั้วไฟฟ้า (electric dipole)



▶ สนามไฟฟ้าจากประจุคู่ขั้วไฟฟ้า (cont.)

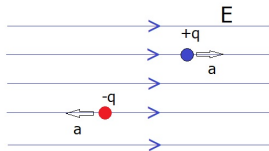
$$\begin{aligned} E_P &= E_y(+q) + E_y(-q) = \left(\frac{Kq}{r_+^2} + \frac{Kq}{r_-^2} \right) \sin \theta \\ &= Kq \frac{2}{x^2 + a^2/4} \frac{a/2}{\sqrt{x^2 + a^2/4}} \xrightarrow{x \gg a} \frac{Kqa}{x^3} \\ \vec{d} &= q\vec{a} \rightarrow \vec{E}_P = -\frac{K\vec{d}}{x^3} \end{aligned} \quad (1)$$



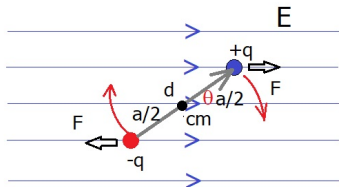
3 แรงไฟฟ้าบนอนุภาคที่มีประจุ

- ▶ แรงไฟฟ้าบนจุดประจุ จากสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ \vec{E}

$$\begin{aligned}\vec{F} &= q\vec{E} = m\vec{a} \\ \rightarrow \vec{a} &= \frac{q}{m}\vec{E}\end{aligned}\quad (2)$$



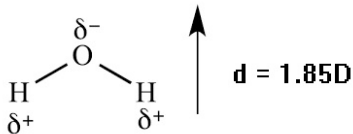
- ▶ แรงไฟฟ้าบนประจุคู่ขั้ว จากสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ \vec{E}



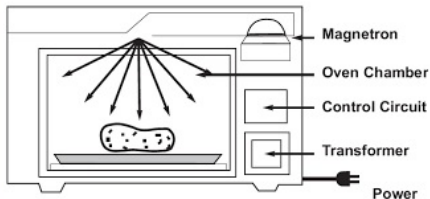
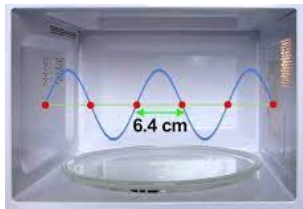
$$\begin{aligned}\tau &= 2(Fa/2) \sin \theta \\ &= qEa \sin \theta = Ed \sin \theta \\ &\simeq Ed\theta = I_0\alpha = -I_0\ddot{\theta} \\ \ddot{\theta} + \frac{Ed}{I_0}\theta &= 0, \quad \omega = \sqrt{\frac{Ed}{I_0}}\end{aligned}\quad (3)$$

ค่าโมเมนต์คู่ขั้วไฟฟ้าของโมเลกุลน้ำ

$$d_{\text{water}} = 1.85D, \quad 1.0D(\text{Debye}) = 3.33564 \times 10^{-30} \text{C} \cdot \text{m}$$



การทำงานของเตาไมโครเวฟ



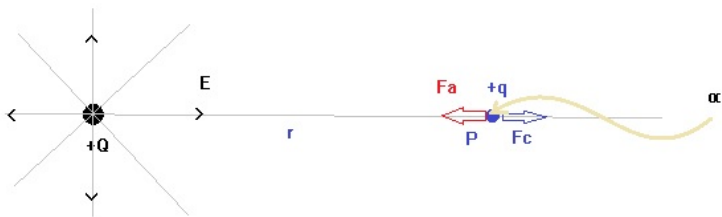
4 พลังงานศักย์ไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้า

วิเคราะห์งานเชิงกลจากแรง $F_a = -F_c$ จากการนำประจุทดสอบ $+q$ มาจากระยะอนันต์ เข้าหาประจุกำเนิด $+Q$ ที่ระยะ r (ณ จุด P) พบว่า

$$W_{\infty r} = \int_{\infty}^r \left(-\frac{KQq}{r^2} \right) dr = \frac{KQq}{r} \equiv U(r) - U(\infty)$$

$$U(r) = \frac{KQq}{r} \text{ [Joule]} \mapsto U(\infty) = 0$$

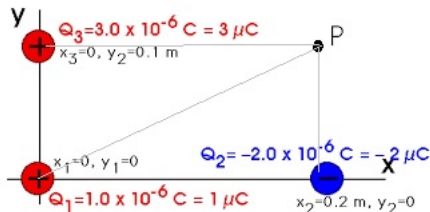
$U(r)$ คือพลังงานศักย์ไฟฟ้าระหว่างประจุ $+Q$ และ $+q$



ศักย์ไฟฟ้า ของประจุกำเนิด $+Q$ ถูกนิยามให้มีค่าเท่ากับ พลังงานศักย์ไฟฟ้าต่อหน่วยประจุทดสอบ

$$V(r) = \frac{U(r)}{q} = \frac{KQ}{r} \quad [J/C = \text{Volt} : V]$$

ศักย์ไฟฟ้า เป็นสเกลาร์ ผลรวมศักย์ไฟฟ้า ณ จุดใดๆ รวมได้โดยตรง ไม่มีทิศทาง จึงสะดวกในการคำนวณ

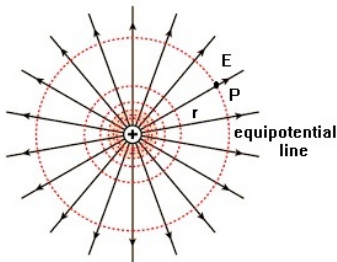


$$V_P = 9 \times 10^9 \left(\frac{3 \times 10^{-6}}{0.2} + \frac{1 \times 10^{-6}}{\sqrt{(0.1)^2 + (0.2)^2}} - \frac{2 \times 10^{-6}}{0.2} \right) = 86 \times 10^3 \text{ Volt}$$

เมื่อคำนวณศักย์ไฟฟ้า ณ ตำแหน่งใดๆ ได้แล้ว จะทราบค่าสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งนั้นได้อย่างไร?

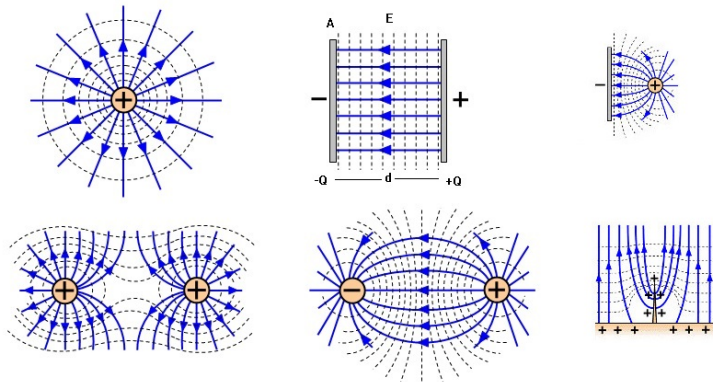
พิจารณาค่าศักย์และสนามไฟฟ้าจากจุดประจุ $+Q$ ณ ตำแหน่ง P (ระยะ r)

$$V(r) = \frac{KQ}{r}, \quad \vec{E}(r) = \frac{KQ}{r^2} \hat{r} = -\hat{r} \frac{d}{dr} V(r)$$



พบว่า สนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งใดๆ จะมีค่าเท่ากับ (-ve) อนุพันธ์ของ ศักย์ไฟฟ้า ในทิศตั้งฉากกับแนวศักย์ไฟฟ้าเท่านั้น ณ ตำแหน่งนั้น

แนวศักร์ไฟฟ้าเท่ากัน

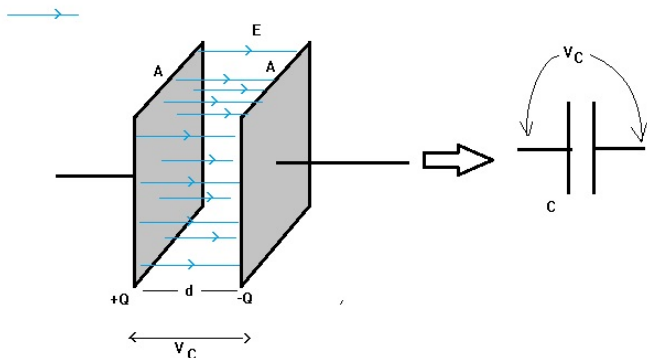


สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอระหว่างแผ่นตัวนำสองแผ่น ที่มีประจุ $\pm Q$ อยู่ข้างกัน ที่ระยะห่าง d และมีพื้นที่ผิวตัวนำเท่ากับ A พบว่า

$$E = \frac{Q}{A\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}, \quad \epsilon = \frac{Q}{A} \text{ [C/m}^2\text{]}$$

5 ตัวเก็บประจุ และความจุประจุไฟฟ้า

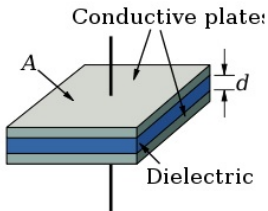
ตัวเก็บประจุ มีโครงสร้างเป็นแผ่นตัวนำคู่ขนาน



ความจุประจุ (capacitance) นิยามจาก

$$Q = CV_C, \quad V_C = \frac{\sigma d}{\epsilon_0} = \frac{Qd}{\epsilon_0 A} \mapsto C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad [C/V = \text{Farad} : F]$$

สาร dielectric เพิ่มความสามารถในการเก็บประจุ โดยการเพิ่ม $\epsilon_0 \rightarrow \epsilon$



$$C_0 = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

$$\rightarrow C = \frac{\epsilon A}{d} = \kappa C_0, \quad \kappa = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

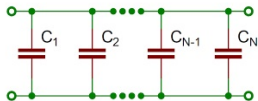
κ คือค่า dielectric constant

| Material | Dielectric constant |
|----------------------------|---------------------|
| Air (dry) | 1.0 |
| Bakelite | 4.9 |
| Mylar | 3.2 |
| Nylon | 3.4 |
| Paper | 3.7 |
| Paraffin-impregnated paper | 3.5 |
| Polypropylene | 2.2 |
| Polystyrene | 2.6 |
| Polyvinyl chloride | 3.4 |
| Porcelain | 6.0 |
| Pyrex glass | 5.6 |
| Strontium titanate | 233.0 |
| Water | 80.0 |

การต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรม

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \mapsto d = \frac{\epsilon_0 A}{C}, d_{tot} = d_1 + d_2 + \dots + d_N$$

$$\mapsto \frac{1}{C_{tot}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N}$$

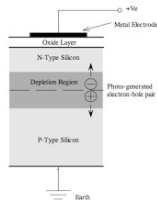
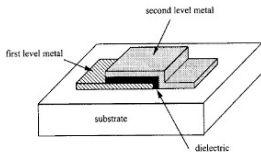
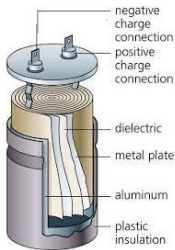


การต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \mapsto A = \frac{Cd}{\epsilon_0}, A_{tot} = A_1 + A_2 + \dots + A_N$$

$$C_{tot} = C_1 + C_2 + \dots + C_N$$

ตัวเก็บประจุ



Coupling Capacitors Device (CCD)

Metal Oxide Semiconductor (MOS) Capacitor

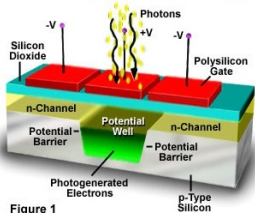


Figure 1

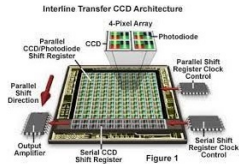
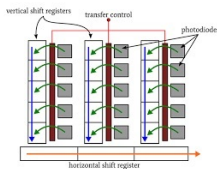
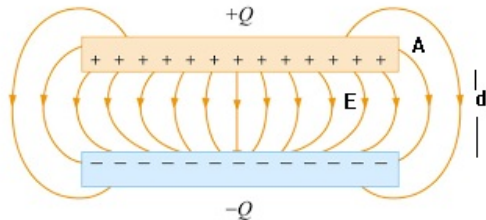


Figure 1

6 พลังงานสนามไฟฟ้า

พิจารณาสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำ ในตัวเก็บประจุ



พลังงานไฟฟ้า ในตัวเก็บประจุ

$$dU = V_C dQ = \frac{1}{C} Q dQ = d \frac{Q^2}{2C} \mapsto U = \frac{Q^2}{2C}$$

$$C = \frac{\epsilon A}{d}, Q = \epsilon A E \mapsto U = \frac{\epsilon}{2} E^2 \text{vol.} (Ad) = u(\text{vol.} Ad), u = \frac{1}{2} \epsilon E^2$$

7 กระแส และความต้านทานไฟฟ้าในลวดตัวนำ

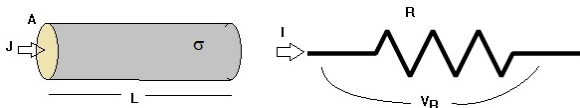
ลวดตัวนำมีความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้า ด้วยสภาพการนำ
กระแสไฟฟ้า (conductivity) $\sigma [1/Ohm \cdot cm] = 1/\rho [Ohm \cdot cm]$
(สภาพต้านทานไฟฟ้า - resistivity)

ปริมาณกระแสไฟฟ้าจะเป็นไปตามสมการ

$$J = \sigma E [C/s \cdot m^2]$$

สำหรับลวดตัวนำยาว L พื้นที่ตัดขวาง A และมีความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่าง
ปลายทั้งสองด้าน $V = E/L$ พบว่า

$$I = JA = \frac{\sigma A}{L} V \equiv \frac{V}{R} \mapsto R = \frac{L}{\sigma A} = \frac{\rho L}{A} \text{ Ohm's law}$$



| Type of Materials | Electrical conductivity, σ ($\Omega \cdot m$) ⁻¹ |
|-------------------|--|
| Silver | 6.3×10^7 |
| Copper | 5.8×10^7 |
| Gold | 4.2×10^7 |
| Aluminum | 3.4×10^7 |
| Germanium | 2.2 |
| Silicon | 4.3×10^{-4} |
| Polyethylene | 10^{-14} |
| Diamond | 10^{-14} |

การต่อตัวความต้านทาน (Resistor) R เข้าด้วยกัน

▶ ต่อแบบอนุกรม

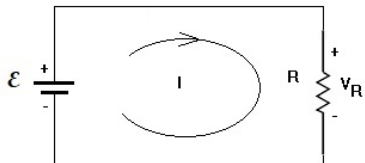
$$L_{tot} = L_1 + L_2 + \dots + L_N = \sigma A R_{tot} \mapsto R_{tot} = R_1 + R_2 + \dots + R_N$$

▶ ต่อแบบขนาน

$$A_{tot} = A_1 + A_2 + \dots + A_N = \frac{L}{\sigma R_{tot}} \mapsto \frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N}$$

8 วงจรไฟฟ้ากระแสตรง

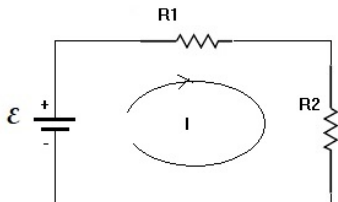
วงจรไฟฟ้ากระแสตรง ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า
กระแสตรง (แบตเตอรี่) + ลวดตัวนำ + อุปกรณ์ไฟฟ้า (R)



ทฤษฎีวงจรไฟฟ้า - กฎของเคอร์ชอฟฟ์

- ▶ กำหนดกระแสไฟฟ้าวงรอบ $\{I_i\}$
- ▶ ผลรวมศักย์ไฟฟ้ารอบวง $\sum_i \mathcal{E}_i = \sum_i V_{R_i}$ โดยที่ $V_{R_i} = \sum_j (I_i - I_j) R_i$ ตามกฎของโอห์ม

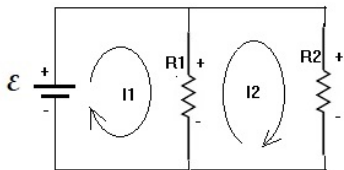
วงจรแบ่งศักย์ไฟฟ้า



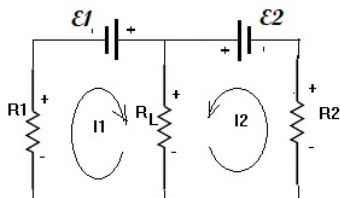
$$\begin{aligned}\mathcal{E} &= V_{R_1} + V_{R_2} \\ &= IR_1 + IR_2 = I(R_1 + R_2) \\ \Rightarrow I &= \frac{\mathcal{E}}{R_1 + R_2} \quad (4)\end{aligned}$$

วงจรแบ่งกระแสไฟฟ้า

$$\begin{aligned}\mathcal{E} &= (I_1 - I_2)R_1 \\ 0 &= (I_2 - I_1)R_1 + I_2R_2 \\ I_2 &= I_1 \frac{R_1}{R_1 + R_2}, \quad I_1 = \mathcal{E} \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}\end{aligned}$$



วงจรแรงดันไฟฟ้าร่วม



$$\mathcal{E}_1 = I_1 R_1 + (I_1 + I_2) R_L$$

$$= I_1 (R_1 + R_L) + I_2 R_L$$

$$\mathcal{E}_2 = I_2 R_2 + (I_1 + I_2) R_L$$

$$= I_1 R_L + I_2 (R_2 + R_L)$$

$$\text{Solve } I_1, I_2 \mapsto V_L = (I_1 + I_2) R_L \quad (5)$$

วงจรบริจด์

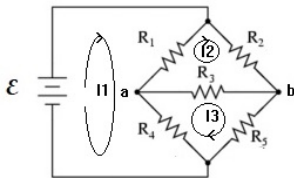
$$\mathcal{E} = (I_1 - I_2) R_1 + (I_1 - I_3) R_4$$

$$0 = I_2 R_2 + (I_2 - I_3) R_3 + (I_2 - I_1) R_1$$

$$0 = I_3 R_5 + (I_3 - I_1) R_4 + (I_3 - I_2) R_3$$

$$\text{Bridge balance} \mapsto I_2 = I_3, \quad V_{ab} = 0$$

$$\mapsto \left| \frac{R_1}{R_4} \right| = \left| \frac{R_2}{R_5} \right| \quad (6)$$



แบบฝึกหัดท้ายบท