

CAMPO ELECTROMAGNÉTICO

O principal objetivo deste curso é introduzir os estudantes aos fundamentos do electromagnetismo. O electromagnetismo é um dos pilares da física clássica e moderna estando na base de algumas das mais importantes descobertas da humanidade. É crucial que os estudantes tenham uma clara compreensão dos principios básicos e que os consigam dominar do ponto de vista da compreensão física e da sua aplicação.

A ideia do curso é apresentar a matéria de forma clara e simplificada mas sempre com rigor matemático recomendando sempre que forneça a ilustrações e exemplos que possam ajudar na compreensão dos conceitos.

Este curso destina-se a estudantes de engenharia e os requisitos exigidos para a compreensão do electromagnetismo e suas aplicações requerem um nível de algébricas em geral superior ao de outras unidades comunitárias do seu programa.

Dois dos principais quantities a usar - Campo eléctrico e magnético - são entidades vectoriais que podem variar de ponto para ponto no espaço e no tempo. A sua compreensão e visualização requer uma abordagem abstrata.

Como referi o estudo do electromagnetismo aborda basicamente uma parte designada por electrostática, outra de magnetostática e electro dinâmica. Esta divisão ficará clara no decorrer do curso.

A electrostática como a palavra indica está relacionada com a interacção entre cargas estáticas.

A magnetostática estuda a origem de campos magnéticos estáticos que podem originar de materiais magnéticos ou através de correntes eléctricas estacionárias.

A electro dinâmica lida com campos variáveis no tempo, por exemplo, um campo magnético variável no tempo produz campos elétricos.

A dar coerência a tudo isto, como vemos ver, existem quatro equações que descrevem todo o electromagnetismo e serão alvo de análise no curso - as equações de Maxwell.

No final do curso iremos ver uma das grandes consequências de tudo isto, que é o facto de que a energia electromagnética pode propagar-se, através das chamadas ondas electromagnéticas, ou radiações electromagnéticas, que estudaremos no final do curso e que são a base de toda a área das telecomunicações (ex: satélite, redes fibra óptica, wireless, etc.)

Para o estudo da electrostática, iremos usar uma das mais fundamentais leis de Física - a lei de Coulomb.

[Charles Coulomb, 1785; "coulomb" é a unidade de carga elétrica]

Para o estudo das interações eletromagnéticas reservamos de definir o mediador "carga", no caso carga-elettrica. Existem dois tipos de cargas (+ e -). Esta está quantizada. A carga elementar e é de eletrões: $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$. Assim qualquer carga $Q = n \cdot e$.

Formas de manifestar a existência de carga pode ser feito através de vários processos: fricção, indução ou condução.

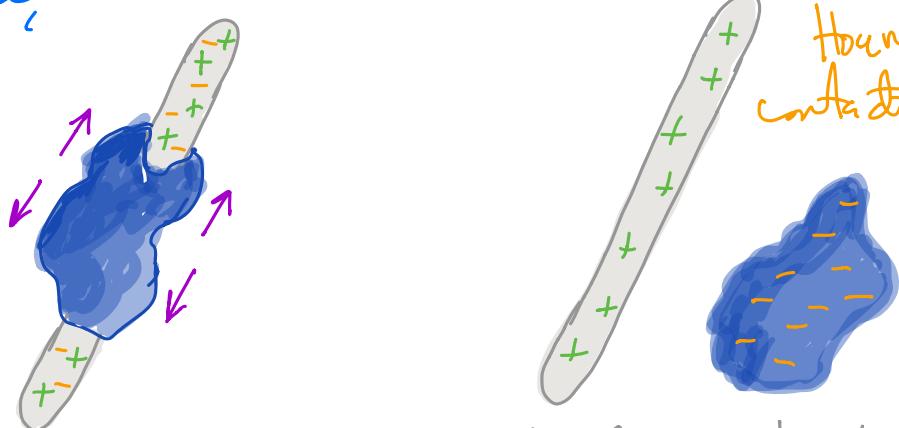


Fig: eletrização por contato (piano/vidro)

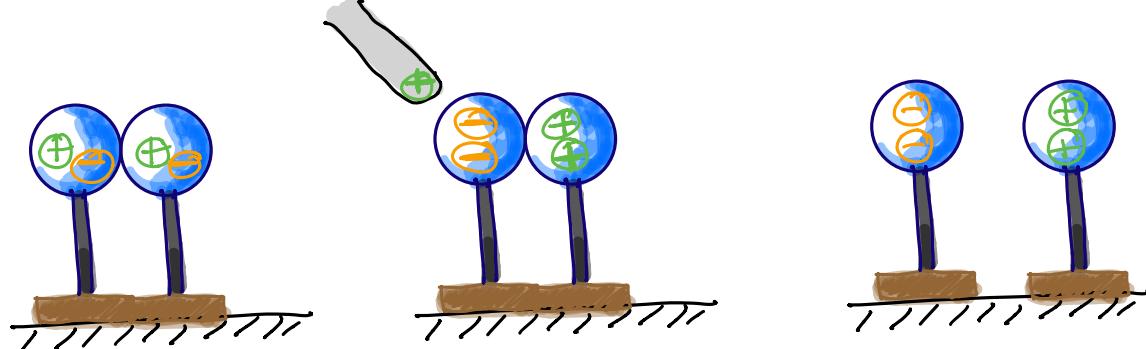
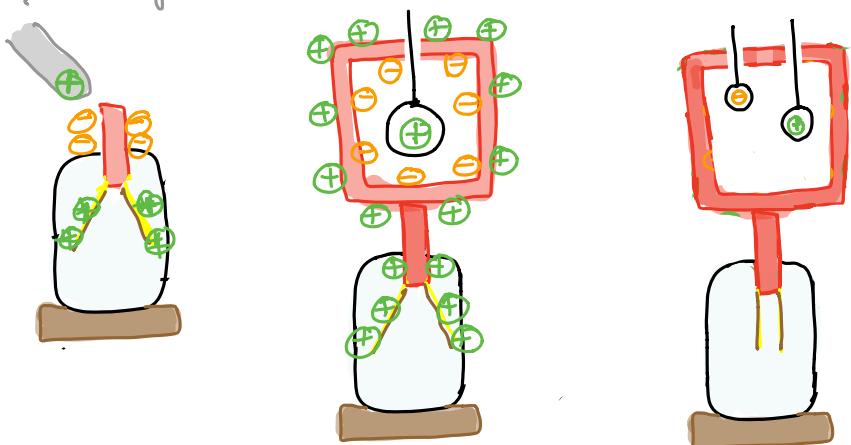
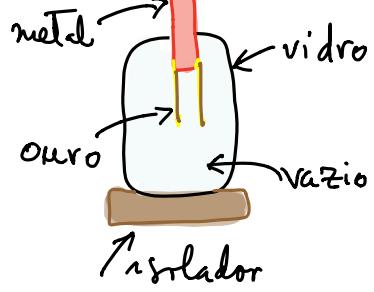


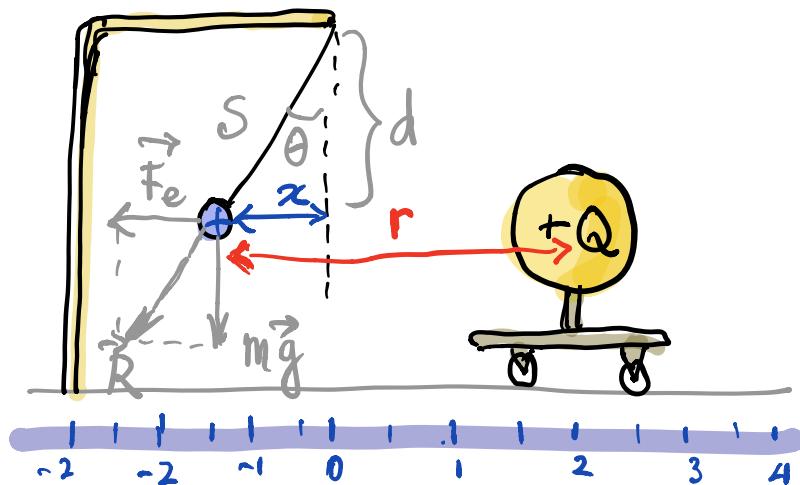
Fig. eletrizadas por influência

Vejamos outro exemplo ilustrativo: eletroscópio



LEI DE COULOMB:

Esta lei foi obtida através de uma experiência laboratorial
não é logicamente ou matematicamente derivável a partir
de outros conceitos.



$$\operatorname{tg} \theta = \frac{x}{d} = \frac{x}{s} (= \sin \theta)$$

$$\text{Force}_{\text{total}} = \vec{F}_e + \vec{F}_g$$

$$\tan \theta = \frac{F_e}{mg} \Rightarrow F_e = \tan \theta \cdot mg$$

$$= \frac{x}{s} \cdot mg$$

$$= \boxed{\frac{mg}{s}} \cdot x$$

Para diferentes valores de \underline{r} , determinar \underline{x}

$$\Rightarrow F_e \propto \frac{1}{r^2}$$

Ao encontrar a dependência de x em r
dig-nos como T_c depende de r .

Lei de Coulomb:

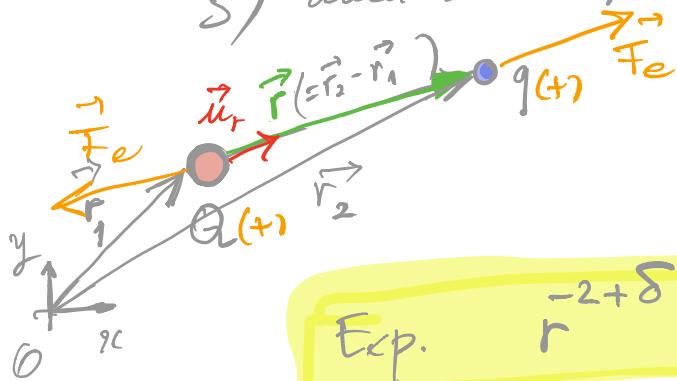
- 1) F é proporcional ao produto das cargas
 - 2) experimentalmente: verificamos $\propto \frac{1}{d^2}$
 - 3) constante de proporcionalidade $\equiv k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \text{ N}^{\text{-1}}\text{C}^2$

$$F = k \cdot \frac{Q \cdot q}{d^2}$$

$$\epsilon_0 \approx 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

(permittividade do vazio)

- 4) Força é uma grandeza vetorial
 5) atua ao longo da linha que une os cargas



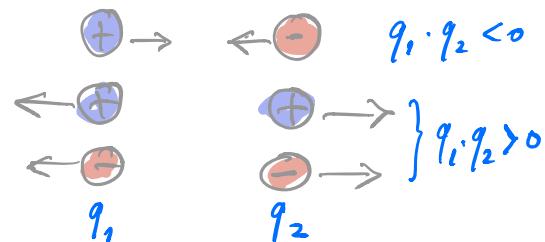
$$\vec{F}_{ele} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q \cdot q}{|r|^2} \cdot \vec{u}_r$$

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q \cdot q}{r^2} \vec{u}_r ; |\vec{u}_r| = 1$$

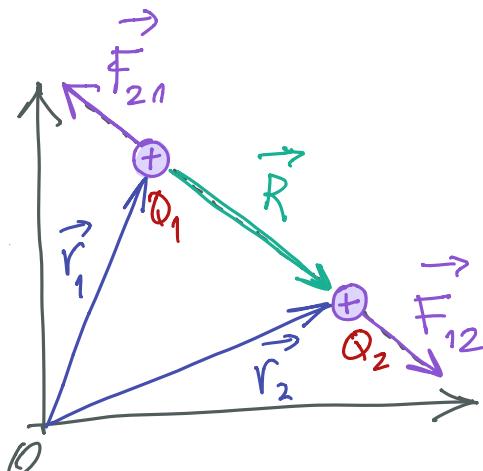
Exp. $r^{-2+\delta}$; $|8| < |10|^{16}$ [Williams et al., 1971]

Válida para todos os r's? válida para $r \in [10^{-13}, 10^7] \text{ m}$

- 5) atração ou repulsão



Expressão matemática da lei de Coulomb.



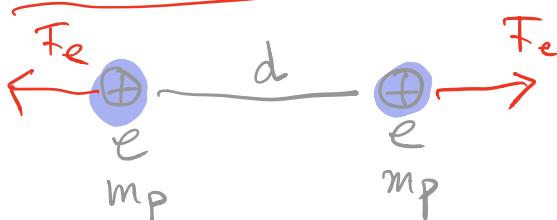
$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} = K \frac{Q_1 Q_2}{R^2} \cdot \vec{u}_R$$

$$\vec{R} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1 \quad \vec{u}_R = \frac{\vec{R}}{R}$$

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$$

$$\epsilon_0 \approx 8,854 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1} (\text{Farad/metro})$$

Calcular as forças elétricas e gravitacionais entre 2 e⁺



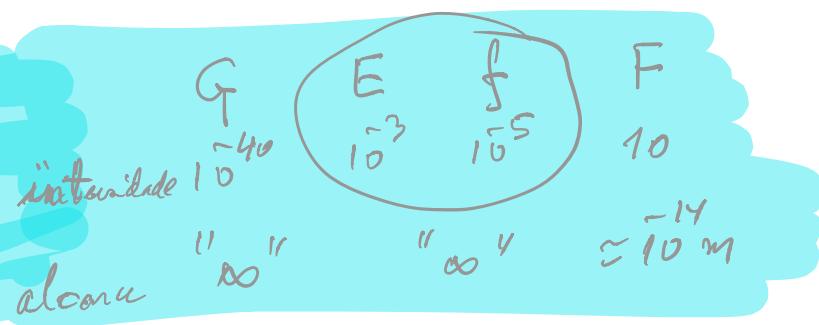
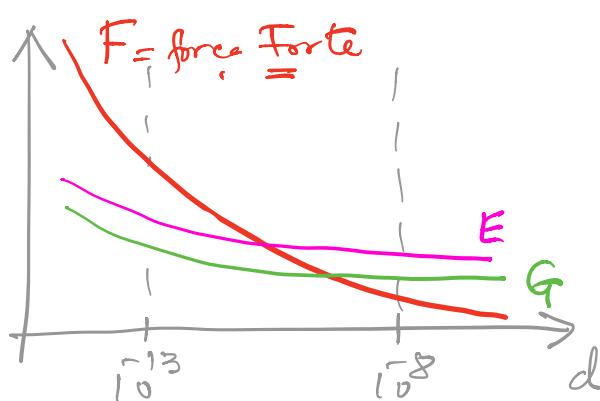
$$F_{ele} = K \cdot \frac{e^2}{d^2}$$

$$F_{grav} = G \cdot \frac{m_p^2}{d^2}$$

$$m_p = 1,7 \times 10^{-27} \text{ kg}, e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$k = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2 \text{ C}^{-2}, G = 6,67 \times 10^{-11}$$

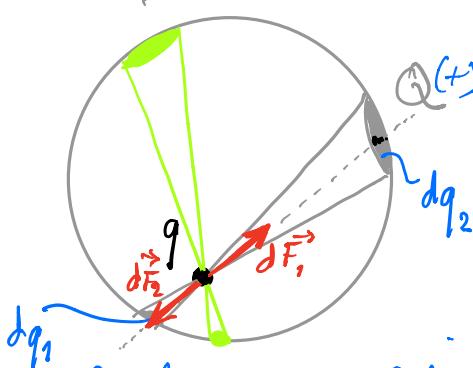
$$\frac{F_{ele}}{F_{gra}} \approx 10^{36}$$



$$\text{Carga típica} \approx \mu\text{C}$$

$$F_g = \text{força gravitacional}$$

"Dedicação" teórica da Lei de Coulomb.



$Q(+)$ → distribuição uniforme de carga.

$$\text{densidade} \equiv \sigma = Q/\text{área} = \frac{Q}{4\pi a^2}$$

$$\text{área} = 4\pi a^2$$

$$= 0$$

$$dq = \sigma ds$$

qualquer que seja o ponto de superfície dentro dos "cones" as respectivas forças somam $dF_1 + dF_2$.

$$F_{ele} \propto \frac{1}{r^n}$$

(notar que $n=2$)

$$dF_2 = k \frac{q \cdot dq_2}{r_2^n}$$

$$dF_1 = k \frac{q \cdot dq_1}{r_1^n}$$

Se a força (resultante) é nula \Rightarrow

$$dF_1 = dF_2 \Leftrightarrow$$

$$\frac{dq_2}{r_2^n} = \frac{dq_1}{r_1^n} \Leftrightarrow$$

$$\frac{ds_2}{r_2^n} = \frac{ds_1}{r_1^n}$$

Noção de ângulo sólido

(1)

$\theta = \frac{s}{r}$ $\text{ângulo} = \text{raio} \times \text{ângulo (2d)}$

$S_{\text{surf}} = \text{raio} \times \text{ângulo sólido (3d)}$

$\Omega = \frac{S}{r^2}$

$d\Omega = \frac{ds}{r^2}$

$\int d\Omega = 4\pi$

$\text{ângulo sólido (mede-se em esteroradianos)}$

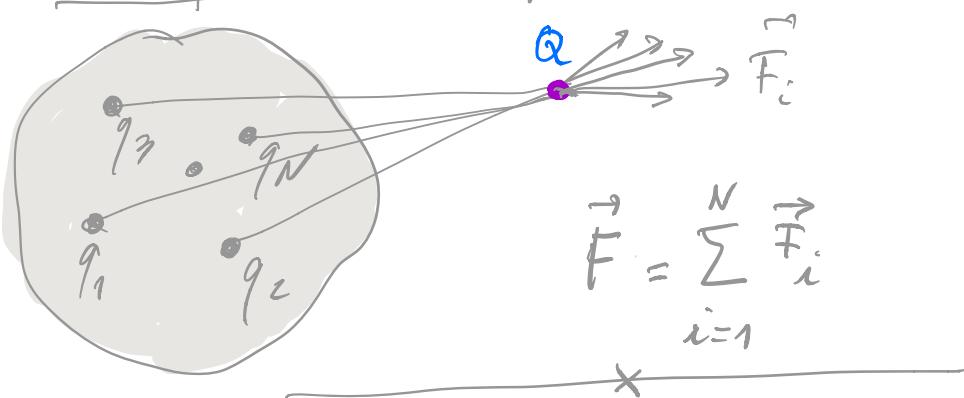
$d\Omega = \frac{dS_1 \cos\alpha}{r_1^2}$

$d\Omega = \frac{dS_2 \cos\alpha}{r_2^2}$

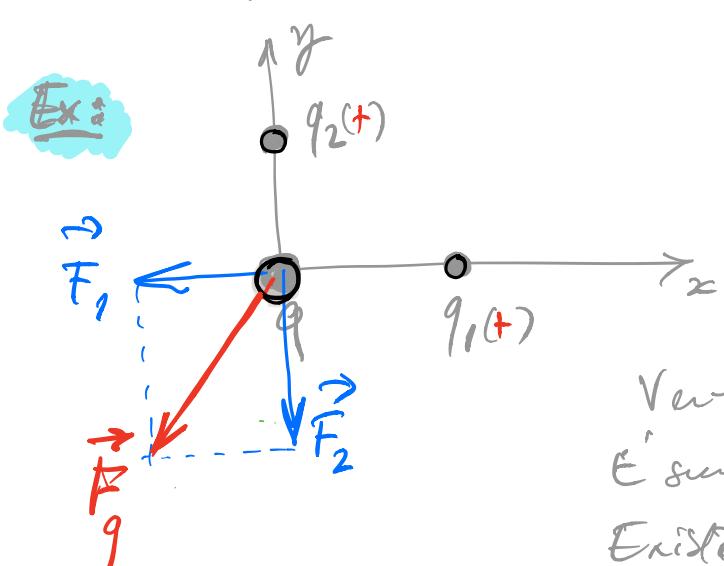
$\frac{dS_1}{r_1^2} = \frac{dS_2}{r_2^2} \Rightarrow r_1^{n-2} = r_2^{n-2}$

Como r_1, r_2 são arbitrários $\Rightarrow n=2$

Princípio de superposição

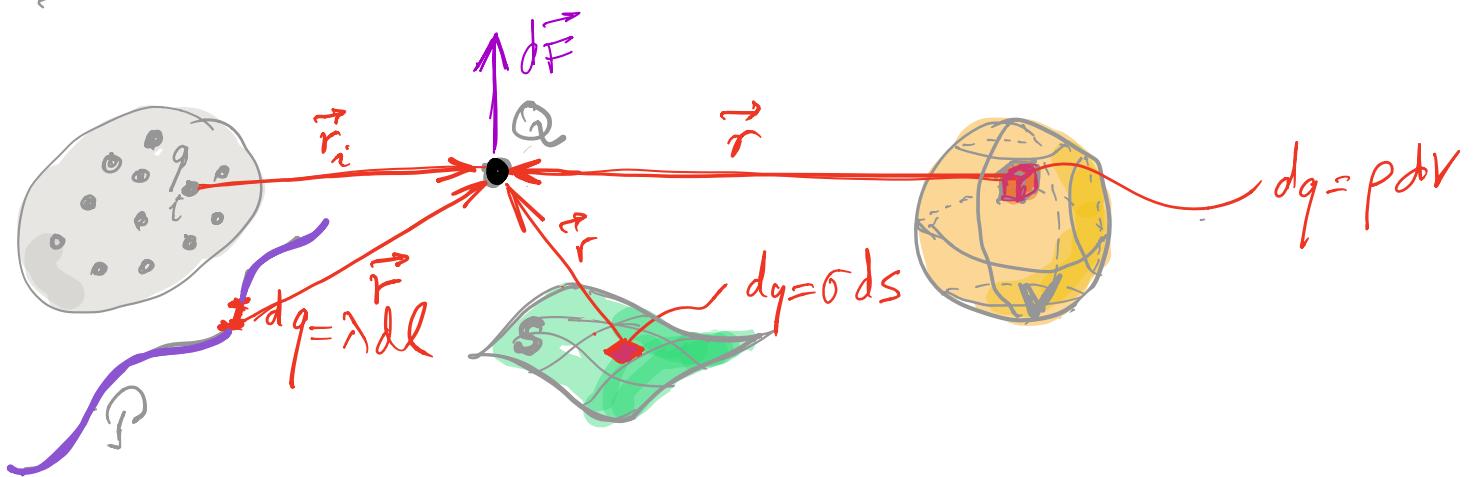


A resultante das forças eletrônicas em Q é o somatório das forças entre cada q_i e Q .



Verificam experimentalmente
é sempre válida? É
Existem exceções? = +
SIM, se o sistema não for linear!

Distribuições contínuas de carga



λ = densidade linear de carga

σ = " superficial de carga

ρ = " volumica de carga

$$\vec{dF} = k \sum_{i=1}^N \frac{Q q_i}{r_i^2} \vec{u}_i + \int_P k \frac{Q dq}{r^2} \vec{u}_r + \int_S k \frac{Q dq}{r^2} \vec{u}_r + \int_V k \frac{Q dq}{r^2} \vec{u}_r$$

Cargas isoladas linha superfície volume

Carga total no fio, superfície ou volume:

$$\text{fio: } dq = \lambda dl \rightarrow Q_{\text{fio}} = \int_P \lambda dl$$

$$\text{superfície: } dq = \sigma ds \rightarrow Q_{\text{sup.}} = \int_S \sigma ds$$

$$\text{volume: } dq = \rho dv \rightarrow Q_{\text{volume}} = \int_V \rho dv$$

