

- Veja "Demonstration of the Electric Fields of Current-Carrying Conductors" por O. Jefimenko, *American Journal of Physics*, janeiro, 1962.
13. Duas cargas puntiformes, de sinal e módulo desconhecidos, estão separadas por uma distância d . A intensidade do campo elétrico se anula num ponto do segmento que une as cargas. O que se pode concluir sobre estas cargas?
 14. Compare a variação de E com r para (a) uma carga puntiforme (Eq. 27-4), (b) um dipolo (Eq. 28-8a) e (c) um quadrupolo (Probl. 33).
 15. Cargas fixas $+Q$ e $-Q$ estão separadas pela distância L ; desenha-se uma reta longa passando por ambas. Qual é o sentido de \mathbf{E} sobre essa reta, para pontos (a) entre as cargas, (b) fora das cargas e na direção de $+Q$, e (c) fora das cargas e na direção de $-Q$?
 16. Duas cargas puntiformes de sinais e módulos desconhecidos estão fixas e separadas pela distância L . Pode-se ter $\mathbf{E} = 0$ para pontos fora do eixo (excluindo ∞)? Explique.
 17. De que maneira a Eq. 27-8b falha em representar as linhas de força da Fig. 27-5, se se abandona a exigência de que $r \gg a$?
 18. Superpondo-se dois dipolos de momentos \mathbf{p}_1 e \mathbf{p}_2 , o momento de dipolo da configuração resultante será dado por $\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2$?
 19. Na Fig. 27-5, atua sobre a carga inferior uma força finita no sentido de baixo para cima. O adensamento das linhas de força, no entanto, sugere ser E infinitamente grande no ponto em que se acha a carga. Uma carga colocada num campo infinito deveria sofrer a ação de uma força infinita. Qual é a solução deste dilema?
 20. Um dipolo elétrico é colocado num campo *não uniforme*. Existe uma força resultante, diferente de zero, atuando sobre ele?
 21. Um dipolo elétrico é colocado em repouso, num campo elétrico externo uniforme, como na Fig. 27-15a. Discutir o seu movimento.
 22. Um dipolo elétrico tem seu momento de dipolo \mathbf{p} alinhado com um campo externo uniforme \mathbf{E} . (a) O equilíbrio é instável ou estável? (b) Discuta a natureza do equilíbrio, quando \mathbf{p} e \mathbf{E} têm sentidos opostos.

SEÇÃO 27-2

1. Qual é o módulo de uma carga elétrica puntiforme escolhida de modo a produzir um campo de $2,0 \text{ N/C}$, à distância de 50 cm ?
Resposta: $5,6 \times 10^{-11} \text{ C}$.
2. Qual o módulo e o sentido do campo elétrico E que equilibra o peso de (a) um elétron e (b) uma partícula α ?
3. Existe um campo elétrico \mathbf{E} apontando para baixo, na atmosfera terrestre, com uma intensidade média de 150 N/C . Desejamos fazer flutuar neste campo uma esfera de enxofre de $0,5 \text{ kg}$. (a) Que carga (módulo e sinal) precisa ter a esfera? (b) Por que esta experiência não é realizável na prática? Dê uma explicação qualitativa apoiada em cálculos numéricos aproximados.
Resposta: (a) $-0,030 \text{ C}$. (b) A esfera explodiria, devido à repulsão Coulombiana mútua.
4. Num certo instante, as componentes da velocidade de um elétron deslocando-se entre duas placas paralelas, carregadas, são $v_x = 1,5 \times 10^5 \text{ m/s}$ e $v_y = 0,30 \times 10^4 \text{ m/s}$. Sendo o campo elétrico entre as placas dado por $\mathbf{E} = \mathbf{j} 1,2 \times 10^4 \text{ N/C}$, (a) qual é a aceleração do elétron? (b) Após a coordenada x do elétron ter mudado de $2,0 \text{ cm}$, qual será a velocidade do elétron?
5. Uma carga puntiforme, de $-2,0 \times 10^{-9} \text{ C}$, colocada num campo elétrico uniforme, está sujeita a uma força de $3,0 \times 10^{-6} \text{ N}$, que age verticalmente de cima para baixo. (a) Qual é a intensidade do campo? (b) Qual o módulo e o sentido da força elétrica exercida sobre um próton, colocado nesse campo? (c) Qual é a força da gravidade que atua sobre o próton? (d) Qual a relação entre as forças elétrica e gravitacional, nesse caso?
Resposta: (a) $1,5 \times 10^3 \text{ N/C}$. (b) $2,4 \times 10^{-16} \text{ N}$, para cima. (c) $1,6 \times 10^{-26} \text{ N}$. (d) $1,5 \times 10^{10}$.
6. Estabelece-se um campo elétrico uniforme, vertical, \mathbf{E} , no espaço existente entre duas placas paralelas. Suspende-se, nesse campo, uma pequena esfera condutora de massa m , presa a um cordel de comprimento l . Determinar o período deste pêndulo, quando a esfera está carregada com uma carga $+q$, se a placa inferior estiver positivamente carregada; repetir o cálculo para a placa inferior carregada negativamente.

problemas

SEÇÃO 27-3

- Suponhamos que o expoente da Lei de Coulomb não seja exatamente igual a "dois" mas, sim, igual a n . Demonstrar que, para $n \neq 2$, será impossível construir linhas que tenham as propriedades mencionadas (para as linhas de força) na Seç. 27-3. Para simplificar, considerar o campo devido a uma única carga puntiforme.
- Esboçar qualitativamente as linhas de força associadas a um disco circular (fino, de raio R) uniformemente eletrizado. (*Sugestão*: Considerar, como casos limites, pontos muito próximos ou muito afastados da superfície do disco.) Representar, apenas, as linhas existentes em um plano que contenha o eixo do disco.
- Esboçar qualitativamente as linhas de força entre duas camadas esféricas condutoras concêntricas, a camada interior tendo carga $+q_1$ e a exterior carga $-q_2$. Considerar os casos $q_1 > q_2$, $q_1 = q_2$, $q_1 < q_2$.
- (a) Esboçar qualitativamente as linhas de força associadas a três linhas de carga longas e paralelas, dispostas num plano perpendicular. Suponha que as interseções das linhas de carga com esse plano formam um triângulo equilátero e que cada linha de carga possua a mesma densidade linear de carga, λ (C/m). (b) Discutir a natureza do equilíbrio de uma carga de prova colocada no eixo central do conjunto de cargas.
- Considerar, na Fig. 27-4, duas linhas de força quaisquer que se originem na carga superior. Se o ângulo entre as suas tangentes nos pontos próximos da carga for igual a θ , em pontos afastados, tenderá para $\theta/\sqrt{2}$. Verificar e explicar o porquê desta afirmação. (*Sugestão*: Considerar o aspecto que as linhas devem ter próximo das cargas e longe delas.)

SEÇÃO 27-4

- Três cargas estão dispostas nos vértices de um triângulo equilátero como se vê na Fig. 27-16. Qual é a direção e o sentido da força que age sobre a carga $+q$?
- Dois pontos situados a uma distância de 15 cm. (a) Determinar o módulo, a direção e o sentido de E no ponto situado a meia distância entre as cargas. (b) Determinar o módulo, a direção e o sentido da força que age sobre um elétron colocado nesse ponto.
Resposta: (a) $6,4 \times 10^5$ N/C, em direção à carga negativa. (b) $1,0 \times 10^{-13}$ N, em direção à carga positiva.
- Dois pontos situados a uma distância de 12 cm. (a) Qual o campo elétrico que cada uma produz no local onde está a outra? (b) Qual a força que age sobre cada uma delas?
Resposta: (a) $2,0 \times 10^{-7}$ C e $+8,5 \times 10^{-8}$ C estão separadas por uma distância de 12 cm. (a) Qual o campo elétrico que cada uma produz no local onde está a outra? (b) Qual a força que age sobre cada uma delas?
- Dois pontos situados a uma distância de 12 cm. (a) Qual o campo elétrico que cada uma produz no local onde está a outra? (b) Qual a força que age sobre cada uma delas?
Resposta: (a) $2,0 \times 10^{-7}$ C e $+8,5 \times 10^{-8}$ C estão separadas por uma distância de 12 cm. (a) Qual o campo elétrico que cada uma produz no local onde está a outra? (b) Qual a força que age sobre cada uma delas?
- Dois pontos situados a uma distância de 12 cm. (a) Qual o campo elétrico que cada uma produz no local onde está a outra? (b) Qual a força que age sobre cada uma delas?
Resposta: (a) $2,0 \times 10^{-7}$ C e $+8,5 \times 10^{-8}$ C estão separadas por uma distância de 12 cm. (a) Qual o campo elétrico que cada uma produz no local onde está a outra? (b) Qual a força que age sobre cada uma delas?
- Dois pontos situados a uma distância de 12 cm. (a) Qual o campo elétrico que cada uma produz no local onde está a outra? (b) Qual a força que age sobre cada uma delas?
Resposta: (a) $2,0 \times 10^{-7}$ C e $+8,5 \times 10^{-8}$ C estão separadas por uma distância de 12 cm. (a) Qual o campo elétrico que cada uma produz no local onde está a outra? (b) Qual a força que age sobre cada uma delas?
- Dois pontos situados a uma distância de 12 cm. (a) Qual o campo elétrico que cada uma produz no local onde está a outra? (b) Qual a força que age sobre cada uma delas?
Resposta: (a) $2,0 \times 10^{-7}$ C e $+8,5 \times 10^{-8}$ C estão separadas por uma distância de 12 cm. (a) Qual o campo elétrico que cada uma produz no local onde está a outra? (b) Qual a força que age sobre cada uma delas?
- Dois pontos situados a uma distância de 12 cm. (a) Qual o campo elétrico que cada uma produz no local onde está a outra? (b) Qual a força que age sobre cada uma delas?
Resposta: (a) $2,0 \times 10^{-7}$ C e $+8,5 \times 10^{-8}$ C estão separadas por uma distância de 12 cm. (a) Qual o campo elétrico que cada uma produz no local onde está a outra? (b) Qual a força que age sobre cada uma delas?
- Dois pontos situados a uma distância de 12 cm. (a) Qual o campo elétrico que cada uma produz no local onde está a outra? (b) Qual a força que age sobre cada uma delas?
Resposta: (a) $2,0 \times 10^{-7}$ C e $+8,5 \times 10^{-8}$ C estão separadas por uma distância de 12 cm. (a) Qual o campo elétrico que cada uma produz no local onde está a outra? (b) Qual a força que age sobre cada uma delas?
- Dois pontos situados a uma distância de 12 cm. (a) Qual o campo elétrico que cada uma produz no local onde está a outra? (b) Qual a força que age sobre cada uma delas?
Resposta: (a) $2,0 \times 10^{-7}$ C e $+8,5 \times 10^{-8}$ C estão separadas por uma distância de 12 cm. (a) Qual o campo elétrico que cada uma produz no local onde está a outra? (b) Qual a força que age sobre cada uma delas?

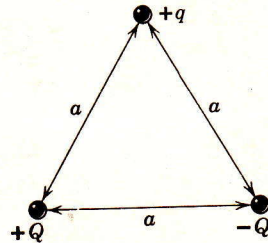


figura 27-16
Problema 12

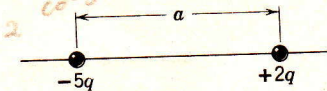


figura 27-17
Problema 16

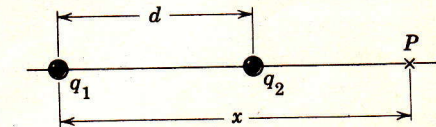


figura 27-18
Problema 17

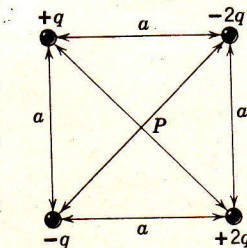


figura 27-19
Problema 18

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

Resposta: (a) $2,0 \times 10^{-7}$ C e $+8,5 \times 10^{-8}$ C estão separadas por uma distância de 12 cm. (a) Qual o campo elétrico que cada uma produz no local onde está a outra? (b) Qual a força que age sobre cada uma delas?

(b) Qual a direção e o sentido de E ? (c) É razoável que E varie, neste caso, proporcionalmente a r^{-2} , enquanto que para o dipolo da Fig. 27-8, varia proporcionalmente a r^{-3} ?

Resposta: (b) Ortogonal ao eixo e afastando-se dele.

20. Cargas $+q$ e $-2q$ estão fixas e separadas por uma distância d , como na Fig. 27-20. (a) Determinar E nos pontos A , B e C . (b) Esboçar aproximadamente as linhas de força.

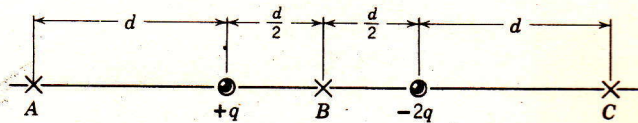


figura 27-20
Problema 20

21. Calcular E (direção, sentido e módulo) no ponto P da Fig. 27-21.
Resposta: $E = q/\pi\epsilon_0 a^2$, ao longo da mediatriz, para fora do triângulo.

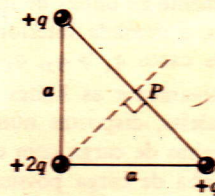


figura 27-21
Problema 21

22. Um bastão fino de vidro é encurvado de modo a formar um semicírculo de raio R . Uma carga $+Q$ está uniformemente distribuída ao longo da metade superior, e uma carga $-Q$ ao longo da inferior, como mostra a Fig. 27-22. Determinar o campo elétrico E no centro P , do semicírculo.

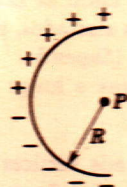


figura 27-22
Problema 22

23. Uma barra fina (de comprimento finito l e de material não condutor) acha-se carregada uniformemente, com uma carga total q . Demonstrar que o valor de E , no ponto P da sua mediatriz, representado na Fig. 27-23, é dado por

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 y} \frac{1}{\sqrt{l^2 + 4y^2}}$$

Demonstrar que, quando $l \rightarrow \infty$, esta expressão tende para o resultado do Exemplo 6.

24. Um elétron tem seu movimento restrito ao eixo do anel de cargas do Exemplo 5. Demonstrar que o elétron pode oscilar com uma frequência dada por

$$\omega = \sqrt{\frac{eq}{4\pi\epsilon_0 m a^3}}$$

Esta fórmula vale apenas para pequenas oscilações (isto é, quando $x \ll a$ na Fig. 27-10). (Sugestão: Demonstrar que o movimento é harmônico simples e utilizar a Eq. 15-11.)

25. Campo axial produzido por um dipolo elétrico. Na Fig. 27-8, considerar um ponto à distância r do centro do dipolo e situado no seu eixo. (a) Demonstrar que, para valores grandes de r , o campo elétrico nesse ponto é igual a

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{p}{r^3}$$

valor este duas vezes maior que o determinado nas condições do Exemplo 3. (b) Qual a direção de E ? Resposta: (b) Paralela a p .

26. Demonstrar, para o anel de cargas do Exemplo 5, que o valor máximo de E ocorre quando $x = a/\sqrt{2}$.

27. Considerar o anel de cargas do Exemplo 5. Supor, agora, que a carga q não esteja mais distribuída uniformemente no anel; mas sim, que haja uma carga q_1 distribuída uniformemente em uma das metades, e uma carga q_2 , também distribuída uniformemente, na outra metade do anel. Supor: $q_1 + q_2 = q$. (a) Determinar a componente do campo elétrico, num ponto do eixo e paralela a este, comparando-a com o caso uniforme do Exemplo 5. (b) Repetir o cálculo para a componente perpendicular ao eixo, num ponto do mesmo, comparando-a novamente com o caso uniforme do Exemplo 5.

Resposta: (a) $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qx}{(a^2 + x^2)^{3/2}}$; (b) $E = \frac{1}{2\pi^2\epsilon_0} \frac{(q_1 - q_2)a}{(a^2 + x^2)^{3/2}}$

28. Campo devido a um dipolo elétrico. Demonstrar que as componentes de E produzidas por um dipolo em pontos distantes, são dadas por

$$E_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{3pxy}{(x^2 + y^2)^{5/2}}$$

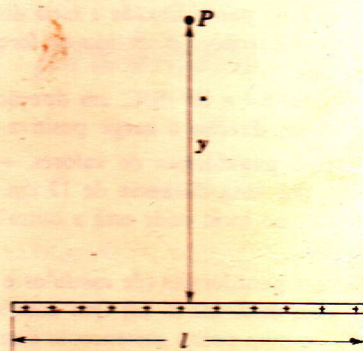


figura 27-23
Problema 23

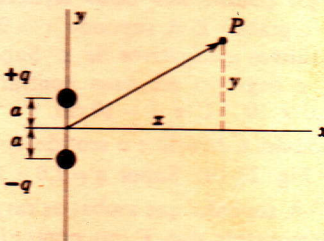


figura 27-24
Problema 28

calcula $E(x)$ e $\log E'(x) = 0$

$$E_y = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\rho(2y^2 - x^2)}{(x^2 + y^2)^{5/2}}$$

onde x e y são as coordenadas do ponto, como mostra a Fig. 27-24. Mostrar que esta expressão geral abrange os casos particulares da Eq. 27-8b e do Probl. 25.

29) Uma haste isolante "semi-infinita" (Fig. 27-25) é portadora de uma carga constante, por unidade de comprimento, λ . Mostrar que o campo elétrico no ponto P forma um ângulo de 45° com a haste. Verifique que esse resultado é independente da distância R .

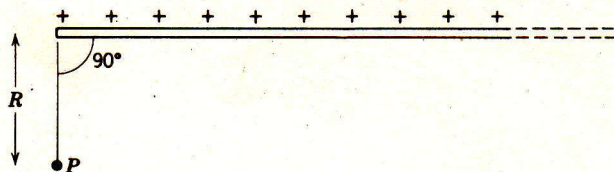


figura 27-25
Problema 29

30) Uma taça hemisférica não condutora, de raio interno a , acha-se uniformemente carregada em sua superfície interna com uma carga total q . Determinar o valor do campo elétrico no seu centro de curvatura.

31) Uma haste fina, não condutora, é encurvada de modo a formar um arco de circunferência de raio a , subtendendo um ângulo central θ_0 . Distribui-se uniformemente, em toda a sua extensão, uma carga total q . Determinar a intensidade do campo elétrico, no centro da circunferência, em função de a , q e θ_0 .

Resposta: $E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0\theta_0 a^2} \text{sen}(\theta_0/2)$.

32) Um disco (fino, circular, de raio a) acha-se carregado uniformemente, com uma densidade superficial de carga σ . Determinar o campo elétrico num ponto do eixo do disco, situado a uma distância r do mesmo.

33) *Quadrupolo elétrico.* A Fig. 27-26 representa um quadrupolo elétrico típico. É constituído por dois dipolos cujos efeitos em pontos distantes não chegam a se anular completamente. Demonstrar que o valor de E no eixo do quadrupolo, para pontos situados a uma distância r ($r \gg a$) do seu centro, é dado por

$$E = \frac{3Q}{4\pi\epsilon_0 r^4}$$

onde Q (igual a $2qa^2$) é chamado *momento de quadrupolo* da distribuição de cargas.

34) Um tipo de "quadrupolo elétrico" é formado por quatro cargas situadas nos vértices de um quadrado de lado $2a$. Um ponto P está a uma distância R do centro do quadrupolo sobre uma reta paralela a dois dos lados do quadrado, como mostra a Fig. 27-27. Mostrar que, para $R \gg a$, o campo elétrico em P é dado, aproximadamente, por

$$E = \frac{3(2qa^2)}{4\pi\epsilon_0 R^4}$$

(Sugestão: Considere o quadrupolo como sendo formado por dois dipolos.)

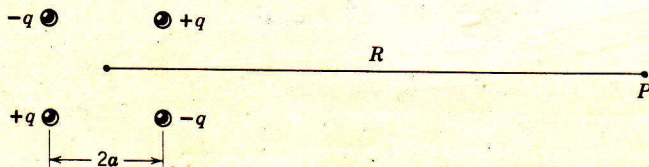


figura 27-27
Problema 34

SEÇÃO 27-5

35) Existe um campo elétrico uniforme no espaço entre duas placas de cargas opostas. Um elétron parte do repouso na superfície da placa carregada negativamente e incide sobre a superfície da placa oposta, a 2,0 cm de distância,

aqui a distância não varia

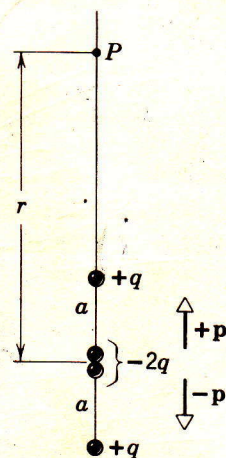


figura 27-26
Problema 33

após 1.5×10^{-8} s. (a) Qual é a velocidade desse elétron quando ele incide sobre a segunda placa? (b) Qual é o módulo do campo elétrico E ?

Resposta: (a) 2.7×10^6 m/s. (b) 1.0×10^3 N/C.

36. Um elétron, com uma velocidade de 5.0×10^8 cm/s, é lançado paralelamente a um campo elétrico de 1.0×10^3 N/C, cujo sentido concorre para frear-lhe o movimento. (a) Que distância o elétron percorrerá antes de atingir (momentaneamente) o repouso? (b) Quanto tempo isso levará? (c) Se o campo se tornar nulo bruscamente, após percorridos 0,8 cm, que fração da sua energia inicial perderá o elétron ao atravessá-lo?

37. (a) Determinar a aceleração recebida por um elétron, colocado num campo elétrico uniforme de 10^6 N/C. (b) Quanto tempo esta partícula gastaria para, partindo do repouso, atingir um décimo da velocidade da luz? Supor que a Mecânica Newtoniana seja válida.

Resposta: (a) 1.8×10^{17} m/s². (b) 1.7×10^{-10} s.

38. Um elétron é projetado, como na Fig. 27-28, com uma velocidade de 6.0×10^6 m/s, segundo um ângulo θ de 45° . $E = 2.0 \times 10^3$ N/C (apontando de baixo para cima), $d = 2,0$ cm e $l = 10,0$ cm. (a) Atingirá o elétron uma das duas placas? (b) Se atingir, em que ponto isso ocorrerá?

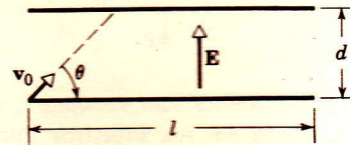


figura 27-28
Problema 38

39. *Experiência de Millikan.* No aparelho da Fig. 27-24 (idealizado por R. A. Millikan) uma pequena gota de óleo carregada, colocada num campo elétrico uniforme E , pode ser "equilibrada" ajustando-se o valor de E de modo que a força elétrica na gota seja exatamente igual e oposta ao seu peso. O raio da gota é de $1,64 \times 10^{-4}$ cm, e o valor de E na situação de equilíbrio é de $1,92 \times 10^5$ N/C. (a) Qual a carga da gota em termos da carga do elétron e ? (b) Por que Millikan não tentou "equilibrar" elétrons no lugar de gotas de óleo? A densidade do óleo é de $0,851$ g/cm³. (Esta foi a maneira usada por Millikan na primeira medida da carga do elétron. Ele calculou o raio das gotas, observando a velocidade limite com que elas caíam no ar, na ausência do campo elétrico. As gotas foram eletrizadas por meio de uma irradiação com pulsos de raios X.) Ver *The Electron* por Robert Millikan, 2.^a ed., University of Chicago Press, 1924.

Resposta: (a) $5,0 e$. (b) Não se podem ver elétrons; além disso, o valor de E em equilíbrio seria inconvenientemente pequeno.

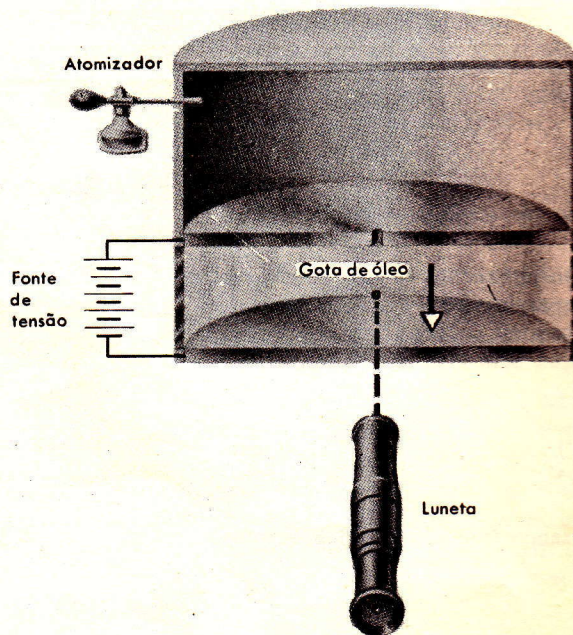


figura 27-29
Problema 39

O aparelho de Millikan. Gotas de óleo eletrizadas, introduzidas pelo vaporizador A, caem através do orifício na placa B.

40. Numa de suas primeiras experiências (1911), Millikan observou para a carga de uma mesma gota em tempos diferentes, os seguintes valores

$6,563 \times 10^{-19}$ C	$13,13 \times 10^{-19}$ C	$19,71 \times 10^{-19}$ C
$8,204 \times 10^{-19}$ C	$16,48 \times 10^{-19}$ C	$22,89 \times 10^{-19}$ C
$11,50 \times 10^{-19}$ C	$18,08 \times 10^{-19}$ C	$26,13 \times 10^{-19}$ C

Que valor para a carga elementar e pode ser deduzido destes dados?

SEÇÃO 27-6

41. Dipolo num campo não uniforme. (a) Deduzir a expressão para dE/dz num ponto situado a meia distância entre duas cargas positivas iguais, sendo z a distância a partir de uma delas, medida sobre o segmento de reta por elas definido. (b) Ficará um pequeno dipolo, colocado nesse ponto com seu eixo coincidente com o eixo dos z , sujeito à ação de alguma força? Lembrar que, nesse ponto, $E = 0$.

Resposta: (a) $dE/dz = -8q/\pi\epsilon_0 d^3$, onde d é a distância entre as cargas. (b) Sim.

42. Determinar a frequência de oscilação de um dipolo elétrico, de momento p e momento de inércia I , para pequenas amplitudes de oscilação em torno de sua posição de equilíbrio, num campo elétrico uniforme de intensidade E .

43. Uma carga $q = 3,0 \times 10^{-6}$ C dista 30 cm de um dipolo, medidos sobre o seu plano bisetor perpendicular. A intensidade da força sobre a carga é $5,0 \times 10^{-6}$ N. Mostrar num diagrama (a) a direção da força sobre a carga, (b) a direção da força sobre o dipolo, e (c) determinar a intensidade da força sobre o dipolo. Resposta: (a) Oposta a p . (b, c) $5,0 \times 10^{-6}$ N, paralela a p .

↳ força e reação pois R dipolo + carga = 0