2 Nacimiento de la teoría cuántica. Fines del siglo XIX y principios del XX

Las leyes y los hechos más fundamentales de la ciencia física han sido todos descubiertos; están ahora tan firmemente establecidos que la posibilidad de ser suplantados —como consecuencia de nuevos descubrimientos— es remota. Nuestros futuros descubrimientos sólo buscarán obtener la sexta cifra decimal.

ALBERT MICHELSON (1899)

Algunos de los participantes en la Primera Conferencia de Solvay en 1911. De pie se encuentran Plank (primero de izquierda a derecha), Einstein (segundo de derecha a izquierda) y Rutherford (cuarto de derecha a izquierda). El hombre joven, al lado de Rutherford, es Jeans. La única mujer presente es *madame* Curie. Thomson, aunque asistió, no aparece en la fotografía. *(Tomada de Hetch:* Physics in perspective, © *1980. Addison-Wesley Publishing Co. Cortesía de California Institute of Technology, Pasadena, Cal.)*

2.1 INTRODUCCION

Durante los años de 1895 a 1905 apareció una serie de hechos y teorías que cambiaron radicalmente el rumbo de la física y contribuyeron al advenimiento de la química moderna. En esta época se dio el descubrimiento de los rayos X, la radiactividad y el electrón, así como la aparición de la teoría cuántica y la teoría especial de relatividad. No deja de ser sorprendente el hecho de que, en un intervalo tan corto, hayan ocurrido acontecimientos susceptibles de modificar, hasta sus entrañas, nuestra concepción del universo.

En este capítulo analizaremos algunos de los hechos mencionados anteriormente para poder visualizar el contexto bajo el cual nació la teoría cuántica, cuyas implicaciones químicas son el centro de atención de este libro. Vale la pena aclarar que este análisis no seguirá un curso cronológico estricto. Asimismo, cabe agregar que a lo largo del texto emplearemos las unidades del sistema internacional, por lo que hemos incluido la sección 2.2 para el lector que no está familiarizado con ellas.

Fundamentalmente, nuestro interés primordial es examinar aquellos resultados útiles para el químico, razón por la cual hemos dado énfasis a tres aspectos:

1) Descubrimiento del electrón (Sec. 2.4), debido al cual hemos introducido previamente algunos conceptos sobre campos eléctricos y magnéticos y su interacción con partículas cargadas (Sec. 2.3), para quien juzgue necesario revisarlos.

2) Ley de Planck (Secs. 2.7 y 2.8) y explicación del efecto fotoeléctrico (Sec. 2.9). Ya que estos hechos resultan ser las primeras manifestaciones de la cuantización y, por tanto, constituyen el inicio de la teoría cuántica, son de primordial importancia para el desarrollo ulterior del texto. Como ambos se refieren a problemas de la interacción de la radiación electromagnética con la materia, hemos juzgado conveniente introducir previamente una sección (2.5) sobre movimiento ondulatorio y naturaleza de la luz, seguida de otra sobre la posibilidad de transferir energía a través de la radiación electromagnética (Sec. 2.6).

3) Modelo atómico de Rutherford. En esta última sección 2.10 se parte del descubrimiento de la radiactividad hasta llegar al del núcleo atómico.

Este capítulo constituye el antecedente necesario para empezar a comprender la intrincada naturaleza del átomo. Al concluirlo, contaremos con los «ingredientes» (electrones y núcleo) y la «receta» (teoría cuántica) para comprender la construcción del primer modelo cuántico del átomo introducido por Bohr, el cual será motivo del siguiente capítulo del texto.

2.2 EL SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (SI)

Dado que cada día se generaliza más el uso del SI, hemos decidido emplear estas unidades a lo largo del texto. Sin embargo, no todos los científicos han adoptado este sistema. Emplear únicamente las unidades del SI trae un problema como consecuencia: la eliminación de varias unidades ampliamente utilizadas. Gran parte de los datos que aparecen en la bibliografía vienen dados en unidades no recomendadas por el SI.

UNIDADES DEL SI

	MEDIDA	UNIDAD	SIMBOLO
Básicas	Longitud	metro	m
	Masa	kilogramo	kg
	Tiempo	segundo	s
	Intensidad de corriente	amperio	A
	Temperatura	kelvin	K
	Cantidad de sustancia	mol	mol
	Intensidad luminosa	candela	cd
Suplementarias	Angulo plano	radián	rad
	Angulo sólido	estereorradián	sr

Tabla 2.1

Creemos, por consiguiente, que debe familiarizarse al estudiante con el uso tanto de las unidades «nuevas» como de las «viejas», cuando menos en este periodo de transición.

En el SI se tienen siete unidades básicas y dos más suplementarias (véanse Tablas 2.1 y 2.2, donde se encuentran las definiciones de las unidades básicas).

Los múltiplos o fracciones de las unidades básicas se indican con prefijos, representando cada uno cierta potencia de 10 (véase Tabla 2.3); esto nos permite ampliar o reducir a conveniencia las unidades básicas del SI.

En la figura 2.1[1] se presentan las magnitudes de algunas distancias mediante el empleo de estos prefijos. En la figura 2.2[2] se ejemplifica la misma situación pero utilizando, ahora, la masa de los cuerpos.

A partir de las unidades básicas pueden obtenerse múltiples unidades derivadas por combinación algebraica. Algunas de ellas reciben nombres especiales, los cuales vale la pena aprender.

[1] La idea fue tomada del libro *Chemistry*, de J. W. Moore, W. G. Davies y R. W. Collins, McGraw Hill Book Co., 1978.

[2] *Idem.*

DEFINICIONES DE LAS UNIDADES BASICAS

METRO	Es la distancia que recorre una onda electromagnética en el vacío durante $\left(\frac{1}{299792458}\right)$ seg.
KILOGRAMO	Es igual a la masa del prototipo internacional del kilogramo de platino-iridio custodiado por el Comité Internacional de Pesos y Medidas, en Sèvres, Francia.
SEGUNDO	Es la duración de 9 192 631 770 periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de ^{133}Cs.
AMPERIO	Es la intensidad de una corriente constante que, mantenida en dos conductores paralelos de longitud infinita, de sección circular despreciable, colocados a una distancia de un metro entre sí, en el vacío, produciría entre ellos una fuerza igual a 2×10^{-7} newtons por metro de longitud.
KELVIN	Es la fracción $\frac{1}{273.16}$ de la temperatura termodinámica del punto triple del agua.
MOL	Es la cantidad de sustancia de un sistema que contiene tantas entidades elementales como átomos hay en 0.012 kg de ^{12}C.
CANDELA	Es la intensidad luminosa, en dirección perpendicular, de una superficie de $\frac{1}{600\,000}$ de metro cuadrado de un cuerpo negro a la temperatura de solidificación del platino (2042 K) y bajo una presión de 101 325 newtons por metro cuadrado.

Tabla 2.2

PREFIJOS DEL SI

PREFIJO	SIMBOLO	FACTOR
exa	E	1 000 000 000 000 000 000 ó 10^{18}
peta	P	1 000 000 000 000 000 ó 10^{15}
tera	T	1 000 000 000 000 ó 10^{12}
giga	G	1 000 000 000 ó 10^{9}
mega	M	1 000 000 ó 10^{6}
kilo	k	1 000 ó 10^{3}
hecto	h	100 ó 10^{2}
deka	da	10 ó 10^{1}
—	—	1 ó 10^{0}
deci	d	0.1 ó 10^{-1}
centi	c	0.01 ó 10^{-2}
mili	m	0.001 ó 10^{-3}
micro	μ	0.000 001 ó 10^{-6}
nano	n	0.000 000 001 ó 10^{-9}
pico	p	0.000 000 000 001 ó 10^{-12}
femto	f	0.000 000 000 000 001 ó 10^{-15}
atto	a	0.000 000 000 000 000 001 ó 10^{-18}

Tabla 2.3

Las unidades derivadas más empleadas en el texto, así como algunas unidades básicas fuera del SI pero de uso práctico aceptado, son:

UNIDAD	COMBINACION ALGEBRAICA	SIMBOLO
Area	m^2	—
Volumen	m^3	—
(De uso aceptado)	10^{-3} m^3	l (litro)
Velocidad	m/s	—
Aceleración	m/s^2	—
Fuerza	kg m/s^2	N (newton)
Trabajo y energía	kg m^2/s^2 = N-m	J (julio)
Potencia	kg m^2/s^3 = J/s	W (vatio)
Frecuencia	oscilaciones/s o s^{-1}	Hz (hertzio)
Carga eléctrica	A-s	C (coulombio)
Diferencia de potencial	W/A = J/C	V (voltio)
Campo magnético	N/A-m	T (tesla)
Presión	N/m^2	Pa (pascal)
(De uso aceptado)	101 325 Pa	atm (atmósfera)
(De uso aceptado)	10^5 Pa	bar
Temperatura (de uso aceptado)	K-273.15	°C (grado celsius)
Tiempo (de uso aceptado)	60 s	min (minuto)
(De uso aceptado)	3600 s	h (hora)
(De uso aceptado)	86 400 s	d (día)

	20 Em	Espesor de la Vía Láctea.
10^{18} m exámetro, Em		
	40 Pm	Distancia a la estrella más cercana.
10^{15} m petámetro, Pm		
	6 Tm	Distancia del Sol a Plutón.
10^{12} m terámetro, Tm		
	149 Gm	Distancia del Sol a la Tierra.
10^{9} m gigámetro, Gm		
	384 Mm	Distancia de la Tierra a la Luna.
	40 Mm	Perímetro de la Tierra.
10^{6} m megámetro, Mm	950 km	Longitud de la península itálica.
	8.84 km	Altura del monte Everest.
10^{3} m kilómetro, km	979 m	Cataratas más altas (Salto del Angel).
	2.42 m	Mayor salto de altura (1987).
	8 cm	Tamaño de un cigarro.
	2 mm	Anchura de una puntilla de lápiz.
10^{-3} m milímetro, mm		
	40 μm	El espesor de esta página.
10^{-6} m micrómetro, μm	1 μm	Diámetro de una partícula de humo.
	100 nm	Diámetro de un pequeño virus.
	7 nm	Diámetro de una molécula de hemoglobina.
10^{-9} m nanómetro, nm	250 pm	Radios atómicos.
1 Å		
	37 pm	
10^{-12} m picómetro, pm		
	100 fm	Longitud de onda posible para un rayo γ.
10^{-15} m femtómetro, fm	1 fm	Radio de un protón.
10^{-18} m attómetro, am		

Figura 2.1 Comparación de algunas distancias representativas.

10^{27} g	6×10^{27} g	Masa de la Tierra.
	7×10^{25} g	Masa de la Luna.
10^{24} g	1.4×10^{24} g	Agua de los océanos.
	5×10^{21} g	Masa de la atmósfera.
10^{21} g		
10^{18} g exagramo, Eg		
	500 Pg	Una alta montaña.
10^{15} g petagramo, Pg		
	340 Tg	Producción mundial de maíz (1976).
	31 Tg	Producción mundial de vino (1976).
10^{12} g teragramo, Tg		
10^{9} g gigagramo, Gg	500 Mg	Jumbo Jet (cargado).
10^{6} g megagramo, Mg	2 Mg	Un camión ligero.
	50 kg	Masa media de una mujer.
10^{3} g kilogramo, kg	1 kg	Kilogramo patrón.
	5 g	Cucharada de agua.
10^{0} g gramo, g		
	75 mg	Aguja.
10^{-3} g miligramo, mg		
	100 μg	Grano de sal.
10^{-6} g microgramo, μg		
	50 ng	Masa del punto sobre esta i.
10^{-9} g nanogramo, ng		
10^{-12} g picogramo, pg	1 pg	Partícula de humo.
10^{-15} g femtogramo, fg	1 fg	Molécula de DNA humana.
10^{-18} g attogramo, ag		
	1.07×10^{-19} g	Molécula de hemoglobina.
10^{-21} g		
	5.68×10^{-22} g	Molécula de azúcar.
10^{-24} g	1.67×10^{-24} g	Atomo de hidrógeno.
10^{-27} g	0.91×10^{-27} g	Electrón.

Figura 2.2 Comparación de algunas masas representativas. Por encima de 10^{18} g o debajo de 10^{-18} g no existen prefijos y las cantidades se expresan como potencias de 10.

En la figura 2.3 se ha representado la relación entre algunas unidades básicas y las más importantes unidades derivadas. Para obtener unidades derivadas se procederá como sigue: se escoge la unidad derivada y se ve qué líneas *llegan* a ella. Una línea sólida indica multiplicación y una segmentada división.

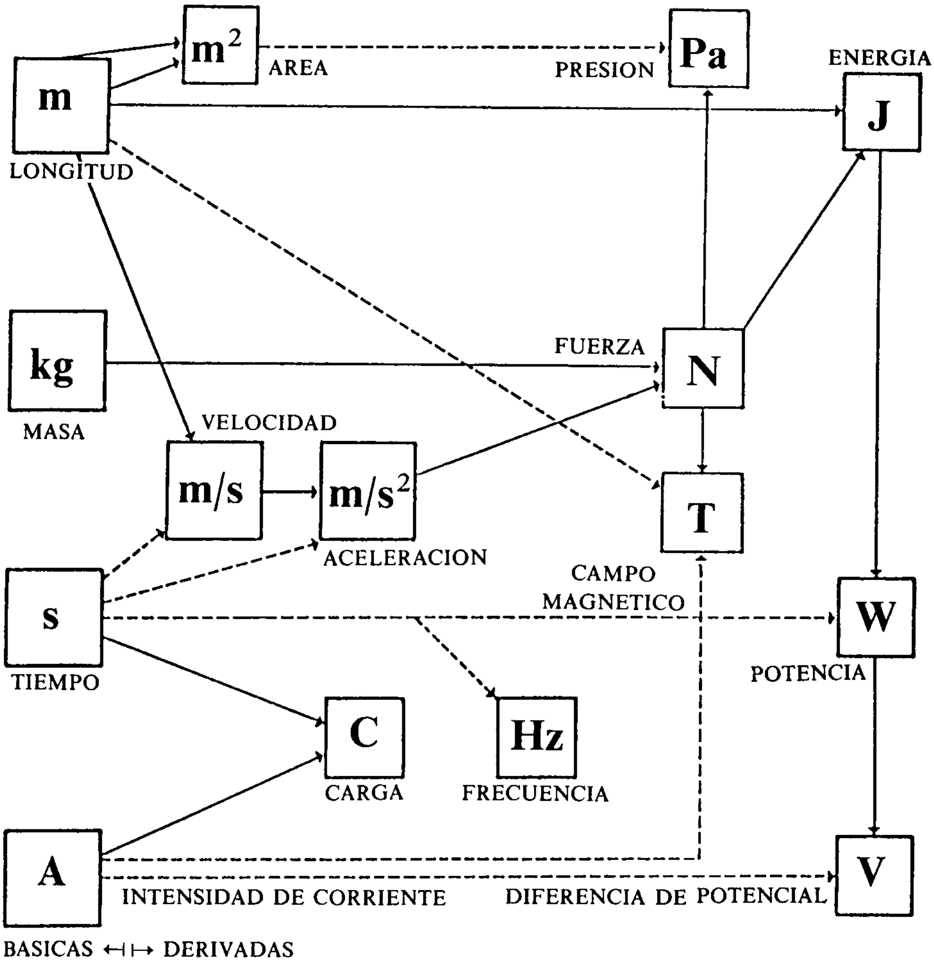


Figura 2.3

A lo largo del texto hemos empleado los prefijos de la tabla 2.3 para algunas de las unidades derivadas. Así, un attojulio (1 aJ) debe entenderse como 1×10^{-18} J.

En la figura 2.4 mostramos algunos valores de energías comunes expresadas con esta notación de prefijos.

10^{27} J -	4×10^{26} J	Energía que sale del Sol por segundo.
10^{24} J -		
10^{21} J -		
	42 EJ	Mil bombas atómicas de 10 megatones.
10^{18} J - exajulio, EJ		
	172 PJ	Energía solar que llega a la superficie de la tierra en un segundo.
10^{15} J - petajulio, PJ		
	90 TJ	Energía relativista equivalente a un gramo de materia.
10^{12} J - terajulio, TJ	1 TJ	Producción mundial de energía eléctrica por segundo.
	4.2 GJ	Tonelada de TNT.
10^{9} J - gigajulio, GJ		
	2.6 MJ	Diez focos de 100 W prendidos una hora.
10^{6} J - megajulio, MJ		
	34 kJ	Combustión de un gramo de carbón.
10^{3} J - kilojulio, kJ		
	4.184 J	Energía para elevar un grado la temperatura de un gramo de agua.
10^{0} J - julio		
10^{-3} J - milijulio, mJ	1 mJ	Energía para levantar a un metro del suelo un objeto de un gramo.
10^{-6} J - microjulio, μJ		
1 erg	100 nJ	Energía de una partícula en un acelerador muy potente.
10^{-9} J - nanojulio, nJ		
	10 pJ	Energía de los neutrones rápidos en la fisión nuclear.
10^{-12} J - picojulio, pJ		
	18 fJ	Energía de ionización del último electrón del uranio.
10^{-15} J - femtojulio, fJ		
	2.18 aJ	Energía de ionización del hidrógeno.
10^{-18} J - attojulio, aJ		
	1.6021×10^{-19}	Energía de un electrón en una diferencia de potencial de un voltio (1 eV).

Figura 2.4 Comparación de algunos valores de energía.

Para terminar, una recomendación al lector: use siempre las unidades del SI al sustituir en una ecuación. De esta manera, nunca podrá existir equivocación respecto al resultado obtenido. Si éste es una distancia, será obtenido automáticamente en metros. Si es una energía, se tendrá en julios, y así sucesivamente.

Al sustituir valores, sólo se usarán los kilogramos como unidades con prefijo, todas las demás variables deberán sustituirse *sin prefijos.*

Si alguno de los datos no está dado con unidades del SI (litros, calorías, grados celsius, electrón-voltios, etc.) deberá hacerse (antes de sustituir) la transformación a las unidades del SI.

2.3 ALGO SOBRE CAMPOS ELECTRICOS Y MAGNETICOS[3]

Toda la materia está formada por cargas eléctricas, tanto positivas como negativas. A esto se debe que, antes de iniciar nuestro relato sobre el descubrimiento del electrón, resulte conveniente detenernos para analizar las fuerzas que aparecen en sistemas con cargas eléctricas. Estas son de dos tipos: las fuerzas eléctricas y las fuerzas magnéticas.

Las primeras existen aun cuando las cargas estén en reposo; los estudios cuantitativos de ellas fueron realizados inicialmente por Charles Coulomb (1736-1806).

Las magnéticas aparecen cuando las cargas eléctricas se encuentran en movimiento; éstas fueron estudiadas en su interacción con las eléctricas primeramente, entre otros, por Ampère, Hans Christian Oersted (1777-1851) y Michael Faraday (1791-1867).

Como dato curioso, Oersted descubrió un efecto trascendente del electromagnetismo mientras realizaba una experiencia de cátedra con sus alumnos.

2.3.1 Fuerza coulombiana

Coulomb encontró que las fuerzas de atracción (entre cargas opuestas) y repulsión (entre cargas de igual signo) son proporcionales al producto de sus cargas y a la inversa del cuadrado de la distancia que las separa. Lo anterior queda expresado en la ecuación siguiente:

$$\boxed{F_e = \kappa \frac{qq'}{r^2}} \qquad \textbf{(2-1)}$$

---

[3] Cualquier lector que tenga los conocimientos mínimos de electricidad y magnetismo que aquí se exponen, podría reiniciar la lectura en la sección 2.4. No obstante, a lo largo del texto se hará mención de esta sección cuando sean empleados dichos conocimientos.

donde κ es la constante de proporcionalidad. El arreglo de las cargas sería el mostrado en la figura 2.5. Cuando entre las cargas q y q' exista el vacío y éstas se expresen en coulombios (C) y la distancia entre ellas en metros, la constante toma el valor de $\kappa = 8.99 \times 10^9$ N-m^2/C^2, y entonces la fuerza (2-1) en newtons, viene dada por

$$F_e = (8.99 \times 10^9 \text{ N-m}^2/\text{C}^2)\frac{qq'}{r^2}, \quad q \text{ y } q' \text{ en C, } r \text{ en m.} \qquad \textbf{(2-2)}$$

Ejemplo 2.1 Calcule la aceleración inicial que adquirirán dos cuerpos con masas de 1 kg y carga de 1 C que se encontrasen separados por una distancia de 1 m.

Solución La solución de este problema es trivial, pero ejemplifica muy bien lo grande (o pequeña) que es una carga de un coulombio. Al sustituir $q = q' = 1$ C y $r = 1$ m en la ecuación (2-2), obtenemos que la fuerza eléctrica ejercida sobre cada uno de los cuerpos es

$$F_e = 8.99 \times 10^9 \text{ N} = 8.99 \text{ GN}$$

donde hemos usado la abreviación G (giga) que representa $10^9 = 1\,000\,000\,000$. De acuerdo con la segunda ley de Newton, cuando una fuerza actúa sobre un cuerpo de masa m, éste experimenta un movimiento acelerado que satisface

$$F_e = ma \qquad \textbf{(2-3)}$$

donde a es la aceleración. Despejando a de (2-3), obtenemos

$$a = F_e/m$$

Sustituyendo F_e y $m = 1$ kg y recordando que 1 N = 1 kg-m/s^2, tenemos

$$a = 8.99 \times 10^9 \text{ N/1 kg} = 8.99 \times 10^9 \text{ m/s}^2$$

El resultado es realmente escalofriante: ¡nueve millones de kilómetros sobre segundo al cuadrado! Recordemos que la aceleración de la gravedad es 9.81 m/s^2, así que el valor obtenido es mil millones de veces mayor. Para dar un ejemplo, una partícula con una aceleración como la obtenida tardaría menos de dos segundos en llegar al Sol (la luz tarda ocho segundos) y alcanzaría la velocidad de la luz en 0.30 segundos partiendo del reposo. Lo anterior indica que una carga de un coulombio es una magnitud enorme. Obviamente, conforme se separaran las dos cargas, la fuerza que actuaría sobre ellas iría disminuyendo, pues aumentaría r. Sin embargo, a un kilómetro de distancia dicha fuerza aún sería de 8990 N.

Ejemplo 2.2 Dos cargas iguales se encuentran separadas a una distancia de un centímetro. Si la fuerza de repulsión es de 10^{-5} N (1 dina), ¿cuál es la magnitud de la carga de cada una?

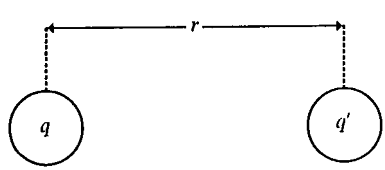


Figura 2.5 Cargas separadas una distancia r.

Solución Haciendo $q = q'$ en la ecuación (2-1) y despejando el valor de q, alcanzamos la expresión

$$q = r(F_e/\kappa)^{1/2}$$

Sustituyendo valores:

$$q = 1 \times 10^{-2}\,\mathrm{m}\left(\frac{1 \times 10^{-5}\,\mathrm{N}}{8.99 \times 10^{9}\,\mathrm{N\text{-}m^2/C^2}}\right)^{1/2} \qquad q = 3.335 \times 10^{-10}\,\mathrm{C}$$

Aprovechando que un pico coulombio es 10^{-12} coulombios, podemos expresar esta carga como

$$q = 333.5\ \mathrm{pC}$$

Este valor se suele denominar *unidad electrostática de carga* (u.e.s.), es decir,

$$1\ \text{u.e.s.} = 333.5\ \mathrm{pC} = 3.335 \times 10^{-10}\ \mathrm{C} \qquad \textbf{(2-4)}$$

PROBLEMA 2.1 Hoy día se conoce que la carga del electrón es -1.6021×10^{-19} C. Transforme este valor a attocoulombios (recuerde que 1 atto = 10^{-18}) y a u.e.s.

Respuesta $-1.6021 \times 10^{-19}\ \mathrm{C} = -0.16021\ \mathrm{aC} = -4.803 \times 10^{-10}$ u.e.s.

PROBLEMA 2.2 Suponga que en el núcleo de un átomo dos protones se encuentran separados a una distancia de 1×10^{-15} m (1 femtómetro). La carga de un protón es de 0.16021 aC. *a)* Calcule la fuerza de repulsión entre ambos protones. *b)* Investigue por qué, si la fuerza de repulsión es tan grande, los protones permanecen fijos en el núcleo y éste no se desintegra por la repulsión coulombiana.

Respuesta *a)* $F_e = 230.7$ N. *b)* Los protones permanecen unidos en el núcleo, junto con los neutrones, debido a que existe una fuerza de atracción que se opone a la de repulsión coulombiana. La fuerza de atracción nuclear no tiene ningún análogo clásico, pues sólo se hace presente a distancias muy pequeñas. A la interacción entre nucleones (protones y neutrones) que genera esta atracción se le conoce como interacción fuerte.

PROBLEMA 2.3 Calcule la fuerza de atracción entre un protón y un electrón separados a 10 nm de distancia.

Respuesta $F_e = 2.31 \times 10^{-12}\ \mathrm{N} = 2.31$ pN.

PROBLEMA 2.4 ¿A qué distancia se encuentran separadas dos cargas, una de 1 nC y otra de 700 pC, si la fuerza de repulsión entre ellas es 6.3 nN?

Respuesta $r = 1$ m.

2.3.2 Campo eléctrico

Es claro que la fuerza de Coulomb actúa «a distancia»; es decir, dos partículas cargadas interactúan entre sí sin necesidad de tocarse, estando a una distancia r una de otra. Consideremos la partícula con carga q' de la figura 2.6. Podríamos decir que el espacio que rodea a la carga no puede considerarse como «vacío», ya que en el mismo momento en que colocáramos en él una segunda carga q (de un coulombio, por ejemplo) ésta se vería atraída o repelida

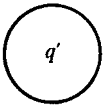


Figura 2.6 ¿Qué caracteriza al espacio que rodea una carga eléctrica?

por la primera, según sea positiva o negativa. Si q' es positiva, la carga q de 1 C sería repelida, según se indica en la figura 2.7, y si q' fuese negativa, la carga prueba de 1 C sería atraída de acuerdo con la figura 2.8.

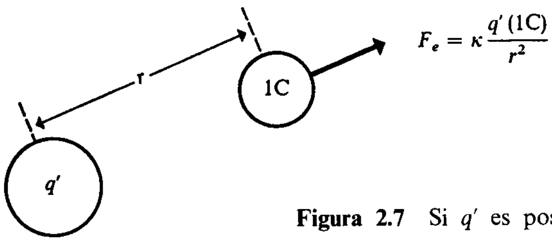


Figura 2.7 Si q' es positiva, la carga prueba es repelida.

La fuerza eléctrica que se indica en las figuras 2.7 y 2.8 será diferente si la carga prueba de 1 C se coloca más o menos separada de la carga q'. Lo anterior puede ejemplificarse si, haciendo caso omiso de la carga prueba, dibujamos en un diagrama las fuerzas a las que se vería sometida de acuerdo con el punto donde se le situara, lo que se ha realizado en la figura 2.9 (a) y (b).

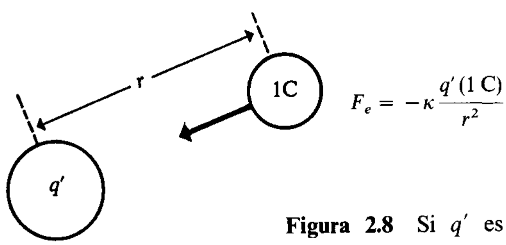


Figura 2.8 Si q' es negativa, la carga prueba es atraída.

En la figura 2.9 sólo se presentan unas cuantas posibilidades para la posición de la carga de 1 C, pero de ellas se hace patente el hecho de que el espacio que rodea a cualquier carga q' es todo un campo de fuerzas potenciales que podrían actuar al hacerse presente la carga prueba, como se observa en la figura 2.10.

La elección de una carga prueba de un coulombio trae la siguiente ventaja: cualquiera de los vectores del campo de fuerzas tiene una magnitud de

$$F_e = \kappa \frac{q'(1\text{ C})}{r^2}$$

y al dividir esta expresión entre 1 C, obtenemos la fuerza eléctrica por unidad de carga, la que se conoce como *campo eléctrico,*

$$E = F_e/(1\text{ C}) = \kappa \frac{q'}{r^2} \qquad \textbf{(2-5)}$$

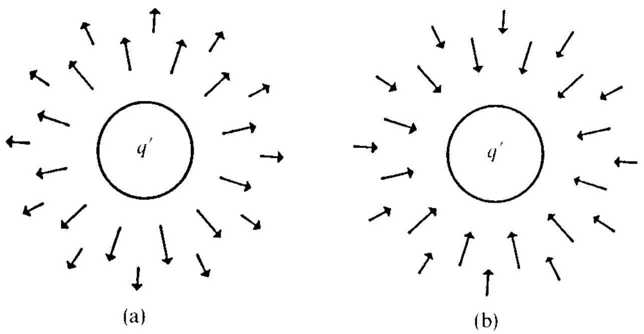


Figura 2.9 (a) Campo de fuerzas para q' positiva. (b) Campo de fuerzas para q' negativa.

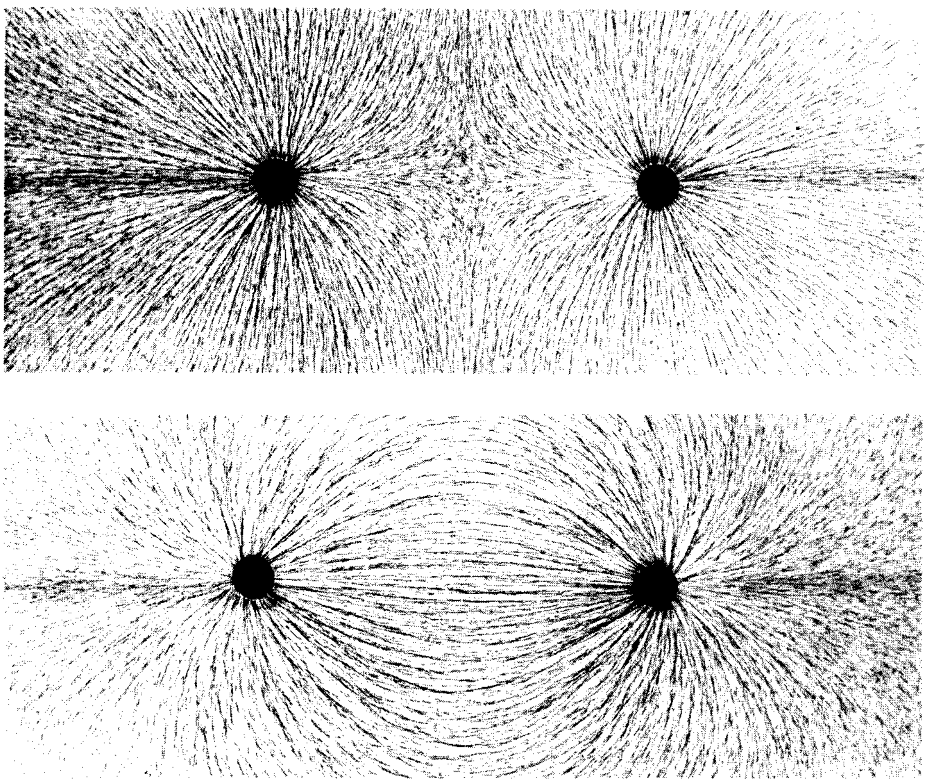


Figura 2.10 Campos de fuerzas resultantes de la interacción de dos partículas. *(Foto de limaduras de hierro, tomada de Hetch,* Physics in perspective, *© 1980. Addison-Wesley Publishing Co. Cortesía de Physics Department, Princeton University, Princeton, N. J.)*

De la ecuación (2-5), la magnitud del campo eléctrico sería la misma que la de la fuerza eléctrica, así como su dirección. A esto se debe que los campos vectoriales de la figura 2.9 sean también correspondientes a vectores de campo eléctrico, con la diferencia de que éste tiene unidades de fuerza por unidad de carga, por ejemplo, newtons sobre coulombios (N/C).

En física, un campo es cualquier cantidad que puede tomar diferentes valores en cada punto del espacio. Así, la temperatura es un campo, pues puede variar dependiendo del punto (x, y, z) donde se la mida. Podemos hablar entonces de la temperatura como una función $T(x, y, z)$. Si la temperatura en cada punto del espacio varía conforme transcurre el tiempo, entonces hablaremos de $T(x, y, z, t)$.

La velocidad de un líquido es también un campo, pero ya que la velocidad es un vector, éste es un *campo vectorial*, a diferencia del campo de temperatura, que es un *campo escalar*. En un campo vectorial, las tres componentes del vector pueden cambiar dependiendo de la posición (x, y, z) y del tiempo. Las funciones $v_x(x, y, z, t)$, $v_y(x, y, z, t)$ y $v_z(x, y, z, t)$ determinan el campo vectorial, pues dado un punto del espacio y un tiempo t, las tres funciones fijan el vector $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$.

El campo eléctrico se define como la fuerza eléctrica (que es un vector) por unidad de carga y,

por tanto, es un campo vectorial, pues, de la figura 2.9 se desprende que la fuerza eléctrica varía de un punto del espacio a otro.

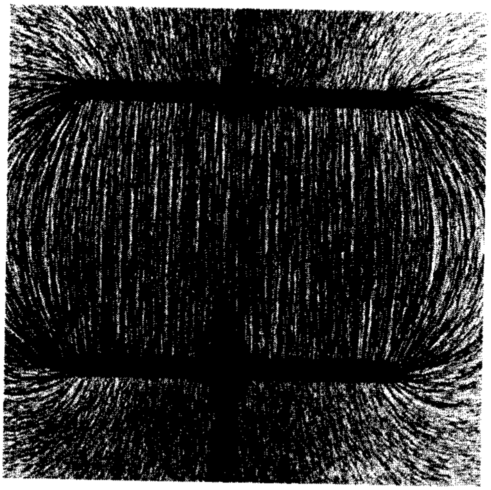
Vale la pena preguntarse cuál es la ventaja de haber creado el concepto de *campo eléctrico*. La respuesta es simple: contar con una expresión para la fuerza eléctrica ejercida por unidad de carga, lo cual permite, ahora, calcular aquélla que existe sobre cualquier otra carga q, como

$$\boxed{F_e = qE} \qquad \textbf{(2-6)}$$

Por ejemplo, la sustitución del campo eléctrico E para una partícula de carga q' de la ecuación (2-5), en la (2-6) conduce directamente a la ley de Coulomb, de donde es clara la validez de (2-6) para este caso. Dicha expresión es, además, utilizable para cualquier otro campo eléctrico. Por ejemplo, cuando tenemos un par de placas paralelas cargadas, como se muestra en la figura 2.11, el campo eléctrico es ahora constante en el espacio que hay entre las placas. Esto quiere decir que una carga prueba de 1 C, colocada en cualquier punto, sentiría una fuerza hacia abajo cuya magnitud sería idéntica a la de los vectores de la figura.

Así, cuando una carga q se colocara entre las placas, la fuerza eléctrica ejercida sobre ella vendría dada por (2-6).

PROBLEMA 2.5 Entre dos placas paralelas se tiene un campo eléctrico de 10 000 N/C. Calcule la fuerza eléctrica sobre una carga de un millón de electrones.



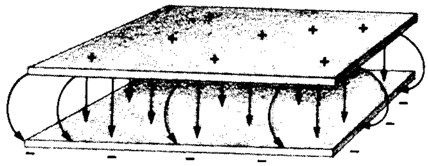


Figura 2.11 Campo eléctrico entre dos placas paralelas cargadas. *(Tomada de Hetch,* Physics in perspective, *© 1980. Addison-Wesley Publishing Co. Cortesía de Physics Department, Princeton University, Princeton, N. J.)*

Respuesta $F_e = 1.6 \times 10^{-9}$ N = 1.6 nN.

Ejemplo 2.3 ¿Cuál es el campo eléctrico creado por un protón?

Solución Empleando la expresión (2-5) obtenemos

$$E = \frac{(8.99 \times 10^9 \text{ N-m}^2/\text{C}^2)(1.6021 \times 10^{-19} \text{ C})}{r^2}$$

$$E = \frac{1.44 \times 10^{-9}}{r^2}$$

Como vemos, la magnitud del campo eléctrico depende de la distancia al protón. Cuando ésta se diera en metros, el resultado para E se obtendría en N/C. A continuación tabulamos el valor del campo eléctrico para distancias desde un nanómetro hasta un metro, con lo que nos ejercitamos un poco en el sistema internacional de unidades.

DISTANCIA	CAMPO ELECTRICO (en N/C)
1 nm	1.44×10^9
10 nm	1.44×10^7
100 nm	1.44×10^5
1 μm	1.44×10^3
10 μm	1.44×10^1
100 μm	1.44×10^{-1}
1 mm	1.44×10^{-3}
1 cm	1.44×10^{-5}
1 dm	1.44×10^{-7}
1 m	1.44×10^{-9}

Obviamente, como podemos ver en la figura 2.9, la dirección del vector campo eléctrico es hacia afuera del protón.

Ejemplo 2.4 Encuentre gráficamente el campo eléctrico a una distancia de 1 mm para un protón que se encuentra dentro de dos placas paralelas. El campo eléctrico entre las placas en ausencia del protón es de 0.001 N/C.

Solución Con este problema se trata de ejemplificar la adición de dos campos eléctricos. Al colocar la carga prueba de 1 C a una distancia de 1 mm del protón, ésta sentirá dos fuerzas: una que lo tiende a separar del protón, con una magnitud $E_1 = 1.44 \times 10^{-3}$ N (véase el ejemplo anterior) y otra que lo tiende a llevar a la placa negativa, con una magnitud de $E_2 = 1 \times 10^{-3}$ N. La fuerza resultante sobre la carga prueba, o sea, el campo eléctrico total, será igual a la suma de ambos campos considerados como vectores. En la figura 2.12 hemos realizado dicha suma vectorial para algunos puntos alrededor del protón.

Los vectores resultantes de la figura 2.12 muestran la magnitud y dirección de la fuerza eléctrica que «sentiría» una carga de 1 C si fuera colocada en algunos de los ocho puntos mostrados.

Hemos visto que el campo eléctrico puede variar de un punto a otro del espacio. En aquellos lugares donde el campo eléctrico adquiere un valor elevado, una partícula cargada sufrirá una fuerza grande y en aquellos donde el campo sea pequeño, la fuerza eléctrica será también pequeña.

Como en la definición de campo eléctrico se ha usado una carga positiva como referencia; es decir, se ha definido a éste como la fuerza por unidad de carga positiva, la dirección de la fuerza ejercida sobre una carga q será la misma que la del campo eléctrico E en ese punto si q es positiva; ambos vectores (F_e y E) tendrán direcciones opuestas si q es negativa. Lo anterior

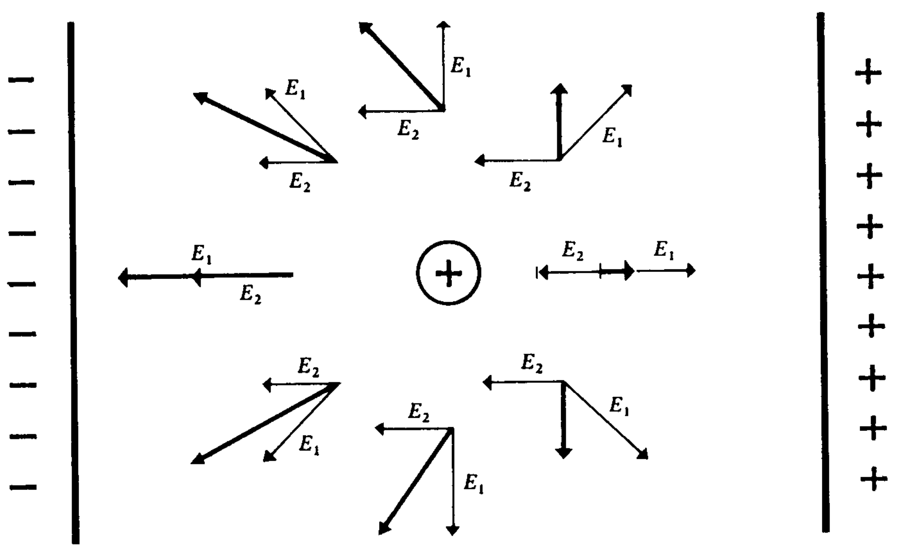


Figura 2.12 Adición vectorial del campo E_1 producido por el protón y el campo E_2 producido por las placas cargadas para los ángulos 0, 45, 90, 135 y 180° entre ambos. La resultante está representada por la línea más gruesa.

queda claro al observar la fórmula (2-6). Es decir, el campo eléctrico especifica la dirección en la cual se movería una partícula cargada positivamente que fuera colocada en ese punto como resultado de la fuerza que actúa sobre ella. Si la partícula es negativa, ésta se moverá en dirección contraria al campo eléctrico cuando fuera colocada en ese lugar. Para que esto quede claro, nos referiremos a la figura 2.11. Un protón colocado en medio de dos placas paralelas tenderá a moverse en la dirección especificada por el campo, es decir, hacia la placa negativa, mientras que un electrón lo haría en el sentido inverso, hacia la positiva.

Ejemplo 2.5 Estime la trayectoria que seguiría una partícula α (formada por dos protones y dos neutrones) cuando es enviada sobre un protón con las condiciones iniciales especificadas en la figura 2.13.

Solución Recordemos, para empezar, que los vectores del campo eléctrico creado por el protón apuntan hacia afuera de éste. Como la partícula α es positiva, la fuerza que ejerce el protón tendrá la misma dirección que el campo eléctrico, por lo que existirá una fuerza de repulsión, la cual irá en aumento conforme la partícula α se acerque. Dicha fuerza producirá una desaceleración sobre la partícula.

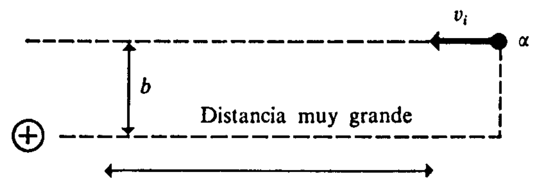


Figura 2.13 v_i es la velocidad inicial de la partícula α y b es el llamado «parámetro de impacto» que se supone pequeña para que exista una interacción apreciable. Supóngase, durante todo el experimento, que el protón permanece fijo en el espacio.

En la figura 2.14 se ha esquematizado la posición de la partícula α a iguales intervalos de tiempo. La máxima fuerza de repulsión se tiene en el punto A de la trayectoria; después de un tiempo considerable, la partícula se alejaría del protón en la dirección especificada por el ángulo θ a la velocidad v_i.

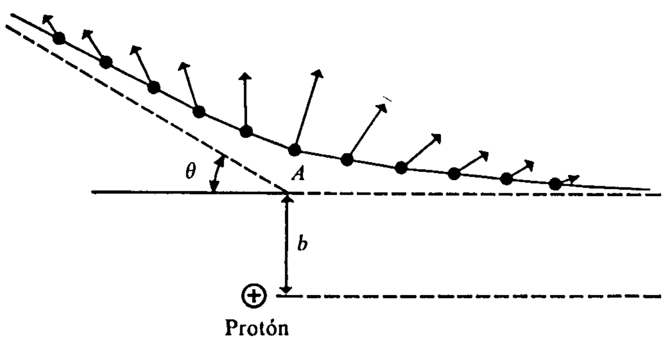


Figura 2.14 Trayectoria estimada para una partícula α que se lanza contra un protón. En el punto A, la fuerza de repulsión es perpendicular a la trayectoria. Al ángulo θ se le conoce como ángulo de dispersión.

PROBLEMA 2.6 ¿Cómo se modificaría el ángulo θ del ejemplo anterior si

a) en lugar del protón se tiene un núcleo pesado?
b) el parámetro de impacto es cero?
c) el parámetro de impacto aumenta?
d) la velocidad inicial de la partícula α es mayor?

2.3.3 Potencial eléctrico

En esta sección nos preguntaremos cuál es la energía necesaria para llevar una carga q de un punto a otro del espacio. Por simplicidad, supondremos que q es una carga positiva.

De acuerdo con la ley de conservación de la energía, cuando se transporta una carga desde el punto uno hasta el punto dos, se realizará un trabajo ω que deberá ser igual a la diferencia de energías potenciales en uno y dos:

$$V_2 - V_1 = \Delta V = \omega \tag{2-7}$$

Si se desarrolla un *trabajo sobre la carga*[4], su energía potencial en dos debe ser mayor que en uno, es decir,

$$\omega > 0 \rightarrow V_2 > V_1 \tag{2-8}$$

Por el contrario, si la carga hace *trabajo sobre su entorno*, entonces alcanza un punto con menor energía potencial que al principio:

$$\omega < 0 \rightarrow V_2 < V_1 \tag{2-9}$$

Estas implicaciones y la ecuación (2-7) son válidas también para el caso del campo gravitacional. Cuando una masa m aumenta su energía potencial al ser elevada de h_1 a h_2 $(h_2 > h_1)$ se necesita hacer un trabajo sobre ella. El trabajo empleado hace aumentar la energía potencial de la masa. En este caso tenemos

$$\omega = \Delta V = mg(h_2 - h_1) > 0$$

En cambio, cuando $h_2 < h_1$, la masa desciende, disminuyendo su energía potencial, pudiendo realizar sobre su entorno un trabajo. Ahora tanto ω como ΔV son negativos.

En el caso eléctrico, el campo que hace variar la energía potencial de un punto a otro es el campo eléctrico y no el gravitacional, como en los ejemplos anteriores[5].

Consideremos que la carga q positiva se desee aproximar a un protón desde el punto uno al punto dos (véase Fig. 2.15). Para ello será necesario realizar un

---

[4] En este caso hablaremos de un *trabajo positivo*, convención que no es la usualmente empleada en termodinámica. Para emplear la misma convención que en termodinámica, la fórmula (2-7) debería escribirse $\Delta V = -\omega$.

[5] Las interacciones electromagnéticas ocupan el tercer lugar en la naturaleza en cuanto a su magnitud. Son mayores que las gravitacionales (véase Ejemplo 9), pero menores que las que ocurren en el decaimiento radiactivo β (interacciones débiles, véase Sec. 2.10) y en el núcleo atómico (interacciones fuertes).

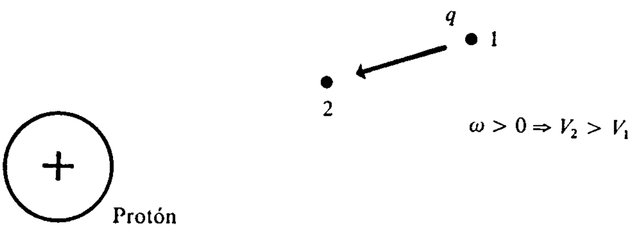


Figura 2.15 La energía potencial de una carga positiva es mayor cerca que lejos de un protón.

trabajo sobre la carga, pues intentamos llevarla de un lugar donde experimenta menos repulsión a otro donde existe mayor repulsión, es decir, ω es positivo. Debido a esto, y de acuerdo con (2-8), $V_2 > V_1$.

En este caso, la trayectoria de la carga q tiene dirección opuesta al campo eléctrico producido por el protón (véase Fig. 2.9). Por tanto, de acuerdo con (2-6), una fuerza eléctrica de magnitud Eq se opone al movimiento de la partícula de uno a dos.

Por el contrario, si la carga positiva q se acerca a un electrón, el campo eléctrico (véase Fig. 2.10) y, por tanto, la fuerza eléctrica actúa a favor de su movimiento, por lo que se puede realizar un trabajo ($\omega < 0$), disminuyendo con ello su energía potencial (Fig. 2.16).

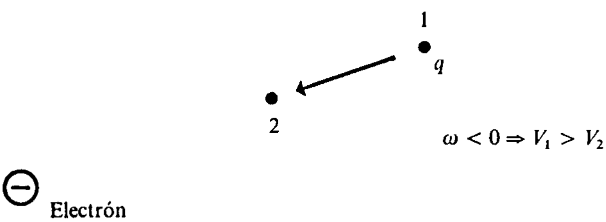


Figura 2.16 La energía potencial de una carga positiva es menor donde mayor es la atracción.

Al igual que en un campo gravitacional, se escoge arbitrariamente el cero de la energía potencial gravitacional (el plano para el cual $h = 0$), lo mismo debe hacerse en un campo eléctrico para la energía potencial eléctrica.

Por convención, $V = 0$ para los puntos donde no se ejerza ni atracción ni repulsión sobre la carga q, lo cual siempre ocurre si se encuentra a una distancia infinita de cualquier otra carga eléctrica.

La energía potencial en cualquier punto $V(x, y, z)$ se calcula por el trabajo realizado para llevar la carga q desde el infinito (punto uno) hasta el punto (x, y, z) en cuestión. Lo anterior es claro si, empleando (2-7),

$$V(x, y, z) - V_1(\infty) = \omega$$

recordamos que $V_1(\infty) = 0$, por convención, y entonces

$$V(x, y, z) = \omega \tag{2-10}$$

Así como al campo eléctrico se le definió como la fuerza por unidad de carga, a la energía potencial por unidad de carga se le conoce como *potencial eléctrico,* ϕ,

$$\phi = \frac{V}{q} \tag{2-11}$$

De (2-10) y (2-11) se desprende que si $q = 1$ C, el potencial ϕ en un punto puede interpretarse como el trabajo para llevar una carga unitaria desde el infinito hasta el punto en cuestión. Las unidades del potencial eléctrico son de energía sobre carga. Un potencial de un voltio (V) se tendría cuando una carga de 1 C tuviera una energía potencial de 1 J:

$$1\text{ V} = \frac{1\text{ J}}{1\text{ C}}$$

O sea, que un voltio por un coulombio es igual a un julio. La diferencia de potenciales en dos puntos dados del espacio sería

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = \frac{1}{q}(V_2 - V_1) \tag{2-12}$$

Pero como V_2 es el trabajo para llevar a q del ∞ a 2 y V_1 del ∞ a 1, $V_2 - V_1$ es precisamente el trabajo para llevar a q de 1 a 2 (véase Fig. 2.17):

$$\omega_{12} = V_2 - V_1 \tag{2-13}$$

Sustituyendo (2-13) en (2-12),

$$\Delta\phi = \frac{\omega_{12}}{q} \tag{2-14}$$

Podemos decir, entonces, que la diferencia de potencial entre los puntos 1 y 2 es el trabajo necesario para llevar la unidad de carga de 1 a 2.

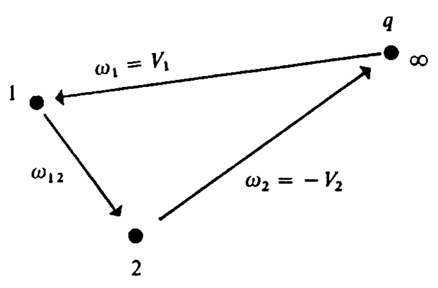


Figura 2.17 Dado que en el ciclo especificado se parte de ∞, se llega a 1, luego a 2 y se retorna a ∞, el trabajo total del ciclo es cero y entonces $\omega_1 + \omega_{12} + \omega_2 = 0$, por lo que $V_1 + \omega_{12} - V_2 = 0$; $V_2 - V_1 = \omega_{12}$.

Rearreglando (2-11) y (2-14), tenemos

$$\boxed{V = \phi q} \tag{2-15}$$

$$\boxed{\omega_{12} = (\Delta\phi)q} \tag{2-16}$$

Dichas fórmulas son válidas para cualquier carga q y se leerían como sigue:

— **La energía potencial eléctrica de una carga q en un punto dado es igual al producto de q por el potencial eléctrico en el punto.**
— **El trabajo necesario para llevar una carga q de un punto a otro es igual al producto de q por la diferencia de potencial entre ambos puntos.**

Así como los cuerpos tienden espontáneamente a caer desde puntos de mayor potencial gravitacional a otros de menor potencial, debido a que en este proceso ω es negativo, la fórmula (2-16) puede interpretarse de la misma forma para sistemas con cargas eléctricas.

Si q es positiva, ésta tenderá espontáneamente a viajar hacia puntos con menor potencial eléctrico, ya que así $\Delta\phi < 0$ y $q\Delta\phi = \omega < 0$.

Si q es negativa, ésta tenderá espontáneamente a pasar hacia puntos con mayor potencial eléctrico, ya que $\Delta\phi > 0$ y $q\Delta\phi = \omega < 0$.

Ejemplo 2.6 Calcule la diferencia de potencial $\Delta\phi$ entre dos placas cargadas separadas a una distancia d, con un campo eléctrico E constante en su interior.

Solución La ecuación que vamos a emplear es la (2-14), que indica que $\Delta\phi$ es el trabajo necesario para llevar una carga de 1 C de una placa a la otra $\Delta\phi = \omega_{12}/1$ C. El proceso se indica en la figura 2.18.

La fuerza entre placas es una constante igual al producto de carga por campo eléctrico [Ec. (2-6)] y, como el trabajo es fuerza por distancia, tenemos

$$\omega_{12} = F_e d \quad \text{y} \quad F_e = E(1\text{ C})$$

entonces,

$$\Delta\phi = \omega_{12}/1\text{ C} = \frac{F_e d}{1\text{ C}} = \frac{(1\text{ C})Ed}{(1\text{ C})} = Ed$$

Como puede observarse, la elección arbitraria del valor de la carga (1 C) es intrascendente, pues finalmente no interviene en las ecuaciones, por cancelación.

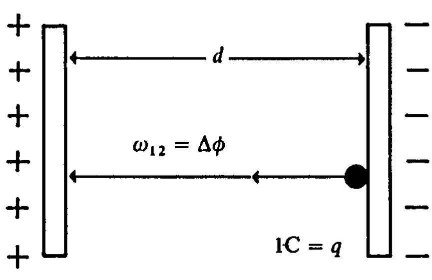


Figura 2.18 La diferencia de potencial entre las placas se obtiene del trabajo necesario para transportar 1 C de la placa negativa a la positiva.

Normalmente, la diferencia de potencial en voltios es una cantidad medible, así que la ecuación

$$E = \frac{\Delta\phi}{d} \tag{2-17}$$

permite calcular el campo eléctrico entre dos placas.

Ejemplo 2.7 Calcule el cambio en la energía potencial cuando un electrón se transporta de un punto a otro, entre los cuales existe una diferencia de potencial igual a un voltio.

Solución Si despejamos $V_2 - V_1$ de la ecuación (2-12), colocando e en el lugar de q, obtenemos

$$V_2 - V_1 = e\Delta\phi$$

Sustituyamos los valores

$$V_2 - V_1 = -1.6021 \times 10^{-19}\,\mathrm{C} \cdot 1\,\mathrm{V} = -1.6021 \times 10^{-19}\,\mathrm{J}$$

al valor absoluto de esta energía se le conoce comúnmente como un *electrón-voltio* (eV), es decir,

$$1\,\mathrm{eV} = 1.6021 \times 10^{-19}\,\mathrm{J} \tag{2-18}$$

PROBLEMA 2.7 La energía potencial necesaria para llevar un electrón de la superficie del sodio metálico hasta el infinito es 2.28 eV. Transforme este valor a *ergios* (1 erg = = 10^{-7} J).

Respuesta 3.653×10^{-12} erg.

PROBLEMA 2.8 Por medio de calentamiento es posible dar la energía necesaria para sacar un electrón de la plata (efecto termiónico). Sólo basta dar al electrón una energía de 0.730 aJ a 600 °C. Transforme este valor a electrón-voltios.

Respuesta 4.56 eV.

Ejemplo 2.8 Obtenga una expresión para el potencial a una distancia r de una carga q'.

Solución Se calculará ϕ a partir de (2-11). Escogiendo $q = 1$ C, y de acuerdo con (2-10), el potencial a una distancia r es igual al trabajo realizado para llevar la carga prueba desde el infinito hasta una distancia r de la carga q'.

$$\phi = \frac{\omega}{1\,\mathrm{C}} \tag{2-19}$$

Ahora bien, el trabajo ω no es simple de calcular, pues la fuerza eléctrica varía mientras la carga prueba se acerca a q' (Fig. 2.19).

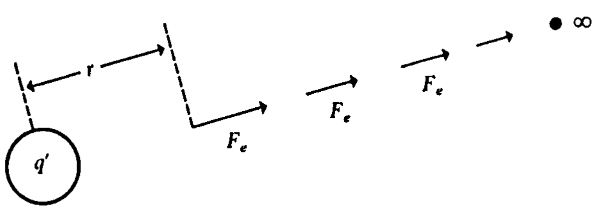


Figura 2.19 Fuerzas eléctricas a lo largo de la trayectoria de la carga unitaria desde el infinito (donde $F_e = 0$) hasta r, donde $F_e = \dfrac{\kappa(1\ \mathrm{C})(q')}{r^2}$.

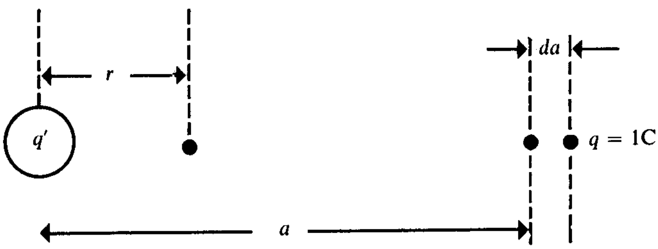


Figura 2.20

Cuando la carga unitaria se desplace una diferencial de distancia desde a hasta $a - da$ (Fig. 2.20), la fuerza eléctrica es constante e igual a

$$F_e = \kappa \frac{(1\ \mathrm{C})(q')}{a^2} \tag{2-20}$$

por lo que la diferencial de trabajo que se realiza en este proceso es el producto de fuerza por distancia:

$$d\omega = -F_e da \tag{2-21}$$

donde el signo menos aparece porque la fuerza y la trayectoria tienen direcciones opuestas.

Sumar todas estas diferenciales de trabajo, desde que $a \to \infty$ hasta que $a = r$, significa integrar la ecuación (2-21) con estos límites, obteniéndose el trabajo

$$\omega = -\int_{a\to\infty}^{a=r} F_e da \tag{2-22}$$

Sustituyendo (2-20) en (2-22):

$$\omega = -\kappa(1\ \mathrm{C})q' \int_{\infty}^{r} \frac{da}{a^2}$$

Realizando la integral:

$$\omega = -\kappa(1\ \mathrm{C})q' \left[-\frac{1}{a}\right]_{\infty}^{r} = -\kappa(1\ \mathrm{C})q' \left[-\frac{1}{r}\right]$$

$$\omega = \frac{\kappa(1\ \mathrm{C})q'}{r} \tag{2-23}$$

Finalmente, sustituyendo (2-23) en (2-19):

$$\boxed{\phi = \kappa \frac{q'}{r}} \tag{2-24}$$

Ejemplo 2.9 Obtenga la expresión de la energía potencial para una carga q situada a una distancia r de una carga q'.

Solución Una vez obtenido el potencial (2-24), basta usar (2-15) para alcanzar el resultado deseado. La razón es que ϕ ha sido calculado como la energía potencial por unidad de carga y para calcular V sólo es necesario multiplicar ϕ por la carga en cuestión. Sustituyendo (2-24) en (2-15) obtenemos

$$V = \kappa \frac{qq'}{r} \qquad \textbf{(2-25)}$$

V sería, precisamente, el trabajo para llevar la carga q desde el infinito hasta una distancia r de q'. Como vemos, si q y q' tienen iguales signos, la energía potencial es positiva, lo mismo que ω [véase Ec. (2-10)]. En cambio, si q y q' tienen signos opuestos, V y ω son negativos.

PROBLEMA 2.9 Cuál sería la energía potencial de un electrón a una distancia de un armstrong (Å) de un protón (1 Å = 10^{-10} m).

Respuesta. $V = -2.31 \times 10^{-18}$ J = -2.31 aJ.

PROBLEMA 2.10 Una partícula α se lanza frontalmente sobre un protón a una velocidad de 2 $\frac{\text{Mm}}{\text{s}}$ (M = mega = 10^6). La repulsión hace que la partícula α se frene a cierta distancia r del protón. En ese punto toda su energía cinética se habrá transformado en energía potencial. Calcule la distancia r. La masa de una partícula α es 4.00278 u.m.a. (1 uma = 1.66043 × 10^{-27} kg).

Respuesta $r = 3.47 \times 10^{-14}$ m.

PROBLEMA 2.11 Calcule la diferencia de potencial que existe entre un punto a una distancia de 1 nm de un protón y otro a una distancia de 10 nm.

Respuesta $\Delta\phi = -1.296$ V.

2.3.4 Campo magnético

El tema de la electrodinámica es el estudio de las cargas en movimiento. Cuando dos cargas eléctricas están quietas (electrostática), la fuerza es proporcional a $1/r^2$ (ley de Coulomb), pero esto deja de ser cierto cuando hay movimiento relativo entre ellas. En este caso, la fuerza no depende sólo de $1/r^2$, sino, además y de un modo complicado, del movimiento de las mismas. Sin embargo, hay un principio general que hace posible tratar la fuerza de una forma simple, que indica

$$F = F_e + F_m \qquad \textbf{(2-26)}$$

El primer término o fuerza eléctrica,

$$F_e = qE \qquad \textbf{(2-27)}$$

es la componente de la fuerza que es independiente del movimiento de la carga q, lo cual implica que (2-6) puede emplearse en electrostática o en electrodinámica.