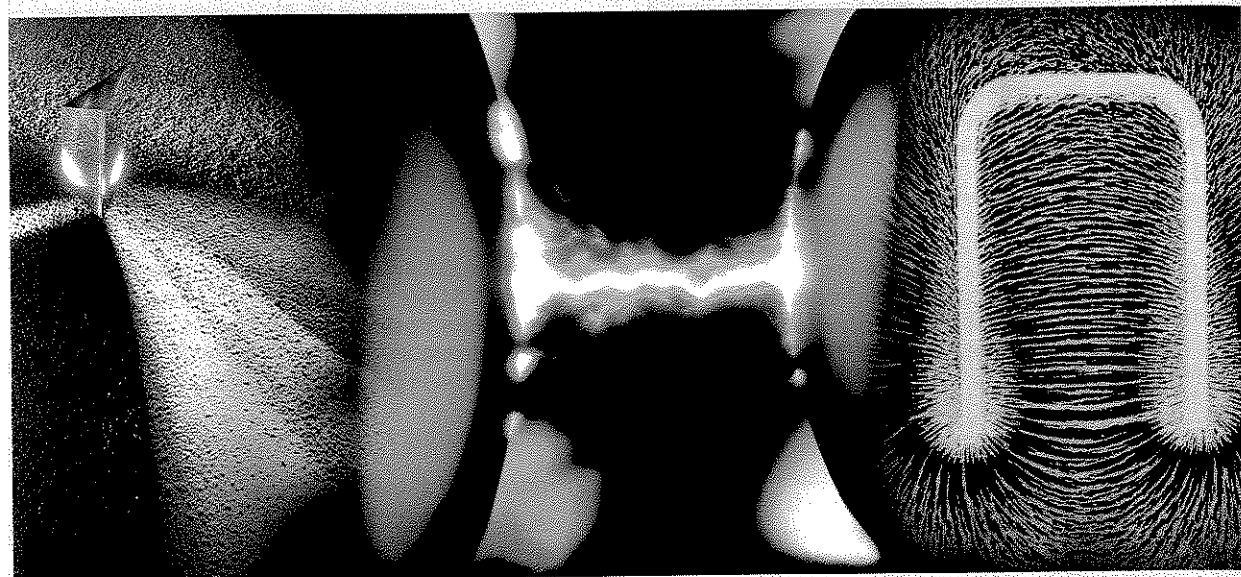


Electromagnetismo



A luz, fundamental para a posibilidade de vida na Terra e o medio que nos permite relacionarnos co noso contorno, foi, segundo a *Biblia*, a primeira obra da Creación: «Fágase a luz e a luz fíxose.».

Os filósofos gregos **Heráclito** e **Empédocles** e, posteriormente, **Platón** (427-347 a. C.) e **Aristóteles** (384-322 a. C.), xa formularon as súas teorías, máis filosóficas ca científicas, acerca da natureza da luz e da visión. Para Platón, por exemplo, a luz estaba constituída por un chorro de diminutas partículas e as cores que percibimos debíanse á súa diferenza de tamaño e de velocidade.

Que os raios procedentes dos nosos ollos se moven con velocidade infinita pódese inferir da seguinte consideración. Cando despois de ter pechado os ollos os abrimos e miramos ó ceo, non se necesita ningún intervalo de tempo para que os raios visuais alcancen o ceo. En efecto, vemos as estrelas tan pronto como as miramos, aínda que podemos dicir que a distancia é infinita.

Herón, en *Catóptrica*

Os primeiros libros dedicados á luz foron escritos polos científicos ale-

xandrinos **Euclides**, **Ptolomeo** e **Herón de Alexandría**, entre o s. III a. C. e o I da nosa era. Estes crían que os ollos emiten raios visuais que se propagan a gran velocidade e en liña recta e que son reflectidos polos obxectos que vemos. Ptolomeo dedicou a súa atención ós fenómenos de reflexión e refracción e á dedución das súas leis, no seu libro *Óptica*.

Merece destacarse o físico árabe **Ibn Al-Haytham (Alhazen)** (965-1039), que exerceu enorme influencia ata o século XVII. Sostíña que a luz procede do Sol ou doutra fonte luminosa, reflicte nos obxectos iluminados e deles chega ós nosos ollos. Describiu detalladamente o órgano da vista, estudiou a reflexión e a refracción e experimentou con lentes e espellos. Tras el, houbo que esperar seis séculos para que se producisen novos avances en óptica.

O astrónomo alemán **J. Kepler** (1571-1630) explicou en 1604 o fenómeno da visión e o funcionamento do telescopio, inaugurando a chamada *óptica xeométrica*, á que tamén dedicaron a súa atención o astrónomo e físico italiano **Galileo Galilei** (1564-1642), o matemático holandés **W. Shell** (1591-1626), o matemático francés **P. de Fermat** (1601-1665), o físico e astrónomo

holandés **Ch. Huygens** (1629-1695) e outros. Moitos dos físicos da época ocuparon o seu tempo na construción de instrumentos ópticos.

Pero ¿cal é a natureza íntima da luz?, ¿en que consiste esta? A resposta a estas preguntas supuxo unha das controversias máis interesantes e duradeiras da historia da ciencia.

En 1704, **I. Newton** (1642-1727) publicou a súa obra *Óptica*. Nela defendía a natureza corpuscular da luz baseándose nas súas propias experimentacións, aínda que participou nunha aceda controversia cos seus coetáneos o físico inglés **R. Hooke** (1635-1703) e **Ch. Huygens**, que provocou, ó parecer, serias dúbidas en Newton sobre a súa propia teoría.

En efecto, Ch. Huygens no seu *Traado da luz* propuxera en 1690 que esta era de natureza ondulatoria. Pero, se a luz fose unha onda, debería rodear as esquinas dos obstáculos, como fai o son. ¿Por que non vemos os obxectos situados detrás dun obstáculo?

Hoxe en día sábese que a luz *rodea* os obxectos aínda que é difícil de observar debido á súa pequena lonxitude de onda. Os experimentos do médico e físico inglés **T. Young**

(1773-1829) en 1801 e do físico francés **A. J. Fresnel** (1788-1827) en 1815 sobre as interferencias e a difracción amosaron claramente a natureza ondulatoria da luz. A teoría corpuscular quedaba en cuestión.

O matemático e físico escocés **J. C. Maxwell** (1831-1879) propuxo en 1864 que a luz é unha forma de onda electromagnética de alta frecuencia. Este feito foi comprobado experimentalmente polo físico alemán **H. Hertz** (1857-1894) en 1887.

A teoría de Maxwell, perfectamente estruturada, parecía ser definitiva ata que en 1905 o físico **A. Einstein** (1879-1955), para interpretar o efecto fotoeléctrico, acudiu de novo á teoría corpuscular: a luz está constituída por corpúsculos de enerxía, os fotóns.

Hoxe é aceptado que a luz ten unha dobre natureza con manifestacións nun ou noutro sentido dependendo dos fenómenos analizados. O que non deixa de ser para a nosa mente algo paradoxal e misterioso.

O desenvolvemento das aplicacións prácticas do *Electromagnetismo*, do que obtemos moitas vantaxes, foi espectacular no século XX.

O filósofo grego **Tales de Mileto** (640-546 a. C.) foi o primeiro en estudar o magnetismo e a electricidade. Dise que observou que un anaco de resina fósil, o ámbar, ó que entón se chamaba *elektron*, era capaz de atraer obxectos lixeiros.

Pero houbo que esperar moito tempo para que alguén tomase con interese científico este fenómeno. O físico e médico inglés **W. Gilbert** (1544-1603), contemporáneo de Galileo, publicou un libro titulado *De magnete* no que describía o comportamento de distintos obxectos refregados e interpretaba o movemento das agullas imantadas ó supoñer por primeira vez que a Terra é un xigantesco imán.

O físico francés **Ch. du Fay** (1698-1739) observou as atraccións e as repulsións que se producen entre corpos refregados segundo a súa natureza, de onde deduciu a exis-

tencia de dúas clases de *electricidade*, nome dado por Gilbert, ás que chamou *resinosa* e *vítrea*.

En 1729 o investigador inglés **S. Gray** (1696-1736) observou a condución da electricidade, da cal se descoñecía a súa natureza, a través dalgunhas substancias, aínda que non todas permitían o paso da mesma. O físico francés **J. T. Desaguliers** (1683-1744) propuxo os nomes de *conductores* e *illantes* para designar as substancias que permiten ou impiden, respectivamente, o paso da electricidade.

O científico norteamericano **B. Franklin** (1706-1790) describiu a electricidade como un fluído con formas de manifestación debidas ou ó exceso ou ó defecto do mesmo. Deste xeito resultan os corpos con carga positiva ou negativa, respectivamente, segundo a nomenclatura proposta por el mesmo. Franklin demostrou que as nubes tormentosas están cargadas de electricidade mediante o seu célebre e perigoso experimento de lanzar, aproveitando unha forte tormenta, un papaventos cunha punta metálica conectada a un fío de seda. Franklin completou a súa investigación cun invento de suma utilidade: o pararraios.

En 1785 o físico francés **Ch. de Coulomb** (1736-1806) ideou a balanza de torsión para medir forzas eléctricas de moi pequena intensidade, o que lle permitiu enunciarse a célebre lei de Coulomb.

O século XIX iniciouse cun invento espectacular: a pila de Volta. En 1800 o físico italiano **A. Volta** (1745-1827) xeraba por primeira vez unha corrente eléctrica mediante as reaccións químicas producidas entre dous metais, prata e cinc, en contacto cunha disolución salina.

O ano 1820 é outra data importante na historia da ciencia: o físico danés **H. Ch. Oersted** (1777-1851) descubriu a íntima conexión existente entre electricidade e magnetismo ó revelar que unha corrente eléctrica é capaz de producir a desviación da agulla imantada dun compás. ¡Nació o electromagnetismo!

Oersted enviou as súas observacións á revista francesa *Annales de Chimie et de Physique*, que as publicou con esta nota dos editores:

Os lectores (...) débense ter dado conta de que non apoiamos demasiado apresuradamente os anuncios de descubrimentos extraordinarios (...). Pero en relación co artigo do señor Oersted, os resultados por el obtidos, por singulares que parezan, están acompañados de demasiados detalles como para que se poida suscitar a menor sospeita de erro.

O achado atraeu moitos científicos que profundaron na súa natureza, como o matemático e físico francés **A. M. Ampère** (1775-1836).

O físico e químico inglés **M. Faraday** (1791-1867) efectuou un experimento de enorme influencia polas súas importantes aplicacións. Nel descubriu a inducción electromagnética, base dos xeradores eléctricos. Faraday probou que, ó mover un imán no interior dunha bobina de arame, xérase nela unha corrente eléctrica. A el debemos os conceptos de *campo* e *liñas de forza*, que romperon coa visión mecánica do Universo de Newton.

O físico norteamericano **J. Henry** (1797-1878) tamén destacou no estudo do electromagnetismo. Descubriu a inducción ó mesmo tempo ca Faraday e fabricou electroimáns, motores eléctricos e outros aparellos.

Pero a formulación matemática do electromagnetismo correspondeulle ó maior físico teórico do século XIX, **J. C. Maxwell**. Maxwell partiu das ideas de Faraday acerca das liñas de forza e profundou en que os efectos eléctricos e magnéticos son resultado dos campos creados por conductores e imáns. A súa extraordinaria habilidade matemática permitiulle formular definitivamente a natureza e propiedades do electromagnetismo nas ecuacións que levan o seu nome e que representan un vínculo definitivo entre o campo eléctrico e o magnético.

Fíxate

Para simplificar fórmulas posteriores, a constante K adóitase escribir na forma:

$$K = \frac{1}{4 \pi \epsilon} \quad \epsilon = \text{constante dieléctrica ou permitividade}$$

A constante dieléctrica do baleiro denótase por ϵ_0 e o seu valor é:

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

Para outros medios materiais acostúmase expresar:

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad \epsilon_r = \text{constante dieléctrica relativa}$$

A constante ϵ_r é unha magnitude sen dimensións característica de cada medio. Canto maior é ϵ_r (e polo tanto menor é K), máis débiles son as interaccións electrostáticas. No baleiro $\epsilon_r = 1$.

Substancia	ϵ_r
Auga	80
Aire	1
Madeira	2-8
Porcelana	6-8
Vidro	4-10
Xofre	4

Constantes dieléctricas relativas dalgunhas substancias a 20 °C.

Fíxate

Nas aplicacións da lei de Coulomb podemos considerar que son cargas puntuais todos aqueles corpos cargados con tamaños moi pequenos comparados coas distancias que os separan.

1.2. Lei de Coulomb

En 1785, Charles Augustin de Coulomb enunciou a lei que expresa o valor da forza que se exercen mutuamente dúas cargas eléctricas:

A **forza de atracción ou repulsión entre dúas cargas eléctricas puntuais é directamente proporcional ó produto das cargas e inversamente proporcional ó cadrado da distancia que as separa.**



$$\vec{F}_{21} = K \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \vec{u}_2$$
$$\vec{F}_{12} = K \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \vec{u}_1$$

$\vec{F}_{12}$ = forza exercida por Q_1 sobre Q_2 .

$\vec{F}_{21}$ = forza exercida por Q_2 sobre Q_1 .

K = constante de proporcionalidade cun valor que depende do medio. No baleiro e no aire é igual a $9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$.

Q_1 e Q_2 = cargas eléctricas.

r = distancia entre as cargas.

$\vec{u}_1$ = vector unitario na dirección da recta de unión das cargas e sentido de Q_1 a Q_2 .

$\vec{u}_2$ = vector unitario na dirección da recta de unión das cargas e sentido de Q_2 a Q_1 .

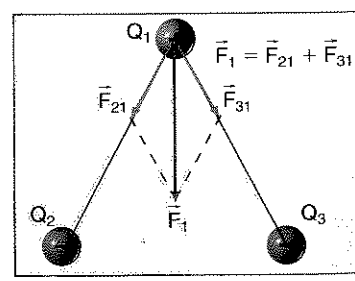
As forzas eléctricas teñen as características seguintes:

- A forza está dirixida ó longo da recta de unión das cargas. A forza é repulsiva se as cargas son do mesmo signo (os vectores $\vec{F}_{12}$ e $\vec{u}_1$ teñen o mesmo sentido, igual cós vectores $\vec{F}_{21}$ e $\vec{u}_2$). En cambio, se as dúas cargas son de signo contrario, estes vectores terán sentidos contrarios. Así, dúas cargas de distinto signo atráense.
- Son forzas a distancia, non é preciso que exista ningún medio material entre as cargas para que esas forzas actúen.
- Sempre se presentan a pares, como afirma o principio de acción e reacción. Isto é, as forzas $\vec{F}_{12}$ e $\vec{F}_{21}$ teñen igual módulo e dirección pero sentidos opostos.

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

$$F_{12} = F_{21} = K \frac{|Q_1| |Q_2|}{r^2}$$

- Experimentalmente comprobamos que as forzas eléctricas verifican o principio de superposición. No caso de ter tres ou máis cargas eléctricas puntuais, a forza resultante sobre unha delas é a suma vectorial de todas as forzas que exercen sobre esta as demais cargas.



Exemplo 1

A distancia entre o electrón e o protón no átomo de hidróxeno é $5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}$. Compara as forzas electrostática e gravitacional que se exercen mutuamente e di qué conclusión obtés. (Masa do protón: $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; masa do electrón: $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$; carga do electrón $-e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; carga do protón $+e = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)

Datos: $r = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}$ $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
 $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ $|+e| = |-e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

- Aplicamos a lei de Coulomb para calcular a forza electrostática que se exercen mutuamente as dúas partículas:

$$|\vec{F}_e| = K \frac{|+e| |-e|}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C})^2}{(5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m})^2}$$
$$|\vec{F}_e| = 8,2 \cdot 10^{-8} \text{ N}$$

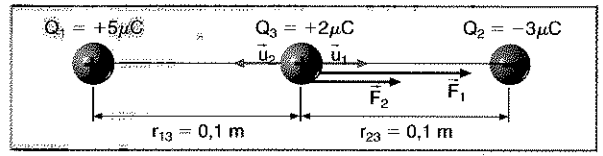
- Aplicamos a lei da gravitación para calcular a forza gravitacional que se exercen mutuamente as dúas partículas:

$$|\vec{F}_g| = G \frac{m_e m_p}{r^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2} \cdot \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}{(5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m})^2}$$
$$|\vec{F}_g| = 3,6 \cdot 10^{-47} \text{ N}$$

- A forza electrostática é 10^{39} veces maior cá forza gravitacional. Este resultado pon de manifesto que a nivel atómico as forzas electrostáticas son moito máis intensas cás gravitacionais.

Exemplo 2

Dúas cargas $Q_1 = +5 \mu\text{C}$ e $Q_2 = -3 \mu\text{C}$ están separadas 20 cm no baleiro. Calcula a forza eléctrica que actúa sobre unha terceira carga $Q_3 = +2 \mu\text{C}$ situada no punto medio do segmento que une Q_1 e Q_2 .



Calculamos a forza que Q_1 exerce sobre Q_3 :

$$\vec{F}_{13} = K \frac{Q_1 Q_3}{r_{13}^2} \vec{u}_1 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{5 \cdot 10^{-6} \text{ C} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \text{ C}}{(0,1 \text{ m})^2} \vec{u}_1$$
$$\vec{F}_{13} = 9 \vec{u}_1 \text{ N}$$

Calculamos a forza que Q_2 exerce sobre Q_3 :

$$\vec{F}_{23} = K \frac{Q_2 Q_3}{r_{23}^2} \vec{u}_2 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{-3 \cdot 10^{-6} \text{ C} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \text{ C}}{(0,1 \text{ m})^2} \vec{u}_2$$
$$\vec{F}_{23} = -5,4 \vec{u}_2 \text{ N}$$

A forza resultante $\vec{F}_3$ que actúa sobre Q_3 é a suma vectorial das dúas forzas anteriores. Tendo en conta que $\vec{u}_2 = -\vec{u}_1$, resulta:

$$\vec{F}_3 = \vec{F}_{13} + \vec{F}_{23} = 9 \vec{u}_1 \text{ N} - 5,4 \vec{u}_2 \text{ N}$$
$$\vec{F}_3 = 9 \vec{u}_1 \text{ N} + 5,4 \vec{u}_1 \text{ N} = 14,4 \vec{u}_1 \text{ N}$$

O seu módulo é $F_3 = 14,4 \text{ N}$.

Exercicios

7. Enuncia a lei de Coulomb e describe as características principais das forzas eléctricas.

8. Dúas cargas puntuais de $+3 \mu\text{C}$ e $+12 \mu\text{C}$ están separadas 50 cm. Calcula a forza electrostática que se exercen se: a) están situadas no aire; b) están situadas na auga ($\epsilon_r = 80$).

Sol.: a) 1,3 N; b) $1,6 \cdot 10^{-2} \text{ N}$
9. Dúas cargas eléctricas puntuais $Q_1 = +2 \mu\text{C}$ e $Q_2 = +4 \mu\text{C}$ están separadas 90 cm no baleiro. Calcula a forza eléctrica que actúa sobre unha terceira carga $Q_3 = -3 \mu\text{C}$ situada sobre o segmento que une Q_1 e Q_2 e a 30 cm de Q_1 .

— ¿Como cambiaría o resultado se Q_3 tivese o mesmo valor absoluto pero signo contrario?

Sol.: 0,3 N

2. Estudio do campo eléctrico

Unha carga eléctrica, simplemente coa súa presenza, perturba o espazo que a rodea creando ó seu redor un campo de forzas que recibe o nome de *campo eléctrico*.

Chamámolles **campo eléctrico** á perturbación que un corpo produce no **espazo** que o rodea polo feito de ter **carga eléctrica**.

Cando outra carga eléctrica se sitúa nesta rexión do espazo, interacciona co campo e experimenta unha forza eléctrica.

2.1. Descrición do campo eléctrico

Os campos eléctricos descríbense mediante dúas magnitudes fundamentais: unha vectorial, a *intensidade do campo eléctrico*, e outra escalar, o *potencial eléctrico*.

Intensidade do campo eléctrico

Para describir un campo eléctrico asignámolles a cada punto do espazo un vector que denominamos *intensidade do campo eléctrico*.

A **intensidade do campo eléctrico**, $\vec{E}$, nun punto do espazo é a **forza que actuaría sobre a unidade de carga positiva situada nese punto**.

A unidade da intensidade do campo eléctrico no SI é o *newton por coulomb* (N/C).

A definición anterior permítenos calcular o campo eléctrico creado por unha carga puntual Q . Para iso colocamos unha carga de proba q nun punto P do espazo situado a unha distancia r da carga Q . O campo eléctrico nese punto será a forza por unidade de carga.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = \frac{K \frac{Qq}{r^2} \vec{u}}{q} \quad \boxed{\vec{E} = K \frac{Q}{r^2} \vec{u}}$$

Onde $\vec{u}$ é un vector unitario na dirección da recta de unión da carga Q co punto P e con sentido da carga Q ó punto P .

Como podemos observar, o campo eléctrico creado por unha carga puntual Q ten as seguintes propiedades:

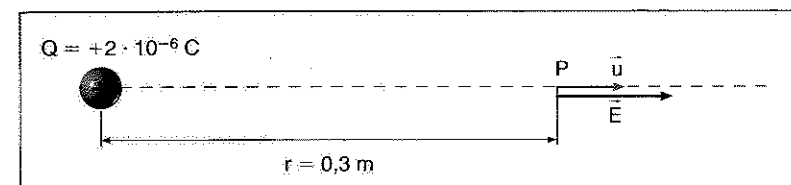
- É radial e diminúe co cadrado da distancia, polo tanto trátase dun **campo central**.
- O seu **sentido depende do signo de Q** . Se a carga é negativa, o campo eléctrico diríxese cara á carga; se é positiva, afástase desta.

A forza eléctrica sobre unha carga q situada nun punto en que a intensidade do campo eléctrico é $\vec{E}$ exprésase:

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

Exemplo 3

Calcula o campo eléctrico creado por unha carga $Q = +2 \mu\text{C}$ nun punto P situada a 30 cm de distancia no baleiro. Calcula tamén a forza que actúa sobre unha carga $q = -4 \mu\text{C}$ situada no punto P .



— Calculamos o campo eléctrico no punto P :

$$\vec{E} = K \frac{Q}{r^2} \vec{u}; \quad \vec{E} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-6} \text{C}}{(0,3 \text{ m})^2} \vec{u} = 2 \cdot 10^5 \vec{u} \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

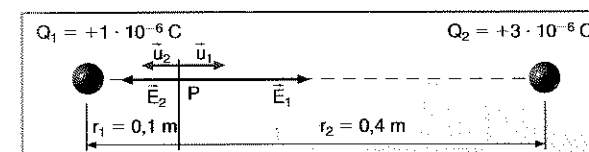
— Calculamos a forza eléctrica que actúa sobre q :

$$\vec{F} = q \vec{E} = -4 \cdot 10^{-6} \text{C} \cdot 2 \cdot 10^5 \vec{u} \frac{\text{N}}{\text{C}} = -0,8 \vec{u} \text{ N}$$

A forza é atractiva, como corresponde a dúas cargas de signo contrario. O seu módulo é $F = 0,8 \text{ N}$.

Exemplo 4

Dúas cargas puntuais, $Q_1 = +1 \mu\text{C}$ e $Q_2 = +3 \mu\text{C}$, están situadas no baleiro a 50 cm unha da outra. Calcula o campo eléctrico nun punto P situado sobre o segmento que une as dúas cargas e a 10 cm de Q_1 .



— Calculamos o campo eléctrico creado por Q_1 en P :

$$\vec{E}_1 = K \frac{Q_1}{r_1^2} \vec{u}_1 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{1 \cdot 10^{-6} \text{C}}{(0,1 \text{ m})^2} \vec{u}_1$$

$$\vec{E}_1 = 9 \cdot 10^5 \vec{u}_1 \text{ N/C}$$

Calculamos o campo eléctrico creado por Q_2 en P :

$$\vec{E}_2 = K \frac{Q_2}{r_2^2} \vec{u}_2 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{3 \cdot 10^{-6} \text{C}}{(0,4 \text{ m})^2} \vec{u}_2$$

$$\vec{E}_2 = 1,7 \cdot 10^5 \vec{u}_2 \text{ N/C}$$

O campo eléctrico resultante no punto P é a suma vectorial de $\vec{E}_1$ e $\vec{E}_2$. Para obtelo, teremos en conta que $\vec{u}_2 = -\vec{u}_1$.

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = 9 \cdot 10^5 \vec{u}_1 \text{ N/C} + 1,7 \cdot 10^5 \vec{u}_2 \text{ N/C}$$

$$\vec{E} = 9 \cdot 10^5 \vec{u}_1 \text{ N/C} - 1,7 \cdot 10^5 \vec{u}_1 \text{ N/C}$$

$$\vec{E} = 7,3 \cdot 10^5 \vec{u}_1 \text{ N/C}$$

O seu módulo é $E = 7,3 \cdot 10^5 \text{ N/C}$.

Exercicios

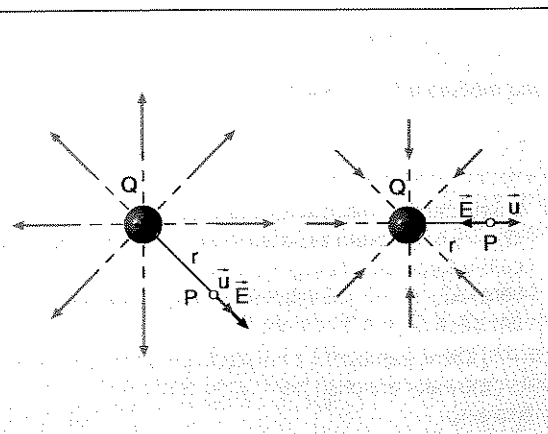
- Di cómo varía a intensidade do campo eléctrico creado por unha carga puntual coa distancia. Debuxa unha gráfica que represente esa variación.
- Calcula o campo eléctrico creado por unha carga de $+4 \mu\text{C}$ a unha distancia de 50 cm se: a) o medio exterior á carga é o baleiro; b) o medio exterior é a auga.
Sol.: a) $1,4 \cdot 10^5 \text{ N/C}$; b) $1,8 \cdot 10^3 \text{ N/C}$
- Dúas cargas eléctricas puntuais de $+3 \mu\text{C}$ e $-2 \mu\text{C}$ están separadas 40 cm no baleiro. Calcula o campo eléctrico no punto medio do segmento que as une.
Sol.: $1,12 \cdot 10^6 \text{ N/C}$
- Dúas cargas puntuais, $Q_1 = +4 \mu\text{C}$ e $Q_2 = +1 \mu\text{C}$, están separadas 30 cm no baleiro. Calcula o campo eléctrico nun punto do segmento que une as cargas situado a 12 cm de Q_1 .
— Determina a forza que actúa sobre unha carga $Q_3 = -0,5 \mu\text{C}$ situada nese punto.
Sol.: $2,2 \cdot 10^6 \text{ N/C}$; $1,1 \text{ N}$
- Determina a qué distancia dunha carga puntual de 120 nC situada no baleiro a intensidade do campo eléctrico é de 6750 N/C.
Sol.: 0,4 m

Interacción entre cargas eléctricas en movemento

Considera dúas cargas, Q e q , separadas por unha gran distancia. Se agora movemos Q rapidamente, a carga q verase afectada por ese movemento. Pero esta interacción necesita certo tempo para propagarse. Polo tanto, a carga q verase afectada cun certo atraso. Este atraso dificulta a interpretación de que as cargas interaccionan instantaneamente a distancia, como nos suxire a lei de Coulomb. De feito, esta lei non é válida para cargas en movemento rápido. Neste caso o campo eléctrico ofrécenos unha interpretación máis axeitada da interacción entre cargas eléctricas.

Fíxate

Frecuentemente úsase o termo **campo eléctrico** para denominar o vector **intensidade do campo eléctrico**.



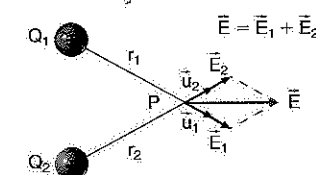
Fíxate

O **principio de superposición** tamén se cumpre para a intensidade do campo eléctrico.

O campo eléctrico creado por unha distribución de tres ou máis cargas puntuais nun punto é a suma vectorial dos campos creados por cada unha das cargas nese punto:

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots$$

$$\vec{E} = K \frac{Q_1}{r_1^2} \vec{u}_1 + K \frac{Q_2}{r_2^2} \vec{u}_2 + \dots$$

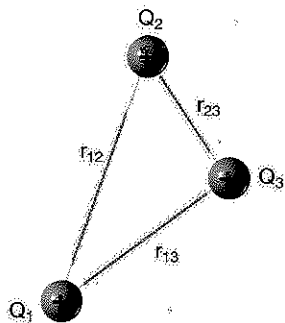


Energía potencial dun sistema de cargas

Definimos a enerxía potencial dun sistema de cargas fixas como o traballo que debemos realizar contra o campo para formar o sistema, trasladando cada carga desde unha distancia infinita ata a posición final que ocupa.

Deste xeito, a enerxía potencial eléctrica do sistema de tres cargas da figura é:

$$E_p = K \left(\frac{Q_1 Q_2}{r_{12}} + \frac{Q_1 Q_3}{r_{13}} + \frac{Q_2 Q_3}{r_{23}} \right)$$



Potencial eléctrico

Se queremos achegar dúas cargas positivas, debemos realizar un traballo contra as forzas eléctricas de repulsión entre as cargas. Este traballo non depende do camiño seguido para achegar as cargas, senón que só depende das súas posicións iniciais e finais. Dicimos que o **campo eléctrico é conservativo**.

Tras achegar as cargas, poderíamos recuperar facilmente o traballo realizado. Bastaría con deixalas libres e aproveitar o seu movemento. Dicimos que o traballo realizado sobre as cargas ó achegalas aumentou a súa **enerxía potencial eléctrica**.

A diferenza de enerxía potencial eléctrica dunha carga entre un punto A e outro punto B é igual ó traballo realizado polo campo eléctrico para trasladar esa carga de A a B.

$$E_{pA} - E_{pB} = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{r}$$

Usando esta expresión xeral podemos calcular a enerxía potencial eléctrica dunha carga puntual q no campo eléctrico creado por outra carga puntual Q situada a unha distancia r .

$$E_{pA} - E_{pB} = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{r} = \int_A^B K \frac{Qq}{r^2} \vec{u} \cdot d\vec{r}$$

Como o traballo non depende do camiño seguido, escollemos unha traxectoria radial para simplificar os cálculos:

$$\vec{u} \cdot d\vec{r} = |\vec{u}| \cdot |d\vec{r}| \cos 0^\circ = |d\vec{r}| = dr$$

$$E_{pA} - E_{pB} = KQq \int_A^B \frac{dr}{r^2} = KQq \left[-\frac{1}{r} \right]_A^B$$

$$E_{pA} - E_{pB} = K \frac{Qq}{r_A} - K \frac{Qq}{r_B}$$

De onde: $E_p = K \frac{Qq}{r} + C$

A constante C é arbitraria e depende da elección da orixe de enerxía potencial. Xeralmente, asignamos o valor cero de enerxía potencial ós puntos situados a distancia infinita da carga que crea o campo ($r \rightarrow \infty$). Con esta elección obtemos $C = 0$ e a enerxía potencial eléctrica resulta:

$$E_p = K \frac{Qq}{r}$$

Observa que esta expresión coincide coa do traballo se colocamos o punto B no infinito. Isto permítenos dar unha interpretación física da enerxía potencial eléctrica:

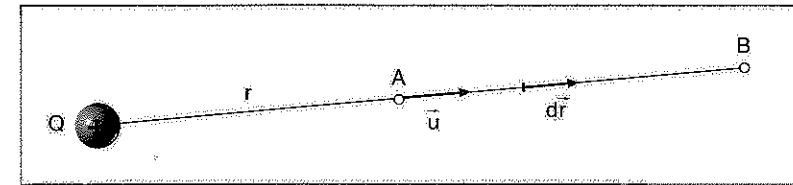
A enerxía potencial eléctrica dunha carga q nun punto do espacio é o traballo que realiza o campo eléctrico para trasladar a carga q desde ese punto ata o infinito.

Outra magnitude fundamental na descrición do campo eléctrico é o **potencial eléctrico**. Este representa a enerxía potencial da unidade de carga positiva situada nun punto do campo eléctrico.

A diferenza de potencial eléctrico entre un punto A e outro punto B é igual ó traballo realizado polo campo eléctrico ó trasladar a unidade de carga positiva de A a B:

$$V_A - V_B = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

Calculemos esta diferenza no caso do campo eléctrico creado por unha carga puntual Q .



$$V_A - V_B = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{r} = \int_A^B K \frac{Q}{r^2} \vec{u} \cdot d\vec{r}$$

Eliximos unha traxectoria radial: $\vec{u} \cdot d\vec{r} = |\vec{u}| \cdot |d\vec{r}| \cos 0^\circ = |d\vec{r}| = dr$

$$V_A - V_B = KQ \int_A^B \frac{dr}{r^2} = KQ \left[-\frac{1}{r} \right]_A^B = K \frac{Q}{r_A} - K \frac{Q}{r_B}$$

Se lles asignamos un valor cero de potencial ós puntos situados a distancia infinita da carga Q ($r \rightarrow \infty$), obtemos:

$$V = K \frac{Q}{r}$$

Observa que esta expresión coincide coa do traballo por unidade de carga se colocamos o punto B no infinito. De aquí deducimos a interpretación física do potencial eléctrico:

O potencial eléctrico nun punto do espacio é o traballo que realiza o campo eléctrico para trasladar a unidade de carga positiva desde ese punto ata o infinito.

A unidade de potencial eléctrico e de diferenza de potencial eléctrico no SI é o J/C e recibe o nome de **volt (V)**.

Se en lugar da unidade de carga positiva se traslada unha carga eléctrica q de A a B, o traballo realizado polo campo eléctrico será:

$$W = q(V_A - V_B)$$

A enerxía potencial eléctrica dunha carga nun punto do espacio relaciónase co potencial eléctrico nese punto deste xeito:

$$E_p = qV$$

Fíxate

Relación entre o campo e o potencial eléctrico

$$V_A - V_B = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

Fíxate

No caso de que existan varias cargas puntuais, cúmprese o **principio de superposición**:

O potencial eléctrico resultante é igual á suma dos potenciais debidos a cada unha das cargas.

$$V = \sum_{i=1}^n V_i = V_1 + V_2 + \dots$$

O electrón-volt

Unha unidade que se utiliza con frecuencia en electrónica e física atómica é o electrón-volt. Non é unha unidade de potencial eléctrico senón de enerxía.

Un electrón-volt, eV, defínese como a enerxía que adquire un electrón que é acelerado por unha diferenza de potencial de 1 volt.

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Traballo do campo positivo ($W > 0$)

- A carga q desprázase por acción das forzas do campo eléctrico.
- A carga q diminúe a súa enerxía potencial eléctrica.
- Isto ocorre cando se separan dúas cargas do mesmo signo ou cando se achegan dúas cargas de signo contrario.

Traballo do campo negativo ($W < 0$)

- A carga q desprázase por acción dunha forza exterior ó campo eléctrico.
- A carga q aumenta a súa enerxía potencial eléctrica.
- Isto ocorre cando se achegan dúas cargas do mesmo signo ou cando se separan dúas cargas de signo contrario.

Recorda

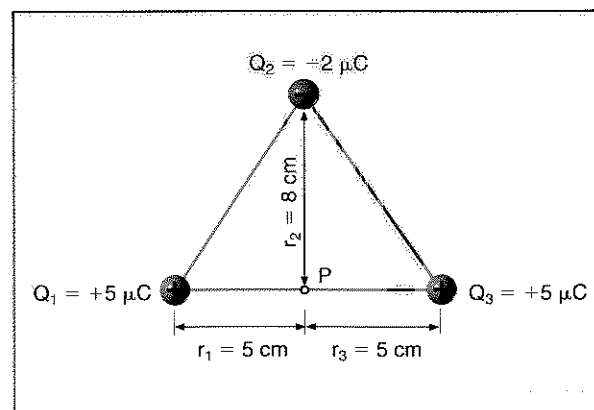
Recorda que todos os campos centrais son **conservativos**.

O **campo eléctrico** é un campo central, polo tanto tamén é un campo **conservativo**.

Exemplo 5

As tres cargas eléctricas da figura están no aire. Calcula:

- O potencial eléctrico no punto P.
- A enerxía potencial que adquire unha carga $q = +2,5 \mu\text{C}$ ó situarse no punto P.



- Calculamos o potencial eléctrico creado por cada unha das cargas no punto P:

$$V_1 = K \frac{Q_1}{r_1} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{5 \cdot 10^{-6} \text{C}}{0,05 \text{m}} = 9 \cdot 10^5 \text{V}$$

$$V_2 = K \frac{Q_2}{r_2} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{-2 \cdot 10^{-6} \text{C}}{0,08 \text{m}} = -2,25 \cdot 10^5 \text{V}$$

$$V_3 = K \frac{Q_3}{r_3} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{5 \cdot 10^{-6} \text{C}}{0,05 \text{m}} = 9 \cdot 10^5 \text{V}$$

O potencial eléctrico no punto P é a suma alébrica dos potenciais eléctricos creados por cada unha das tres cargas:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \\ V = (9 - 2,25 + 9) \cdot 10^5 \text{V} = 15,75 \cdot 10^5 \text{V}$$

- Calculamos a enerxía potencial eléctrica que adquire unha carga $q = +2,5 \mu\text{C}$ ó situarse no punto P:

$$E_p = qV = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{C} \cdot 15,75 \cdot 10^5 \text{V} = 3,9 \text{J}$$

Exercicios

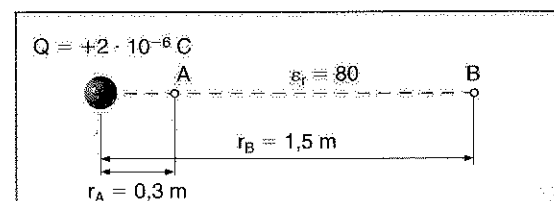
- Unha carga eléctrica positiva móvese no interior dun campo eléctrico uniforme. Xustifica cómo varía a súa enerxía potencial eléctrica nos seguintes casos:

- A carga móvese na mesma dirección e sentido có campo eléctrico.
- A carga móvese na dirección do campo eléctrico pero en sentido contrario.
- A carga móvese en dirección perpendicular ó campo eléctrico.
- A carga describe unha circunferencia e volve ó punto de partida.

Exemplo 6

Unha carga eléctrica puntual $Q = +2 \mu\text{C}$ atópase na auga ($\epsilon_r = 80$). Calcula: a) o potencial eléctrico a unha distancia de 30 cm e a unha distancia de 150 cm da carga; b) a enerxía potencial eléctrica que tería unha carga puntual $q = -3 \mu\text{C}$ situada neses puntos; c) o traballo que deberíamos realizar para trasladar a carga q desde o primeiro punto ata o segundo.

— Datos:



- Calculamos o potencial eléctrico nos puntos A e B. Teremos en conta que na auga o valor de K é:

$$K = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0 \epsilon_r}; K = \frac{9 \cdot 10^9}{80} \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$$

$$V_A = K \frac{Q}{r_A} = \frac{9 \cdot 10^9}{80} \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-6} \text{C}}{0,3 \text{m}} = 750 \text{V}$$

$$V_B = K \frac{Q}{r_B} = \frac{9 \cdot 10^9}{80} \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-6} \text{C}}{1,5 \text{m}} = 150 \text{V}$$

- Calculamos a enerxía potencial eléctrica da carga q nos dous puntos:

$$E_{pA} = qV_A = -3 \cdot 10^{-6} \text{C} \cdot 750 \text{V} = -2,25 \cdot 10^{-3} \text{J}$$

$$E_{pB} = qV_B = -3 \cdot 10^{-6} \text{C} \cdot 150 \text{V} = -0,45 \cdot 10^{-3} \text{J}$$

- O traballo que realiza o campo eléctrico para trasladar a carga q desde A ata B é igual á diferenza de enerxía potencial eléctrica entre estes puntos:

$$W = q(V_A - V_B) = E_{pA} - E_{pB}$$

$$W = -2,25 \cdot 10^{-3} \text{J} - (-0,45 \cdot 10^{-3} \text{J}) = -1,8 \cdot 10^{-3} \text{J}$$

O traballo que realiza o campo é negativo. Isto significa que debemos efectuar un traballo de $1,8 \cdot 10^{-3} \text{J}$ en contra do campo para trasladar a carga q de A a B.

- Unha carga eléctrica $Q = +4 \cdot 10^{-8} \text{C}$ está no aire. Calcula: a) o potencial eléctrico a 5 cm da carga; b) a enerxía potencial eléctrica que adquire unha carga $q = -1,5 \cdot 10^{-9} \text{C}$ ó situarse neste punto.

$$\text{Sol.: a) } 7200 \text{V; b) } -1,1 \cdot 10^{-5} \text{J}$$

- Catro cargas eléctricas puntuais de $+5 \mu\text{C}$ están situadas nos catro vértices dun cadrado de 40 cm de lado. Calcula o traballo que debemos realizar para trasladar unha destas cargas desde a posición que ocupa ata o centro do cadrado.

$$\text{Sol.: } 0,88 \text{J}$$

2.2. Representación do campo eléctrico

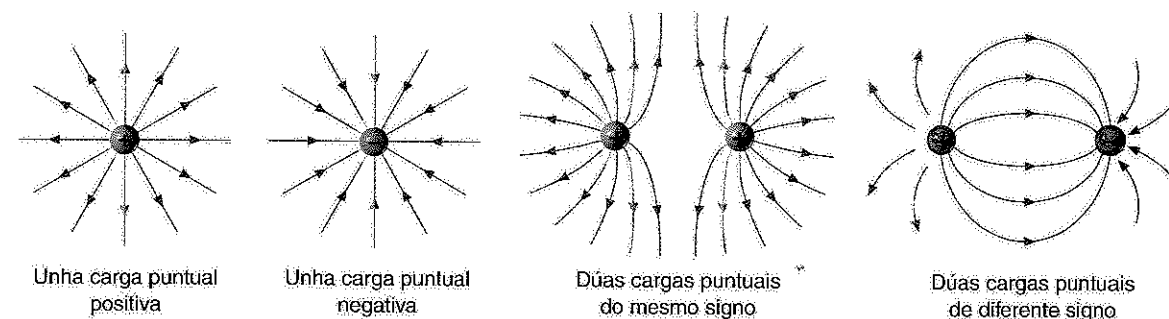
Un campo eléctrico pódese representar esquematicamente nunha rexión do espazo mediante as súas *liñas de campo* e as súas *superficies equipotenciais*.

Liñas de campo

Trázanse de xeito que cumpran as condicións seguintes:

- Que en cada punto do espazo o vector **intensidade do campo eléctrico** sexa **tanxente** ás **liñas de campo** e teña o mesmo sentido ca estas.
- A **densidade de liñas de campo**, o número de liñas que atravesan a unidade de superficie colocada perpendicularmente a estas, sexa **proporcional** ó **módulo do campo eléctrico**. É dicir, o campo eléctrico é máis intenso naquelas rexións en que as liñas de campo están máis xuntas.

As liñas de campo sempre se orixinan nas cargas positivas e terminan nas cargas negativas. A figura amosa as liñas de campo para algunhas distribucións de carga.



Superficies equipotenciais

Son superficies obtidas ó unir os puntos do espazo que se atopan ó **mesmo potencial eléctrico**. Teñen as seguintes propiedades:

- As superficies equipotenciais son **perpendiculares** ás **liñas de campo** en calquera punto.
- O **traballo** que realiza o campo eléctrico para trasladar unha carga dun punto a outro da mesma **superficie equipotencial** é **nulo**.

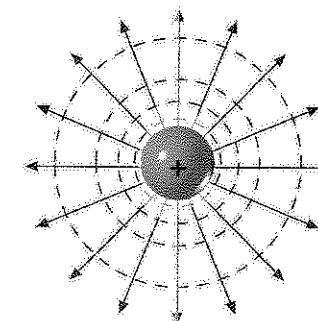
$$W = q(V_A - V_B) = 0$$

- Para o campo creado por unha **carga puntual**, positiva ou negativa, o **potencial** só depende da **distancia á carga**. Polo tanto, as **superficies equipotenciais** son **esferas concéntricas** con centro na propia carga.

Fíxate

As liñas de campo foron introducidas por Faraday para visualizar as forzas magnéticas que un imán produce sobre as limaduras de ferro esparexidas ó seu redor.

Posteriormente, este concepto estendeuse para describir as interaccións eléctrica e gravitacional. Isto posibilitou unha descrición do universo a través do concepto de campo.



Exercicios

- Debuxa as liñas de campo das seguintes distribucións de carga: a) unha esfera cargada uniformemente; b) un plano infinito cargado uniformemente; c) un arame moi longo cargado uniformemente.
- Contesta razoadamente as seguintes preguntas:
 - ¿Pódense cruzar dúas liñas de campo eléctrico?
 - ¿Que traballo debemos realizar para trasladar unha carga eléctrica a través dunha superficie equipotencial?