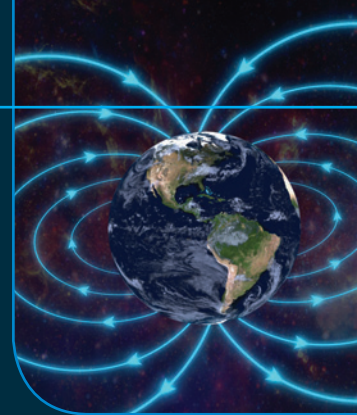


Física

PARA UNIVERSITÁRIOS



ELETRICIDADE E MAGNETISMO

WOLFGANG BAUER

GARY D. WESTFALL

HELIO DIAS

**Mc
Graw
Hill**





B338f Bauer, Wolfgang

Física para universitários [recurso eletrônico] : eletricidade e magnetismo / Wolfgang Bauer ; Gary D. Westfall ; Helio Dias ; tradução: Trieste Freire Ricci ; revisão técnica: Helio Dias. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre : AMGH, 2012.

Editado também como livro impresso em 2012.
ISBN 978-85-8055-126-6

1. Física. 2. Eletricidade. 3. Magnetismo. I. Título.
II. Westfall, Gary D. III. Dias, Helio.

CDU 537

1.2 Carga elétrica

Vamos examinar com um pouco mais de profundidade a causa das descargas elétricas que ocasionalmente são recebidas em dias secos ao se caminhar sobre um carpete e depois tocar em uma maçaneta metálica. (Descargas eletrostáticas também provocam a ignição do vapor de gasolina quando se está abastecendo o tanque em um posto de combustíveis. Não se trata de uma lenda urbana; alguns desses casos foram registrados por câmeras de segurança de postos.) O processo que causa essas faíscas é chamado de **eletrização** ou **carregamento**. A eletrização consiste na transferência de partículas carregadas, chamadas de elétrons, dos átomos e moléculas do material do carpete para as solas de seus sapatos. Essa carga pode se mover com relativa facilidade através de seu corpo, incluindo suas mãos. A carga elétrica acumulada é descarregada através do metal da maçaneta, gerando uma faísca.

Os dois tipos de carga elétrica encontrados na natureza são **cargas positivas** e **cargas negativas**. Normalmente, os objetos ao nosso redor não parecem carregados; em vez disso, são eletricamente neutros. Objetos neutros contêm aproximadamente o mesmo número de cargas positivas e negativas, que praticamente se cancelam. Somente quando as cargas positivas e as negativas não se contrabalançam é que observamos os efeitos da carga elétrica.

Se você esfregar uma haste de vidro com um pano, o vidro se tornará carregado e o pano adquirirá uma carga de sinal oposto. Se esfregar uma haste de plástico com pelo de animal, a haste e a pele também se tornarão eletrizadas contrariamente. Se você aproximar duas hastes de vidro eletrizadas, elas se repelirão. E se aproximar duas hastes de plástico, elas também se repelirão. Entretanto, uma haste de vidro eletrizada atrairá uma haste de plástico carregada. Essa diferença surge do fato de que a haste de vidro e a de plástico adquirem cargas opostas. Essa observação nos leva a concluir:

Lei das cargas elétricas

Cargas de mesmo sinal se repelem, e cargas opostas se atraem.

A unidade de carga elétrica é o **coulomb** (C), assim denominada em homenagem a Charles-Augustine de Coulomb (1736-1806). O coulomb é definido em termos da unidade de corrente do SI, o ampère (A), que constitui uma homenagem a outro cientista francês, André-Marie Ampère (1775-1836). Nem o ampère, nem o coulomb, podem ser derivados de outras unidades do SI: metro, quilograma e segundo. Em vez disso, o ampère constitui outra unidade fundamental do SI. Por isso, o sistema SI de unidades às vezes é chamado de sistema MKSA (*metro-quilograma-segundo-ampère*). A unidade de carga é definida como

$$1 \text{ C} = 1 \text{ A s.} \quad (1.1)$$

A definição do ampère terá de esperar para o momento em que abordarmos a corrente elétrica, em capítulos posteriores. Todavia, podemos definir o valor do coulomb simplesmente especificando a carga de um único elétron:

$$q_e = -e \quad (1.2)$$

onde q_e é a carga, e e tem o valor (atualmente melhor aceito e experimentalmente medido)

$$e = 1,602176487(40) \cdot 10^{-19} \text{ C.} \quad (1.3)$$

(Normalmente é necessário reter somente os dois primeiros algarismos significativos dessa mantissa. Usaremos o valor de 1,602 neste capítulo, mas você deveria ter em mente que a equação 1.3 expressa a precisão total com a qual tal carga foi medida.)

A carga do elétron é uma propriedade intrínseca do elétron, da mesma forma como sua massa. A carga do **próton**, outra partícula básica constituinte dos átomos, é exatamente de mesmo valor absoluto que a do elétron, mas de sinal contrário:

$$q_p = +e. \quad (1.4)$$

A escolha de qual carga é positiva e qual é negativa é arbitrária. A escolha convencional de $q_e < 0$ e $q_p > 0$ se deve ao estadista, cientista e inventor norte-americano Benjamin Franklin (1706-1790), um dos pioneiros no estudo da eletricidade.

O coulomb é uma unidade de carga extremamente grande. Veremos mais tarde, neste capítulo, quão grande ela é quando examinarmos a intensidade das forças exercidas entre cargas. Por isso subunidades tais como μC (microcoulomb, 10^{-6} C), nC (nanocoulomb, 10^{-9} C) e pC (picocoulomb, 10^{-12} C) são usadas.

Benjamin Franklin também propôs que a carga é conservada. Por exemplo, quando você esfrega uma haste de plástico com pele de animal, elétrons são transferidos para a haste plástica, deixando uma carga positiva líquida sobre a pele. (Prótons não são transferidos porque geralmente eles estão situados no interior de núcleos atômicos.) A carga não é criada ou destruída, e sim simplesmente movida de um objeto para outro.

Princípio de conservação da carga

A carga elétrica total de um sistema isolado é conservada.

Este princípio é a quarta lei de conservação com que nos deparamos até aqui, as três primeiras sendo as da conservação da energia total, do momento total e do momento angular total. As leis de conservação constituem os princípios comuns que percorrem toda a física e, portanto, todo este livro também.

1.1 Exercícios de sala de aula

Quantos elétrons são necessários para alcançar 1,00 C de carga?

- a) $1,60 \cdot 10^{19}$ d) $6,24 \cdot 10^{18}$
- b) $6,60 \cdot 10^{19}$ e) $6,66 \cdot 10^{17}$
- c) $3,20 \cdot 10^{16}$

É importante notar que existe um princípio de conservação para a carga, mas *não* para a massa. Veremos mais adiante neste livro que a massa e a energia não são independentes uma da outra. Aquilo que às vezes é descrito, em química básica, como conservação da massa não constitui um princípio de conservação exato, mas somente uma aproximação usada para contabilizar o número de átomos participantes de reações químicas. (O que é uma boa aproximação para um grande número de situações, mas não uma lei exata, como a da conservação da carga.) A conservação da carga se aplica a todos os sistemas, desde sistemas macroscópicos tais como uma haste de plástico ou a pele de um animal, até sistemas de partículas subatômicas.

Carga elementar

A carga elétrica ocorre apenas em múltiplos inteiros de uma quantidade mínima. Isso é expresso dizendo-se que a carga é **quantizada**. A menor unidade de carga elétrica já observada é a carga do elétron, no valor de $-1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ (como definido pela equação 1.3).

O fato de que a carga elétrica seja quantizada foi comprovado por meio de um engenhoso experimento realizado, em 1910, pelo físico norte-americano Robert A. Millikan (1868-1953), conhecido como o *experimento de Millikan com gotas de óleo* (Figura 1.4). Neste experimento, gotas de óleo são borrifadas dentro de uma câmara, onde elétrons são expulsos das gotas por algum tipo de radiação, geralmente raios X. As gotas resultantes, positivamente carregadas, ficam livres entre duas placas contrariamente eletrizadas. Ajustando-se a carga das placas, detém-se a queda das gotas, permitindo que suas cargas sejam medidas. O que Millikan observou foi que essas cargas eram discretas, e não contínuas. (No Capítulo 3 sobre potencial elétrico, apresentaremos uma análise quantitativa desse experimento.) Ou seja, o experimento e seus subseqüentes aperfeiçoamentos revelaram que a carga surge sempre apenas como múltiplos inteiros da carga de um elétron. Nas experiências cotidianas com eletricidade não notamos a quantização da carga porque a maioria dos fenômenos elétricos envolve enormes números de elétrons.

Sabemos que a matéria é composta por átomos, e que um átomo consiste em um núcleo contendo prótons e nêutrons. O desenho esquemático de um átomo de carbono é mostrado na Figura 1.5. Cada átomo de carbono contém seis prótons e (geralmente) seis nêutrons em seu núcleo. Este núcleo está rodeado por seis elétrons. Note que o desenho não está em escala. Em um átomo real, a distância entre os elétrons e o núcleo é muito maior (por um fator da ordem de 10.000) do que o tamanho do núcleo. Além disso, os elétrons são mostrados movendo-se em órbitas circulares, o que também não está completamente correto. Veremos que as posições dos elétrons em um átomo só podem ser caracterizadas por distribuições de probabilidade.

Como já foi mencionado, cada próton possui uma carga positiva de valor absoluto *exatamente* igual ao da carga negativa de um elétron. Em um átomo neutro, o número de elétrons negativamente carregados é igual ao número de prótons positivamente carregados. A massa de um elétron é muito menor do que a de um próton ou de um nêutron. Portanto, a maior parte da massa de um átomo reside em seu núcleo. Os elétrons podem ser removidos dos átomos com relativa facilidade. Por essa razão, geralmente os elétrons são os portadores da eletricidade, mais do que prótons ou núcleos atômicos.

O elétron é uma partícula fundamental e não possui uma subestrutura: é considerado uma partícula puntiforme de raio nulo (pelo menos de acordo com a compreensão atual que temos dele). Todavia, sondas de alta energia são usadas para investigar o interior dos prótons. Um próton é composto por partículas carregadas denominadas *quarks*, mantidos juntos por partículas desprovidas de carga elétrica chamadas de *glúons*. Os quarks possuem uma carga de $\pm \frac{1}{3}$ ou $\pm \frac{2}{3}$ vezes a carga de um elétron. Essas partículas de carga elétrica fracionária não podem existir independentemente, e jamais foram observadas diretamente, a despeito das pesquisas mais dispendiosas realizadas. Da mesma forma como a carga de um elétron, as cargas dos quarks são propriedades intrínsecas dessas partículas elementares.

Um próton é constituído por dois quarks *up* (cada qual com carga de $+\frac{2}{3}e$) e por um quark *down* (com carga igual a $-\frac{1}{3}e$), dando ao próton uma carga $q_p = (2)(+\frac{2}{3}e) + (1)(-\frac{1}{3}e) = +e$, como ilustrado na Figura 1.6a. O nêutron eletricamente neutro (daí seu nome!) é composto

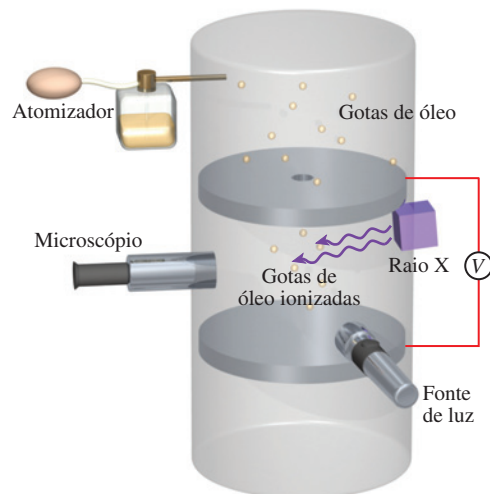


Figura 1.4 Desenho esquemático do experimento de Millikan com gotas de óleo.

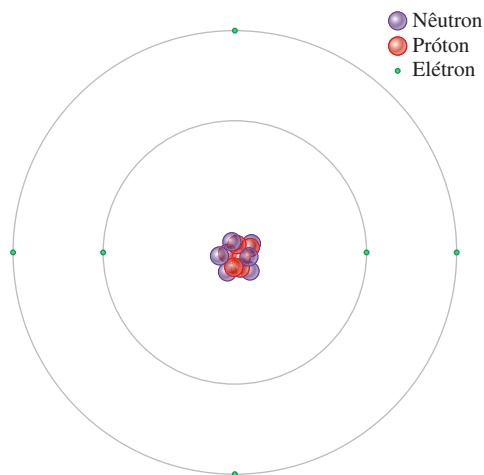


Figura 1.5 Em um átomo de carbono, o núcleo contém seis nêutrons e seis prótons. O núcleo é cercado por seis elétrons. Note que o desenho é apenas um esquema, e não está em escala.

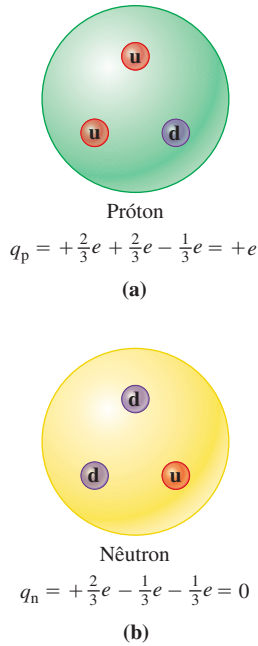


Figura 1.6 (a) Um próton contém dois quarks *up* (*u*) e um quark *down* (*d*). (b) Um nêutron contém um quark *up* (*u*) e dois *down* (*d*).

1.1 Pausa para teste

Expresse a carga das seguintes partículas elementares em função da carga elementar $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

- Próton.
- Nêutron.
- Átomo de hélio (dois prótons e dois nêutrons, mais dois elétrons).
- Átomo de hidrogênio (um próton e um elétron).
- Quark *up*.
- Quark *down*.
- Elétron.
- Partícula alfa (dois prótons e dois nêutrons).

por um quark *up* e dois *downs*, como ilustrado na Figura 1.6b, de modo que sua carga é $q_n = (1)(+\frac{2}{3}e) + (2)(-\frac{1}{3}e) = 0$. Veremos que existem outros tipos de quarks, mais pesados, denominados *strange* (estranho), *charm* (charmoso), *bottom* (inferior) e *top* (superior), com as mesmas cargas dos quarks *up* e *down*. Também existem partículas parecidas com elétrons muito mais pesadas, chamadas de *múon* e *tau*. Mas os fatos básicos se mantêm: toda a matéria do mundo cotidiano é formada por elétrons (de carga elétrica $-e$), quarks *up* e *down* (de cargas elétricas $+\frac{2}{3}e$ e $-\frac{1}{3}e$, respectivamente) e glúons (desprovidos de carga).

É notável que as cargas elétricas dos quarks dentro de um próton se somem dando *exatamente* o mesmo valor que o valor absoluto da carga de um elétron. Este fato ainda constitui um enigma, sinalizando para a existência de alguma simetria profunda da natureza ainda não compreendida.

Uma vez que todos os objetos são formados por átomos, que por sua vez são formados por elétrons e núcleos atômicos consistindo em prótons e nêutrons, a carga q de qualquer objeto pode ser expressa em termos do número dos prótons, N_p , menos o de elétrons, N_e , que constituem o objeto:

$$q = e \cdot (N_p - N_e). \quad (1.5)$$

EXEMPLO 1.1 Carga líquida

PROBLEMA

Se desejamos que um bloco de ferro de 3,25 kg de massa adquira uma carga positiva de 0,100 C, que fração do número de seus elétrons teríamos de remover?

SOLUÇÃO

O ferro tem número de massa igual a 56. Portanto, o número de átomos de ferro contidos em um bloco de 3,25 kg é

$$N_{\text{átomo}} = \frac{(3,25 \text{ kg})(6,022 \cdot 10^{23} \text{ átomos/mol})}{0,0560 \text{ kg/mol}} = 3,495 \cdot 10^{25} = 3,50 \cdot 10^{25} \text{ átomos}.$$

Note que usamos o número de Avogadro, $6,022 \cdot 10^{23}$, e a definição de 1 mol, que especifica que a massa de 1 mol de qualquer substância é igual, simplesmente, a seu número de massa – neste caso 56 – expresso em gramas.

Uma vez que o número atômico do ferro é 26, que é igual ao número de prótons ou de elétrons de um átomo de ferro, o número total de elétrons em um bloco de 3,25 kg de ferro é:

$$N_e = 26N_{\text{átomo}} = (26)(3,495 \cdot 10^{25}) = 9,09 \cdot 10^{26} \text{ elétrons}.$$

Usamos a equação 1.5 para determinar o número de elétrons, $N_{\Delta e}$, que teriam de ser removidos. Como o número de elétrons é igual ao de prótons no objeto original neutro, a diferença entre o número de prótons e de elétrons é o número de elétrons que foram removidos, $N_{\Delta e}$:

$$q = e \cdot N_{\Delta e} \Rightarrow N_{\Delta e} = \frac{q}{e} = \frac{0,100 \text{ C}}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = 6,24 \cdot 10^{17}.$$

Finalmente, obtemos a fração dos elétrons do objeto que temos de remover:

$$\frac{N_{\Delta e}}{N_e} = \frac{6,24 \cdot 10^{17}}{9,09 \cdot 10^{26}} = 6,87 \cdot 10^{-10}.$$

A fim de dotá-lo de uma carga elétrica positiva de 0,100 C, teríamos de remover do bloco de ferro um pouco menos que um em cada bilhão de seus elétrons.

Encerra aqui o trecho do livro disponibilizado para esta Unidade de Aprendizagem. Na Biblioteca Virtual da Instituição, você encontra a obra na íntegra.

