2. O campo elétrico

Sumário

Neste capítulo, revisitamos um problema que discutimos brevemente no Capítulo 7: a natureza de longo alcance da eletricidade e interações gravitacionais. Como um objeto carregado pode "Alcançar" e afetar outro objeto carregado? O que são as "molas" invisíveis que nos puxam - e tudo ao nosso redor - em direção à superfície da Terra? Você pode descrever essas interações, dizendo que cada objeto carregado e que cada objeto massivo possui uma "esfera de influência"ao redor dele mesmo. A palavra moderna para essa esfera de influência é campo. Os campos não são imaginários. Essa sensação que você sentiu quando, enquanto lia o início do Capítulo 22, segurou uma embalagem de plástico para comida perto de seu rosto foi a sensação de um campo criado pelas partículas carregadas na embalagem. Quanto mais próximo da pele a embalagem mais forte é a sensação.

O conceito de campo é importante por duas razões. Primeiro, é impossível descrever a interação entre mover partículas carregadas sem ele. Em segundo lugar, como você verá em breve, muitas vezes é mais fácil lidar com campos do que com distribuições de carga porque frequentemente se sabe mais sobre os campos do que sobre a forma como as cargas são distribuídas.

2.1 O modelo de campo

A lei da gravidade de Newton, descrevendo a força gravitacional entre objetos massivos, e a lei de Coulomb, descrevendo a força elétrica entre partículas carregadas, computa com sucesso as magnitudes das forças gravitacionais e elétricas entre objetos estacionários. No entanto, elas não abordam o enigma fundamental de como objetos separados no espaço podem interagir sem qualquer mediador da interação (tal interação é chamada de ação à distância). Pior, eles compartilham uma falha fundamental: Ambos implicam que a ação de um objeto em outro, é instantânea em todos os lugares do espaço. Considere, por exemplo, as duas barras de metal na Figura 23.1. Mesmo se ambas forem eletricamente neutras, seus elétrons interagem. Suponha que você conduza rapidamente os elétrons na haste A até parte inferior, como na Figura 23.1b. De acordo com a lei de Coulomb, fazer isso mudará instantaneamente a força exercida pelos elétrons em A sobre aqueles em B, independentemente da distância entre as hastes . Isso significa que seria possível - em princípio - estar em uma posição no espaço e detectar instantaneamente um mudança que ocorre em alguma posição distante.

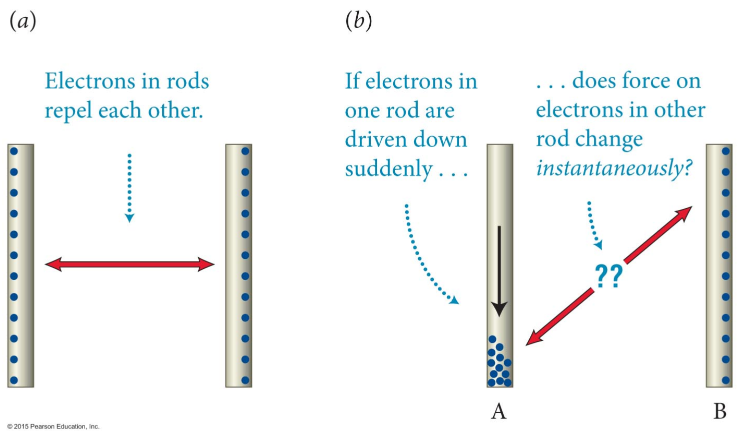


Figura 2.1: As leis de Newton e Coulomb implicam que forças são exercidas instantaneamente à distância - mas os experimentos mostram que não.

A ideia de que um objeto pode influenciar direta e instantaneamente outro objeto, independentemente de sua separação, era preocupante no século 19, mas tornou-se insustentável no início do século 20, quando foi demonstrado experimentalmente que a interação entre objetos carregados não é instantânea. O princípio ilustrado na Figura 23.1, por exemplo, é o que torna possível a transmissão de sinais de rádio de uma antena de transmissão (haste A) para uma antena de recepção (haste B). Sabemos por muitos experimentos que essa transmissão não é instantânea. Apenas como um exemplo, um sinal de radio leva cerca de 0,1 s para viajar da superfície da Terra para um satélite de comunicações em órbita. Em outras palavras, a descrição transmitida pela lei da gravidade de Newton e Coulomb's lei - que um objeto afeta direta e instantaneamente outros objetos independentemente da distância entre eles, não pode estar correta.

Em vez disso, devemos adotar outro modelo para interações de longo alcance , um modelo no qual as interações acontecem por meio de um campo de interação (ou simplesmente um campo). No modelo de campo, um objeto interagindo preenche o espaço em torno de si com um campo. Quando um objeto A é colocado no campo de um objeto B, A pode "sentir"a presença do campo de B . Em vez de os dois objetos interagirem diretamente, conforme ilustrado na Figura 23.2a, é o campo criado por cada objeto que atua sobre o outro objeto (Figura 23.2b). Quanto mais forte o campo, maior será a magnitude da força resultante da interação.

O modelo de campo se aplica igualmente bem a interações gravitacionais e elétricas, com cada interação tendo seu próprio tipo de campo. O espaço em torno de qualquer objeto com massa é preenchido com um campo gravitacional, e o espaço ao redor de qualquer objeto eletricamente carregado é preenchido com um campo elétrico. Os campos gravitacionais exercem forças sobre objetos que têm massa, e os campos elétricos exercem forças sobre objetos que carregam uma carga ou podem ser polarizados. Vamos começar desenvolvendo o conceito de campo gravitacional.

Antes de tentarmos obter uma quantidade física que possamos usar para descrever qualquer campo gravitacional, devemos observar algumas coisas. Primeiro, para qualquer objeto A localizado em um campo gravitacional criado por um objeto S (S é chamado de fonte do campo), a magnitude do campo sentido por A depende apenas das propriedades de S e da posição de A em relação a S; a magnitude do campo não depende de forma alguma das propriedades de A. Em segundo lugar, o campo de um objeto estará sempre lá, mesmo quando o objeto não estiver interagindo com mais nada. Um campo, portanto, deve ser representado por um conjunto de valores numéricos que cobrem todo o espaço fora da fonte do campo, com cada ponto deste espaço tem um valor numérico diferente. Uma representação de campo com a qual você já está familiarizado é o de um "campo de temperatura", onde a temperatura entre a superfície de uma região tem um valor específico em cada local (Figura 23.3). Terceiro, para objetos estacionários, o modelo de campo deve dar as mesmas forças que a lei da gravidade de Newton e a lei de Coulomb. Em particular, o modelo de campo ainda deve produzir forças entre os dois objetos que são iguais em magnitude e opostas na direção. Não é imediatamente óbvio que o modelo de campo preserva essa simetria nas forças porque um campo não é algo compartilhado por dois objetos interagindo - cada objeto tem seu próprio campo.

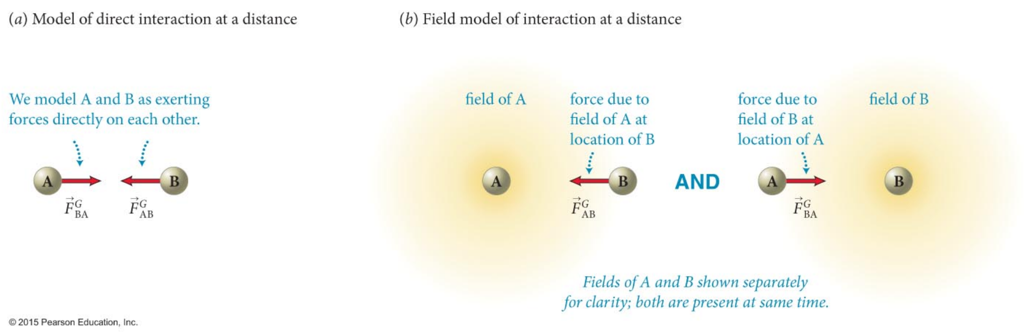


Figura 2.2: O modelo de campo para interação à distância.

Por exemplo, na interação gravitacional entre uma bola e a Terra, a força gravitacional exercida pela Terra na bola se deve ao campo gravitacional da Terra e a força gravitacional exercida na terra se deve ao campo da bola. Note que esses dois campos gravitacionais são muito diferentes um do outro: o campo da Terra puxa fortemente um clipe de papel por exemplo, enquanto o efeito do campo da bola naquele clipe de papel é incomensuravelmente pequeno. Como você verá em breve, no entanto, a simetria da interação é preservada apesar da assimetria nos campos (ver Checkpoint 23.3).

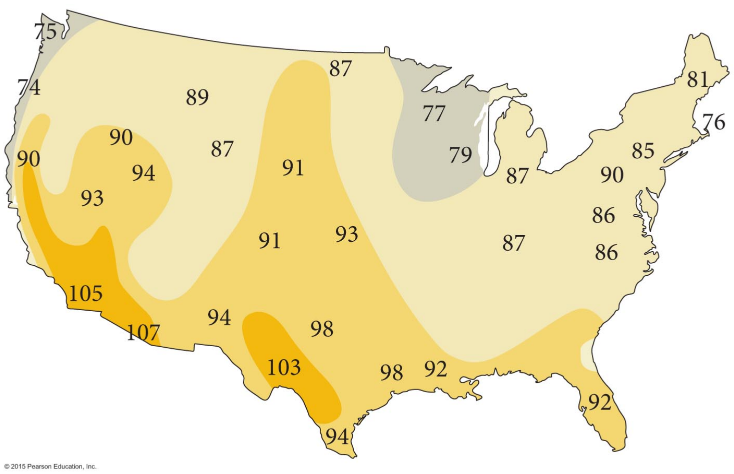


Figura 2.3: A temperatura em uma região é especificada por um conjunto de valores, com um valor de temperatura específico para cada posição naquela região. Esse conjunto de valores é chamado de campo.

Qual quantidade física podemos usar para descrever o campo gravitacional de um objeto? Que tal a força gravitacional exercida pelo objeto? Vamos examinar essa possibilidade usando Terra como nosso objeto. Como vimos na Seção 8.8, a magnitude da força gravitacional exercida pela Terra em um objeto de massa m perto da superfície da Terra é $F_G^{Eo} = mg$. Esta força é não é uma boa quantidade para descrever o campo da Terra porque o força não depende apenas da fonte - Terra (que determina g) - mas também na massa m do objeto colocado no campo. Conforme ilustrado na Figura 23.4, dois objetos que têm diferentes massas m1 e m2, mas são colocadas na mesma altura acima da superfície da Terra estão sujeitos a diferentes gravitacionais força m1g e m2 g. A quantidade $g = F_E^G/m$, no entanto - a força gravitacional por unidade de massa é a mesma para qualquer objeto. * Esta quantidade é determinada exclusivamente pelas propriedades da Terra e é independente de qualquer objeto aquelas experiências uma força gravitacional exercida pela Terra.

> checkpoint 23.1 Dois objetos 1 e 2, de massa m1 e m2, são liberados do repouso longe da Terra, em um local onde a magnitude de a aceleração da gravidade é muito menor que $g = 9,8m/s^2$. (a) Qual é a proporção $F_G^{E_1}/F_{E_2}^G$? (b) Para esses dois objetos, qual é a magnitude da força gravitacional exercida pela Terra por unidade massa independente das propriedades dos objetos?

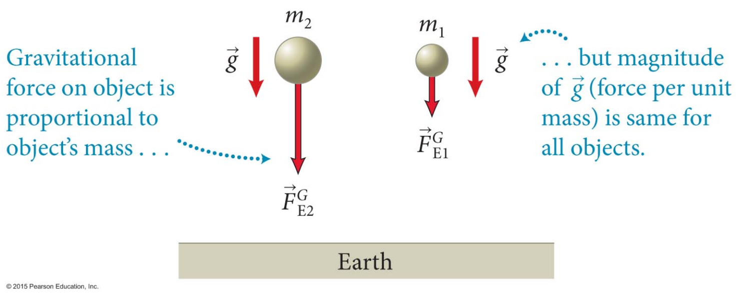


Figura 2.4: Comparação entre força gravitacional e gravitacional aceleração em objetos de diferentes massas na mesma distância da Terra.

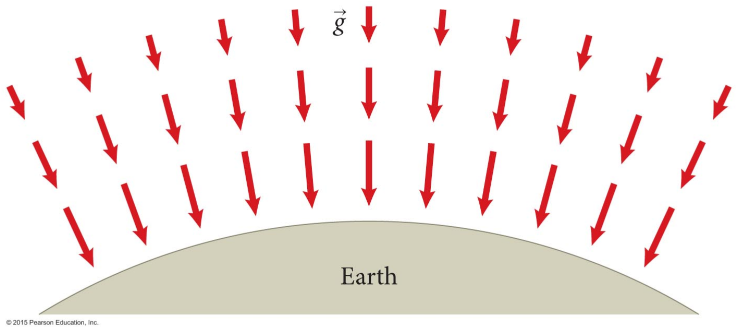


Figura 2.5: Diagrama de campo vetorial para o campo gravitacional em uma região perto da Terra.

Podemos usar a força gravitacional por unidade de massa exercida por um objeto como uma medida da magnitude do campo gravitacional do objeto. Por exemplo, perto da superfície da Terra, $g = 9,8m/s^2$, a magnitude da gravidade da Terra o campo é $9,8N/kg$; perto da superfície da Lua, onde $g_{lua}1,6m/s^2$, a magnitude do campo gravitacional da lua é $1,6N/kg$. (Lembre-se de que $1N/kg = 1(kg \cdot /ms^2)/kg = 1m/s^2$.)

> Em qualquer local determinado na vizinhança de um objeto de um objeto fote S, a magnitude do campo gravitacional criado por S é a magnitude da força gravitacional exercida sobre um objeto B colocado naquele local dividido pela massa de B.

Ao contrário do campo de temperatura na Figura 23.3, que é um campo escalar, o campo gravitacional é um campo vetorial: a cada posição, ele tem uma magnitude e uma direção.

A Figura 23.5, por exemplo, mostra um diagrama de campo vetorial que representa o campo gravitacional perto da Terra. Você pode determinar a magnitude e direção deste campo no espaço circundante a Terra usando uma partícula de teste (uma partícula idealizada cuja massa é pequena o suficiente para que sua presença não perturbe o objeto cujo campo gravitacional estamos medindo). Meça, em cada localização, a força gravitacional exercida pela Terra na partícula de teste e, em seguida, divida essa força pela massa da partícula de teste para obter a direção e a magnitude do campo gravitacional naquele local. Como você pode ver na Figura 23.5, O campo gravitacional da Terra, que pode ser representado em cada posição por um vetor $\vec{g}$, sempre está apontando para o Centro da Terra, e sua magnitude diminui com o aumento distância longe da Terra. Perto da superfície da Terra, a magnitude de esses vetores é g $g = 9,8N/kg$.

Checkpoint 23.2 Um satélite de comunicações orbita a $1,4 \times 10^7 m$ do centro da Terra em uma localização onde a magnitude do campo gravitacional é dada por $2.0N/Kg$. (a) Se a massa do satélite é $2000kg$, qual a magnitude de $\vec{F}^G_{Es}$? (b) se você posicionar uma bola de 0.2Kg na mesma posição do satélite, qual o valor de F^G_{Eb}.

O checkpoint 23.2 ilustra que, se você conhece o campo gravitacional em uma determinada posição, você pode calcular facilmente a força gravitacional exercida pela fonte desse campo em qualquer objeto nessa posição, realizando o produto entre magnitude do campo gravitacional na localização do objeto e a massa do objeto.

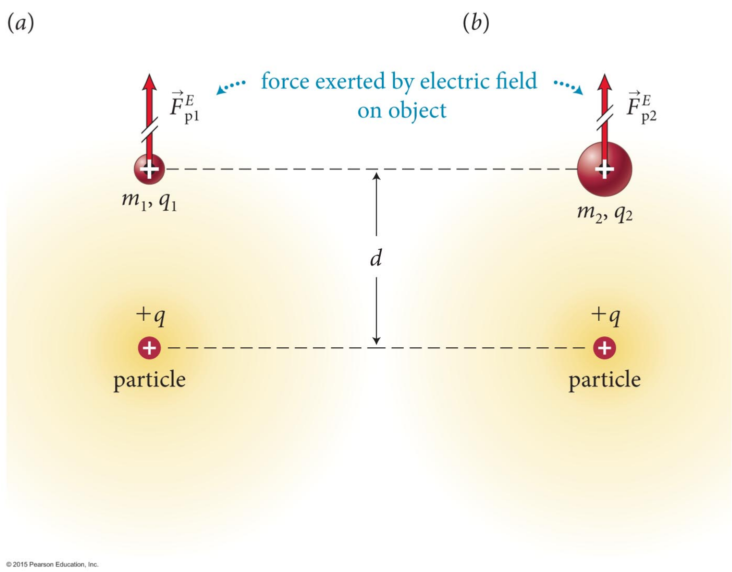


Figura 2.6: Força elétrica exercida sobre dois objetos de inércia diferente m e carga q pelos campos elétricos criados por duas partículas idênticas carregadas .

Checkpoint 23.3 (a) a magnitude da força gravitacional exercida pela Terra em uma bola é maior, igual ou menor que o magnitude da força gravitacional exercida pela bola na Terra? (b) A magnitude do campo gravitacional da Terra na posição da bola é maior, igual ou menor que a magnitude do campo gravitacional da bola a uma distância igual à do raio da Terra ? (c) Explique como as respostas para as partes a e b podem ser ambas corretas.

2.2 Diagramas de Campo Elétrico

Vamos agora aplicar as mesmas idéias às interações elétricas. A Figura 23.6a mostra o objeto 1 de massa m_1 e carga q_1 a uma distância d de uma partícula que carrega uma carga q. O que é o campo elétrico $\vec{E}$ criado pela partícula na posição de objeto 1? Antes de responder a esta pergunta, responda ao próximo checkpoint, que diz respeito às interações da partícula com o objeto 1 e com um objeto 2 de massa m2 e carga q2 (Figura 23.6b;$m2 \neq m1 eq2 \neq q1$).

checkpoint 23.4 (a) São as forças elétricas $F^E_{p_1}$ e $\vec{F}^E_{p_2}$ na Figura 23.6 iguais? (b) O que a quantidade $F^E_{p_i}/m_i$ representa? (c) esta quantidade é igual para os objetos 1 e 2? Se não, qual quantidade é a mesma para esses dois objetos?

Como o Checkpoint 23.4 deixa claro, a quantidade $F\vec{e_p}/q_i$ força elétrica por unidade de carga - é determinada inteiramente por a fonte do campo elétrico e é independente do objeto sobre o qual o campo exerce uma força. Então, em analogia com o campo gravitacional, podemos dizer:

Em qualquer local determinado no espaço ao redor de um objeto fonte S, o campo elétrico criado por S é a força elétrica exercida sobre uma partícula de teste carregada colocado naquele local dividido pela carga do partícula de teste: $\vec{E}_s = F^{\vec{E}}_{St}/q_t$.

Como os campos gravitacionais, os campos elétricos são campos vetoriais. Existe uma diferença entre os dois tipos de campos, Contudo. As interações elétricas podem ser repulsivas ou atrativas, e assim a direção da força elétrica - e portanto, a direção do campo elétrico - depende do sinal da cobrança. Nossa regra é que:

A direção do campo elétrico em um determinado local é o mesmo que a direção da força elétrica exercida em um objeto carregado positivamente naquele local.

Checkpoint 23.5 (a) Se a partícula na Figura 23.6 carrega uma carga negativa $q < 0$ e $q1$ e $q2$ são positivoa, quais são as direções de $\vec{F}^E_{p1}$ $\vec{F}^E_{p2}$? (b) O campo elétrico criado pela partícula aponta para dentro ou para fora da partícula? (c) Se q e q2 forem negativas, quais é a direção de F^{p2}_E e a direção do campo elétrico criado pela partícula na localização do objeto 2? (d) Se q for positivo, o campo elétrico criado pela partícula apontar para dentro ou para fora da partícula? (e) Como a magnitude do campo elétrico criado por uma partícula que carrega uma carga $+q(q > 00)$ compare com a magnitude do elétrico campo criado por uma partícula que carrega uma carga -q de idêntica magnitude a uma distância d de cada partícula?

A Figura 23.7 mostra os diagramas de campo vetorial para o campos elétricos de partículas que carregam cargas positivas e negativas . Porque é impossível desenhar o campo elétrico vetores em todos os locais, os diagramas mostram vetores em apenas certas posições; a partir desses vetores representativos, você pode ter uma ideia de como é o campo elétrico como um todo. Além disso, o desenho é limitado a duas dimensões, mas você deve visualizar o campo elétrico se espalhando em todas as três dimensões. Os campos elétricos podem ser tornados visíveis colocando objetos em um líquido (não condutor) que contém pequenas fibras plásticas ou sementes de grama descarregadas. Cada fibra se alinha com a direção do campo elétrico no local da fibra (Figura 23.8).

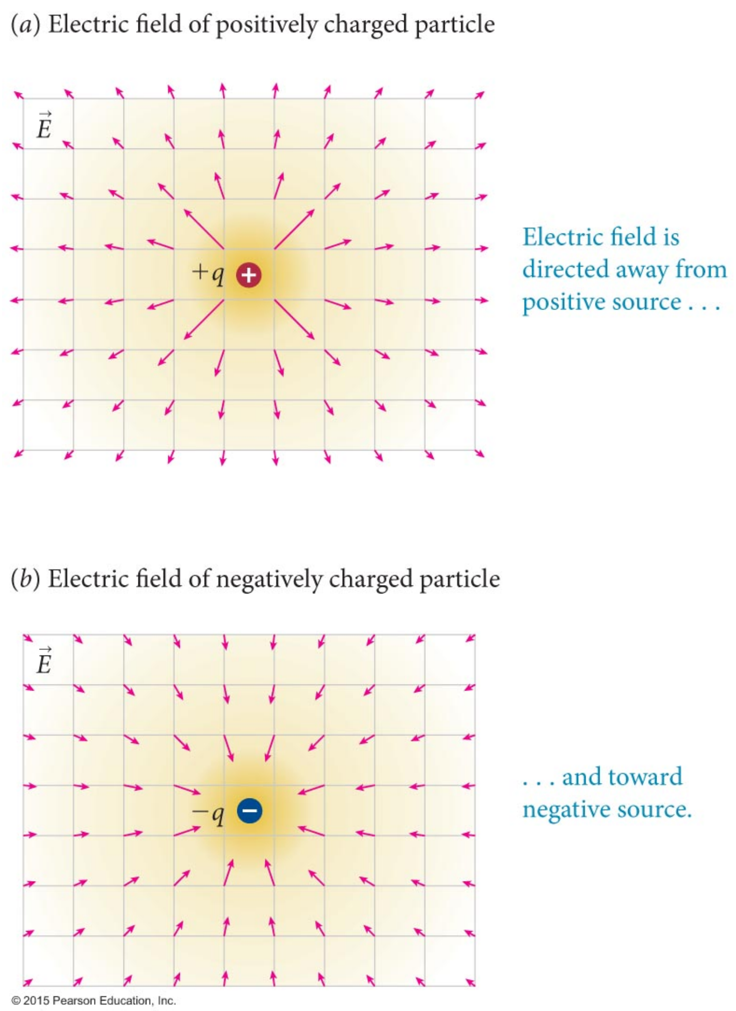


Figura 2.7: Diagramas de campo vetorial para cargas positivas e negativas partículas. Os comprimentos dos vetores mostram que a magnitude do campo elétrico diminui com o aumento da distância da fonte.

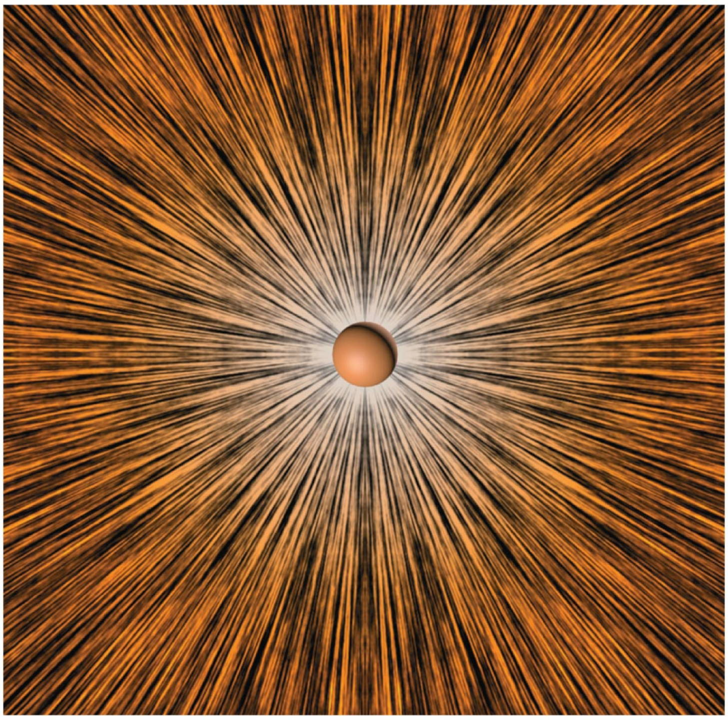


Figura 2.8: Padrão de campo elétrico criado por um pequeno objeto carregado em um solução que contém fibras plásticas. As fibras se alinham com a direção de o campo elétrico criado pelo objeto carregado.

Checkpoint 23.6 Se você conhece o campo elétrico em algum local, como você pode determinar a magnitude e direção da força elétrica exercida por esse campo em um objeto carregando uma carga q e colocado naquele local?

2.3 Superposição de campos elétricos

O conceito de campo elétrico torna-se especialmente útil quando consideramos o campo elétrico combinado que resulta de mais de um objeto carregado. Suponha que estejamos interessados no campo elétrico criado por duas partículas que carregam cargas de igual magnitude, mas de sinal oposto. Para determinar o campo elétrico criado pelas partículas em um ponto P, colocamos uma partícula de teste * carregando uma carga positiva qt em P e mediimos a soma vetorial das forças exercidas sobre ele pelos dois carregados partículas de origem (Figura 23.9 na próxima página). O elétrico campo em P é então igual a esta soma vetorial dividida por qt.

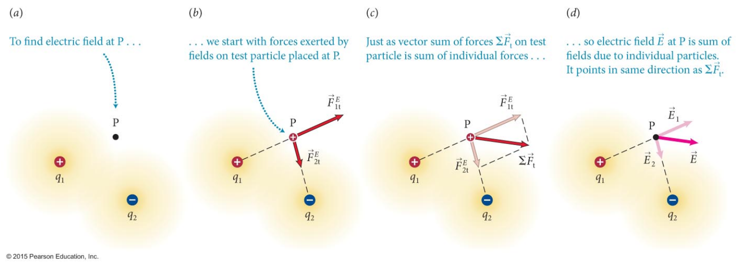


Figura 2.9: O campo elétrico devido a vários objetos carregados (aqui, um par de partículas carregadas) é a soma vetorial dos campos criados pelos objetos individuais.

O princípio da superposição é válido independentemente do número de fontes. Devido à natureza vetorial de a interação elétrica, as forças elétricas somam-se vetorialmente (Eq. 22.9). Consequentemente, o campo elétrico em P é igual para $(\vec{F}^E_{1t} + \vec{F}^E_{2t})/q_t = \vec{F}^E_{1t}/q_t + \vec{F}^E_{2t}/q_t$, que é o vetor soma dos campos elétricos criados pelas duas fontes individualmente. A única ressalva é a que apontei na Figura 22.30. Quando lidamos com condutores, a distribuição de carga nos condutores individuais de forma isolada pode ser diferente do que é quando os condutores são colocados perto juntos.

2.3.1 Exercício 23.1

Considere duas partículas idênticas 1 e 2 carregando cargas $q1 = q2 > 0$. Qual a direção do campo elétrico nos pontos P_1 a P_4?

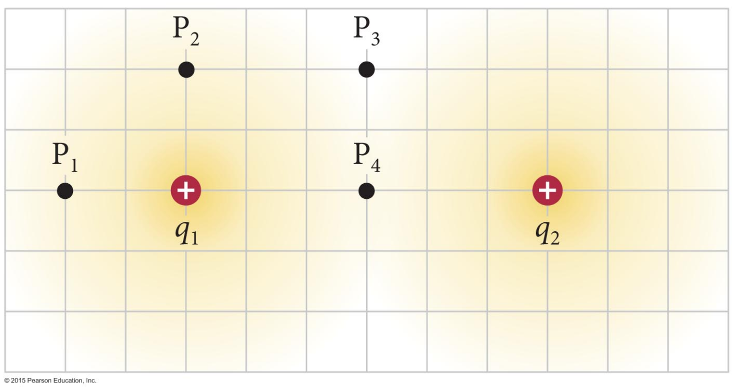
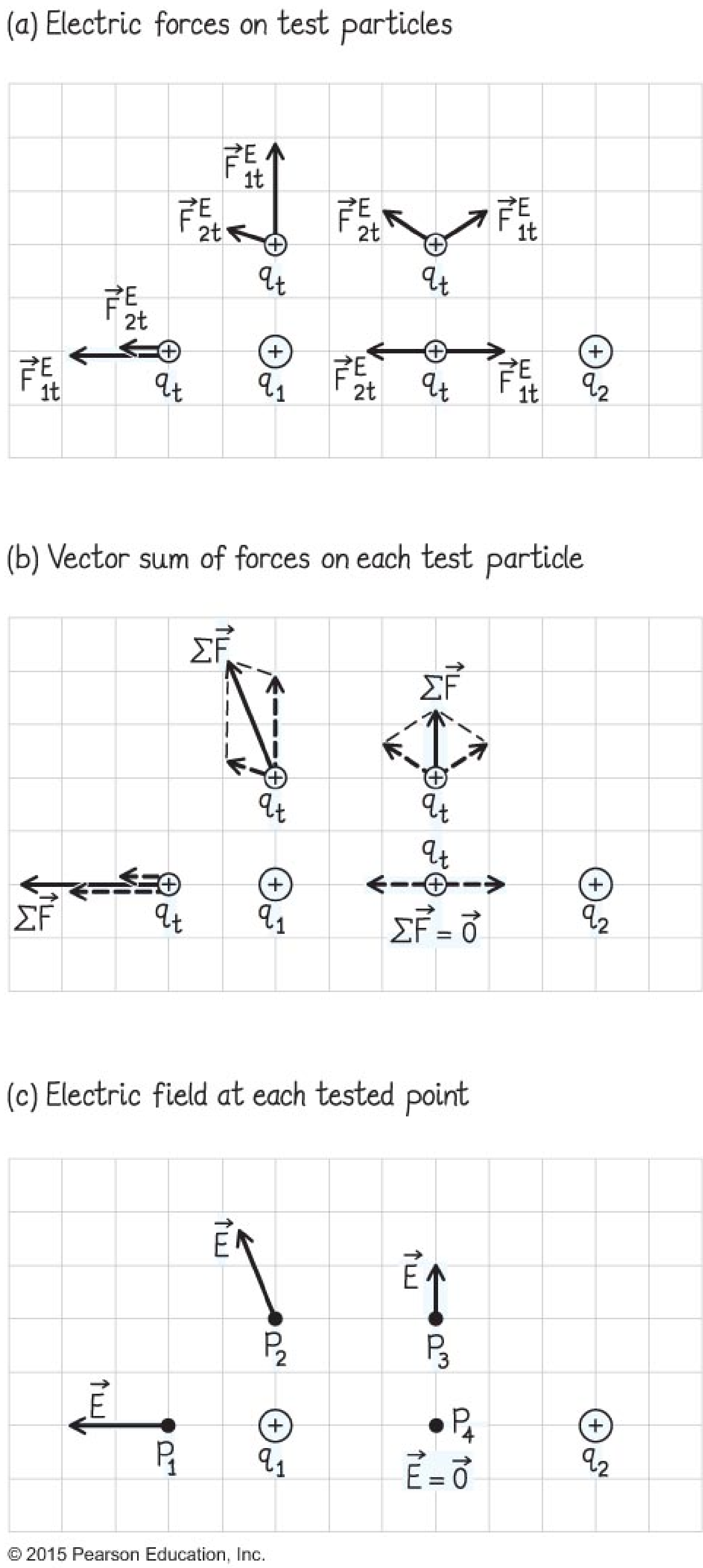


Figura 2.10

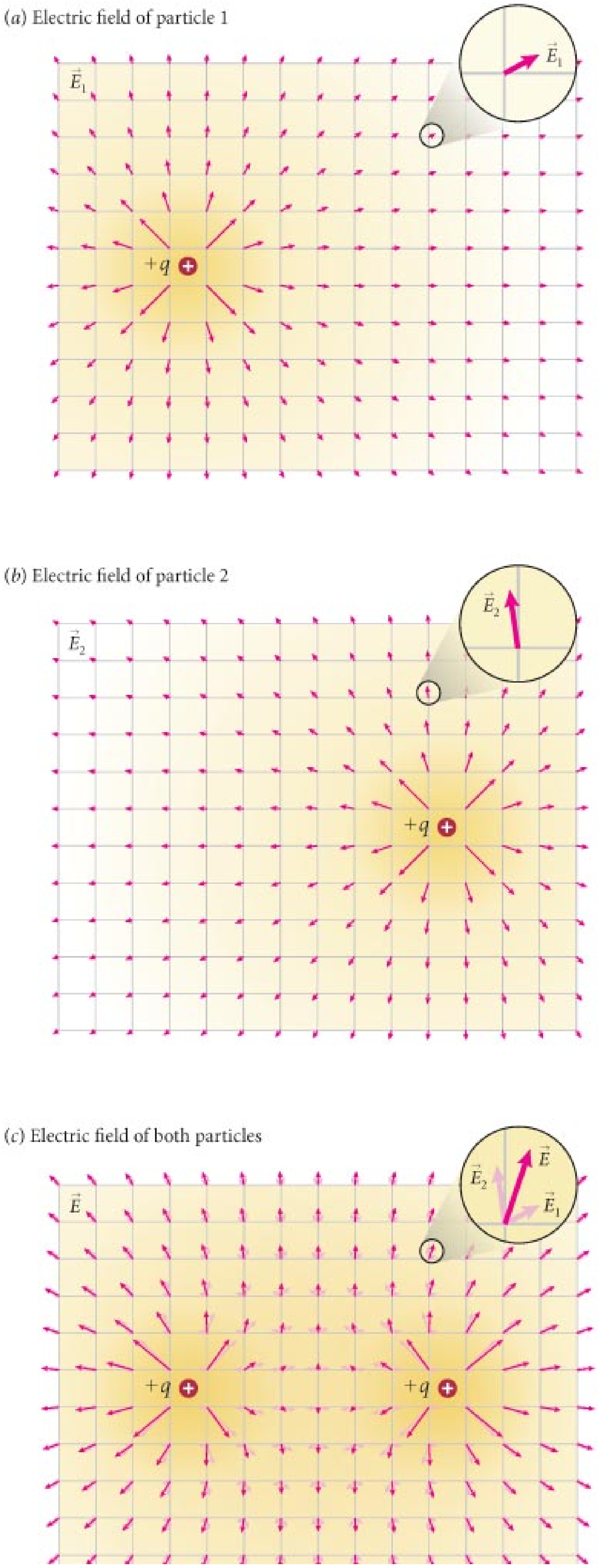
Solução:

Eu coloco uma partícula de teste carregada positivamente em cada localização e determino a soma vetorial das forças (repulsivas) exercido por 1 e 2 em cada partícula de teste. Porque $\vec{E} = \sum \vec{F}/q_{teste}$ a direção de $\vec{E}$ é a mesma que a direção do $\sum \vec{F}$



(a) Electric forces on test particles
$\vec{F}^E_{1t}$
$\vec{F}^E_{2t}$
q_t
q_1
q_2
(b) Vector sum of forces on each test particle
$\Sigma\vec{F}$
$\Sigma\vec{F} = \vec{0}$
(c) Electric field at each tested point
$\vec{E}$
P_1
P_2
P_3
P_4
$\vec{E} = \vec{0}$
© 2015 Pearson Education, Inc.

Figura 2.11


(a) Electric field of particle 1
$\vec{E}_1$
$\vec{E}_1$
+q
(b) Electric field of particle 2
$\vec{E}_2$
$\vec{E}_2$
+q
(c) Electric field of both particles
$\vec{E}$
$\vec{E}_2$
$\vec{E}$
$\vec{E}_1$
+q
+q

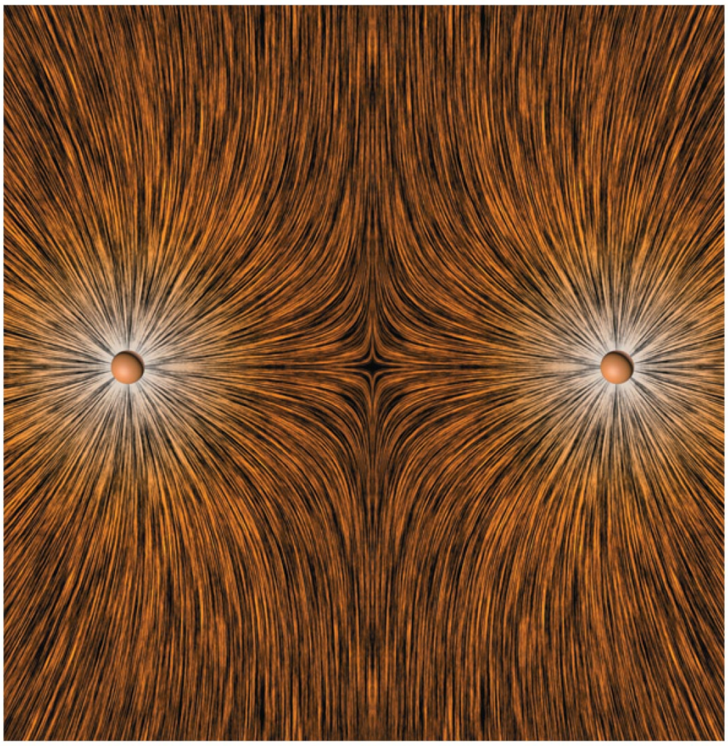


Figura 2.13: Padrão criado por duas partículas carregadas idênticas em um líquido contendo fibras de plástico. Compare com o diagrama de campo vetorial em Figura 23.12c.

Checkpoint 23.7 (a) Se a carga da partícula 2 no Exercício 23.1 for dobrada de modo que $q_2 = 2q_1$, o que acontece com a direção do campo elétrico nos pontos P1 a P4? (b) Se a carga na partícula 2 é negativa de modo que $q2 = -q1$, qual é a direção do elétrico campo nos pontos P1 a P4?

A Figura 23.11 fornece uma visão limitada do campo elétrico criado pelas duas partículas. Uma visão mais completa é fornecida na Figura 23.12. Este diagrama é obtido vetorialmente adicionando, para cada ponto da rede, os vetores do campo elétrico para o Individual partículas. Observe como o padrão de vetores se assemelha o padrão criado por duas partículas com carga idêntica em uma solução de fibras plásticas (Figura 23.13).

Usando o princípio da superposição, podemos determinar o campo elétrico produzido por qualquer sistema de partículas carregadas. A Figura 23.14, por exemplo, mostra um diagrama vetorial para o campo elétrico gerado por três partículas carregadas. Porque cada objeto carregado é feito de partículas carregadas - elétrons e prótons - podemos determinar o campo elétrico de qualquer objeto em qualquer posição no espaço. Para um objeto real, o cálculo pode ser muito tedioso ou mesmo intratável Porque do grande número de partículas carregadas, mas o princípio básico é como dado acima.

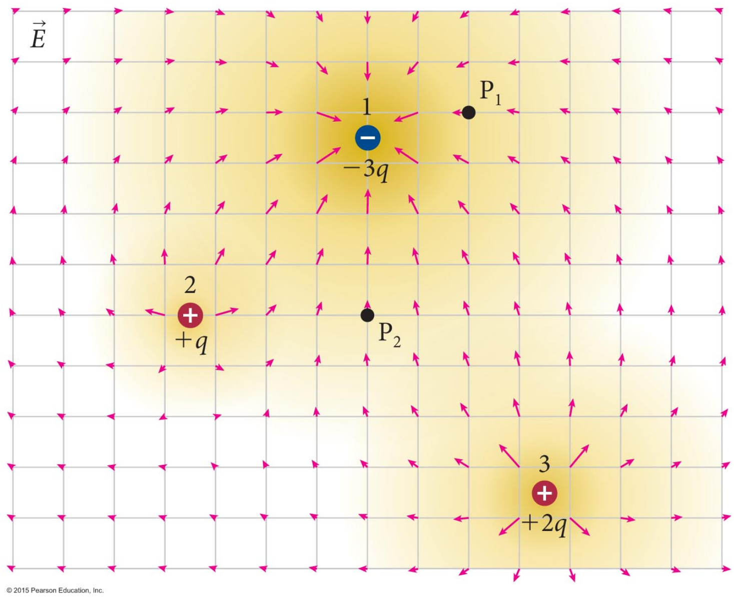


Figura 2.14: Diagrama de campo vetorial do campo elétrico criado por três objetos carregados.

Checkpoint 23.8 (a) Na Figura 23.14, qual é a direção da força $\sum \vec{F}^E$ exercido sobre uma partícula carregando uma carga q e colocada em P1? (b) Como o $\sum \vec{F}^E$ muda quando a partícula em P1 carrega uma carga 3q? (c) Faça a magnitude e a direção de $\sum \vec{F}^E$ em uma partícula carregada em P1 muda se a carga 2q no objeto 3 é dividido pela metade? (d) Qual é a direção de $\sum \vec{F}^E$ exercida sobre uma partícula carregando uma carga -q colocada no ponto P2?

2.4 Campos Elétricos e Forças

Antes de desenvolver técnicas adicionais para determinar os campos elétricos criados por sistemas de partículas carregadas, vamos considerar esta questão: Quais são as forças exercidas por um campo elétrico em objetos carregados ou polarizados? Uma das vantagens de trabalhar com campos elétricos é que, por qualquer sistema de partículas carregadas, uma vez que conhecemos o campo elétrico que o sistema cria em algum ponto P no espaço, podemos determinar a força exercida pelo sistema em qualquer outra partícula carregada colocada em P sem se preocupar com qualquer uma das partículas fontes individuais no sistema. * No Capítulo 22, usamos o modelo de ação à distância para discutir as forças exercidas por objetos carregados tanto em outros objetos carregados quanto em objetos polarizados. Agora podemos usar o modelo de campo para fazer a mesma coisa. Para partículas carregadas em repouso , ambos os métodos devem produzir o mesmo resultado.

Quando estudamos as forças exercidas por campos elétricos, é útil distinguir entre uniforme e não uniforme. No um campo elétrico uniforme, a direção e magnitude do os campos elétricos são iguais em todos os lugares. Nenhum campo elétrico é sempre uniforme em todo o espaço, mas como veremos em Seção 23.7 é possível criar regiões do espaço onde o campo elétrico é uniforme. Em um campo elétrico não uniforme, a direção e magnitude do campo elétrico variam de posição para posição. (Todos os campos elétricos que consideramos até agora não são uniformes.)

Vamos primeiro considerar o que acontece com uma partícula carregada colocada em um campo elétrico uniforme. Porque o campo elétrico é definido como a força elétrica por unidade de carga, a força $\vec{F}_p^E$ exercido por um campo elétrico $\vec{E}$ em uma partícula carregando uma carga q é $\vec{F}_p^E = q\vec{E}$. Porque $\vec{E}$ é o mesmo em todos os lugares, a força $\vec{F}_p^E$ exercido sobre a partícula é constante e por isso sofre uma aceleração constante $\vec{a} = \vec{F}_p^E/m = q\vec{E}/m = (q/m)\vec{E}$ onde m é a massa da partícula.

> Uma partícula carregada colocada em um campo elétrico uniforme sofre aceleração constante.

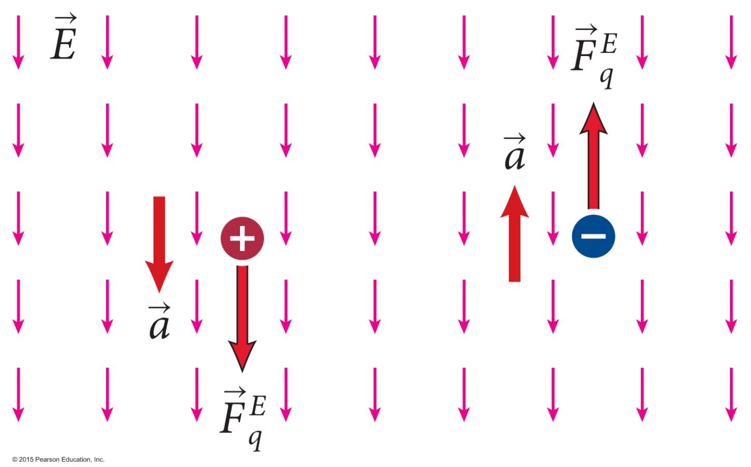


Figura 2.15: Forças exercidas em um campo elétrico uniforme em uma carga positiva e outra negativa

Se a partícula carrega uma carga positiva,$q > 0$, $\vec{F}_p^E$ e $\vec{a}$ apontam na mesma direção que $\vec{E}$. Se $q < 0$, $\vec{F}_p^E$ e $\vec{a}$ apontam na direção oposta à direção do campo elétrico (Figura 23.15).

Note de $\vec{a} = (q/m)\vec{E}$ que a magnitude da aceleração depende da magnitude do campo elétrico e da relação carga-massa q/m da partícula. Uma grande carga q faz com que uma força maior seja exercida sobre a partícula e, portanto, tenha uma maior aceleração; uma massa maior m significa a partícula tem maior inércia e portanto a aceleração é menor.

Porque já estudamos o movimento com aceleração constante, podemos aplicar nosso conhecimento ao movimento de partículas carregadas em um campo elétrico uniforme. Em geral, a trajetória dessas partículas é parabólica, como a trajetória de um projétil disparado perto da superfície da Terra, onde o campo gravitacional pode ser considerado uniforme em uma área limitada. No caso especial em que a velocidade inicial de uma partícula é paralela à direção do campo elétrico, a trajetória é uma linha reta, como a queda vertical de um objeto liberado do repouso. A principal diferença entre o movimento de projéteis perto da superfície da Terra e o movimento de partículas carregadas em um campo elétrico é o campo gravitacional da Terra é sempre direcionado verticalmente para baixo, enquanto o campo elétrico pode estar em qualquer direção.

2.4.1 Exemplo 23.2

Quatro partículas carregadas são disparadas com uma velocidade inicial horizontal vS em um campo elétrico uniforme que é direcionado verticalmente para baixo. O efeito da gravidade é desprezível. As partículas têm as seguintes cargas e massas: partícula 1 (q, m); 2 (q, 2m); 3 (2q, 2m); 4 (-q, m). Esboce as quatro trajetórias.

- INICIANDO: Porque a direção do campo elétrico é verticalmente para baixo, as três partículas carregadas positivamente experimentam uma força descendente e as de partículas carregadas negativamente experimentam uma força ascendente. A magnitude desta força não muda conforme as partículas se movem através do campo elétrico porque tanto a magnitude do campo quanto as cargas nas partículas são constantes.

- PREPARE UM PLANO: Como a força exercida em cada partícula é constante, as partículas experimentam acelerações constantes. Porque a direção da força é perpendicular a direção do movimento inicial das partículas, todas elas têm uma trajetória parabólica trajetória. As partículas carregadas positivamente têm uma constante aceleração descendente; a partícula carregada negativamente tem um aceleração ascendente constante. Porque $\vec{a} = (q/m)\vec{E}$, a magnitude da aceleração é maior quando q é grande e / ou m é pequeno.

- EXECUTE O PLANO: Eu desenho trajetórias que curvam para baixo por 1, 2, e 3 e para cima para 4 (Figura 23.16). A magnitude da a força elétrica exercida na partícula 2 é a mesma que aquela exercida na partícula 1, mas a aceleração da partícula 2 é menor porque esta partícula tem a maior massa. Eu indico essa diferença na aceleração por tornando a trajetória 1 mais curva do que a trajetória 2. A magnitude da força elétrica exercida na partícula 3 é duas vezes maior que a que é exercida sobre a partícula 1, mas a massa de 3 também é duas vezes maior, e então as duas partículas têm a mesma relação carga-massa e, portanto, a mesma aceleração e trajetória. A magnitude da a força elétrica exercida sobre a partícula 4 é a mesma que a exercida sobre partícula 1, mas aponta na direção oposta, e assim as trajetórias 1 e 4 são idênticos em forma, mas se curvam em direções opostas.

- AVALIE O RESULTADO: Meu esboço indica que as partículas com razão carga-massa mais positiva curvam para baixo. Por outro lado, as partículas com razões carga-massa mais nergativa se curvam mais para cima. Isso é o que Eu espero, porque a deflexão de uma partícula é uma função de ambos os valores de carga, que determina a magnitude da força exercida pelo campo elétrico nela (maior carga, maior deflexão), e sua massa, que relaciona a aceleração da partícula à força exercida nela (maior massa, menor deflexão).

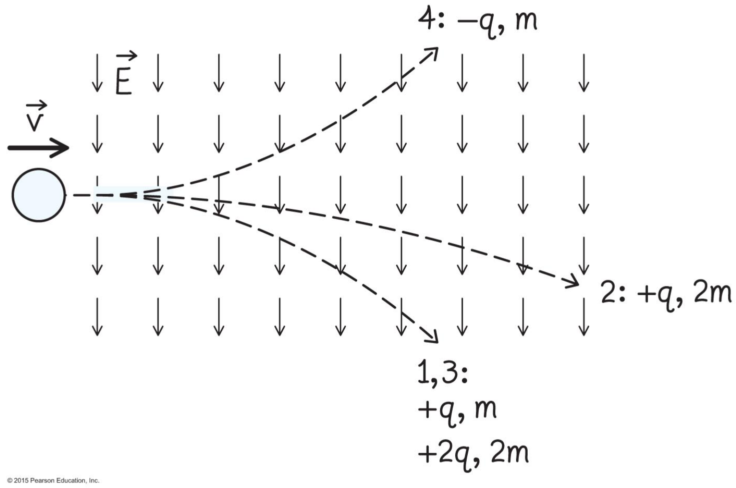


Figura 2.16

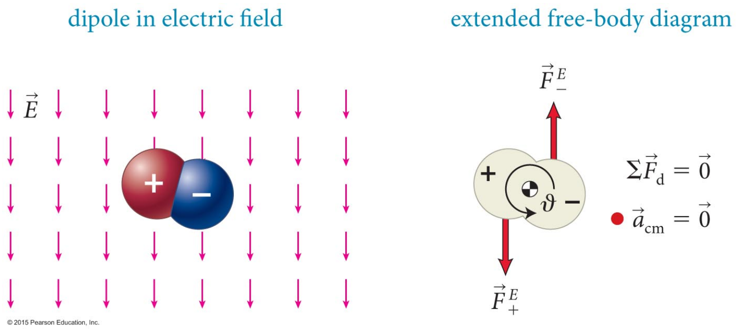


Figura 2.17: Diagrama de corpo livre estendido para um dipolo permanente colocado em um campo elétrico uniforme.

> Checkpoint 23.9 Uma gota de água carregando uma carga positiva é liberada do repouso em um campo elétrico horizontal uniforme perto da superfície da Terra. A força elétrica horizontal é comparável em magnitude à força gravitacional exercida pela Terra. Descreva a trajetória da gota.

Em um campo elétrico não uniforme, a força exercida sobre uma partícula carregada varia de uma posição para outra, então nós não pode facilmente especificar a trajetória da partícula sem saber mais sobre o campo elétrico. Como em um campo elétrico uniforme , no entanto:

> Uma partícula carregada positivamente colocada em um campo elétrico não uniforme tem uma aceleração na mesma direção como o campo elétrico; uma partícula carregada negativamente colocado em tal campo tem uma aceleração no sentido oposto direção.

No Capítulo 22, descobrimos que objetos carregados podem polarizar objetos eletricamente neutros, separando os centros de carga positiva e negativa. a configuração de carga resultante - quantidades iguais de positivo e carga negativa separada por uma pequena distância - é chamada de dipolo elétrico ou simplesmente dipolo. Muitas moléculas, como moléculas de água, são dipolos permanentes; isto é, os centros de carga positiva e negativa são mantidos separados por algum mecanismo interno. A Figura 23.17 ilustra as forças exercidas sobre um dipolo elétrico permanente em um campo elétrico uniforme. Porque o campo elétrico é uniforme e a magnitude da carga na extremidade positiva do dipolo é igual para a magnitude da carga na extremidade negativa, as forças exercidas nas duas extremidades são iguais em magnitude, mas na direção oposta, fazendo com que sua soma vetorial seja zero. Contudo, as forças exercidas nas duas extremidades causam um torque (veja o Capítulo 12).

Checkpoint 23.10 (a) Qual é o efeito do torque causado pelo campo elétrico no dipolo elétrico da Figura 23.17? (b) é o o mesmo torque para cada orientação da molécula?

A orientação de um dipolo elétrico pode ser caracterizada por um vetor, o momento de dipolo, que, por definição, aponta do centro de carga negativa para o centro de carga positiva , conforme mostrado na Figura 23.18 na próxima página. Como O checkpoint 23.10 ilustra, as forças elétricas criam um torque no dipolo que tende a alinhar o momento dipolo com o campo elétrico.

Em um campo elétrico não uniforme, a situação é mais complicada porque as duas extremidades do dipolo são agora sujeitas a forças que têm diferentes magnitudes, bem como direções diferentes. Considere, por exemplo, o campo elétrico não uniforme na Figura 23.18a, que ocorre devido a uma partícula positivamente carregada no lado esquerdo da figura. A magnitude de $\vec{F}_{-}^{E}$ é maior do que a magnitude de $\vec{F}_{+}^{E}$ porque a extremidade negativa do dipolo está mais perto da carga positiva da partícula. Assim, a soma vetorial das forças exercidas sobre as duas extremidades é diferente de zero, e assim o dipolo experimenta uma aceleração cuja magnitude e direção dependem de sua orientação em relação ao campo elétrico. Além disso, as forças criam um torque sobre o centro de massa do dipolo. Como em um campo elétrico uniforme:

Um dipolo elétrico permanente colocado em um campo elétrico está sujeito a um torque que tende a alinhar o momento de dipolo com a direção do campo elétrico. Se o campo for uniforme, o dipolo tem aceleração zero; se o campo elétrico não for uniforme, o dipolo tem uma aceleração diferente de zero.

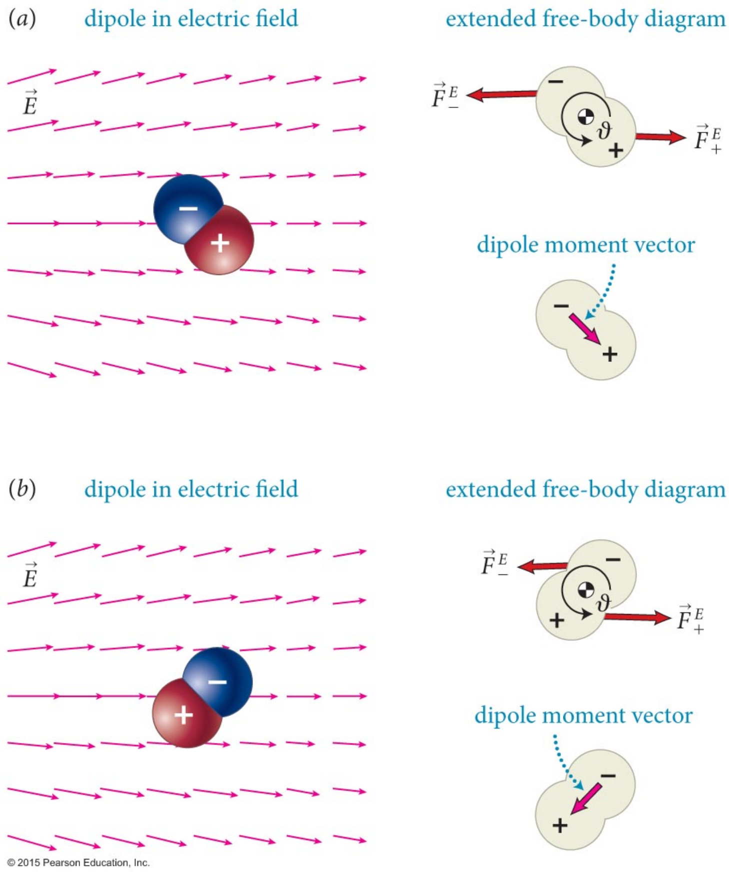


Figura 2.18: Diagrama de corpo livre estendido para um dipolo permanente colocado em um campo elétrico uniforme.

Checkpoint 23.11 (a) Desenhe um diagrama de corpo livre para o dipolo em Figura 23.18a e determinar a direção do centro do dipolo aceleração de massa. (b) Desenhe um diagrama de corpo livre para o dipolo na Figura 23.18b e descrever qualitativamente o movimento do dipolo.

Análise Quantitativa

2.5 Campo elétrico de uma partícula carregada

Na Seção 2 deste capítulo, definimos o campo elétrico em um certo ponto P no espaço como a força elétrica experimentada em P por uma partícula de teste carregando uma carga q_t dividida pela carga da partícula de teste:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_t^E}{q_t} \tag{2.1}$$

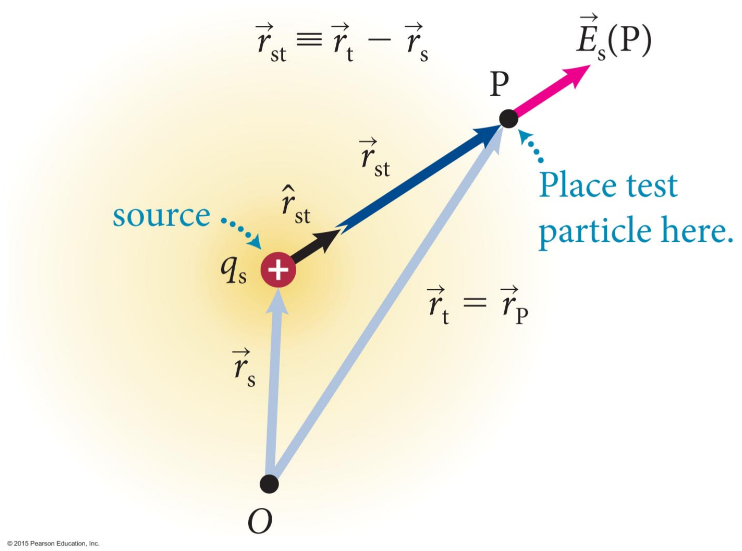


Figura 2.19: Para determinar o campo elétrico em P gerado por uma partícula de fonte carregada, colocamos uma partícula de teste em P.

A unidade SI do campo elétrico é o newton por coulomb (N/C). A Equação 2.1 não requer nenhum conhecimento da distribuição de carga que causa o campo elétrico: ela dá uma prescrição para determinar o campo elétrico em uma determinada posição no espaço. Podemos usar a lei de Coulomb, entretanto, para derivar uma expressão para o campo elétrico criado em algum ponto P devido a uma partícula de fonte carregando uma carga q_s na posição r_s (Figura2.19). Se colocarmos uma partícula de teste carregando uma carga q_t em P, a lei de Coulomb nos diz que a força exercida sobre a partícula de teste é:

$$\vec{F}_{st}^E = k\frac{q_s q_t}{r_{st}^2}\hat{r}_{st} \quad , \tag{2.2}$$

onde $k = 9,0 \times 10^9$ N m^2/C^2 é a constante de proporcionalidade que aparece na lei de Coulomb , r_{st} é a distância entre as duas partículas e $\hat{r}_{st}$ é um vetor unitário que aponta da partícula de origem para a partícula de teste. Se dividirmos a força elétrica exercida pela partícula fonte na partícula de teste pela carga q_t na partícula de teste, obtemos uma expressão para o campo elétrico criado pela partícula fonte em P:

$$\vec{E}_{st}^E = k\frac{q_s}{r_{st}^2}\hat{r}_{st} \quad , \tag{2.3}$$

Porque a partícula de teste não tem nada a ver com este campo elétrico, podemos omitir qualquer referência a ele escrevendo $r_{st} = r_{sP}$ e nos referindo apenas à posição do ponto P:

$$\vec{E}_s(P) = k\frac{q_s}{r_{sP}^2}\hat{r}_{sP} \quad , \tag{2.4}$$

Esta expressão representa o campo elétrico em P devido a uma partícula fonte carregando uma carga q_s na posição r_s. Como esperado, a magnitude do campo elétrico em P é proporcional a q_s, é independente de q_t e diminui com o inverso do quadrado da distância r_{sP} à partícula fonte. A direção do campo elétrico é para fora (isto é, na direção dada por $\hat{r}_{sP}$) quando q_s é positivo e para dentro quando q_s é negativo. Usando o princípio de superposição, podemos agora determinar o campo elétrico devido a um sistema de partículas 1, 2, ..., carregando cargas $q_1, q_2, ...$ O campo elétrico combinado é a soma vetorial dos campos elétricos individuais:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \ldots = \sum k\frac{q_i}{r_{iP}^2}\hat{r}_{iP} \quad , \tag{2.5}$$

Uma vez que o campo elétrico em uma determinada posição é conhecido, a força exercida sobre qualquer partícula carregando carga q colocada naquela posição pode ser encontrada:

$$\vec{F}_P^E = q\vec{E}. \tag{2.6}$$

Se q for positivo, a força exercida na partícula está na mesma direção que o campo elétrico; se q for negativo, a força exercida sobre a partícula é na direção oposta à direção do campo elétrico.

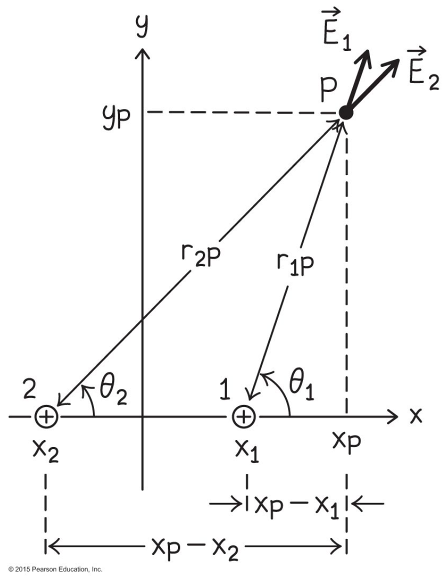


Figura 2.20

Ponto de verificação 23.12 Qual é a magnitude da força elétrica exercida pelo campo elétrico em um elétron colocado no ponto P na Figura 2.20? Qual é a aceleração inicial do elétron se ele for liberado do repouso a partir desse ponto? [$e = 1,6x10^{-19}$ C; $m_e = 9,1 \times 10^{-31}$ kg]

2.6 Campo de dipolo

Em seguida, examinamos o campo elétrico devido a um dipolo elétrico permanente. A Figura 2.21 mostra um dipolo que consiste em uma partícula carregando uma carga $+q_p$ em $x = 0$, $y = +(1/2)d$, e outra partícula carregando uma carga $-q_p$ em $x = 0$, $y = -(1/2)d$, onde d é a distância entre as duas partículas. A carga q_p do polo positivo é chamada de carga do dipolo, e a distância d é chamada de separação do dipolo. Cada partícula cria um campo elétrico em todas as posições no espaço, de modo que os dois campos se sobrepõem em todos os lugares. Podemos determinar o campo elétrico combinado em qualquer posição adicionando os dois campos vetorialmente. Vamos fazer isso para duas localizações gerais: em qualquer lugar ao longo do eixo x e em qualquer lugar ao longo do eixo y.

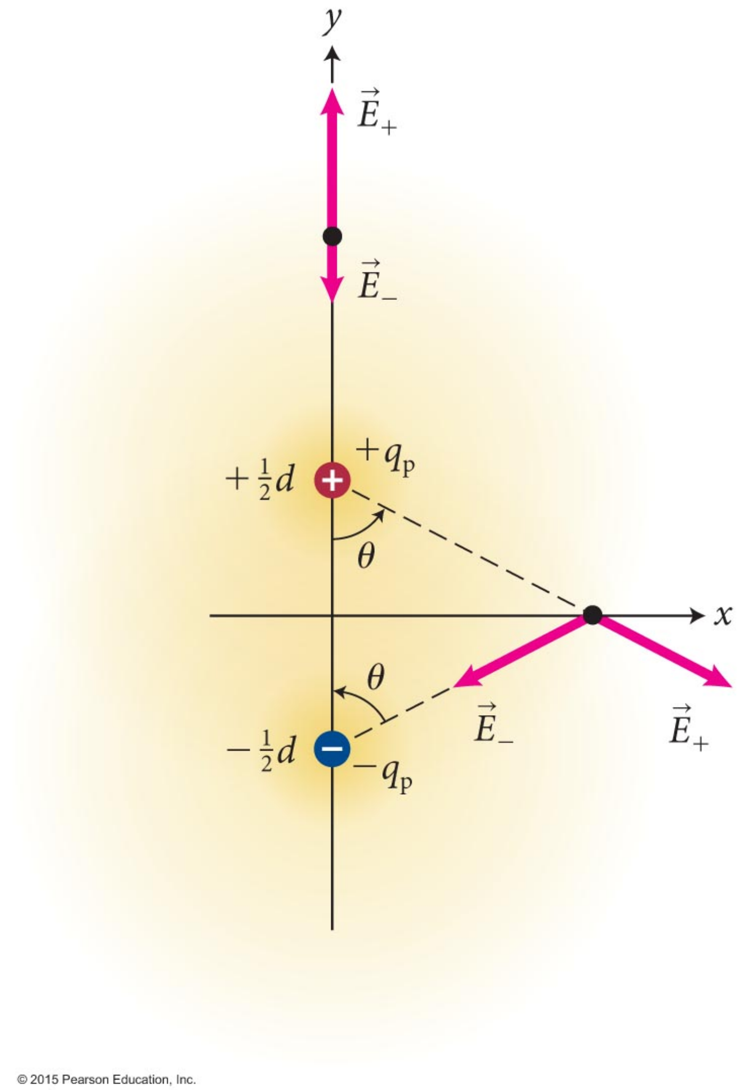


Figura 2.21: Calculando o campo elétrico devido a um dipolo.

Ao longo do eixo x, que divide o dipolo, as magnitudes dos campos elétricos devido às duas extremidades do dipolo são iguais:

$$E_+ = E_- = k\frac{q_P}{x^2 + (d/2)^2}\,. \tag{2.7}$$

Os componentes x desses dois campos elétricos apontam em direções opostas e, portanto, somam zero. A magnitude do campo elétrico combinado é, portanto, igual à soma dos componentes y:

$$\begin{aligned} E_y &= E_{+y} + E_{-y} = -(E_+ + E_-)\cos\theta & (2.8)\\ &= -\left(2k\frac{q_P}{x^2+(d/2)^2}\right)\left(\frac{d/2}{[x^2+(d/2)^2]^{1/2}}\right) = -k\frac{q_P d}{[x^2+(d/2)^2]^{3/2}} & (2.9)\end{aligned}$$

O produto $q_p d$ é uma medida da força do dipolo e é a magnitude do momento dipolo introduzido na Seção 4. Para especificar a força e a orientação do dipolo, podemos escrever essa quantidade como um vetor, chamado de momento de dipolo:

$$\vec{p} = q_P\vec{r}_P\,, \tag{2.10}$$

onde $\vec{r}_P \equiv \vec{r}_{-+} = \vec{r}_+ - \vec{r}_-$ é a posição da partícula carregada positivamente em relação à partícula carregada negativamente (e assim $d = r_p$). Como q_p é sempre considerado positivo, o momento de dipolo p aponta na mesma direção de r_p: ao longo do eixo do dipolo (a linha que passa pelo centro de cada partícula), na direção do pólo negativo para o positivo (Figura 2.22). Grandes momentos de dipolo permanentes podem ser causados por uma grande separação de dipolo d ou por uma grande carga de dipolo q_p. Conceitualmente, você pode pensar na magnitude do momento de dipolo como uma medida de quão fortemente o dipolo deseja se alinhar na direção de um campo elétrico. A unidade SI do momento de dipolo é o $C.m$. Para distâncias longe do dipolo ($x \gg d/2$), podemos ignorar $d/2$ e, portanto:

$$E_y \approx -k\frac{p}{|x^3|} \quad \text{longe do dipolo ao longo do eixo } x \tag{2.11}$$

O lado direito desta equação é negativo para x positivo e negativo e, portanto, em qualquer lugar ao longo do eixo x, o campo elétrico do dipolo E aponta na direção negativa de y, oposta à direção do momento de dipolo. A Equação 2.11 também mostra que a magnitude do campo elétrico é inversamente proporcional a x^3, em contraste com o campo elétrico de uma partícula carregada, que é inversamente proporcional a x^2 (Eq. 2.4). A razão pela qual o campo elétrico de um dipolo se aproxima de zero mais rápido à medida que x aumenta é que o ângulo entre E_+ e E_- na Figura 2.21 se aproxima de 180^o conforme x aumenta e, portanto, os campos elétricos dos dois pólos tendem a se cancelar mais e mais.

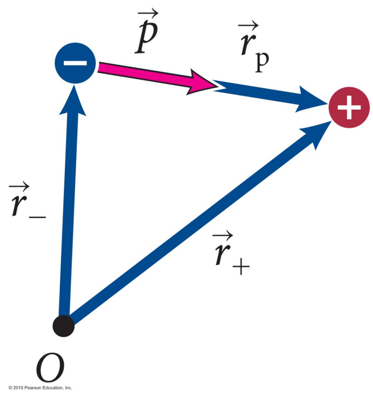


Figura 2.22: O momento de dipolo p aponta ao longo do eixo do dipolo do pólo negativo para positivo.

Ao longo do eixo y, o campo elétrico criado por cada extremidade do dipolo é direcionado ao longo do eixo y. Assim, para determinar o componente y do campo elétrico do dipolo em qualquer posição ao longo do eixo y, devemos adicionar os componentes y dos campos de cada partícula. Para $y > +d/2$:

$$E_y = E_{+y} + E_{-y} = k\frac{qp}{[y-(d/2)]^2} - k\frac{qp}{[y+(d/2)]^2}. \tag{2.12}$$

Depois de alguma álgebra, isso pode ser reescrito na forma

$$E_y = k\frac{qp}{y^2}\left[\left(1-\frac{d}{2y}\right)^{-2} - \left(1+\frac{d}{2y}\right)^{-2}\right] \quad (y > +d/2). \tag{2.13}$$

Para distâncias longe do dipolo, $y \gg +d/2$, então podemos usar a expansão da série binomial, que afirma que para $x \ll 1$, $(1+x)^n \approx 1 + nx$ (consulte o Apêndice B do livro texto). Aplicando essa expansão aos dois termos dentro dos colchetes na Eq. 2.13, obtemos

$$E_y = k\frac{qp}{y^2}\left[\left(1+2\frac{d}{2y}\right)-\left(1-2\frac{d}{2y}\right)\right] = (...) = 2k\frac{p}{y^3} \quad (y \gg +d/2). \tag{2.14}$$

O lado direito desta equação tem o mesmo sinal algébrico que y, então o campo elétrico do dipolo $\vec{E}$ aponta na direção y positiva. (Fazendo o mesmo cálculo para $y < -d/2$, você pode mostrar que o campo elétrico ainda aponta na positiva direção y. Entre as duas partículas carregadas, o campo elétrico aponta na direção y negativa.) A magnitude do campo elétrico é inversamente proporcional a y^3 - assim como ao longo do eixo x, os campos elétricos de cada um dos dois pólos tendem a se cancelar mais e mais conforme a distância do dipolo aumenta. Pode-se mostrar que o campo elétrico do dipolo tem a forma $1/r^3$ para todas as posições distantes do dipolo (onde r é a distância entre o ponto em questão e ao centro do dipolo). A razão é que os campos elétricos das extremidades positiva e negativa do dipolo se cancelam parcialmente, e esse cancelamento se torna mais completo longe do dipolo: quanto mais longe você estiver do dipolo, menor será a separação entre as partículas carregadas.

Ponto de verificação 23.13 A magnitude do campo elétrico criado pelo dipolo A em um certo ponto P é E_A. Se o dipolo for substituído por outro dipolo B que tenha seu momento de dipolo orientado na mesma direção, a magnitude do campo elétrico no ponto P é considerada maior: $E_B > E_A$. Qual dipolo tem o maior momento de dipolo? Para qual desses dois dipolos a carga dipolo q_p é maior?

2.7 Campos elétricos de distribuições de carga contínua

Até agora, lidamos apenas com partículas carregadas porque a lei de Coulomb se aplica apenas a partículas carregadas. No entanto, a maioria dos objetos carregados de interesse - de pentes carregados a componentes elétricos - não são partículas. Em vez disso, eles são corpos estendidos. Embora todo objeto macroscópico consista em um grande número de partículas carregadas - prótons e elétrons - não é prático calcular o campo individual de cada uma dessas partículas e então adicioná-los vetorialmente. Em vez disso, devemos tratar qualquer objeto macroscópico carregado como tendo uma distribuição de carga contínua e calcular o campo elétrico criado pelo objeto, dividindo a distribuição de carga no objeto em segmentos infinitesimalmente pequenos que podem ser considerados partículas de fonte carregadas carregando uma carga dq_s. Para o objeto macroscópico carregado mostrado na Figura 2.23, por exemplo, podemos usar a lei de Coulomb para obter porção infinitesimal do campo elétrico no ponto P:

$$d\vec{E}_s(P) = k\frac{dq_s}{r_{sP}^2}\hat{r}_{sP}\,, \tag{2.15}$$

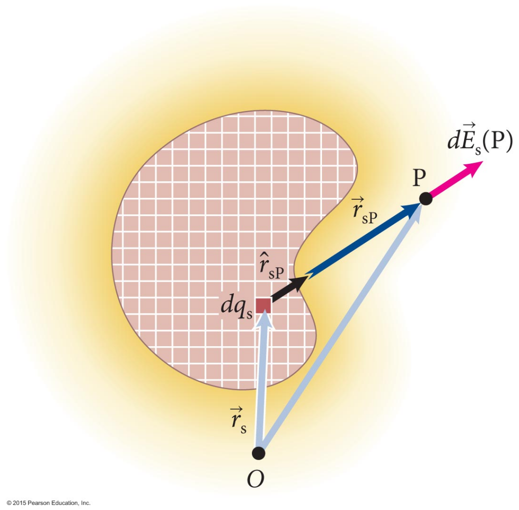


Figura 2.23: Para calcular o campo elétrico criado em P por uma distribuição contínua de carga, dividimos a distribuição em segmentos infinitesimalmente pequenos que podem ser tratados como partículas carregadas com carga dq_s.

Usando o princípio da superposição, podemos então somar as contribuições de todos os segmentos que compõem o objeto. Como os segmentos são infinitesimalmente pequenos, essa soma corresponde a uma integral:

$$\vec{E} = \int d\vec{E}_s = k \int \frac{dq_s}{r_{sP}^2} \hat{r}_{sP} \,. \tag{2.16}$$

Para avaliar essa integral, devemos expressar dq_s, $1/r_{sP}^2$ e $\hat{r}_{sP}$ em termos da(s) mesma(s) coordenada(s). Para fazer isso, é necessário expressar a carga no objeto em termos de densidade de carga - a quantidade de carga por unidade de comprimento, por unidade de área de superfície ou por unidade de volume. Para um objeto unidimensional, como um fio fino carregado de comprimento l carregando uma carga q uniformemente distribuída ao longo do fio, a densidade de carga linear - a quantidade de carga por unidade de comprimento (em coulombs por metro) - é dada por:

$$\lambda \equiv \frac{q}{l} \quad \text{(distribuição uniforme de carga).} \tag{2.17}$$

Para objetos bidimensionais com carga uniforme, usamos a densidade de carga superficial - a quantidade de carga por unidade de área (em coulombs por metro quadrado). Por exemplo, a densidade de carga superficial de uma placa plana de área A carregando uma carga q uniformemente distribuída é:

$$\sigma \equiv \frac{q}{A} \quad \text{(distribuição uniforme de carga).} \tag{2.18}$$

Para um objeto tridimensional uniformemente carregado, usamos acarga de volume densidade de:

$$\rho \equiv \frac{q}{V} \quad \text{(distribuição uniforme de carga).} \tag{2.19}$$

que dá a quantidade de carga por metro cúbico. O procedimento abaixo fornece algumas etapas úteis para realizar a integral na Eq. 2.16, e os quatro exemplos no livro texto mostram como colocar o procedimento em prática.

Procedimento: Calculando o campo elétrico de distribuições de carga contínua por integração

Para calcular o campo elétrico de uma distribuição de carga contínua, você precisa avaliar a integral na Eq. 2.16. As etapas a seguir o ajudarão a avaliar a integral.

1. Comece fazendo um esboço da distribuição de carga. Divida mentalmente a distribuição em pequenos segmentos. Indique um desses segmentos que carregue uma carga dq_s em seu desenho.

2. Escolha um sistema de coordenadas que permite expressar a posição do segmento em termos de um mínimo número de coordenadas (x, y, z, r ou u). Essas coordenadas são as variáveis de integração. Por exemplo, use um sistema de coordenadas radial para uma distribuição de carga com simetria radial. A menos que o problema especifique o contrário, deixe a origem no centro do objeto.

3. Desenhe um vetor mostrando o campo elétrico causado pelo segmento no ponto de interesse. Examine como os componentes desse vetor mudam conforme você varia a posição do segmento ao longo da distribuição de carga. Alguns componentes podem ser cancelados, o que simplifica muito o cálculo. Se você pode determinar a direção do campo elétrico resultante, você pode precisar calcular apenas um componente. Caso contrário, expresse $\hat{r}_{sP}$ em termos de suas variáveis de integração e avalie as integrais para cada componente do campo separadamente.

4. Determine se a distribuição de carga é unidimensional (um fio reto ou curvo), bidimensional (uma superfície plana ou curva) ou tridimensional (qualquer objeto em massa).

Expresse dq_s em termos da densidade de carga correspondente do objeto e as variáveis de integração.

5. Expresse o fator $1/r_{sP}^2$, onde r_{sP} é a distância entre dq_s e o ponto de interesse, em termos da(s) variável(is) de integração.

Neste ponto, você pode substituir suas expressões por dq_s e $1/r_{sP}^2$ na Eq. 2.16 e execute a integral (ou as componentes das integrais), usando o que você determinou sobre a direção do campo elétrico (ou substituindo sua expressão por $\hat{r}_{sP}$).

Ponto de verificação 23.14: (a) Descreva o campo elétrico entre duas folhas paralelas carregadas infinitamente grandes se a densidade de carga de uma folha é $+\sigma$ e a da outra é $-\sigma$. (b) Descreva o campo elétrico fora das folhas.

Ponto de verificação 23.15: Como o campo elétrico dentro de uma esfera uniformemente carregada varia com a distância do centro da esfera? [Dica: Qual é o campo elétrico dentro de uma esfera oca com carga uniforme?]

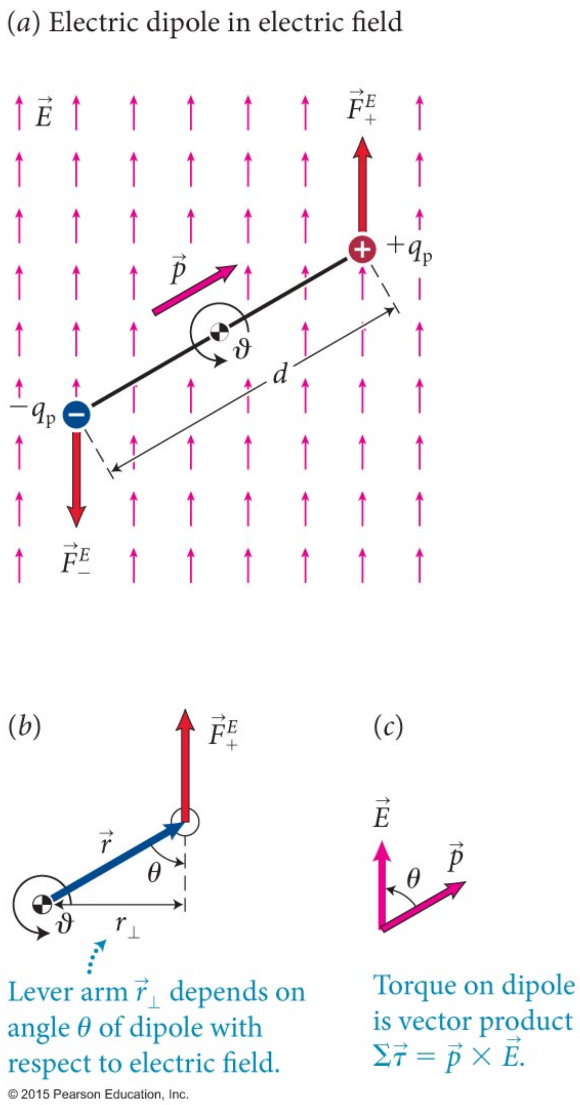


Figura 2.24: O torque em um dipolo elétrico causado por um campo elétrico tende a alinhar o momento de dipolo $\vec{p}$ com a direção do campo elétrico.

2.8 Dipolos nos campos elétricos

Vamos terminar este capítulo considerando as forças exercidas pelos campos elétricos nos dipolos. A Figura 2.24a mostra um dipolo que consiste em duas partículas que carregam cargas de igual magnitude, mas de sinais opostos, conectados por uma haste de comprimento d; o dipolo forma um ângulo θ com um campo elétrico uniforme $\vec{E}$ criado por alguma fonte distante. Como vimos na Seção 4, as forças exercidas pelo campo elétrico nas extremidades carregadas do dipolo são iguais em magnitude, mas na direção oposta, e assim a soma vetorial das forças exercidas no dipolo é zero. Conseqüentemente, a aceleração do centro de massa do dipolo é zero. Como as forças são exercidas em extremidades opostas do dipolo, no entanto, elas criam torques que fazem o dipolo girar no sentido anti-horário em torno de seu centro de massa. A Figura 2.24b mostra que a força exercida na extremidade positiva causa um torque no sentido anti-horário de magnitude

$$\tau_+ = r_\perp F_+^E = \left(\frac{1}{2} d \sin\theta\right)(q_P E), \tag{2.20}$$

onde $r_\perp$ é o braço de alavanca da força. A força exercida na extremidade negativa causa um torque idêntico porque o braço de alavanca e a magnitude da força são os mesmos. O campo elétrico, portanto, causa um torque no dipolo igual a

$$\sum \tau = 2\left(\frac{1}{2} d \sin\theta\right)(q_P E) = pE \sin\theta. \tag{2.21}$$

Isso pode ser escrito na forma vetorial como

$$\sum \vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E}. \tag{2.22}$$

onde $\vec{p}$ é o momento de dipolo, que por definição aponta da extremidade negativa do dipolo para a extremidade positiva e cuja magnitude é dada pela Eq. 2.10. De acordo com a regra da mão direita (consulte a Seção 12.4 do livro texto), o produto vetorial $\vec{p} \times \vec{E}$ na Eq. 2.22 fornece um torque que aponta para fora do plano do desenho na figura 2.24. Como vimos na Seção 12.8 do livro texto, esse torque de fato causa uma rotação no sentido anti-horário. O torque no dipolo é máximo quando o momento do dipolo é perpendicular ao campo elétrico e zero quando é paralelo ou anti-paralelo ao campo elétrico.

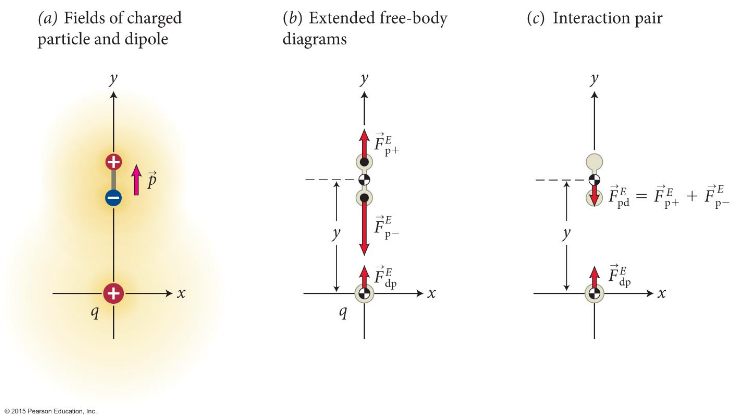


Figura 2.25: Um dipolo interage com uma partícula carregada

> Ponto de verificação 23.16 Is Eq. 2.21 válido se o centro de massa não está no meio do dipolo?

Como vimos na Seção 4, a soma vetorial das forças exercidas sobre os dipolos em campos elétricos não uniformes não é zero. Considere, por exemplo, a situação ilustrada na Figura 2.25a. Um dipolo com seu momento de dipolo $\vec{p}$ alinhado ao longo do eixo y é colocado no campo elétrico não uniforme gerado por uma partícula carregando uma carga q e localizada na origem. Porque a distância entre a carga negativa do dipolo e a partícula é menor do que a distância entre a carga positiva e a partícula, a magnitude da força atractiva $\vec{F}^E_{p^-}$ na extremidade negativa é maior do que a força repulsiva $\vec{F}^E_{p^+}$ na extremidade positiva.

Conseqüentemente, a soma vetorial das forças exercidas pelo campo não uniforme no dipolo é diferente de zero, e o dipolo é atraído pela partícula. Como essa atração varia com a posição y do dipolo?

Para responder a essa pergunta, podemos escrever uma expressão para a soma vetorial das forças exercidas nas duas extremidades do dipolo e examinar como essa soma varia com y. Alternativamente, podemos calcular a força exercida pelo dipolo na partícula usando nossos resultados da Seção 6. Essa força e a soma vetorial das forças exercidas pela partícula no dipolo formam um par de ação e reação, e portanto, suas magnitudes são as mesmas. A Equação 2.14 nos diz que, ao longo do eixo do dipolo, a magnitude do campo elétrico criado pelo dipolo é $2k(p/y^3)$, e portanto, a magnitude da força exercida pelo dipolo na partícula é

$$F^E_{dp} = 2k\frac{pq}{y^3} \tag{2.23}$$

A magnitude da força exercida pela partícula no dipolo é portanto igual em magnitude

$$F^E_{pd} = 2k\frac{pq}{y^3} \tag{2.24}$$

Como o campo elétrico de um dipolo, as forças entre um objeto carregado carregando carga q e um dipolo são inversamente proporcionais ao cubo do distância entre eles.

> Ponto de Verificação 23.17: Como dobrar cada uma das seguintes grandezas afeta a força entre um dipolo e uma partícula colocada perto do dipolo e carregando carga q? (a) a carga q, (b) a separação dipolo d do dipolo, (c) a carga de dipolo q_p, (d) a distância entre o dipolo e a partícula carregada

Como vimos no Capítulo anterior, objetos eletricamente neutros interagem com um objeto carregado porque eles se tornam polarizados na presença do objeto carregado. Considere um átomo neutro isolado. Os centros das distribuições de carga positiva e negativa do átomo coincidem e, portanto, o momento de dipolo do átomo é zero: $d = 0$ e, portanto, $\vec{p} = 0$ (Figura 2.26a). A presença de um campo elétrico externo - isto é, um campo elétrico criado por algum outro objeto carregado - causa uma separação entre os centros de carga positivo e negativo e, portanto, induz um momento de dipolo (Figura 2.26b). Para entender a interação entre objetos carregados e neutros, devemos, portanto, estudar a interação entre uma partícula carregada e o que é chamado de dipolo induzido. A primeira pergunta a fazer é: Como a magnitude do momento de dipolo induzido depende da presença de uma partícula carregada?

Quando um átomo neutro é colocado em um campo elétrico $\vec{E}$, verifica-se que, desde que as forças elétricas exercidas por esse campo nas partículas carregadas no átomo não sejam muito grandes, a separação de dipolo induzida d_{ind} no átomo obedece Lei de Hooke. Em outras palavras, a separação de dipolo induzida é proporcional à magnitude da força elétrica aplicada, $F^E_d = cd_{ind}$, com c sendo a ”constante de mola”do átomo. Podemos reescrever isso como:

$$\vec{p}_{ind} = \alpha\vec{E} \qquad \vec{E} \text{ não muito grande} \tag{2.25}$$

onde α, a polarizabilidade do átomo, é uma constante que expressa a facilidade com que as distribuições de carga no átomo são deslocados uns dos outros. A unidade SI de polarizabilidade é $C^2.m/N$.

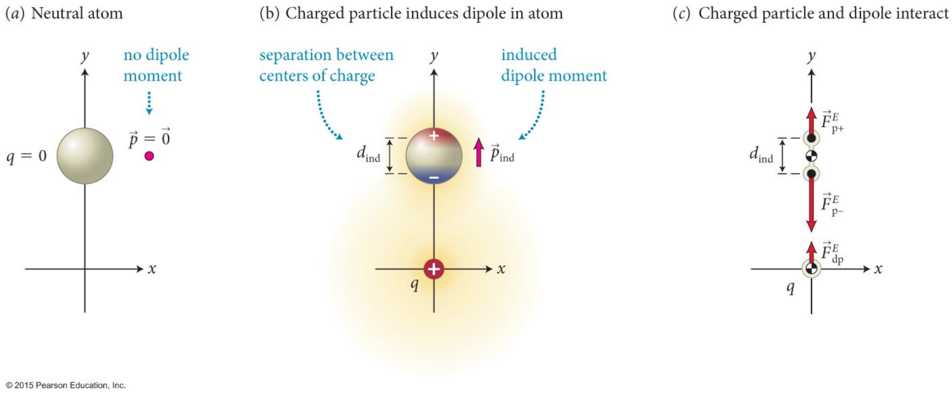


Figura 2.26: Uma partícula carregada induz um dipolo em um átomo eletricamente neutro.

> Ponto de Verificação 23.18: Dado que o momento de dipolo induzido p_{ind} aponta da extremidade negativa para a positiva de um dipolo induzido e o campo elétrico $\vec{E}$ desloca o centro da carga positiva na direção do campo elétrico e o centro de carga negativa na direção oposta, você espera que a polarizabilidade α seja positiva ou negativa?

O campo elétrico de uma partícula carregada é dado pela Eq. 2.4, então a magnitude do momento de dipolo induzido é proporcional ao inverso do quadrado da distância entre a partícula e o dipolo:

$$p_{ind} = \alpha E = \alpha k \frac{q}{y^2} \tag{2.26}$$

Em contraste, o momento de dipolo de um dipolo permanente é constante. Podemos agora substituir o resultado do dipolo induzido da Eq. 2.26 na Eq. 2.24 para determinar a força exercida por uma partícula carregada em um dipolo induzido:

$$F^E_{pd} = 2k \frac{p_{ind} q}{y^3} = \alpha \frac{2k^2 q^2}{y^5} \tag{2.27}$$

Este resultado mostra que a interação entre uma partícula carregada e um objeto polarizado depende muito mais fortemente da distância entre eles ($1/y^5$) do que a interação entre dois objetos carregados ($1/y^2$). Você deve ter notado isso no Capítulo anterior, ao comparar a atração entre duas tiras carregadas de fita com a atração entre uma tira carregada e um objeto neutro.[1] Conforme o objeto neutro se aproxima da tira carregada, a força varia tão rapidamente com a distância que muitas vezes é difícil evitar que a fita grude no objeto neutro .

> Ponto de Verificação 23.19 (a) Como dobrar a carga q_A carregada por um objeto A afeta a força exercida por A em outra partícula carregada? (b) Como dobrar q_A afeta a força exercida por A em um dipolo induzido? (c) Explique por que suas respostas às partes a e b são iguais ou diferentes. (d) A força exercida por uma partícula carregada pode causar um torque em um dipolo induzido?

[1] Experimente! Retire duas tiras de fita transparente de um dispensador, suspenda uma na borda de uma mesa e mova a outra lentamente em direção a ela. Observe como a interação entre as faixas varia de maneira relativamente uniforme em função da separação. Em seguida, mova sua mão lentamente em direção à tira suspensa e observe como a força aumenta rapidamente.

2.9 Problemas

Atividade 2.1 Uma molécula de água (Figura 2.27) tem um momento de dipolo de $6,19\times10^{-30}$ C.m. Se as ligações O–H fossem ligações iônicas (na realidade, são ligações covalentes polares), os elétrons dos dois átomos de hidrogênio seriam completamente transferidos para o átomo de oxigênio. Usando o momento dipolar medido e o fato de que os centros de carga positiva e negativa estão separados por 0,058 nm, você pode descartar a hipótese de que as ligações O – H são iônicas?

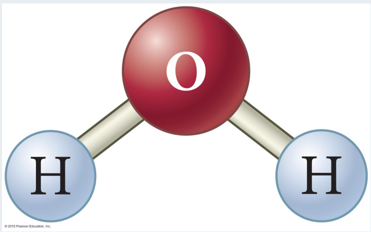


Figura 2.27

Atividade 2.2 Uma haste de 20 cm de comprimento é carregada com uma densidade de carga linear uniforme de 100 nC/m. Qual a magnitude e direção do campo elétrico gerado pela haste em um ponto localizado a 5 cm do ponto médio da haste?

Atividade 2.3 Um dipolo deve ser liberado em uma região onde existe um campo elétrico uniforme e nenhuma força dissipativa. Descreva o movimento do dipolo se ele for liberado do repouso em uma orientação (a) paralela ao campo elétrico e (b) quase perpendicular ao campo elétrico.

Exercício 2.1 As contas carregadas são colocadas nos cantos de um quadrado nas várias configurações mostradas na Figura 2.28. Cada conta vermelha carrega uma carga $+q$, e a conta azul carrega uma carga $-q$. Classifique as configurações de acordo com a magnitude do campo elétrico no centro do quadrado, a menor magnitude primeiro.

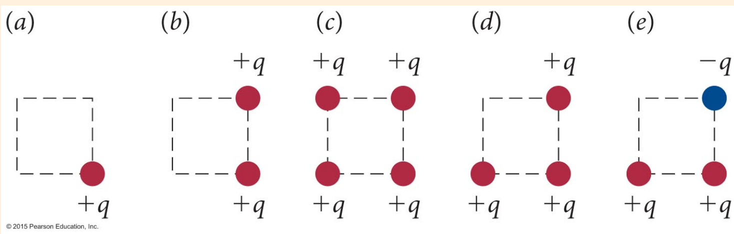


Figura 2.28

Exercício 2.2 Uma partícula, carregando uma carga positiva de 4 nC, localizada a 5 cm de uma partícula com carga desconhecida q, experimenta uma força elétrica atrativa de magnitude 115,2 N.
(a) Determine o valor da carga q.
(b) Usando a relação entre o campo elétrico e a força elétrica e o resultado da parte (a), determine a magnitude e a direção do campo elétrico devido à carga q em um ponto localizado a 20 cm de distância da carga de 4 nC em uma direção ortogonal à linha entre as duas cargas.

Exercício 2.3 Uma gota de óleo carregada positivamente, de 5 mg de massa, está em uma região de campo elétrico uniforme, direcionada para cima, de magnitude 1200 N/C. Além de seu peso e da força elétrica, a carga sente uma força resistiva $F = -kv$ proporcional à sua velocidade vetorial v, de modo que depois de um tempo ela se move para cima a uma velocidade constante $v_1 = 0,75$ m/s. Se invertermos a direção do campo elétrico, a queda se move para baixo a uma velocidade constante $v_2 = 1,53$ m/s. Use essas informações para determinar a carga na entrega.

Exercício 2.4 Um quadrupolo elétrico pode ser construído colocando quatro objetos carregados nos cantos de um quadrado (Figura 2.29). Os objetos são idênticos, exceto pela carga que carregam: os dois objetos em um par diagonalmente oposto, cada um carrega carga + q, e os outros dois objetos carregam carga -q. (Observe que não há carga no quadrupolo geral e que a combinação de quatro cargas não tem momento de dipolo.) Como a magnitude do campo elétrico depende da distância r do centro do quadrupolo? Pegue o comprimento do lado do quadrado como d e assuma r W d.

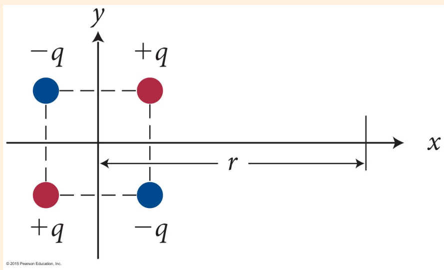


Figura 2.29

Problema 2.1 Duas esferas não condutoras 1 e 2 carregam a mesma carga, e a magnitude da força elétrica exercida por cada esfera na outra é 0,10 N quando elas estão 50 mm uma da outra. (a) Qual é a magnitude da carga em cada esfera, supondo que cada uma tenha um diâmetro muito menor do que 10 mm? (b) Qual é a magnitude do campo elétrico 50 mm diretamente acima da esfera 1 se a esfera 2 estiver localizada à esquerda da esfera 1? (c) Suas respostas mudariam se cada esfera tivesse um raio de 10 mm?

Problema 2.2 Um dipolo elétrico que tem separação dipolo d está alinhado ao longo do eixo y de um sistema de coordenadas xy, apontado na direção y positiva.
(a) Mostre que para x e y muito maiores do que d, os componentes xey do campo elétrico do são dados por

$$E_x = \frac{3kpxy}{(x^2+y^2)^{5/2}} \quad ; \quad E_x = \frac{kp(2y^2-x^2)}{(x^2+y^2)^{5/2}}$$

(b) Mostre que este resultado geral inclui os resultados especiais derivados na Seção 23.6 do livro texto.

Problema 2.3 Uma haste de comprimento p_R é composta por três segmentos não condutores de igual comprimento. O segmento do meio é eletricamente neutro e cada segmento final carrega uma carga negativa distribuída uniformemente $-q$. A haste é dobrada em um semicírculo de raio R. Determine a magnitude do campo elétrico no centro do arco semicircular.

Lista de problemas escolhidos para aula exploratória: