

Física III

A Carga Elétrica e a Lei de Coulomb



Prof. VICTOR M. MIRANDA

Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- A natureza da carga elétrica e como sabemos que a carga elétrica é conservada e quantizada.
- Como os corpos se tornam eletricamente carregados e os processos de eletrização.
- Como usar a lei de Coulomb para calcular a força elétrica existente entre cargas.
- Aplicar o Princípio da Superposição para calcular a força elétrica dado um conjunto de cargas.

Introdução

Eletrostática

Eletrostática (do grego *elektron*, elétron/âmbar + *statikos*, estacionário) é o ramo da eletricidade que estuda as propriedades, o comportamento e as interações entre as **cargas elétricas em repouso**, ou seja, estuda os fenômenos do **equilíbrio** da eletricidade nos corpos que de alguma forma se tornam carregados de carga elétrica, ou eletrizados.

Fenômeno já conhecido na Grécia antiga: verificou-se que, ao serem atritados com a pele de um animal, determinados materiais (**âmbar**, em particular), adquiriam a propriedade de atrair pequenos objetos (ação de uma **força elétrica**), como, por exemplo, segmentos de palha.

Introdução

Eletrodinâmica

A **Eletrodinâmica** é a parte da física responsável pelo estudo do comportamento das *cargas elétricas em movimento*.

Ao se estudarem situações onde as partículas eletricamente carregadas deixam de estar em equilíbrio eletrostático passamos à situação onde há deslocamento destas cargas para uma determinada direção e em um sentido, este deslocamento é o que chamamos *corrente elétrica*.

Exemplos comuns de eletrodinâmica são os raios e a geração de energia elétrica.



Introdução

Magnetismo (Magnetostática)

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

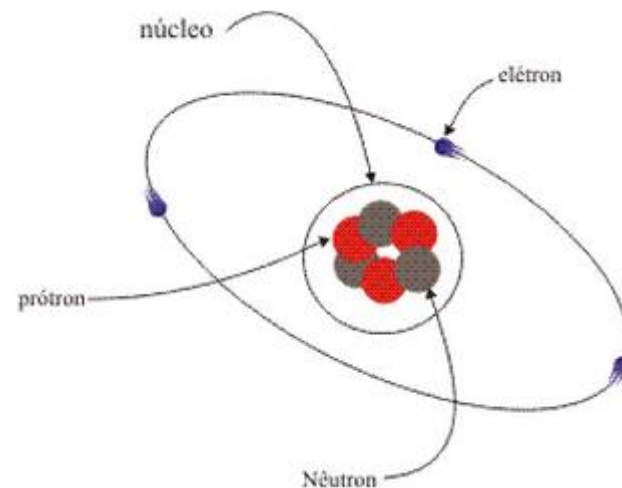
Eletromagnetismo

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

A Carga Elétrica e a Estrutura da Matéria

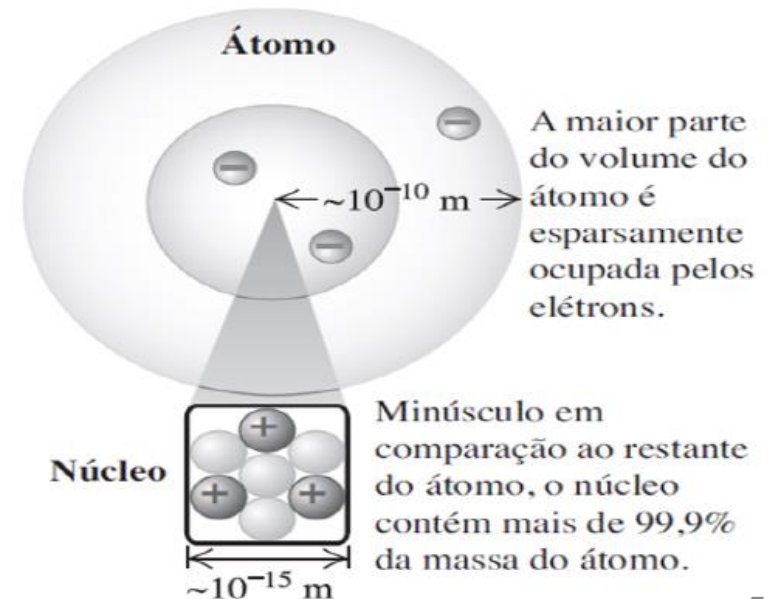
A estrutura do átomo pode ser entendida com base em três partículas elementares:

- ▶ O **elétron** → Carga **negativa**. $m_e = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$.
- ▶ O **próton** → Carga **positiva**. $m_p = 1,672 \times 10^{-27} \text{ kg}$.
- ▶ O **nêutron** → Carga **nula**. $m_n = 1,674 \times 10^{-27} \text{ kg}$.
- ▶ Os prótons e os nêutrons estão no interior do átomo formando um caroço central denso chamado **núcleo**. Cujo o diâmetro é da ordem de $D_N \sim 10^{-15} \text{ m}$.
- ▶ Os elétrons estão em camadas ao redor do núcleo, a uma distância de aproximadamente $D_e \sim 10^{-10} \text{ m}$.



A Carga Elétrica e a Estrutura da Matéria

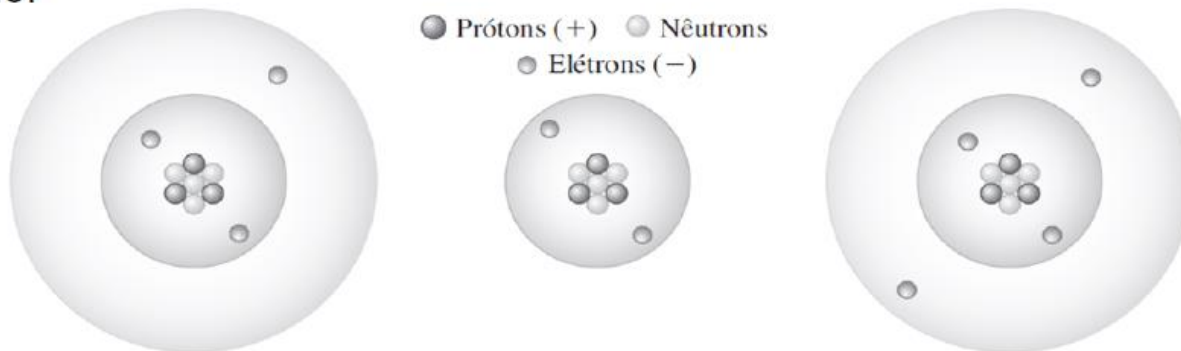
- ▶ Os elétrons são mantidos no interior do átomo pela **força elétrica de atração** entre os núcleos positivos e os elétrons.
- ▶ Os prótons e os nêutrons são mantidos no interior do núcleo pela **força nuclear forte** que supera a repulsão elétrica entre os prótons.
- ▶ O módulo da carga elétrica negativa do elétron é exatamente igual à carga elétrica positiva dos prótons.



A Carga Elétrica e a Estrutura da Matéria

O átomo neutro:

- ▶ O número de prótons é exatamente igual ao número de elétrons.
- ▶ A carga elétrica total(soma algébrica) é exatamente igual a zero.
- ▶ **Número atômico(Z)** é o numero de elétrons ou prótons em um átomo neutro.
- ▶ **Íon positivo** é um átomo com **falta** de um elétrons.
- ▶ **Íon negativo** é um átomo com **excesso** de um elétrons.
- ▶ Denomina-se **ionização** o processo de **perda** ou **ganho** de um elétron por um átomo.



(a) Átomo de lítio neutro (Li):	(b) Íon de lítio positivo (Li ⁺):	(c) Íon de lítio negativo (Li ⁻):
3 prótons (3+)	3 prótons (3+)	3 prótons (3+)
4 nêutrons	4 nêutrons	4 nêutrons
3 elétrons (3-)	2 elétrons (2-)	4 elétrons (4-)

Elétrons equivalem a prótons:

Menos elétrons do que prótons:

Mais elétrons do que prótons:

A Carga Elétrica e a Estrutura da Matéria

Fique atento:

É comum haver confusão sobre *corpos positivamente carregados*, principalmente, já que é plausível de se pensar que para que o corpo tenha carga elétrica positiva ele deva receber carga elétrica positiva, ou seja, ganhar prótons.

Quando na verdade um corpo está positivamente carregado se ele perder elétrons, ficando com menos carga elétrica negativa.

Para que durante os cálculos você não se confunda, lembre que a física vista a nível de ensino médio estuda apenas reações elementares e cotidianas, como o movimento de elétrons. As reações onde as partículas intranucleares (nêutrons e prótons) podem ser modificadas são estudadas na parte da ciência conhecida como Física Nuclear.

Propriedades da Carga Elétrica

<https://www.youtube.com/watch?v=x2tL7Xi7LsM>

A carga elétrica é conservada

Na discussão feita até esse momento existe dois princípios fundamentais:

Princípio da conservação da carga elétrica:

- ▶ A soma algébrica de todas as cargas elétricas existentes em um sistema isolado permanece constante.

EM QUALQUER PROCESSO, NO QUAL UM CORPO É CARREGADO, A CARGA ELÉTRICA NÃO PODE SER CRIADA NEM DESTRUÍDA, ELA É MERAMENTE *TRANSFERIDA* DE UM CORPO PARA OUTRO.

Princípio da quantização da carga elétrica:

- ▶ O modulo da carga elétrica do elétron ou do próton é uma unidade de carga natural (ou elementar).

Qualquer quantidade de carga elétrica observada é sempre um múltiplo inteiro dessa unidade básica:

- ▶ $q = \pm ne$, onde n é o numero de cargas e e é o modulo da carga fundamental.
- ▶ $e = 1,6021 \times 10^{-19} C$. (Unidade: Coulomb [C])

Propriedades da Carga Elétrica

EXEMPLO:

Ao remover 100 *elétrons* de um corpo neutro, qual a carga resultante?

$$Q = + ne$$

$$Q = + 100 (1,6 \cdot 10^{-19}) \text{ C}$$

$$Q = + 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^2 \text{ C}$$

$$Q = + 1,6 \cdot 10^{-17} \text{ C}$$

Ele fica carregado **positivamente**.

Princípio de Interações Eletrostáticas

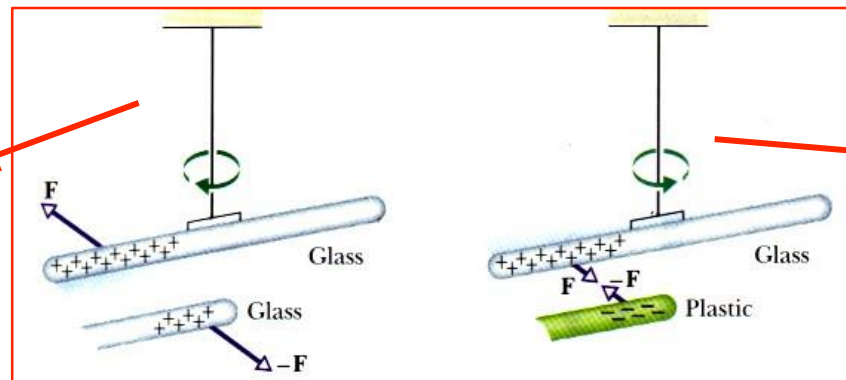
A carga elétrica é **uma propriedade intrínseca** (como a massa) **das partículas que constituem a matéria** e está presente em todos os objetos.

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 **eletricamente carregado** com um dos tipos de carga em excesso. Ele então passa a atrair pequenos objetos.



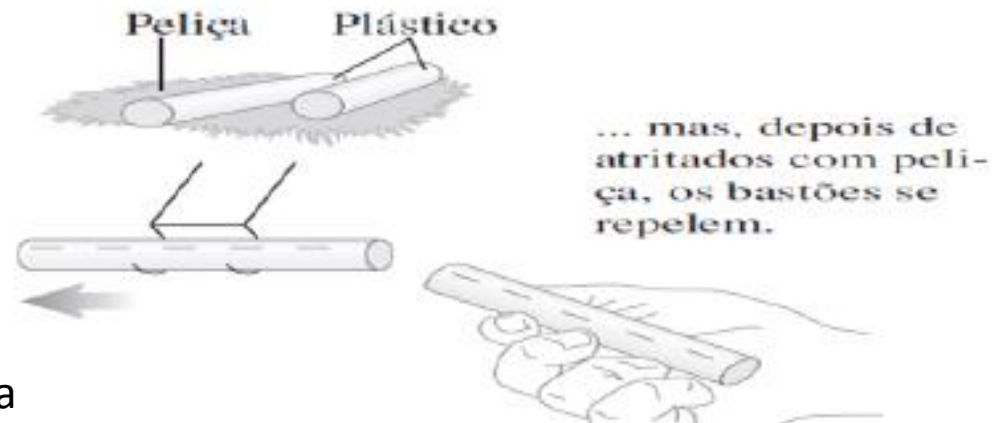
Depois de atritados, em uma de suas extremidades, com seda, dois bastões de vidro se repelem.



Depois de atritado, em uma de suas extremidades, com lã, o bastão de plástico atrai o bastão de vidro carregado.

Cargas de mesmo sinal se repelem e cargas de sinais opostos se atraem.

Princípio de Interações Eletrostáticas



Alguns materiais possibilitam a migração da carga elétrica de uma região para outra, enquanto outros impedem o movimento das cargas elétricas. Veremos a seguir.

Condutores e Isolantes

- A principal questão envolvida na definição do que é um material condutor ou isolante tem muito a ver com a sua *estrutura microscópica*.

CONDUTORES:

- Um condutor permite o movimento de cargas elétricas, com facilidade, através dele.
 - Quando os átomos de um material condutor se unem para formar um sólido, alguns dos elétrons mais afastados (e, portanto, mais fracamente atraídos pelo núcleo – camada de condução) podem se tornar livres e se movimentam pelo material (geração de elétrons livres). O movimento desses elétrons produz a transferência de carga elétrica através do condutor.
- Todos os metais, água mineral e corpo humano são exemplos de *condutores*.

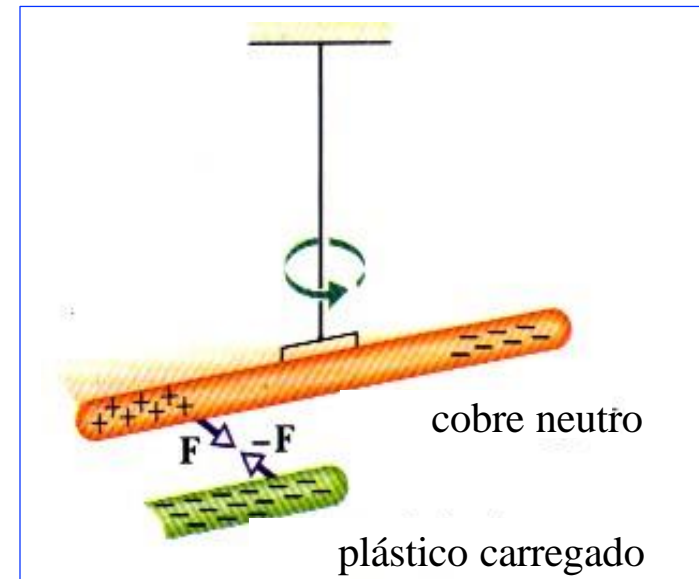
ISOLANTES:

- Um isolante não permite o movimento de cargas elétricas (baixa mobilidade).
 - Em um isolante o número de elétrons condução é praticamente nulo, já que os elétrons estão fortemente ligados ao núcleo e, portanto, não podem se movimentar pelo material.
- Vidro, papel, borracha, madeira, plásticos e água destilada são exemplos de *isolantes*.

Condutores e Isolantes

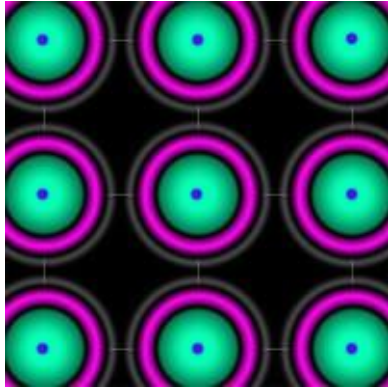
Repetindo-se a experiência anterior com um bastão de metal neutro, ao invés de vidro, observa-se movimento de cargas com grande facilidade:

FIG. 21-4 Uma barra de cobre neutra é isolada eletricamente da terra ao ser suspensa por um fio de material não-condutor. Qualquer das extremidades da barra é atraída por uma barra de plástico eletricamente carregada. Na figura, elétrons de condução da barra de cobre são repelidos para a extremidade mais afastada da barra pela carga negativa da barra de plástico, deixando a extremidade mais próxima com uma carga total positiva. Como está mais próxima, esta carga positiva é atraída pela carga negativa da barra de plástico com mais força do que a carga negativa que se acumulou na outra extremidade é repelida, o que faz girar a barra de cobre.

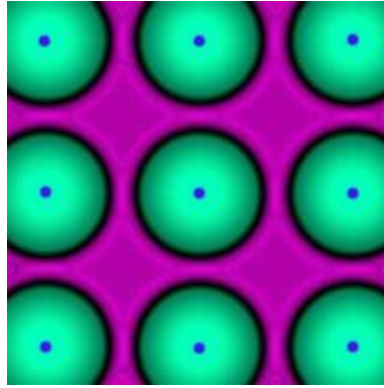


Condutores e Isolantes

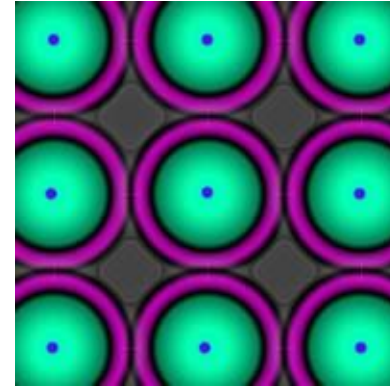
Estrutura desses materiais:



↑
isolantes



↑
condutores



↑
semicondutores

Os *semicondutores* são materiais com propriedade elétricas intermediárias entre as do condutores e as dos isolantes. Um exemplo é o Silício, usados nos circuitos eletrônicos.

Há ainda os chamados *supercondutores*, que são condutores perfeitos, ou seja, as cargas se movem sem encontrar nenhuma resistência.

Condutores e Isolantes

- **Condições ambientais** também podem influir na capacidade de uma substância conduzir ou isolar eletricidade. De maneira geral, em climas úmidos, um corpo eletrizado, mesmo apoiado por isolantes, acaba se descarregando depois de um certo tempo.

Embora o ar atmosférico seja isolante, a presença de umidade faz com que ele se torne condutor.

Distribuição de cargas elétricas em condutores

- No equilíbrio eletrostático, qualquer excesso de carga deve ficar localizado **sobre a superfície de um condutor sólido**.
- A quantidade de carga por unidade de área na superfície de um condutor (**densidade superficial de cargas**) em equilíbrio eletrostático não é, em geral, uniforme.
- Verifica-se que, onde o raio de curvatura do condutor é menor, ou seja, onde **ele é mais pontudo, há maior concentração de cargas**. Em contrapartida, quanto maior o raio de curvatura, menor a concentração de cargas.





Shazaam



Curiosidades sobre a Eletricidade Estática

Você atravessa o tapete para alcançar a maçaneta da porta e de repente recebe um choque estático.

- Quando você anda sobre um tapete, os elétrons se movem do tapete para você. Agora você tem os elétrons extras e uma carga estática negativa. Quando você toca uma maçaneta metálica (condutora), os elétrons saltam de você para ela, e você sente o choque estático.
- O mesmo princípio acontece quando encostamos em um carro. Se estivermos com acúmulo de carga elétrica, ao tocarmos na porta do automóvel também sentimos o choque, pois o carro acumula carga ao se movimentar. O atrito com o ar faz com que a carga elétrica fique na superfície externa do carro, que é de metal.

E por que a eletricidade estática é um problema mais comum no inverno?

- Os choques deste tipo são mais comuns no inverno, quando muita gente usa roupas de lã sintética, material que mantém a carga elétrica. Se a pessoa está descalça, essa carga é liberada aos poucos e não chega a ser percebida. Porém, se a pessoa está com um calçado com solado de borracha, que serve como isolante, ela acumula maior carga.
- Nós geralmente só percebemos a eletricidade estática no inverno, quando o ar está muito seco. Durante o verão, o ar está mais úmido e esta umidade acaba aliviando a carga elétrica extra que o corpo humano pode carregar (a água no ar ajuda os elétrons a se moverem mais rapidamente, de modo que as pessoas não acumulam uma grande carga estática). Por isso, uma das formas de evitar choques estáticos é manter um umidificador no ambiente.



Curiosidades sobre a Eletricidade Estática

Você sai no frio, tira o seu chapéu e PAM! Cabelo estático – a eletricidade estática faz seu cabelo ficar em linha reta, arrepiado.

O que acontece?

- Quando você tira o chapéu de lã, ele entra em atrito com o seu cabelo. Os elétrons se movem a partir de seu cabelo para o chapéu. Uma carga estática acumula-se e agora cada um de seus fios tem a mesma carga positiva. Lembre-se, carga de mesmo sinal se repelem. Assim, os cabelos tentam chegar o mais longe possível uns dos outros. O mais longe que podem ficar é de pé. E é assim que a eletricidade estática provoca um dia de cabelo ruim.



<http://www.tecmundo.com.br/ciencia/16339-tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-energia-estatica.htm>

Métodos de Eletrização (ou Ionização)

Considera-se um corpo eletrizado quando este tiver número diferente de prótons e elétrons, ou seja, quando não estiver neutro. O processo de retirar ou acrescentar elétrons a um corpo neutro para que este passe a estar eletrizado denomina-se *eletrização*.

Eletrização por Atrito

Os primeiros registros dos quais se tem notícia relacionados com fenômenos elétricos foram feitos pelos gregos.

Verificou-se que, ao serem atritados com a pele de um animal, determinados materiais (*âmbar*, em particular), adquiriam a propriedade de atrair pequenos objetos (ação de uma *força elétrica*), como, por exemplo, segmentos de palha.

Métodos de Eletrização (ou Ionização)

Estudos baseados em experimentos posteriores possibilitaram comprovar que:

*dois **corpos neutros** feitos de **materiais distintos**, quando são atritados entre si, um deles fica **eletrizado negativamente** (ganha elétrons) e outro **positivamente** (perde elétrons).*

Quando há eletrização por atrito, os dois corpos ficam com cargas de módulo igual, porém com sinais opostos.

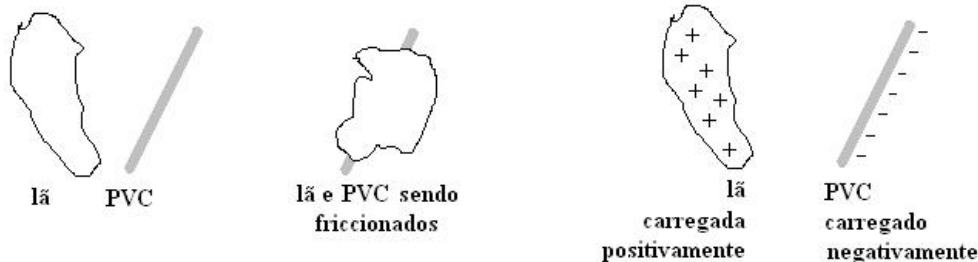
Esta eletrização depende também da natureza do material, por exemplo, atritar um material $m1$ com uma material $m2$ pode deixar $m1$ carregado negativamente e $m2$ positivamente, enquanto o atrito entre o material $m1$ e outro material $m3$ é capaz de deixar $m3$ carregado negativamente e $m1$ positivamente.

A eletrização por atrito é mais forte quando é feita por corpos isolantes, pois os elétrons permanecem nas regiões atritadas.

Métodos de Eletrização (ou Ionização)

Convenientemente foi elaborada uma lista em dada ordem que um elemento ao ser atritado com o sucessor da lista fica eletrizado positivamente. Esta lista é chamada *Série Triboelétrica*.

EXEMPLO:



“Vale lembrar que os cientistas acreditam que não é o atrito ou fricção que faz com que os elétrons se movam. É simplesmente o contato entre os dois materiais diferentes. Esfregar apenas aumenta a área de contato entre eles”.

Materiais	
Pele humana seca	+
Couro	
Pele de coelho	
Vidro	
Cabelo humano	
Fibra sintética (nylon)	
Lã	
Chumbo	
Pele de gato	
Seda	
Alumínio	-
Papel	
Algodão	
Aço	
Madeira	
Âmbar	
Borracha dura	
Níquel	
Cobre	
Latão	
Prata	
Ouro	
Platina	
Poliéster	
Isopor	
Filme PVC	
Poliuretano	
Polietileno ('fita adesiva')	
Polipropileno	
Vinil	
Silicone	
Teflon	

Métodos de Eletrização (ou Ionização)

Eletrização por Contato

Outro processo capaz de eletrizar um corpo é feito por contato entre eles.

Se dois *corpos condutores*, sendo *pelo menos um deles eletrizado*, são postos em contato, a carga elétrica tende a se estabilizar, sendo redistribuída entre os dois, fazendo com que ambos **tenham a mesma carga***, **inclusive com mesmo sinal**.

Um corpo *carregado positivamente* em *contato com a terra (tamanho bem maior)*, através de um fio condutor, *será neutralizado*, já que os elétrons serão doados pela terra;

um corpo *carregado negativamente* em *contato com a terra (tamanho bem maior)*, através de um fio condutor, também *será neutralizado*, já que os seus elétrons serão descarregados para a terra.

**Corpos de tamanhos diferentes ficam com cargas de valores diferentes, ainda que com mesmo sinais.*



Métodos de Eletrização (ou Ionização)

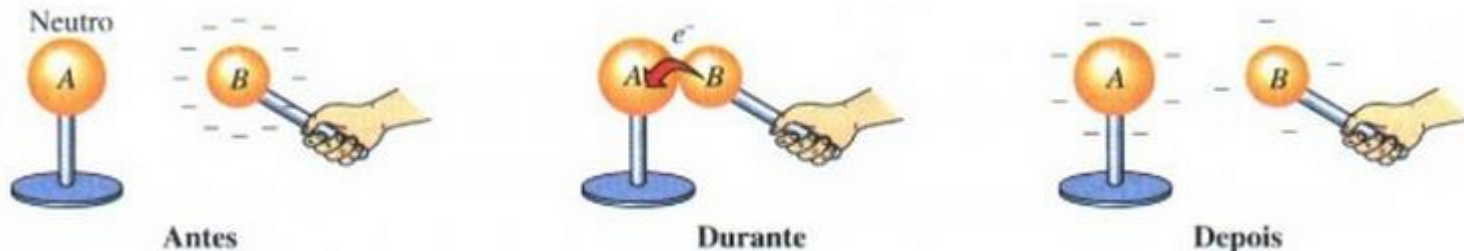
Eletrização por Contato

EXEMPLO 1:

Contato de Corpos Idênticos			
Antes do contato	A	B	
	Q_a	Q_b	
Depois do contato	A	B	
	$Q_{a'}$	$Q_{b'}$	
Conservação de cargas		Cargas depois	
$Q_a + Q_b = Q_{a'} + Q_{b'}$		$Q_{a'} = Q_{b'} = \frac{Q_a + Q_b}{2}$	

- Um corpo condutor A com carga $Q_1 = +6C$ é posto em contato com outro corpo neutro $Q_N = 0C$. Qual é a carga em cada um deles após serem separados.

$$Q' = \frac{Q_1 + Q_N}{2} = \frac{+6 + 0}{2} = +3C$$



Métodos de Eletrização (ou Ionização)

Eletrização por Contato

EXEMPLO 2:

- Um corpo condutor A com carga $Q_A = -1C$ é posto em contato com outro corpo condutor B com carga $Q_B = -3C$, após serem separados os dois o corpo A é posto em contato com um terceiro corpo condutor C de carga $Q_C = +4C$ qual é a carga em cada um após serem separados?

$$Q' = \frac{Q_A + Q_B}{2} = \frac{-1 - 3}{2} = -2C$$

Ou seja, neste momento:

$$Q' = Q'_A = Q'_B = -2C$$

Após o segundo contato, tem-se:

$$Q'' = \frac{Q'_A + Q_C}{2} = \frac{-2 + 4}{2} = +1C$$

E neste momento:

$$Q'' = Q''_A = Q''_C = +1C$$

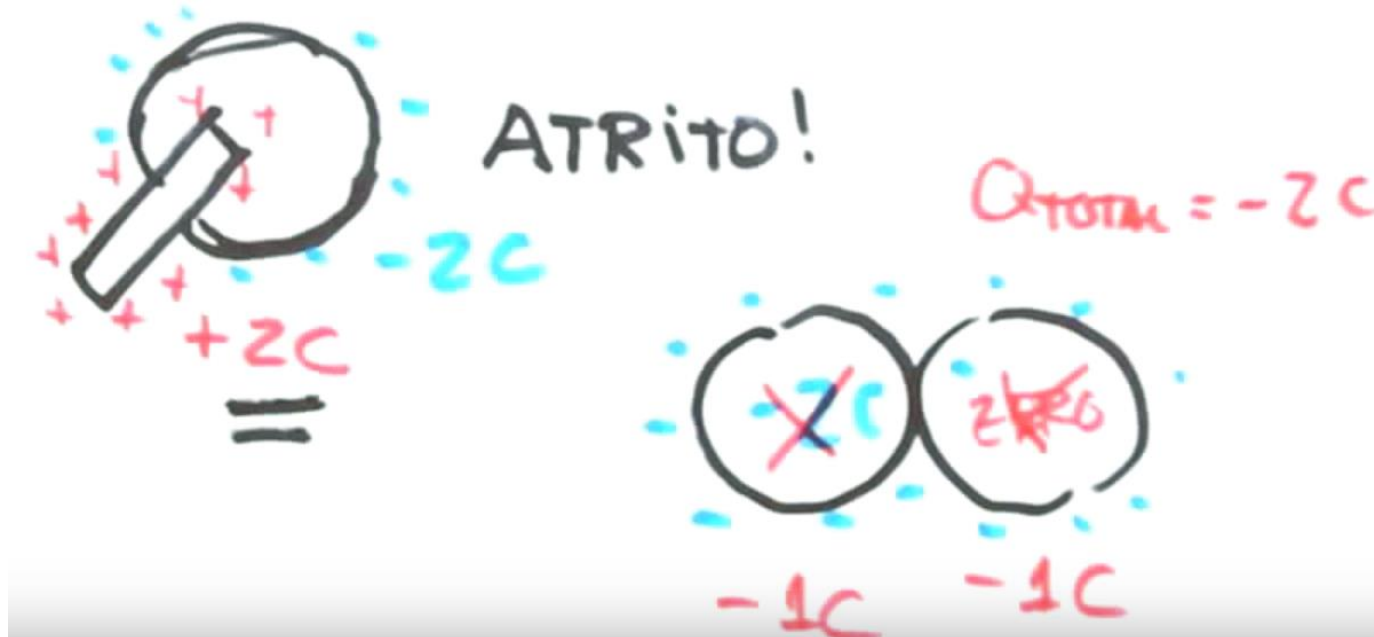
Ou seja, a carga após os contatos no corpo A será +1C, no corpo B será -2C e no corpo C será +1C.

Métodos de Eletrização (ou Ionização)

Eletrização por Contato

EXEMPLO 3:

Um bastão de vidro atritado em uma esfera condutora adquire carga $+2C$. A esfera é, então, encostada em outra idêntica, inicialmente neutra. Qual a carga final de cada corpo?



Métodos de Eletrização (ou Ionização)

Eletrização por Indução

A eletrização de um condutor neutro pode ocorrer por *simples aproximação* de um outro corpo eletrizado, *sem que haja o contato* entre eles.

Consideremos um condutor inicialmente neutro (B) e um corpo eletrizado negativamente (A). O *condutor carregado* (A) será o *indutor* e o *condutor neutro* (B), o *induzido*.

Quando aproximamos A de B, as suas cargas negativas repelem os elétrons livres do corpo neutro para posições mais distantes possíveis.



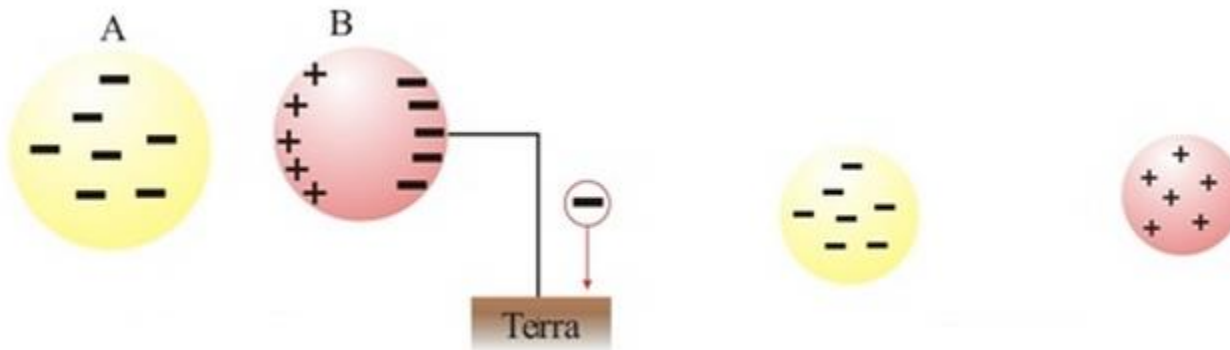
Observa-se que a esfera (B) não fica eletrizada (excesso ou falta de elétrons), tendo em vista que ainda é neutra. Há uma separação das cargas no corpo. Em cada lado da esfera surgiu uma *carga induzida*.

Métodos de Eletrização (ou Ionização)

Dessa forma, o corpo fica com falta de elétrons numa extremidade e com excesso de elétrons em outra. O fenômeno da separação de cargas num condutor, provocado pela aproximação de um corpo eletrizado, pode também ser denominado **indução eletrostática**.

Ligando-se o induzido (B) à terra através de um fio condutor, ainda na presença do indutor (A), os seus elétrons são descarregados.

Primeiramente desligando o induzido (B) à terra e, **em seguida**, afastando-se o indutor (A) das proximidades de (B), teremos como resultado o induzido (B) eletrizado com sinal oposto à carga do indutor (A) e as cargas distribuídas em sua superfície.

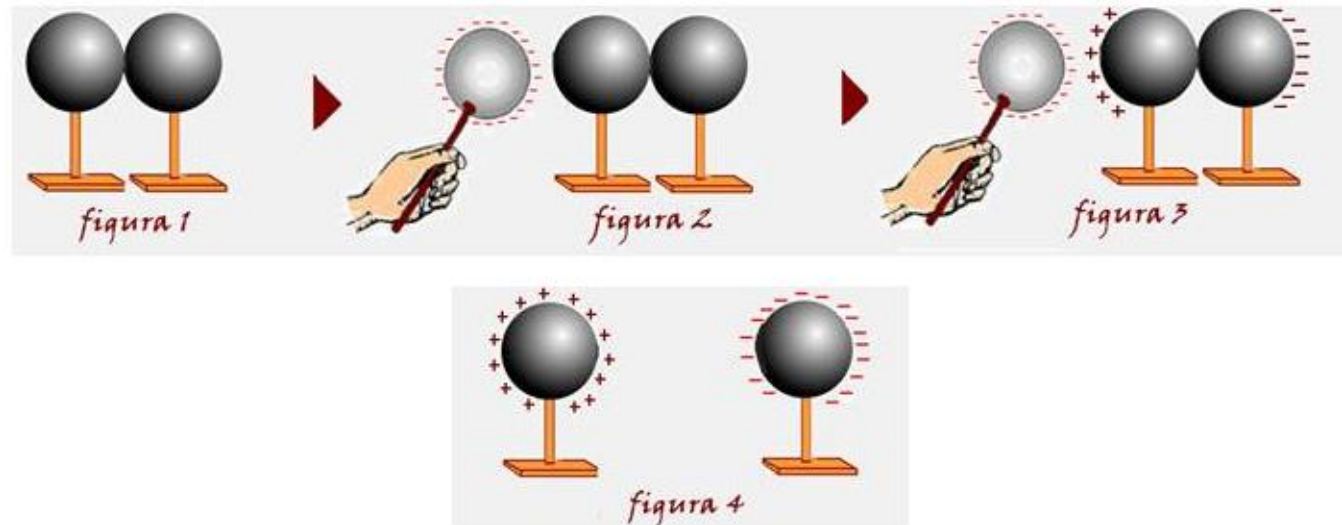


A **polarização** ocorre em corpos isolantes: quando um objeto carregado (qualquer que seja o sinal de sua carga elétrica) se aproxima de um isolante – como um balão de látex eletrizado aproximando-se de uma parede – a "nuvem eletrônica" de moléculas e átomos sofrem deformações que originam dipolos elétricos.

Métodos de Eletrização (ou Ionização)

Eletrização por Indução

Outros Exemplos:



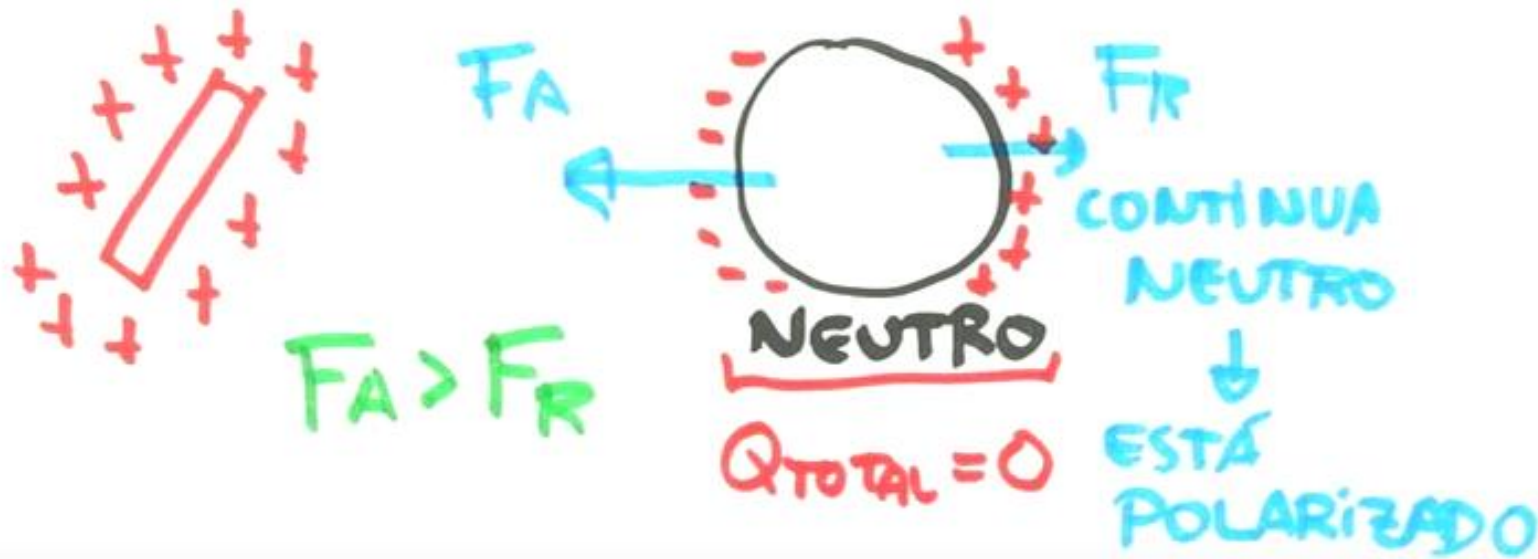
DICA PRÁTICA: Para entender como ocorre a eletrização por atrito, faça a seguinte experiência. Pegue uma caneta esferográfica e corte alguns pedaços de papel bem pequenos. Agora atrite a parte de trás da caneta em seu cabelo e depois aproxime a parte atritada aos pedaços de papel.

O que acontece? Por quê?

Métodos de Eletrização (ou Ionização)

Indução Eletrostática

OBS: Entre um corpo carregado e um neutro sempre haverá uma atração!

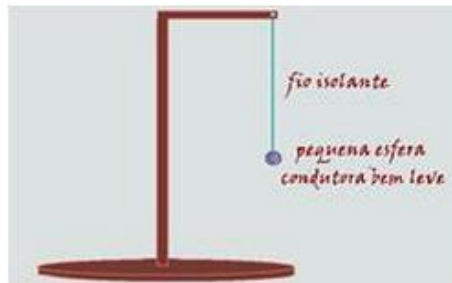


Métodos de Eletrização (ou Ionização)

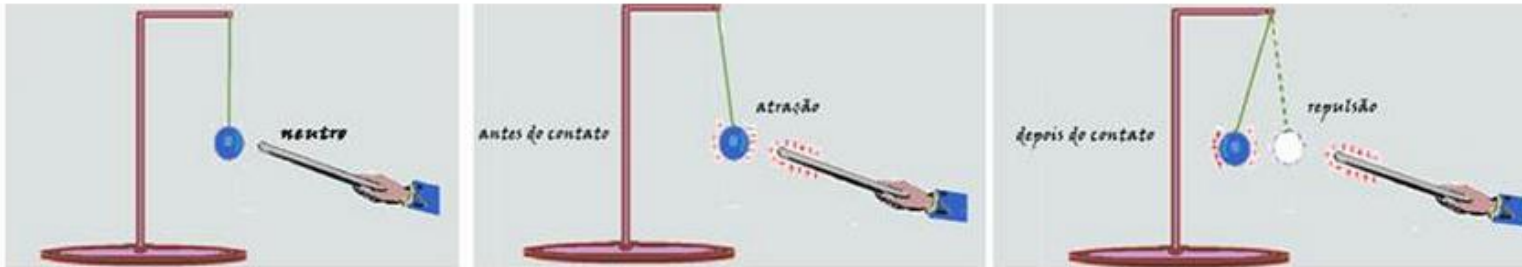
Eletroscópios

► Eletroscópios – dispositivos que apenas indicam se um corpo está ou não eletrizado não fornecendo o sinal da carga e nem seu módulo. Destacam-se dois tipos:

► Pêndulo eletrostático – consta de uma pequena esfera de material condutor bem leve, suspensa por um fino fio de material



isolante. Com a esfera do pêndulo inicialmente neutra, quando você aproxima ou encosta um corpo neutro, o pêndulo não se move. Se você aproximar, sem encostar um corpo eletrizado, ele provocará indução na esfera do pêndulo e ela será atraída.

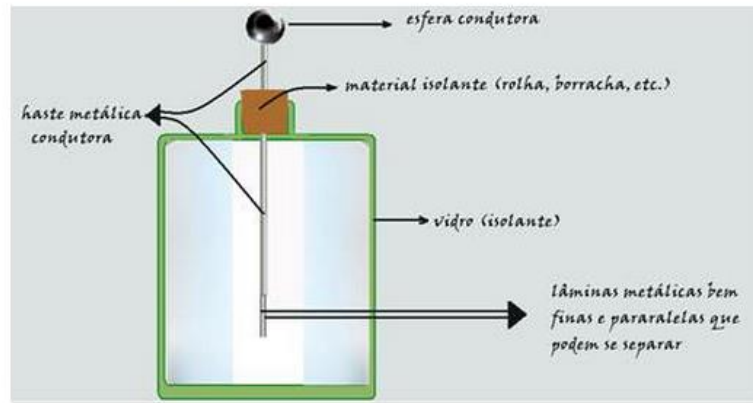


Se o corpo carregado encostar na esfera do pêndulo, ambos ficarão eletrizados por contato, com cargas de mesmo sinal e a esfera do pêndulo será repelida.

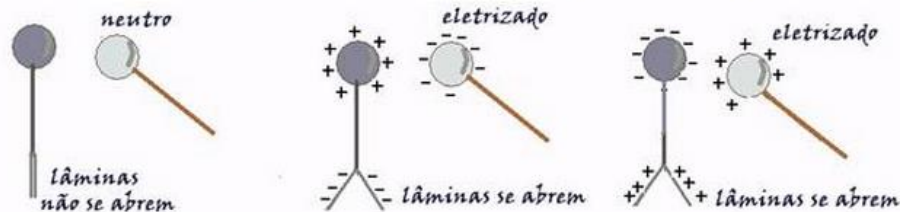
Métodos de Eletrização (ou Ionização)

► Eletroscópio de folhas

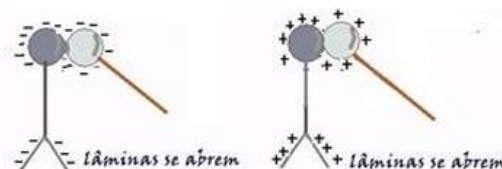
- Trata-se do aparelho apresentado na figura abaixo. Observe atentamente cada elemento do mesmo.



Quando está neutro, as lâminas permanecem fechadas. Se você aproximar um corpo eletrizado com carga de qualquer sinal, sem encostar, as lâminas se abrem, pois o corpo eletrizado provoca uma indução fazendo surgir nas lâminas cargas elétricas de mesmo sinal que o seu, e na esfera, cargas de sinais opostos (figuras abaixo)



Se você afastar o corpo eletrizado as lâminas retornam à situação inicial, mas se você encostá-lo na esfera haverá eletrização por



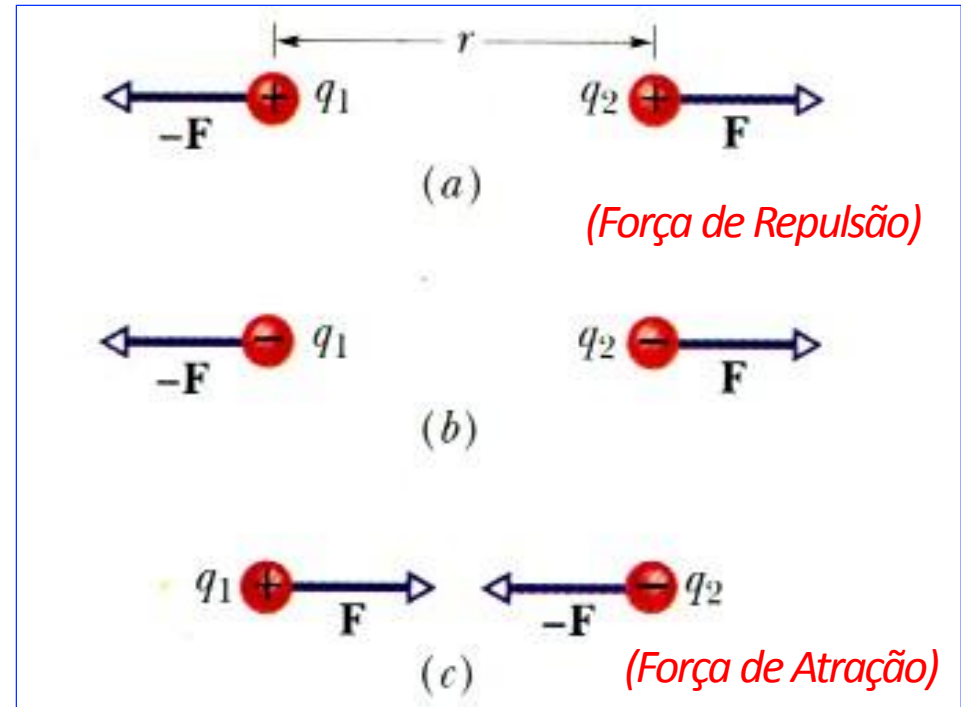
contato e as lâminas se abrem.

A lei de Coulomb

Observa-se que *cargas de mesmo sinal se repelem e de sinais opostos se atraem*.

As forças formam um par de *ação e reação* (3ª Lei de Newton) 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:



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


(Lei de Coulomb)

A lei de Coulomb

No SI, a *constante eletrostática* é dada por:

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

ATENÇÃO AO
SISTEMA
INTERNACIONAL
(S.I.)



onde ϵ_0 é a *permissividade do vácuo (espaço livre)*, que é dada por:

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

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$$

(Lei de Coulomb: Força
Elétrica entre duas
Cargas Puntiformes*)

*Corpos carregados separados por uma distância r muito maior que os respectivos tamanhos.

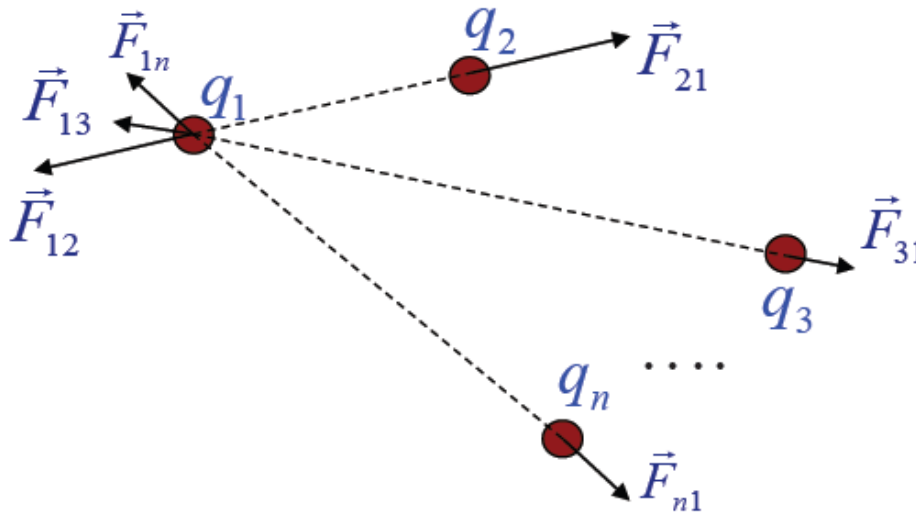
A lei de Coulomb e o Princípio da Superposição

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

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:

$$\vec{F}_{ij} = -\vec{F}_{ji}$$

$$\vec{F}_1 = q_1 \left(\sum_{j=2}^n k \frac{q_j}{|\vec{r}_{ij}|^2} \hat{r}_{ij} \right)$$

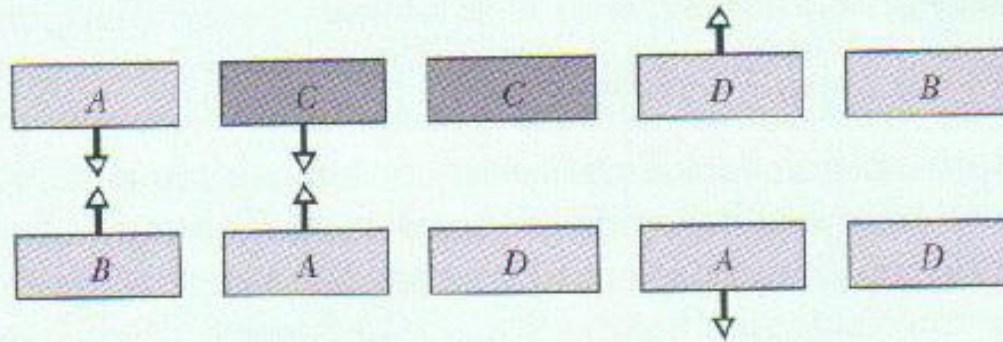
Exercícios: A lei de Coulomb

TESTES RÁPIDOS:



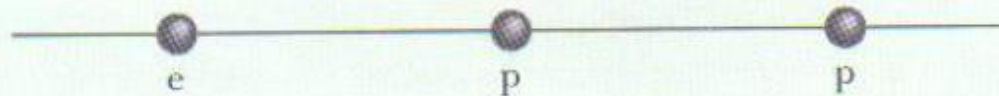
TESTE 1

A figura mostra cinco pares de placa: A , B e D são placas de plástico carregadas, e C é uma placa de cobre eletricamente neutra. As forças eletrostáticas entre três dos pares de placas estão indicadas. Os outros dois pares de placas se atraem ou se repelem?



TESTE 2

A figura mostra dois prótons (símbolo p) e um elétron (símbolo e) sobre uma reta. Qual é o sentido (a) da força eletrostática exercida pelo elétron sobre o próton do meio; (b) da força eletrostática exercida sobre o próton do meio sobre o outro próton; (c) da força total exercida sobre o próton do meio?



Força Eletrostática vs. Gravitacional

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

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

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

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

Substituindo estes valores nas equações acima:

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

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

Exemplo 1

FORÇA ELÉTRICA VERSUS FORÇA GRAVITACIONAL Uma partícula α ('alfa') é o núcleo do átomo de hélio. Ela possui massa $m = 6,64 \times 10^{-27} \text{ kg}$ e carga $q = +2e = 3,2 \times 10^{-19} \text{ C}$. Compare a força de repulsão elétrica entre duas partículas α com a força de atração gravitacional entre elas.

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{r^2}$$

O módulo F_g da força gravitacional é dado pela Equação

$$F_g = G \frac{m^2}{r^2}$$

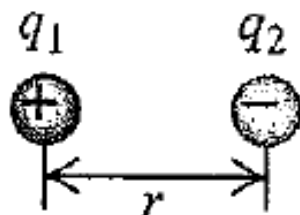
EXECUTAR: a razão entre a força elétrica e a força gravitacional é

$$\begin{aligned} \frac{F_e}{F_g} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0 G} \frac{q^2}{m^2} = \frac{9,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2}{6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2} \frac{(3,2 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{(6,64 \times 10^{-27} \text{ kg})^2} \\ &= 3,1 \times 10^{35} \end{aligned}$$

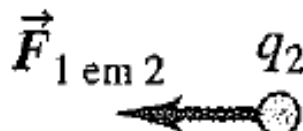
Exemplo 2

FORÇA ENTRE DUAS CARGAS PUNTIFORMES Duas cargas puntiformes, $q_1 = +25 \text{ nC}$ e $q_2 = -75 \text{ nC}$, estão separadas por uma distância igual a $3,0 \text{ cm}$ (Figura 21.12a). Determine o módulo, a direção e o sentido (a) da força elétrica que q_1 exerce sobre q_2 ; e (b) da força elétrica que q_2 exerce sobre q_1 .

(a) As duas cargas



(b) Diagrama do corpo livre para q_2



(c) Diagrama do corpo livre para q_1

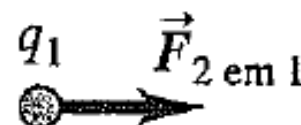


Figura 21.12 Qual é a força elétrica que q_1 exerce sobre q_2 e qual é a força elétrica que q_2 exerce sobre q_1 ? As forças gravitacionais são desprezíveis.

Exemplo 2 (Continuação)

EXECUTAR: (a) convertendo as cargas para coulombs e as distâncias para metros, obtemos o módulo da força que q_1 exerce sobre q_2 .

$$\begin{aligned} F_{1 \text{ em } 2} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1 q_2|}{r^2} \\ &= (9,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{|(+25 \times 10^{-9} \text{ C})(-75 \times 10^{-9} \text{ C})|}{(0,030 \text{ m})^2} \\ &= 0,019 \text{ N} \end{aligned}$$

Visto que as duas cargas possuem sinais opostos, a força é de atração, ou seja, a força que atua sobre q_2 está sobre a reta que une as duas cargas e possui sentido orientado para q_1 , como indica a Figura 21.12b.

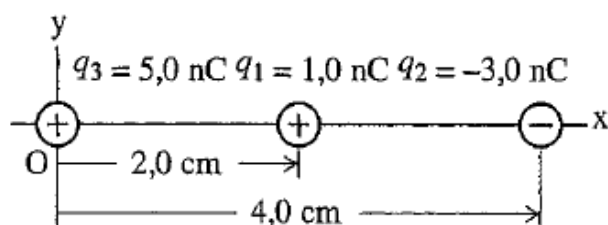
(b) Lembre-se de que a terceira lei de Newton se aplica à força elétrica. Embora as duas cargas possuam módulos diferentes, o módulo da força elétrica que q_2 exerce sobre q_1 é *igual* ao módulo da força que q_1 exerce sobre q_2 :

Exemplo 3

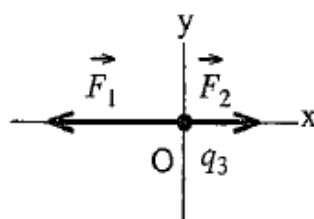
SOMA VETORIAL PARA FORÇAS ELÉTRICAS COLINEARES

Duas cargas puntiformes estão localizadas no lado positivo do eixo Ox de um sistema de coordenadas. A carga $q_1 = 1,0 \text{ nC}$ está localizada a $2,0 \text{ cm}$ da origem, e a carga $q_2 = -3,0 \text{ nC}$ está localizada a $4,0 \text{ cm}$ da origem. Qual é a força total exercida por essas duas cargas sobre uma carga $q_3 = 5,0 \text{ nC}$ localizada na origem? As forças gravitacionais são desprezíveis.

(a) Nosso diagrama da situação



(b) Diagrama do corpo livre para q_3



$$\begin{aligned} F_{1 \text{ em } 3} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1 q_3|}{r^2} \\ &= (9,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(1,0 \times 10^{-9} \text{ C})(5,0 \times 10^{-9} \text{ C})}{(0,020 \text{ m})^2} \\ &= 1,12 \times 10^{-4} \text{ N} = 112 \mu\text{N} \end{aligned}$$

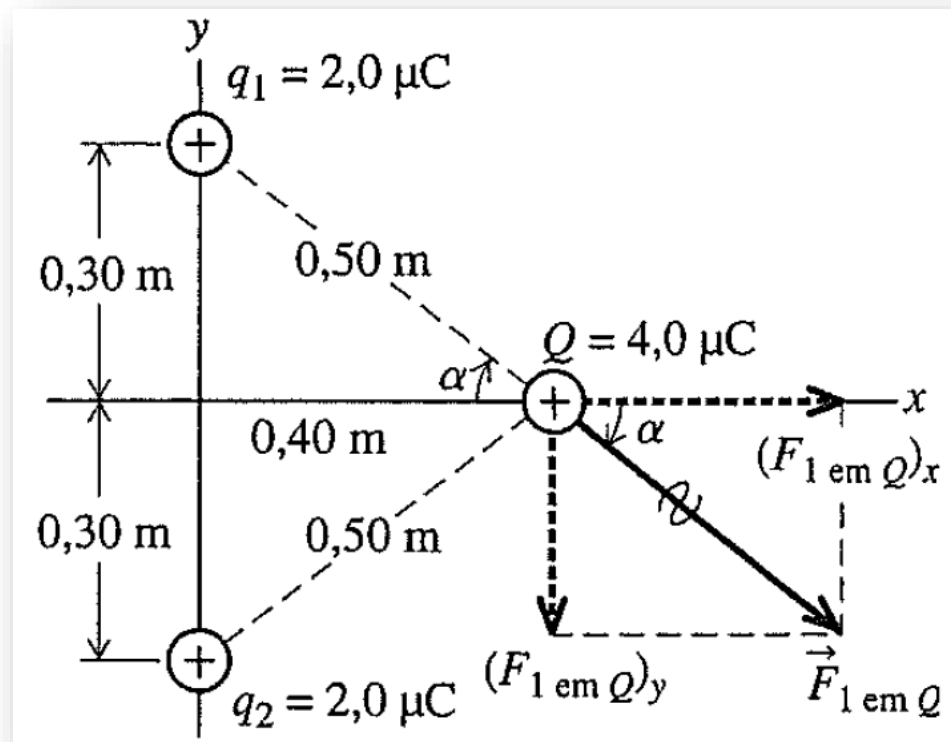
$$\begin{aligned} F_{2 \text{ em } 3} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_2 q_3|}{r^2} \\ &= (9,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(3,0 \times 10^{-9} \text{ C})(5,0 \times 10^{-9} \text{ C})}{(0,040 \text{ m})^2} \\ &= 8,4 \times 10^{-5} \text{ N} = 84 \mu\text{N} \end{aligned}$$

$$F_x = -112 \mu\text{N} + 84 \mu\text{N} = -28 \mu\text{N}$$

Portanto, a força total que atua sobre q_3 é orientada para a esquerda e possui módulo igual a $28 \mu\text{N} = 2,8 \times 10^{-5} \text{ N}$.

Exemplo 4

SOMA VETORIAL PARA FORÇAS ELÉTRICAS EM UM PLANO Duas cargas puntiformes positivas iguais $q_1 = q_2 = 2,0 \mu\text{C}$ estão localizadas em $x = 0, y = 0,30 \text{ m}$ e $x = 0, y = -0,30 \text{ m}$, respectivamente. Determine o módulo, a direção e o sentido da força elétrica total (resultante) que essas cargas exercem sobre uma terceira carga puntiforme $Q = 4,0 \mu\text{C}$ em $x = 0,40 \text{ m}, y = 0$.



Exemplo 4 (Continuação)

$$F_{1 \text{ em } Q} = (9,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(4,0 \times 10^{-6} \text{ C})(2,0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0,50 \text{ m})^2}$$

$$= 0,29 \text{ N}$$

$$(F_{1 \text{ em } Q})_x = (F_{1 \text{ em } Q}) \cos \alpha = (0,29 \text{ N}) \frac{0,40 \text{ m}}{0,50 \text{ m}} = 0,23 \text{ N}$$

$$(F_{1 \text{ em } Q})_y = -(F_{1 \text{ em } Q}) \sin \alpha = -(0,29 \text{ N}) \frac{0,30 \text{ m}}{0,50 \text{ m}} = -0,17 \text{ N}$$

Usando um raciocínio de simetria vemos que o componente x é o mesmo que o da carga superior, porém o componente y possui sentido contrário ao da carga superior.

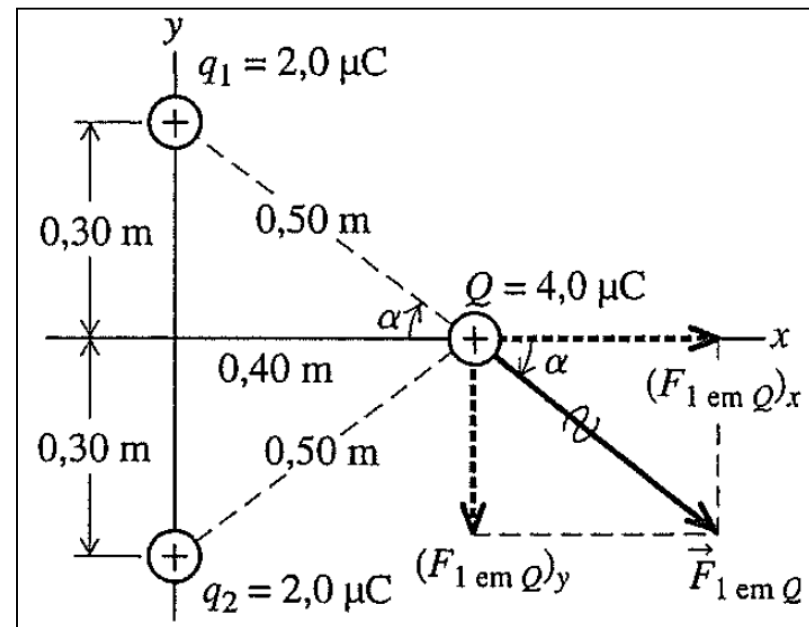
AVALIAR: a força total sobre Q aponta em um sentido que não se afasta diretamente de q_1 nem de q_2 . Em vez disso, esse sentido é uma acomodação que aponta para fora do sistema das cargas q_1 e q_2 . Você é capaz de constatar que a força total *não* apontaria no sentido positivo de x se q_1 e q_2 não fossem iguais ou se a disposição geométrica das alterações não fosse tão simétrica?

$$F_x = 0,23 \text{ N} + 0,23 \text{ N} = 0,46 \text{ N}$$

$$F_y = -0,17 \text{ N} + 0,17 \text{ N} = 0$$

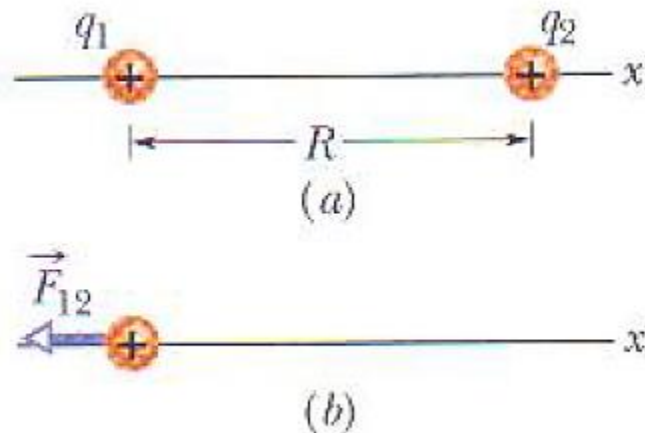
Exemplo 5: Para refletir

Teste sua compreensão da Seção Considere que a carga q_2 no Exemplo 4 fosse $-2,0 \mu\text{C}$. Nesse caso, a força elétrica total sobre Q (i) apontaria no sentido positivo de x ; (ii) apontaria no sentido negativo de x ; (iii) apontaria no sentido positivo de y ; (iv) apontaria no sentido negativo de y ; (v) seria igual a zero; (vi) nenhuma das alternativas. ■



Exemplo 6 (a) — páginas 8 e 9

(a) A Figura 21-9a mostra duas partículas positivamente carregadas situadas em pontos fixos do eixo x . As cargas são $q_1 = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$ e $q_2 = 3,20 \times 10^{-19} \text{ C}$, e a distância entre as cargas é $R = 0,0200 \text{ m}$. Determine o módulo e a orientação da força eletrostática \vec{F}_{12} exercida pela partícula 2 sobre a partícula 1.



$$\begin{aligned}
 F_{12} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{R^2} \\
 &= (8,99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \\
 &\quad \times \frac{(1,60 \times 10^{-19} \text{ C})(3,20 \times 10^{-19} \text{ C})}{(0,0200 \text{ m})^2} \\
 &= 1,15 \times 10^{-24} \text{ N}.
 \end{aligned}$$

$$\vec{F}_{12} = -(1,15 \times 10^{-24} \text{ N})\hat{i}.$$

Diagrama de corpo livre

Exemplo 6 (b) — páginas 8 e 9

(b) A Fig. 21-9c é idêntica à Fig. 21-9a, exceto pelo fato de que agora existe uma partícula 3 no eixo x entre as partículas 1 e 2. A partícula 3 tem uma carga $q_3 = -3,20 \times 10^{-19}$ C e está a uma distância $3R/4$ da partícula 1. Determine a força eletrostática $\vec{F}_{1,\text{tot}}$ exercida sobre a partícula 1 pelas partículas 2 e 3.

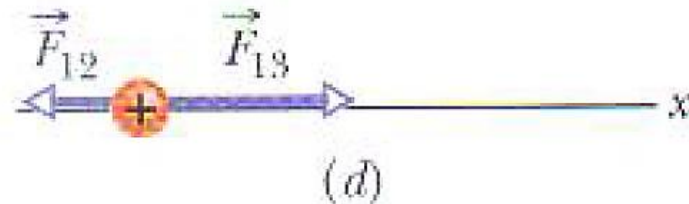
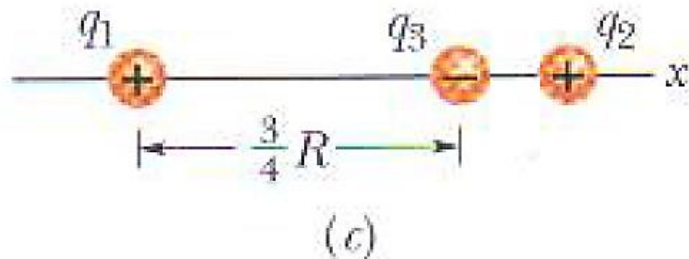


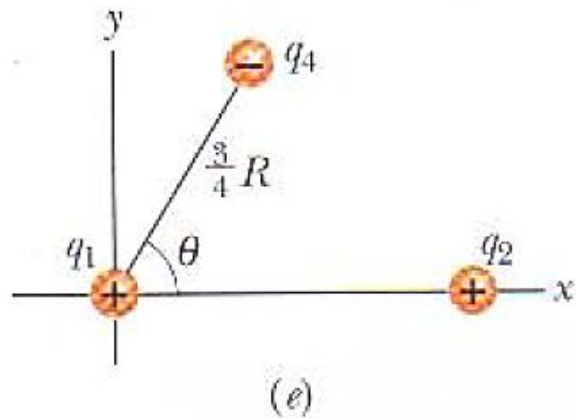
Diagrama de corpo livre

$$\begin{aligned}
 F_{13} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_3|}{(\frac{3}{4}R)^2} \\
 &= (8,99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \\
 &\quad \times \frac{(1,60 \times 10^{-19} \text{ C})(3,20 \times 10^{-19} \text{ C})}{(\frac{3}{4})^2(0,0200 \text{ m})^2} \\
 &= 2,05 \times 10^{-24} \text{ N}.
 \end{aligned}$$

$$\vec{F}_{13} = (2,05 \times 10^{-24} \text{ N})\hat{i}.$$

$$\begin{aligned}
 \vec{F}_{1,\text{tot}} &= \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} \\
 &= -(1,15 \times 10^{-24} \text{ N})\hat{i} + (2,05 \times 10^{-24} \text{ N})\hat{i} \\
 &= (9,00 \times 10^{-25} \text{ N})\hat{i}. \quad \text{(Resposta)}
 \end{aligned}$$

Exemplo 6 (c) — páginas 8 e 9



(c) A Fig. 21-9e é idêntica à Fig. 21-9a, exceto pelo fato de que agora existe uma partícula 4. A partícula 4 tem uma carga $q_4 = -3,20 \times 10^{-19} \text{ C}$, está a uma distância $3R/4$ da partícula 1 e está sobre uma reta que faz um ângulo $\theta = 60^\circ$ com o eixo x . Determine a força de atração eletrostática $\vec{F}_{1,\text{tot}}$ exercida sobre a partícula 1 pelas partículas 2 e 4.

Método 2. Executar a soma vetorial em termos dos vetores unitários. Em primeiro lugar, escrevemos \vec{F}_{14} na forma

$$\vec{F}_{14} = (F_{14} \cos \theta) \hat{i} + (F_{14} \sin \theta) \hat{j}.$$

Fazendo $F_{14} = 2,05 \times 10^{-24} \text{ N}$ e $\theta = 60^\circ$, temos:

$$\vec{F}_{14} = (1,025 \times 10^{-24} \text{ N}) \hat{i} + (1,775 \times 10^{-24} \text{ N}) \hat{j}.$$

Agora podemos executar a soma:

$$\begin{aligned} \vec{F}_{1,\text{tot}} &= \vec{F}_{12} + \vec{F}_{14} \\ &= -(1,15 \times 10^{-24} \text{ N}) \hat{i} \\ &\quad + (1,025 \times 10^{-24} \text{ N}) \hat{i} + (1,775 \times 10^{-24} \text{ N}) \hat{j} \\ &\approx (-1,25 \times 10^{-25} \text{ N}) \hat{i} + (1,78 \times 10^{-24} \text{ N}) \hat{j}. \end{aligned}$$

(Resposta)

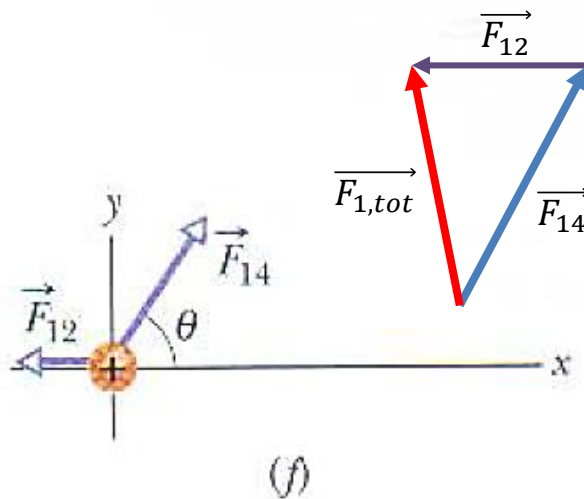
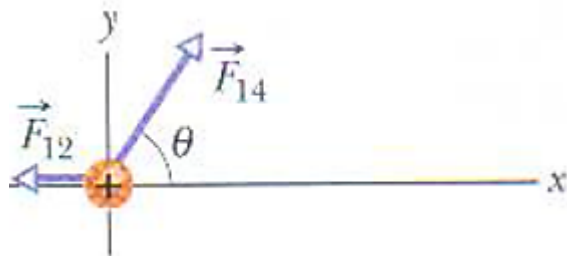


Diagrama de corpo livre

Exemplo 6 (c) — páginas 8 e 9



(c) A Fig. 21-9e é idêntica à Fig. 21-9a, exceto pelo fato de que agora existe uma partícula 4. A partícula 4 tem uma carga $q_4 = -3,20 \times 10^{-19} \text{ C}$, está a uma distância $3R/4$ da partícula 1 e está sobre uma reta que faz um ângulo $\theta = 60^\circ$ com o eixo x . Determine a força de atração eletrostática $\vec{F}_{1,\text{tot}}$ exercida sobre a partícula 1 pelas partículas 2 e 4.

Método 3. Executar a soma vetorial componente por componente. Somando as componentes x dos dois vetores, temos:

$$\begin{aligned} F_{1,\text{tot},x} &= F_{12,x} + F_{14,x} = F_{12} + F_{14} \cos 60^\circ \\ &= -1,15 \times 10^{-24} \text{ N} + (2,05 \times 10^{-24} \text{ N})(\cos 60^\circ) \\ &= -1,25 \times 10^{-25} \text{ N}. \end{aligned}$$

Somando as componentes y , temos:

$$\begin{aligned} F_{1,\text{tot},y} &= F_{12,y} + F_{14,y} = 0 + F_{14} \sin 60^\circ \\ &= (2,05 \times 10^{-24} \text{ N})(\sin 60^\circ) \\ &= 1,78 \times 10^{-24} \text{ N}. \end{aligned}$$

O módulo da força $\vec{F}_{1,\text{tot}}$ é dado por

$$F_{1,\text{tot}} = \sqrt{F_{1,\text{tot},x}^2 + F_{1,\text{tot},y}^2} = 1,78 \times 10^{-24} \text{ N}. \quad (\text{Resposta})$$

Para determinar a orientação de $\vec{F}_{1,\text{tot}}$, calculamos

$$\theta = \tan^{-1} \frac{F_{1,\text{tot},y}}{F_{1,\text{tot},x}} = -86,0^\circ.$$

Entretanto, este resultado não é razoável, já que a orientação de $\vec{F}_{1,\text{tot}}$ deve estar entre as orientações de \vec{F}_{12} e \vec{F}_{14} . Para encontrar o valor correto de θ somamos 180° , obtendo

$$-86,0^\circ + 180^\circ = 94,0^\circ. \quad (\text{Resposta})$$

Exemplo 7 — páginas 10 e 11

A Fig. 21-10a mostra duas partículas fixas: uma partícula de carga $q_1 = +8q$ na origem e uma partícula de carga $q_2 = -2q$ em $x = L$. Em que ponto (que não esteja a uma distância infinita das cargas) um próton pode ser colocado de modo a ficar *em equilíbrio* (sem estar submetido a nenhuma força)? Este equilíbrio é *estável* ou *instável*?

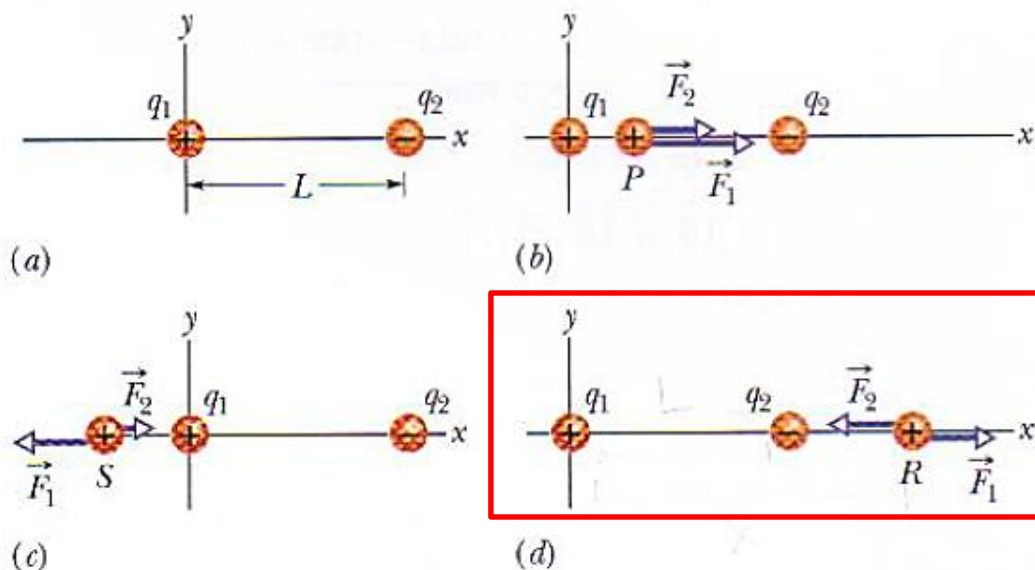


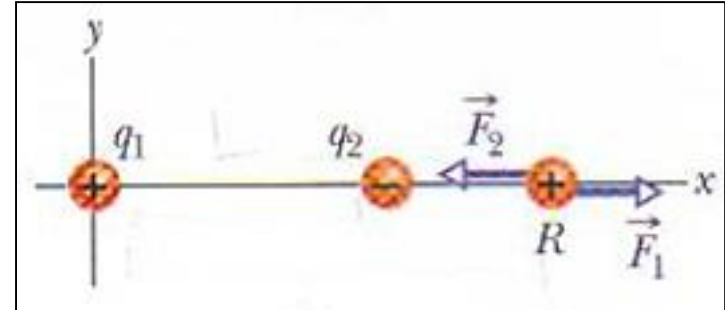
FIG. 21-10 (a) Duas partículas de cargas q_1 e q_2 são mantidas fixas sobre o eixo x , separadas por uma distância L . (b)–(d) Três posições possíveis de um próton, P , S e R . Nas três posições, \vec{F}_1 é a força que a partícula 1 exerce sobre o próton e \vec{F}_2 é a força que a partícula 2 exerce sobre o próton.

Se o próton estiver em um ponto do eixo x entre q_1 e q_2 , como o ponto P da Fig. 21-10b, \vec{F}_1 e \vec{F}_2 terão o mesmo sentido e não sentidos opostos, como desejamos. Se o próton estiver em um ponto do eixo x à esquerda de q_1 , como o ponto S da Fig. 21-10c, \vec{F}_1 e \vec{F}_2 terão sentidos opostos. Entretanto, de acordo com a Eq. 21-4, \vec{F}_1 e \vec{F}_2 não poderão ter módulos iguais; \vec{F}_1 será sempre maior que \vec{F}_2 , já que \vec{F}_1 será produzido por uma carga mais próxima (com menor valor de r) e maior módulo ($8q$, em comparação com $2q$).

Finalmente, se o próton estiver em um ponto do eixo x à direita de q_2 , como o ponto R da Fig. 21-9d, \vec{F}_1 e \vec{F}_2 terão novamente sentidos opostos. Entretanto, como agora a carga de maior módulo (q_1) está *mais distante* do próton que a carga de menor módulo, existe um ponto no qual \vec{F}_1 e \vec{F}_2 são iguais. Seja x a coordenada deste ponto e seja q_p a carga do próton.

Exemplo 7 (continuação) — páginas 10 e 11

A Fig. 21-10a mostra duas partículas fixas: uma partícula de carga $q_1 = +8q$ na origem e uma partícula de carga $q_2 = -2q$ em $x = L$. Em que ponto (que não esteja a uma distância infinita das cargas) um próton pode ser colocado de modo a ficar *em equilíbrio* (sem estar submetido a nenhuma força)? Este equilíbrio é *estável* ou *instável*?



$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{8qq_p}{x^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2qq_p}{(x-L)^2}$$

$$\left(\frac{x-L}{x} \right)^2 = \frac{1}{4}$$

$$\frac{x-L}{x} = \frac{1}{2}$$

$$x = 2L$$

O equilíbrio no ponto $x = 2L$ é instável. Quando o próton é deslocado para a esquerda em relação ao ponto R , F_1 e F_2 aumentam, mas F_2 aumenta mais (porque q_2 está mais próxima que q_1) e a força resultante faz com que o próton continue a se mover para a esquerda até se chocar com a carga q_2 . Quando o próton é deslocado para a direita em relação ao ponto R , F_1 e F_2 diminuem, mas F_2 diminui mais e a força resultante faz com que o próton continue a se mover indefinidamente para a direita. Se o equilíbrio fosse estável, o próton voltaria à posição inicial depois de ser deslocado ligeiramente para a esquerda ou para a direita.

Exemplo 8 — página 11

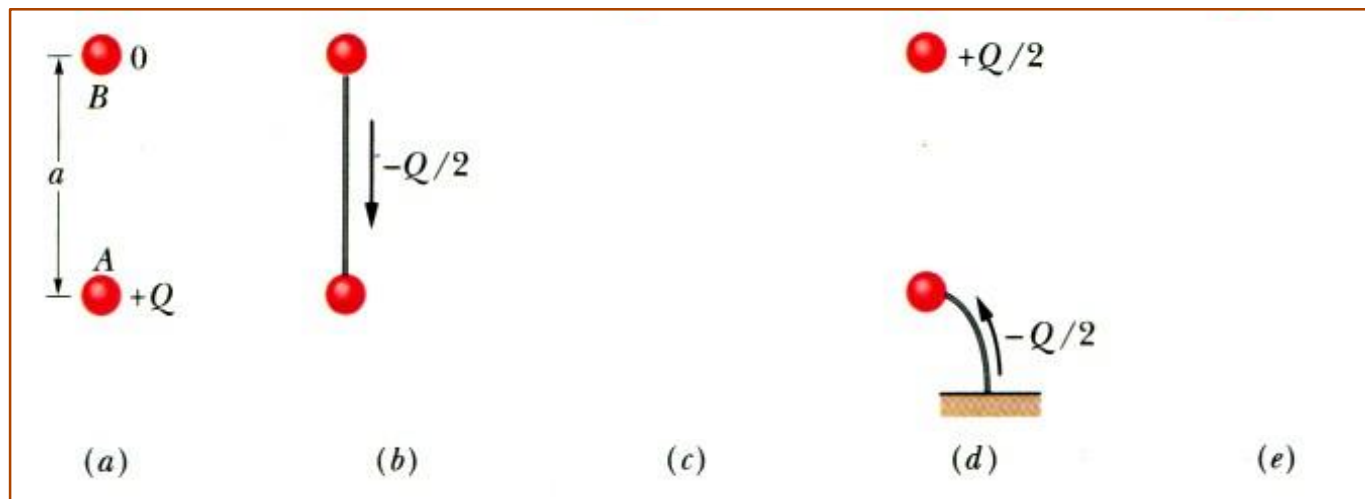
Duas esferas condutoras idênticas, eletricamente isoladas e bem afastadas (separadas por uma distância a muito maior que os seus raios).

Suponha que a *carga induzida nas esferas possa ser desprezada* porque as esferas estão muito afastadas.

Qual é a força eletrostática entre as esferas após as situações:

(b), ou seja, depois que o fio (condutor suficientemente fino para que a carga acumulada seja desprezada) é removido.

e (d), ou seja, depois que a esfera A é ligada momentaneamente à terra e, em seguida, a ligação à terra é removida?



Exemplo 8 (continuação) — página 11

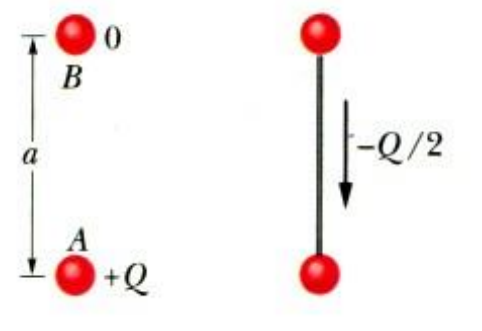
Duas esferas condutoras idênticas, eletricamente isoladas e bem afastadas (separadas por uma distância a muito maior que os seus raios).

Suponha que a carga induzida nas esferas possa ser desprezada porque as esferas estão muito afastadas.

Qual é a força eletrostática entre as esferas após as situações:

(b), ou seja, depois que o fio (condutor suficientemente fino para que a carga acumulada seja desprezada) é removido.

e (d), ou seja, depois que a esfera A é ligada momentaneamente à terra e, em seguida, a ligação à terra é removida?



(a)
(b)
(c)

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{(Q/2)(Q/2)}{a^2} = \frac{1}{16\pi\epsilon_0} \left(\frac{Q}{a}\right)^2.$$

Exemplo 8 (continuação) — página 11

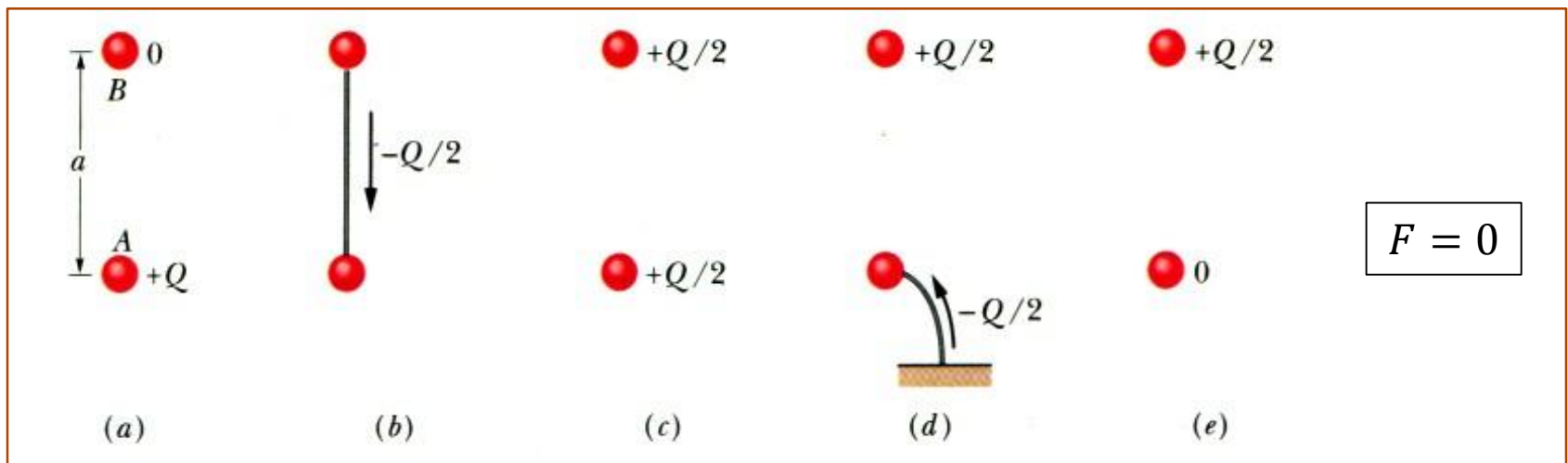
Duas esferas condutoras idênticas, eletricamente isoladas e bem afastadas (separadas por uma distância a muito maior que os seus raios).

Suponha que a carga induzida nas esferas possa ser desprezada porque as esferas estão muito afastadas.

Qual é a força eletrostática entre as esferas após as situações:

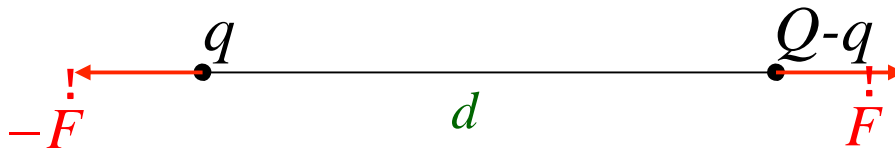
(b), ou seja, depois que o fio (condutor suficientemente fino para que a carga acumulada seja desprezada) é removido.

e (d), ou seja, depois que a esfera A é ligada momentaneamente à terra e, em seguida, a ligação à terra é removida?



Exemplo 9

Da carga Q que uma pequena esfera contém inicialmente, uma parte q 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?



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

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

Dúvidas ??



Indicações de Outras Bibliografias:

[UnivespTV e Me Salva \(Youtube - Física - Eletrostática\)](#)

<http://fisicaevestibular.com.br/novo/eletricidade/eletrostatica/carga-eletrica-e-processos-de-eletrizacao/>

Lista Complementar

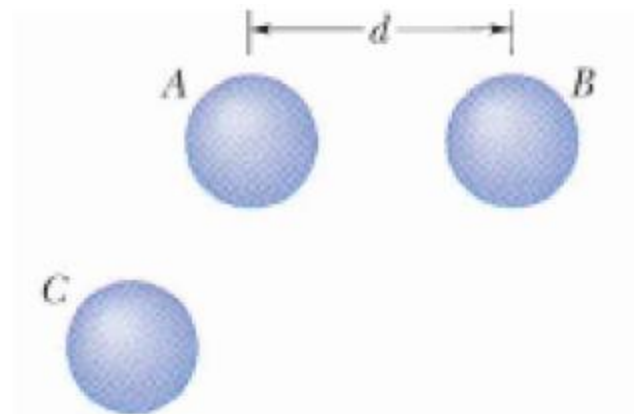
Exercícios Adicionais



Exercício (Problema 67 – Halliday)

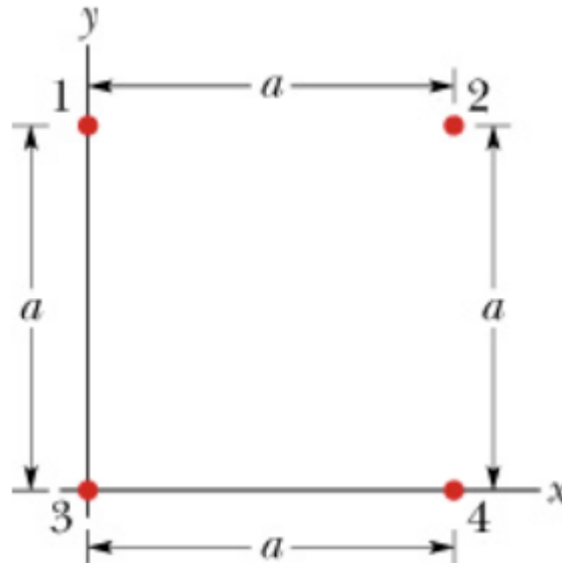
As cargas iniciais das três esferas condutoras idênticas A, B e C da figura ao lado são Q , $-Q/4$ e $Q/2$, respectivamente. A carga Q é igual a $2,0 \times 10^{-14} \text{ C}$. As esferas A e B são mantidas fixas, com uma distância entre seus centros de $d=1,2 \text{ m}$, que é muito maior que o raio das esferas. A esfera C é colocada primeiro em contato com a esfera A e depois com a esfera B, antes de ser removida. Qual é o módulo da força eletrostática entre as esferas A e B?

$$F = k \frac{(3\frac{q}{4})_A (\frac{q}{4})_B}{d^2} = 4,68 \times 10^{-19} \text{ N}$$



Exercício (Problema 62 – Halliday)

Na figura ao lado, quatro partículas formam um quadrado. As cargas são $q_1 = +Q$, $q_2 = q_3 = q$ e $q_4 = -2Q$. Qual é o valor da relação q/Q se a força eletrostática total sobre a partícula 1 é zero?



Exercício

21.24 Duas cargas, uma de $2,50 \mu\text{C}$ e outra de $-3,50 \mu\text{C}$, são colocadas no eixo x , uma na origem e outra em $x = 0,600 \text{ m}$, como indica a Figura 21.36. Determine a posição sobre o eixo x em que a força resultante sobre a pequena carga $+q$ será igual a zero.

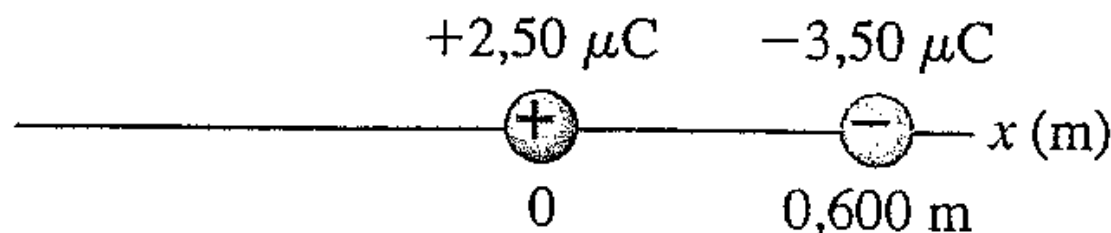


Figura 21.36 Exercício 21.24.

Resolução do Exercício Anterior

21.24 Duas cargas, uma de $2,50 \mu\text{C}$ e outra de $-3,50 \mu\text{C}$, são colocadas no eixo x , uma na origem e outra em $x = 0,600 \text{ m}$, como indica a Figura 21.36. Determine a posição sobre o eixo x em que a força resultante sobre a pequena carga $+q$ será igual a zero.

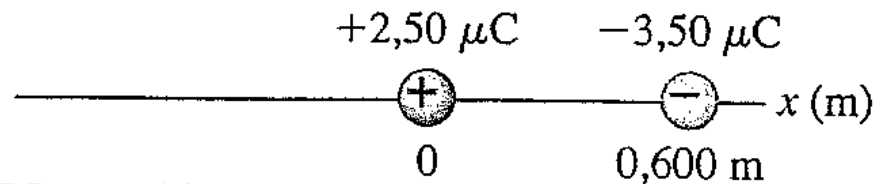


Figura 21.36 Exercício 21.24.

21.24. IDENTIFY: Apply $F = \frac{k|qq'|}{r^2}$ to find the force of each charge on $+q$. The net force is the vector sum of the individual forces.

SET UP: Let $q_1 = +2.50 \mu\text{C}$ and $q_2 = -3.50 \mu\text{C}$. The charge $+q$ must be to the left of q_1 or to the right of q_2 in order for the two forces to be in opposite directions. But for the two forces to have equal magnitudes, $+q$ must be closer to the charge q_1 , since this charge has the smaller magnitude. Therefore, the two forces can combine to give zero net force only in the region to the left of q_1 . Let $+q$ be a distance d to the left of q_1 , so it is a distance $d + 0.600 \text{ m}$ from q_2 .

EXECUTE: $F_1 = F_2$ gives $\frac{kq|q_1|}{d^2} = \frac{kq|q_2|}{(d + 0.600 \text{ m})^2}$. $d = \pm \sqrt{\frac{|q_1|}{|q_2|}}(d + 0.600 \text{ m}) = \pm(0.8452)(d + 0.600 \text{ m})$. d must

be positive, so $d = \frac{(0.8452)(0.600 \text{ m})}{1 - 0.8452} = 3.27 \text{ m}$. The net force would be zero when $+q$ is at $x = -3.27 \text{ m}$.

EVALUATE: When $+q$ is at $x = -3.27 \text{ m}$, \vec{F}_1 is in the $-x$ direction and \vec{F}_2 is in the $+x$ direction.

BONS ESTUDOS !!!

Prof. Victor M. Miranda