

# **EletróMagnetismo**

**MEFT 2020-2021**

Prof. Pedro Abreu (T e Pb)  
pedro.t.abreu@técnico.ulisboa.pt

# EletroMagnetismo

MEFT 2020-2021

Prof. Pedro Abreu

[pedro.t.abreu@tecnico.ulisboa.pt](mailto:pedro.t.abreu@tecnico.ulisboa.pt)

1ª Aula

Funcionamento e organização

Introdução às forças elétricas e magnéticas

Lei de Coulomb

Eletrostática: campo e potencial elétricos

*Examinador – O que é então eletricidade ?*

*Aluno – Oh, Senhor Professor, tenho a certeza de que sabia o que era, mas esqueci-me!*

*Examinador – Mas que grande tragédia! Apenas dois seres alguma vez souberam o que era Eletricidade, o Autor da Natureza e você. E agora uma esqueceu-se!*

Oxford, ca. 1890, in "More Random Walks in Science", Robert L. Weber, Ed. IOP, Londres



# Funcionamento

- Programa: **Eletrostática, Corrente Elétrica, Magnetostática, Eletrodinâmica, Eq. Maxwell, Ondas Eletromagnéticas**
- **Avaliação:** 100% [Prova Escrita]
- Pr. Escrita: **2 Testes** e/ou **1 Exame** – possível repetir **UM<sup>(\*)</sup>** Teste na data de exame
  - Testes: **27/Abr.**, 18h30, **28/Jun.**, 11h30; Exame: **12/Jul.**, 11h30.
  - Conta a melhor nota, se um teste for repetido;
  - **Nota mínima: 9,5 valores/20** (exame ou **média** dos 2 testes)
  - Nota mínima nos testes: **não existe!**
- **(T) Teóricas:** presença recomendada, concentrada e participativa!
- **(PB) Problemas:** 1h30 para discutir alguns problemas em detalhe, e **ajudar** os alunos que se esforçaram por resolver os problemas.
- **Dúvidas:** Online Zoom, 3ªFeira, 18h00–20h00, sujeito a marcação;  
4ªFeira, 19h30–20h30, passível de alterações.

(\*)Em caso de realização dos testes de forma online (para todos os alunos), será então permitida a recuperação dos dois testes na data de exame, contando as melhores notas de cada par de testes

# Bibliografia

- ‘normal’:
  - **Introduction to Electrodynamics**  
David J. Griffiths  
4<sup>th</sup> Edition, Cambridge University Press, 2017
  - **Electromagnetismo**  
Alfredo Barbosa Henriques e Jorge Crispim Romão  
IST Press, 2006
  - **Exercícios de Electromagnetismo e Óptica**  
Jorge Loureiro  
IST Press, 2018
- ‘Para os verdadeiros apreciadores’:
  - **Feynman Lectures on Physics – Vol. II**  
Richard P. Feynman, Ralph Leighton, Matthew Sands  
Addison–Wesley Publ. Co., 1964
  - e ainda: **Introdução à Física, Cap.V** (Jorge Dias de Deus *et al.*)

# Horário

	Seg 3/1	Ter 3/2	Qua 3/3	Qui 3/4	Sex 3/5
07:00					
08:00					
09:00					
10:00					
11:00					
12:00					
13:00	13:00 - 14:30 T QA1.1 Zoom		13:30 - 15:00 PB C9 (Zoom)		
14:00					
15:00					15:00 - 16:30 T QA1.4 Zoom
16:00					
17:00					
18:00		18:00 - 20:00 Dúvidas Zoom	18:00 - 19:30 PB P1 Zoom		
19:00					
20:00			19:30 - 20:30 Dúvidas Zoom		



# As forças fundamentais na natureza

- Forças **nucleares** (descobertas apenas no século XX – 1<sup>as</sup> “teorias” em 1934):
  - **Fraca**, de alcance muitíssimo curto ( $\approx 10^{-18}$  m), apenas entre partículas elementares
  - **Forte**, muitíssimo intensa quando a distância entre quarks é  $>10^{-15}$  m, para **anular a “cor”** ao juntar quarks ( $r, g, b$ ) e anti-quarks (anti- $r$ , anti- $g$ , anti- $b$ ) em partículas compostas (protão, neutrão,...), levando a um alcance limitado ao tamanho  $\approx$ protão
  - **Forte residual**, entre prótons e nêutrons, muito intensa, limitada aos núcleos
- Força **elétrica** provocada por cargas elétricas (Coulomb), bastante intensa ( $\approx 10^{10}$  qQ/r<sup>2</sup> [N]), atrativa entre cargas opostas e repulsiva entre cargas do mesmo sinal, **que se anula quando a carga total é nula**
- Força **elétrica residual** ( $\approx 10^{10}$  qQd/r<sup>3</sup> [N]) entre átomos neutros, para formar moléculas, **redes cristalinas, sólidos, líquidos, etc.** Anulam-se quando opostas.
- Força **magnética** [provocada por cargas elétricas em movimento (Ampère)] de intensidade  $\approx$ força elétrica residual, **que se anulam com correntes opostas.**
- Força **gravítica**, muito muito fraca ( $\approx 10^{-11}$  mM/r<sup>2</sup> [N]), mas as massas somam-se todas
- À escala do Universo, anulam-se TODAS as forças EXCEPTO a GRAVÍTICA
- À nossa escala,  $\approx$  **tudo** é dominado pelas **forças elétricas (eletromagnéticas)!**

# As forças elétricas e magnéticas

- Desde a pré-história:
  - Magnes (pastor, 4000 a.C.) encontra minérios de óxido de ferro, em *Magnesia* na costa turca, que são atraídos/repelidos entre si
  - Thales (Mileto, séc.VII a.C.) estuda estes fenómenos e a fricção de âmbar com pedaços de feltro e de lã, provocando forças atrativas e repulsivas
  - Na China descobre-se o movimento e utilidade da bússola (séc.XII)
  - W.Gilbert (Inglaterra, séc.XVI) recupera os trabalhos de Thales, e faz estudos mais sistemáticos dos fenómenos com o âmbar, denominando-os de eletricidade (da palavra grega para âmbar: *elektron*), publicando-os na sua obra “De magnete”
  - Benjamin Franklin (USA, séc.XVIII) estuda os relâmpagos e a corrente elétrica, convencendo os sinais para as cargas elétricas e sentido da corrente elétrica (das cargas positivas), e descobrindo o para-raios.
  - ...e muitos outros tiveram contribuições importantíssimas! (Coulomb, Galvani, Volta, Oersted, Ampère, Joule, **Faraday**, **Maxwell**, Hertz, Planck, Einstein, Dirac, Feynman/Schwinger/Tomonaga...)
- Força elétrica provocada por cargas elétricas (Coulomb) e força magnética provocada por cargas elétricas em movimento (correntes elétricas) (Ampère)

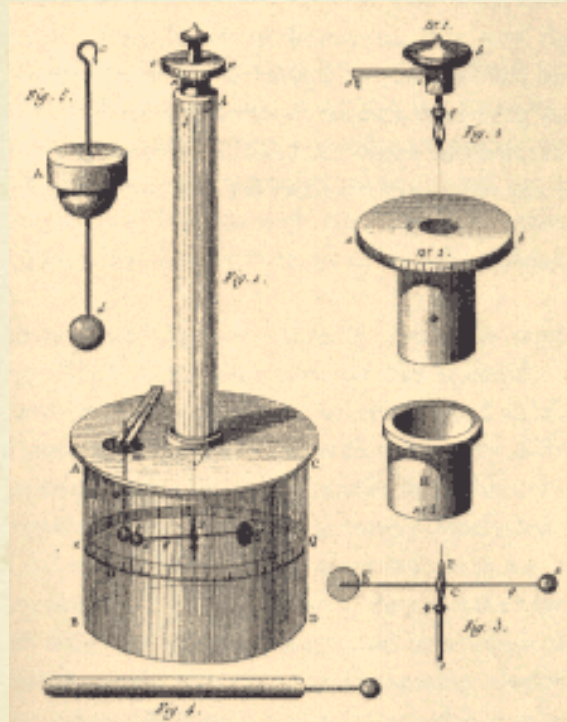


# A Lei de Coulomb e a Força Eléctrica

Charles Coulomb (1736-1806)



Medição da força eléctrica(\*)



(\*) usando uma balança de torsão muito melhorada em relação à usada por Cavendish para a determinação de

$$G_N = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N.kg}^{-2} \text{ m}^2$$

em  $\vec{F} = G_N \frac{mM}{r^2} \vec{e}_M$

Força gravítica entre 2 protões no  $^4\text{He}$ :  $1,86 \times 10^{-34} \text{ N}$  mas força eléctrica  $\Rightarrow 230,4 \text{ N} !$

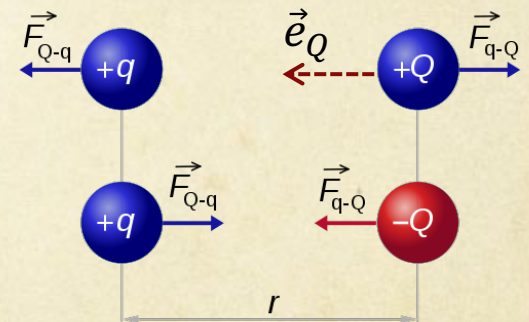
Como é que há núcleos?! (existe uma força nuclear forte  $\approx 60$  x força eléctrica)

$$\vec{F} = k_e \frac{qQ}{r^2} \vec{e}_Q$$

$$k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cong 9 \times 10^9 \text{ m/F}$$

$[Q]_{SI} = \text{C} = \text{Coulomb}$

$$1 \text{ C} = \frac{e}{1,6 \times 10^{-19}}$$



- Cargas com o mesmo sinal repelem-se
- Cargas de sinal contrário atraem-se



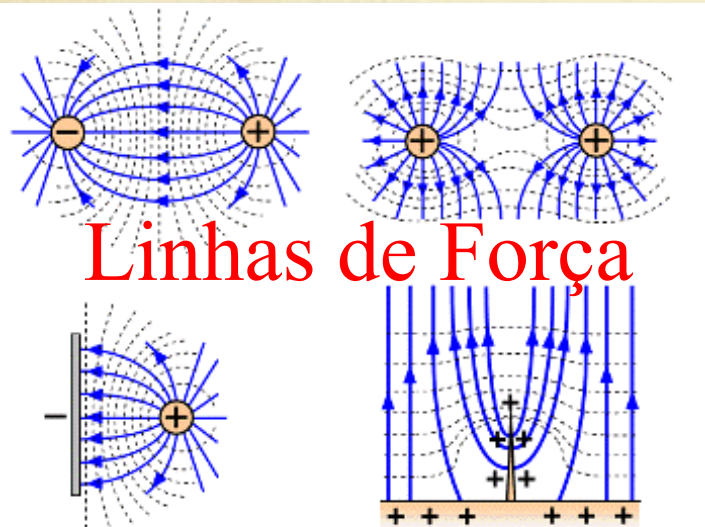
# Campo Eléctrico e Linhas de Força

$$\vec{F} = k_e \frac{qQ}{r^2} \vec{e}_Q \Rightarrow \vec{F} = q k_e \frac{Q}{r^2} \vec{e}_Q = q \vec{E}$$

Campo Eléctrico

$$\vec{E} = k_e \frac{Q}{r^2} \vec{e}_Q$$

- Vector ( $[E]=V/m$ )
- Aditivo  
 $\vec{E}(1,2) = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$



- Linhas tangentes ao Campo Eléctrico
- Nunca se cruzam
- Representam-se mais linhas onde o campo é mais intenso (maior densidade de linhas de força)

ELETROSTÁTICA  $\Rightarrow$  Calcular  $\vec{E}$  para {cargas}

# Campo Eléctrico devido a distribuições de carga(s) eléctrica(s)

- 1 carga pontual  $Q$  na origem  $\vec{E} = k_e \frac{Q}{r^2} \vec{e}_Q$
- {Cargas  $Q_i$  em posições  $r_i$  }  $\vec{E} \equiv \vec{E}(\vec{r}) = k_e \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^2} \vec{e}_i$
- Distribuições de carga (em volume  $\rho$ , em superfície  $\sigma$  ou em linha  $\lambda$  )

$$\vec{E}(\vec{r}) = k_e \iiint_{Vol.} \frac{\rho(\vec{r}')(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dv' \quad \vec{E} = k_e \iint_S \frac{\sigma(\vec{r}')(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} ds'$$

$$\vec{E} = k_e \int_l \frac{\lambda(\vec{r}')(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dl' \quad \text{e ADITIVO!} \Rightarrow \vec{E} \equiv \sum \vec{E}_i$$



# Propriedades do Campo Elétrico (eletrostático)

*Teorema de Helmholtz*

Qualquer campo que tenda para zero no infinito, pode ser determinado unicamente pelo conhecimento da sua divergência e do seu rotacional (e se estes tenderem para zero quando  $r$  tende para infinito mais depressa do que  $1/r^2$ )

$$\text{div } \vec{E} ? \quad \vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iiint \frac{\rho(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2} \vec{e}' dv'$$

$$\text{div } \vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iiint \rho(\vec{r}') \text{div} \frac{\vec{e}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2} dv' \quad \text{mas} \quad \text{div} \frac{\vec{e}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2} = 4\pi\delta^3(\vec{r} - \vec{r}')$$

pelo que

$$\text{div } \vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iiint \rho(\vec{r}') 4\pi\delta^3(\vec{r} - \vec{r}') dv' = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} 4\pi \int \rho(\vec{r}') \delta^3(\vec{r} - \vec{r}') dv' = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\boxed{\text{div } \vec{E} \equiv \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}} \quad \text{e} \quad \text{rot } \vec{E} ? \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = \vec{\nabla} \times \left( \frac{\vec{e}_r}{r^2} \right) = 0 \quad \begin{array}{l} \text{campo} \\ \text{central} \end{array}$$

$$\boxed{\text{rot } \vec{E} \equiv \vec{\nabla} \times \vec{E} = 0} \quad \Leftrightarrow \quad \exists \phi : \boxed{\vec{E} = -\vec{\nabla} \phi} \quad \phi = \text{POTENCIAL ELÉTRICO}$$

$$[\phi] = \text{V (Volt)} \quad V \equiv \phi_2 - \phi_1 = \text{d.d.p.} = \text{TENSÃO}$$