

# Ley de Coulomb

Prof. Gustavo Forte

# Existen cuatro fuerzas fundamentales

**Fuerza gravitatoria:** actúa entre cuerpos debido a sus masas, tiene alcance infinito

**Fuerza débil:** actúa entre partículas a distancias más cortas que el núcleo atómico

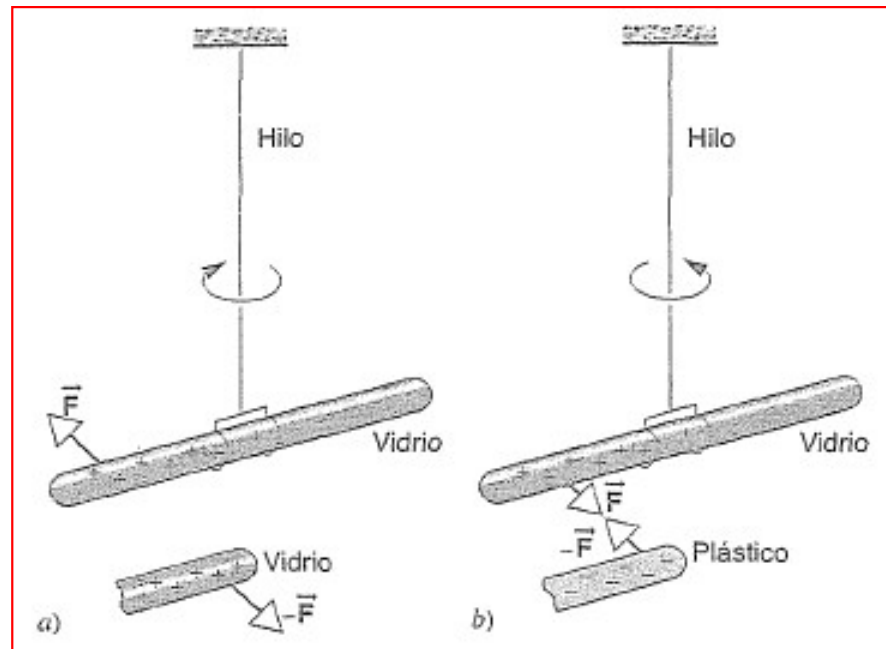
**Fuerza fuerte:** actúa entre partículas a distancias del orden del núcleo atómico, causante del enlace dentro del núcleo (de su estabilidad)



**Fuerza electromagnética:** actúa entre cuerpos debido a sus cargas eléctricas, tiene alcance infinito

# La carga eléctrica

Hay evidencia experimental de atracciones y repulsiones entre cuerpos macroscópicos luego de haber sido frotados cada uno de ellos por separado:



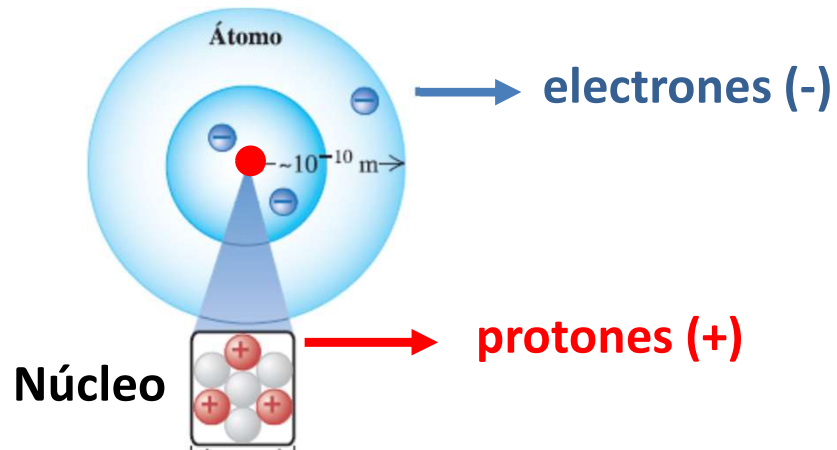
Parece razonable concluir:

1. La materia es electricamente neutra.
2. Por efecto de la fricción, una entidad física es transferida desde un objeto a otro, **la carga eléctrica**.
3. Existen dos tipos de carga eléctrica: **positiva y negativa**. Las cargas del mismo signo se repelen y las de signo opuesto se atraen.

# Propiedades de la carga eléctrica

- La carga eléctrica existe solo en 2 “variedades”: **positiva** y **negativa**

Ej.: átomo de litio



Átomo de cualquier elemento:  
 $N^\circ \text{ de } e^- = N^\circ \text{ de } p^+$   
**Materia eléctricamente neutra**

- Se representa con el símbolo **q**. Es una **cantidad escalar**
- La **unidad** de carga eléctrica es el coulomb (**C**)

## Propiedades de la carga eléctrica

- La carga eléctrica está **cuantizada**:  $q = ne \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

$$\underbrace{e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}}$$

**Carga elemental**, constante fundamental de la naturaleza

Carga del **electrón** =  $-1e = -1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$

Carga del **protón** =  $+1e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$

Carga del **núcleo atómico** =  $+Ze$ ,  $Z$ : número atómico

Carga **electrónica del átomo** =  $-Ze$

- El coulomb es una unidad muy grande de carga -> se necesitan unos  $6 \times 10^{18}$  electrones para obtener -1 coulomb
- La carga eléctrica **se conserva** en un sistema aislado:  $\sum q = \text{constante}$

# Materiales: Conductores y aislantes

Si bien las cargas eléctricas pueden existir en forma aislada, los fenómenos eléctricos se manifiestan entre cuerpos cargados

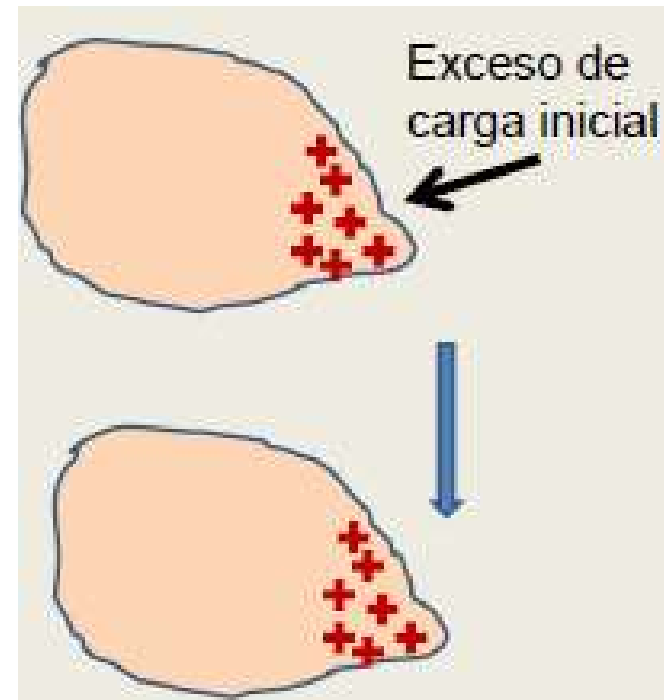
Cuerpo cargado = exceso de carga { **positiva**: menor N° de electrones  
**negativa**: mayor N° de electrones

## Conductores



Metales

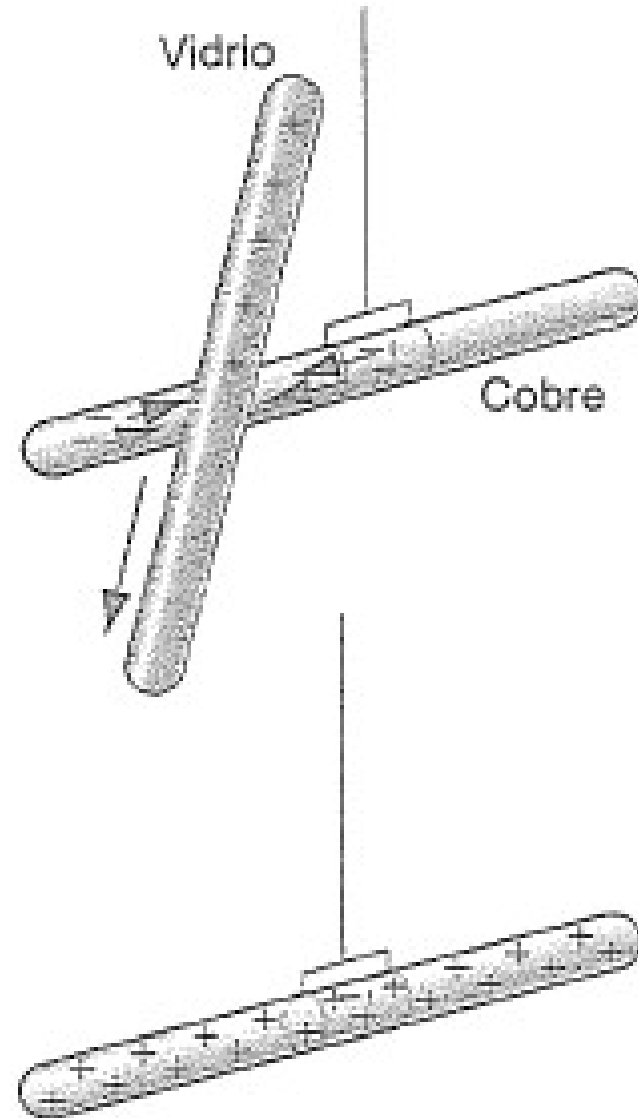
## Aislantes o dieléctricos



Vidrios, plásticos

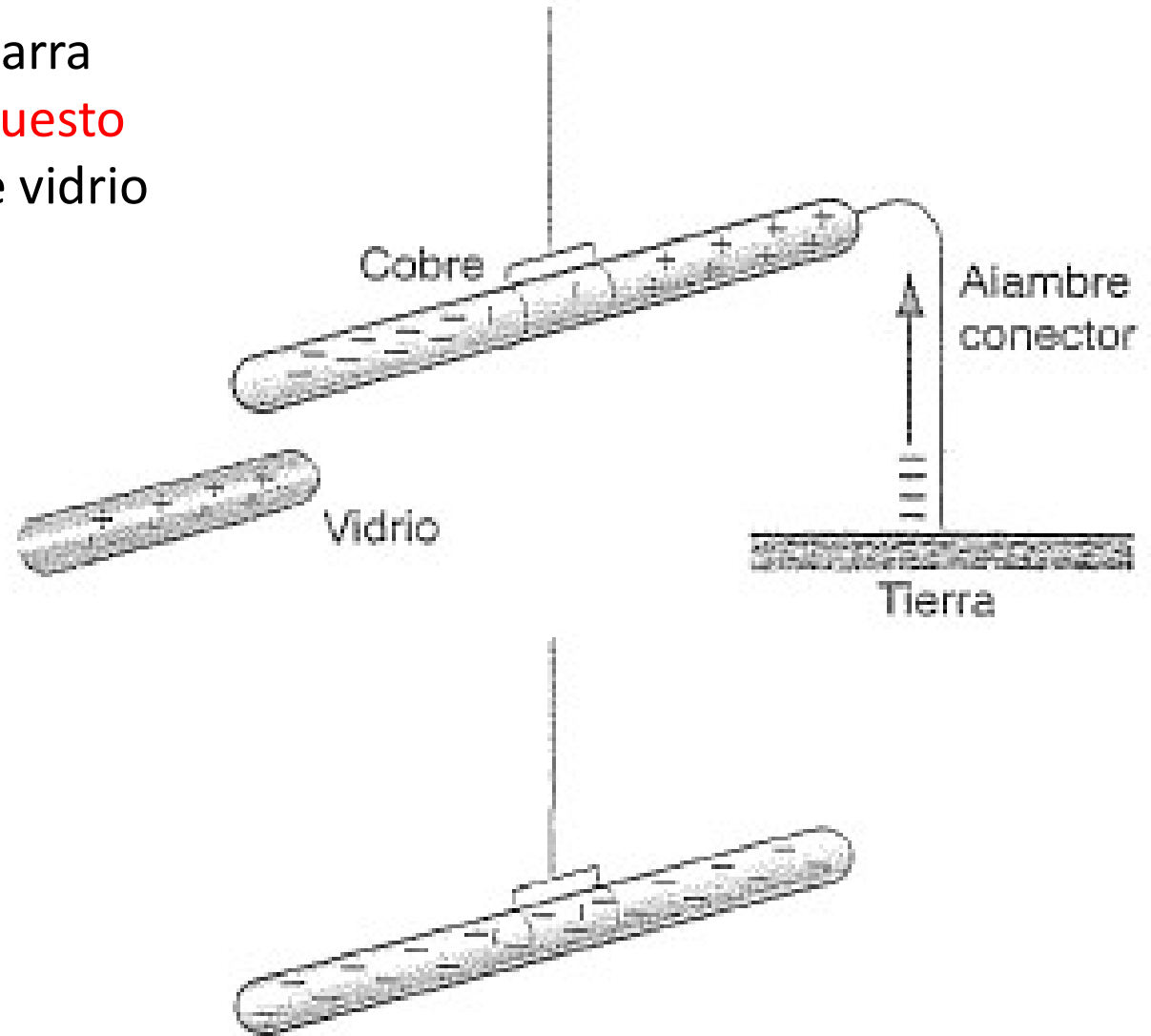
## Carga por contacto

La carga que adquiere la barra conductora tiene el **mismo signo** que la carga de la barra de vidrio



# Carga por inducción

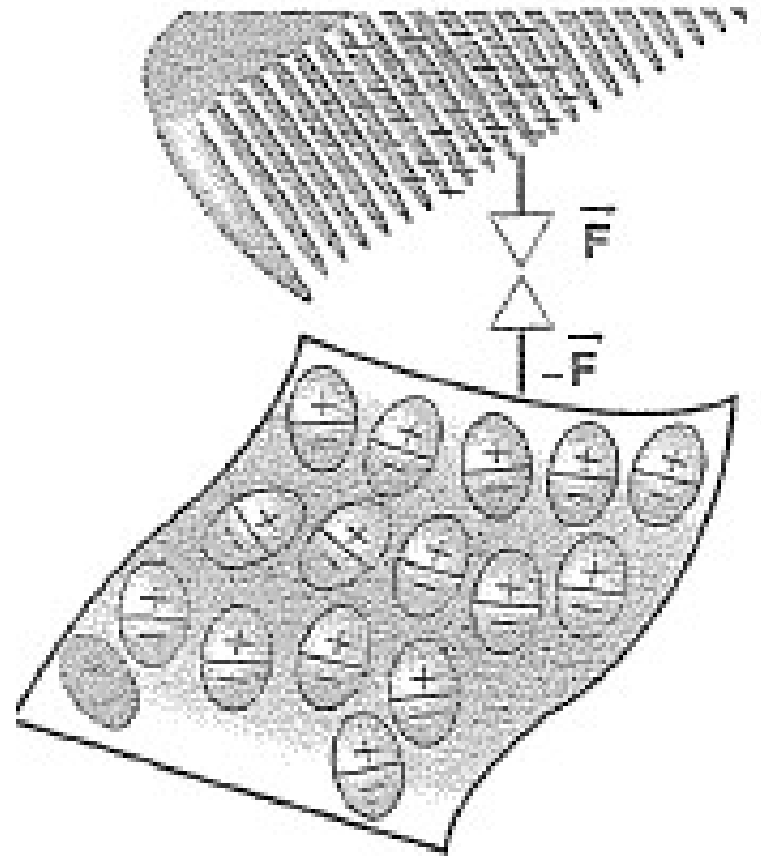
La carga que adquiere la barra conductora tiene **signo opuesto** que la carga de la barra de vidrio





# Polarización por inducción

Las cargas positivas y negativas de las moléculas del material aislante (papel) son desplazadas por inducción (polarización molecular), dando como resultado una fuerza de atracción neta



# La fuerza eléctrica: ley de Coulomb

¿Cómo se cuantifican las interacciones entre cargas eléctricas?



En 1785, **Charles Agustin de Coulomb** realizó cuidadosos experimentos para investigar las relaciones cuantitativas de las interacciones de atracción y repulsión de cargas eléctricas

Para estudiar la dependencia de estas interacciones con distintos parámetros, tomó la hipótesis de trabajar con **esferas muy pequeñas cargadas**, de modo que la **“distribución de cargas”** tuviese un **volumen “infinitesimal”** comparado con cualquier dimensión típica del experimento, es decir **“cargas puntuales”**.

Instrumento: balanza de torsión

Parámetros a medir: dirección y sentido de la fuerza eléctrica ( $F_e$ ), dependencia con la distancia que las separa y con el valor de las cargas

Tenemos en cuenta sólo las cargas que se encuentran en reposo unas respecto a otras → **electrostática**

# La fuerza eléctrica: ley de Coulomb



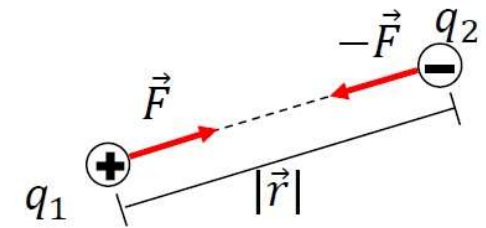
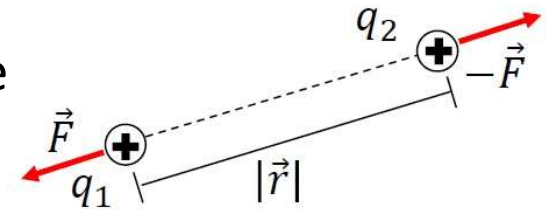
Resultados del experimento:

i) La dirección de la fuerza entre dos cargas está **sobre la recta que une ambas cargas**

ii) La fuerza es **atractiva** si las cargas tienen **signo opuesto** y **repulsiva** si tienen **mismo signo**

iii) El **módulo** de la fuerza es **proporcional al producto de las cargas**

iv) El **módulo** de la fuerza es **inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre las cargas**



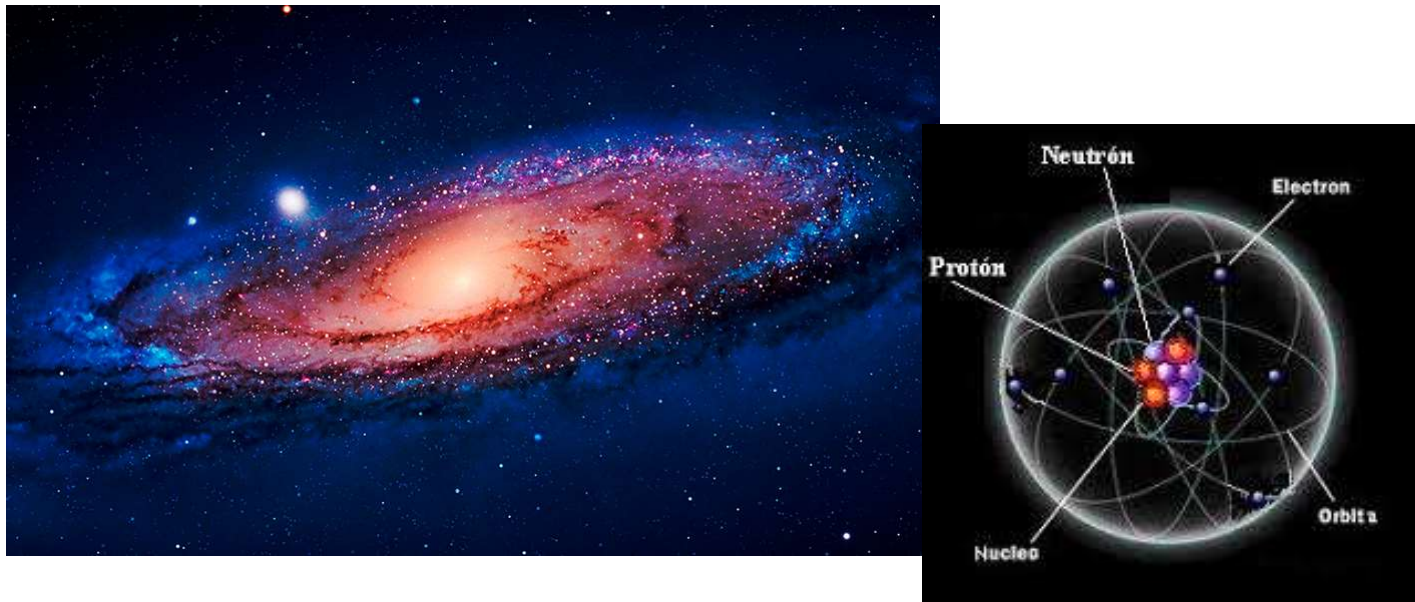
$$|F_e| = k |q_1| |q_2| \frac{1}{r^2}$$

$$k = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$$

En el SI:  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ ,  $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$ : permitividad eléctrica del vacío

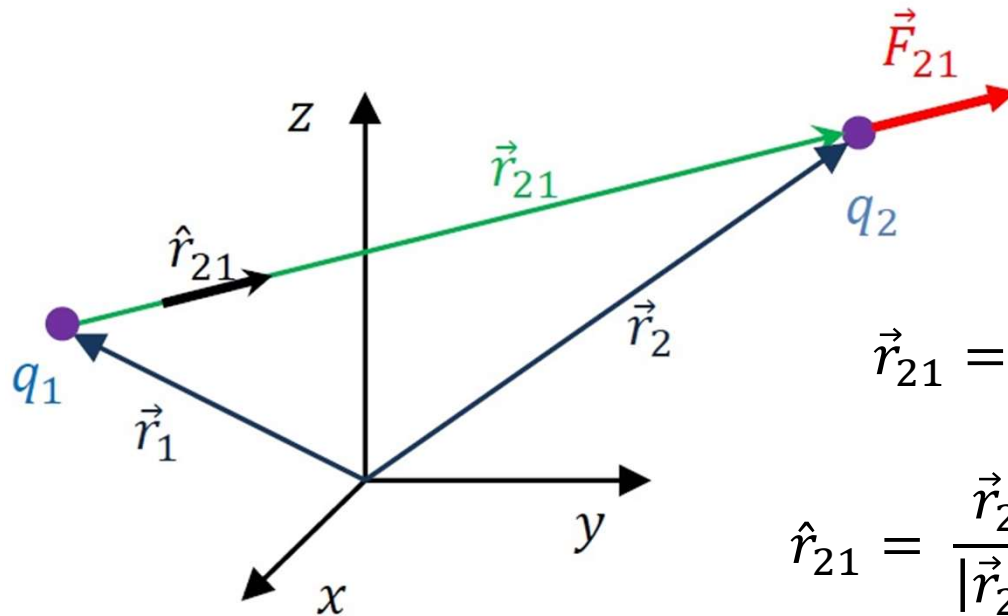
# Fuerza eléctrica vs. Fuerza gravitacional

- $F_G$  es siempre atractiva, puede acumular masas muy grandes (estrellas, galaxias) y dar lugar a importantes fuerzas gravitacionales
- $F_E$  puede ser repulsiva (entre cargas del mismo signo), es imposible acumular cargas muy grandes del mismo signo.
- $F_E$  puede ser atractiva, al ser muy intensa es posible formar la materia a nivel atómico. Para la interacción  $e^- - p^+$  del átomo de hidrógeno,  $F_G / F_E \sim 10^{-39}$



## Ley de Coulomb: forma vectorial

$q_1$  y  $q_2$  : cargas puntuales estáticas con vectores posición  $\vec{r}_1$  y  $\vec{r}_2$



$\vec{F}_{21}$  : Fuerza que experimenta  $q_2$  debido a la presencia de  $q_1$

$\vec{r}_{21} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$  : vector distancia entre  $q_1$  y  $q_2$

$\hat{r}_{21} = \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|}$  : versor en la dirección  $q_1 \rightarrow q_2$

$$\vec{F}_{21} = k \frac{q_1 q_2}{|\vec{r}_{21}|^2} \hat{r}_{21}$$

## Ley de Coulomb: forma vectorial

$$\vec{F}_{21} = k \frac{q_1 q_2}{|\vec{r}_{21}|^2} \hat{r}_{21}$$

Las cargas deben escribirse con el signo que les corresponda

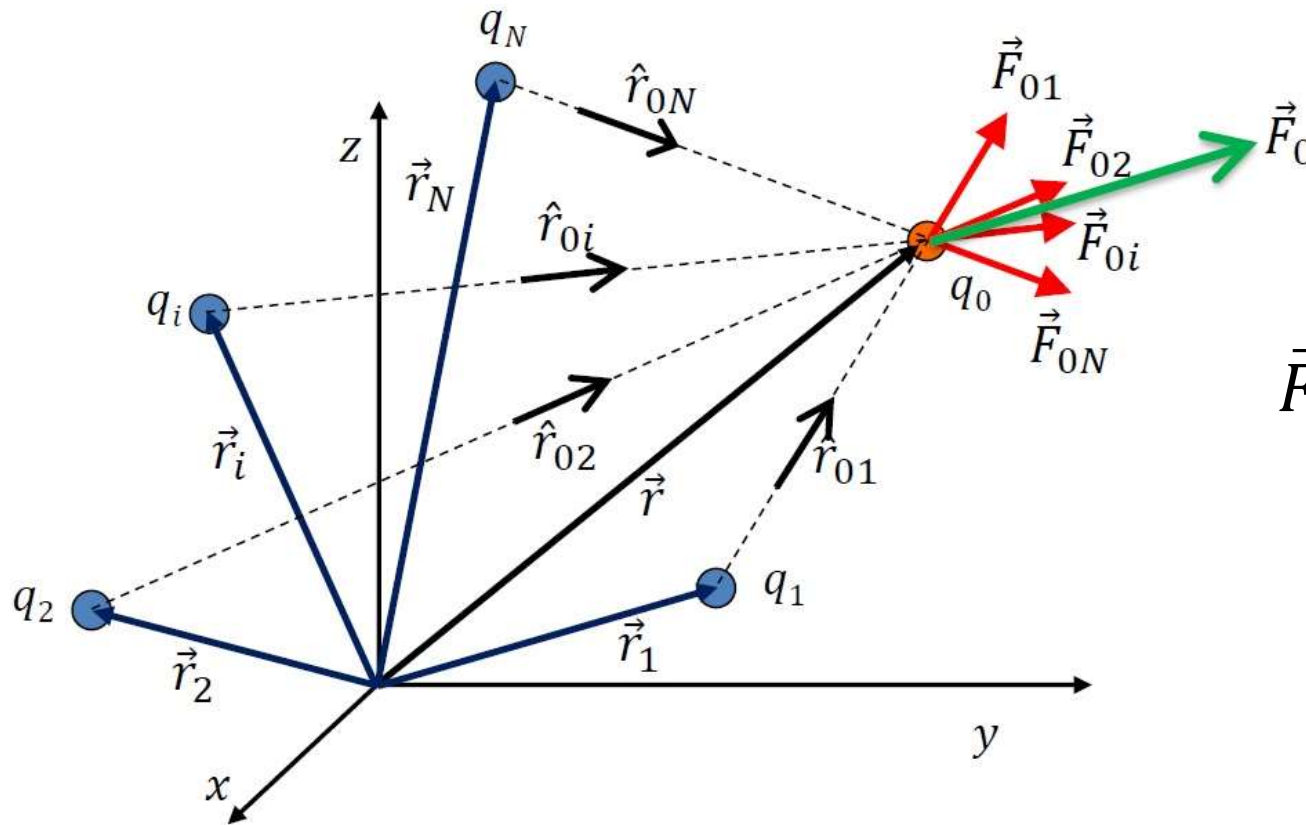
**ambas positivas** →  $\vec{F}_{21}$  apunta en sentido de  $\vec{r}_{21}$  → **repulsiva**

**ambas negativas** →  $\vec{F}_{21}$  apunta en sentido de  $\vec{r}_{21}$  → **repulsiva**

**positiva-negativa** →  $\vec{F}_{21}$  apunta en sentido de  $(-\vec{r}_{21})$  → **atractiva**

Es fácil demostrar que  $\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}$

## Ley de Coulomb para sistema de cargas puntuales



$$\vec{F}_0 = k \sum_{i=1}^N \frac{q_0 q_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^2} \hat{r}_{0i}$$

**Principio de superposición:** la fuerza que actúa sobre una carga debido a otra no depende de la presencia de otras cargas; puede calcularse por separado en cada par de cargas y luego sumar vectorialmente para encontrar la fuerza neta sobre cualquiera de ellas. Puede no cumplirse tratándose de fuerzas eléctricas muy intensas.

# Ley de Coulomb para distribución continua de cargas

La ley de Coulomb se aplica sólo a cargas puntuales. Cómo hago para calcular la fuerza que una varilla cargada hace sobre otra? Para una carga total de 1nC hay  $10^{10}$  cargas puntuales en cada varilla!!



1. Suponemos la distribución de carga continua, formada por diferenciales de carga  $dq$
2. Si las cargas se distribuyen en
  - una línea:  $dq = \lambda dx$ ,  $\lambda$ : densidad lineal de carga,  $[\lambda] = \text{C/m}$
  - una superficie:  $dq = \sigma dA$ ,  $\sigma$ : densidad superficial de carga,  $[\sigma] = \text{C/m}^2$
  - un volumen:  $dq = \rho dV$ ,  $\rho$ : densidad volumétrica de carga,  $[\rho] = \text{C/m}^3$
3. Se trata la carga  $dq$  como una carga puntual

$$d\vec{F} = k \frac{dq q_0}{r^2} \hat{r}$$

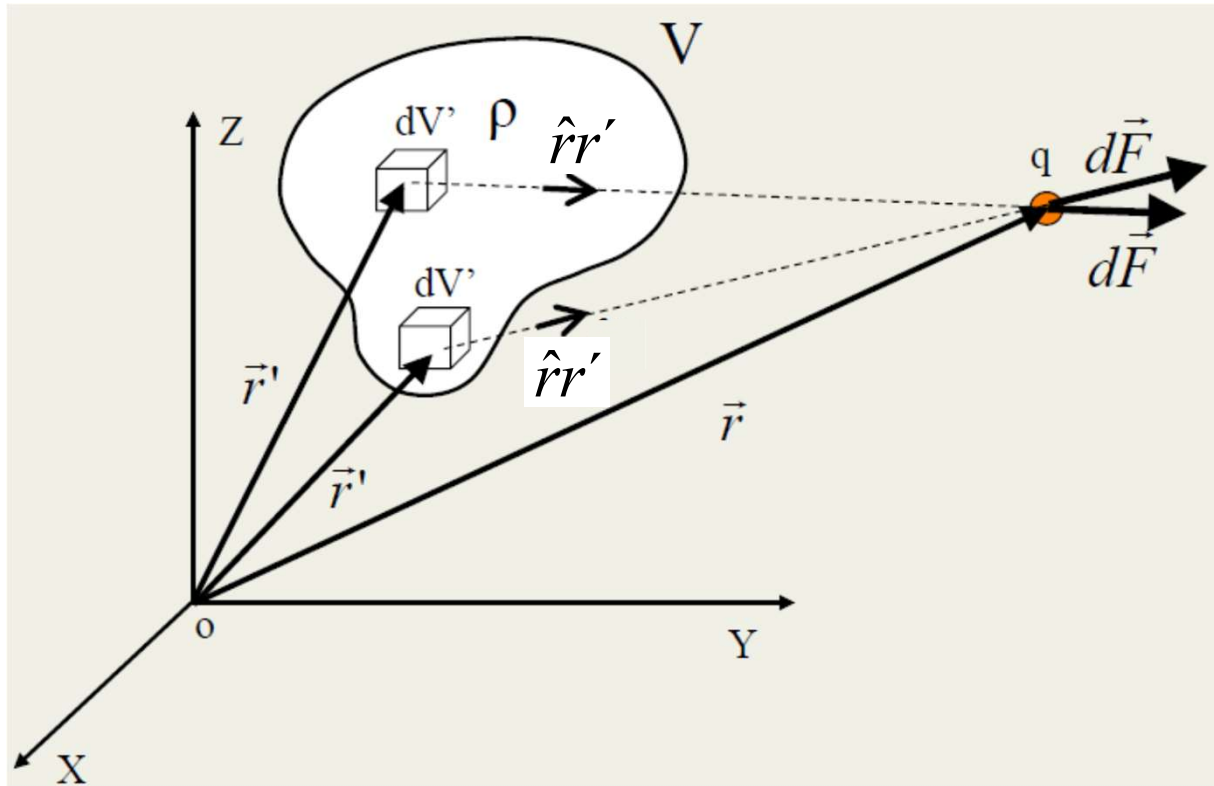
4. Se calcula la fuerza total sumando todas sus contribuciones infinitesimales

$$\vec{F} = \int d\vec{F}$$



# Ley de Coulomb para distribución continua de cargas

Por ejemplo para una distribución volumétrica de carga  $\rho(\vec{r}')$



$$dq = \rho(\vec{r}') dV'$$
$$d\vec{F} = k \frac{q dq}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2} \hat{r}r'$$
$$\vec{F} = \iiint_V kq \frac{\rho(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2} dV' \hat{r}r'$$

Aprovechando la simetría de la distribución de carga la integral se puede expresar de una forma más simple