AULA

37

Atração fatal

Ernesto atritou um canudo de refresco com um pedaço de papel higiênico. Depois colocou o canudo contra uma parede, enquanto Roberto observava.

– Olha como ele fica grudado!

– É a força eletrostática. As cargas do canudo fazem aparecer, na parede, cargas contrárias. É o fenômeno da indução – diz Roberto.

– Ainda não estou entendendo.

Roberto faz um desenho (Figura 1) enquanto fala:

– As cargas negativas do canudo empurram as cargas negativas da parede. Então, na parede, perto do canudo, vão ficar cargas positivas. Essas cargas positivas da parede atraem as cargas negativas do canudo. Então, o canudo é atraído pela parede e fica grudado nela.

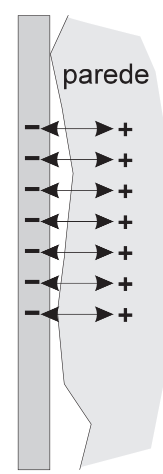


Figura 1

– Como se fosse um ímã?

– Como se fosse um ímã. Mas não é um ímã. Nem a parede nem o canudo estão imantados. Eles estão eletrizados. Essas forças elétricas, as forças magnéticas e a força gravitacional são parecidas, mas são forças diferentes.

– É, mas nesse caso só a parede está puxando. Como o canudo não pode entrar na parede, fica grudado nela. Certo? Mas, e se duas coisas estivessem puxando o canudo? Para onde ele iria?

– Para responder a isso podemos montar um aparelhinho parecido com o pêndulo eletrostático.

A força elétrica como um vetor

Um pêndulo eletrostático modificado pode nos dar uma boa idéia do que é a força eletrostática. Se no lugar do disco de papel de alumínio colocarmos uma flecha de papel, como aparece na Figura 2, já teremos o que necessitamos.

A flecha é feita de papel comum – que, como vimos, comporta-se como um condutor. Na sua extremidade existe um pedaço de canudo que serve como contrapeso e também para segurar a flecha quando quisermos carregá-la por indução.

Vamos agora carregar a flecha por indução. Para isso, seguramos a flecha com dois dedos (Figura 3), tocamos o papel com outro dedo e aproximamos o canudo. Em seguida, retiramos o dedo e o canudo. Lembre-se, isso deve ser feito exatamente nessa ordem: primeiro o dedo, depois o canudo! Agora, se você aproximar o canudo da flecha, vai ver que a flecha segue o canudo, mostrando a direção da força. A flecha é atraída pelo canudo, pois está com carga contrária às cargas dele. Lembre-se: quando carregamos um objeto por indução usando um corpo carregado positivamente, o objeto vai ficar carregado negativamente e vice-versa.

Esse aparelhinho que mostra a direção da força pode ser chamado de vetor.

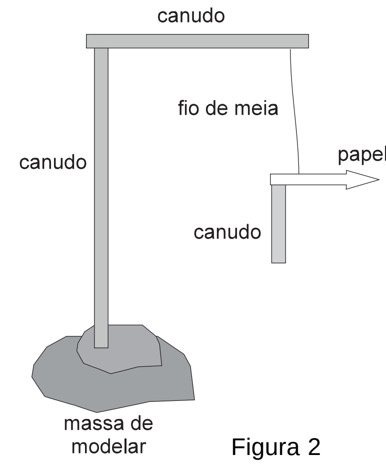


Figura 2

Agora estamos em condições de responder à questão de Ernesto. Vamos carregar o vetor mais uma vez, por indução, usando um canudo de refresco. Em seguida, colocamos o canudo em frente ao vetor. A flecha vai apontar o canudo, pois essa é a direção da força.

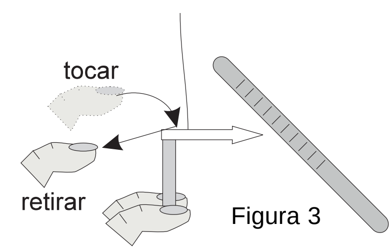


Figura 3

Vamos colocar mais um canudo carregado perto do vetor (ver Figura 4).

Temos, portanto, dois objetos atraindo a flecha. Para onde ela vai? Isso dependerá do canudo que estiver mais carregado. Mas, de qualquer maneira, as duas forças se somam e a flecha aponta para a direção da resultante delas. Essa é uma maneira de mostrar que a força elétrica, como todas as forças, é um vetor. Ela tem um valor, uma direção e um sentido.

Mas não basta conhecer a direção da força elétrica que existe entre duas cargas. Precisamos saber qual é seu valor.

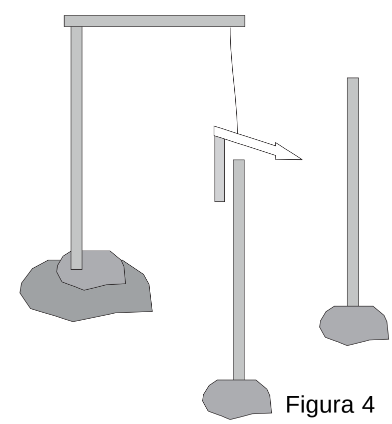


Figura 4

Quem descobriu como calcular a força que atua entre dois objetos carregados eletricamente foi Charles A. Coulomb, em 1784 – 85. Ele mostrou que tanto as forças magnéticas como as elétricas variavam "com o inverso do quadrado das distâncias", ou seja, obedeciam à leis que eram análogas à lei da gravitação de Newton. Para isso, Coulomb usou um aparelho semelhante ao que está apresentado na Figura 5.

Nesse figura estão representadas duas esferas carregadas positivamente. Uma delas é fixa, a esfera A, e a outra (B) está suspensa por um fio de quartzo. Quando a esfera A é aproximada da esfera B, esta é repelida e torce o fio, exercendo uma força sobre ele. Assim, se soubermos com que ângulo o fio girou, poderemos calcular a força que estava sendo aplicada no fio e, portanto, a força existente entre as duas esferas.

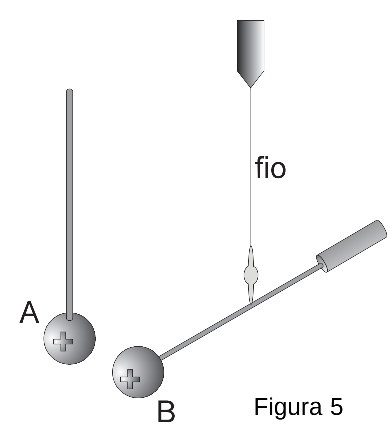


Figura 5

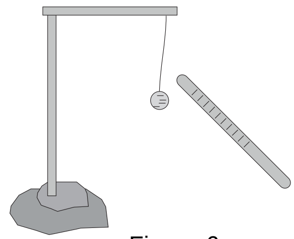


Figura 6a

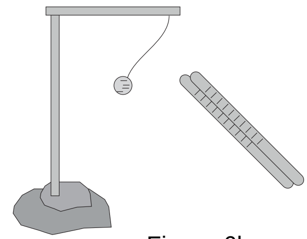


Figura 6b

Se carregarmos um pêndulo elétrico por contato, usando um canudo, e, em seguida, aproximarmos o canudo do pêndulo, sabemos que o pêndulo vai ser repelido (Figura 6a). Se juntarmos ao primeiro canudo um novo canudo carregado da mesma maneira, veremos que o pêndulo vai ser repelido com mais intensidade (Figura 6b). Ou seja:

A força elétrica que existe entre dois corpos carregados eletricamente depende diretamente da quantidade de cargas de cada um deles.

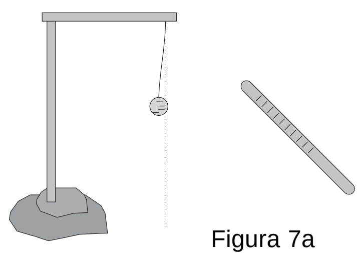


Figura 7a

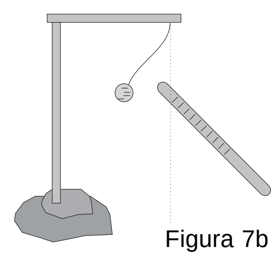


Figura 7b

Quando aproximamos um canudo carregado de um pêndulo também carregado, veremos que, quanto **menor** for a distância entre o pêndulo e o canudo, **maior** vai ser a força (Figura 7). Ou seja: a força depende inversamente da distância. Na realidade, Coulomb mostrou que a força depende inversamente do quadrado da distância, isto é:

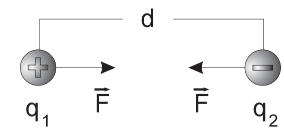
- se dividirmos a distância por 2, a força aumenta 4 vezes;
- se dividirmos a distância por 3, a força aumenta 9 vezes;
- se dividirmos a distância por 4, a força aumenta 16 vezes;

e assim por diante. Então, podemos dizer que:

A força elétrica que existe entre dois corpos carregados eletricamente depende inversamente do quadrado da distância que separa esses dois corpos.

Mas, como medir a quantidade de cargas que existe num corpo? A unidade de quantidade de cargas é o **coulomb**. Sabemos que um corpo está eletrizado quando ele tem excesso de elétrons ou deficiência de elétrons. Se um corpo tiver excesso ou falta de **$6{,}25 \cdot 10^{18}$ életrons**, sua carga será de 1 coulomb. Um coulomb é uma carga extraordinariamente grande. Para dar um exemplo, as cargas elétricas das nuvens durante tempestades, que são capazes de provocar faíscas elétricas formidáveis, são da ordem de uns 20 coulombs.

A representação matemática da lei de Coulomb



Vamos supor que tenhamos duas cargas eletricas q_1 e q_2 separadas por uma distância d. Vimos que a força eletrostática depende do valor de q_1, do valor de q_2 e do inverso do quadrado da distância entre essas cargas. Poderíamos escrever que o valor da força elétrica $\vec{F}$ é **proporcional** a essas grandezas, ou seja:

$$\boxed{F \propto \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2}}$$

Essa é a maneira de dizer que existe uma proporcionalidade entre F e as outras grandezas. A relação acima seria lida da seguinte maneira:

A força elétrica (ou eletrostática) é proporcional aos valores das cargas e inversamente proporcional à distância entre elas.

Essa relação vale para qualquer meio no qual estejam colocadas as cargas. Se as cargas estivessem no vácuo, existiria uma constante de proporcionalidade, **k**, entre F e os outros valores. Se o meio fosse a água ou um outro material qualquer, o valor da constante seria diferente. Os cientistas fizeram inúmeras medições dessas constantes e constataram que, se as cargas estivessem no vácuo, a constante de proporcionalidade seria:

$$k = 9{,}0 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$$

Agora estamos em condições de escrever a relação que nos permite calcular a força elétrica entre duas cargas quando elas estiverem no vácuo:

$$F = 9{,}0 \cdot 10^9 \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2}$$

Esse valor será aproximadamente o mesmo se as cargas estiverem no ar.

Força elétrica e força gravitacional

A lei de Coulomb, que nos permite calcular a força que existe entre duas cargas, é bastante semelhante à lei da gravitação universal de Newton. A forca gravitacional, F_g entre duas massas M e m é dada por:

$$\boxed{F_g = G \cdot \frac{M \cdot m}{d^2}}$$

Nessa relação, G, a constante da gravitação, vale $6{,}67 \cdot 10^{-11} \frac{N m^2}{kg^2}$

Note que as unidades de G são parecidas com as de k, a constante de proporcionalidade da lei de Coulomb.

– Matéria atrai matéria na razão direta das cargas e na razão inversa do quadrado da distância. Posso falar isso? – perguntou Ernesto.

– Na realidade é isso mesmo – respondeu Roberto.

– Mas a força elétrica é muito maior.

– Não estou entendendo! Como maior? Como podemos comparar?

– Deixe eu explicar melhor. Vamos calcular a força de atração elétrica e gravitacional entre dois corpos. Corpos que possuam, ao mesmo tempo, massa e carga. Quem pode servir bem para isso é um átomo de hidrogênio. Ele tem um elétron girando em torno de um próton. Tanto o próton como o elétron têm carga e massa. Então podemos comparar as duas forças. Para isso vamos precisar saber quanto valem a carga e a massa de cada um.

– Além da distância entre eles! – acrescentou Ernesto.

– É isso aí! Veja se você consegue esses valores no seu livro de Física. O valor das duas constantes a gente já sabe.

Depois de algum tempo, Ernesto volta satisfeito e mostra o que tinha copiado num papel.

massa do próton	=	$1{,}7 \cdot 10^{-27}$ kg
massa do elétron	=	$9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg
carga do elétron = carga do próton	=	$1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C
distância entre o elétron e o próton	=	$5{,}3 \cdot 10^{-11}$ m

– Bom, agora é fácil! Basta usar as duas leis: a de Newton para calcular a força gravitacional e a de Coulomb para calcular a força elétrica. As duas forças, nesse caso, são de atração. Aliás, essa é uma outra diferença entre as duas forças. A força gravitacional é sempre de atração, mas a força elétrica pode ser de repulsão. Vou calcular as duas forças! Vou chamar de F_g a força gravitacional e de F_e a força elétrica.

$$F_g = G \cdot \frac{m_{\text{próton}} \cdot m_{\text{elétron}}}{d^2} =$$

$$= \frac{6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2 \cdot 1{,}7 \cdot 10^{-27}\ \text{kg} \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31}\ \text{kg}}{(5{,}3 \cdot 10^{-11})^2} =$$

$$F_g = 3{,}7 \cdot 10^{-47}\ \text{N}$$

– A força elétrica vai ficar assim:

$$F_e = k \cdot \frac{Q_{\text{próton}} \cdot Q_{\text{elétron}}}{d^2} =$$

$$= \frac{9{,}0 \cdot 10^{9}\ \text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{C} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{C}}{(5{,}3 \cdot 10^{-11})^2} =$$

$$F_e = 8{,}2 \cdot 10^{-8}\ \text{N}$$

– Dividindo uma pela outra, teremos:

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{8{,}2 \cdot 10^{-8}}{3{,}7 \cdot 10^{-47}} \cong 2 \cdot 10^{39}$$

– Mas e esse número meio maluco, o que é?

– Ele representa quantas vezes uma força é maior do que a outra. Ele é um número muito grande. Quando comparamos o tamanho do Universo com o tamanho de um átomo, o número obtido é menor.

Passo a passo

1. Duas cargas positivas de $2{,}0 \cdot 10^{-7}$ C estão separadas por uma distância de 0,1m. Qual o valor da força elétrica que age em cada uma delas?

$$F = 9{,}0 \cdot 10^{9} \, \frac{2{,}0 \cdot 10^{-7} \cdot 2{,}0 \cdot 10^{-7}}{(0{,}1)^{2}} = 0{,}036\text{N}$$

As cargas vão se repelir com uma força de 0,036 N.

2. Uma carga negativa de $8 \cdot 10^{-8}$C está a uma distância de $2 \cdot 10^{-3}$m de uma carga positiva cujo valor é $5 \cdot 10^{-10}$C. Qual o valor da força eletrostática que age em cada uma delas?

$$F = 9{,}0 \cdot 10^{9} \, \frac{8 \cdot 10^{-8} \cdot 5 \cdot 10^{-10}}{(2 \cdot 10^{-3})^{2}} = 9 \cdot 10^{-2}\text{N}$$

Teremos então, entre as duas cargas, uma força atrativa de $9 \cdot 10^{-2}$N. Note que as duas cargas se atraem com forças iguais, apesar de as cargas de cada uma serem diferentes.

3. Três cargas elétricas positivas cujo valor é $4 \cdot 10^{-8}$C estão nos vértices de um triângulo equilátero de lado 3 cm (ver Figura 9). Qual o valor da força eletrostática que age em cada uma delas?

Cada uma das cargas exerce sobre a outra uma força igual. Então, bastará calcular uma das forças: as outras duas serão iguais. Vamos considerar a carga que está na parte superior da figura, a carga A. Ela vai ser repelida pelas duas cargas que estão na parte inferior e que agem sobre ela com as forças $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$. Essas duas forças somadas produzirão a força resultante $\vec{F}$ sobre a carga A. Nas cargas B e C vão aparecer forças com o mesmo valor de $\vec{F}$, e que podem ser calculadas de maneira análoga. Para calcular o valor da força $\vec{F}$ precisamos, antes, calcular os valores de $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$. O primeiro deles é o valor da força com que a carga que está em B empurra a carga que está em A. Então, como o valor de cada carga é $4 \cdot 10^{-8}$C e a distância entre elas é 3 cm, o valor da força $\vec{F}_1$ vai ser:

$$F_1 = 9 \cdot 10^{9} \, \frac{(4 \cdot 10^{-8})^{2}}{(3 \cdot 10^{-2})^{2}} = 1{,}6 \cdot 10^{-2}\text{C}$$

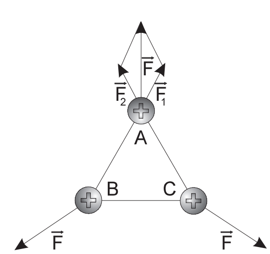


Figura 9

A força $\vec{F}_2$ é aquela que existe entre as cargas que estão nas posições A e C. Como os valores das cargas e das distâncias são exatamente os mesmos, o valor de $\vec{F}_2$ será o mesmo, ou seja:

$$F_2 = 1{,}6 \cdot 10^{-2}\ C$$

Observando a figura, vemos que $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$ formam entre si um ângulo de 60º. Então, para calcular a resultante entre essas duas forças, podemos usar a regra do paralelogramo, ou seja:

$$F_2 = F_1^2 + F_2^2 + 2 \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot \cos 60^{\circ}$$

$$F_2 = (1{,}6 \cdot 10^{-2})^2 + (1{,}6 \cdot 10^{-2})^2 + 2 \cdot (1{,}6 \cdot 10^{-2}) \cdot (1{,}6 \cdot 10^{-2}) \cdot (0{,}5)$$

$$F_2 = (1{,}6 \cdot 10^{-2})^2 + (1{,}6 \cdot 10^{-2})^2 + (1{,}6 \cdot 10^{-2})^2$$

$$F \cong 2{,}8 \cdot 10^{-2}\ N$$

Como a carga em cada um dos vértices é a mesma e o triângulo é equilátero, os valores das forças sobre as cargas nos outros vértices vão ser os mesmos.

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu:

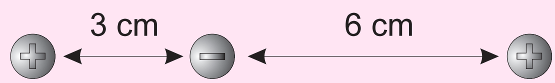
- a lei de Coulomb para cargas elétricas;
- a construir um dispositivo que nos permite visualizar o vetor força elétrica;
- quanto a força elétrica é maior do que a gravitacional.

Exercício 1

Uma carga positiva de $5 \cdot 10^{-10}$C está distante $4 \cdot 10^{-4}$m de uma outra carga, também positiva, cujo valor é $8 \cdot 10^{-10}$C. Qual vai ser a força entre elas?

Exercício 2

Duas cargas positivas de $6 \cdot 10^{-10}$C estão separadas por uma distância de 9 cm. Na mesma reta que une as duas, e a 3 cm de uma delas, existe uma carga negativa cujo valor é $3 \cdot 10^{-10}$C. Qual a força resultante que vai agir em cada uma das cargas?



Exercício 3

Três cargas positivas de valor $6 \cdot 10^{-8}$C estão nos vértices de um triângulo retângulo cujos lados medem, respectivamente, 3 cm, 4 cm e 5 cm. Qual o valor da força elétrica que age sobre a carga que está sobre a aresta do ângulo de 90^o?