CLASE 02 · CAPÍTULO 1 · ELECTROSTÁTICA · 2:58 MIN

LA LEY DE COULOMB

La fuerza entre dos cargas puntuales en reposo es proporcional al producto de las cargas, cae con el cuadrado de la distancia y actúa sobre la recta que las une.



VER LA CLASE

BNSOLUTIONS.CL/LECTURES

01 IDEAS CLAVE

Cargas en reposo y cargas puntuales

La electrostática estudia cargas en reposo y los campos que producen. Su modelo más simple es la carga puntual: toda la carga concentrada en una posición. Sirve para electrones y protones, y para cuerpos cuyo tamaño es mucho menor que las distancias del problema. El aire se trata como vacío: las constantes cambian en menos de una parte en mil.

La balanza de torsión: una fuerza leída como ángulo

En 1785 Coulomb midió la repulsión entre dos esferas cargadas con una varilla colgada de una fibra. La fibra se retuerce hasta que su torque $\kappa\theta$ equilibra el torque eléctrico $F\ell$, de modo que $F = \kappa\theta/\ell$. Con una fibra de κ pequeño, una fuerza diminuta produce un giro visible.

Tres hallazgos, una ley

La fuerza es proporcional al producto de las cargas (duplicar una duplica la fuerza), inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (al doble de separación, un cuarto) y apunta por la recta que une las cargas. Juntos dan $F = k_e|q_1||q_2|/r^2$, con $k_e = 1/(4\pi\varepsilon_0)$. Hoy el exponente 2 está comprobado hasta unas pocas partes en 10^{16}.

La fuerza es un vector

Con $\vec{r}_{12} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$ (de la carga 1 a la 2), la fuerza que 1 ejerce sobre 2 es $\vec{F}_{12} = k_e q_1 q_2 \,\hat{r}_{12}/r_{12}^2$, con las cargas con su signo. Si $q_1 q_2 > 0$ apunta alejándose de 1 (repulsión); si $q_1 q_2 < 0$, hacia 1 (atracción). Siempre $\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}$: es un par de acción y reacción. La gravitación de Newton tiene la misma forma, pero solo atrae y su constante es diminuta: en el hidrógeno, la fuerza eléctrica supera a la gravitatoria por un factor de 2×10^{39}.

Superposición

La fuerza entre dos cargas no cambia por la presencia de otras: es un hecho experimental. Sobre una carga de prueba q_0 la fuerza neta es la suma vectorial de los aportes de cada carga fuente, componente a componente. Una neta nula no significa que cada fuerza sea nula, y la fuerza eléctrica entra en $\sum \vec{F} = m\vec{a}$ junto a las demás.

02 FÓRMULAS

$$F = k_e \frac{|q_1|\,|q_2|}{r^2}, \qquad k_e = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 8{,}99 \times 10^9\ \mathrm{N\,m^2/C^2}$$

Módulo de la fuerza entre dos cargas puntuales en reposo, separadas r, en el vacío. Repulsiva si los signos son iguales, atractiva si son opuestos.

$$\vec{F}_{12} = k_e\, q_1 q_2\, \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|^3}, \qquad \vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}$$

Forma vectorial: fuerza que q_1 ejerce sobre q_2. Las cargas entran con su signo, y el signo del producto decide el sentido.

$$\vec{F}_{\text{neta}} = \sum_{n=1}^{N} k_e\, q_n q_0\, \frac{\vec{r} - \vec{r}_n}{|\vec{r} - \vec{r}_n|^3}$$

Superposición: fuerza sobre q_0 en $\vec{r}$ debida a N cargas en $\vec{r}_n$. Se suma componente a componente.

$$F = \frac{\kappa\,|\theta|}{\ell}$$

Balanza de torsión con la fuerza perpendicular al brazo: κ es la constante de torsión de la fibra y ℓ el brazo.

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{k_e\, e^2}{G\, m_p m_e}$$

Razón entre la fuerza eléctrica y la gravitatoria en el hidrógeno. No depende de r, porque ambas van como $1/r^2$.

03 EJEMPLO RESUELTO

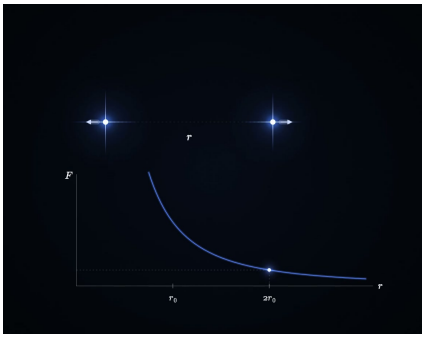
RESUELTO PASO A PASO

Sobre el eje x hay tres cargas: $q_1 = +2{,}0\ \mu\mathrm{C}$ en $x = 0$, $q_2 = -3{,}0\ \mu\mathrm{C}$ en $x = 0{,}20$ m y $q_0 = +1{,}0\ \mu\mathrm{C}$ en $x = 0{,}50$ m. Calcule la fuerza neta sobre q_0.

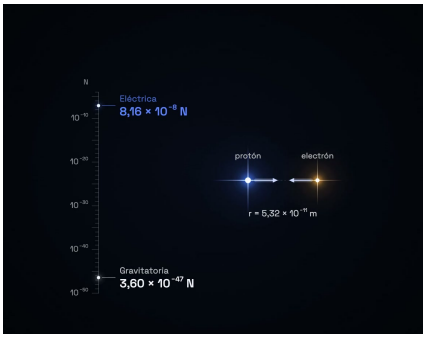
1. Sentidos por los signos: q_1 y q_0 son positivas, así que q_1 empuja a q_0 hacia $+\hat{x}$. q_2 es negativa y atrae a q_0 hacia sí, hacia $-\hat{x}$.
2. Distancias: $r_{10} = 0{,}50$ m y $r_{20} = 0{,}50 - 0{,}20 = 0{,}30$ m.
3. $F_1 = \dfrac{(8{,}99\times10^{9})(2{,}0\times10^{-6})(1{,}0\times10^{-6})}{(0{,}50)^2} = 7{,}19\times10^{-2}$ N.
4. $F_2 = \dfrac{(8{,}99\times10^{9})(3{,}0\times10^{-6})(1{,}0\times10^{-6})}{(0{,}30)^2} = 3{,}00\times10^{-1}$ N.
5. Suma con signo: $F_x = 0{,}0719 - 0{,}300 = -0{,}228$ N. La segunda carga es mayor y está más cerca, y gana.

RESULTADO $\vec{F}_{\text{neta}} = -0{,}228\ \hat{x}$ N: 0,228 N hacia la carga negativa. Sumar magnitudes daría 0,372 N, que es incorrecto.

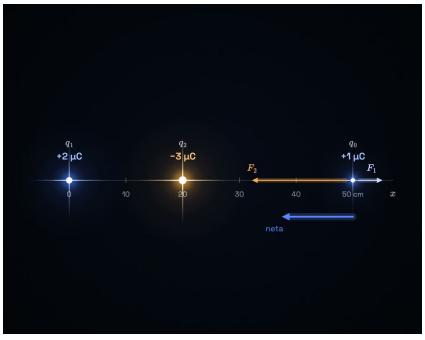
04 EN EL VIDEO



MINUTO 0:51



MINUTO 1:53



MINUTO 2:34

05 ¡OJO!

- Las distancias van en metros y al cuadrado: olvidar pasar de cm a m o usar r en vez de r^2 son los errores más comunes.
- En $\vec{F}_{12}$ el subíndice indica quién ejerce y quién recibe: es la fuerza de q_1 sobre q_2, y $\vec{r}_{12}$ va de 1 a 2.
- Las fuerzas mutuas tienen el mismo módulo aunque las cargas sean distintas; las aceleraciones, en cambio, dependen de cada masa.
- La ley vale para cargas puntuales en reposo en el vacío. Con cargas en movimiento o dentro de un material hay que agregar más física.

06 PARA PENSAR

? ¿Por qué una carga de 1 μC y otra de 5 μC se ejercen fuerzas de igual módulo?

? Si la fuerza eléctrica es 10^{39} veces más intensa que la gravitatoria en el hidrógeno, ¿por qué la gravedad gobierna el movimiento de los planetas?

? ¿Qué cambia en las fuerzas si se invierten los signos de las dos cargas a la vez?

? Una carga puede estar en equilibrio entre otras dos sin que ninguna fuerza sobre ella sea cero. ¿Cómo es posible?

07 EJERCICIOS

DIFICULTAD ●○○ DIRECTA ●●○ COMBINA IDEAS ●●● DESAFÍO · SOLUCIONES AL FINAL

01 ●○○

Una carga de +4,0 nC y otra de −6,0 nC están separadas 3,0 cm. Calcule el módulo de la fuerza entre ellas e indique si es atractiva o repulsiva.

02 ●○○

En el átomo de hidrógeno, el protón y el electrón están a $5{,}3 \times 10^{-11}$ m. Calcule la fuerza eléctrica y la gravitatoria entre ellos, y su razón. Use $G = 6{,}674 \times 10^{-11}\ \mathrm{N\,m^2/kg^2}$ y $m_p = 1{,}673 \times 10^{-27}$ kg.

03 ●●○

Una carga $q = +1{,}0\ \mu$C está en $x = 0$ y otra $4q = +4{,}0\ \mu$C en $x = 0{,}30$ m. ¿En qué punto del eje una tercera carga q_0 queda con fuerza neta nula? ¿Depende la respuesta del signo o del valor de q_0?

04 ●●●

Una carga $q_1 = +3{,}0\ \mu$C está en el origen, $q_2 = -5{,}0\ \mu$C en $(0{,}40;\ 0)$ m y $q_0 = +2{,}0\ \mu$C en $(0;\ 0{,}30)$ m. Calcule la fuerza neta sobre q_0 en componentes, su módulo y su dirección.

08 SOLUCIONES

EJERCICIO 01

$F = \dfrac{(8{,}99\times10^{9})(4{,}0\times10^{-9})(6{,}0\times10^{-9})}{(0{,}030)^2} = 2{,}40\times10^{-4}$ N. Los signos son opuestos.

$2{,}40\times10^{-4}$ N, atractiva.

EJERCICIO 02

$F_e = k_e e^2/r^2 = 8{,}21\times10^{-8}$ N. $F_g = Gm_p m_e/r^2 = 3{,}62\times10^{-47}$ N. La razón $F_e/F_g = k_e e^2/(Gm_p m_e) = 2{,}27\times10^{39}$ no depende de r.

$F_e = 8{,}21\times10^{-8}$ N, $F_g = 3{,}62\times10^{-47}$ N, $F_e/F_g = 2{,}27\times10^{39}$.

EJERCICIO 03

Fuera del segmento ambas fuerzas apuntan en el mismo sentido, así que el punto está entre las cargas. Igualando módulos: $\dfrac{k_e q q_0}{x^2} = \dfrac{k_e(4q)q_0}{(0{,}30-x)^2}$, de donde $0{,}30 - x = 2x$ y $x = 0{,}10$ m. q_0 se cancela: si cambia de signo, las dos fuerzas se invierten a la vez y la neta sigue siendo cero.

$x = 0{,}10$ m (un tercio del camino, del lado de la carga menor); no depende de q_0.

EJERCICIO 04

De q_1 (repulsión, a 0,30 m): $F_1 = 0{,}599$ N en $+\hat{y}$. De q_2 (atracción, a 0,50 m): $F_2 = 0{,}360$ N hacia q_2, en la dirección $(0{,}8;\ -0{,}6)$: $\vec{F}_2 = (0{,}288;\ -0{,}216)$ N. Suma: $\vec{F} = (0{,}288;\ 0{,}384)$ N, $|\vec{F}| = 0{,}479$ N, $\tan\phi = 0{,}384/0{,}288$.

$\vec{F} = (0{,}288\,\hat{x} + 0{,}384\,\hat{y})$ N; 0,479 N a 53,1° sobre el eje $+x$.

09 PARA SEGUIR

LECTURAS

Física universitaria vol. 2 · 5.3 Ley de Coulomb

Forma vectorial de la ley y superposición de fuerzas entre varias cargas, con ejemplos resueltos.

OPENSTAX · CC BY 4.0 · ES

Feynman Lectures Vol. II · Cap. 4 Electrostatics

Sección 4-2 «Coulomb's law; superposition».

RICHARD P. FEYNMAN (CALTECH) · LECTURA LIBRE EN LÍNEA (© CALTECH) · EN

CURSOS ABIERTOS

MIT 8.02 (primavera 2007) · Cap. 2 Coulomb's Law (apuntes PDF)

Secciones 2.2 y 2.3: ley de Coulomb y principio de superposición.

MIT OPENCOURSEWARE (P. DOURMASHKIN, J. BELCHER ET AL.) · CC BY-NC-SA 4.0 · EN

SIMULACIONES

PhET · Ley de Coulomb

Cambia cargas y distancia y mide la fuerza; comprueba la dependencia $1/r^2$.

PHET INTERACTIVE SIMULATIONS, UNIVERSITY OF COLORADO BOULDER · CC BY 4.0 · ES

Basada en: Apuntes de Electricidad y Magnetismo (J. Patiño, CFSA3440), Clase 1, sección 6 (Electrostática: el problema que vamos a resolver), sección 7 (La ley de Coulomb, 7.1 a 7.6) y sección 8 (Principio de superposición). Ficha de B&N Lectures, proyecto creado y dirigido por Nicolás Moreno; el texto, los ejercicios y las cifras son propios y se comprobaron con código. Fotogramas del video de la clase. © 2026 B&N Solutions · bnsolutions.cl/lectures