

**Notas de aula e 1ª Série de Exercícios**

**1. ÁTOMOS E CARGA ELÉTRICA**

- (I) Vivemos em um Universo onde as coisas materiais são formadas por átomos. Um átomo, por sua vez, é formado por partículas elementares. O átomo não tem tamanho nem forma muito bem definidos; um modelo muito aproximado do mesmo consiste em um diminuto núcleo central (onde encontramos os prótons e os nêutrons), envolto por uma nuvem de elétrons.
- (II) A matéria que conhecemos é formada pela combinação de um número pequeno (cerca de cem) elementos químicos. Cada substância que conhecemos é formada por moléculas que contém um ou mais elementos químicos. Por exemplo, a água é uma substância formada por moléculas do tipo  $H_2O$ , onde dois átomos do elemento Hidrogênio (H) se combinam com um átomo do elemento Oxigênio (O).
- (III) O que diferencia um elemento químico do outro é o número de prótons existentes no núcleo do átomo correspondente. De modo geral, é preciso muita energia para se acrescentar ou retirar prótons dos núcleos, de modo que, em condições normais, a grande maioria dos elementos mais comuns são bastante estáveis. A nuvem de elétrons, por outro lado, pode ser alterada com relativa facilidade.
- (IV) Os prótons no núcleo e os elétrons ao redor possuem carga elétrica, que é uma propriedade que causa uma força de atração ou de repulsão entre eles. Os prótons possuem carga positiva (+) e os elétrons carga negativa (-). A regra da força eletrostática é que cargas de sinais contrários se atraem, e de sinais iguais se repelem. Assim, os prótons e os elétrons atraem-se mutuamente, ao passo que os prótons repelem um aos outros, assim como os elétrons também repelem entre si. A existência de átomos estáveis nessas condições é um enigma bastante complicado, cuja solução requer uma boa dose de mecânica quântica e de física nuclear.
- (V) A intensidade da força elétrica é enorme quando comparada com a força gravitacional, em condições normais. Por exemplo, a força de atração elétrica entre um próton e um elétron, em um átomo de hidrogênio, é cerca de  $10^{39}$  (cem octilhões) de vezes maior do que a força de atração gravitacional entre eles. Não notamos a força elétrica no dia-a-dia porque, normalmente, os corpos possuem a mesma quantidade de cargas positivas e negativas, ou seja, são neutros eletricamente. Quando isso não acontece, observamos fenômenos estranhos e mesmo espetaculares (como um pente que atrai pedacinhos de papel, faíscas, raios, choques).
- (VI) A menor quantidade de carga que existe é a carga do elétron, chamada de carga elementar, representada pela letra  $e$ . A carga do próton tem a mesma intensidade da carga do elétron, mas sinal oposto. Assim, o elétron tem carga  $-e$ , enquanto que o próton tem carga  $+e$ . (já as massas não são as mesmas; o próton é cerca de 1800 vezes mais massivo que o elétron).
- (VII) Os átomos, em condições puras, são neutros: tem o mesmo número de prótons e de elétrons (carga total zero). Quando um átomo perde elétrons, adquire carga positiva (excesso de prótons), e torna-se um íon positivo ou cátion. Quando um átomo ganha elétrons, adquire carga negativa (excesso de elétrons), e torna-se um íon negativo ou ânion. Alguns elementos preferem mesmo ganhar elétrons e existem como ânions; outros

preferem perder elétrons e existem como cátions; alguns poucos (nobres) preferem permanecer neutros. É esse gosto variado por elétrons que explica as inúmeras reações químicas que ocorrem na natureza entre os elementos, formando a infinidade de substâncias diferentes que conhecemos ou que criamos em laboratório e nas indústrias.

(VIII) O átomo mais simples e um dos mais importantes que existe é o de Hidrogênio (H), que tem um único próton no núcleo. O tamanho de um átomo de Hidrogênio é cerca de  $0,5 \text{ \AA}$  ( $5 \times 10^{-11} \text{ m}$ ). O hidrogênio neutro tem apenas um elétron ao redor do núcleo, mas ele pode perder esse elétron (tornando-se  $\text{H}^+$ ) ou ganhar outro (tornando-se  $\text{H}^-$ ). Na verdade, os átomos de H preferem combinar entre si, para dividir os elétrons, formando moléculas neutras  $\text{H}_2$ . Também dividem o elétron com muitos outros átomos diferentes, formando uma infinidade de substâncias importantes.

(IX) Já o átomo de Hélio, que tem dois prótons no núcleo, é nobre: é bastante difícil retirar ou acrescentar elétrons dele. Por isso o hélio é chamado de gás nobre.

(X) Alguns átomos comuns e importantes são (consulte a tabela periódica e verifique a posição dos mesmos):

elemento	símbolo	número atômico	estado (a 27° C e 1 atm)	comportamento elétrico
Hidrogênio	H	1	gás	isolante ( $\text{H}_2$ )
Carbono	C	6	sólido	isolante (diamante) condutor (grafite)
Nitrogênio	N	7	gás	isolante
Oxigênio	O	8	gás	isolante ( $\text{O}_2$ )
Sódio	Na	11	sólido	condutor
Alumínio	Al	13	sólido	condutor
Silício	Si	14	sólido	semicondutor
Ferro	Fe	26	sólido	condutor
Cobre	Cu	29	sólido	condutor
Prata	Ag	47	sólido	condutor
Ouro	Au	79	sólido	condutor
Chumbo	Pb	82	sólido	condutor

(XI) (*eletrização por atrito*) Os gregos antigos já sabiam que é possível transferir carga elétrica entre dois materiais quando se esfrega um no outro. Por exemplo, se uma barra de vidro é esfregada com um pano de seda, o vidro torna-se positivamente carregado (uma pequena fração de elétrons é transferida do vidro para o pano de seda). Algo semelhante ocorre quando voce atrita um pente de plástico no cabelo. Uma vez que os corpos estejam eletrizados, eles podem se atrair ou repelir mutuamente com uma força apreciável.

(XII) (*indução eletrostática*) Corpos eletrizados podem agir sobre outros corpos, por indução; eles são capazes de exercer uma força eletrostática que pode causar uma pequena separação de cargas em outro corpo. Assim, um pente de plástico, se atritado no cabelo, pode atrair pequenos pedaços de papel.

(XIII) Pode-se construir máquinas que geram uma grande separação de cargas por atrito (chamadas de geradores eletrostáticos), e com isso conseguir efeitos espetaculares (cabelos em pé, raios luminosos, etc.). Na natureza, o atrito entre partículas de gelo no interior das nuvens pode causar uma separação de cargas enorme, responsável pelos raios.



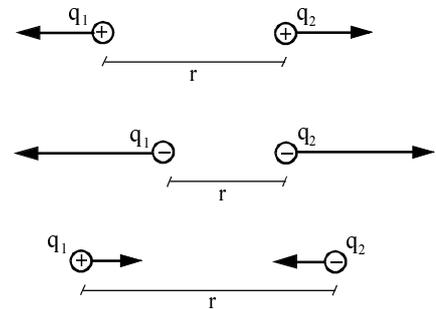
<http://thunder.msfc.nasa.gov/primer/primer2.html>

## 2. MEDIDAS DE FORÇAS ELÉTRICAS : A LEI DE COULOMB

(XIV) Por volta de 1784, o físico francês Charles Augustin Coulomb realizou uma série de experimentos cuidadosos e geniais para determinar como a força elétrica depende da quantidade de carga e da distância entre os corpos carregados. Ele chegou à conclusão de que a força elétrica diminui com o quadrado da distância entre os corpos, e é proporcional ao produto das quantidades de carga de cada corpo.

Quando os corpos tem dimensões pequenas comparadas com a distância entre eles, dizemos que as cargas são “pontuais”, e a lei de Coulomb se escreve, em unidades modernas (sistema SI):

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



A unidade SI de carga é o Coulomb (C) .

A constante k depende do meio onde as cargas se encontram.

No vácuo, o valor de k é  $8,99 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$  .

Note que a força entre as cargas é dirigida ao longo da linha reta que une as mesmas.

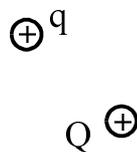
**Exercício 1:** Nos esquemas abaixo, são utilizadas duas cargas Q e q . Meça a distância entre elas e, em cada caso, calcule a força entre Q e q com dois significativos e indique essa força obedecendo a uma escala linear.



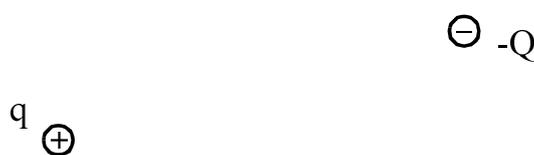
(a)



(b)



(c)



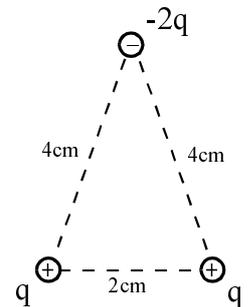
(XV) Para encontrar a força elétrica entre dois corpos extensos, divide-se os corpos em pequenas regiões, obtendo-se um sistema de cargas pontuais; aplica-se então a lei de Coulomb a cada par de cargas e a força total em cada corpo é encontrada pela soma vetorial das forças que agem em cada pequena região do mesmo. Em geral, isso implica em um cálculo bastante complicado.

**Exercício 2:** (a) Duas cargas de mesmo valor  $q$  repelem-se com uma força de  $20\text{N}$  quando separadas por uma distância de  $10\text{cm}$ . A partir dessa informação, calcule a intensidade e a direção da força resultante sobre a carga  $q$  (inferior direita) na disposição de cargas abaixo:

Resp.:  $500\text{N}$ , formando  $29^\circ$  com a horizontal

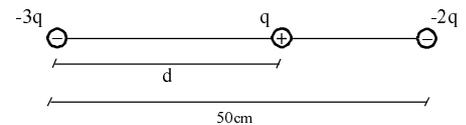
(b) Qual o valor da carga  $q$ , com dois significativos?

Resp.:  $4,7\mu\text{C}$



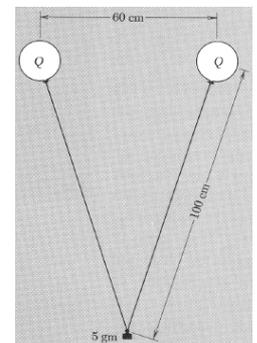
**Exercício 3:** Encontre a distância  $d$  (três significativos) de modo que a força sobre a carga do meio seja zero:

Resp.:  $27,5\text{cm}$



**Exercício 4:** (Purcell, 1965, adaptado) Dois balões iguais, cheios de hélio, amarrados a um peso de  $5\text{g}$ , flutuam em equilíbrio como ao lado. Há uma carga  $Q$  em cada balão. Qual o valor de  $Q$  em  $\mu\text{C}$ ? (use  $g = 9,8\text{m/s}^2$ )

Resp.:  $0,56\mu\text{C}$



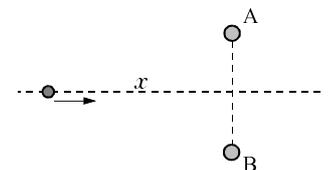
**Exercício 5:** Uma carga  $q$  está a uma distância  $d$  de uma barra homoganeamente carregada com uma densidade linear de carga  $\lambda$  (Coulomb/metro), como no esquema ao lado. O comprimento da barra é  $L$ . Calcule a força de repulsão elétrica sobre  $q$ . Se  $d \gg L$ , podemos tratar o problema como duas cargas pontuais. Verifique esse limite na fórmula.



Resp.:  $F = 9 \times 10^9 \lambda q \frac{L}{d(L+d)}$

**Exercício 6:** (Purcell, 1965, adaptado) Uma pequena partícula carregada é lançada em alta velocidade para que passe exatamente no meio de duas cargas iguais A e B, fixas a uma distância  $d$  uma da outra. Em que posição  $x$  a força sobre a partícula será máxima?

Resp.:  $x = \frac{d}{\sqrt{2}}$



(XVI) O cientista americano Robert A. Millikan, em 1909, realizou uma série de experimentos onde mediu pequenas quantidades de carga em gotículas de óleo. As medidas mostraram que as cargas eram sempre múltiplas de um mesmo valor, que mais tarde foi reconhecido como sendo o valor da carga do elétron (a menor quantidade de carga que pode ser observada, em condições normais). Millikan recebeu o prêmio Nobel de física em 1923 por essas descobertas. Em unidades SI, a carga do elétron é bastante pequena:

$$e = -1,60 \times 10^{-19}\text{C} \quad (\text{carga elementar})$$

A natureza granular (quantizada) da carga elétrica não é percebida em situações comuns do dia a dia, porque uma quantidade enorme de elétrons é envolvida nos fenômenos elétricos corriqueiros. O exercício seguinte ilustra esse fato, e explica porque não precisamos considerar os elétrons individualmente na maioria das aplicações práticas. Ilustra também a enorme intensidade da força elétrica que pode surgir quando não há neutralidade de cargas.

Na maioria das aplicações corriqueiras, são envolvidas cargas da ordem de  $\mu\text{C}$  ( $10^{-6}\text{C}$ ), e isso já corresponde a uma quantidade enorme de elétrons.

**Exercício 7:** A densidade do cobre é  $8,9\text{g/cm}^3$ . Considere duas pequenas bolinhas maciças de cobre de diâmetro  $1\text{mm}$ . Cada átomo de cobre neutro tem 29 elétrons, e pelo menos dois desses elétrons são partilhados entre os vários átomos que compõem as bolinhas (chamados de *elétrons de valência*); isto é, cada átomo de cobre contribui com dois elétrons para formar uma nuvem eletrônica que se espalha quase que livremente dentro do material. Dessa maneira, é razoavelmente fácil remover ou acrescentar alguns elétrons de um pedaço de cobre.

(a) Consultando a tabela periódica e os manuais de química, descobrimos que  $6,02 \times 10^{23}$  átomos de cobre tem massa  $63\text{g}$ . Quantos átomos de cobre há em uma bolinha de cobre de diâmetro  $1\text{mm}$ ?

*Resp:  $4,5 \times 10^{19}$  átomos (aproximadamente 45 quintilhões)*

(b) Suponha que uma das bolinhas seja eletrizada, de modo que perca alguns elétrons (*como o cobre é um bom condutor de eletricidade, não é fácil manter essa eletrização, porque a bolinha de cobre troca carga facilmente com qualquer coisa que entre em contato com ela*). Com muito cuidado, essa bolinha eletrizada é posta em contato com outra bolinha idêntica, porém neutra. Assim, o excesso de carga fica dividido igualmente entre as duas. Depois do contato, elas tendem a se repelir, porque vão conter cargas iguais e de mesmo sinal. Calcule a porcentagem de elétrons, em relação ao total dos elétrons disponíveis, que foi retirado da bolinha inicialmente eletrizada, de modo que a força de repulsão entre as bolinhas seja igual a  $600\text{N}$  (correspondente ao peso de uma pessoa de uns  $60\text{kg}$ ) quando separadas por uma distância de  $20\text{cm}$ .

*Resp:  $7,3 \times 10^{-4} \% = 0,00073\%$  (aproximadamente 1 em cada 140000 elétrons foi retirado)*

(c) Sendo o cobre um excelente condutor de eletricidade, isso significa que os elétrons de valência são livres pra se moverem no interior do material. Portanto, qualquer excesso de carga deve ser espalhado ao longo da superfície da bolinha. De outro modo, as forças elétricas causadas pelo desbalanceamento de carga causariam um movimento nos elétrons, redistribuindo os mesmos. Essa redistribuição cessa quando as cargas em excesso ficarem todas espalhadas pela superfície. No caso da bolinha, a superfície é homogênea (tem a mesma geometria local em cada ponto), de modo que o excesso de carga fica igualmente distribuído pela superfície da mesma. Calcule a densidade superficial de carga que existia na bolinha inicialmente eletrizada. Esse valor corresponde a quantos elétrons por  $\text{mm}^2$ ?

*Resp:  $3,3 \times 10^{-3} \text{C/m}^2 = 3,3 \times 10^{-3} \mu\text{C/mm}^2 = 2,1 \times 10^{10} \text{elétrons/mm}^2$  (aproximadamente 21 bilhões por  $\text{mm}^2$ )*

**OBS:** veremos adiante que estes cálculos são apenas ilustrativos; na prática, é impossível carregar a bolinha com essa quantidade de carga, porque o campo elétrico ao redor da mesma seria tão grande que causaria uma faísca, descarregando quase todo esse excesso para o ar ao redor.

## REFERENCIAS

1. Amaldi, H. *Imagens da Física*, Scipione, 1995
2. <http://www.cea.inpe.br/webdqe/elat/>
3. <http://thunder.msfc.nasa.gov/primer>
4. [http://www.physics.sjsu.edu/becke/physics51/elec\\_charge.htm](http://www.physics.sjsu.edu/becke/physics51/elec_charge.htm)
5. <http://historia.et.tudelft.nl/wggesch/geschiedenis/electricity/>
6. Keller, F.J.; Gettys, W.E. e Skowe, M.J. *Física*, Vol.2, Makron, 1999
7. Purcell, E.M., *Electricity and Magnetism* (Berkeley Physics Course Vol. 2), 1965.

© 2006-13 Mauricio Fabbri  
MCT/INPE: <http://www.las.inpe.br/~fabbri>  
Universidade São Francisco – USF  
Itatiba/Campinas – <http://www.saofrancisco.edu.br>  
São Paulo - Brazil  
Permitido uso livre para fins educacionais,  
sem ônus, desde que seja citada a fonte.