

Halliday & Resnick
Fundamentos de Física
Eletromagnetismo
Volume 3



LTC
EDITORA



www.grupogen.com.br
<http://gen-io.grupogen.com.br>



Conteúdos editoriais



ROCA

LTC

atlas



O **GEN | Grupo Editorial Nacional** reúne as editoras Guanabara Koogan, Santos, Roca, AC Farmacêutica, LTC, Forense, Método, EPU, Atlas e Forense Universitária



O **GEN-IO | GEN – Informação Online** é o repositório de material suplementar dos livros dessas editoras

www.grupogen.com.br

<http://gen-io.grupogen.com.br>



Capítulo 22

Campos Elétricos



22-1 O Campo Elétrico



Objetivos do Aprendizado

22.01 Saber que uma partícula carregada cria um campo elétrico no espaço em torno que é uma grandeza vetorial e que, portanto, possui um módulo e uma orientação.

22.02 Saber que um campo elétrico pode ser usado para explicar por que uma partícula carregada pode exercer uma força eletrostática em outra partícula carregada, mesmo que as partículas não estejam em contato.

22.03 Explicar de que modo uma pequena carga de teste positiva pode ser usada (pelo menos em princípio) para medir o campo elétrico em um ponto qualquer do espaço.

22.04 Explicar o que são linhas de campo elétrico, onde começam, onde terminam, e o que significa o espaçamento das linhas.



q_1

?



q_2

Como a partícula 1 “sabe” que existe a partícula 2? Em outras palavras, se as partículas não se tocam, por que a partícula 2 afeta a partícula 1? Como explicar essa *ação a distância*?



Campo Elétrico



q_1

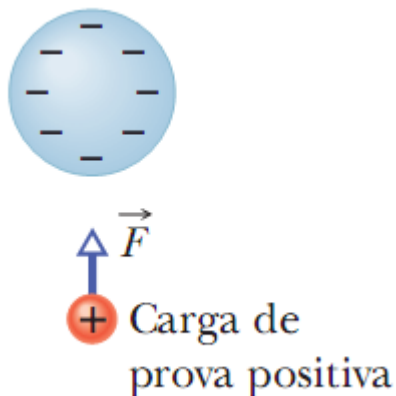


q_2

A explicação que vamos apresentar é a seguinte: A partícula 2 cria um **campo elétrico** no espaço que a cerca, mesmo que o espaço esteja vazio. Quando a partícula 1 é colocada em um ponto qualquer desse espaço, a partícula "sabe" que a partícula 2 existe porque é afetada pelo campo elétrico que a partícula 2 criou nesse ponto. Assim, a partícula 2 afeta a partícula 1, não por contato direto, como acontece quando você empurra uma xícara de café, mas por meio do campo elétrico que a partícula 2 produz.



Campo Elétrico

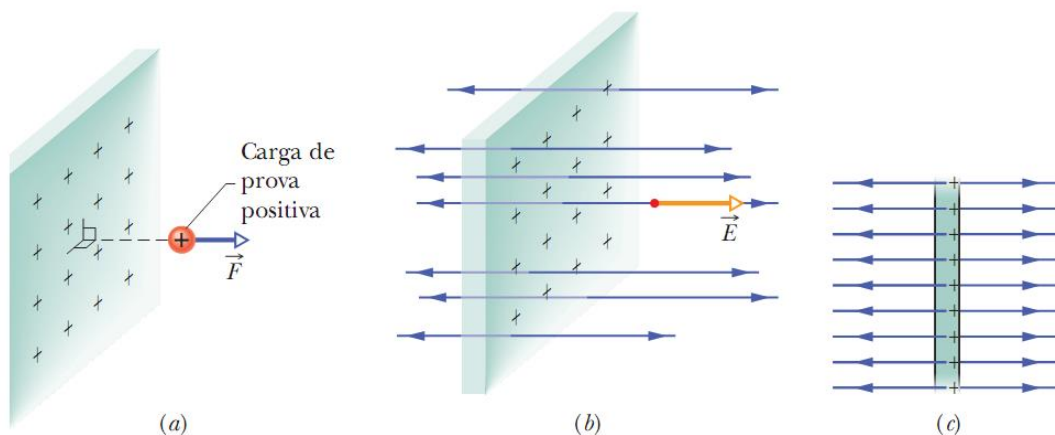


O campo elétrico \vec{E} em um ponto do espaço é definido em termos da força eletrostática \vec{F} a que seria submetida uma carga de prova positiva q_0 colocada nesse ponto:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

Linhas de Campo Elétrico

As linhas de campo elétrico ajudam a visualizar o módulo e a orientação do campo elétrico. O vetor campo elétrico em qualquer ponto é tangente à linha de campo elétrico nesse ponto. A concentração de linhas de campo elétrico em uma região é proporcional ao módulo do campo elétrico na região.



(a) A força que age sobre uma carga de prova positiva colocada nas proximidades de uma placa muito grande, isolante, com uma distribuição uniforme de carga positiva na superfície direita. (b) O vetor campo elétrico na posição da carga de prova e as linhas de campo nas vizinhanças da placa. As linhas de campo elétrico começam na superfície da placa. (c) Vista lateral de (b).

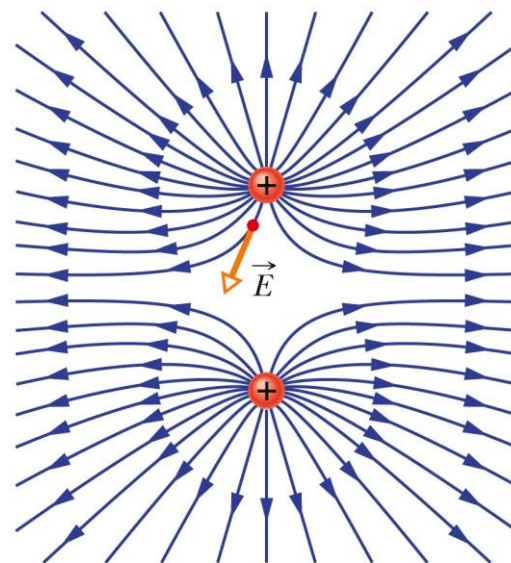


Linhas de Campo Elétrico



As linhas de campo elétrico se afastam das cargas positivas (onde começam) e se aproximam das cargas negativas (onde terminam).

- (1) Em todos os pontos do espaço, o vetor campo elétrico é tangente à linha de campo elétrico que passa pelo ponto e tem o mesmo sentido que a linha, como mostra a figura para um desses vetores.
- (2) As linhas de campo elétrico são menos espaçadas nas regiões em que o módulo do campo elétrico é maior.



Linhas de campo de duas partículas com cargas positivas iguais. O desenho não transmite a ideia de que as partículas se repelem?



22-2 O Campo Elétrico Produzido por uma Partícula Carregada



Objetivos do Aprendizado

22.05 Desenhar uma partícula carregada, indicar o sinal da carga, escolher um ponto próximo e desenhar o vetor campo elétrico nesse ponto, com a origem no ponto.

22.06 Dado um ponto nas vizinhanças de uma partícula carregada, indicar a direção do vetor campo elétrico e o sentido do campo.

22.07 Dado um ponto nas vizinhanças de uma partícula carregada, conhecer a relação entre o módulo E do campo, o valor absoluto $|q|$ da carga e a distância r entre o ponto e a partícula.

22.08 Saber que a equação usada para calcular o campo elétrico nas vizinhanças de uma partícula não pode ser usada para calcular o campo elétrico nas vizinhanças de um objeto macroscópico.

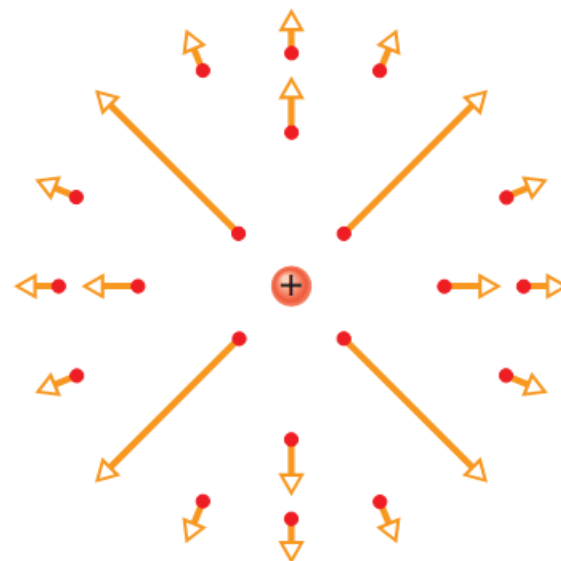
22.09 Se existe mais de um campo elétrico em um ponto do espaço, calcular o campo elétrico resultante usando uma soma vetorial (e não uma soma algébrica) dos campos elétricos envolvidos.

O módulo do campo elétrico **E** criado por uma partícula de carga q em um ponto situado a uma distância r da partícula é dado por

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

Os vetores campo elétrico criados por uma partícula positivamente carregada apontam para longe da partícula; os vetores campo elétrico criados por uma partícula negativamente carregada apontam para a partícula.

Se o campo elétrico em um ponto do espaço é criado por mais de uma partícula, o campo elétrico total é a soma dos campos elétricos individuais; o campo elétrico obedece ao **princípio da superposição**.



Vetores campo elétrico em vários pontos das vizinhanças de uma partícula de carga positiva.



22-3 O Campo Elétrico Produzido por um Dipolo



Objetivos do Aprendizado

22.10 Desenhar um dipolo elétrico, indicando as cargas (valores e sinais), o eixo do dipolo e a orientação do momento dipolar elétrico.

22.11 Conhecer a orientação do campo elétrico em qualquer ponto do eixo do dipolo, dentro e fora da região entre as cargas.

22.12 Saber que a equação do campo elétrico produzido por um dipolo elétrico pode ser deduzida a partir das equações do campo elétrico produzido pelas cargas elétricas que formam o dipolo.

22.13 Comparar a variação do campo elétrico com a distância para uma partícula isolada e para um dipolo elétrico e verificar que o campo elétrico diminui mais depressa com a distância no caso de um dipolo.



22.14 Conhecer a relação entre o módulo p do momento dipolar elétrico, a distância d entre as cargas e o valor absoluto q das cargas.

22.15 Para qualquer ponto do eixo do dipolo situado a uma grande distância das cargas, conhecer a relação entre o módulo E do campo elétrico, a distância z do centro do dipolo e o módulo p do momento dipolar.



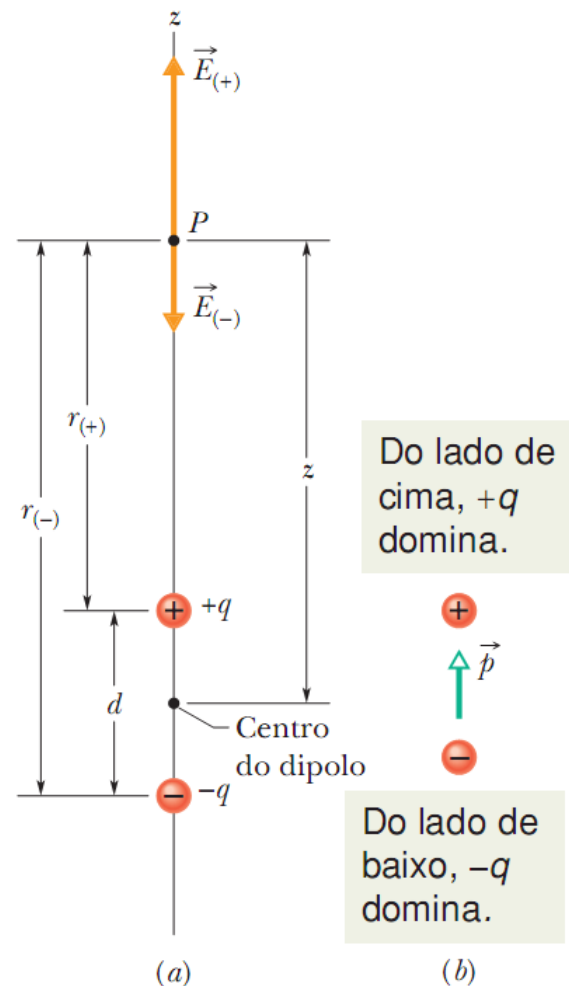
Dipolo Elétrico

Um dipolo elétrico é formado por duas partículas de cargas de mesmo valor absoluto q e sinais opostos, separadas por uma pequena distância d .

O módulo do campo elétrico criado por um dipolo elétrico em um ponto distante do eixo do dipolo (reta que passa pelas duas cargas) pode ser escrito em função do produto qd ou do módulo p do momento dipolar:

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

em que z é a distância entre o ponto e o centro do dipolo.





22-4 O Campo Elétrico Produzido por uma Linha de Carga



Objetivos do Aprendizado

22.16 No caso de uma distribuição uniforme de carga, calcular a densidade linear de carga λ de uma linha, a densidade superficial de carga σ de uma superfície e a densidade volumétrica de carga ρ de um sólido.

22.17 No caso de uma linha uniforme de carga, determinar o campo elétrico total em um ponto nas vizinhanças da linha dividindo a distribuição em elementos de carga dq e

somando (por integração) os campos elétricos produzidos por esses elementos na posição do ponto.

22.18 Explicar de que forma a simetria pode ser usada para calcular o campo elétrico em um ponto nas vizinhanças de uma linha uniforme de carga.



Ideias Básicas

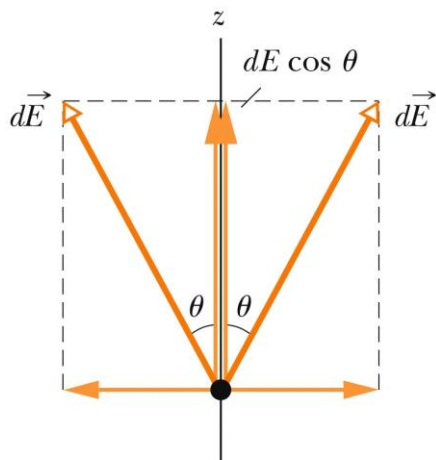
- A equação do campo elétrico criado por uma partícula não pode ser aplicada a um objeto macroscópico (que possui uma **distribuição de carga contínua**).
- Para calcular o campo elétrico produzido por um objeto macroscópico, consideramos primeiro o campo elétrico produzido por um elemento de carga dq do objeto, suficientemente pequeno, para que possamos usar a equação do campo criado por uma partícula. Em seguida, somamos, por integração, os campos elétricos $d\mathbf{E}$ criados por todos os elementos de carga da partícula.
- Como os campos elétricos $d\mathbf{E}$ têm módulos e orientações diferentes, é importante verificar se a simetria permite cancelar alguma componente dos campos, o que facilita a integração.



Anel de Carga

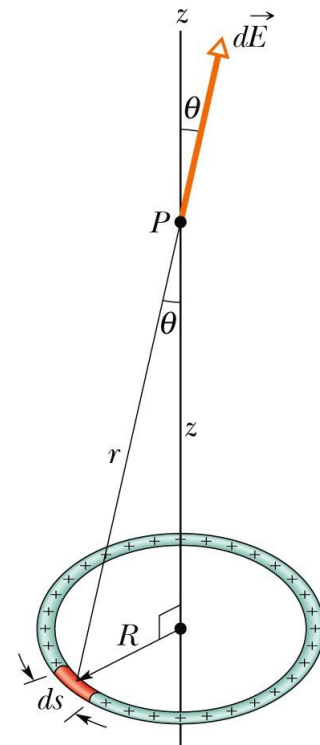
Campo no Ponto P do Eixo z

Cancelamento de Componentes. Na figura da direita, considere o elemento de carga no lado oposto do anel. Ele também produz um campo de módulo dE , mas o vetor faz um ângulo θ no sentido oposto ao do primeiro elemento, como mostra a vista lateral abaixo. Assim, as componentes perpendiculares ao eixo se cancelam. Como esse cancelamento ocorre para os elementos de carga simétricos ao longo de todo o anel, o campo resultante na direção perpendicular ao eixo do anel é nulo.



As componentes perpendiculares ao eixo z se cancelam; as componentes paralelas se somam.

Copyright © 2014 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.



Um anel de carga positiva. Um elemento de carga, de comprimento ds (muito exagerado na figura), cria um campo elétrico dE no ponto P .

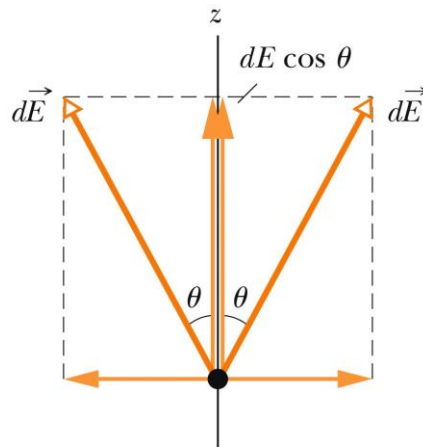
Anel de Carga

Soma de Componentes. Como mostra a figura abaixo, as componentes paralelas do campo são dadas por $d\vec{E} \cos \theta$. Podemos calcular o valor de $\cos \theta$ usando teorema de Pitágoras:

$$\cos \theta = \frac{z}{r} = \frac{z}{(z^2 + R^2)^{1/2}}$$

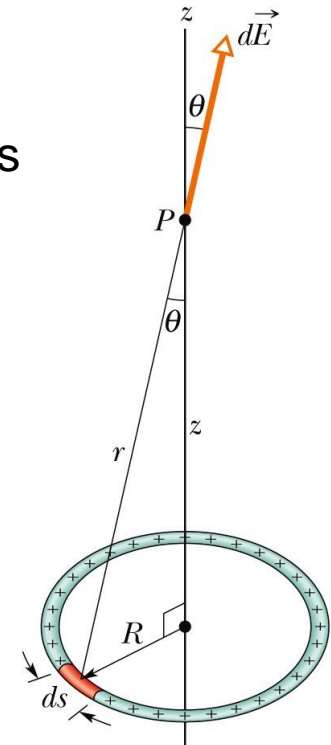
e, portanto,

$$dE \cos \theta = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{z\lambda}{(z^2 + R^2)^{3/2}} ds$$



As componentes perpendiculares ao eixo z se cancelam; as componentes paralelas se somam.

Copyright © 2014 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.



Um anel de carga positiva. Um elemento de carga, de comprimento ds (muito exagerado na figura), cria um campo elétrico $d\vec{E}$ no ponto P .

Anel de Carga

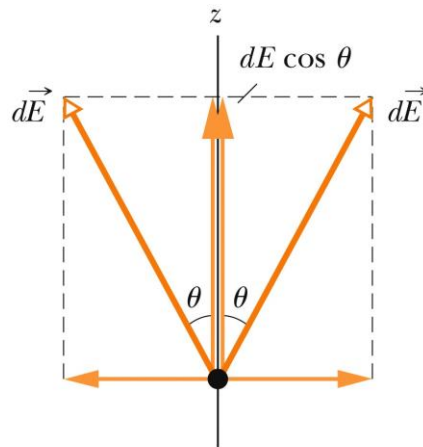
Integração. Para somar um número infinito de componentes infinitesimais, escrevemos uma integral que se estende a todo o anel, do ponto inicial $s = 0$ até o ponto final ($s = 2\pi R$). A integral é

$$E = \int dE \cos \theta = \frac{z\lambda}{4\pi\epsilon_0(z^2 + R^2)^{3/2}} \int_0^{2\pi R} ds$$

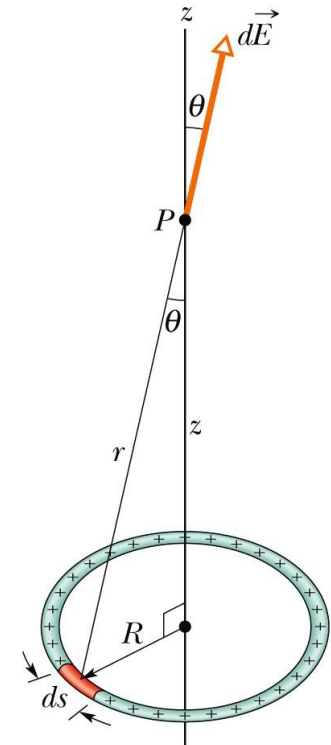
que nos dá

$$E = \frac{qz}{4\pi\epsilon_0(z^2 + R^2)^{3/2}} \quad (\text{anel carregado})$$

As componentes perpendiculares ao eixo z se cancelam; as componentes paralelas se somam.



Copyright © 2014 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.



Um anel de carga positiva. Um elemento de carga, de comprimento ds (muito exagerado na figura), cria um campo elétrico $d\vec{E}$ no ponto P .



22-5 O Campo Elétrico Produzido por um Disco Carregado



Objetivos do Aprendizado

22.19 Desenhar um disco com uma distribuição uniforme de carga e indicar a orientação do campo elétrico em um ponto do eixo central se a carga for positiva e se a carga for negativa.

22.20 Explicar de que forma a equação para o campo elétrico no eixo central de um anel uniformemente carregado pode ser usado para obter uma equação para o campo elétrico no eixo central de um disco uniformemente carregado.

22.21 No caso de um ponto do eixo central de um disco uniformemente carregado, conhecer a relação entre a densidade superficial de carga σ , o raio R do disco e a distância z entre o ponto e o centro do disco.



Imaginamos uma seção do disco em forma de anel, como mostra a figura, com um raio $r \leq R$, em que R é o raio do disco. O anel é tão fino que podemos tratar a carga que contém como um elemento de carga $dq = \sigma 2\pi r dr$. A contribuição dE do anel para o campo elétrico no ponto P do eixo do disco é dada por

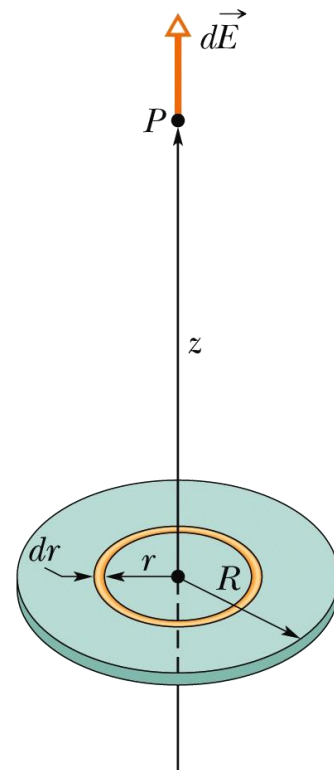
$$dE = \frac{z\sigma 2\pi r dr}{4\pi\epsilon_0(z^2 + r^2)^{3/2}}$$

Integrando dE para todos os raios r possíveis, obtemos

$$E = \int dE = \frac{\sigma z}{4\epsilon_0} \int_0^R (z^2 + r^2)^{-3/2} (2r) dr$$

o que nos dá

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \left(1 - \frac{z}{\sqrt{z^2 + R^2}} \right) \quad (\text{disco carregado})$$



Copyright © 2014 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

Um disco de raio R e carga positiva uniforme. Um anel infinitesimal de raio r e largura dr cria um campo elétrico infinitesimal dE no ponto P do eixo central.



22-6 Uma Carga Pontual em um Campo Elétrico



Objetivos do Aprendizado

22.22 No caso de uma partícula carregada submetida a um campo elétrico (produzido por outros objetos carregados), conhecer a relação entre o campo elétrico no ponto onde está a partícula, a carga q da partícula e a força eletrostática que age sobre a partícula, e saber qual será o sentido da força em relação ao sentido do campo se a carga for positiva e se a carga for negativa.

22.23 Explicar o método usado por Millikan para medir a carga elementar.

22.24 Explicar como funciona uma impressora eletrostática de jato de tinta.

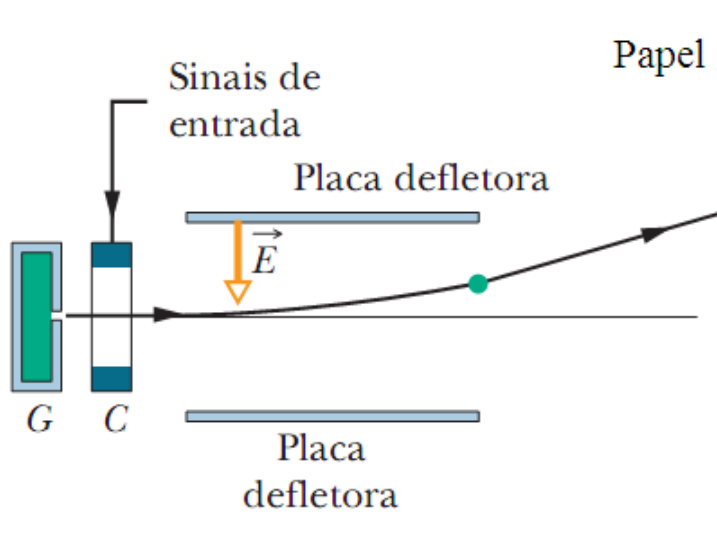


Se uma partícula de carga q é colocada em um campo elétrico externo \vec{E} , essa partícula é submetida a uma força eletrostática \vec{F} dada por

$$\vec{F} = q\vec{E}$$



A força eletrostática \vec{F} que age sobre uma partícula carregada submetida a um campo elétrico \vec{E} tem o mesmo sentido que \vec{E} , se a carga q da partícula for positiva, e o sentido oposto, se a carga q for negativa.



Impressora jato de tinta. Gotas produzidas no gerador G recebem uma carga na unidade de carregamento C . Um sinal elétrico controla a carga de cada gota e, portanto, o efeito do campo \vec{E} e o ponto em que cada gota atinge o papel.



22-7 Um Dipolo em um Campo Elétrico



Objetivos do Aprendizado

22.25 Em um desenho de um dipolo elétrico na presença de um campo elétrico externo uniforme, indicar a orientação do campo, a orientação do dipolo, a orientação das forças eletrostáticas que o campo elétrico exerce sobre as cargas do dipolo e o sentido em que essas forças tendem a fazer o dipolo girar, e verificar que a força total que o campo elétrico exerce sobre o dipolo é nula.

22.26 Calcular o torque que um campo elétrico externo exerce sobre um dipolo elétrico usando o produto vetorial do vetor momento dipolar pelo vetor campo elétrico.

22.27 No caso de um dipolo elétrico submetido a um campo elétrico externo, conhecer a relação entre a energia potencial do dipolo e o trabalho realizado pelo torque ao fazer girar o dipolo.



22.28 No caso de um dipolo elétrico submetido a um campo elétrico externo, calcular a energia potencial usando o produto escalar do vetor momento dipolar pelo vetor campo elétrico.

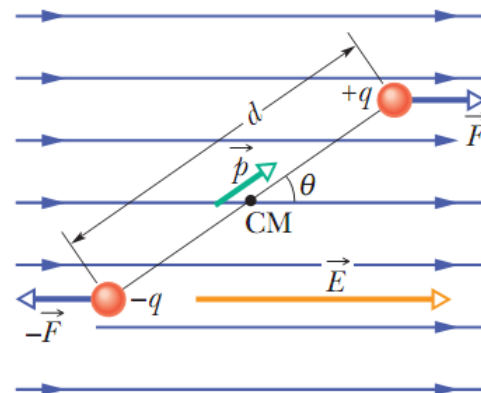
22.29 No caso de um dipolo elétrico submetido a um campo elétrico externo, conhecer os ângulos para os quais a energia potencial é mínima e máxima e os ângulos para os quais o módulo do torque é mínimo e máximo.

O torque a que é submetido um dipolo elétrico de momento dipolar \vec{p} na presença de um campo elétrico externo \vec{E} é dado pelo produto vetorial

$$\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E} \quad (\text{torque em um dipolo})$$

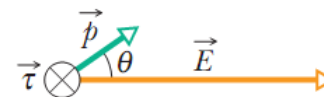
A energia potencial U associada à orientação do momento dipolar na presença do campo elétrico é dada pelo produto escalar

$$U = -\vec{p} \cdot \vec{E} \quad (\text{energia potencial de um dipolo}).$$



(a)

O torque tende a alinhar o dipolo com o campo.



(b)

(a) Um dipolo elétrico em um campo elétrico externo uniforme \vec{E} .
(b) O campo \vec{E} aplica um torque $\vec{\tau}$ ao dipolo. O sentido de $\vec{\tau}$ é para fora do papel, como indica o símbolo \otimes .



22 Resumo



Definição de Campo Elétrico

- O campo elétrico é dado por

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad \text{Eq. 22-1}$$

Linhas de Campo Elétrico

- Ajudam a visualizar o módulo e a orientação do campo elétrico

Campo de uma Carga Pontual

- O módulo do campo elétrico E produzido por uma carga pontual q a uma distância r é dado por

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r} \quad \text{Eq. 22-3}$$

Campo de um Dipolo Elétrico

- O módulo do campo elétrico criado por um dipolo em um ponto distante do eixo é dado por

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{p}{z^3} \quad \text{Eq. 22-9}$$

Campo de um Disco Carregado

- O módulo do campo elétrico em um ponto do eixo central de um disco carregado é dado por

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \left(1 - \frac{z}{\sqrt{z^2 + R^2}} \right) \quad \text{Eq. 22-26}$$



Uma Carga Pontual em um Campo Elétrico

- Uma carga pontual q em um campo magnético externo \mathbf{E} é submetida a uma força dada por

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad \text{Eq. 22-28}$$

Um Dipolo em um Campo Elétrico

- Um dipolo de momento dipolar \mathbf{p} em um campo magnético \mathbf{E} é submetido a um torque dado por

$$\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E} \quad \text{Eq. 22-34}$$

- A energia potencial associada à orientação do dipolo em relação ao campo elétrico é dada por

$$U = -\vec{p} \cdot \vec{E} \quad \text{Eq. 22-38}$$