

ELETROMAGNETISMO:

da magia da eletricidade e do magnetismo à descoberta das ondas electromagnéticas



Lucília Brito

Departamento de Física da
Universidade de Coimbra

PARTE I

- ✓ Algumas considerações sobre a evolução da eletricidade e do magnetismo;
- ✓ A interação eletromagnética no quadro das interações fundamentais;
- ✓ A lei de Coulomb: aplicações;
- ✓ O campo elétrico criado por diversas distribuições de cargas;
- ✓ Linhas do campo elétrico; lei de Gauss;
- ✓ Energia potencial eletrostática; relação entre campo elétrico e potencial elétrico;
- ✓ Condensadores e dielétricos.

No Princípio foi assim...

- ★ Muito espanto, algum temor, muito mistério, muita magia:

“Os deuses estão em todas as coisas, magnetes e âmbar ambos têm uma alma que lhes confere o poder de atraírem as coisas”

Thales de Mileto, no ano 600 a. C.

“Foi de casa em casa a arrastar dois lingotes metálicos, e toda a gente ficou espantada ao ver como as caldeiras, os tachos, as tenazes e os fogareiros caíam dos seus lugares ... e até os objectos perdidos há muito tempo apareciam por onde mais se procurara e arrastavam-se em debandada turbulenta atrás dos ferros mágicos de Melquíades. *“As coisas têm vida própria”*, apregoava o cigano com sotaque áspero, *“é tudo uma questão de lhes acordar a alma”*

Cem anos de solidão, G. Garcia Marquez

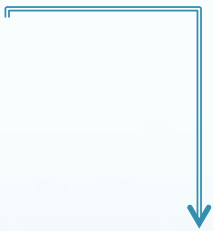
No Princípio foi assim...

- ★ A observação das trovoadas e o desejo de poder armazenar aquela força (?), aquela energia (?), aquele fluido (?) que destruía casas e árvores e poder “domesticá-lo” para usar quando e como fosse útil!
- ★ A observação dos fogos de santelmo (Sant’ Elmo) nos mastros das embarcações e nos extremos das lanças dos soldados, vistos como mensagens de bom augúrio por parte dos deuses...
- ★ A utilização de pedras-guia pelos chineses nos seus longos percursos por terra e por mar → invenção da bússola no século XII.

É preciso “tomar notas” sobre as coisas que já sabemos

- 1600 → William Gilbert reuniu na obra *De Magnete* os relatos das experiências e das observações sobre os fenómenos elétricos e sobre os fenómenos magnéticos
 - Introduziu o termo elétrico para caracterizar materiais que se comportavam como o âmbar (elektron);
 - Sugeriu uma explicação para o comportamento das agulhas magnéticas usadas na orientação pelos viajantes;
 - Deixou-nos a designações de Pólo Norte e Pólo Sul magnéticos...

Ao longo do século XVIII

- ✓ 1746 Peter Musschenbroek: armazenou pela 1ª vez energia elétrica numa garrafa: a garrafa de Leiden foi o 1º condensador;
 - ✓ 1760 Benjamin Franklin instalou o 1º pára-raios na casa de um comerciante de Filadélfia;
 - ✓ 1767 Joseph Priestley
 - ✓ 1771 Henri Cavendish
 - ✓ 1785 Charles Coulomb
- 

Estudos quantitativos sobre os efeitos entre corpos carregados: **a lei de Coulomb.**

Esperem para ver: vem aí o século XIX ...

- ✓ 1800 Alessandro Volta inventou a pilha;
- ✓ 1813 Humphry Davy inventou a lâmpada de arco;
- ✓ 1820 Hans C. Oersted observou o efeito de uma corrente elétrica sobre uma agulha magnética;
- ✓ 1820 $\longleftrightarrow$ 1830

Jean B. Biot e Félix Savart

Andre-Marie Ampère

Dominique Arago

Pierre S. Laplace

Estudaram os campos magnéticos criados por circuitos com diversas geometrias; lei de Biot e Savart; lei de Ampère, etc.

E ainda não terminou!

- ✓ **1831** Michael Faraday e H. Lenz descobriram a indução eletromagnética; Joseph Henry ficou (quase) esquecido...
- ✓ **1865** James Maxwell estabeleceu as equações do campo eletromagnético; unificou o eletromagnetismo com a ótica.
- ✓ **1887** Heinrich Hertz produziu e detetou ondas eletromagnéticas (ondas hertzianas...)



Ah! Ah! Ah! Então só
agora é que me
descobriram?!
Chamo-me elétron e
estou metido em tudo
isto desde o princípio ...

1897 J. J. Thomson
determinou a razão e/m :
identificou o elétron

1909 Robert Millikan
determinou o valor da carga
do elétron (carga elementar)

A interação eletromagnética no quadro das interações fundamentais

Interação 	gravitacional	eletromagnética	forte	fraca
intensidade	muito pequena 10^{-40}	pequena 10^{-3}	grande 10	pequena 10^{-5}
alcance	longo infinito (∞)	longo infinito (∞)	curto $\leq 10^{-13}\text{cm}$	curto $\leq 10^{-18}\text{cm}$


importante ao nível de
objectos de grande
massa


importante ao nível
da Física Atômica e
Molecular


importantes ao nível dos
núcleos atômicos

Mais... sobre as interações fundamentais

- ★ Gravitacional experimentada por partículas com **massa**; mediada pelo **gravitão**...
- ★ Eletromagnética experimentada pelas partículas com **carga elétrica**; mediada pelo **fotão**.
- ★ Fraca experimentada pelas partículas que têm **sabor** (quarks e léptões); mediada pelos **bosões W^+ W^- e Z^0** (fracões).
- ★ Forte experimentada pelas partículas que têm **cor** (quarks); mediada pelos **gluões**.

A unificação das interações fundamentais: como? quando?

Gravidade
terrestre

Gravidade
astronómica

Interação
gravitacional

Eletricidade

Magnetismo

Interação
eletromagnética

Interação fraca

Interação
eletrofraca

Interação forte

Grande
interação
unificada-GUT

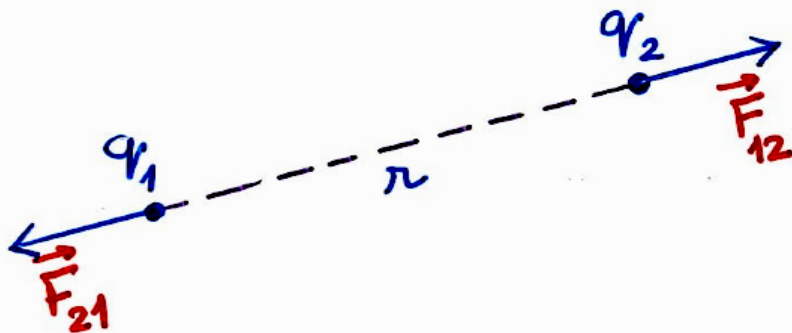


A lei de Coulomb: interação entre duas cargas pontuais

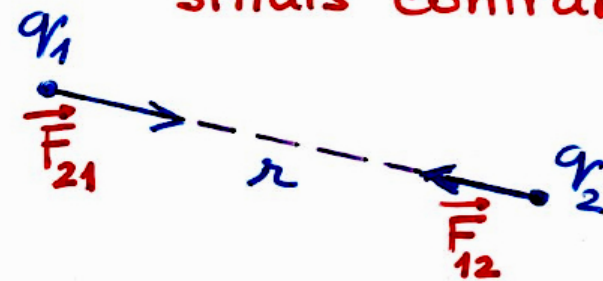
a lei de Coulomb

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

q_1 e q_2
do mesmo sinal



q_1 e q_2 de
sinais contrários

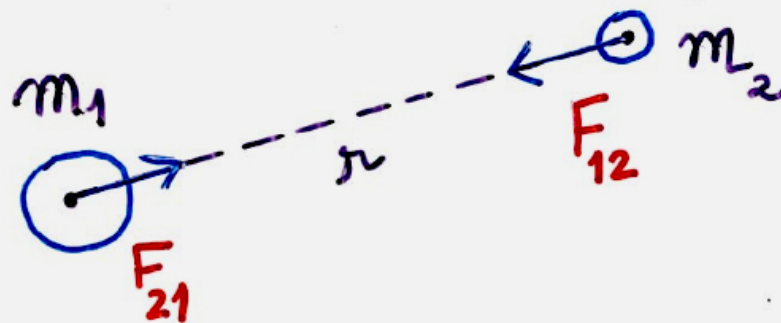


A lei de gravitação universal

e a lei de atracção entre duas massas

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

força sempre
atractiva



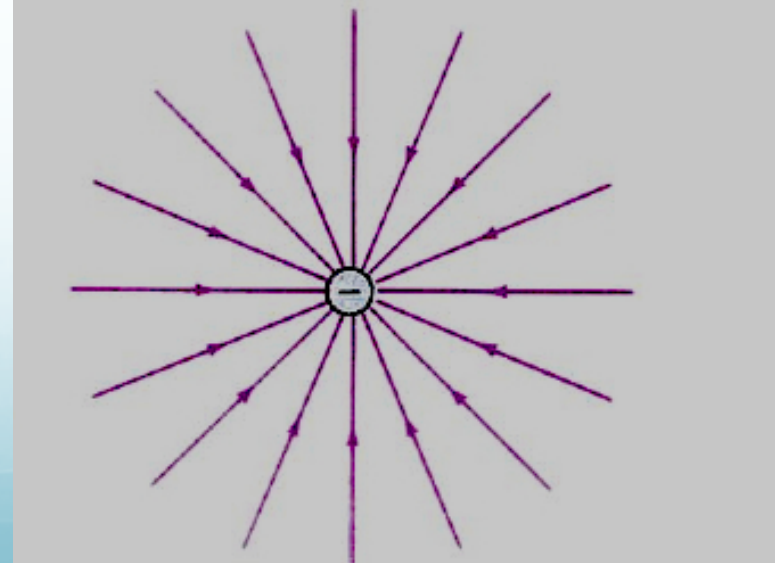
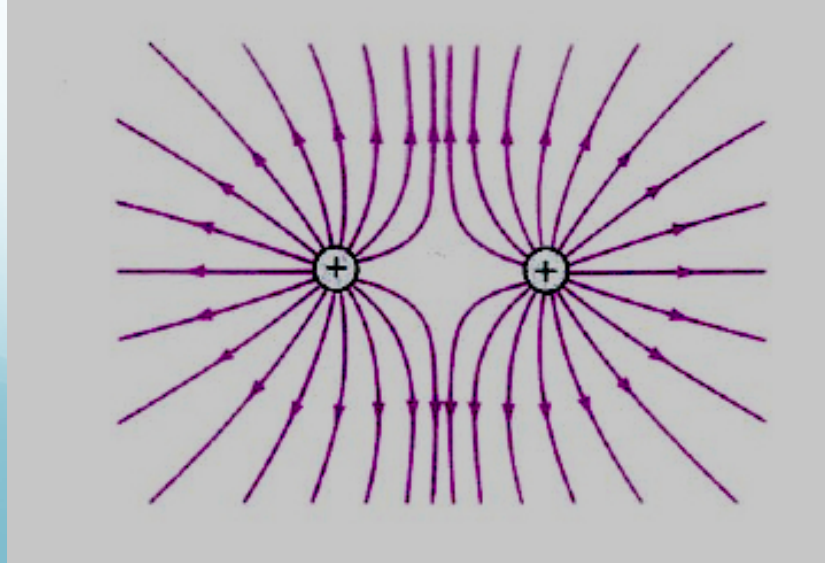
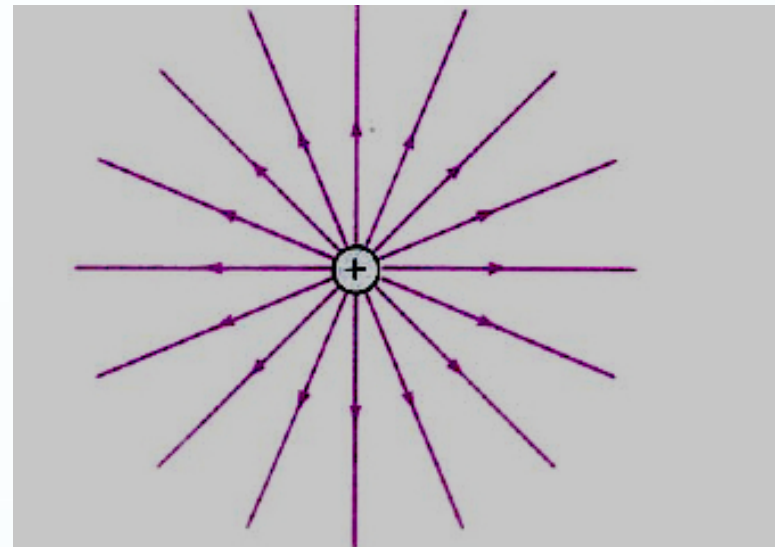
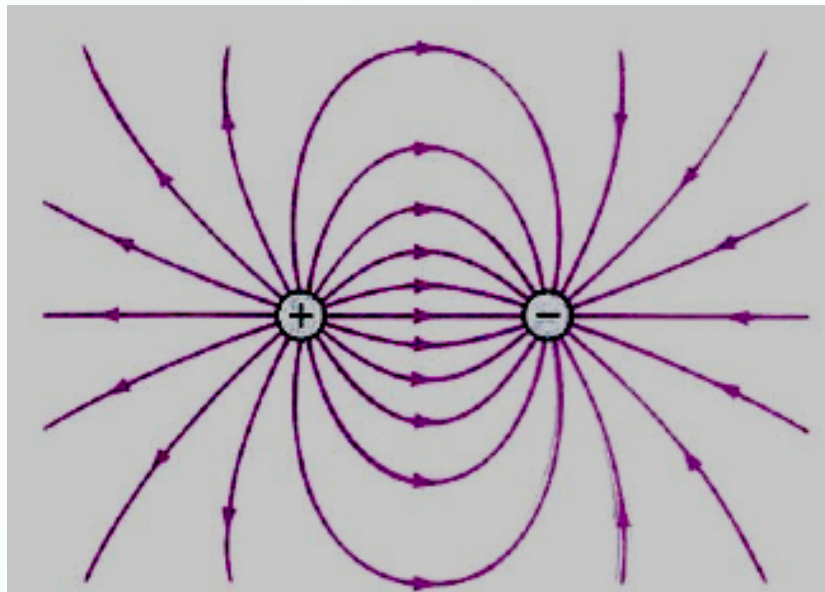
O problema das interações à distância...

✓ Como “sabem” as cargas que devem atrair-se ou repelir-se?

- Já Newton manifestava grande desconforto em aceitar as interações à distância sem nenhum tipo de mediação;
- Uma tentativa de explicar estas ações tinha sido sugerida por William Gilbert: teoria dos eflúvios e das atmosferas através da qual se manifestariam as interações;
- Com Descartes o espaço era preenchido pelo controverso éter: as perturbações introduzidas pelos corpos carregados seriam levadas através do éter até aos outros corpos;

No início do séc. XIX, Faraday introduziu o conceito de **campo** para descrever a região de influência de uma determinada fonte: carga, massa, etc.

Linhas do campo elétrico



O campo de uma carga pontual

- ✓ Quando uma carga pontual está na vizinhança de outros objectos carregados, experimenta a força

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

- ✓ Se o único objecto carregado “por perto” for outra carga pontual

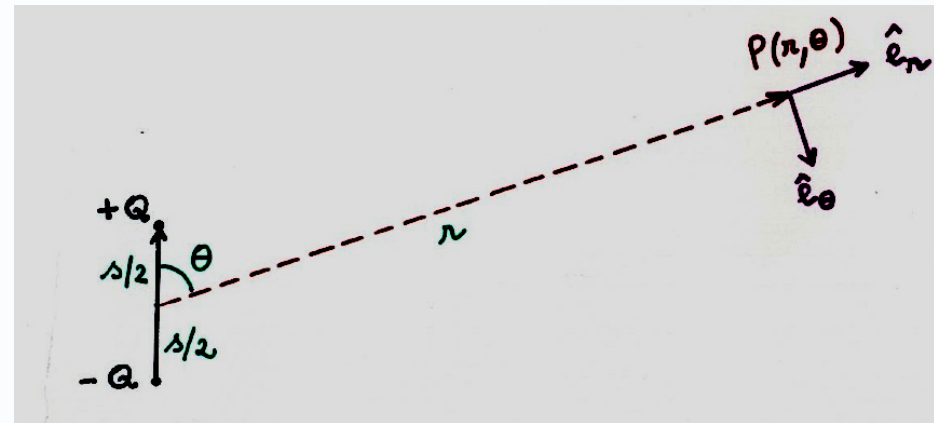
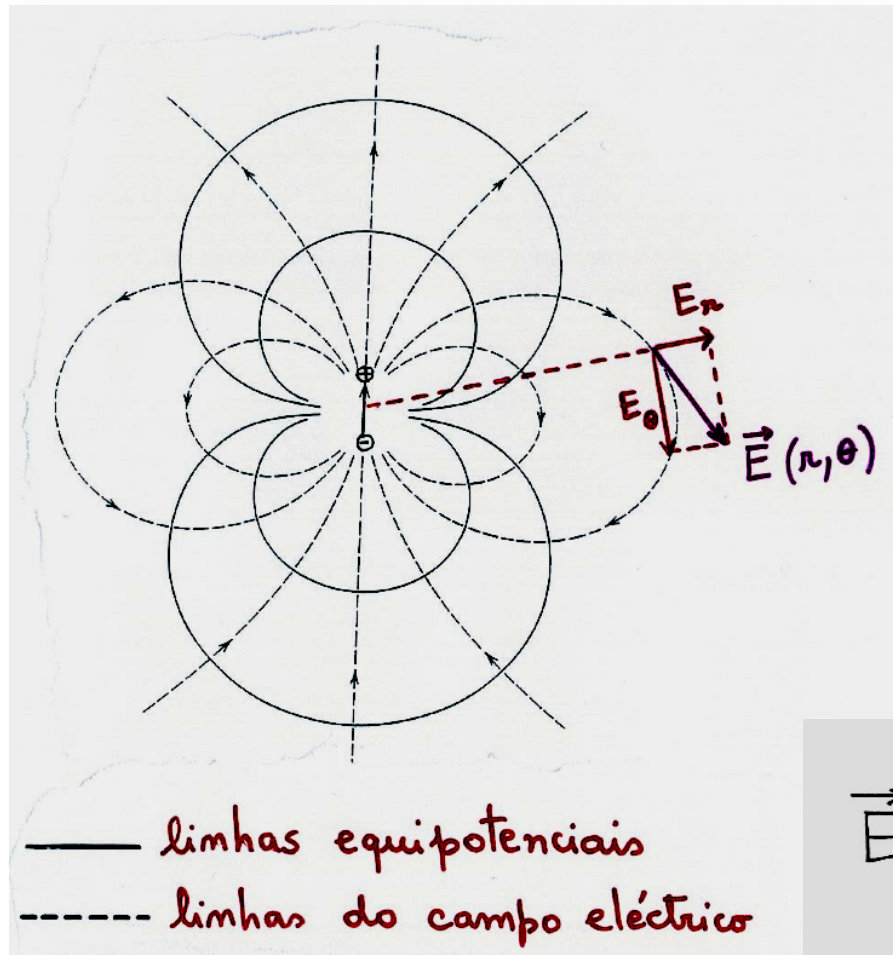
$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q q_0}{r^2} \hat{e}_r$$

- ✓ Assim, o campo criado por uma carga pontual tem a expressão

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{e}_r$$

Diversas distribuições de cargas... diferentes expressões para o campo eléctrico...

Campo de um dipolo eléctrico

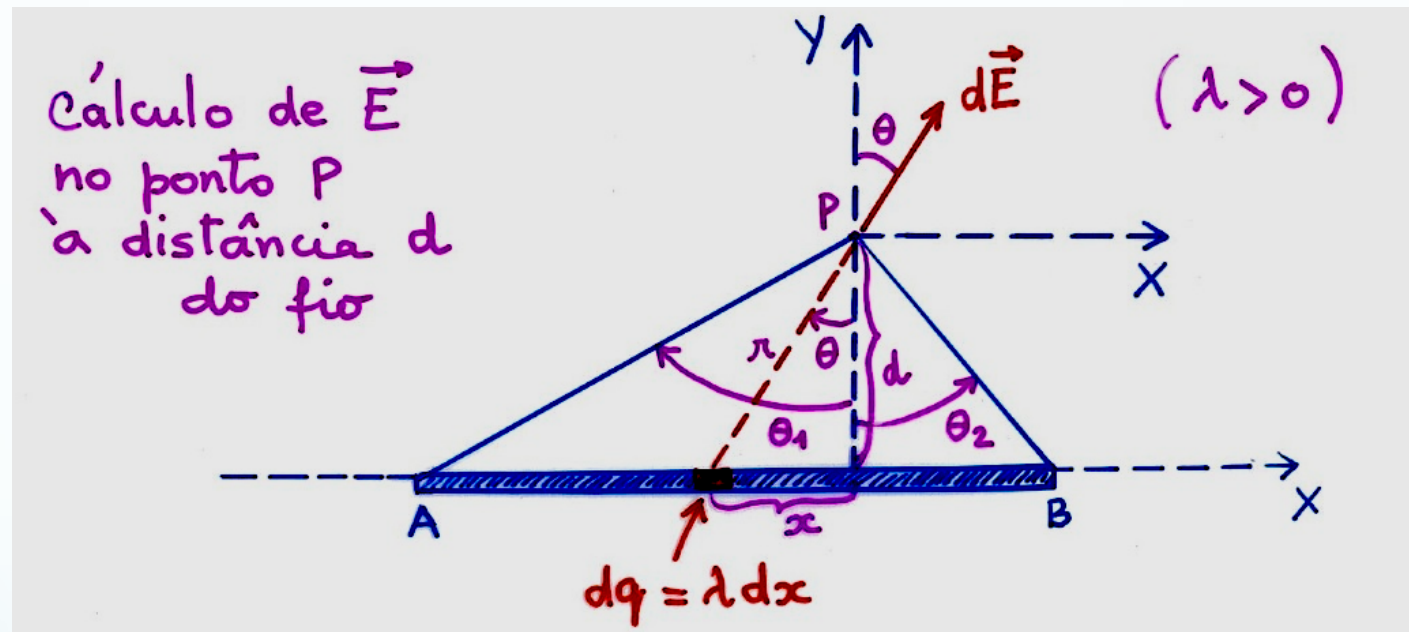


Campo eléctrico criado no ponto $P(r, \theta)$

$$\vec{E}(r, \theta) = \frac{p}{4\pi\epsilon_0 r^3} (2 \cos \theta \hat{e}_r + \sin \theta \hat{e}_\theta)$$

A lei de Coulomb e o princípio de sobreposição

✓ sempre possível, mas pode ser trabalhoso ...

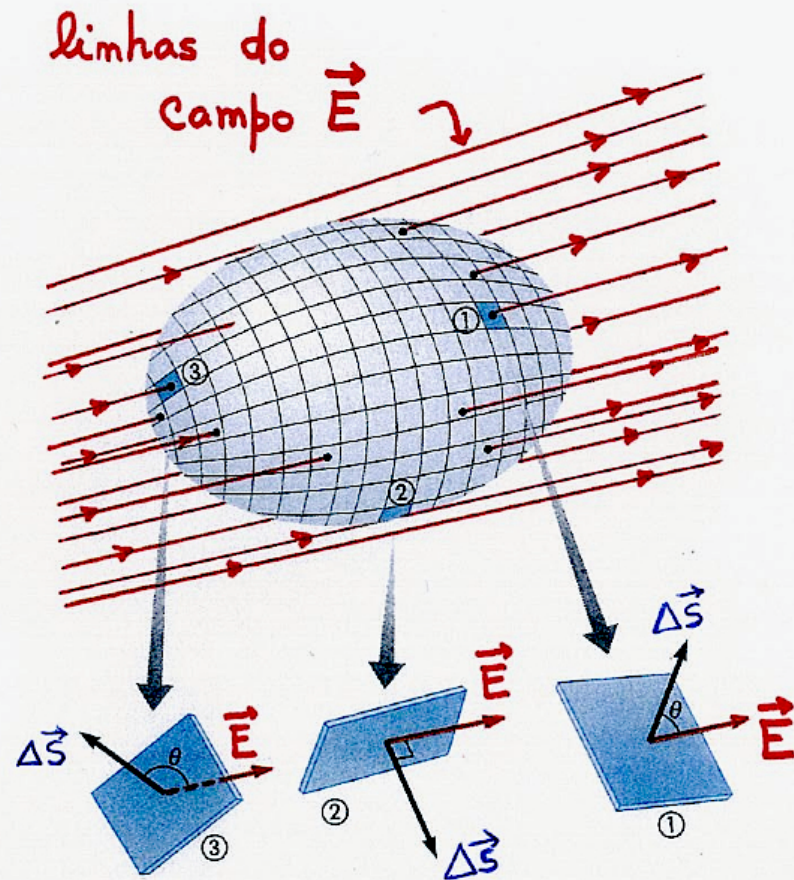


$$\begin{cases} E_x = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 d} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \\ E_y = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 d} (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \end{cases}$$

Linha muito longa (linha "infinita")

$$\begin{aligned} \theta_1 &\rightarrow -\frac{\pi}{2} \\ \theta_2 &\rightarrow \frac{\pi}{2} \end{aligned} \rightarrow \begin{cases} E_x = 0 \\ E_y = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{d} \end{cases}$$

Fluxo do campo elétrico



Superfície fechada
numa região onde
existe um campo
elétrico $\vec{E}$

A superfície está
dividida em pequenas
regiões de área ΔS

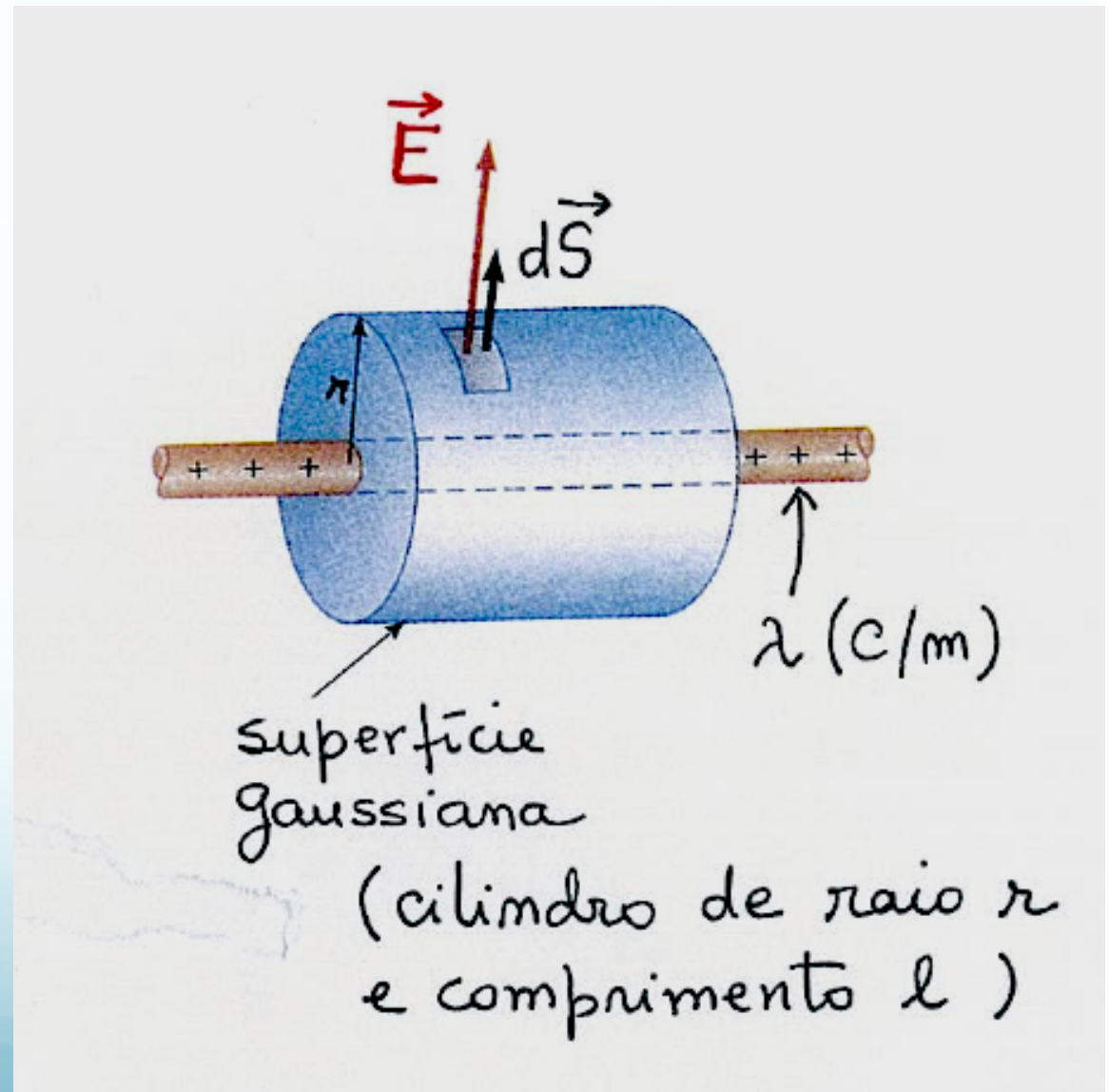
O fluxo através
da área ΔS é

$$\Delta\phi = \vec{E} \cdot \hat{n} \Delta S = \vec{E} \cdot \Delta \vec{S}$$

$\Delta\phi$ pode ser positivo (em ①)
nulo (em ②)
ou negativo (em ③)

Linha carregada com a densidade uniforme de carga λ

Vamos calcular o fluxo do campo elétrico que sai através da superfície fechada!

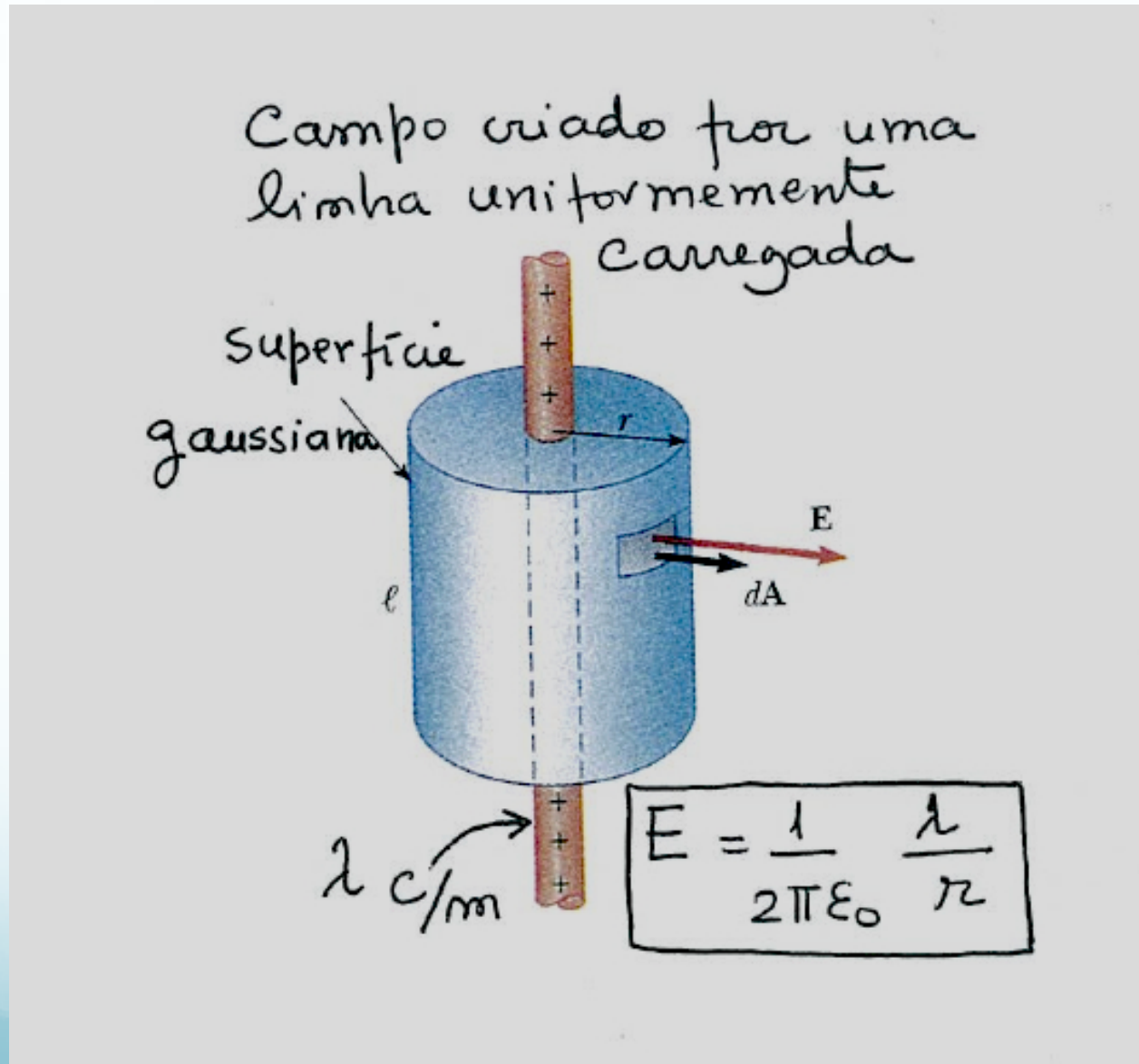


A lei de Gauss para o campo elétrico

- ✓ A simetria da distribuição de cargas permite esboçar as linhas do campo;
- ✓ O fluxo do campo elétrico que atravessa uma superfície fechada deve ser proporcional à quantidade de carga que está no interior dessa superfície.

$$\Phi_E = \oint_S \vec{E} \cdot \hat{n} \, dS = \frac{q_{\text{int}}}{\epsilon_0}$$

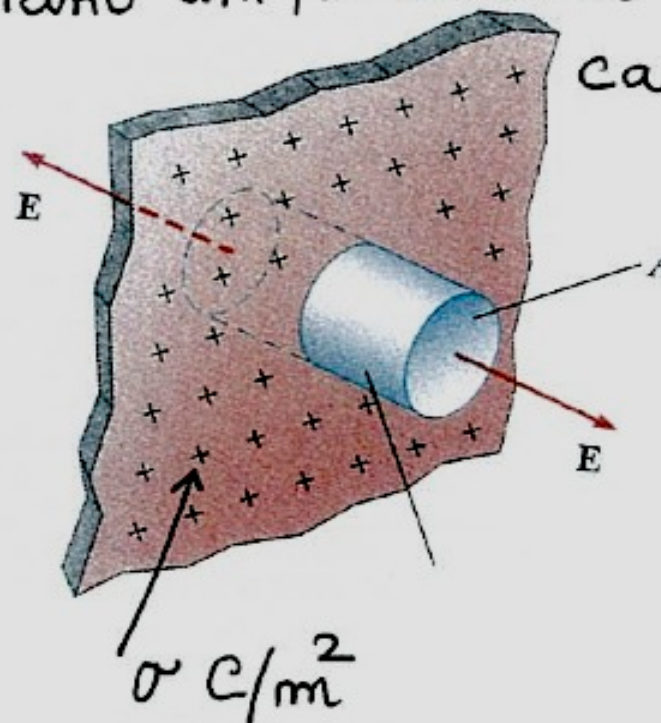
Linha carregada com a densidade uniforme de carga λ



Plano carregado com densidade uniforme de carga σ

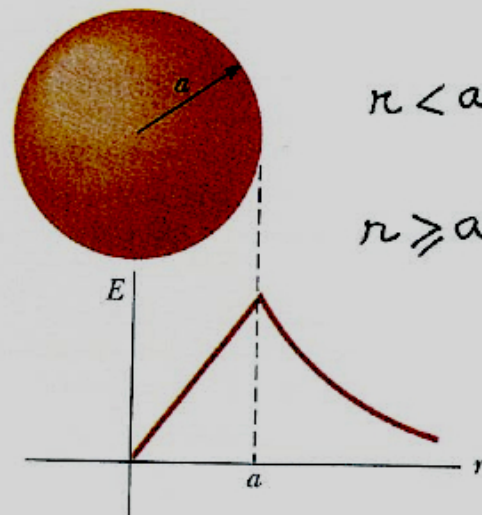
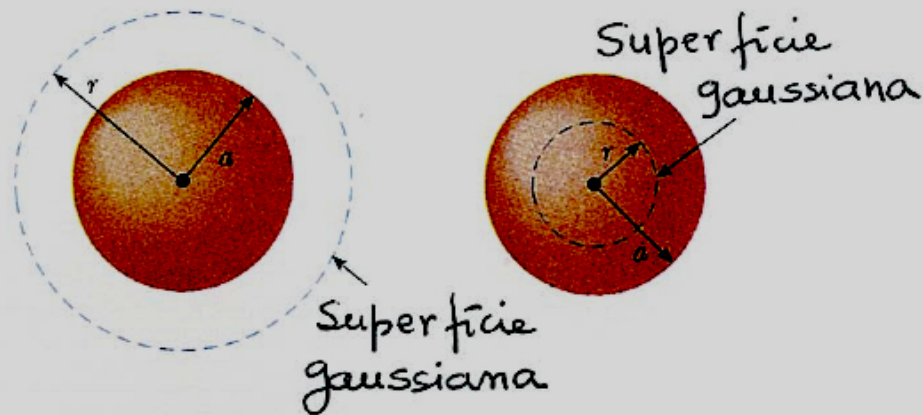
Exemplo de
um campo uniforme
em pontos próximos
do plano

Campo criado por um
plano uniformemente
carregado



$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

Esfera isoladora com densidade de carga uniforme ρ



$$r < a : E = k \frac{Q}{a^3} r$$

$$r \geq a : E = k \frac{Q}{r^2}$$

Distribuições de cargas e campos...

➔ Campo criado por uma esfera condutora

- no interior da esfera, $r < a \implies \vec{E} = 0$
- no exterior da esfera, $r > a \implies \vec{E} = k \frac{Q}{r^2} \hat{e}_r$

➔ Campo criado por uma esfera isoladora

- no interior da esfera, $r < a \implies \vec{E} = k \frac{Qr}{a^3} \hat{e}_r$
- no exterior da esfera, $r \geq a \implies \vec{E} = k \frac{Q}{r^2} \hat{e}_r$

Energia potencial eletrostática entre cargas pontuais

- ✓ É necessário realizar trabalho para colocar duas cargas pontuais à distância r uma da outra

$$U_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q q_0}{r}$$

$$U_p(r_A) - U_p(r_B) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q q_0}{r_A} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q q_0}{r_B}$$

$$U_p(r_A) - U_p(r_B) = q_0 \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r_A} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r_B} \right) = q_0 (V_A - V_B)$$

Potencial elétrico criado por diversas distribuições de cargas

→ Carga pontual q

$$V(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$$

→ Esfera carregada com a carga Q , num ponto exterior à esfera

$$V(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$$

→ Linha infinita com a densidade linear de carga λ

$$V(r) = -\frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln r + C$$

→ Placa infinita com a densidade superficial de carga σ

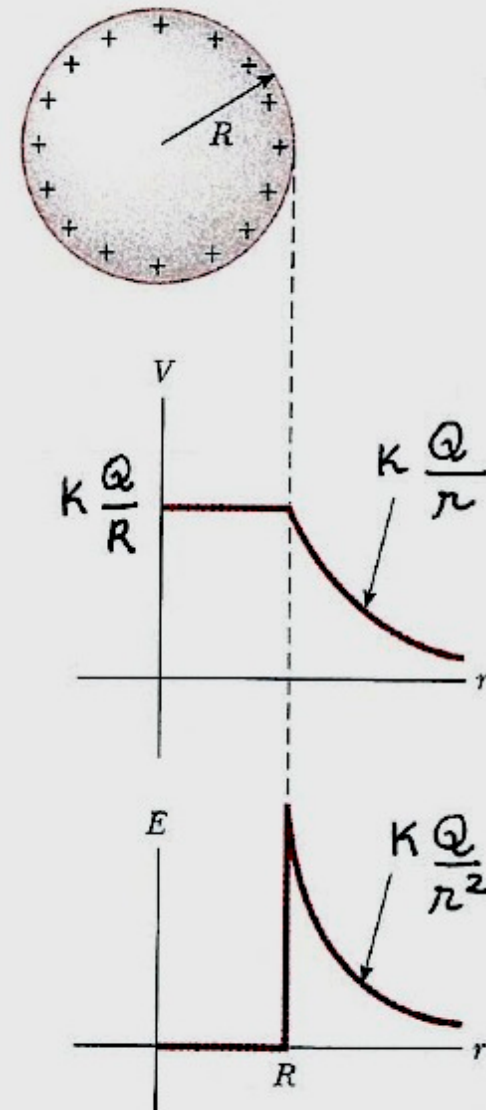
$$V(z) = -\frac{\sigma}{2\epsilon_0} z + C$$

Esfera condutora carregada com a carga Q

- O campo elétrico é nulo em todos os pontos de um condutor em equilíbrio;
- A carga distribui-se na superfície do condutor;
- O condutor é uma região de potencial constante.

$$V(r \leq R) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R} = \frac{\sigma R}{\epsilon_0}$$

$$\vec{E}(r = R_+) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R^2} \hat{e}_r = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \hat{e}_r$$

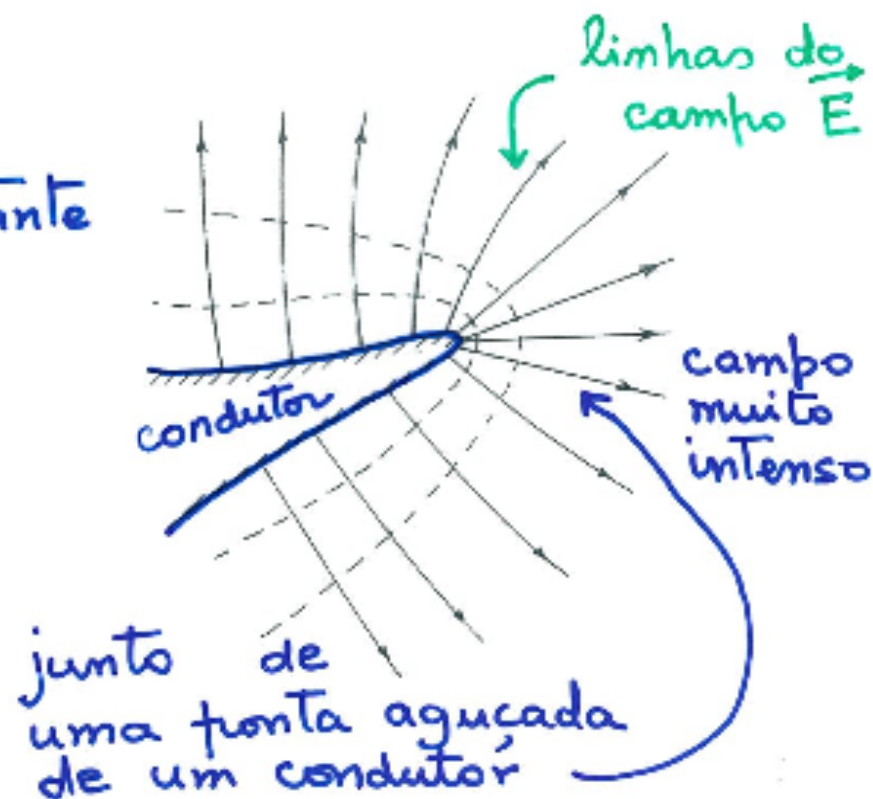
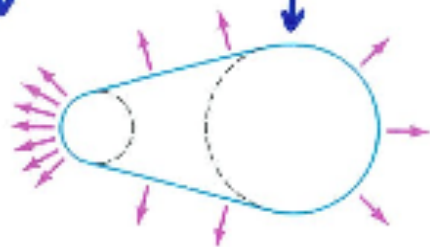


O poder das “pontas”

pequeno raio de curvatura $\Rightarrow$ elevado valor de σ

Campo eléctrico elevado $(E = \frac{\sigma}{\epsilon_0})$

condutor
(potencial constante
em todo o condutor)



Condensadores e dielétricos

- ★ Condensador: sistema de dois condutores que armazena carga; para carregar o condensador é necessário fornecer energia às cargas → o condensador é um reservatório de energia.

- ★ Capacidade de um condensador:
$$C = \frac{Q}{V_1 - V_2} = \frac{Q}{V}$$

- ★ A capacidade de um condensador depende da geometria e das dimensões do condensador e do material que existe entre os condutores (material isolador ou dielétrico).

- ★ Quanto maior for a permissividade relativa do dielétrico ϵ_r (também chamada constante dielétrica k_e no caso estático), maior é a capacidade do condensador.

$$C' = \frac{Q}{V'} = \epsilon_r C$$

$$C' = \frac{Q'}{V} = \epsilon_r C$$

Energia armazenada num condensador

→ O que significa aumentar a capacidade de um condensador?

★ Condensador isolado:

Q mantém-se, mas o campo elétrico diminui.

★ Condensador inserido num circuito fechado:

O campo elétrico mantém-se, mas o condensador armazena mais carga.

Material	Constante dieléctrica ↳ K	Campo de ruptura dieléctrica (V/m) ↙
Vacuum	1.0000	
Air (1 atm)	1.0006	3×10^6
Paraffin	2.2	10×10^6
Polystyrene	2.6	24×10^6
Rubber, neoprene	6.7	12×10^6
Vinyl (plastic)	2-4	50×10^6
Paper	3.7	15×10^6
Quartz	4.3	8×10^6
Oil	4	12×10^6
Glass, Pyrex	5	14×10^6
Porcelain	6-8	5×10^6
Mica	7	150×10^6
Water (liquid)	80	
Strontium titanate	300	8×10^6