

Capítulo 21 - Carga elétrica e campo elétrica

RODRIGO ALVES DIAS

Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF

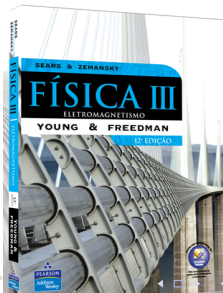
Livro texto: Física 3 - Eletromagnetismo

Autores: Sears e Zemansky

Edição: 12^a

Editora: Pearson - Addison and Wesley

6 de abril de 2011



Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- ▶ A natureza da carga elétrica e como sabemos que a carga elétrica é conservada.

Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- ▶ A natureza da carga elétrica e como sabemos que a carga elétrica é conservada.
- ▶ Como os corpos se tornam eletricamente carregados.

Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- ▶ A natureza da carga elétrica e como sabemos que a carga elétrica é conservada.
- ▶ Como os corpos se tornam eletricamente carregados.
- ▶ Como usar a lei de Coulomb para calcular a força elétrica existente entre cargas.

Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- ▶ A natureza da carga elétrica e como sabemos que a carga elétrica é conservada.
- ▶ Como os corpos se tornam eletricamente carregados.
- ▶ Como usar a lei de Coulomb para calcular a força elétrica existente entre cargas.
- ▶ A distinção entre força elétrica e campo elétrico.

Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- ▶ A natureza da carga elétrica e como sabemos que a carga elétrica é conservada.
- ▶ Como os corpos se tornam eletricamente carregados.
- ▶ Como usar a lei de Coulomb para calcular a força elétrica existente entre cargas.
- ▶ A distinção entre força elétrica e campo elétrico.
- ▶ Como calcular a força elétrica dado um conjunto de cargas.

Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- ▶ A natureza da carga elétrica e como sabemos que a carga elétrica é conservada.
- ▶ Como os corpos se tornam eletricamente carregados.
- ▶ Como usar a lei de Coulomb para calcular a força elétrica existente entre cargas.
- ▶ A distinção entre força elétrica e campo elétrico.
- ▶ Como calcular a força elétrica dado um conjunto de cargas.
- ▶ Como usar o conceito de linhas de campo elétrico para visualizar e interpretar os campos elétricos.

Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- ▶ A natureza da carga elétrica e como sabemos que a carga elétrica é conservada.
- ▶ Como os corpos se tornam eletricamente carregados.
- ▶ Como usar a lei de Coulomb para calcular a força elétrica existente entre cargas.
- ▶ A distinção entre força elétrica e campo elétrico.
- ▶ Como calcular a força elétrica dado um conjunto de cargas.
- ▶ Como usar o conceito de linhas de campo elétrico para visualizar e interpretar os campos elétricos.
- ▶ Como calcular as propriedades dos dipolos elétricos.

Na natureza existem 4 tipos de forças fundamentais:

Na natureza existem 4 tipos de forças fundamentais:

- ▶ Forças Gravitacionais.

Na natureza existem 4 tipos de forças fundamentais:

- ▶ Forças Gravitacionais.
- ▶ **Forças Eletromagnéticas.**

Na natureza existem 4 tipos de forças fundamentais:

- ▶ Forças Gravitacionais.
- ▶ **Forças Eletromagnéticas.**
- ▶ Força Nuclear Forte.

Na natureza existem 4 tipos de forças fundamentais:

- ▶ Forças Gravitacionais.
- ▶ **Forças Eletromagnéticas.**
- ▶ Força Nuclear Forte.
- ▶ Força Nuclear Fraca.

Na natureza existem 4 tipos de forças fundamentais:

- ▶ Forças Gravitacionais.
- ▶ **Forças Eletromagnéticas.**
- ▶ Força Nuclear Forte.
- ▶ Força Nuclear Fraca.

As **interações eletromagnéticas** envolvem partículas que possuem uma propriedade chamada **carga elétrica**, atributo tão fundamental quanto a **massa**.

Na natureza existem 4 tipos de forças fundamentais:

- ▶ Forças Gravitacionais.
- ▶ **Forças Eletromagnéticas.**
- ▶ Força Nuclear Forte.
- ▶ Força Nuclear Fraca.

As **interações eletromagnéticas** envolvem partículas que possuem uma propriedade chamada **carga elétrica**, atributo tão fundamental quanto a **massa**.

Objetos com **massa** são acelerados pelas **forças gravitacionais**, assim como objetos com **carga** são acelerados pelas **forças eletromagnéticas**.

Na natureza existem 4 tipos de forças fundamentais:

- ▶ Forças Gravitacionais.
- ▶ Forças Eletromagnéticas.
- ▶ Força Nuclear Forte.
- ▶ Força Nuclear Fraca.

As **interações eletromagnéticas** envolvem partículas que possuem uma propriedade chamada **carga elétrica**, atributo tão fundamental quanto a **massa**.

Objetos com **massa** são acelerados pelas **forças gravitacionais**, assim como objetos com **carga** são acelerados pelas **forças eletromagnéticas**.

Mostraremos que a **carga elétrica** é **quantizada** e obedece a um **princípio de conservação**.

Na natureza existem 4 tipos de forças fundamentais:

- ▶ Forças Gravitacionais.
- ▶ Forças Eletromagnéticas.
- ▶ Força Nuclear Forte.
- ▶ Força Nuclear Fraca.

As **interações eletromagnéticas** envolvem partículas que possuem uma propriedade chamada **carga elétrica**, atributo tão fundamental quanto a **massa**.

Objetos com **massa** são acelerados pelas **forças gravitacionais**, assim como objetos com **carga** são acelerados pelas **forças eletromagnéticas**.

Mostraremos que a **carga elétrica** é **quantizada** e obedece a um **princípio de conservação**.

As interações entre **cargas elétricas** que estão em **repouso**, em nosso sistema de referência, são conhecidas por **interações eletrostáticas**.

As **interações eletromagnéticas** envolvem partículas que possuem uma propriedade chamada **carga elétrica**, atributo tão fundamental quanto a **massa**.

Objetos com **massa** são acelerados pelas **forças gravitacionais**, assim como objetos com **carga** são acelerados pelas **forças eletromagnéticas**.

Mostraremos que a **carga elétrica** é **quantizada** e obedece a um **princípio de conservação**.

As interações entre **cargas elétricas** que estão em **repouso**, em nosso sistema de referência, são conhecidas por **interações eletrostáticas**.

Interações eletrostáticas:

- ▶ São descritas por uma relação simples chamada de **Lei de Coulomb**.

Mostraremos que a **carga elétrica** é **quantizada** e obedece a um **princípio de conservação**.

As interações entre **cargas elétricas** que estão em **repouso**, em nosso sistema de referência, são conhecidas por **interações eletrostáticas**.

Interações eletrostáticas:

- ▶ São descritas por uma relação simples chamada de **Lei de Coulomb**.
- ▶ Podem ser estudadas mais adequadamente pelo conceito de **Campo elétrico**.

Mostraremos que a **carga elétrica** é **quantizada** e obedece a um **princípio de conservação**.

As interações entre **cargas elétricas** que estão em **repouso**, em nosso sistema de referência, são conhecidas por **interações eletrostáticas**.

Interações eletrostáticas:

- ▶ São descritas por uma relação simples chamada de **Lei de Coulomb**.
- ▶ Podem ser estudadas mais adequadamente pelo conceito de **Campo elétrico**.

Cargas elétricas em **movimento** levam à compreensão do **magnetismo** e da **natureza da luz**.

Mostraremos que a **carga elétrica** é **quantizada** e obedece a um **princípio de conservação**.

As interações entre **cargas elétricas** que estão em **repouso**, em nosso sistema de referência, são conhecidas por **interações eletrostáticas**.

Interações eletrostáticas:

- ▶ São descritas por uma relação simples chamada de **Lei de Coulomb**.
- ▶ Podem ser estudadas mais adequadamente pelo conceito de **Campo elétrico**.

Cargas elétricas em **movimento** levam à compreensão do **magnetismo** e da **natureza da luz**.

As idéias básicas do Eletromagnetismo são simples. Suas aplicações para resolução de problemas práticos exigirão:

- ▶ **Calculo Integral**.
- ▶ **Geometria**.

Carga Elétrica

No ano 600 a.C, os gregos descobriram que:

Carga Elétrica

No ano 600 a.C, os gregos descobriram que:

- ▶ Atritando o Âmbar ele adquire a propriedade de atrair objetos.

Carga Elétrica

No ano 600 a.C, os gregos descobriram que:

- ▶ Atritando o Âmbar ele adquire a propriedade de atrair objetos.
- ▶ Afirmamos que o Âmbar adquire **carga elétrica** ou se torna carregado.

Carga Elétrica

No ano 600 a.C, os gregos descobriram que:

- ▶ Atritando o Âmbar ele adquire a propriedade de atrair objetos.
- ▶ Afirmamos que o Âmbar adquire **carga elétrica** ou se torna carregado.
- ▶ **Elétrico** → Vem do grego **elektron**.

Carga Elétrica

No ano 600 a.C, os gregos descobriram que:

- ▶ Atritando o Âmbar ele adquire a propriedade de atrair objetos.
- ▶ Afirmamos que o Âmbar adquire **carga elétrica** ou se torna carregado.
- ▶ **Elétrico** → Vem do grego **elektron**.

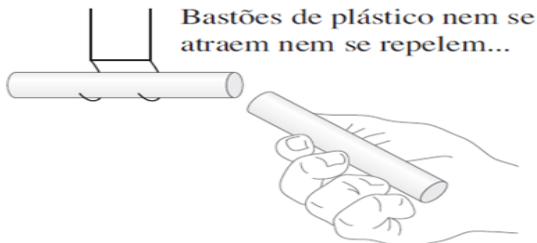
Eletrostática descreve as interações entre cargas elétricas que estão em repouso(ou quase em repouso).

Carga Elétrica

No ano 600 a.C, os gregos descobriram que:

- ▶ Atritando o Âmbar ele adquire a propriedade de atrair objetos.
- ▶ Afirmamos que o Âmbar adquire **carga elétrica** ou se torna carregado.
- ▶ **Elétrico** → Vem do grego **elektron**.

Eletrostática descreve as interações entre cargas elétricas que estão em repouso(ou quase em repouso).

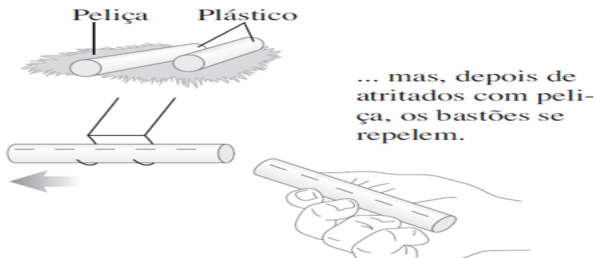


Carga Elétrica

No ano 600 a.C, os gregos descobriram que:

- ▶ Atritando o Âmbar ele adquire a propriedade de atrair objetos.
- ▶ Afirmamos que o Âmbar adquire **carga elétrica** ou se torna carregado.
- ▶ **Elétrico** → Vem do grego **elektron**.

Eletrostática descreve as interações entre cargas elétricas que estão em repouso(ou quase em repouso).

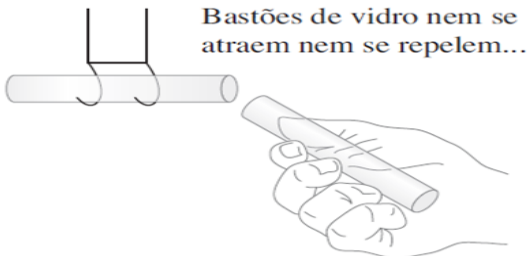


Carga Elétrica

No ano 600 a.C, os gregos descobriram que:

- ▶ Atritando o Âmbar ele adquire a propriedade de atrair objetos.
- ▶ Afirmamos que o Âmbar adquire **carga elétrica** ou se torna carregado.
- ▶ **Elétrico** → Vem do grego **elektron**.

Eletrostática descreve as interações entre cargas elétricas que estão em repouso(ou quase em repouso).

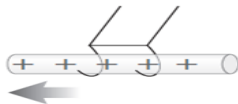


Carga Elétrica

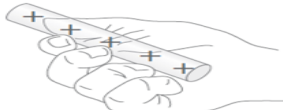
No ano 600 a.C, os gregos descobriram que:

- ▶ Atritando o Âmbar ele adquire a propriedade de atrair objetos.
- ▶ Afirmamos que o Âmbar adquire **carga elétrica** ou se torna carregado.
- ▶ **Elétrico** → Vem do grego **elektron**.

Eletrostática descreve as interações entre cargas elétricas que estão em repouso(ou quase em repouso).



... mas, depois de atritados com seda, os bastões se repelem.

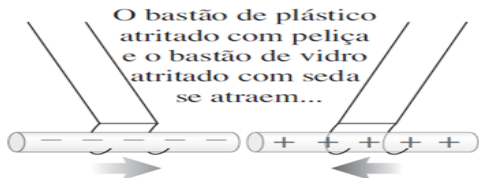


Carga Elétrica

No ano 600 a.C, os gregos descobriram que:

- ▶ Atritando o Âmbar ele adquire a propriedade de atrair objetos.
- ▶ Afirmamos que o Âmbar adquire **carga elétrica** ou se torna carregado.
- ▶ **Elétrico** → Vem do grego **elektron**.

Eletrostática descreve as interações entre cargas elétricas que estão em repouso(ou quase em repouso).

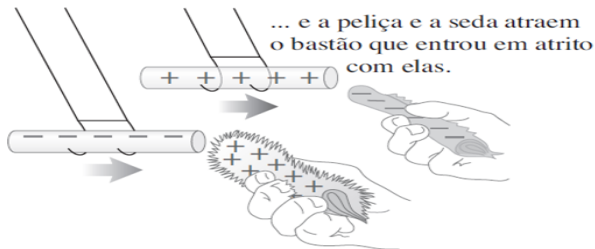


Carga Elétrica

No ano 600 a.C, os gregos descobriram que:

- ▶ Atritando o Âmbar ele adquire a propriedade de atrair objetos.
- ▶ Afirmamos que o Âmbar adquire **carga elétrica** ou se torna carregado.
- ▶ **Elétrico** → Vem do grego **elektron**.

Eletrostática descreve as interações entre cargas elétricas que estão em repouso (ou quase em repouso).



Carga Elétrica

No ano 600 a.C, os gregos descobriram que:

- ▶ Atritando o Âmbar ele adquire a propriedade de atrair objetos.
- ▶ Afirmamos que o Âmbar adquire **carga elétrica** ou se torna carregado.
- ▶ **Elétrico** → Vem do grego **elektron**.

Eletrostática descreve as interações entre cargas elétricas que estão em repouso(ou quase em repouso).

Essas experiências mostram que existem dois tipos de carga elétrica.

Benjamin Franklin sugeriu denominar:

Carga Elétrica

No ano 600 a.C, os gregos descobriram que:

- ▶ Atritando o Âmbar ele adquire a propriedade de atrair objetos.
- ▶ Afirmamos que o Âmbar adquire **carga elétrica** ou se torna carregado.
- ▶ **Elétrico** → Vem do grego **elektron**.

Eletrostática descreve as interações entre cargas elétricas que estão em repouso(ou quase em repouso).

Essas experiências mostram que existem dois tipos de carga elétrica.

Benjamin Franklin sugeriu denominar:

- ▶ Carga positiva.

Carga Elétrica

No ano 600 a.C, os gregos descobriram que:

- ▶ Atritando o Âmbar ele adquire a propriedade de atrair objetos.
- ▶ Afirmamos que o Âmbar adquire **carga elétrica** ou se torna carregado.
- ▶ **Elétrico** → Vem do grego **elektron**.

Eletrostática descreve as interações entre cargas elétricas que estão em repouso(ou quase em repouso).

Essas experiências mostram que existem dois tipos de carga elétrica.

Benjamin Franklin sugeriu denominar:

- ▶ Carga positiva.
- ▶ Carga negativa.

Carga Elétrica

No ano 600 a.C, os gregos descobriram que:

- ▶ Atritando o Âmbar ele adquire a propriedade de atrair objetos.
- ▶ Afirmamos que o Âmbar adquire **carga elétrica** ou se torna carregado.
- ▶ **Elétrico** → Vem do grego **elektron**.

Eletrostática descreve as interações entre cargas elétricas que estão em repouso(ou quase em repouso).

Essas experiências mostram que existem dois tipos de carga elétrica.

Benjamin Franklin sugeriu denominar:

- ▶ Carga positiva.
- ▶ Carga negativa.

Carga Elétrica

No ano 600 a.C, os gregos descobriram que:

- ▶ Atritando o Âmbar ele adquire a propriedade de atrair objetos.
- ▶ Afirmamos que o Âmbar adquire **carga elétrica** ou se torna carregado.
- ▶ **Elétrico** → Vem do grego **elektron**.

Eletrostática descreve as interações entre cargas elétricas que estão em repouso(ou quase em repouso).

Essas experiências mostram que existem dois tipos de carga elétrica.

Benjamin Franklin sugeriu denominar:

- ▶ Carga positiva.
- ▶ Carga negativa.

Duas **cargas positivas** se **repelem** e duas **cargas negativas** também se **repelem**. Existem uma **atração** mutua entre uma **carga positiva** e uma **negativa**.

Carga elétrica e a estrutura da matéria.

Quando atritamos o bastão não ocorre nenhuma alteração visível.

O que ocorre de fato ao bastão ao receber carga elétrica?

Carga elétrica e a estrutura da matéria.

Quando atritamos o bastão não ocorre nenhuma alteração visível.

O que ocorre de fato ao bastão ao receber carga elétrica?

Para entender essa questão temos de analisar a estrutura e as propriedades elétricas dos átomos.

Carga elétrica e a estrutura da matéria.

Quando atritamos o bastão não ocorre nenhuma alteração visível.

O que ocorre de fato ao bastão ao receber carga elétrica?

Para entender essa questão temos de analisar a estrutura e as propriedades elétricas dos átomos.

A estrutura do átomo pode ser entendida com base em três partículas elementares:

- ▶ O **elétron** → Carga **negativa**. $m_e = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$.
- ▶ O **próton** → Carga **positiva**. $m_p = 1,672 \times 10^{-27} \text{ kg}$.
- ▶ O **nêutron** → Carga **nula**. $m_n = 1,674 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

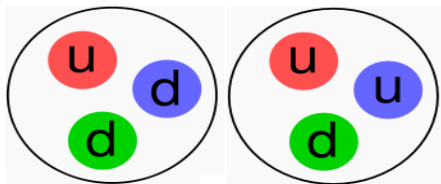
A estrutura do átomo pode ser entendida com base em três partículas elementares:

- ▶ O **elétron** → Carga **negativa**. $m_e = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$.
- ▶ O **próton** → Carga **positiva**. $m_p = 1,672 \times 10^{-27} \text{ kg}$.
- ▶ O **nêutron** → Carga **nula**. $m_n = 1,674 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

Os prótons e os nêutrons são constituídos por *quarks*.

Os *quarks_u* possuem carga elétrica $+\frac{2}{3}$ e os *quarks_d* possuem carga elétrica $-\frac{1}{3}$:

- ▶ O **próton** → $2\text{Quark}_u + 1\text{Quark}_d \rightarrow 2 \times \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$.
- ▶ O **nêutron** → $1\text{Quark}_u + 2\text{Quark}_d \rightarrow \frac{2}{3} - 2 \times \frac{1}{3} = 0$.

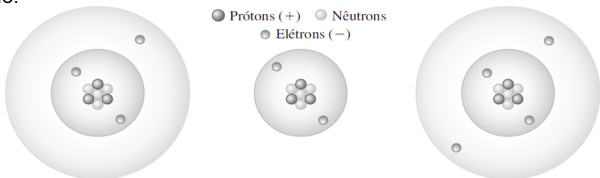


O átomo:

- ▶ Os prótons e os nêutrons estão no interior do átomo formando um caroço central denso chamado **núcleo**. Cujo o diâmetro é da ordem de $D_N \sim 10^{-15}\text{m}$.
- ▶ Os elétrons estão em camadas ao redor do núcleo, a uma distância de aproximadamente $D_e \sim 10^{-10}\text{m}$.

O átomo neutro:

- ▶ O número de prótons é exatamente igual ao número de elétrons.
- ▶ A carga elétrica total(soma algébrica) é exatamente igual a zero.
- ▶ **Número atômico(Z)** é o numero de elétrons ou prótons em um átomo neutro.
- ▶ **Íon positivo** é um átomo com **falta** de um elétrons.
- ▶ **Íon negativo** é um átomo com **excesso** de um elétrons.
- ▶ Denomina-se **ionização** o processo de **perda** ou **ganho** de um elétron por um átomo.



(a) **Átomo de lítio neutro (Li):**

3 prótons (3+)

4 nêutrons

3 elétrons (3-)

Elétrons equivalem a prótons:

(b) **Íon de lítio positivo (Li+):**

3 prótons (3+)

4 nêutrons

2 elétrons (2-)

Menos elétrons do que prótons:

(c) **Íon de lítio negativo (Li-):**

3 prótons (3+)

4 nêutrons

4 elétrons (4-)

Mais elétrons do que prótons:

A carga elétrica é conservada

Na discussão feita até esse momento existe dois princípios fundamentais:

Princípio da conservação da carga elétrica:

- ▶ A soma algébrica de todas as cargas elétricas existentes em um sistema isolado permanece constante.

A carga elétrica é conservada

Na discussão feita até esse momento existe dois princípios fundamentais:

Princípio da conservação da carga elétrica:

- ▶ A soma algébrica de todas as cargas elétricas existentes em um sistema isolado permanece constante.

Princípio da quantização da carga elétrica:

- ▶ O módulo da carga elétrica do elétron ou do próton é uma unidade de carga natural
- ▶ $q = \pm ne$, onde n é o número de cargas e e é o módulo da carga fundamental.
- ▶ $e = 1,6021 \times 10^{-19} C$.

Condutores, isolantes e cargas induzidas

Alguns materiais possibilitam a migração da carga elétrica de uma região para outra, enquanto outros impedem o movimento das cargas elétricas.

Condutores:

- ▶ Um condutor permite o movimento de cargas elétricas.
- ▶ Em condutores existe uma grande quantidade de elétrons em camadas muito externas ao núcleo (**camada de condução**), assim, esses elétrons estão fracamente ligados ao núcleo e podem se movimentar pelo material.

Condutores, isolantes e cargas induzidas

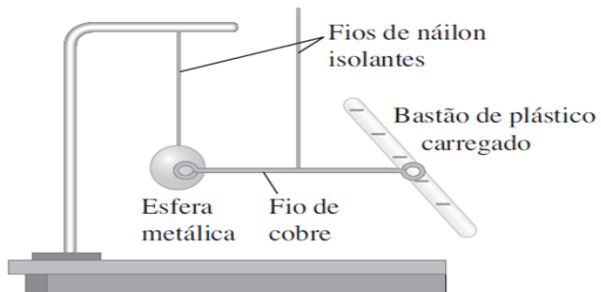
Alguns materiais possibilitam a migração da carga elétrica de uma região para outra, enquanto outros impedem o movimento das cargas elétricas.

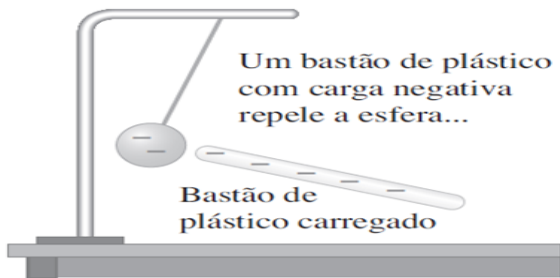
Condutores:

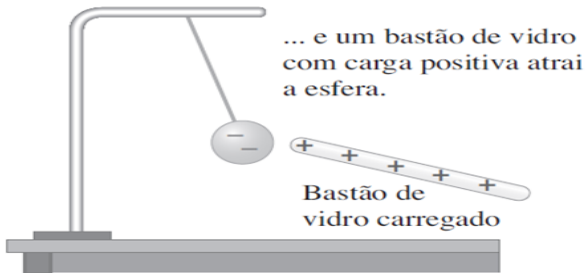
- ▶ Um condutor permite o movimento de cargas elétricas.
- ▶ Em condutores existe uma grande quantidade de elétrons em camadas muito externas ao núcleo (**camada de condução**), assim, esses elétrons estão fracamente ligados ao núcleo e podem se movimentar pelo material.

Isolantes:

- ▶ Um isolante não permite o movimento de cargas elétricas.
- ▶ Em isolante o número de elétrons nas camadas de condução é nulo ou aproximadamente zero, assim, os elétrons estão fortemente ligados ao núcleo e não podem se movimentar pelo material.







Semi-condutores:

- ▶ Conduzem sob algumas condições.

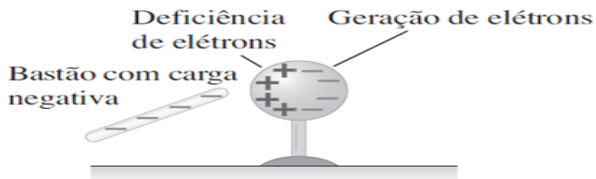
Semi-condutores:

- ▶ Conduzem sob algumas condições.

Super-condutores:

- ▶ Conduzem sem nenhuma resistência elétrica abaixo de uma dada temperatura.

Cargas por indução

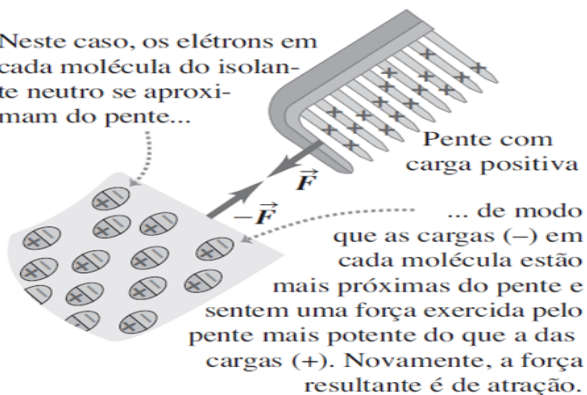


(b) A carga negativa no bastão repele os elétrons, criando zonas de **carga induzida** negativa e positiva.

Forças elétricas sobre objeto descarregados

(c) Como um pente com carga positiva atrai um material isolante

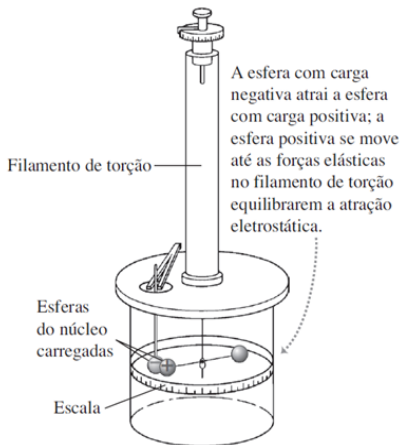
Neste caso, os elétrons em cada molécula do isolante neutro se aproximam do pente...



Lei de Coulomb

Charles Augustin de Coulomb(1736-1806) estudou a força de interação entre partículas carregadas utilizando uma balança de torção, em 1784 e observou que a força elétrica é:

- ▶ proporcional a $1/r^2$ onde r é a distância entre centros dos corpos.
- ▶ depende da carga existente em cada corpo.
- ▶ é proporcional ao produto da carga $q_1 q_2$ existente em cada corpo.



Lei de Coulomb:

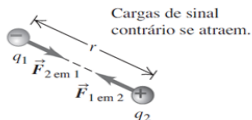
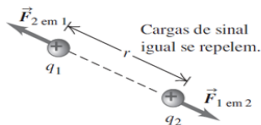
- ▶ O módulo da força elétrica entre duas cargas puntiformes é diretamente proporcional ao produto das cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas.

Matematicamente podemos escrever isso como:

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

$\hat{r} = \vec{r}/r$ o vetor unitário (versor) do vetor \vec{r} que liga o corpo 1 ao corpo 2.

Onde, $k = 8,987 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2 = (10^{-7} \text{ N s}^2/\text{C}^2) c^2 = 1/(4\pi\epsilon_0)$ é a constante elétrica e $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ C}/\text{Nm}^2$.



$$\vec{F}_{1 \text{ em } 2} = -\vec{F}_{2 \text{ em } 1}$$

$$F_{1 \text{ em } 2} = F_{2 \text{ em } 1} = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

Princípio da Superposição de Forças

O efeito sobre o movimento de um corpo produzido de um número (N) de forças é o mesmo efeito produzido por uma única força igual a soma vetorial de todas as (N) forças.

$$\vec{F}_R = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_N$$

Campo elétrico e forças elétricas

No vácuo:

- ▶ Como é possível duas partícula carregada sentir a força uma da outra?

Campo elétrico e forças elétricas

No vácuo:

- ▶ Como é possível duas partícula carregada sentir a força uma da outra?
- ▶ O que existe no espaço entre as cargas para que a interação seja comunicada de uma carga para outra? .

Campo elétrico e forças elétricas

No vácuo:

- ▶ Como é possível duas partícula carregada sentir a força uma da outra?
- ▶ O que existe no espaço entre as cargas para que a interação seja comunicada de uma carga para outra? .

Para responder essas perguntas vamos definir o conceito de **Campo Elétrico**.

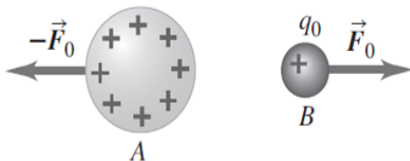
Campo elétrico e forças elétricas

No vácuo:

- ▶ Como é possível duas partículas carregadas sentirem a força uma da outra?
- ▶ O que existe no espaço entre as cargas para que a interação seja comunicada de uma carga para outra? .

Para responder essas perguntas vamos definir o conceito de **Campo Elétrico**.

A e B exercem forças elétricas entre si.



Campo elétrico e forças elétricas

No vácuo:

- ▶ Como é possível duas partículas carregadas sentirem a força uma da outra?
- ▶ O que existe no espaço entre as cargas para que a interação seja comunicada de uma carga para outra? .

Para responder essas perguntas vamos definir o conceito de **Campo Elétrico**.

Remova o corpo B ...



... e denomine sua posição anterior como P .

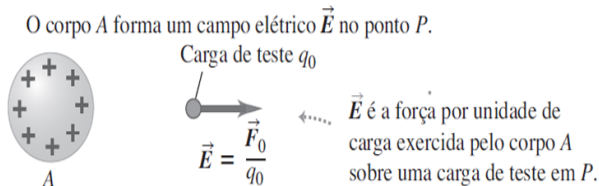


Campo elétrico e forças elétricas

No vácuo:

- ▶ Como é possível duas partículas carregadas sentirem a força uma da outra?
- ▶ O que existe no espaço entre as cargas para que a interação seja comunicada de uma carga para outra? .

Para responder essas perguntas vamos definir o conceito de **Campo Elétrico**.



A força elétrica sobre um corpo carregado é exercida pelo campo elétrico produzido por outros corpos carregados.

Campo elétrico e forças elétricas

No vácuo:

- ▶ Como é possível duas partícula carregada sentir a força uma da outra?
- ▶ O que existe no espaço entre as cargas para que a interação seja comunicada de uma carga para outra? .

Para responder essas perguntas vamos definir o conceito de **Campo Elétrico**.

A força elétrica sobre um corpo carregado é exercida pelo campo elétrico produzido por outros corpos carregados.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{q_0}$$

Campo elétrico e forças elétricas

A força elétrica sobre um corpo carregado é exercida pelo campo elétrico produzido por outros corpos carregados.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{q_0}$$

No S.I. a unidade de campo elétrico é o N/C . Ou seja, é a força elétrica por unidade de carga. Para verificar se existe um campo elétrico em um dado ponto do espaço, colocamos uma **carga de teste**, q_0 , naquele ponto. Se q_0 sofrer uma força é por existe um campo elétrico.

Campo elétrico e forças elétricas

A força elétrica sobre um corpo carregado é exercida pelo campo elétrico produzido por outros corpos carregados.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{q_0}$$

No S.I. a unidade de campo elétrico é o N/C . Ou seja, é a força elétrica por unidade de carga. Para verificar se existe um campo elétrico em um dado ponto do espaço, colocamos uma **carga de teste**, q_0 , naquele ponto. Se q_0 sofrer uma força é por existe um campo elétrico.

Quando conhecemos o campo elétrico \vec{E} gerado por um conjunto de cargas em um dado ponto do espaço, a força sobre uma carga de teste q_0 será dada por:

$$\vec{F}_0 = q_0 \vec{E}$$

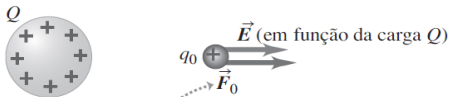
Campo elétrico e forças elétricas

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{q_0}$$

No S.I. a unidade de campo elétrico é o N/C . Ou seja, é a força elétrica por unidade de carga. Para verificar se existe um campo elétrico em um dado ponto do espaço, colocamos uma **carga de teste**, q_0 , naquele ponto. Se q_0 sofrer uma força é por existir um campo elétrico.

Quando conhecemos o campo elétrico \vec{E} gerado por um conjunto de cargas em um dado ponto do espaço, a força sobre uma carga de teste q_0 será dada por:

$$\vec{F}_0 = q_0 \vec{E}$$



A força sobre uma carga de teste positiva q_0 aponta no sentido do campo elétrico.

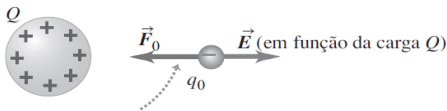
Campo elétrico e forças elétricas

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{q_0}$$

No S.I. a unidade de campo elétrico é o N/C . Ou seja, é a força elétrica por unidade de carga. Para verificar se existe um campo elétrico em um dado ponto do espaço, colocamos uma **carga de teste**, q_0 , naquele ponto. Se q_0 sofrer uma força é por existir um campo elétrico.

Quando conhecemos o campo elétrico \vec{E} gerado por um conjunto de cargas em um dado ponto do espaço, a força sobre uma carga de teste q_0 será dada por:

$$\vec{F}_0 = q_0 \vec{E}$$



A força sobre uma carga de teste negativa q_0 aponta no sentido contrário ao do campo elétrico.

Campo elétrico e forças elétricas

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{q_0}$$

No S.I. a unidade de campo elétrico é o N/C . Ou seja, é a força elétrica por unidade de carga. Para verificar se existe um campo elétrico em um dado ponto do espaço, colocamos uma **carga de teste**, q_0 , naquele ponto. Se q_0 sofrer uma força é por existe um campo elétrico.

Quando conhecemos o campo elétrico \vec{E} gerado por um conjunto de cargas em um dado ponto do espaço, a força sobre uma carga de teste q_0 será dada por:

$$\vec{F}_0 = q_0 \vec{E}$$

PERGUNTA: A carga de teste não afeta o campo da elétrico gerado pelas outras cargas?

Campo elétrico e forças elétricas

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{q_0}$$

No S.I. a unidade de campo elétrico é o N/C . Ou seja, é a força elétrica por unidade de carga. Para verificar se existe um campo elétrico em um dado ponto do espaço, colocamos uma **carga de teste**, q_0 , naquele ponto. Se q_0 sofrer uma força é por existe um campo elétrico.

Quando conhecemos o campo elétrico \vec{E} gerado por um conjunto de cargas em um dado ponto do espaço, a força sobre uma carga de teste q_0 será dada por:

$$\vec{F}_0 = q_0 \vec{E}$$

PERGUNTA: A carga de teste não afeta o campo da elétrico gerado pelas outras cargas?

Sim! Principalmente se o campo for gerado por um condutor(alta mobilidade eletrônica) carregado!

Campo elétrico e forças elétricas

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{q_0}$$

No S.I. a unidade de campo elétrico é o N/C . Ou seja, é a força elétrica por unidade de carga. Para verificar se existe um campo elétrico em um dado ponto do espaço, colocamos uma **carga de teste**, q_0 , naquele ponto. Se q_0 sofrer uma força é por existe um campo elétrico.

Quando conhecemos o campo elétrico \vec{E} gerado por um conjunto de cargas em um dado ponto do espaço, a força sobre uma carga de teste q_0 será dada por:

$$\vec{F}_0 = q_0 \vec{E}$$

Para eliminar o efeito da carga de teste q_0 podemos pensar em uma carga de teste cada vez menor de tal forma que no limite que $q_0 \rightarrow 0$ o campo elétrico não será afetado pela carga de teste. Assim redefiniremos o campo elétrico por:

$$\vec{E} = \lim_{q_0 \rightarrow 0} \frac{\vec{F}_0}{q_0}$$

Campo elétrico de uma carga puntiforme

Quando a distribuição de cargas da fonte é somente uma carga puntiforme q é fácil encontrar o campo elétrico.

- ▶ O ponto onde a carga q se encontra é chamado **ponto da fonte**.
- ▶ O ponto P onde desejamos saber o campo elétrico é chamado **ponto da campo**.

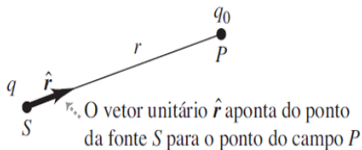
Campo elétrico de uma carga puntiforme

Quando a distribuição de cargas da fonte é somente uma carga puntiforme q é fácil encontrar o campo elétrico.

- ▶ O ponto onde a carga q se encontra é chamado **ponto da fonte**.
- ▶ O ponto P onde desejamos saber o campo elétrico é chamado **ponto da campo**.

A força elétrica sobre uma carga de teste q_0 gerado por uma carga q é dado por:

$$\vec{F}_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q}{r^2} \hat{r}$$



Campo elétrico de uma carga puntiforme

A força elétrica sobre uma carga de teste q_0 gerado por uma carga q é dado por:

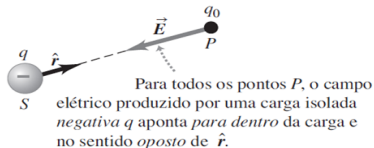
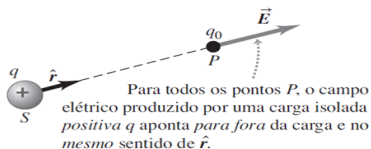
$$\vec{F}_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q}{r^2} \hat{r}$$

Usando a definição do campo elétrico temos que:

$$\vec{E} = \lim_{q_0 \rightarrow 0} \frac{\vec{F}_0}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r}$$

Por definição, o campo elétrico de uma carga puntiforme sempre aponta:

- ▶ para fora de uma carga positiva.
(Mesma direção e sentido de \hat{r}).
- ▶ para dentro de uma carga negativa.
(Mesma direção e sentido oposta de \hat{r}).



Campo elétrico de uma carga puntiforme

O campo elétrico \vec{E} pode variar de um ponto a outro do espaço, definindo o que chamamos de **campo vetorial**.

Campo elétrico de uma carga puntiforme

O campo elétrico \vec{E} pode variar de um ponto a outro do espaço, definindo o que chamamos de **campo vetorial**.

Para um sistema de coordenadas retangulares (x, y, z) cada componente de \vec{E} é função das coordenadas (x, y, z) .

Campo elétrico de uma carga puntiforme

O campo elétrico \vec{E} pode variar de um ponto a outro do espaço, definindo o que chamamos de **campo vetorial**.

Para um sistema de coordenadas retangulares (x, y, z) cada componente de \vec{E} é função das coordenadas (x, y, z) .

$$\vec{E}(xyz) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(x^2 + y^2 + z^2)} \frac{(x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k})}{\sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)}} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{(x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k})}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}}$$

$$\vec{E}(xyz) = \begin{cases} E_x = E_x(xyz) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{x}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \\ E_y = E_y(xyz) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{y}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \\ E_z = E_z(xyz) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \end{cases} \quad (1)$$

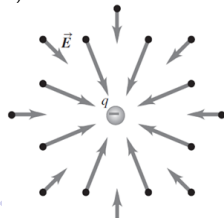
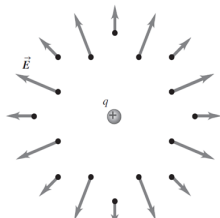
Campo elétrico de uma carga puntiforme

O campo elétrico \vec{E} pode variar de um ponto a outro do espaço, definindo o que chamamos de **campo vetorial**.

Para um sistema de coordenadas retangulares (x, y, z) cada componente de \vec{E} é função das coordenadas (x, y, z) .

$$\vec{E}(xyz) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(x^2 + y^2 + z^2)} \frac{(x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k})}{\sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)}} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{(x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k})}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}}$$

$$\vec{E}(xyz) = \begin{cases} E_x = E_x(xyz) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{x}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \\ E_y = E_y(xyz) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{y}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \\ E_z = E_z(xyz) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \end{cases} \quad (1)$$



Campo elétrico de uma carga puntiforme

O campo elétrico \vec{E} pode variar de um ponto a outro do espaço, definindo o que chamamos de **campo vetorial**.

Para um sistema de coordenadas retangulares (x, y, z) cada componente de \vec{E} é função das coordenadas (x, y, z) .

$$\vec{E}(xyz) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(x^2 + y^2 + z^2)} \frac{(x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k})}{\sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)}} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{(x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k})}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}}$$

$$\vec{E}(xyz) = \begin{cases} E_x = E_x(xyz) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{x}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \\ E_y = E_y(xyz) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{y}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \\ E_z = E_z(xyz) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \end{cases} \quad (1)$$

Em alguns casos o **módulo** e a **direção** do elétrico são constantes em todos os pontos de uma dada região. Nestes casos dizemos que o campo elétrico é **uniforme** em todos os pontos desta região.

Superposição dos campos elétricos

A equação $\vec{E}(xyz) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r}$, descreve o campo gerado por uma única carga puntiforme. Geralmente observamos que existe uma distribuição de cargas no espaço.

Superposição dos campos elétricos

A equação $\vec{E}(xyz) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r}$, descreve o campo gerado por uma única carga puntiforme. Geralmente observamos que existe uma distribuição de cargas no espaço.

Princípio da superposição de campos:

- ▶ Para uma distribuição de cargas temos que o campo elétrico em um dado ponto P é dado pela soma vetorial de todos os campos elétricos gerados por cada carga. ($\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{q_0} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots$)

Superposição dos campos elétricos

A equação $\vec{E}(xyz) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r}$, descreve o campo gerado por uma única carga puntiforme. Geralmente observamos que existe uma distribuição de cargas no espaço.

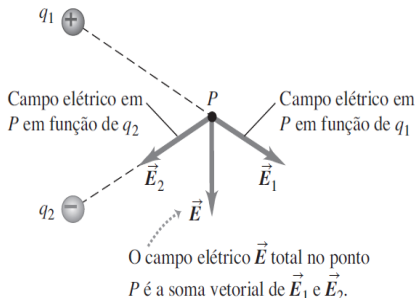
Princípio da superposição de campos:

- ▶ Para uma distribuição de cargas temos que o campo elétrico em um dado ponto P é dado pela soma vetorial de todos os campos elétricos gerados por cada carga. ($\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{q_0} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots$)

Para provar isso considere o princípio de superposição de forças dado por:

$$\vec{F}_0 = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots = q_0 \vec{E}_1 + q_0 \vec{E}_2 + q_0 \vec{E}_3 + \dots$$

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{q_0} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots$$



Superposição dos campos elétricos

A equação $\vec{E}(xyz) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r}$, descreve o campo gerado por uma única carga puntiforme. Geralmente observamos que existe uma distribuição de cargas no espaço.

Princípio da superposição de campos:

- ▶ Para uma distribuição de cargas temos que o campo elétrico em um dado ponto P é dado pela soma vetorial de todos os campos elétricos gerados por cada carga. ($\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{q_0} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots$)

Quando uma dada quantidade de carga Q estiver distribuída sobre:

- ▶ Linha: Densidade linear de carga $\rightarrow \lambda = \frac{Q}{L}$. Unidade: C/m
- ▶ Superfície: Densidade superficial de carga $\rightarrow \sigma = \frac{Q}{A}$. Unidade: C/m^2
- ▶ Volume: Densidade volumétrica de carga $\rightarrow \rho = \frac{Q}{V}$. Unidade: C/m^3

Superposição dos campos elétricos

A equação $\vec{E}(xyz) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r}$, descreve o campo gerado por uma única carga puntiforme. Geralmente observamos que existe uma distribuição de cargas no espaço.

Princípio da superposição de campos:

- ▶ Para uma distribuição de cargas temos que o campo elétrico em um dado ponto P é dado pela soma vetorial de todos os campos elétricos gerados por cada carga. ($\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{q_0} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots$)

Fazer:

- ▶ Campo de um dipolo.
- ▶ Anel carregado.
- ▶ Linha reta carregada \rightarrow fio infinito.
- ▶ Disco uniformemente carregado \rightarrow plano infinito.

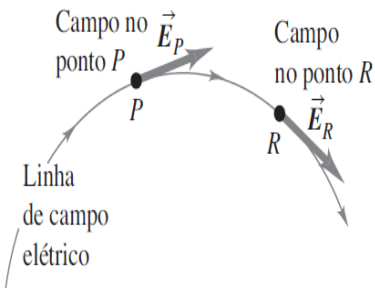
Linhas de força de um campo elétrico

O conceito de campo elétrico pode parecer um pouco abstrato/ilusório porque não se pode vê-lo diretamente.

Linhas de força de um campo elétrico

Linhas de campo elétrico

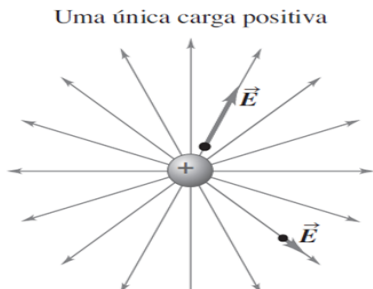
- ▶ É uma linha imaginária reta ou curva que passa por uma região do espaço de tal modo que sua tangente em qualquer ponto fornece a direção e o sentido do campo elétrico(\vec{E}) no ponto considerado. O espaçamento entre as linhas fornece uma idéia do módulo do campo elétrico(\vec{E}) em cada ponto. **As linhas de campo elétrico nunca se cruzam.**



Linhas de força de um campo elétrico

Linhas de campo elétrico

- ▶ É uma linha imaginária reta ou curva que passa por uma região do espaço de tal modo que sua tangente em qualquer ponto fornece a direção e o sentido do campo elétrico(\vec{E}) no ponto considerado. O espaçamento entre as linhas fornece uma idéia do módulo do campo elétrico(\vec{E}) em cada ponto. **As linhas de campo elétrico nunca se cruzam.**

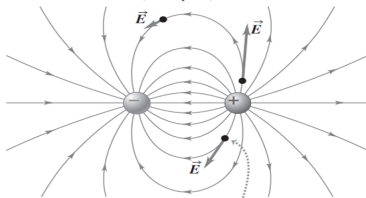


Linhas de força de um campo elétrico

Linhas de campo elétrico

- ▶ É uma linha imaginária reta ou curva que passa por uma região do espaço de tal modo que sua tangente em qualquer ponto fornece a direção e o sentido do campo elétrico(\vec{E}) no ponto considerado. O espaçamento entre as linhas fornece uma idéia do módulo do campo elétrico(\vec{E}) em cada ponto. **As linhas de campo elétrico nunca se cruzam.**

Duas cargas de mesmo módulo, porém de sinais contrários (um dipolo)



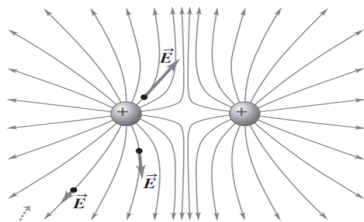
A cada ponto no espaço, o vetor do campo elétrico é *tangente* à linha de campo que passa pelo

Linhas de força de um campo elétrico

Linhas de campo elétrico

- ▶ É uma linha imaginária reta ou curva que passa por uma região do espaço de tal modo que sua tangente em qualquer ponto fornece a direção e o sentido do campo elétrico(\vec{E}) no ponto considerado. O espaçamento entre as linhas fornece uma idéia do módulo do campo elétrico(\vec{E}) em cada ponto. **As linhas de campo elétrico nunca se cruzam.**

Duas cargas positivas iguais



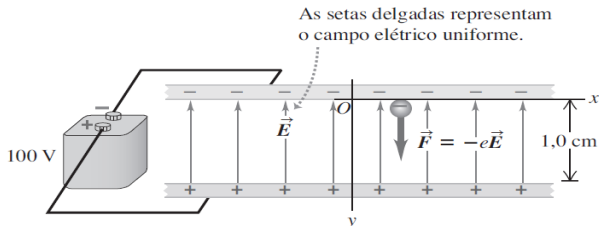
As linhas de campo ficam próximas quando o

Linhas de força de um campo elétrico

Linhas de campo elétrico

- ▶ É uma linha imaginária reta ou curva que passa por uma região do espaço de tal modo que sua tangente em qualquer ponto fornece a direção e o sentido do campo elétrico (\vec{E}) no ponto considerado. O espaçamento entre as linhas fornece uma idéia do módulo do campo elétrico (\vec{E}) em cada ponto. **As linhas de campo elétrico nunca se cruzam.**

Em um campo elétrico uniforme as linhas de campo são retas, paralelas, e as distâncias entre as linhas são constantes.



Dipolos elétricos

O momento de dipolo elétrico $\vec{p}(\vec{r})$, é uma medida da separação entre cargas elétricas positivas e negativas em uma dada distribuição de cargas em um ponto \vec{r} do espaço.

$$\vec{p}(\vec{r}) = \sum_{i=1}^N q_i(\vec{r}_i - \vec{r}) = q_1(\vec{r}_1 - \vec{r}) + q_2(\vec{r}_2 - \vec{r}) + \dots + q_N(\vec{r}_N - \vec{r})$$

Dipolos elétricos

O momento de dipolo elétrico $\vec{p}(\vec{r})$, é uma medida da separação entre cargas elétricas positivas e negativas em uma dada distribuição de cargas em um ponto \vec{r} do espaço.

$$\vec{p}(\vec{r}) = \sum_{i=1}^N q_i(\vec{r}_i - \vec{r}) = q_1(\vec{r}_1 - \vec{r}) + q_2(\vec{r}_2 - \vec{r}) + \dots + q_N(\vec{r}_N - \vec{r})$$

No caso de átomo neutro com $N=2$, temos que:

$$\vec{p}(\vec{r}) = +q(\vec{r}_+ - \vec{r}) - q(\vec{r}_- - \vec{r}) = q(\vec{r}_+ - \vec{r}_-) = q\vec{d}$$

onde \vec{d} é o vetor deslocamento que aponta da carga negativa para carga positiva.

O momento de dipolo elétrico aponta da carga negativa para a carga positiva.

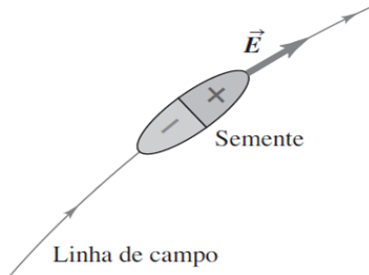
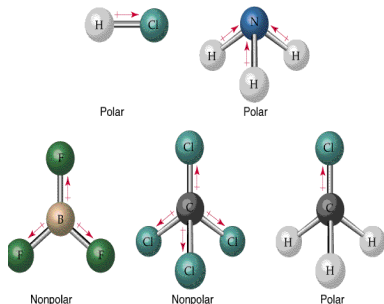
Dipolos elétricos

O momento de dipolo elétrico $\vec{p}(\vec{r})$, é uma medida da separação entre cargas elétricas positivas e negativas em uma dada distribuição de cargas em um ponto \vec{r} do espaço. No caso de átomo neutro com $N=2$, temos que:

$$\vec{p}(\vec{r}) = +q(\vec{r}_+ - \vec{r}) - q(\vec{r}_- - \vec{r}) = q(\vec{r}_+ - \vec{r}_-) = q\vec{d}$$

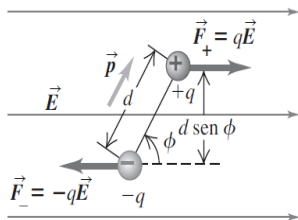
onde \vec{d} é o vetor deslocamento que aponta da carga negativa para carga positiva.

O momento de dipolo elétrico aponta da carga negativa para a carga positiva.



Força e Torque sobre um dipolo elétrico

Para calcular a força sobre um dipolo elétrico vamos colocar um campo elétrico externo constante \vec{E} atuando sobre um dipolo.



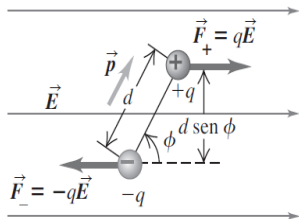
Força e Torque sobre um dipolo elétrico

Para calcular a força sobre um dipolo elétrico vamos colocar um campo elétrico externo constante \vec{E} atuando sobre um dipolo.

Temos: $\vec{F}_+ = +q\vec{E}$ e $\vec{F}_- = -q\vec{E}$ logo

$$\vec{F}_R = \vec{F}_+ + \vec{F}_- = q\vec{E} - q\vec{E} = 0$$

A força resultante atuando sobre um dipolo elétrico em um campo elétrico uniforme externo é igual a zero.

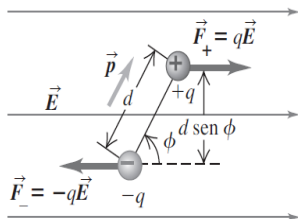


Força e Torque sobre um dipolo elétrico

Para calcular a força sobre um dipolo elétrico vamos colocar um campo elétrico externo constante \vec{E} atuando sobre um dipolo.

Temos: $\vec{F}_+ = +q\vec{E}$ e $\vec{F}_- = -q\vec{E}$ logo
 $\vec{F}_R = \vec{F}_+ + \vec{F}_- = q\vec{E} - q\vec{E} = 0$

A força resultante atuando sobre um dipolo elétrico em um campo elétrico uniforme externo é igual a zero.



Como as forças não atuam ao longo da mesma linha o torque resultante não é zero. Vamos calcular o torque em relação ao centro do dipolo. Assim,

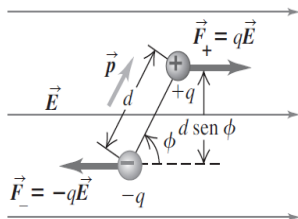
$$\vec{\tau} = \vec{r}_+ \times \vec{F}_+ + \vec{r}_- \times \vec{F}_- = q(\vec{r}_+ - \vec{r}_-) \times \vec{E}$$

Força e Torque sobre um dipolo elétrico

Para calcular a força sobre um dipolo elétrico vamos colocar um campo elétrico externo constante \vec{E} atuando sobre um dipolo.

Temos: $\vec{F}_+ = +q\vec{E}$ e $\vec{F}_- = -q\vec{E}$ logo
 $\vec{F}_R = \vec{F}_+ + \vec{F}_- = q\vec{E} - q\vec{E} = 0$

A força resultante atuando sobre um dipolo elétrico em um campo elétrico uniforme externo é igual a zero.



Como as forças não atuam ao longo da mesma linha o torque resultante não é zero. Vamos calcular o torque em relação ao centro do dipolo. Assim,

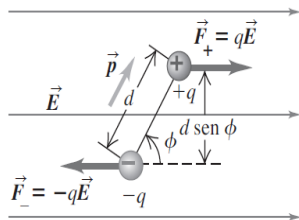
$$\vec{\tau} = q\vec{d} \times \vec{E} \rightarrow \tau = (qE)(d \sin \phi)$$

Força e Torque sobre um dipolo elétrico

Para calcular a força sobre um dipolo elétrico vamos colocar um campo elétrico externo constante \vec{E} atuando sobre um dipolo.

Temos: $\vec{F}_+ = +q\vec{E}$ e $\vec{F}_- = -q\vec{E}$ logo
 $\vec{F}_R = \vec{F}_+ + \vec{F}_- = q\vec{E} - q\vec{E} = 0$

A força resultante atuando sobre um dipolo elétrico em um campo elétrico uniforme externo é igual a zero.



Como as forças não atuam ao longo da mesma linha o **torque** resultante **não é zero**. Vamos calcular o torque em relação ao centro do dipolo. Assim,

$$\vec{\tau} = q\vec{d} \times \vec{E} \rightarrow \tau = (qE)(d \sin \phi)$$

Como $\vec{p} = q\vec{d} \rightarrow p = qd$. Assim,

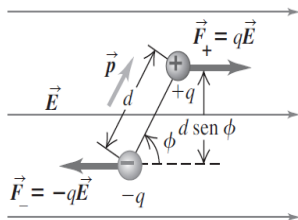
Força e Torque sobre um dipolo elétrico

Para calcular a força sobre um dipolo elétrico vamos colocar um campo elétrico externo constante \vec{E} atuando sobre um dipolo.

Temos: $\vec{F}_+ = +q\vec{E}$ e $\vec{F}_- = -q\vec{E}$ logo

$$\vec{F}_R = \vec{F}_+ + \vec{F}_- = q\vec{E} - q\vec{E} = 0$$

A força resultante atuando sobre um dipolo elétrico em um campo elétrico uniforme externo é igual a zero.



Como as forças não atuam ao longo da mesma linha o **torque** resultante **não é zero**. Vamos calcular o torque em relação ao centro do dipolo. Assim,

$$\vec{\tau} = q\vec{d} \times \vec{E} \rightarrow \tau = (qE)(d \sin \phi)$$

Como $\vec{p} = q\vec{d} \rightarrow p = qd$. Assim,

$$\tau = pE \sin \phi \rightarrow \vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E}$$

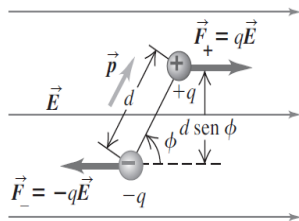
Força e Torque sobre um dipolo elétrico

Para calcular a força sobre um dipolo elétrico vamos colocar um campo elétrico externo constante \vec{E} atuando sobre um dipolo.

Temos: $\vec{F}_+ = +q\vec{E}$ e $\vec{F}_- = -q\vec{E}$ logo

$$\vec{F}_R = \vec{F}_+ + \vec{F}_- = q\vec{E} - q\vec{E} = 0$$

A força resultante atuando sobre um dipolo elétrico em um campo elétrico uniforme externo é igual a zero.



Como as forças não atuam ao longo da mesma linha o **torque** resultante **não é zero**. Vamos calcular o torque em relação ao centro do dipolo. Assim,

$$\vec{\tau} = q\vec{d} \times \vec{E} \rightarrow \tau = (qE)(d \sin \phi)$$

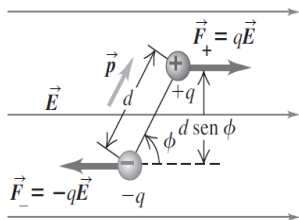
Como $\vec{p} = q\vec{d} \rightarrow p = qd$. Assim,

$$\tau = pE \sin \phi \rightarrow \vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E}$$

O torque tende sempre a alinhar a direção do dipolo \vec{p} paralelamente ao campo elétrico \vec{E} .

Energia potencial de um dipolo elétrico

Quando um **dipolo** muda de direção em um campo elétrico, o **torque** do campo elétrico realiza um **trabalho** sobre ele, produzindo uma correspondente **variação da energia potencial**.

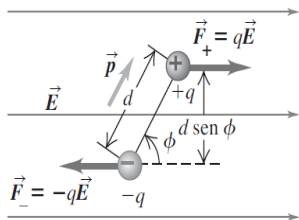


Energia potencial de um dipolo elétrico

Quando um **dipolo** muda de direção em um campo elétrico, o **torque** do campo elétrico realiza um **trabalho** sobre ele, produzindo uma correspondente **variação da energia potencial**.

O trabalho dW realizado pelo torque durante um deslocamento $d\phi$ possui o sentido da diminuição de ϕ assim:

$$dW = \tau d\phi = -pE \sin \phi d\phi$$



Energia potencial de um dipolo elétrico

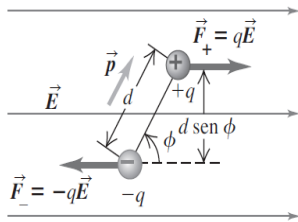
Quando um **dipolo** muda de direção em um campo elétrico, o **torque** do campo elétrico realiza um **trabalho** sobre ele, produzindo uma correspondente **variação da energia potencial**.

O trabalho dW realizado pelo torque durante um deslocamento $d\phi$ possui o sentido da diminuição de ϕ assim:

$$dW = \tau d\phi = -pE \sin \phi d\phi$$

Em um deslocamento finito de ϕ_1 para ϕ_2 o trabalho total será,

$$W = \int_{\phi_1}^{\phi_2} (-pE \sin \phi) d\phi = pE \cos \phi_2 - pE \cos \phi_1$$



Energia potencial de um dipolo elétrico

Quando um **dipolo** muda de direção em um campo elétrico, o **torque** do campo elétrico realiza um **trabalho** sobre ele, produzindo uma correspondente **variação da energia potencial**.

O trabalho dW realizado pelo torque durante um deslocamento $d\phi$ possui o sentido da diminuição de ϕ assim:

$$dW = \tau d\phi = -pE \sin \phi d\phi$$

Em um deslocamento finito de ϕ_1 para ϕ_2 o trabalho total será,

$$W = \int_{\phi_1}^{\phi_2} (-pE \sin \phi) d\phi = pE \cos \phi_2 - pE \cos \phi_1$$

O trabalho total é igual a menos a variação da energia potencial, ($W = -\Delta U = U_1 - U_2$), logo,

$$U(\phi) = -pE \cos \phi \rightarrow U = -\vec{p} \cdot \vec{E}$$

