

Electromagnetismo EE

M. I. em

**Biológica; Biomédica; Materiais; Polímeros;
Telecomunicações e Informática**

2016/17





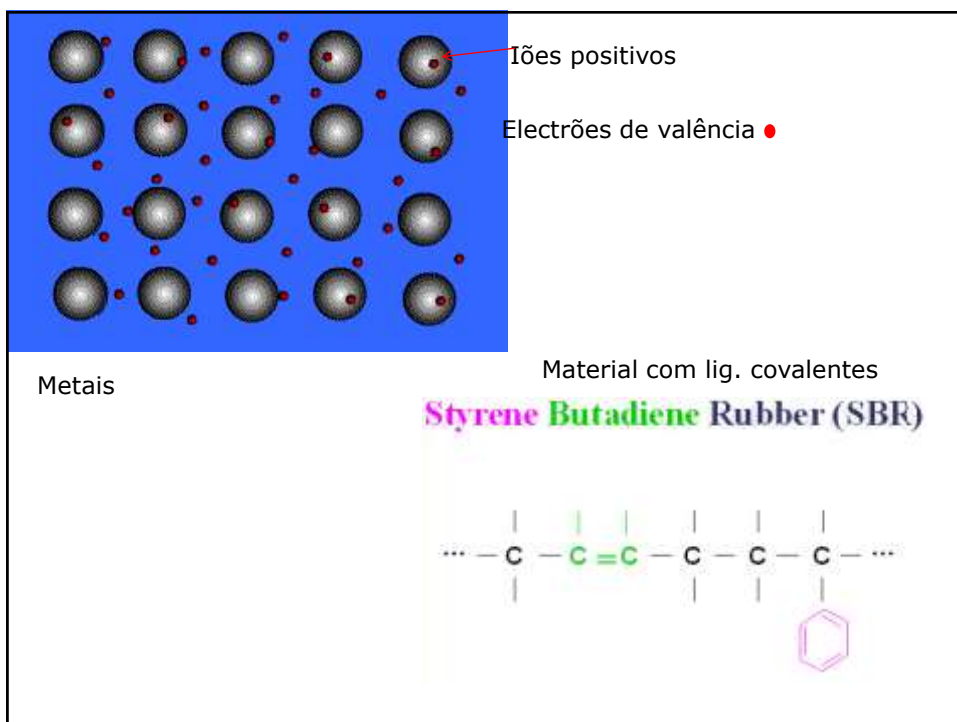
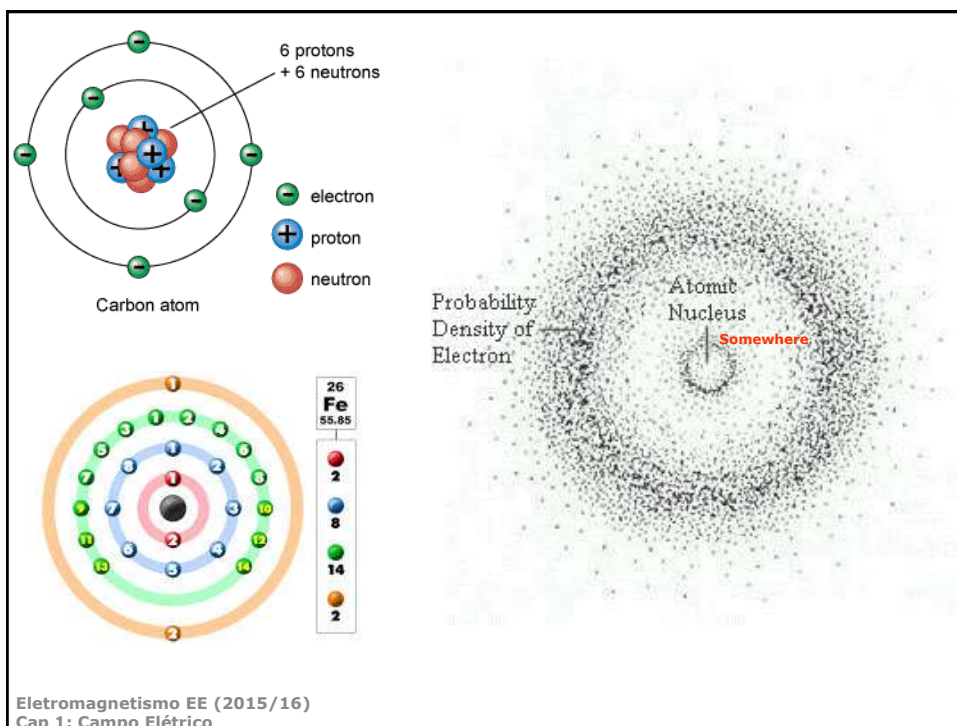
Eletromagnetismo EE (2015/16)
Cap 1: Campo Elétrico

1. Campo Elétrico

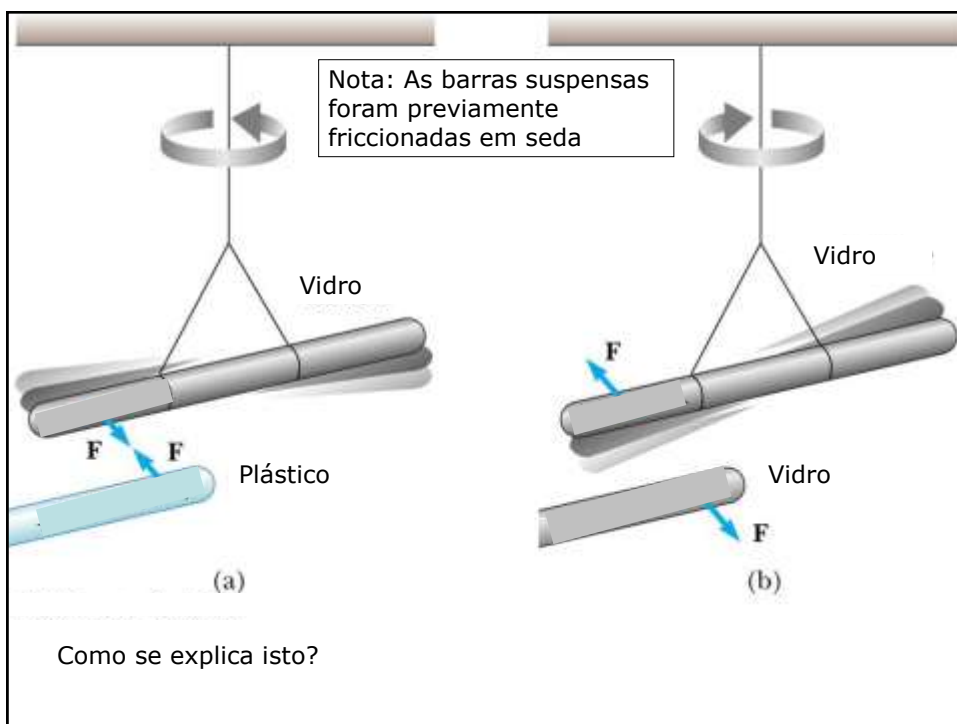
Capítulo dos livros da Bibliografia recomendada (Serway, Resnick and Halliday, Tipler): **Campo Elétrico**. No caso de Jaime Villate; Cap 1 e 3)



Nos hospitais os médicos e enfermeiros tentam manter-se a distâncias razoáveis dos pacientes para evitar a infecção bacteriológica. As superfícies são lavadas, os instrumentos desinfectados a altas temperaturas e em banhos de álcool, usam-se máscaras, as mãos são lavadas com muito cuidado e usam-se luvas. Apesar disto, nesta sala de cirurgias há ainda fontes de bactérias. [Consegue descobrir a fonte?](#)



1.1. Eletrização. Carga eléctrica. Condutores, semicondutores e isoladores

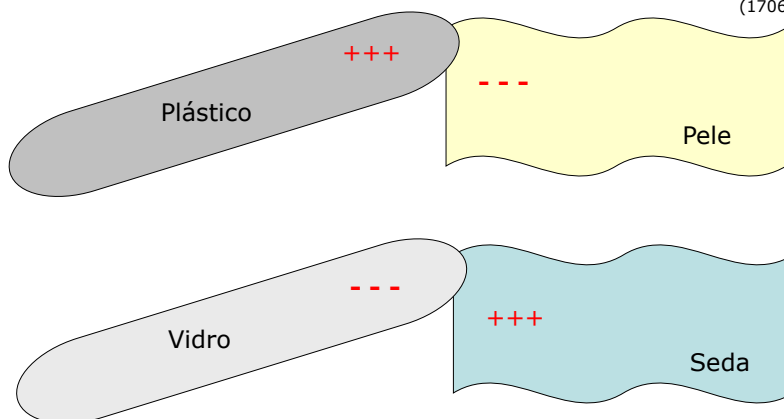


De acordo com **Benjamin Franklin** (séc XVIII): Cada objecto tem determinada quantidade de electricidade que pode ser transferida para outro quando entrarem em contacto (um fica com excesso e outro com deficiência). Para Franklin a electricidade é uma espécie de fluído sem massa.



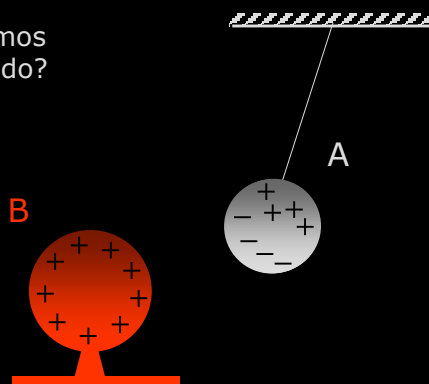
Benjamin Franklin
(1706-1790)

As escolhas de B. Franklin seriam:



questão

Se *A* é atraído por *B*, podemos concluir que *A* está carregado?



Nº atómico & Nº de massa

A carga eléctrica é uma propriedade fundamental das partículas elementares da matéria

(**protões** electrões **neutrões**)

número de massa: $A = 235$
(nº de protões + nº de neutrões)

$^{235}_{92}\text{U}$

número atómico: $Z = 92$
(nº de protões = nº de electrões)

O número atómico $Z = 92$ define o núcleo como sendo um núcleo de Urânio.

massa e carga das partículas atómicas

Neutrão (n):	$m = 1.675 \times 10^{-27} \text{ kg};$	$q = 0$
Protão (p):	$m = 1.673 \times 10^{-27} \text{ kg};$	$q = +1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
Electrão (e):	$m = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg};$	$q = -1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$

- os símbolos “-e” “+e” são usados para a carga do electrão e do protão.

carga elementar: $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$

- Os átomos são electricamente neutros, porque têm o mesmo número de protões e electrões.

quantização da carga

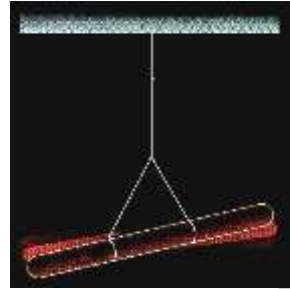
A carga do objecto, q , será:

$$q = e \times N_p - e \times N_e$$

$$q = e \times (N_p - N_e)$$

$$q = e \times n$$

número inteiro



N_n neutrões

N_e electrões

N_p protões

A carga é sempre quantificada, no entanto, geralmente, em fenómenos de grande escala as consequências deste efeito são imperceptíveis.

1. Há duas espécies de cargas eléctricas na natureza: positivas e negativas, com a propriedade: as cargas de espécies diferentes atraem-se e as da mesma espécie repelem-se.

(**Franklin, 1706-1790**)

2. A carga eléctrica conserva-se.

(**Franklin**)

3. A carga é quantificada:

(**Millikan, 1909**)

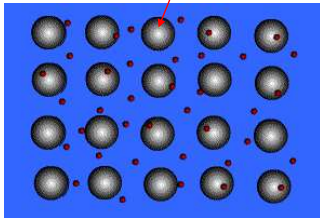
Condutores, isoladores, semicondutores, supercondutores

Há materiais que conduzem a corrente eléctrica mas outros têm comportamento diferente. Qual a razão deste comportamento?

Condutores são materiais nos quais há portadores de carga eléctrica que se podem movimentar "livremente"

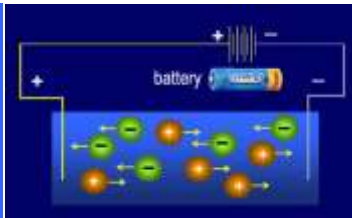
Exemplos?

Cerne (íões positivos)



Metais ou ligas metálicas

Portadores de carga:
Electrões



Solução iônica

Portadores de carga:
Catiões e aniões

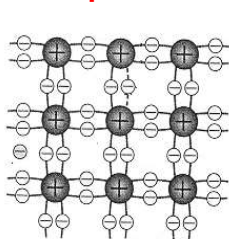


Plasma

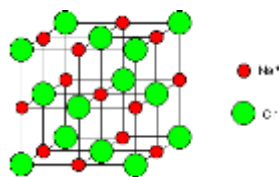
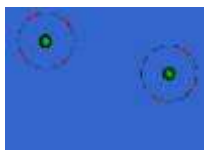
Portadores de carga: **Electrões e catiões**

Isoladores são materiais em que não há portadores de carga eléctrica que se possam mover facilmente

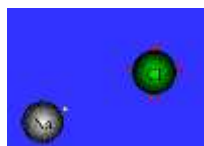
Exemplos?



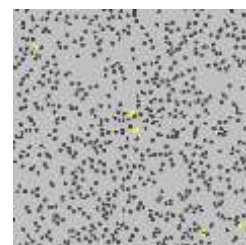
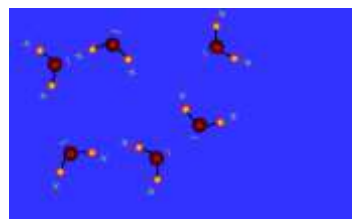
Sólidos com ligações covalentes



Sólidos com ligações iônicas



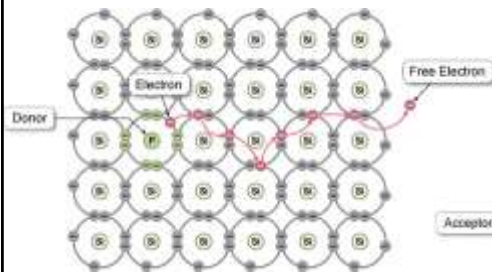
Água pura



Ar

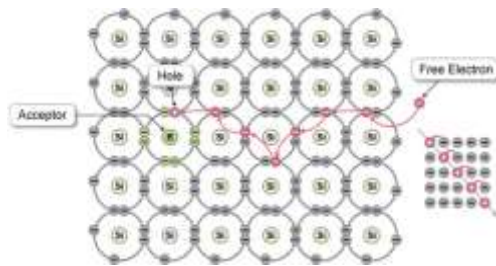
Semicondutores a facilidade de transporte de carga é intermédia

Exemplos? Silício, Germânio



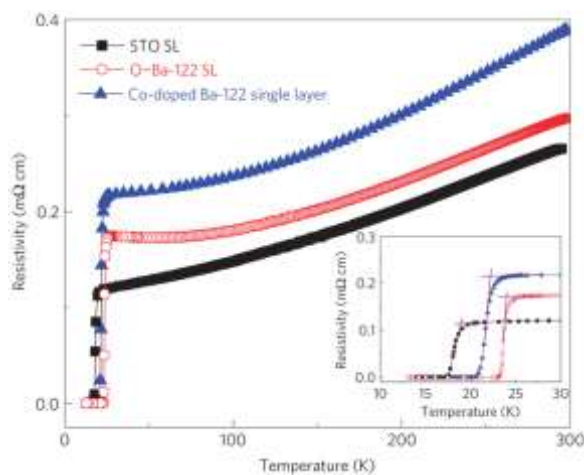
Semiconductor do tipo n

Portadores de carga:
Electrões e lacunas

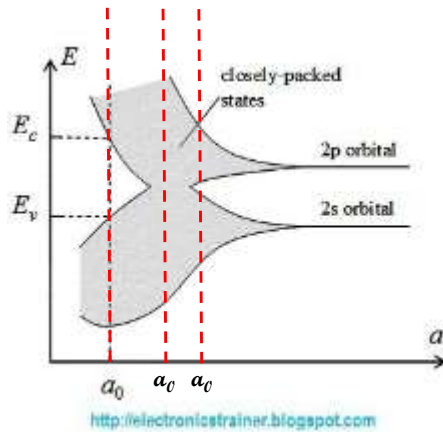


Semiconductor do tipo p

Supercondutores Materiais que não oferecem resistência ao movimento das cargas

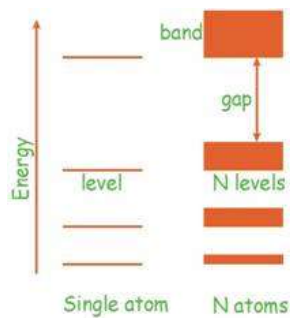


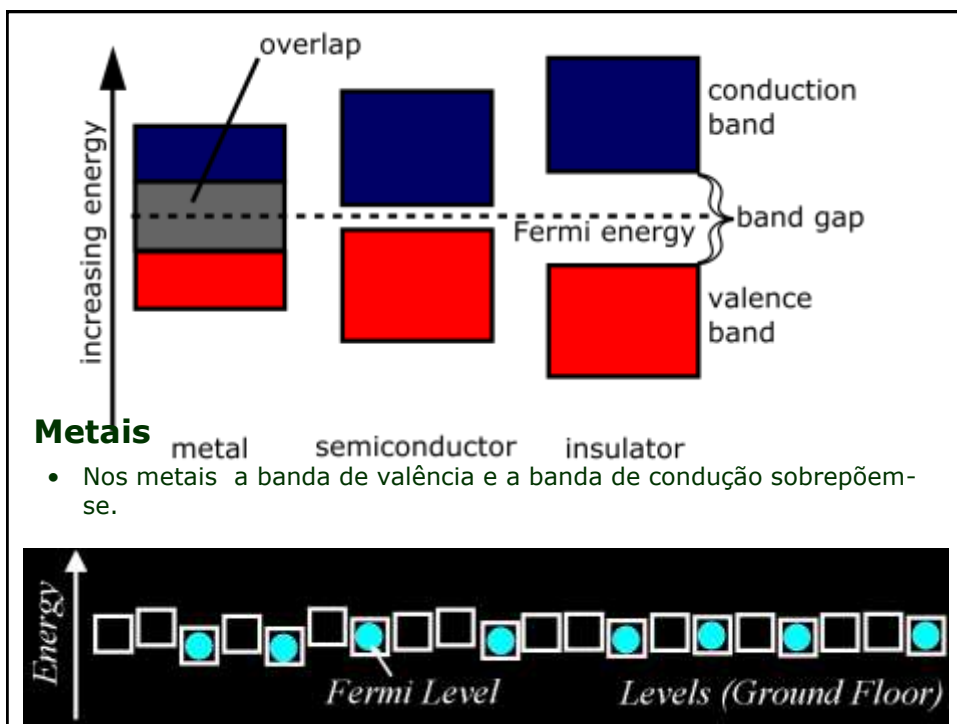
Electrões em sólidos



Electrões em sólidos

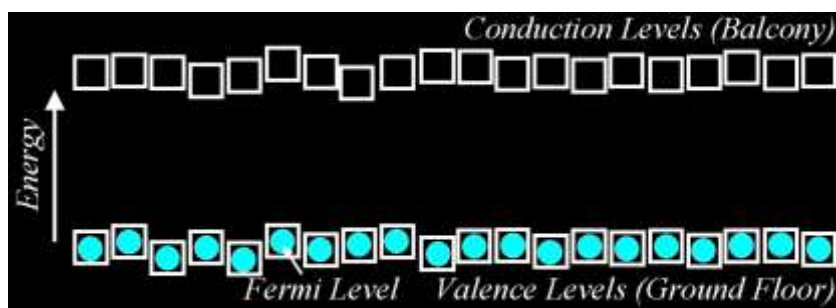
- Num átomo, os electrões distribuem-se em "níveis de energia".
- Num sólido, os níveis de energia ficam mais largos – "bandas".
- As orbitais que só podem ser ocupadas no máximo por dois electrões.
- Os níveis e orbitais são preenchidos por ordem crescente de energia.
- Chama-se *nível de Fermi* ao último nível a ser preenchido (o nível de maior energia que está preenchido com electrões).



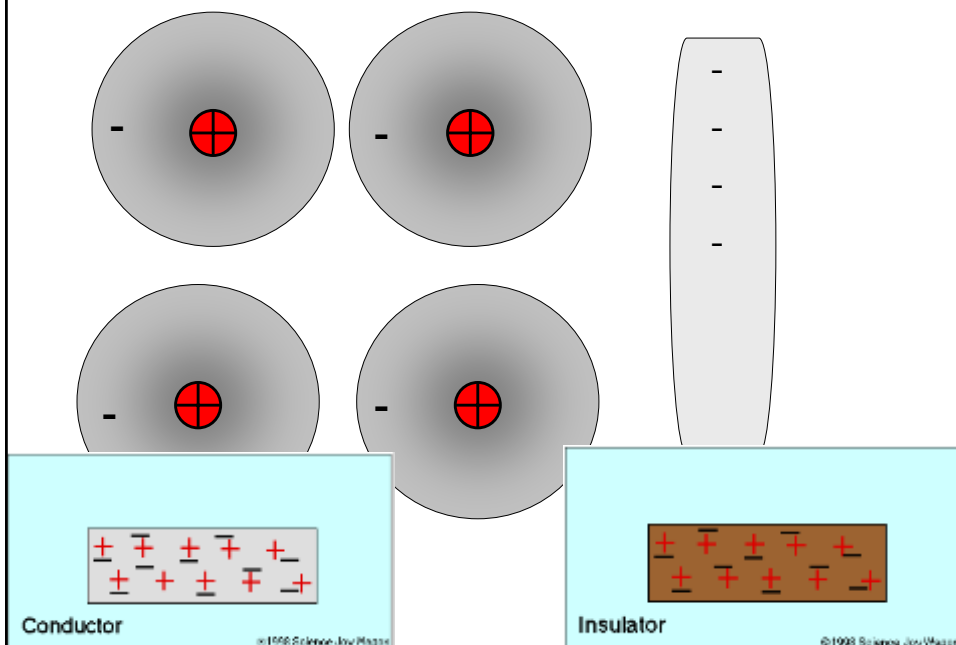


Isoladores

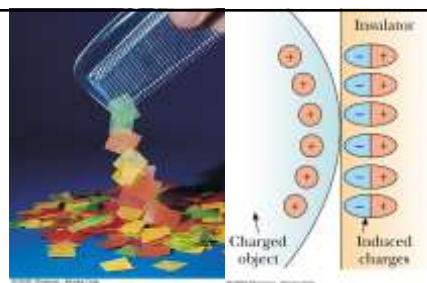
- Não há níveis vagos próximos do nível de Fermi.
- Os electrões não conseguem mover-se, porque os "lugares acessíveis" estão todos ocupados.



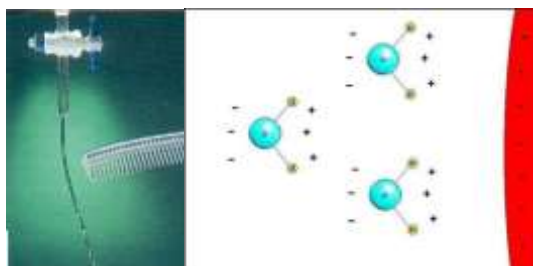
Em isoladores



- Em muitos casos, em átomos e moléculas, o centro de cargas positivas coincide com o centro de cargas negativas (sistemas apolares).
- Na presença de um objecto carregado, estes centros podem separar-se um pouco (polaridade induzida).
- Este realinhamento de carga na superfície de um isolador designa-se por *polarização*.

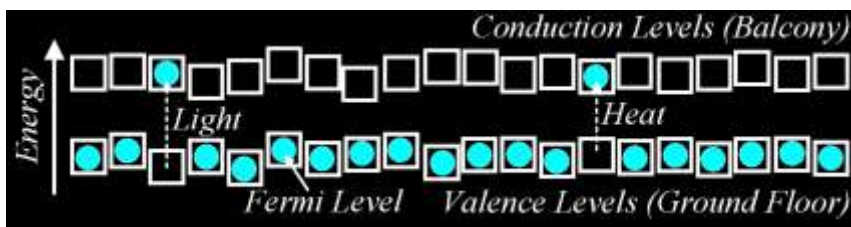


Casos em que o centro de cargas positivas e negativas não coincide (sistemas polares), por ex. Molécula de água, diz-se que existem **dipolos eléctricos**.



Semicondutores

- As bandas de condução e de valência estão relativamente próximas, separadas por um "gap".
- Os electrões podem movimentar-se, desde que tenham energia suficiente para saltarem da banda de condução para a banda de valência.



RESUMO



- Num sólido os electrões distribuem-se em bandas de energia
- Os electrões vão ocupando os estados de mais baixa energia e vão preenchendo a banda
- A última banda a ser preenchida é a banda de valência.



©1999 Science Joy Wagon

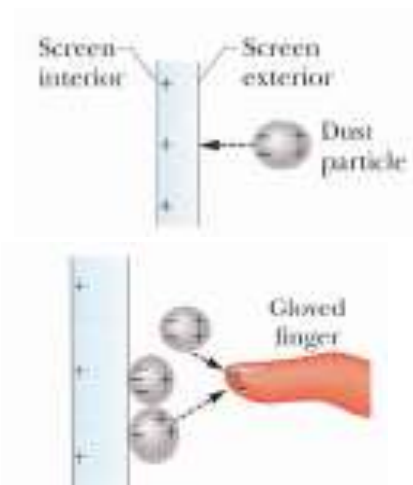


Ao caminhar, o corpo vai adquirindo carga eléctrica devido à fricção com o chão e com o ar.

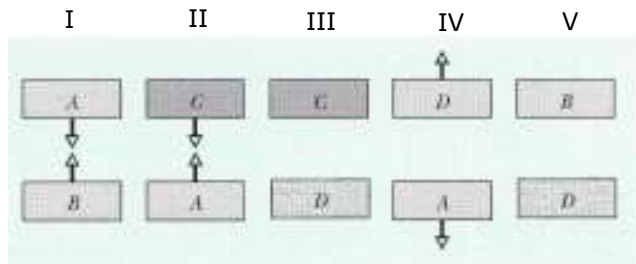
(porque não descarrega?)

Quando se coloca a mão na maçaneta da porta, vai existir um fluxo de cargas eléctricas entre a maçaneta e a mão, e sente-se um choque.

Voltemos à questão inicial. Qual a fonte de contaminação bacteriológica presente nesta sala?



Checkpoint



Na figura estão 5 pares de barras.

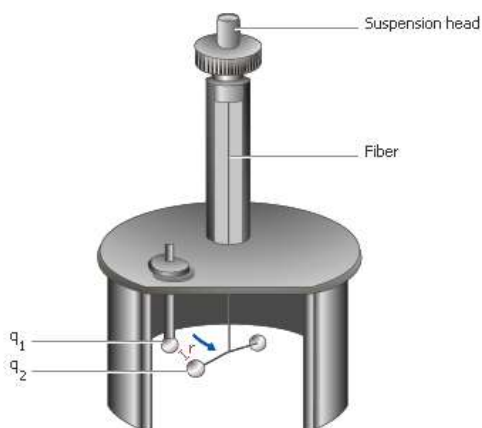
As barras A, B e D são plásticas e estão eletricamente carregadas.

A placa C é metálica e está neutra.

Represente as forças entre os pares III e V.

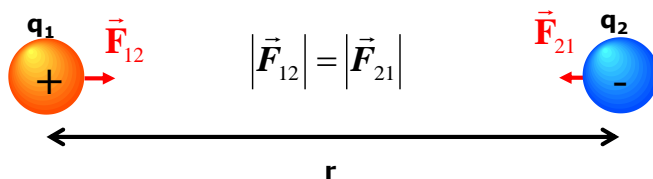
1.2. Interação entre cargas eléctricas. **Lei de Coulomb.**

Utilizando uma balança de torção, Coulomb relacionou a força de atracção (ou repulsão) com o valor das cargas eléctricas e com a distâncias entre as cargas eléctricas.

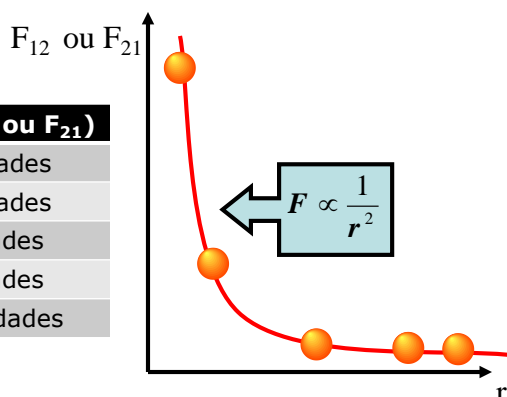


Charles-Augustin Coulomb
(1736 - 1806)

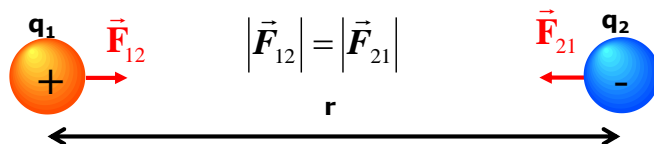
1) Alterando a distância entre 2 cargas eléctricas pontuais (q_1 e q_2), verificou de que modo a força exercida em q_2 (ou q_1) variava.



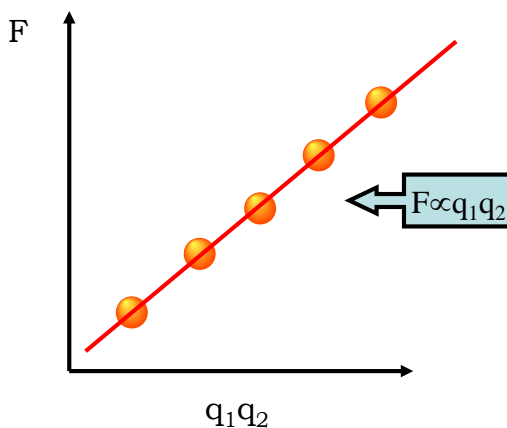
Distância (r)	Força (F_{12} ou F_{21})
1 unidades	64 unidades
2 unidades	16 unidades
4 unidades	4 unidades
8 unidades	1 unidades
16 unidades	0.25 unidades



2) Mantendo a distância entre duas cargas (q_1 e q_2) mas variando o valor das cargas, verificou de que modo a força exercida em q_2 (ou q_1) variava.



Produto das cargas ($q_1 q_2$)	Força (F_{12} ou F_{21})
1 unidades	5 unidades
2 unidades	10 unidades
3 unidades	15 unidades
4 unidades	20 unidades
5 unidades	25 unidades



Entrando em conta com ambas as variações:

$$F \propto \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

A magnitude (módulo) da força de Coulomb exercida por uma carga q_1 numa carga q_2 (ou vice-versa) distanciadas de r é:

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

Lei de Coulomb

Constante de Coulomb

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.99 \times 10^9 (SI)$$

Quais são as unidades SI da constante de Coulomb?

Permitividade eléctrica do vazio

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} (SI)$$

Quais são as unidades SI de ϵ_0 ?

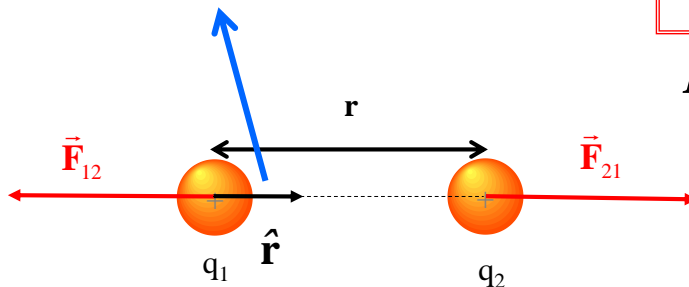
- A força é uma grandeza vectorial!
- A lei de Coulomb só se aplica exactamente a cargas pontuais ou a partículas.
- A força eléctrica de q_1 sobre q_2 , F_{21} :

Lei de Coulomb

$$\vec{F}_{21} = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2} \hat{r}$$

$$\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}$$

Vector unitário
dirigido de q_1 para q_2



E no caso de existirem várias cargas? Qual a força a que cada carga está sujeita?

Resulta do efeito acumulado da acção de cada uma das outras cargas.

Princípio da sobreposição

A força entre qualquer par de cargas é dada pela lei de Coulomb.

A força resultante sobre qualquer das cargas é igual à **soma vectorial** das forças devidas às cargas individuais.

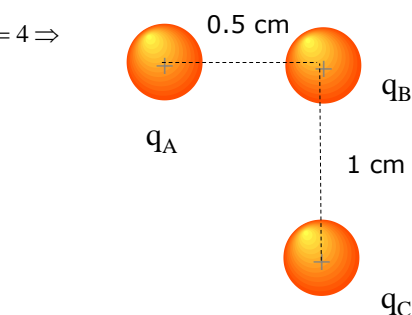
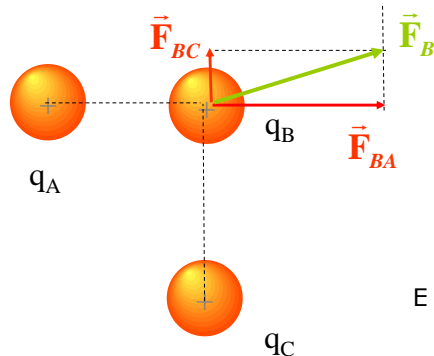
Três esferas carregadas com a mesma carga q positiva estão colocadas num mesmo plano, como indicado na figura. A força eléctrica entre as esferas C e B tem intensidade $F_{CB}=1 \times 10^{-6} \text{ N}$. Determine a força eléctrica:

a) com que A actua sobre B;

b) resultante sobre a esfera B

$$a) \quad F = k \frac{qq}{r^2} \quad \frac{F_{BA}}{F_{BC}} = \frac{r_{BC}^2}{r_{BA}^2} = \frac{(1 \times 10^{-2})^2}{(0.5 \times 10^{-2})^2} = 4 \Rightarrow \\ \Rightarrow F_{BA} = 4 \times 10^{-6} \text{ N}$$

$$b) \quad \vec{F}_B = \vec{F}_{BA} + \vec{F}_{BC}$$



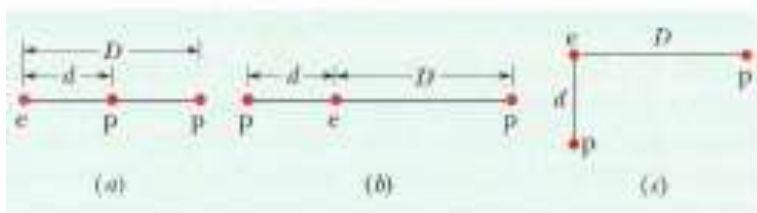
$$\vec{F}_B = (4 \times 10^{-6} \hat{i} + 1 \times 10^{-6} \hat{j}) \text{ N}$$

$$F_B = \sqrt{(4 \times 10^{-6})^2 + (1 \times 10^{-6})^2} \text{ N}$$

$$F_B = \sqrt{17} \times 10^{-6} \text{ N}$$

E se a carga B for negativa?

Checkpoint



A figura representa 3 situações com 2 prótons (p) e um elétron (e).

- Ordene as situações, por ordem decrescente, da magnitude da força eletrostática no elétron devido aos dois prótons.
- Na situação (c) o ângulo entre a força resultante no elétron e a linha d é maior ou menor que 45° ?

Richard Feynman

Ainda assim, tão perfeito é o balanço [entre cargas positivas e negativas no corpo humano] que mesmo que, se se colocar perto de alguém, não sentirá qualquer força. Se estivesse a um braço de distância de alguém e se ambos tivessem 1% de elétrons a mais do que de prótons, a força de repulsão seria incrível. Quão grande? Suficiente para levantar o Empire State Building?

Não!

Suficiente para levantar o Monte Everest?

Não!

A repulsão seria suficiente para levantar um "peso" equivalente à massa da Terra.



- Existem dois tipos de carga eléctrica: positiva e negativa
 - Cargas de sinal contrário atraem-se
 - Cargas do mesmo sinal repelem-se
- A carga é conservada
- A carga é quantificada
- A Lei de Coulomb descreve a força electrostática entre cargas eléctricas pontuais em repouso.
- O princípio da sobreposição permite determinar a força eléctrica resultante que actua numa carga devido um sistema de cargas pontuais.

1.3. Campo Eléctrico



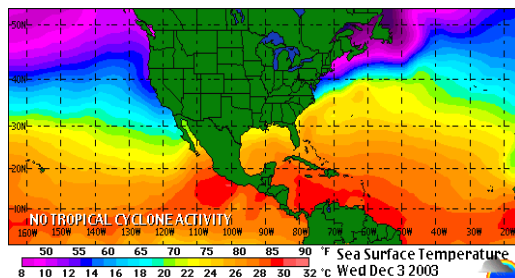
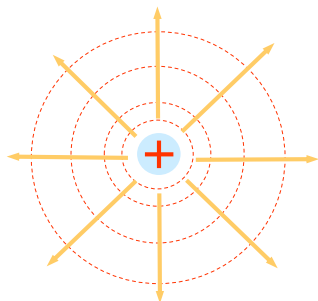
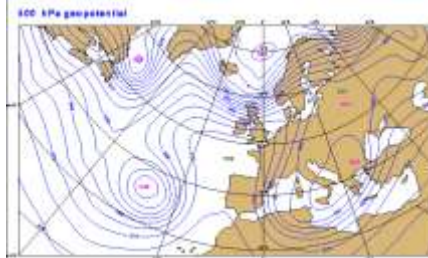
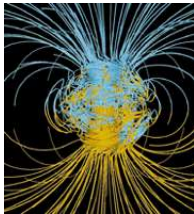
A reprodução nas flores pode depender da atividade dos insetos que transportam o pólen entre flores. As abelhas, ao contrário do que se possa pensar, não coletam o polen simplesmente por se esfregarem na flor. Em vez disso o pólen salta da flor para a abelha, mantém-se preso à abelha durante o voo e depois salta da abelha para uma nova flor. [Qual é a causa destes saltos de pólen?](#)

outros campos

De um modo geral pode dizer-se que em Física, **campo** é uma **propriedade física que se estende por uma região do espaço**.

A cada ponto desse espaço corresponde uma grandeza associada à propriedade em causa, que é função da posição e por vezes do tempo.

Se a propriedade física diz respeito a uma grandeza vectorial, o campo é um **campo vectorial** (forças, velocidades, etc). Se a propriedade diz respeito a uma grandeza escalar, o campo é um **campo escalar** (temperatura, etc)



Campos eléctricos causados por cargas puntuais

As forças electrostáticas, tal como as gravíticas, são **forças que actuam à distância** (sem que os corpos entrem em contacto). O conceito de acção à distância é fisicamente desconfortável. Porquê?

Com que velocidade se propaga esta interacção?

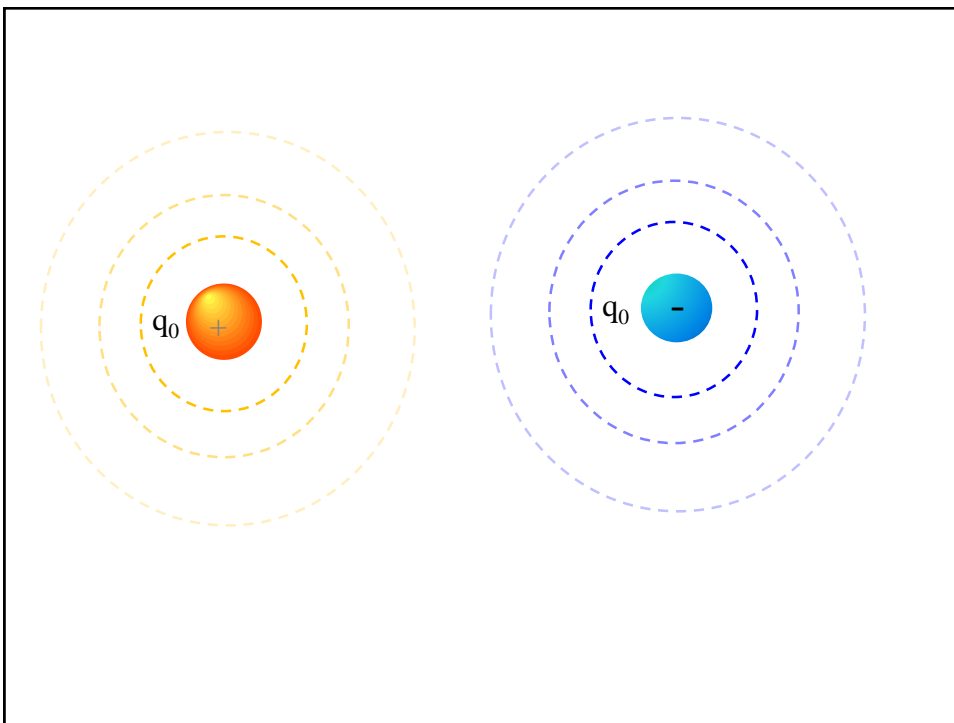



Introdução ao conceito de Campo. Neste caso **Campo Eléctrico**

Cada partícula cria uma perturbação no espaço em seu redor (Campo). Esse campo interactua com outras partículas (nomeadamente através da aplicação duma força).

O campo criado por uma partícula propaga-se no vazio com a velocidade c (velocidade da luz). Se uma carga se move, a força exercida noutra carga situada a uma distância r , só varia uns instantes mais tarde. Qual tempo que demora a segunda carga a sentir o efeito dessa variação?

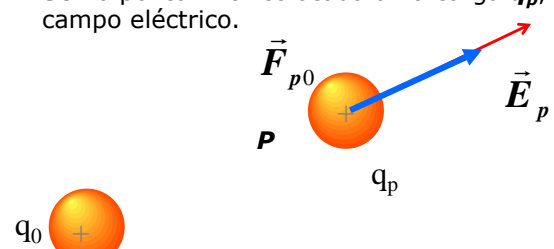
$$c = \frac{r}{t} \Rightarrow t = \frac{r}{c}$$

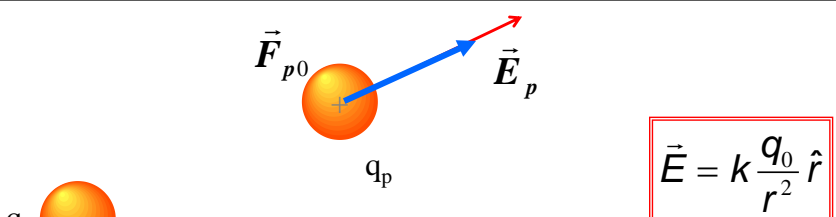




Campo eléctrico criado por q_0 num ponto P a uma distância r da carga q_0 .

Se no ponto P for colocada uma carga q_p , ela vai sentir o efeito do campo eléctrico.




$$\vec{F}_{p0} = k \frac{q_p q_0}{r^2} \hat{r} = q_p k \frac{q_0}{r^2} \hat{r} = q_p \vec{E}_p \Rightarrow \vec{E}_p = \frac{\vec{F}_{p0}}{q_p}$$


O campo eléctrico a uma determinada distância da carga criadora desse campo existe independentemente de haver ou não uma carga de prova nesse ponto.

Se existir uma carga q , ela sente o efeito do campo.

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

E se q_0 for negativa?



Podemos olhar para as forças entre cargas de duas formas:

Carga/carga:

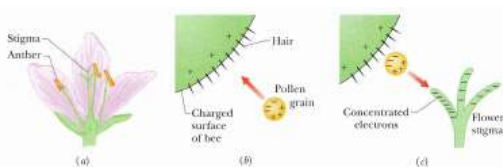
A carga 1 exerce uma força na carga 2

Carga/campo/carga:

A carga 1 cria um campo eléctrico

O campo eléctrico exerce uma força a carga 2.

Afinal qual a razão dos saltos de pólen?

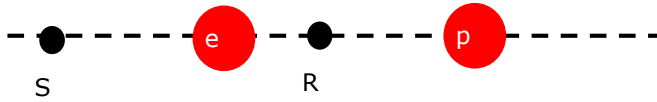


As abelhas adquirem carga eléctrica enquanto voam (fricção com ar). Nas flores, as anteras estão eletricamente isoladas do solo, mas o estigma está eletricamente ligado ao solo.

O campo eléctrico criado pela carga da abelha induz uma polarização no grão de pólen. Este efeito provoca a atração pólen-abelha.

Quando a abelha se aproxima de outra flor, a carga da abelha e a carga induzida no grão de pólen atraem os eletrões de condução para a extremidade do estigma. Se a distância não for demasiado grande, a força resultante provoca atração do pólen pelo estigma.

Checkpoint



A figura representa um próton (p) e um eletrão (e).

Qual o sentido do campo elétrico no ponto S e no ponto R?

Duas esferas carregadas com a mesma carga q positiva ($1\mu\text{C}$) estão colocadas num mesmo plano, como indicado na figura.

A) Determine o campo eléctrico no ponto B:

B) Se no ponto B for colocada uma terceira carga ($1\mu\text{C}$), calcule a força resultante sobre essa carga provocada pelas outras.

$$E_A = k \frac{q_A}{r_A^2} \quad E_A = 9 \times 10^9 \frac{(1 \times 10^{-6})}{(0.5 \times 10^{-2})^2} = 36 \times 10^7 \text{ N/C}$$

$$E_C = k \frac{q_C}{r_C^2} \quad E_C = 9 \times 10^9 \frac{(1 \times 10^{-6})}{(1 \times 10^{-2})^2} = 9 \times 10^7 \text{ N/C}$$

$$\vec{E} = \vec{E}_A + \vec{E}_C = (36 \times 10^7 \hat{i} + 9 \times 10^7 \hat{j}) \text{ N/C} \Rightarrow E = 37.1 \times 10^7 \text{ N/C}$$

$$\vec{F} = q_B \vec{E} = 1 \times 10^{-6} (36 \times 10^7 \hat{i} + 9 \times 10^7 \hat{j}) \text{ N}$$

$$\vec{F} = (360 \hat{i} + 90 \hat{j}) \text{ N}$$

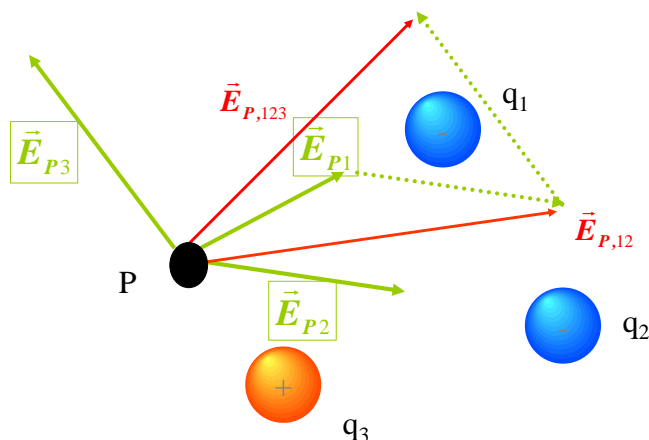
E se a carga colocada em B for negativa?

E no caso de existirem várias cargas pontuais estacionárias? Qual o campo eléctrico no ponto P?

Princípio da sobreposição

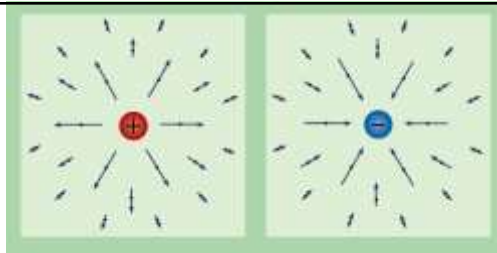
$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i$$

Corresponde à soma do Campo Eléctrico criado por cada carga no ponto P.

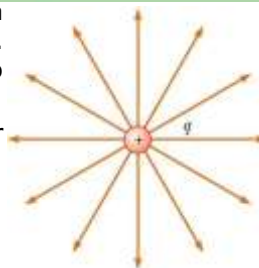


Linhas de Campo Eléctrico

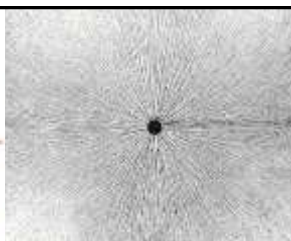
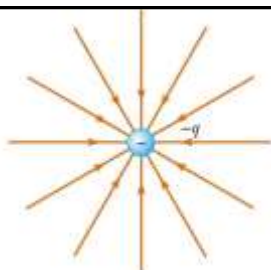
$$\vec{E}_P = k \frac{q_C}{r^2} \hat{r}_P$$



- As linhas de campo eléctrico são uma ajuda para visualizar os padrões de campo eléctrico. Correspondem a linhas tangentes ao campo eléctrico em cada ponto, com o sentido deste.
- As linhas de campo foram introduzidas por Michael Faraday



- Carga pontual positiva isolada
- As linhas irradiam em todas as direcções centrifugamente



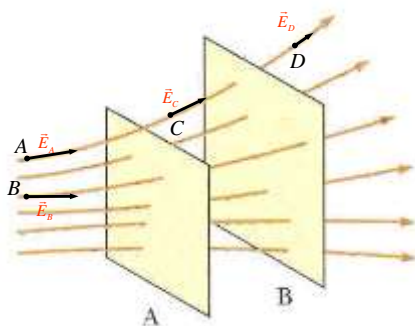
Carga pontual negativa isolada.

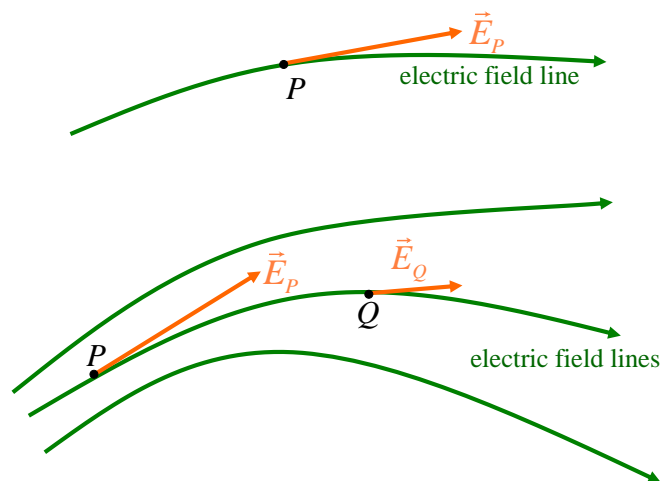
As linhas irradiam em todas as direcções centripetamente

Regras para representar linhas de campo eléctrico:

- As linhas de campo eléctrico iniciam-se em cargas positivas (ou no infinito) e acabam nas cargas neativas (ou no infinito).
- Num esquema, o nº de linhas de campo que partem de uma carga positiva ou chegam a uma carga negativa é proporcional ao valor da carga.
- A densidade de linhas de campo num (nº de linhas por unidade de superfície perpendicular às linhas de campo) em qualquer ponto é proporcional à intensidade do campo eléctrico nesse ponto.
- As linhas de campo nunca se cruzam. Isso significaria que nas intersecções ocorreriam 2 diferentes direcções de campo eléctrico.

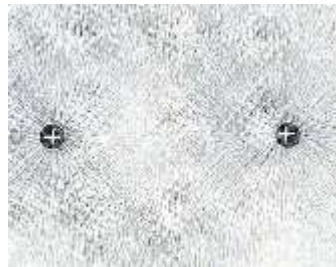
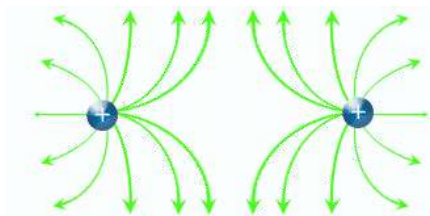
O campo numa dada região de espaço pode ser representado por **linhas de campo**.



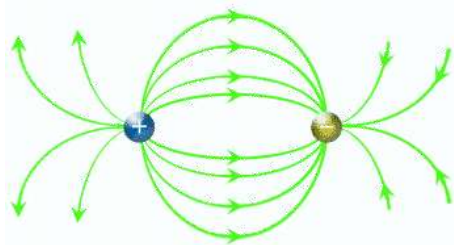


As **linhas de campo** são linhas tangentes ao vector campo em cada um dos seus pontos.

E se as cargas não estiverem isoladas?

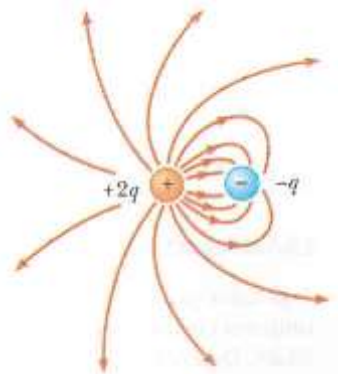


campo criado por duas cargas de sinais e magnitude igual

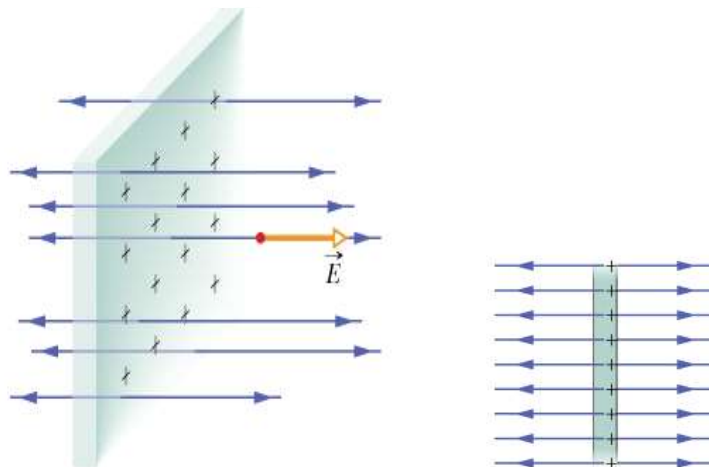


campo criado por duas cargas de sinais contrários e magnitude igual

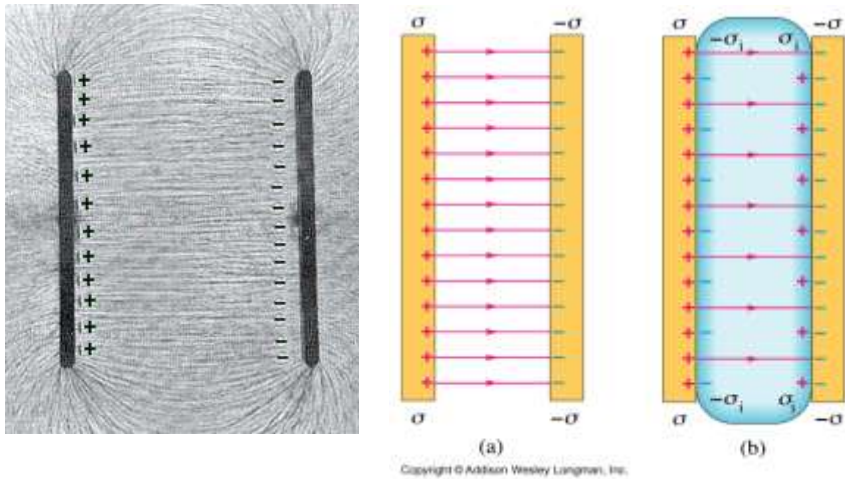
campo criado por duas cargas de sinal contrário e diferentes magnitudes



plano carregado



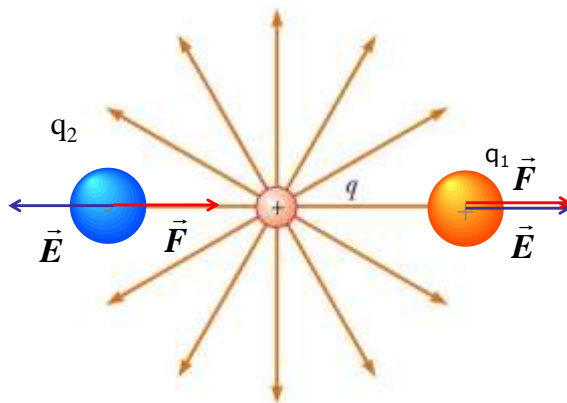
Outros exemplos de linhas de campo eléctrico



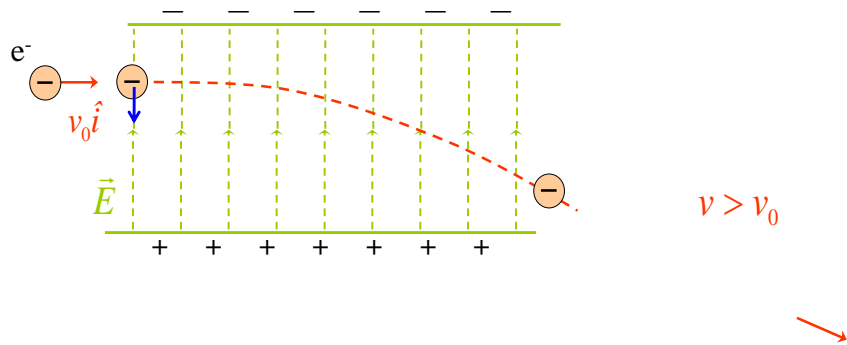
Linhas de campo eléctrico paralelas, igualmente separadas \Rightarrow **Campo eléctrico uniforme**

Movimento de cargas pontuais num Campo Eléctrico

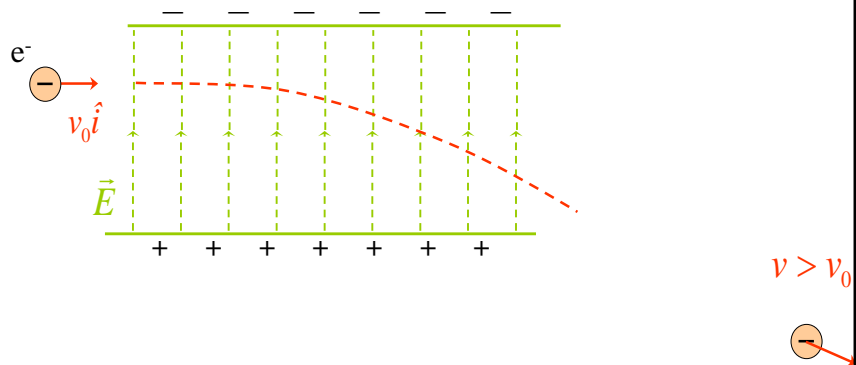
O que acontece a cada uma das cargas pontuais situada num determinado ponto dum campo eléctrico criado pela carga q ?

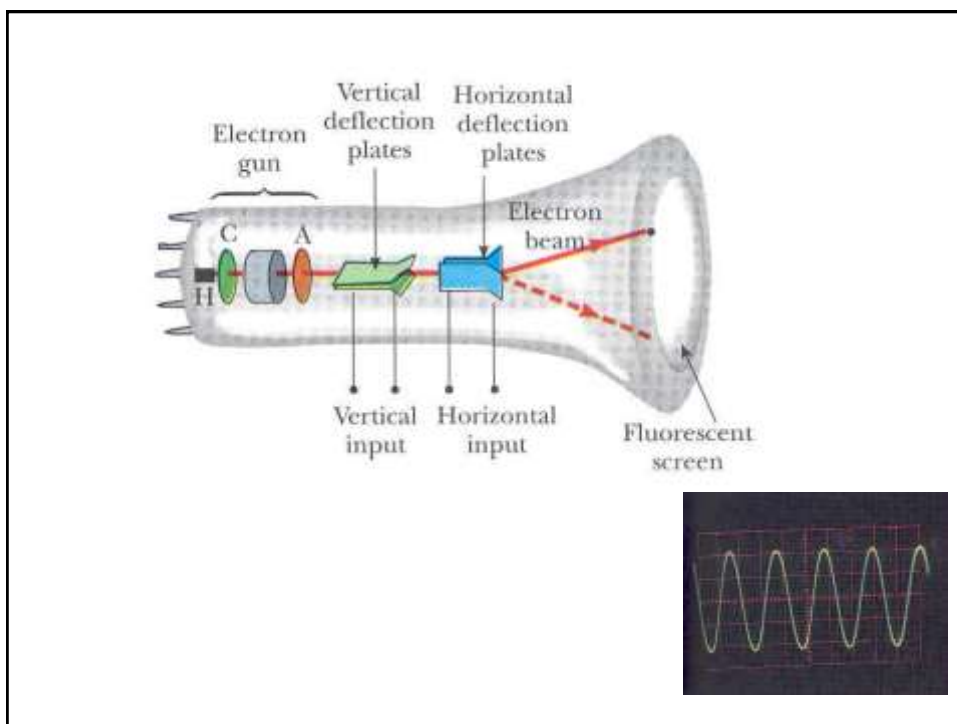


movimento de cargas num campo eléctrico uniforme

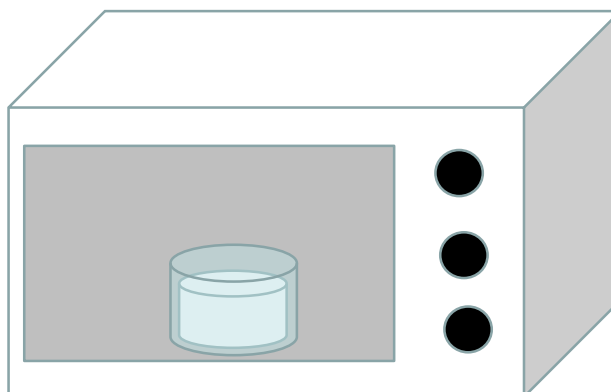


movimento de cargas num campo eléctrico uniforme

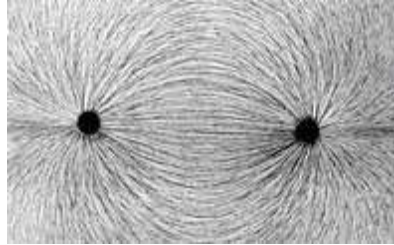
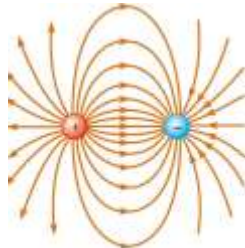




Dipolo Eléctrico



Porque é que os aparelhos designados por *micro-ondas* aquecem os alimentos ?



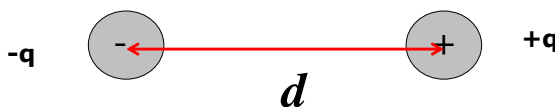
Dipolo eléctrico consiste em duas cargas simétricas separadas por uma determinada distância (centro de cargas positivas não coincide com o centro de cargas negativas).

A maior densidade de linhas de campo entre as cargas indica uma maior intensidade do campo eléctrico nessa região.

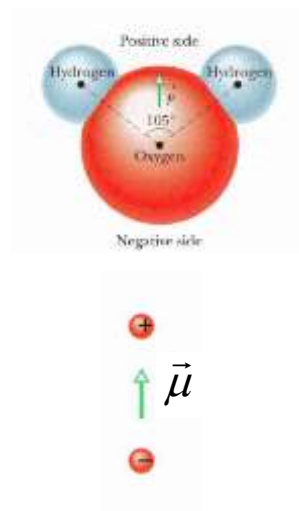
Dipolos eléctricos ocorrem frequentemente em algumas moléculas (moléculas polares, como cloreto de hidrogénio, água, etc.).

A intensidade e orientação do dipolo eléctrico são dados pelo momento dipolar eléctrico: $\vec{\mu}$

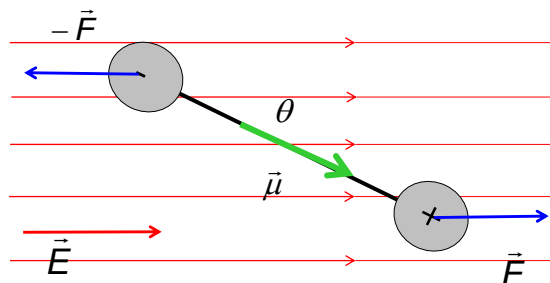
$$|\vec{\mu}| = qd$$



O momento dipolar eléctrico tem a direcção do centro das cargas e sentido da carga negativa para a carga positiva.



Dipolo inserido num campo elétrico uniforme.
Que acontece à molécula?

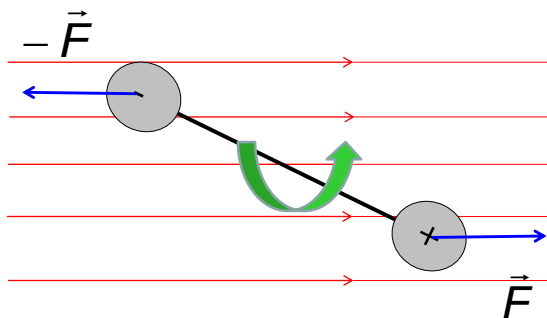


O momento dipolar faz um ângulo θ com o campo elétrico.

Campo elétrico uniforme \Rightarrow forças elétricas constante \Rightarrow força resultante nula \Rightarrow Centro de massa da molécula em equilíbrio.

Como as forças estão aplicadas em pontos diferentes, cria-se um binário de forças em torno do CM (a uma distância x da carga $-q$).

$$M = Fx \sin \theta + F(d - x) \sin \theta = Fd \sin \theta$$



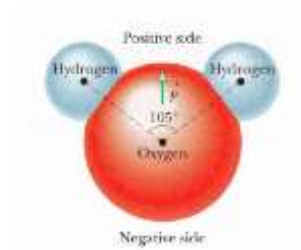
$$M = Fd \sin \theta = qEd \sin \theta = \mu E \sin \theta$$

$$\vec{M} = \vec{\mu} \times \vec{E}$$

Checkpoint

Numa molécula de água neutra, no estado gasoso, o momento dipolar tem uma magnitude de $6.2 \times 10^{-30} \text{ C}\cdot\text{m}$.

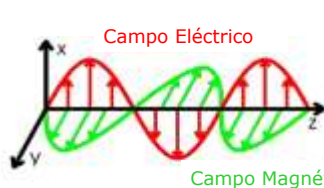
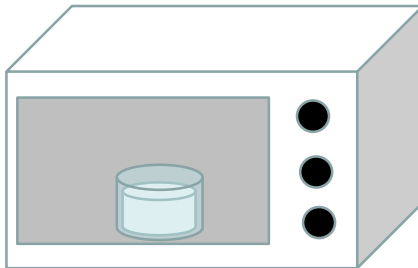
Se a molécula for colocada num campo elétrico com $1.5 \times 10^4 \text{ N/C}$, qual é o momento máximo que o campo pode exercer sobre o dipolo?



$$M = \mu E \sin \theta = 6.2 \times 10^{-30} \times 1.5 \times 10^4 \times \sin 90^\circ$$

$$M = 9.3 \times 10^{-26} \text{ N}\cdot\text{m}$$

Porque é que os aparelhos designados por *micro-ondas* aquecem os alimentos ?

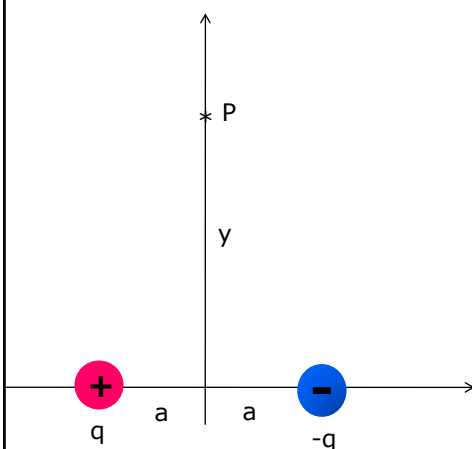


$$E = E_x = E_o \sin 2\pi \left(\frac{1}{\lambda} z - ft \right) = E_o \sin(kz - \omega t)$$

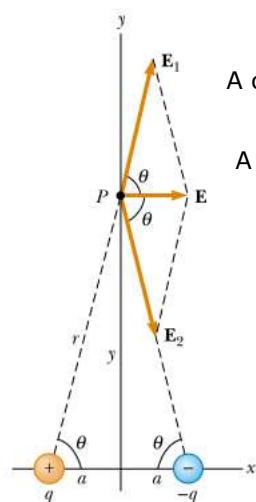
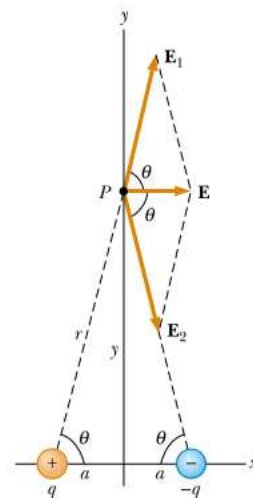
$$B = B_y = B_o \sin 2\pi \left(\frac{1}{\lambda} z - ft \right) = B_o \sin(kz - \omega t)$$

Com o campo elétrico oscilante, os dipolos das moléculas de água dos alimentos tentam orientar-se com o campo elétrico. Neste processo, as moléculas oscilam e algumas ligações químicas (intermoleculares) quebram-se. Quando a ligação química volta a formar-se, liberta-se energia, que é recebida pelos alimentos na forma térmica.

Como calcular o campo eléctrico no ponto P, devido ao dipolo?



$$\vec{E}_P = \vec{E}_{1(+)} + \vec{E}_{2(-)}$$



$$E_1 = E_2 = k \frac{q}{r^2} = k \frac{q}{y^2 + a^2}$$

A componente y é nula: $E_y = 0$

A componente x é:

$$E = 2E_1 \cos \theta \quad \text{e} \quad \cos \theta = \frac{a}{r} = \frac{a}{\sqrt{y^2 + a^2}}$$

$$E = k \frac{2qa}{(y^2 + a^2)^{3/2}}$$

Se $y \gg a$

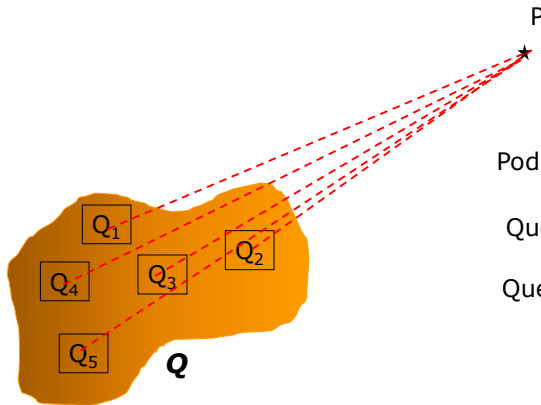
$$E \approx k \frac{2qa}{y^3}$$

E se as cargas não forem pontuais?

Campo eléctrico criado por uma distribuição contínua de cargas eléctricas.

Questão:

Se o corpo representado na figura estiver carregado, como se calcula o campo no ponto P?



Poderemos usar a lei de Coulomb?

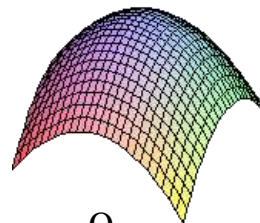
Que carga?

Que distância usar?

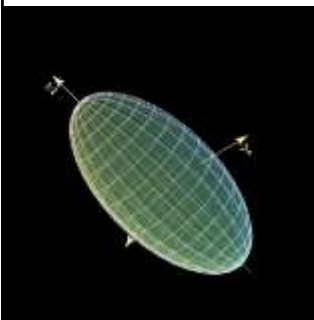
Distribuição contínua de cargas eléctricas.



$$\lambda = \frac{Q}{L} \quad (\text{C/m})$$



$$\sigma = \frac{Q}{A} \quad (\text{C/m}^2)$$

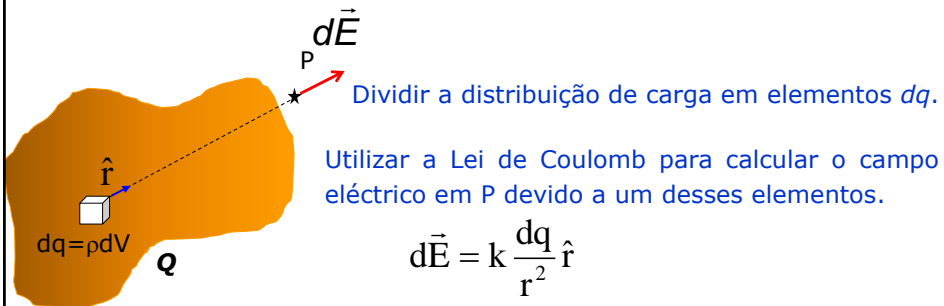


$$\rho = \frac{Q}{V} \quad (\text{C/m}^3)$$

Some Measures of Electric Charge

Name	Symbol	SI Unit
Charge	q	C
Linear charge density	λ	C/m
Surface charge density	σ	C/m ²
Volume charge density	ρ	C/m ³

Como se calcula o campo no ponto P?



$$d\vec{E} = k \frac{dq}{r^2} \hat{r}$$

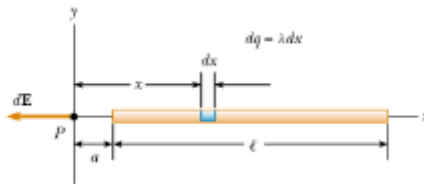
Utilizar o princípio da sobreposição: $\vec{E} \cong k \sum_i \frac{dq_i}{r_i^2} \hat{r}_i$

$$\vec{E} = k \int_V \frac{dq}{r^2} \hat{r}$$

Exemplo:

Calcular o campo criado no ponto P, pela haste carregada positivamente.

$$d\vec{E} = -k \frac{dq}{r^2} \hat{i}$$



$$dE = k \frac{dq}{r^2} \Leftrightarrow dE = k \frac{\lambda dx}{x^2} \quad \rightarrow \quad E = \int_a^{a+l} k\lambda \frac{dx}{x^2}$$

$$E = k\lambda \left[-\frac{1}{x} \right]_a^{a+l} = k\lambda \left[-\frac{1}{a+l} + \frac{1}{a} \right] = k\lambda \left[-\frac{(a+l)-a}{a(a+l)} \right]$$

$$E = k \frac{Q}{a(a+l)}$$

Quando $a \gg l$

$$E \cong k \frac{Q}{a^2}$$

- A intensidade do campo eléctrico é proporcional à intensidade da força que actua numa carga de teste;
- A direcção e o sentido do campo são os da força eléctrica que actua numa carga de prova positiva.
- As linhas de campo são linhas tangentes ao vector campo em cada ponto e iniciam-se em cargas positivas (ou no infinito) e acabam nas cargas negativas (ou no infinito).
- A densidade de linhas de campo (nº de linhas por unidade de superfície perpendicular às linhas de campo) em qualquer ponto é proporcional à intensidade do campo eléctrico nesse ponto.
- O campo eléctrico devido a uma distribuição continua de carga é determinado tratando os elementos de carga como cargas pontuais e depois fazendo a soma, pelo princípio da sobreposição, utilizando a integração.

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