

Aula 1: A carga elétrica e a lei de Coulomb

Curso de Física Geral III

F-328

1º semestre, 2017



O eletromagnetismo

Eletricidade (eletrostática)

Fenômeno já conhecido na Grécia antiga. Ao serem atritados, determinados materiais (*âmbar*, em particular), adquiriam a propriedade de atrair pequenos objetos (ação de uma *força elétrica*).

Magnetismo (magnetostática)

Os gregos também sabiam que determinadas pedras (chamadas de *magnetita*) atraíam limalhas de ferro (ação de uma *força magnética*).

Eletromagnetismo

No século XIX, após os trabalhos de Oersted e Faraday, Maxwell escreveu as equações que unificaram a eletricidade e o magnetismo, mostrando assim que ambos eram manifestações de um mesmo fenômeno, o *eletromagnetismo*.

O eletromagnetismo

Eletricidade (eletrostática)

Fenômeno observado quando corpos são atritados, determinando a existência de cargas elétricas e a *força elétrica*).

Magnetismo

Os gregos também observaram a atração das pedras (chamadas de *magnetita*) atraíam uma *força magnética*).

Eletromagnetismo

No século XIX, com os trabalhos de Oersted e Faraday, unificaram a eletricidade e o magnetismo, mostrando que eram manifestações de um mesmo fenômeno.

E Deus Disse:

$$\nabla \cdot D = \rho$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$$

E a luz se fez.

**NOTAÇÃO
VETORIAL!?**

A carga elétrica

A carga elétrica é **uma propriedade intrínseca das partículas que constituem a matéria** e está presente em todos os objetos.

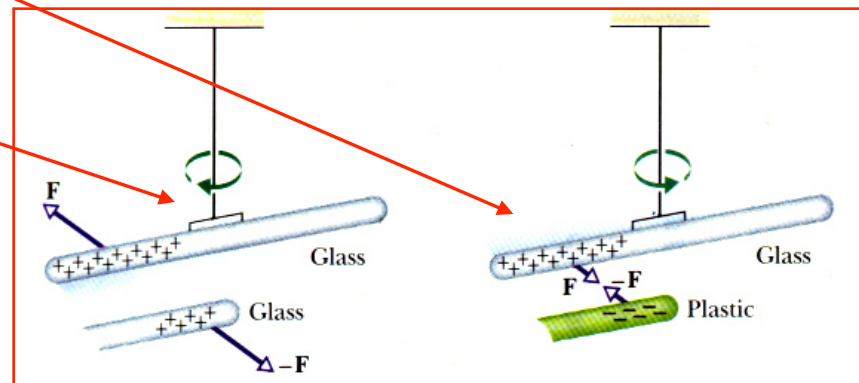
Objetos em geral contêm quantidades iguais de dois tipos de carga: **positiva** e **negativa**. Tais objetos são eletricamente **neutros**.

Contudo, se por exemplo atritarmos um pente num tecido qualquer, há **transferência de carga** de um para o outro e o pente fica carregado com um dos tipos de carga em excesso. Ele então passa a atrair pequenos objetos.



Vidro atritado com seda ou plástico atritado com lã apresentam efeitos distintos.

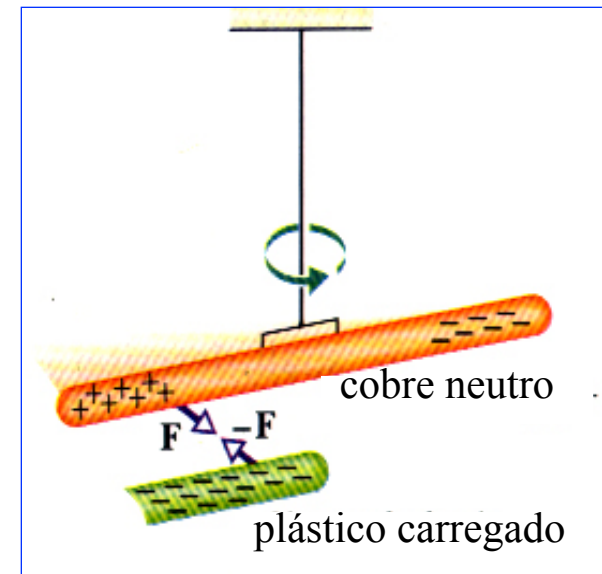
A escolha dos nomes e dos sinais das cargas é mera convenção.



Condutores e isolantes

A estrutura e a natureza elétrica dos átomos são responsáveis pelas propriedades dos condutores e isolantes.

Repetindo a experiência anterior com um bastão de metal neutro, ao invés de vidro, observa-se que há cargas com grande mobilidade: *elétrons*, “fluido” (assim se pensava) de *carga negativa*. →

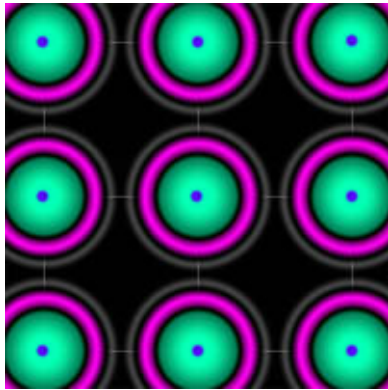


Materiais como o cobre (metais) são chamados *condutores*, onde o excesso de carga concentra-se apenas numa determinada região, ao contrário dos *isolantes*, onde as cargas têm baixa mobilidade. Metais, soluções e corpo humano são exemplos de *condutores*. Vidro, papel, borracha, plásticos e água destilada são exemplos de *isolantes*.

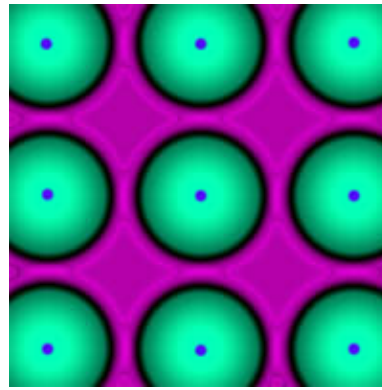
<http://www.youtube.com/watch?v=r63e5y3Z3R8>

Condutores e isolantes

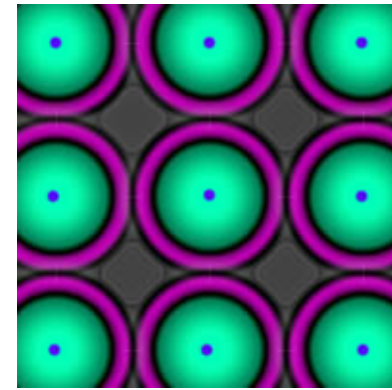
Antecipando a visão moderna da estrutura desses materiais



↑
isolantes



↑
condutores



↑
semicondutores

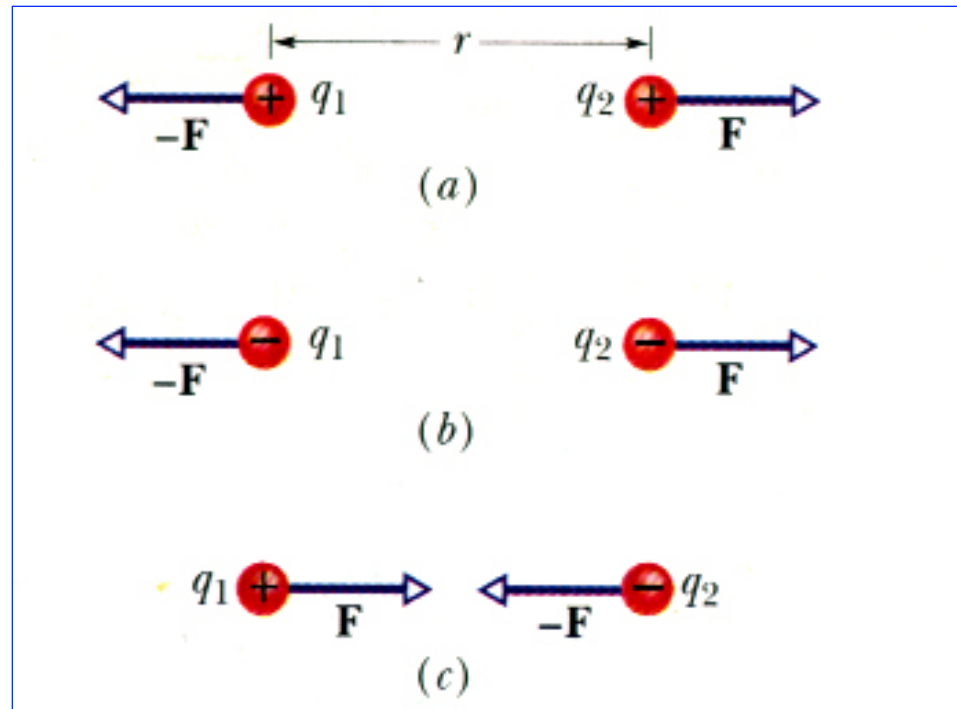
Há ainda os chamados *supercondutores*, onde o fluido eletrônico ocorre sem resistência elétrica.

A lei de Coulomb - 1785

Observa-se que *cargas de mesmo sinal se repelem e de sinais opostos se atraem*. As forças formam um par de *ação e reação* ao longo da *linha que une as cargas*.

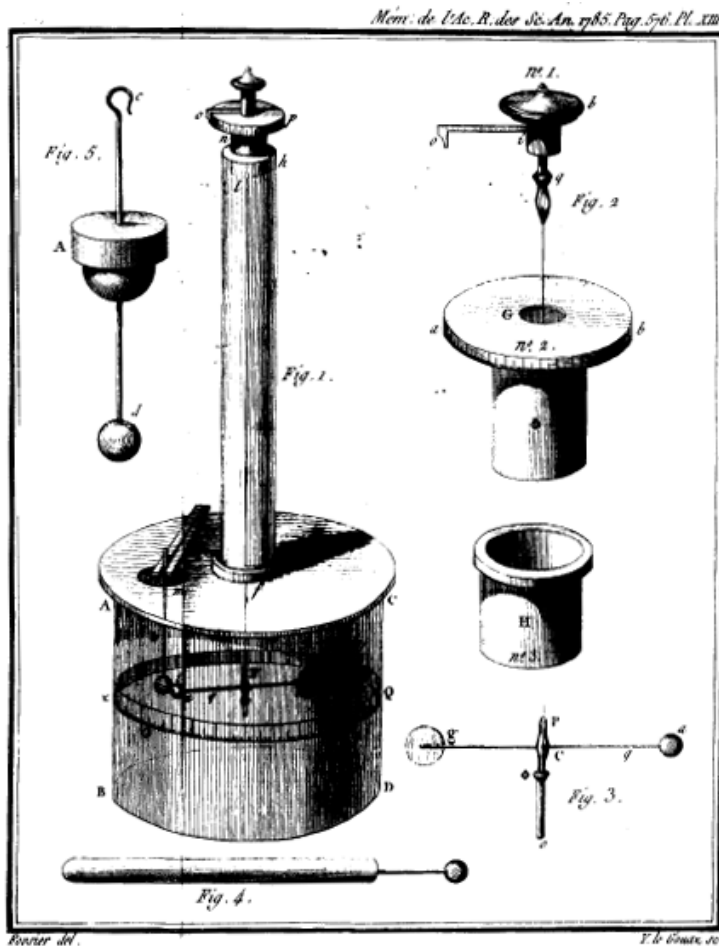
Se a distância entre duas cargas q_1 e q_2 for r , o módulo da força eletrostática entre elas será dado por:

$$F = k \frac{|q_1| |q_2|}{r^2} \quad (\text{Lei de Coulomb})$$



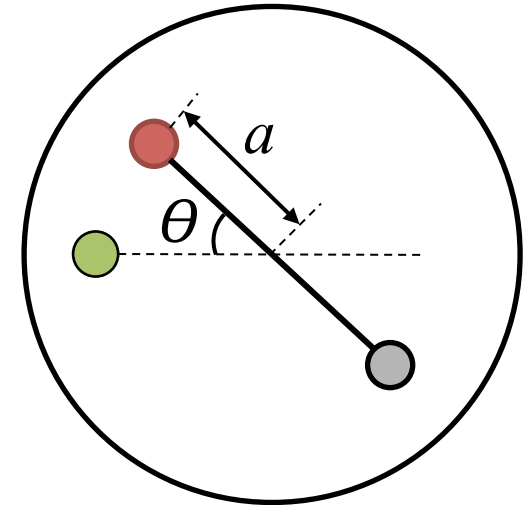
A lei de Coulomb: determinação

Balança de torção



Fonte: Wikipedia

Esquemático



Para pequenos ângulos

$$\vec{\tau} = \vec{a} \times \vec{F} = -K\vec{\theta}$$

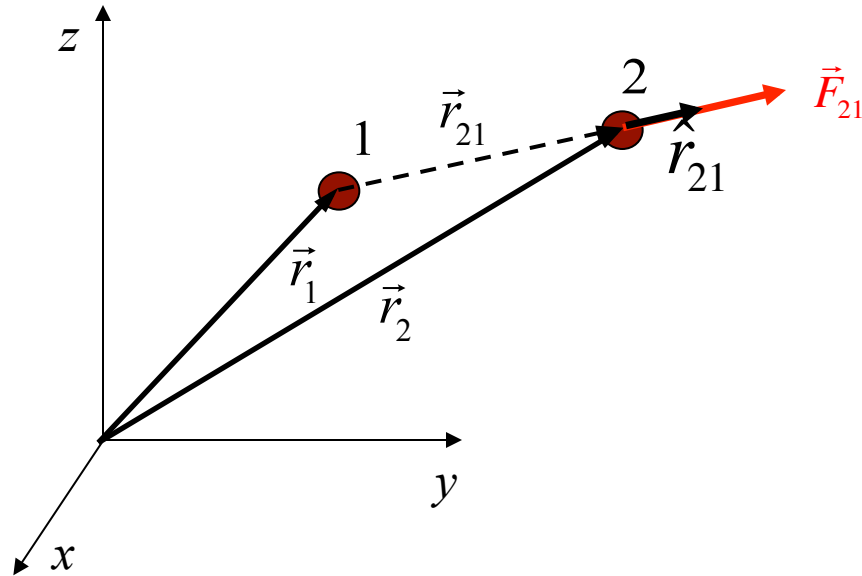
Para pequenos ângulos

$$F_q = \frac{K\theta}{a}$$

A lei de Coulomb



balança de torção



Vetorialmente:

$$\Rightarrow \hat{r}_{21} = \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|}$$

$$\vec{F}_{21} = k \frac{q_2 q_1}{r_{21}^2} \hat{r}_{21} \quad (\text{forma geral da Lei de Coulomb})$$

A lei de Coulomb

Antecipando o conceito de corrente elétrica, a unidade de carga é o *Coulomb*, que não é uma unidade fundamental. O *Coulomb* é definido no SI como sendo a carga transportada por uma corrente de 1 A que atravessa a seção reta de um fio durante 1 segundo.

$$dq = i dt$$

No SI a constante eletrostática k é dada por

$$k \equiv \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cong 8,99 \times 10^9 \frac{\text{N.m}^2}{\text{C}^2}$$

A permissividade do vácuo, ϵ_0 , é dada por

$$\epsilon_0 \cong 8,85 \times 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N.m}^2}$$

Força Eletrostática vs. Gravitacional

Lei de Coulomb:
$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{r_{12}^2}$$

Lei da Gravitação:
$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{r_{12}^2}$$

Átomo de Hidrogênio:

$$|q_e| = |q_p| = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C} ;$$

$$r_{12} = 5,3 \times 10^{-11} \text{ m (distância média entre o próton e o elétron);}$$

$$m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}, \quad m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg e}$$

$$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2 \text{ (constante universal gravitacional)}$$

Substituindo estes valores nas equações acima:

$$F_e = 8,2 \times 10^{-8} \text{ N} \quad ; \quad F_g = 3,6 \times 10^{-47} \text{ N}$$

$$\text{Relação entre } F_e / F_g \cong 2 \times 10^{39}$$

Exemplo

Imaginemos 2 prótons dentro de um núcleo atômico, separados por uma distância $d \cong 10^{-14}$ m. Qual é a aceleração que um próton adquire sob a ação da força elétrica entre eles?

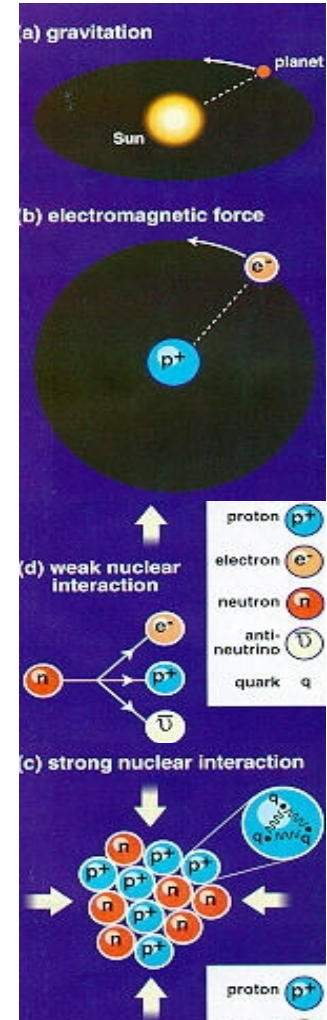
$$F_{el} = k \frac{e^2}{d^2} \cong 9,0 \times 10^9 \frac{(1,6 \times 10^{-19})^2}{(10^{-14})^2} \cong 23 \times 10^{-1} \text{ N}$$
$$a = \frac{F_{el}}{m_p} = \frac{23 \times 10^{-1}}{1,67 \times 10^{-27}} = 13 \times 10^{26} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}! \approx 10^{26} \text{ g}$$

Se esta fosse a única força agindo sobre os prótons, o núcleo não poderia ser estável. **Quem mantém o núcleo estável são as forças nucleares fortes.**

Estabilidade dos Materiais: interação entre cargas (forças nucleares).

As forças fundamentais da natureza

- **Gravitacional ($1/r^2$)**
 - Matéria
 - **Eletromagnética ($1/r^2$)**
 - Cargas elétricas, átomos, sólidos
 - **Nuclear Fraca**
 - Decaimento radiotivo beta
 - **Nuclear Forte**
 - Mantém o núcleo ligado (curto alcance)
- Relative strengths of the four fundamental forces (approximate values):
- Gravitational: 10^{-38}
 - Electromagnetic: 10^{-2}
 - Weak nuclear: 10^{-7}
 - Strong nuclear: 1
- Maxwell tentou unificar as forças **elétrica** e **gravitacional**
 - Depois de 1915 (teoria da relatividade geral), Einstein tentou a unificação
 - Fim dos 60, A. Salam (1926-96) e S. Weinberg (1933-) e S. Glashow (1932-) formularam a teoria **Eletro-Fraca** (Nobel 1979)



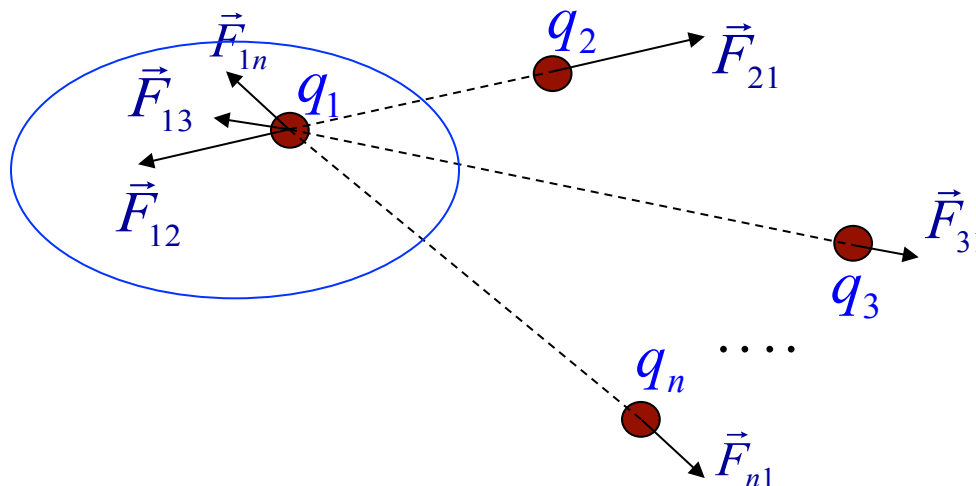
Princípio da superposição

Lei de Coulomb: $F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1| |q_2|}{r_{12}^2} = F_{21}$

Num sistema de n cargas: vale o princípio da superposição:

A força \vec{F}_1 sobre a carga q_1 devida às outras $(n-1)$ cargas é:

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \dots + \vec{F}_{1n} \quad (\text{soma vetorial})$$

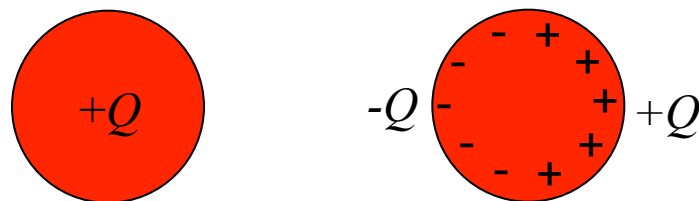


Observa-se que:

$$\vec{F}_{ij} = -\vec{F}_{ji}$$
$$\vec{F}_i = q_i \left(\sum_{j \neq i}^n k \frac{q_j}{|\vec{r}_{ij}|^2} \hat{r}_{ij} \right)$$

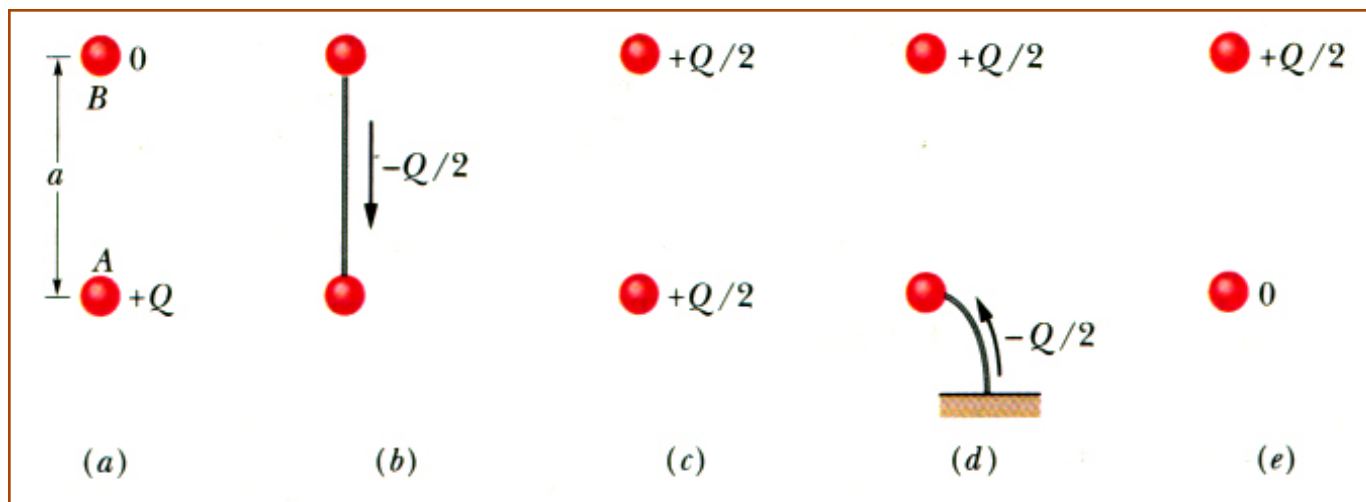
A lei de Coulomb

Movimento de cargas em um sistema de condutores: **Indução**



Exemplo (indução de cargas)

Duas esferas condutoras idênticas, eletricamente isoladas e muito afastadas. Qual é a força entre as esferas nas situações c) e d)?



Propriedades das carga elétricas

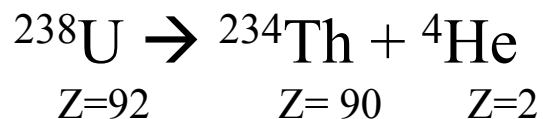
A quantização da carga

Millikan determinou a *carga elementar* (eletrônica) como sendo $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ e portanto $q = ne$, onde $n = \pm 1, \pm 2, \dots$

Mas a teoria do *Modelo Padrão* das partículas elementares prevê a existência dos *quarks*, que são partículas constituintes de prótons e nêutrons, de carga $\pm 2e/3$ ou $\pm e/3$, porém de difícil detecção individual. O “*quantum*” de carga é muito pequeno.

A conservação da carga

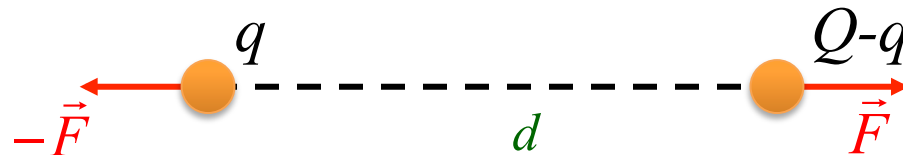
Em todos os processos que ocorrem na natureza, desde a transferência de carga por atrito até as reações entre partículas elementares, *a carga total (soma das cargas positivas e negativas) de um sistema isolado sempre se conserva*. Ex: decaimento radioativo, aniquilação, produção de pares, etc.



(decaimento radioativo: conservação de carga a nível nuclear).

Exercício

Uma pequena esfera contém inicialmente uma carga Q . Uma parte q dessa carga é transferida para uma segunda esfera situada nas proximidades. As duas esferas podem ser consideradas como cargas puntiformes. Para que valor de q a força eletrostática entre as duas esferas é máxima?



$$F = k \frac{q(Q-q)}{d^2}$$

$$F_{\max} \Rightarrow \frac{dF}{dq} = 0 \Rightarrow \frac{k}{d^2}(Q-2q) = 0 \therefore q = \frac{Q}{2}$$

Questão do Moodle

Uma partícula com carga Q está sobre o eixo dos y a uma distância a da origem e uma partícula com carga q está sobre o eixo x a uma distância d da origem. O valor de d para o qual a componente x da força sobre a segunda partícula é máxima é:

Escolha uma:

- ☐ a. a ;
- ☐ b. $a/2$;
- ☐ c. $a/\sqrt{2}$;
- ☐ d. $\sqrt{2}a$;
- ☐ e. 0 ;

Resp.: Letra **c**

Lista de exercícios do capítulo 21

•Informações complementares

Consultar: <http://www.ggte.unicamp.br/eam/course/view.php?id=3643>

Os exercícios pares do Livro texto capítulo 21

Aulas gravadas:

<http://lampiao.ic.unicamp.br/weblectures> (Prof. Roversi)

ou

[UnivespTV e Youtube](#) (Prof. Luiz Marco Brescansin)