



## Carga elétrica

A matéria comum, que estamos acostumados a tratar, é formada por partículas. Átomos, moléculas e estruturas mais sofisticadas são conglomerados – estados ligados, de certas ‘cargas’ elementares. Na Mecânica, a propriedade mais significativa de uma partícula é sua massa, a qual determina sua aceleração quando sujeita a uma força. No Eletromagnetismo há uma outra propriedade significativa: a carga elétrica.

Existem dois tipos de cargas elétricas: positivas e negativas.

A matéria comum é eletricamente neutra. Cada átomo contém um núcleo positivamente carregado e um número de elétrons, negativamente carregados, tal que a carga total é zero. Para estudarmos as cargas elétricas, precisamos separar as positivas das negativas. Uma forma seria, por exemplo, realizar experiências com atrito.

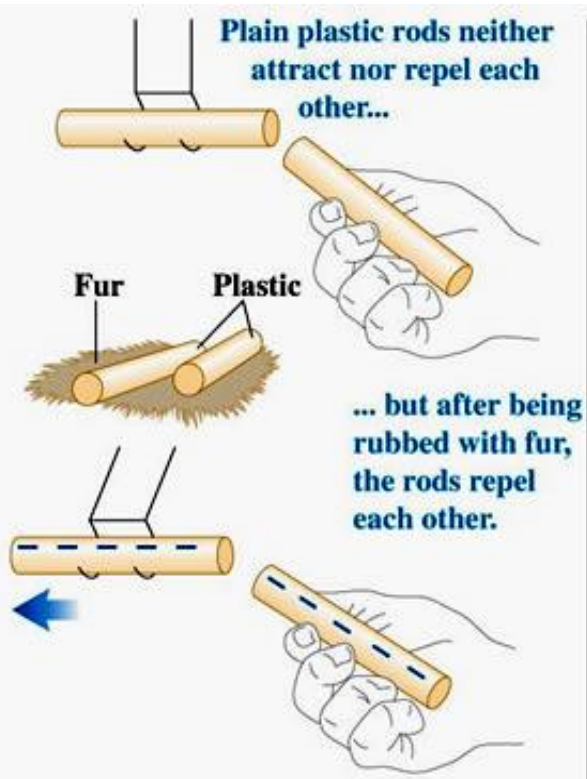
Em qualquer destas experiências, verificamos que a carga elétrica não é criada nem destruída, é somente transferida de um lugar para outro.

Destacamos este fato enunciando a *lei de conservação da carga elétrica*:

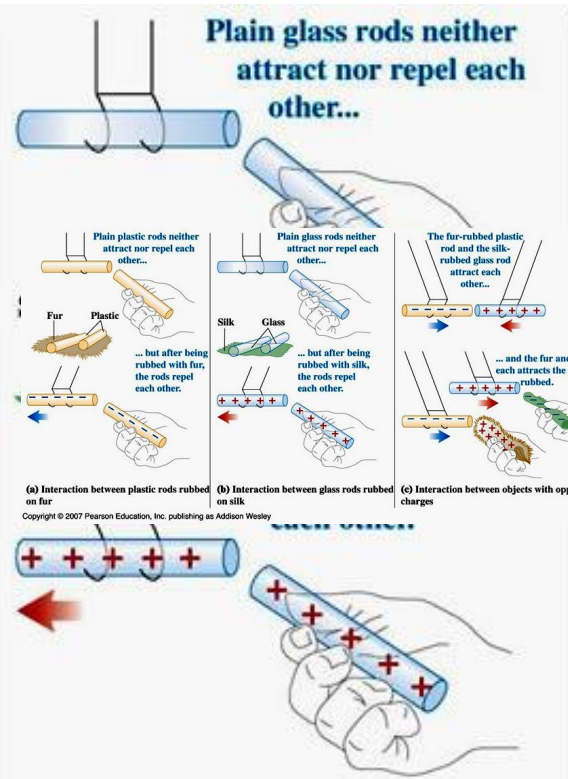
—→ A carga elétrica pode ser transportada, mas não pode ser criada ou destruída.  
A soma algébrica de todas as cargas elétricas de um sistema isolado sempre  
Permanece constante

Plástico atritado em lâ

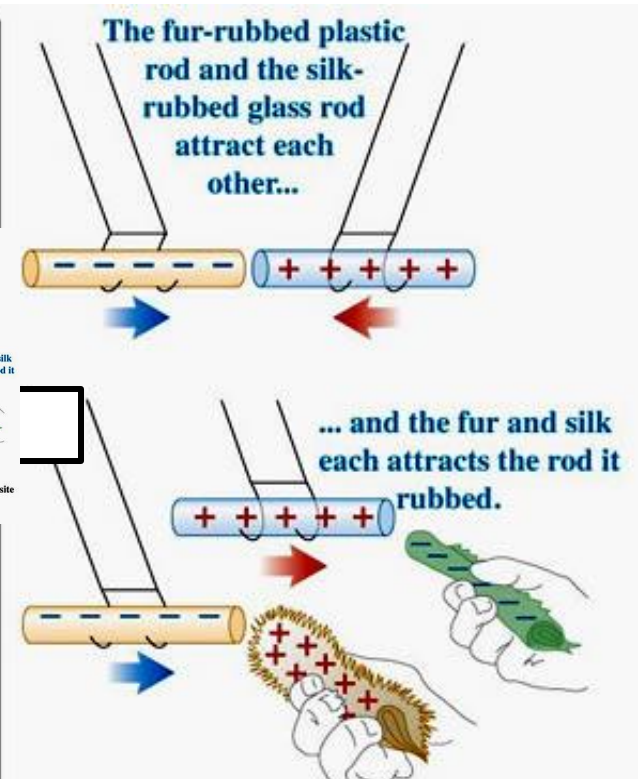
Vidro atritado em seda



(a) Interaction between plastic rods rubbed on fur



(b) Interaction between glass rods rubbed on silk



(c) Interaction between objects with opposite charges



# IF – 430270– Eletricidade e Magnetismo I

---

## Carga elétrica

A unidade SI de carga é o coulomb( $C$ ). A carga de um elétron é  $-e$ , onde  $e = 1,602 \times 10^{-19} C$

e a carga do próton é  $+e$ . Desconsiderando, para efeitos práticos neste curso, que os prótons possam ser formados por partículas (quarks) com carga menor que  $e$ , concluímos que a carga é quantizada: a carga em qualquer objeto é o produto de um número inteiro  $N$  vezes  $e$ .

## Exemplo

→ Uma moeda de níquel tem massa de 5,9 g. (a) Calcule a quantidade total de elétrons na moeda e a carga nele contida.

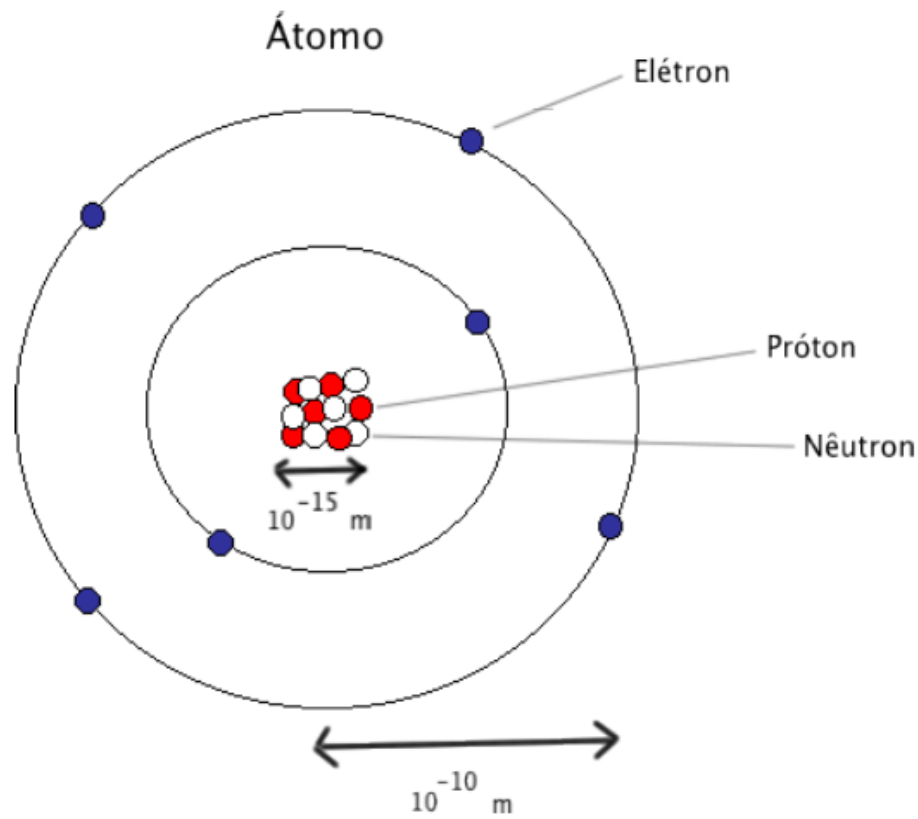
(a) Cada mol ( $6,02 \times 10^{23}$ ) tem massa de 58,7 g.

Portanto, o número de átomos na moeda é:

$$n_a = \frac{5,9}{58,7} \cdot (6,02 \times 10^{23}) = 6,05 \times 10^{22}$$

Cada átomo tem 28 elétrons, portanto  $n_e = 28 \cdot 6,05 \times 10^{22} = 1,69 \times 10^{24}$

$$q = -1,60 \times 10^{-19} C \cdot 1,60 \times 10^{24} = -2,7 \times 10^5 C$$



$$m_e = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg e } q_e \equiv -e = -1,6 \times 10^{-19} \text{ C};$$

$$m_p = 1,673 \times 10^{-27} \text{ kg e } q_p \equiv e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C};$$

$$m_n = 1,675 \times 10^{-27} \text{ kg e } q_n = 0.$$

Em um átomo neutro o número de elétrons é igual ao número de prótons no núcleo, de maneira que a carga elétrica total é zero. Quando um ou mais elétrons são removidos do átomo, este se torna *positivamente ionizado* e passa a ter carga líquida positiva. Quando o átomo ganha um ou mais elétrons ele se torna *negativamente ionizado* e passa a ter carga líquida negativa.

Em geral, os elétrons nos corpos macroscópicos têm mais mobilidade que os prótons e são eles que são adicionados ou removidos durante o atrito.

Os materiais podem ser divididos em três categorias, dependendo da facilidade com que carga elétrica (isto é, elétrons) pode passar através deles. Essas três categorias são:

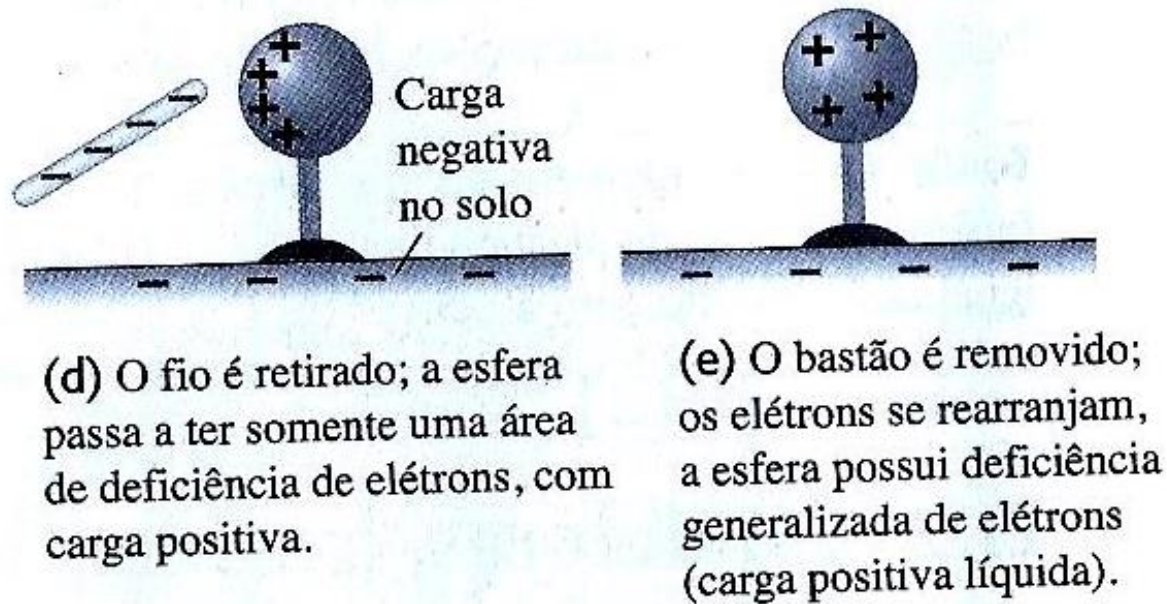
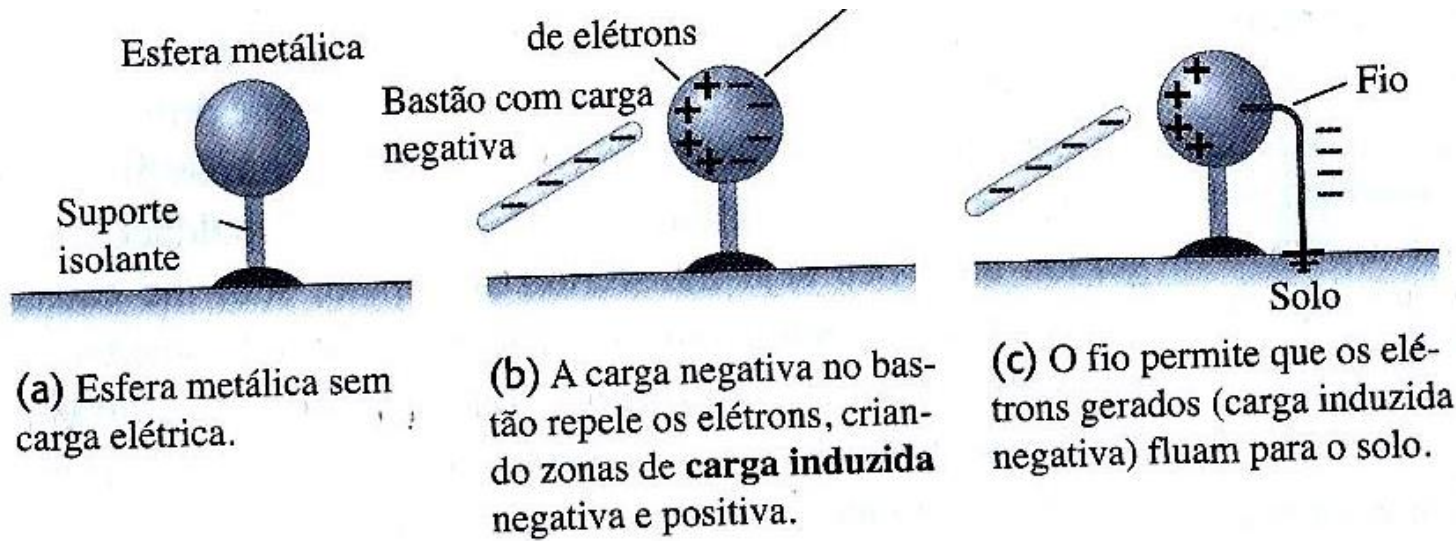
- Condutores: metais (cobre, alumínio, prata, etc), por exemplo;
- Isolantes: borracha, madeira, plástico, por exemplo;
- Semicondutores: silício, germânio, por exemplo.

Existem três maneiras de se fazer um objeto adquirir carga elétrica líquida não nula:

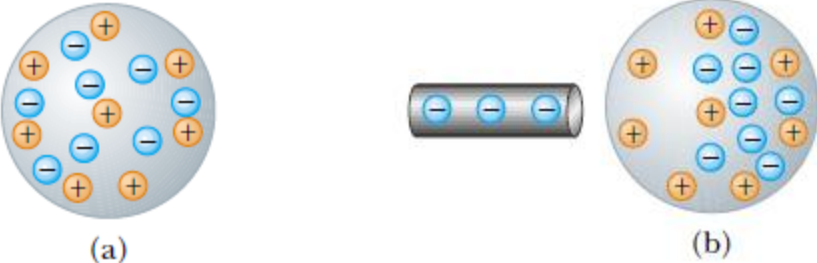
1. Carregamento por atrito: este é o método descrito acima, em que dois objetos são friccionados um contra o outro. O carregamento ocorre porque ocorre transferência de elétrons de um material para outro. Este é um método bom para se carregar materiais isolantes.
2. Carregamento por condução: Quando um objeto carregado toca um condutor, carga se desloca do objeto para o condutor deixando o condutor com carga líquida de mesmo sinal que a carga do objeto (veja a figura 21.6 do livro-texto). Este é um método bom para se carregar metais e outros condutores

3. Carregamento por indução: Quando se aproxima um objeto carregado de um condutor, mas sem tocá-lo, e o condutor está aterrado (o que se chama de terra é basicamente qualquer corpo neutro que possa receber ou dar elétrons para o condutor), elétrons irão se deslocar do condutor para a terra ou da terra para o condutor. Após a retirada da conexão do condutor com a terra, o condutor ficará com carga líquida de sinal contrário à do objeto carregado (veja a figura 21.7 do livro-texto). Este também é um método bom para se carregar metais e outros condutores.

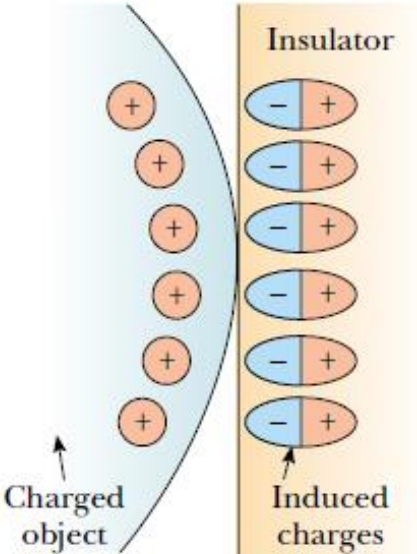




# Carga Induzida em condutores



# Carga Induzida em isolantes



(a)



(b)



## Forças entre cargas

Embora um corpo macroscópico possa conter uma quantidade enorme de carga elétrica, podemos, em certas circunstâncias, considerá-lo suficientemente pequeno para ser tratado como um corpo puntiforme. Usaremos esta aproximação muitas vezes neste curso.

A lei de Coulomb, por exemplo, aplica-se a duas cargas contidas em dois corpos puntiformes.

## Lei de Coulomb

- Cargas de mesmo sinal se repelem, enquanto que cargas de sinal oposto se atraem.  
→ A força entre cargas puntiformes é proporcional ao produto de suas cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas.

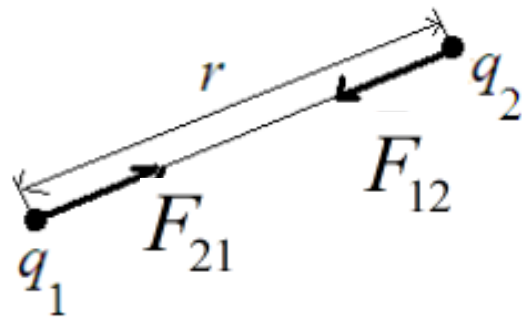
$$\vec{F}_{ij} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}_{ij} = -\vec{F}_{ji}, \quad (\text{Veja figura})$$

onde a constante de proporcionalidade, a constante de Coulomb é:  $k = 8,99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$

A constante  $k$  é frequentemente expressa em termos de outra quantidade:

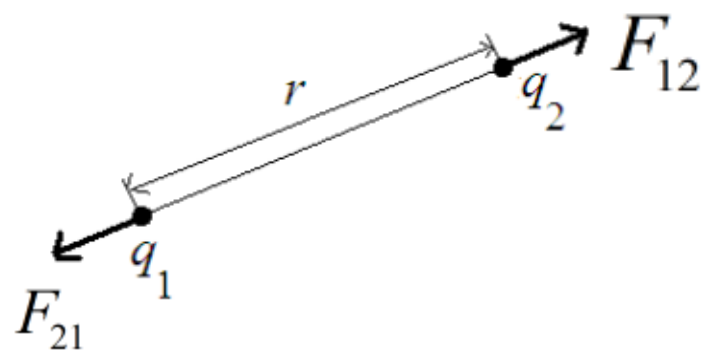
$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad \text{onde} \quad \epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N} \cdot \text{m}^2$$

$$\vec{F}_{ij} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}_{ij} = -\vec{F}_{ji},$$



(a)

$q_1$  e  $q_2$  de sinais opostos

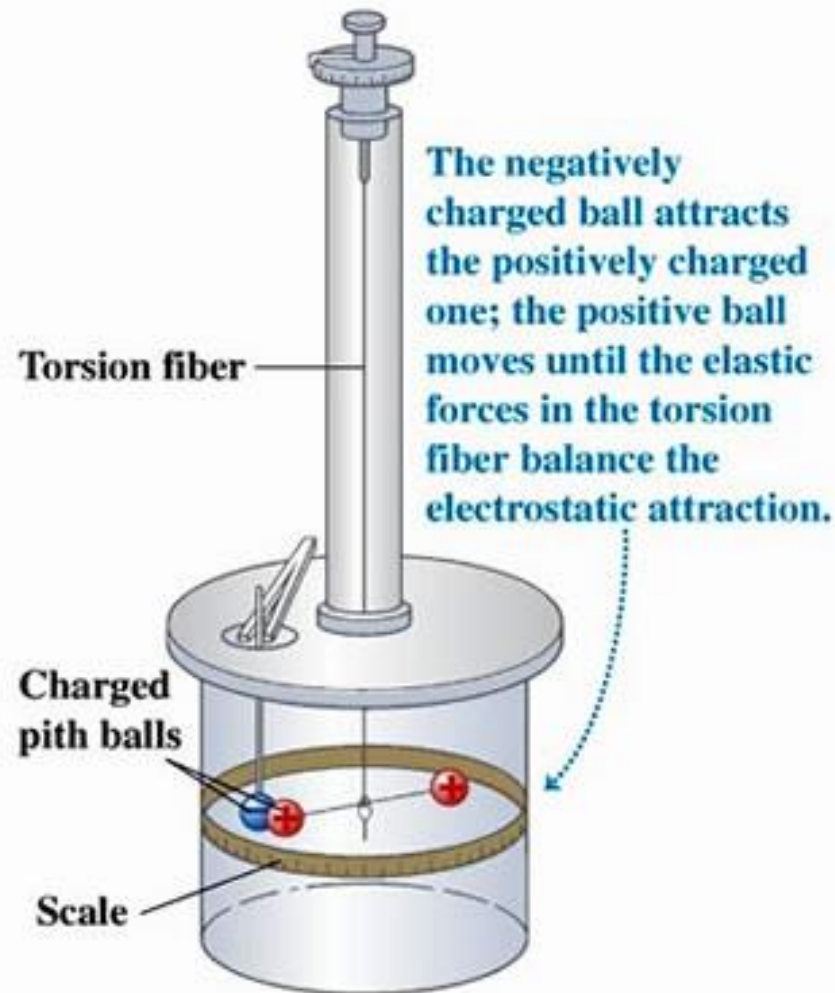


(b)

$q_1$  e  $q_2$  de mesmo sinal

onde  $\vec{F}_{ij}$  é a força que a partícula  $i$  exerce sobre a partícula  $j$ ,  $r$  é a distância entre as duas partículas e  $\hat{r}_{ij} = \vec{r}_{ij}/r_{ij}$  é o vetor unitário na direção da partícula  $i$  para a  $j$ .

<https://nationalmaglab.org/customsearchresultmaglab?q=Coulomb+law&cx=004099242236933193842%3A9shljmje7a&cof=FORID%3A11&sa=SEARCH&x=0&y=0>



**(a) A torsion balance of the type used by Coulomb to measure the electric force**



## Exemplo

→ Uma pequena esfera com carga de  $5,6\text{ C}$  está separada por uma distância de  $2,5\text{ m}$  de outra pequena esfera com carga  $-3,5\text{ C}$ . Estime a força entre elas?

A força é atrativa e, em módulo, é:

$$|\vec{F}| = k \frac{|Q_1||Q_2|}{r^2}$$

$$|\vec{F}| = 9,0 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \frac{(5,6\text{C})(3,5\text{C})}{(2,5\text{m})^2} = 2,8 \times 10^{10}\text{ N}$$

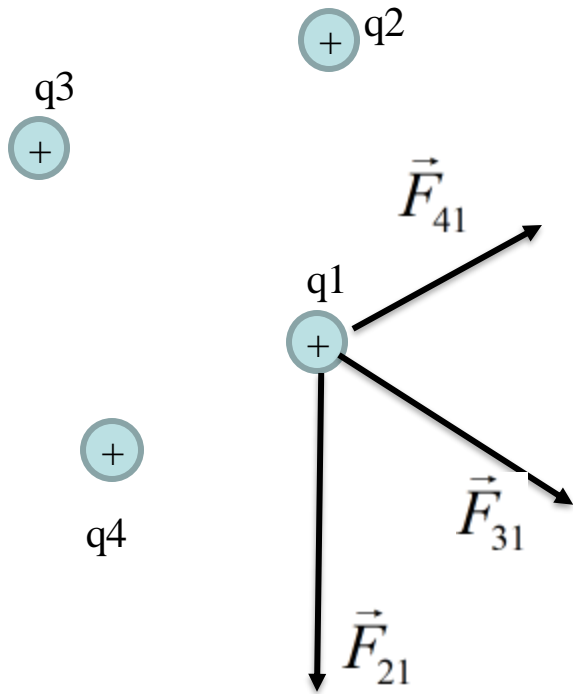
Para  $n$  cargas, vale o princípio da superposição:

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{31} + \vec{F}_{41} \qquad \vec{F}_j = \sum_{i \neq j} \vec{F}_{i,j} = \frac{q_j}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i \neq j} \frac{q_i}{(r_{i,j})^2} \hat{r}_{i,j}$$

onde a soma se estende por todas as cargas  $i = 1, \dots, N$  com exceção da carga  $j$ .

Para quatro cargas positivas

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{31} + \vec{F}_{41}$$

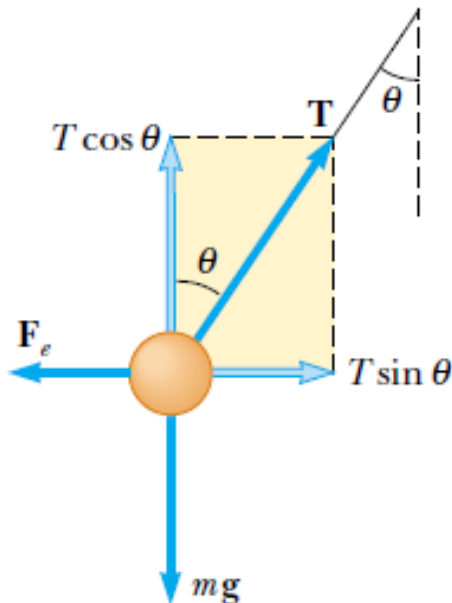




# IF – 430270– Eletricidade e Magnetismo I

**Exemplo** Dois pequenos balões, cada um com massa  $m = 1,0 \text{ g}$ , estão suspensos por fios de comprimento  $l = 21 \text{ cm}$ . O ângulo entre os fios é  $2\theta = 12^\circ$ , e os balões possuem cargas iguais,  $Q$ . Qual o valor de  $Q$ ?

Com o eixo  $x$  na horizontal e o eixo  $y$  para cima temos



$$\sum F_x = T \sin \theta - F_E = 0$$

$$\sum F_y = T \cos \theta - mg = 0$$

Da lei de Coulomb

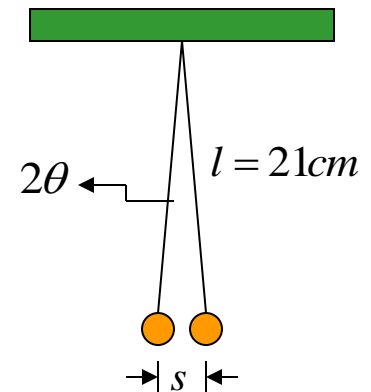
$$F_E = k \frac{Q_1 Q_2}{s^2}$$

Então

$$\tan \theta = \frac{F_E}{mg} = k \frac{Q^2}{mgs^2}$$

$$\Rightarrow Q = \pm 2l \sin \theta \sqrt{\tan \theta \frac{mg}{k}}$$

$$Q = \pm 1,5 \times 10^{-8} \text{ C} = \pm 15 \text{ nC}$$



$$\sin \theta = \frac{s}{2l}$$





# IF – 430270– Eletricidade e Magnetismo I

---

## Exemplo

→ Compare as forças elétrica e gravitacional entre um próton e um elétron.

$$\frac{F_{Elétrica}}{F_{Gravitacional}} = \frac{ke^2/r^2}{Gm_p m_e/r^2} = \frac{ke^2}{Gm_p m_e}$$

$$\frac{F_{Elétrica}}{F_{Gravitacional}} = \frac{(9,0 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(1,6 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{(6,7 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg}\cdot\text{s}^2)(1,7 \times 10^{-27} \text{ kg})(9,0 \times 10^{-31} \text{ kg})}$$

$$\frac{F_{Elétrica}}{F_{Gravitacional}} = 2 \times 10^{39}$$

Em princípio, a lei de Coulomb só pode ser usada para cargas no *vácuo*. Quando existe matéria no espaço entre as cargas, a força resultante sobre cada carga sofre desvios devido à indução elétrica nas moléculas do material que preenche o espaço.

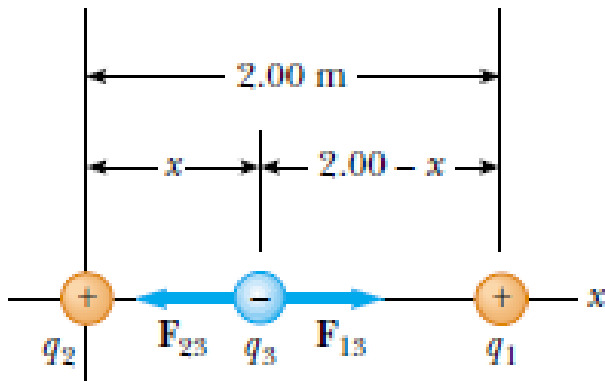
Na prática, porém, pode-se aplicar a lei de Coulomb e o princípio da superposição para cargas puntiformes no ar. Os desvios causados pelo fato das cargas estarem no ar ao invés do vácuo é desprezível na maioria dos casos.



# IF – 430270– Eletricidade e Magnetismo I

Exemplo Três cargas pontuais estão situadas ao longo de  $x$ , como mostrado na figura abaixo.

→ A carga positiva  $q_1 = 15 \mu\text{C}$  está situada em  $x = 2,00 \text{ m}$  e a carga  $q_2 = 6 \mu\text{C}$  está na origem e a força resultante agindo sobre  $q_3$  é zero. Qual é a coordenada de  $q_3$ ?



$$F_{13} = k_e \frac{|q_1||q_3|}{(2.00 - x)^2} \quad F_{23} = k_e \frac{|q_2||q_3|}{x^2}$$

$$k_e \frac{|q_2||q_3|}{x^2} = k_e \frac{|q_1||q_3|}{(2.00 - x)^2}$$

$$(2.00 - x)^2 |q_2| = x^2 |q_1|$$

$$(4.00 - 4.00x + x^2)(6.00 \times 10^{-6} \text{ C}) = x^2(15.0 \times 10^{-6} \text{ C})$$

$$3.00x^2 + 8.00x - 8.00 = 0$$

$$x = 0.775 \text{ m.}$$

~~$$x = -3.44 \text{ m}$$~~