

# บทที่ 1

## ไฟฟ้าสถิต

General Physics II

01420112

รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิศร์ ตั้งเจริญ

# ไฟฟ้าสถิต

- เป็นการศึกษาเกี่ยวกับอันตรกิริยาระหว่างประจุไฟฟ้า (electric charge) ที่หยุดนิ่ง
  - ☐ สมบัติของประจุไฟฟ้า
  - ☐ กฎของคูลอมบ์
  - ☐ สนามไฟฟ้า
- ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้าสถิตที่พบเห็นในชีวิตประจำวัน เช่น เมื่อหวีผมแล้วนำหวีนั้นไปเข้าใกล้เศษกระดาษแผ่นเล็กๆ เศษกระดาษจะถูกดูดให้ติดกับหวีได้



# ประจุไฟฟ้า

ประจุบวก

(Positive charge)

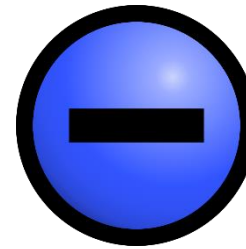


โปรตอน

(Proton)

ประจุลบ

(Negative charge)



อิเล็กตรอน

(Electron)

# ประจุไฟฟ้า

- สัญลักษณ์ของประจุคือ  $q$

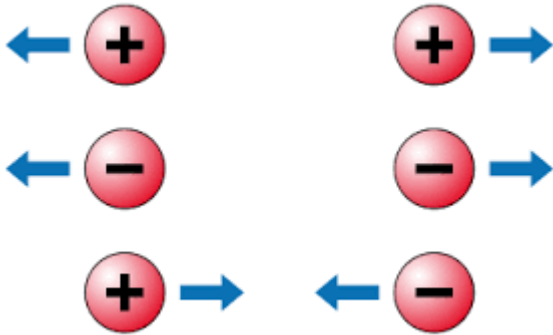
$$q = \pm Ne$$

$N$  คือ จำนวนเต็ม

$e$  คือ หน่วยพื้นฐานที่เล็กที่สุดของประจุ 1 ตัว ( $1.6 \times 10^{-19}$  C)

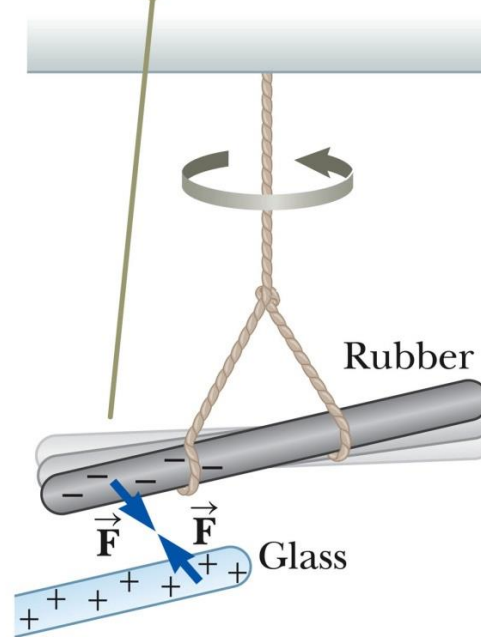
Electron  $\rightarrow -e$       Proton  $\rightarrow +e$

# สมบัติของประจุไฟฟ้า



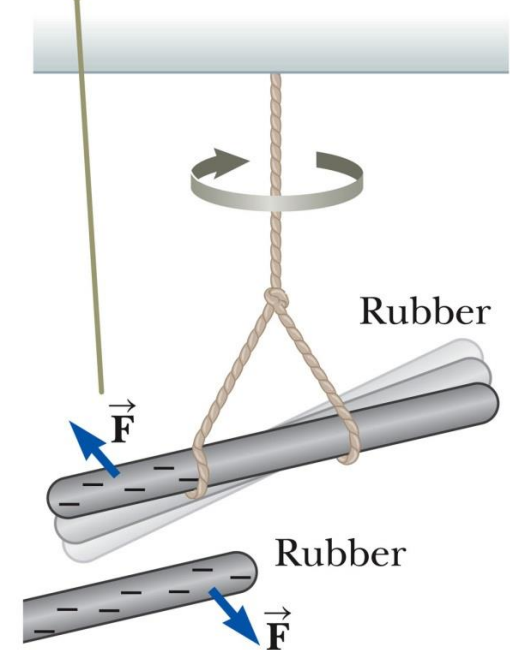
- ประจุที่มีเครื่องหมายเหมือนกันจะผลักออกจากกัน
- ประจุที่มีเครื่องหมายต่างกันจะดึงดูดเข้าหากัน

A negatively charged rubber rod suspended by a string is attracted to a positively charged glass rod.



a

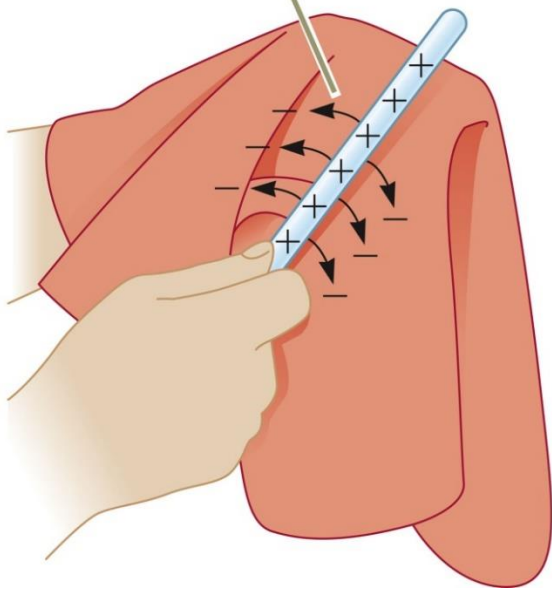
A negatively charged rubber rod is repelled by another negatively charged rubber rod.



b

# สมบัติของประจุไฟฟ้า

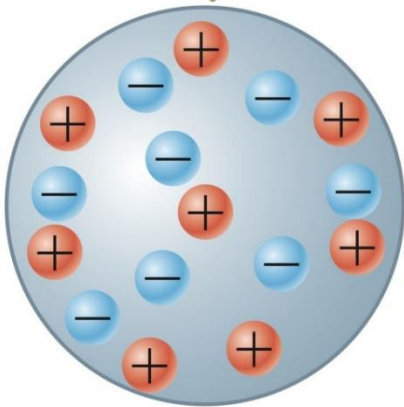
Because of conservation of charge, each electron adds negative charge to the silk and an equal positive charge is left on the glass rod.



- ประจุเป็นปริมาณอนุรักษ์ คือ “ประจุไม่มีการสูญเสียหรือถูกสร้างขึ้นมาใหม่ได้” เรียกว่า **กฎการอนุรักษ์ของประจุ (charge conservative law)**
- เมื่อนำแท่งแก้วถูกับผ้าไหม อิเล็กตรอนจะเกิดการเคลื่อนย้ายจากแท่งแก้วไปยังผ้าไหม เสมือนว่าผ้าไหมได้รับการเติมประจุลบเข้าไปมากขึ้น และส่งผลทำให้ประจุบวกในปริมาณที่เท่ากันเหลืออยู่บนแท่งแก้ว

# การชาร์จประจุไฟฟ้าด้วยการเหนี่ยวนำ

The neutral sphere has equal numbers of positive and negative charges.

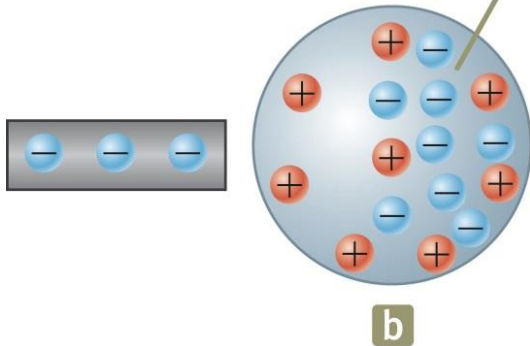


a

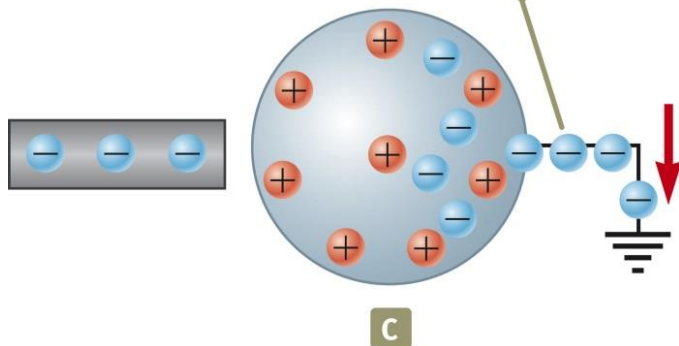
- เป็นวิธีการที่ไม่จำเป็นต้องใช้การสัมผัสกับวัตถุที่ต้องการชาร์จ
- พิจารณาทรงกลมโลหะที่มีความเป็นกลางทางไฟฟ้าดังรูป ซึ่งมีจำนวนประจุบวกและประจุลบกระจายตัวสม่ำเสมอเท่ากัน

# การชาร์จประจุไฟฟ้าด้วยการเหนี่ยวนำ

Electrons redistribute when a charged rod is brought close.



Some electrons leave the grounded sphere through the ground wire.

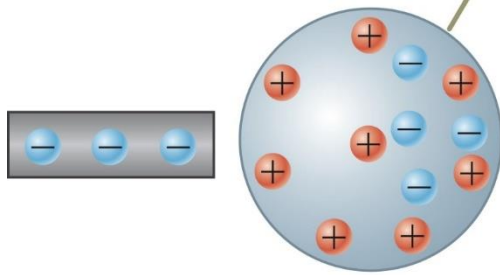


- นำแท่งยางที่มีความเป็นประจุลบเคลื่อนเข้ามาจริง (โดยไม่มีการสัมผัสกับทรงกลม)
- ประจุบวกภายในทรงกลมจะถูกดึงดูดมายังบริเวณที่ใกล้กับแท่งยาง ในขณะที่ประจุลบภายในทรงกลมจะถูกผลักออกไปยังอีกด้านของทรงกลม
- เมื่อต่อสายกราวด์ให้กับทรงกลมดังรูป ประจุลบบางส่วนจะเกิดการเคลื่อนที่ออกจากทรงกลมผ่านสายกราวด์นั้น



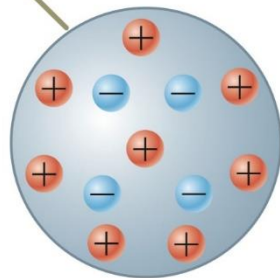
# การชาร์จประจุไฟฟ้า

The excess positive charge is nonuniformly distributed.



d

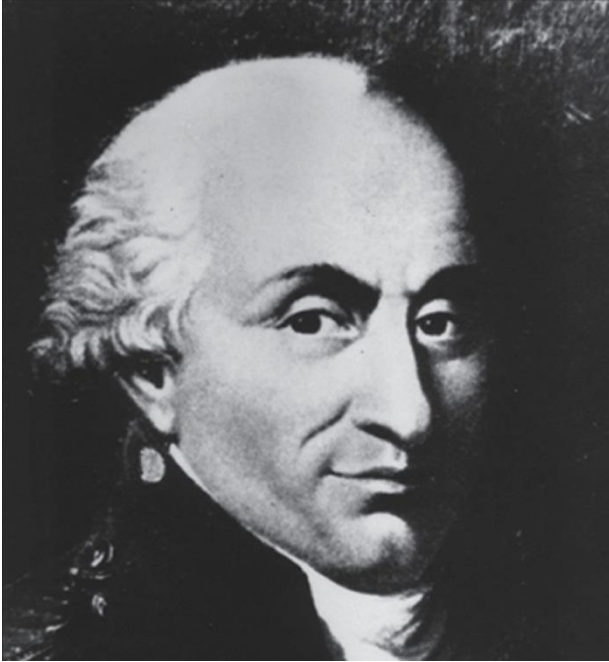
The remaining electrons redistribute uniformly, and there is a net uniform distribution of positive charge on the sphere.



e

- เมื่อนำสายกราวด์และแท่งยางออก ประจุทั้งหมดที่อยู่ภายในทรงกลมจะเกิดการจัดเรียงและกระจายตัวให้สม่ำเสมอขึ้นใหม่อีกครั้ง
- ทรงกลมโลหะดังกล่าวจะเหลือประจุบวกอยู่ภายในมากกว่าประจุลบ จึงแสดงความเป็นประจุบวกออกมาอย่างชัดเจนต่อไป
- แท่งยางจะไม่สูญเสียประจุลบใดๆ เลย เนื่องจากไม่มีการสัมผัสโดยตรงกับทรงกลมโลหะ

# กฎของคูลอมบ์



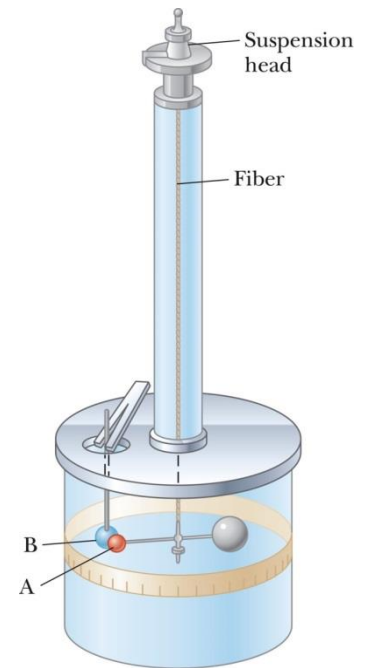
Charles Coulomb  
(1736 – 1806)

ชาร์ล-โอกุสแต็ง เดอ กูลอง

- เป็นนักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสที่ได้ทำการศึกษาและทดลองหาอันตรกิริยาระหว่างประจุ 2 ประจุที่อยู่นิ่งจนพบว่า

“แรงไฟฟ้าที่กระทำระหว่างประจุจุด 2 ตัวมีขนาดแปรผันตามผลคูณของขนาดของประจุแต่ละตัว และแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างประจุจุดทั้งสองยกกำลังสอง”

$$F_e = k_e \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$$



## กฎของคูลอมบ์

$$F_e = k_e \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$$

$F_e$  แรงไฟฟ้าระหว่างประจุจุด (หน่วย คูลอมบ์ C)

$k_e$  ค่าคงที่คูลอมบ์ ( $8.9876 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$ )

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



สภาพยอมในสุญญากาศ (Permittivity of Free Space) มีค่าเท่ากับ  $8.8542 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2$

# กฎของคูลอมบ์

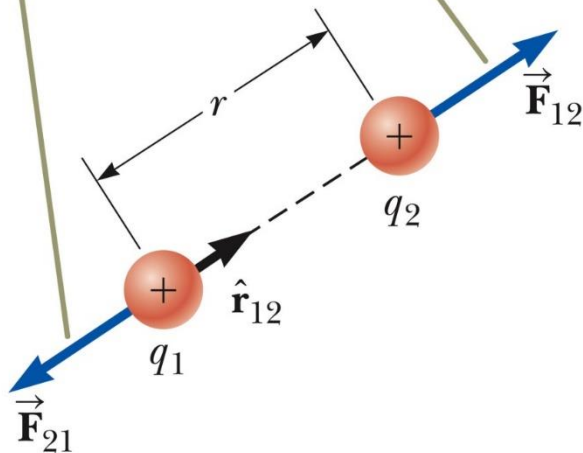
**TABLE 23.1***Charge and Mass of the Electron, Proton, and Neutron*

Particle	Charge (C)	Mass (kg)
Electron (e)	$-1.602\,176\,5 \times 10^{-19}$	$9.109\,4 \times 10^{-31}$
Proton (p)	$+1.602\,176\,5 \times 10^{-19}$	$1.672\,62 \times 10^{-27}$
Neutron (n)	0	$1.674\,93 \times 10^{-27}$

- อิเล็กตรอนและโปรตอนมี “ขนาด” ของประจุที่เท่ากัน แต่มี “มวล” ที่ต่างกันมหาศาล
- โปรตอนและนิวตรอนมี “มวล” ที่เท่ากัน แต่สภาพของความเป็นประจุแตกต่างกัน

# แรงไฟฟ้า

When the charges are of the same sign, the force is repulsive.



a

- เมื่อวางประจุชนิดเดียวกันไว้ใกล้กันจะมีแรงผลักกระทำซึ่งกันและกันดังสมการ

$$\vec{F}_{12} = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}_{12}$$

$\hat{r}_{12}$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่มีทิศชี้จากประจุ  $q_1$  ไปยังประจุ  $q_2$

- จากกฎข้อที่สามของนิวตันจะได้ว่า

“แรงไฟฟ้าที่กระทำต่อประจุ  $q_1$  จะมีขนาดที่เท่ากับแรงที่กระทำต่อประจุ  $q_2$  แต่มีทิศทางที่ตรงข้ามกัน”

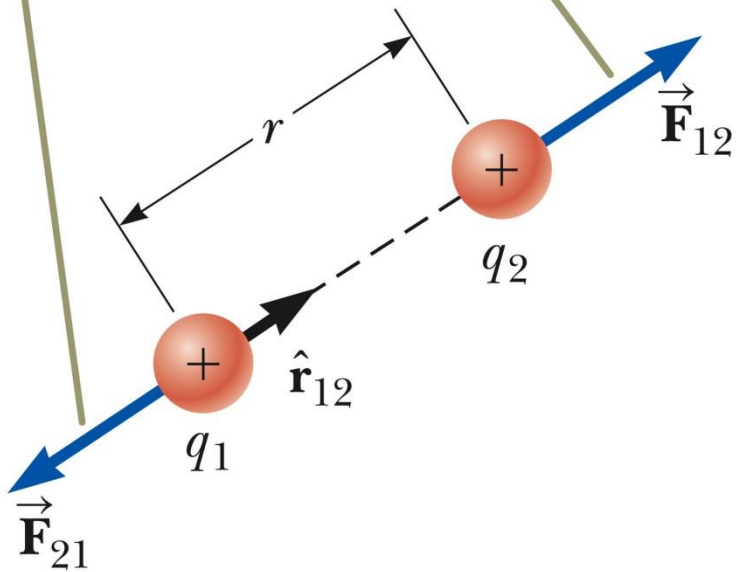
$$\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}$$

ประจุที่เครื่องหมายเหมือนกัน ผลคูณ  $q_1 q_2$  จะเป็นบวกและเกิดแรงผลัก

ประจุที่เครื่องหมายตรงข้ามกัน ผลคูณ  $q_1 q_2$  จะเป็นลบและเกิดแรงดูด

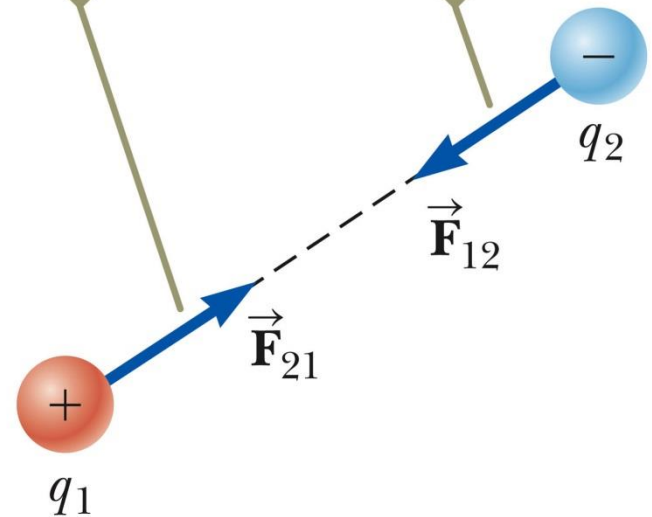
# แรงไฟฟ้า

When the charges are of the same sign, the force is repulsive.



a

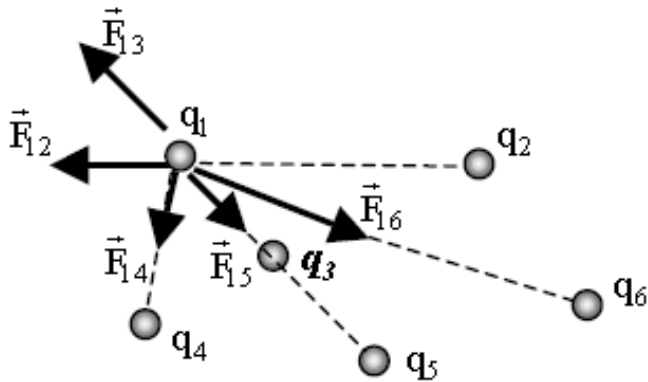
When the charges are of opposite signs, the force is attractive.



b

# แรงไฟฟ้า

- ในกรณีที่มีประจุมากกว่า 2 ตัว แรงที่กระทำบนประจุใดๆ สามารถหาได้จากผลรวมแบบเวกเตอร์ของแรงที่เกิดจากประจุอื่นๆ ที่เหลือ



$$\vec{F} = \sum_{j=1}^N \vec{F}_{ij}$$

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \vec{F}_{14} + \dots + \vec{F}_{16}$$

**ตัวอย่างที่ 1.1** วางวัตถุสองก้อนห่างกันเป็นระยะทาง 3 เมตร ถ้าแต่ละก้อนมีอิเล็กตรอนอิสระอยู่  $5 \times 10^{14}$  ตัว จงหาขนาดของแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้น



**ตัวอย่างที่ 1.2** กำหนดให้ประจุ  $q_1 = 4 \mu\text{C}$  อยู่ ณ พิกัด  $(3,0)$  เมตร ประจุ  $q_2 = 2 \mu\text{C}$  อยู่ ณ พิกัด  $(0,0)$  เมตร และประจุ  $q_3 = 4 \mu\text{C}$  ณ พิกัด  $(0,4)$  จงหาแรงไฟฟ้าสุทธิที่กระทำต่อประจุ  $q_2$

# สนามไฟฟ้า

- สนามไฟฟ้า (Electric Field;  $E$ ) คือแรงไฟฟ้าที่กระทำต่อประจุทดสอบ ( $q_0$ ) ขนาดหนึ่งหน่วย ซึ่งวางอยู่ ณ ตำแหน่งใดๆ ดังสมการ

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

- สนามไฟฟ้าเป็นปริมาณเวกเตอร์ มีหน่วย นิวตันต่อคูลอมบ์ (N/C)
- สนามไฟฟ้าถูกพบบริเวณที่อยู่รอบๆ วัตถุที่มีประจุไฟฟ้า
- ทิศทางของสนามไฟฟ้า  $E$  จะมีทิศทางเดียวกับแรงที่กระทำกับประจุทดสอบที่เป็นบวก แต่จะมีทิศตรงข้ามกันเมื่อประจุทดสอบเป็นลบ

# สนามไฟฟ้า

- แรงไฟฟ้าระหว่างประจุต้นกำเนิด  $q$  และประจุทดสอบ  $q_0$  จากกฎของคูลอมบ์แสดงได้ดังสมการ

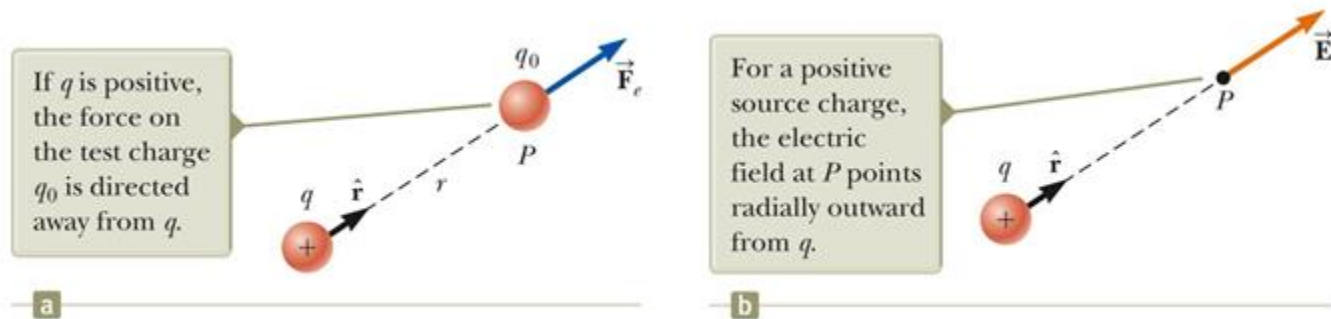
$$\vec{F}_e = k_e \frac{qq_0}{r^2} \hat{r}$$

- ดังนั้นสนามไฟฟ้าจึงมีค่าเท่ากับ

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{q_0} = k_e \frac{q}{r^2} \hat{r}$$

# สนามไฟฟ้า

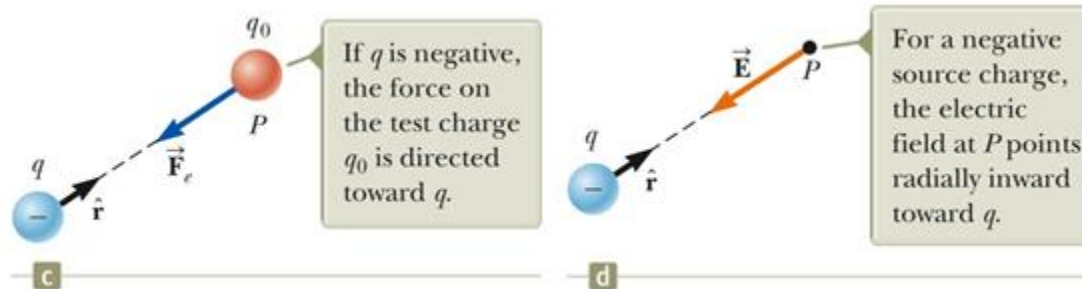
- ถ้าประจุต้นกำเนิดสนามไฟฟ้าเป็นประจุบวก และประจุที่นำมาวางในสนามไฟฟ้าเป็นประจุบวก ทิศของแรงไฟฟ้า  $F$  จะอยู่ในทิศเดียวกันกับทิศของสนามไฟฟ้า  $E$



- ถ้าประจุต้นกำเนิดสนามไฟฟ้าเป็นประจุบวก และประจุที่นำมาวางในสนามไฟฟ้าเป็นประจุลบ ทิศของแรงไฟฟ้า  $F$  จะอยู่ในทิศตรงข้ามกับสนามไฟฟ้า  $E$

# สนามไฟฟ้า

- ถ้าประจุต้นกำเนิดสนามไฟฟ้าเป็นประจุลบ และประจุที่นำมาวางในสนามไฟฟ้าเป็นประจุบวก ทิศของแรงไฟฟ้า  $F$  จะอยู่ในทิศเดียวกันกับทิศของสนามไฟฟ้า  $E$

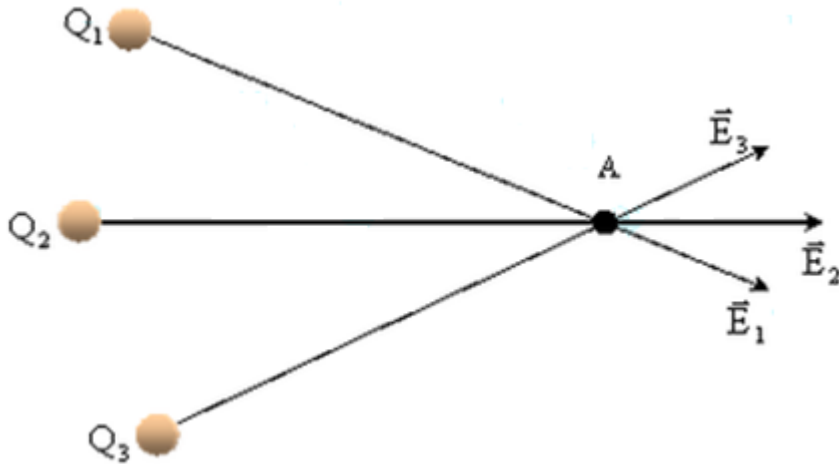


- ถ้าประจุต้นกำเนิดสนามไฟฟ้าเป็นประจุลบ และประจุที่นำมาวางในสนามไฟฟ้าเป็นประจุลบ ทิศของแรงไฟฟ้า  $F$  จะอยู่ในทิศตรงข้ามกับทิศของสนามไฟฟ้า  $E$

**ตัวอย่างที่ 1.3** โปรตอนตัวหนึ่งวางอยู่ในสนามไฟฟ้าขนาด  $2.0 \times 10^4 \text{ N/C}$  ซึ่งมีทิศทางในแนวแกน  $+x$  จงหาแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนโปรตอนตัวนี้

# สนามไฟฟ้า

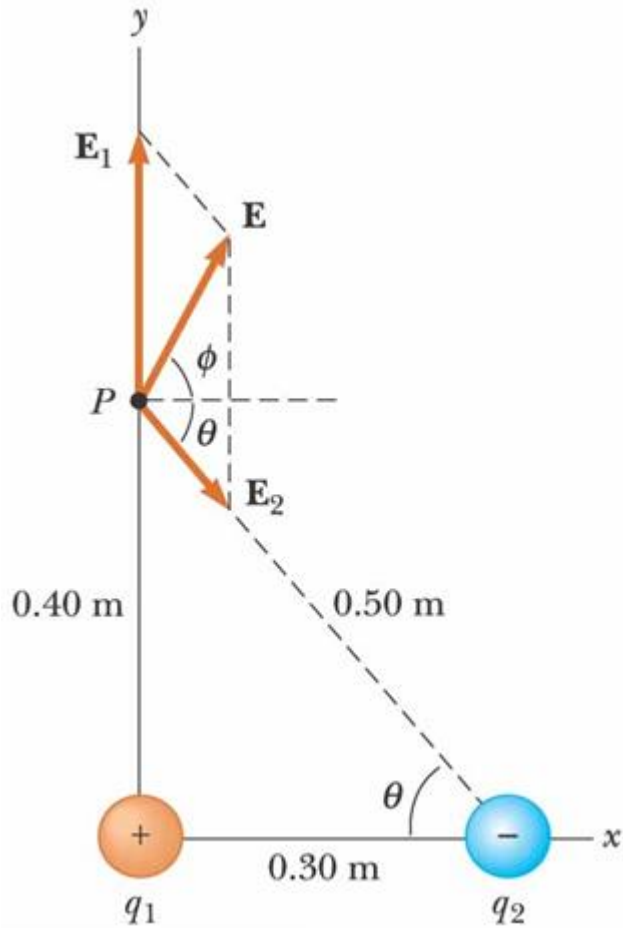
- ถ้ามีประจุต้นกำเนิดมากกว่า 1 ประจุ สนามไฟฟ้ารวมจะสามารถหาได้จากผลรวมแบบเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุต้นกำเนิดแต่ละประจุ



$$\vec{E}_{total} = k_e \sum_i \frac{q_i}{r_i^2} \hat{r}_i$$

$$\vec{E}_{total} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_i$$

**ตัวอย่างที่ 1.4** ประจุ  $q_1$  ขนาด  $7\ \mu\text{C}$  วางอยู่ที่จุดกำเนิดและประจุ  $q_2$  ขนาด  $-5\ \mu\text{C}$  วางอยู่บนแกน  $x$  ห่างจากจุดกำเนิด  $0.3\ \text{m}$  จงหาสนามไฟฟ้าที่จุด  $P$  ซึ่งอยู่ที่ตำแหน่ง  $(0,0.40)$





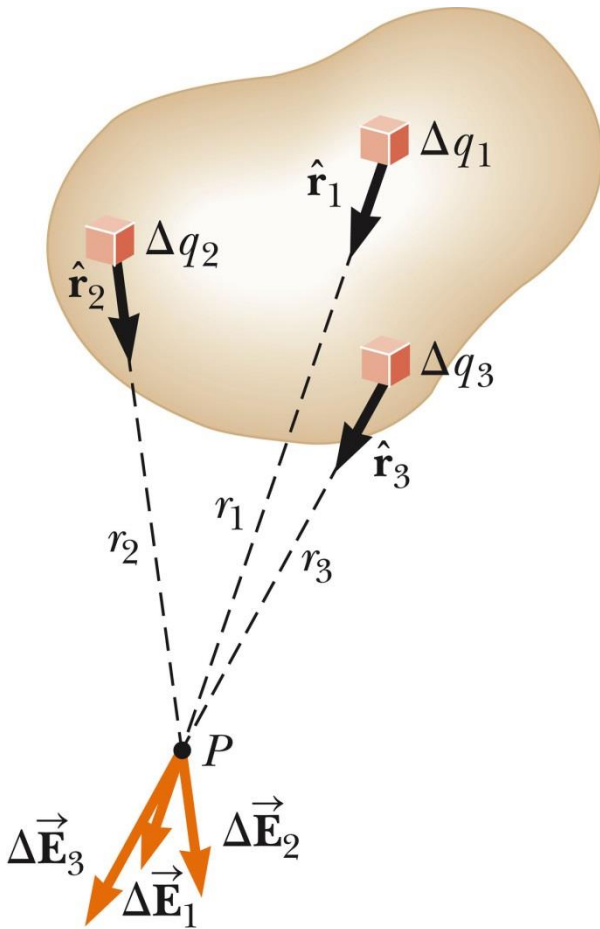
# สนามไฟฟ้าของประจุที่กระจายอย่างสม่ำเสมอ

- สนามไฟฟ้าที่เกิดจากแต่ละส่วนย่อยมีค่าเท่ากับ

$$\Delta \vec{E} = k_e \frac{\Delta q}{r^2} \hat{r}$$

- เนื่องจากประจุมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้น

$$\vec{E} = k_e \lim_{\Delta q_i \rightarrow 0} \sum_i \frac{\Delta q_i}{r_i^2} \hat{r}_i = k_e \int \frac{dq}{r^2} \hat{r}$$



# สนามไฟฟ้าของประจุที่กระจายอย่างสม่ำเสมอ

## ■ ความหนาแน่นประจุ (Charge density)

1. ความหนาแน่นประจุเชิงปริมาตร (Volume charge density;  $\rho$ )

$$\rho = \frac{Q}{V}$$

2. ความหนาแน่นประจุเชิงพื้นที่ผิว (Surface charge density;  $\sigma$ )

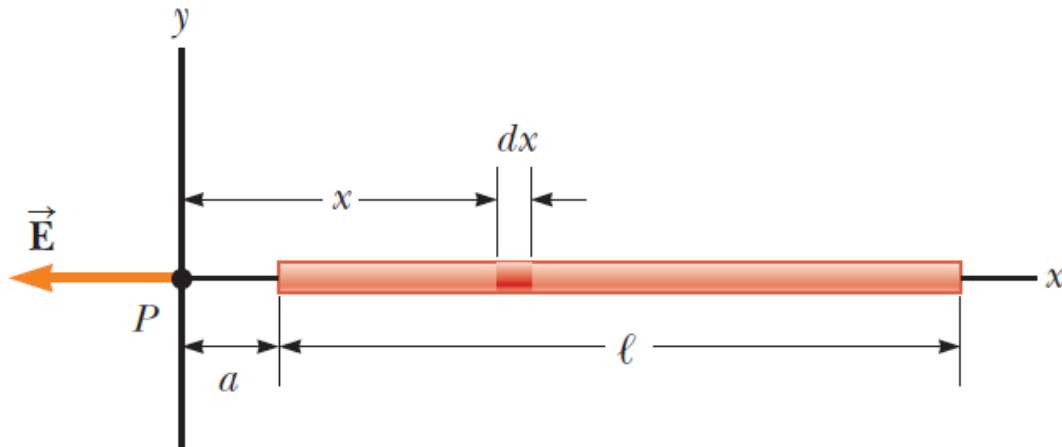
$$\sigma = \frac{Q}{A}$$

3. ความหนาแน่นประจุเชิงเส้น (Linear charge density;  $\lambda$ )

$$\lambda = \frac{Q}{l}$$

# สนามไฟฟ้าของประจุที่กระจายอย่างสม่ำเสมอ

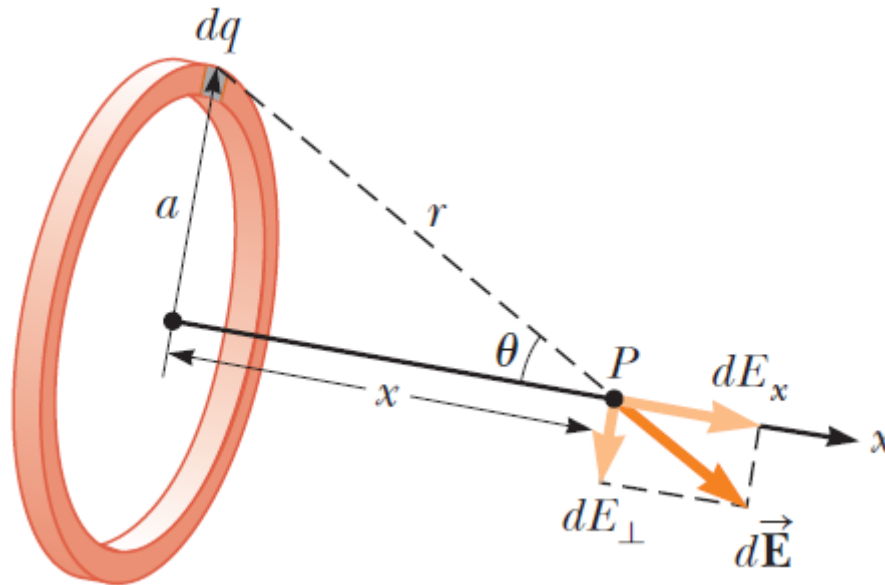
## ■ สนามไฟฟ้าของแท่งประจุ



$$E = \frac{k_e Q}{a(l + a)}$$

# สนามไฟฟ้าของประจุที่กระจายอย่างสม่ำเสมอ

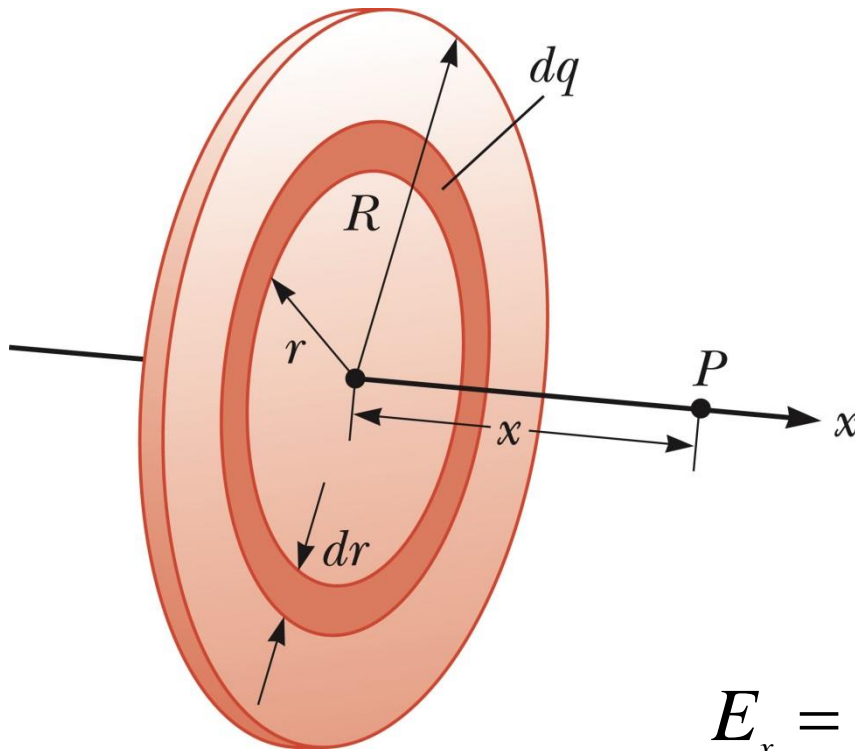
## ■ สนามไฟฟ้าของวงแหวนประจุ



$$E = \frac{k_e x}{(a^2 + x^2)^{3/2}} Q$$

# สนามไฟฟ้าของประจุที่กระจายอย่างสม่ำเสมอ

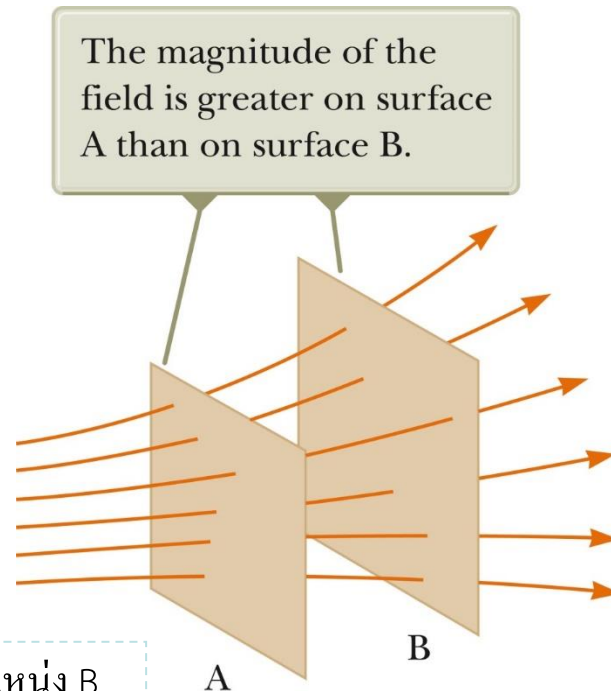
## ■ สนามไฟฟ้าของจานประจุ



$$E_x = 2\pi k_e \sigma \left[ 1 - \frac{x}{(R^2 + x^2)^{1/2}} \right]$$

# เส้นแรงไฟฟ้า

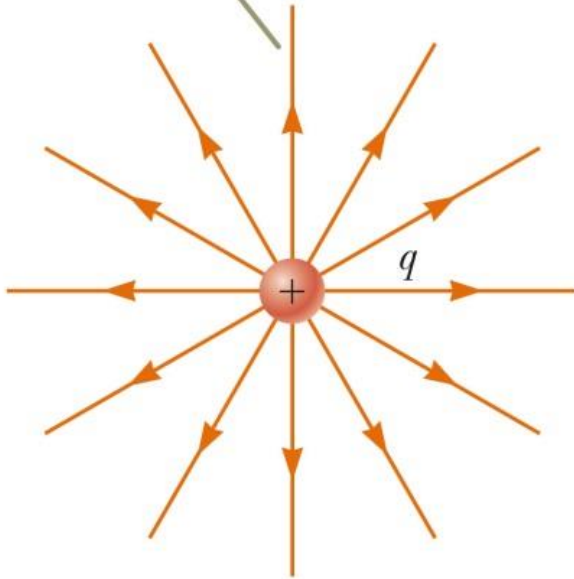
- เส้นแรงไฟฟ้า (Electric Field Line) คือ เส้นที่ลากขึ้นเพื่อแสดงทิศทางของสนามไฟฟ้าที่จุดนั้น (ของประจุทดสอบ  $+1\text{C}$ )
- จำนวนเส้นแรงที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดจะแปรผันตรงกับความเข้มของสนามไฟฟ้า (จำนวนเส้นแรงที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดมาก สนามไฟฟ้าก็จะมีค่ามาก)



ความเข้มของสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่ง A มีค่ามากกว่าที่ตำแหน่ง B

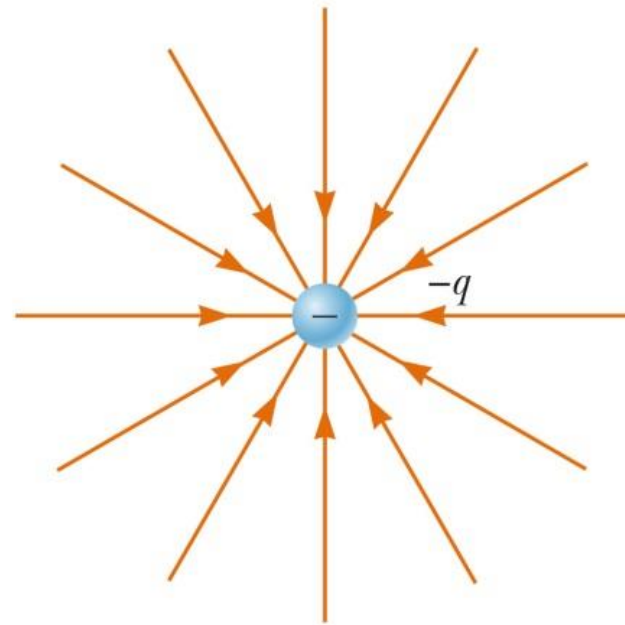
# เส้นแรงไฟฟ้า

For a positive point charge, the field lines are directed radially outward.



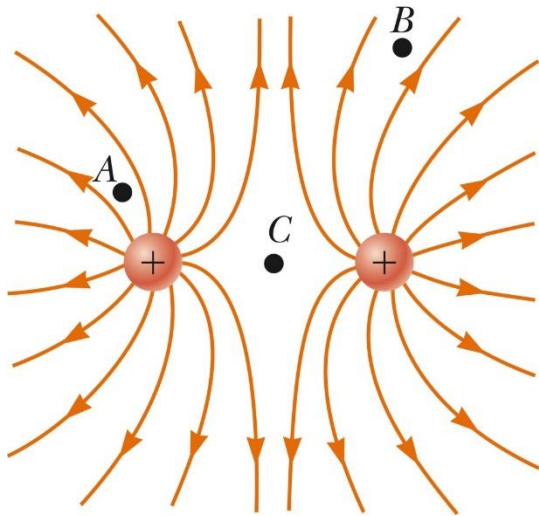
a

ประจุบวกพุ่งออก

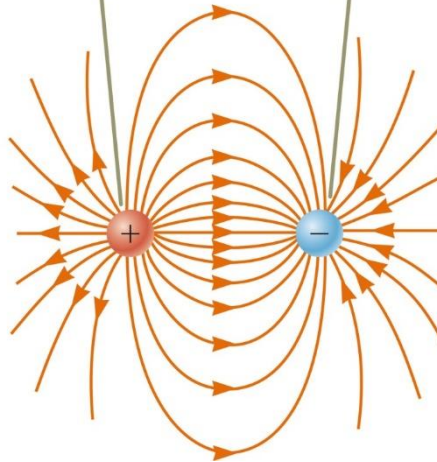


ประจุลบพุ่งเข้า

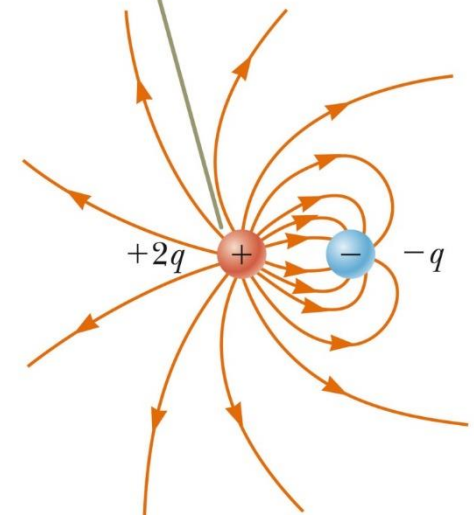
# เส้นแรงไฟฟ้า



The number of field lines leaving the positive charge equals the number terminating at the negative charge.



Two field lines leave  $+2q$  for every one that terminates on  $-q$ .



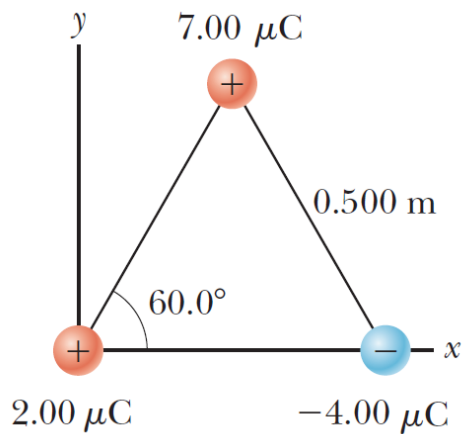
- (ซ้าย) เส้นแรงที่เกิดจากประจุชนิดเดียวกันที่มีขนาดเท่ากัน
- จุด c คือจุดที่สนามไฟฟ้ามีการหักล้างกันเรียกว่าจุดสะเทิน
- (กลาง) เส้นแรงที่เกิดจากประจุตรงข้ามที่มีขนาดเท่ากัน
- เส้นแรงไฟฟ้าจะไม่ตัดผ่านกัน
- (ขวา) ขนาดของประจุมีผลต่อจำนวนเส้นแรงไฟฟ้า



# การบ้านครั้งที่ 1

**ข้อที่ 1** โพรตอน 2 ตัวอยู่ห่างกันเป็นระยะทาง  $3.8 \times 10^{-10}$  m จงหาขนาดของแรงไฟฟ้าที่โปรตอนตัวหนึ่งกระทำต่อโปรตอนอีกตัวหนึ่ง

**ข้อที่ 2** อนุภาคมีประจุ 3 ตัวตั้งอยู่ที่ตำแหน่งมุมของสามเหลี่ยมแต่ละด้านดังรูป จงหาแรงไฟฟ้าสุทธิที่กระทำต่อประจุขนาด  $7 \mu\text{C}$  (กำหนดให้  $\sin 60^\circ = 0.866$  และ  $\cos 60^\circ = 0.5$ )



**ข้อที่ 3** อนุภาคมีประจุ 3 ตัวตั้งอยู่ที่ตำแหน่งมุมของสามเหลี่ยมแต่ละด้านดังรูป จงหาสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งของประจุขนาด  $7 \mu\text{C}$  และ  $4 \mu\text{C}$  (กำหนดให้  $\sin 60^\circ = 0.866$  และ  $\cos 60^\circ = 0.5$ )

**ข้อที่ 4** แท่งประจุมยาว  $14 \text{ cm}$  มีประจุขนาด  $-22 \mu\text{C}$  กระจายตัวอยู่ภายในอย่างสม่ำเสมอ ดังรูป จงหาขนาดและทิศทางของสนามไฟฟ้า ณ จุดที่อยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของแท่งประจุดังกล่าวตามแนวแกนเป็นระยะทาง  $36 \text{ cm}$

