Electrón

*Para otros usos de este término, véase*[*Electrón (desambiguación)*](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n_(desambiguaci%C3%B3n))*.*

|  |  |
| --- | --- |
| **Electrón e− e−** | |
| [Crookes tube-in use-lateral view-standing cross prPNr°11.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Crookes_tube-in_use-lateral_view-standing_cross_prPNr%C2%B011.jpg) La naturaleza de [partícula](https://es.wikipedia.org/wiki/Part%C3%ADcula_subat%C3%B3mica) del electrón se demostró por primera vez con un [tubo de Crookes](https://es.wikipedia.org/wiki/Tubo_de_Crookes). En esta ilustración, un haz de electrones proyecta el perfil en forma de cruz del objetivo contra la cara del tubo.[1](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-Dahl1997-1) | |
| **Clasificación** | [Partículas elementales](https://es.wikipedia.org/wiki/Part%C3%ADculas_elementales)[2](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-prl50-2) |
| **Familia** | [Fermión](https://es.wikipedia.org/wiki/Fermi%C3%B3n) |
| **Grupo** | [Leptón](https://es.wikipedia.org/wiki/Lept%C3%B3n) |
| [**Generación**](https://es.wikipedia.org/wiki/Generaci%C3%B3n_(f%C3%ADsica_de_part%C3%ADculas)) | Primera |
| [**Interacción**](https://es.wikipedia.org/wiki/Interacciones_fundamentales) | [Gravedad](https://es.wikipedia.org/wiki/Gravedad), [Electromagnetismo](https://es.wikipedia.org/wiki/Interacci%C3%B3n_electromagn%C3%A9tica), [Nuclear débil](https://es.wikipedia.org/wiki/Interacci%C3%B3n_d%C3%A9bil) |
| [**Antipartícula**](https://es.wikipedia.org/wiki/Antipart%C3%ADcula) | [Positrón](https://es.wikipedia.org/wiki/Positr%C3%B3n) |
| **Teorizada** | [Richard Laming](https://es.wikipedia.org/wiki/Richard_Laming) (1838-1851),[3](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n" \l "cite_note-farrar-3) [G. Johnstone Stoney](https://es.wikipedia.org/wiki/G._Johnstone_Stoney) (1874) y otros.[4](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-arabatzis-4) [5](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-buchwald1-5) |
| **Descubierta** | [J. J. Thomson](https://es.wikipedia.org/wiki/J._J._Thomson) (1897)[6](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-thomson-6) |
| [**Masa**](https://es.wikipedia.org/wiki/Masa_invariante) | 9,109 382 91(40)×10−31 [kg](https://es.wikipedia.org/wiki/Kilogramo)[7](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-7) 5,485 799 094 6(22)×10−4[uma](https://es.wikipedia.org/wiki/Unidad_de_masa_at%C3%B3mica)[8](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-8) 0,510998928(11) [MeV](https://es.wikipedia.org/wiki/MeV)/c2 [9](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-9) 1822.8884845 (14)−1 u[nota 1](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-10) |
| [**Carga eléctrica**](https://es.wikipedia.org/wiki/Carga_el%C3%A9ctrica) | −1 [e](https://es.wikipedia.org/wiki/Carga_el%C3%A9ctrica#Carga_el.C3.A9ctrica_elemental) −1.602 176 565(35)×10−19 [C](https://es.wikipedia.org/wiki/Culombio)[10](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-11)[nota 2](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-12) |
| [**Momento magnético**](https://es.wikipedia.org/wiki/Momento_magn%C3%A9tico) | −1.00115965218111 [μB](https://es.wikipedia.org/wiki/Magnet%C3%B3n_de_Bohr)[11](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-2010_CODATA-13) |
| [**Carga de color**](https://es.wikipedia.org/wiki/Carga_de_color) | - |
| [**Espín**](https://es.wikipedia.org/wiki/Esp%C3%ADn) | ± 1/2 |
| [[editar datos en Wikidata](https://www.wikidata.org/wiki/Q2225)] | |

El **electrón** (del [griego clásico](https://es.wikipedia.org/wiki/Griego_cl%C3%A1sico) ἤλεκτρον *ḗlektron* ['ámbar'](https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81mbar)), comúnmente representado por el símbolo: **e−**, es una [partícula subatómica](https://es.wikipedia.org/wiki/Part%C3%ADcula_subat%C3%B3mica) con una [carga eléctrica elemental](https://es.wikipedia.org/wiki/Carga_el%C3%A9ctrica#Carga_el.C3.A9ctrica_elemental) negativa.[12](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-14) Un electrón no tiene componentes o subestructura conocidos, en otras palabras, generalmente se define como una [partícula elemental](https://es.wikipedia.org/wiki/Part%C3%ADcula_elemental). En la[teoría de cuerdas](https://es.wikipedia.org/wiki/Teor%C3%ADa_de_cuerdas) se dice que un electrón se encuentra formado por una subestructura (cuerdas).[2](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-prl50-2) Tiene una masa que es aproximadamente 1836 veces menor con respecto a la del [protón](https://es.wikipedia.org/wiki/Prot%C3%B3n).[13](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-nist_codata_mu-15) El [momento angular](https://es.wikipedia.org/wiki/Momento_angular) (espín) intrínseco del electrón es un valor semientero en unidades de [*ħ*](https://es.wikipedia.org/wiki/Constante_de_Planck), lo que significa que es un [fermión](https://es.wikipedia.org/wiki/Fermi%C3%B3n). Su[antipartícula](https://es.wikipedia.org/wiki/Antipart%C3%ADcula) es denominada [positrón](https://es.wikipedia.org/wiki/Positr%C3%B3n): es idéntica excepto por el hecho de que tiene cargas —entre ellas, la eléctrica— de signo opuesto. Cuando un electrón colisiona con un positrón, las dos partículas pueden resultar totalmente aniquiladas y producir [fotones](https://es.wikipedia.org/wiki/Fot%C3%B3n) de [rayos gamma](https://es.wikipedia.org/wiki/Rayos_gamma).

Los electrones, que pertenecen a la primera generación de la familia de partículas de los [leptones](https://es.wikipedia.org/wiki/Leptones),[14](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-curtis74-16) participan en las [interacciones fundamentales](https://es.wikipedia.org/wiki/Interacciones_fundamentales), tales como la[gravedad](https://es.wikipedia.org/wiki/Gravedad), el [electromagnetismo](https://es.wikipedia.org/wiki/Electromagnetismo) y la [fuerza nuclear débil](https://es.wikipedia.org/wiki/Fuerza_nuclear_d%C3%A9bil).[15](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-anastopoulos1-17) Como toda la materia, posee propiedades [mecánico-cuánticas](https://es.wikipedia.org/wiki/Mec%C3%A1nica_cu%C3%A1ntica) tanto de [partículas como de ondas](https://es.wikipedia.org/wiki/Dualidad_onda-part%C3%ADcula), de tal manera que pueden colisionar con otras partículas y pueden ser [difractadas](https://es.wikipedia.org/wiki/Difracci%C3%B3n_de_electrones) como la luz. Esta dualidad se demuestra de una mejor manera en experimentos con electrones a causa de su ínfima masa. Como los electrones son fermiones, dos de ellos no pueden ocupar el mismo [estado cuántico](https://es.wikipedia.org/wiki/Estado_cu%C3%A1ntico), según el [principio de exclusión de Pauli](https://es.wikipedia.org/wiki/Principio_de_exclusi%C3%B3n_de_Pauli).[14](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-curtis74-16)

El concepto de una cantidad indivisible de carga eléctrica fue teorizado para explicar las propiedades químicas de los átomos, el primero en trabajarlo fue el filósofo naturalista británico [Richard Laming](https://es.wikipedia.org/wiki/Richard_Laming) en 1838.[4](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-arabatzis-4) El nombre electrón para esta carga fue introducido el 1894 por el físico irlandés [George Johnstone Stoney](https://es.wikipedia.org/wiki/George_Johnstone_Stoney). Sin embargo, el electrón no fue identificado como una partícula hasta 1897 por [Joseph John Thomson](https://es.wikipedia.org/wiki/Joseph_John_Thomson) y su equipo de físicos británicos.[6](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-thomson-6) [16](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-dahl-18) [17](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-wilson-19)

En muchos fenómenos físicos —tales como la [electricidad](https://es.wikipedia.org/wiki/Electricidad), el [magnetismo](https://es.wikipedia.org/wiki/Magnetismo) o la [conductividad térmica](https://es.wikipedia.org/wiki/Conductividad_t%C3%A9rmica)— los electrones tienen un papel esencial. Un electrón en movimiento genera un [campo electromagnético](https://es.wikipedia.org/wiki/Campo_electromagn%C3%A9tico) y es a su vez desviado por los campos electromagnéticos externos. Cuando se acelera un electrón, puede absorber o radiar energía en forma de fotones. Los electrones, junto con núcleos atómicos formados de [protones](https://es.wikipedia.org/wiki/Prot%C3%B3n) y [neutrones](https://es.wikipedia.org/wiki/Neutr%C3%B3n), conforman los [átomos](https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81tomo), sin embargo, los electrones contribuyen con menos de un 0,06 % a la masa total de los mismos. La misma [fuerza de Coulomb](https://es.wikipedia.org/wiki/Fuerza_de_Coulomb), que causa la atracción entre protones y electrones, también hace que los electrones queden enlazados. El intercambio o compartición de electrones entre dos o más átomos es la causa principal del [enlace químico](https://es.wikipedia.org/wiki/Enlace_qu%C3%ADmico).[18](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-Pauling-20)Los electrones pueden ser creados mediante la [desintegración beta](https://es.wikipedia.org/wiki/Desintegraci%C3%B3n_beta) de [isótopos radiactivos](https://es.wikipedia.org/wiki/Is%C3%B3topos_radiactivos) y en colisiones de alta energía como, por ejemplo, la entrada de un [rayo cósmico](https://es.wikipedia.org/wiki/Rayo_c%C3%B3smico) en la atmósfera. Por otra parte, pueden ser destruidos por aniquilación con positrones, y pueden ser absorbidos durante la [nucleosíntesis estelar](https://es.wikipedia.org/wiki/Nucleos%C3%ADntesis_estelar). Existen instrumentos de laboratorio capaces de contener y observar electrones individuales así como plasma de electrones, además, algunos telescopios pueden detectar plasma de electrones en el espacio exterior. Los electrones tienen muchas aplicaciones, entre ellas la electrónica, la soldadura, los tubos de rayos catódicos, los[microscopios electrónicos](https://es.wikipedia.org/wiki/Microscopio_electr%C3%B3nico), la [radioterapia](https://es.wikipedia.org/wiki/Radioterapia), los [láseres](https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1ser), los detectores de ionización gaseosa y los [aceleradores de partículas](https://es.wikipedia.org/wiki/Acelerador_de_part%C3%ADculas).

## **Historia[[editar](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Electr%C3%B3n&action=edit&section=1" \o "Editar sección: Historia)]**

*Véase también:*[Historia de la electricidad](https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_la_electricidad)

Los antiguos griegos se percataron que el [ámbar](https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81mbar) atraía pequeños objetos cuando se le frotaba contra el pelaje. Junto con el rayo, este fenómeno es una de las primeras experiencias conocidas de los humanos con la [electricidad](https://es.wikipedia.org/wiki/Electricidad).[19](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-21) En su tratado de 1600, [*De Magnete*](https://es.wikipedia.org/wiki/De_Magnete), el científico inglés [William Gilbert](https://es.wikipedia.org/wiki/William_Gilbert) definió el término [*neolatín*](https://es.wikipedia.org/wiki/Neolat%C3%ADn) «electricus» para referirse a la propiedad de un objeto de atraer pequeños objetos después de ser frotado.[20](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-22) Tanto las palabras eléctrico como electricidad derivan del latín «electrum», que a su vez proviene de la palabra griega «ήλεκτρον» («elektron»), que significa ámbar.

A principios de los años 1700, [Francis Hauksbee](https://es.wikipedia.org/wiki/Francis_Hauksbee) y [Charles François de Cisternay du Fay](https://es.wikipedia.org/wiki/Charles_Fran%C3%A7ois_de_Cisternay_du_Fay) descubrieron, cada uno por su lado, lo que creían que eran dos tipos de electricidad friccional: uno generado por el rozamiento con vidrio, y el otro por el rozamiento con [resina](https://es.wikipedia.org/wiki/Resina). A partir de esto, Du Fay teorizó que la electricidad consistía en dos fluidos eléctricos, el «vítreo» y el «resinoso», que estaban separados por la fricción y que se neutralizaban el uno al otro cuando eran combinados.[21](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-23) Una década más tarde, [Benjamin Franklin](https://es.wikipedia.org/wiki/Benjamin_Franklin) propuso que la electricidad no provenía de dos tipos diferentes de fluido eléctrico sino de un mismo fluido a presiones diferentes; les dio la nomenclatura moderna de carga «positiva» y «negativa», respectivamente.[22](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-24) Franklin pensaba que el portador de carga era positivo, pero no identificó correctamente qué situación reflejaba un excedente del portador de carga y en qué caso era un déficit.[23](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-25)

Entre 1838 y 1851, el filósofo naturalista británico [Richard Laming](https://es.wikipedia.org/wiki/Richard_Laming) desarrolló la idea de que un átomo estaba compuesto de un núcleo de materia rodeado por partículas subatómicas con carga eléctrica.[3](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-farrar-3) A partir de 1846, el físico alemán [Wilhelm Eduard Weber](https://es.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Eduard_Weber) teorizó que la electricidad estaba compuesta de fluidos cargados positivamente y negativamente, y que su interacción estaba gobernada por la [ley del inverso del cuadrado](https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_del_inverso_del_cuadrado). Más tarde, tras estudiar el fenómeno de la [electrólisis](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3lisis), el físico irlandés [George Johnstone Stoney](https://es.wikipedia.org/wiki/George_Johnstone_Stoney) sugirió que existía una «única cantidad definida de electricidad», la carga de un ion monovalente; siendo capaz de estimar el valor de esta [carga elemental](https://es.wikipedia.org/wiki/Carga_elemental) mediante las [leyes de Faraday](https://es.wikipedia.org/wiki/Michael_Faraday) de la electrólisis.[24](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-26) Sin embargo, Stoney creía que estas cargas estaban ligadas permanentemente a átomos y que no podían ser removidas. En 1881, el físico alemán [Hermann von Helmholtz](https://es.wikipedia.org/wiki/Hermann_von_Helmholtz) argumentó que tanto las cargas positiva como negativa estaban divididas en partes elementales, cada una de las cuales se comportaba como «átomos de electricidad».[4](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-arabatzis-4)

En 1894, Stoney estableció el término inglés «electron» para describir estos cambios elementales: «[...] se hizo una estimación de la cantidad real de esta unidad de electricidad fundamental, que es la más destacable, por lo que me he aventurado a sugerir el nombre 'electron'».[25](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-27) Dicha palabra «electrón», que deriva del inglés, es una combinación de la palabra «electricidad» y del sufijo griego «patrón» ('el medio por el cual se hace').[26](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-28) [27](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-29)

### Descubrimiento**[[editar](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Electr%C3%B3n&action=edit&section=2" \o "Editar sección: Descubrimiento)]**

[](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cyclotron_motion_wider_view.jpg)

Haz de electrones dentro de un tubo de rayos filiformes siendo desviados siguiendo una trayectoria circular mediante un campo magnético homogéneo.[28](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-30) [29](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-31)

El físico alemán [Johann Wilhelm Hittorf](https://es.wikipedia.org/wiki/Johann_Wilhelm_Hittorf) emprendió el estudio de la [conductividad eléctrica](https://es.wikipedia.org/wiki/Conductividad_el%C3%A9ctrica) de gases enrarecidos. En 1869, descubrió un brillo emitido desde el cátodo que aumentaba de tamaño cuando el gas disminuía de presión. En 1876, el también físico alemán [Eugen Goldstein](https://es.wikipedia.org/wiki/Eugen_Goldstein) mostró que los rayos de ese brillo proyectaban una sombra, y los denominó «[rayos catódicos](https://es.wikipedia.org/wiki/Rayos_cat%C3%B3dicos)».[30](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-32) Durante la década de 1870, el químico y físico inglés *sir* [William Crookes](https://es.wikipedia.org/wiki/William_Crookes) desarrolló el primer tubo de rayos catódicos con un vacío elevado (vacío con presión en el rango de 100 [mPa](https://es.wikipedia.org/wiki/Pascal_(unidad)) a 100 [nPa](https://es.wikipedia.org/wiki/Pascal_(unidad))).[31](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-dekosky-33) Entonces mostró que los rayos luminiscentes que aparecían dentro del tubo llevaban energía y que iban del [cátodo](https://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%A1todo)al [ánodo](https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81nodo). Además, aplicando un campo magnético, Crookes fue capaz de desviar los rayos, con lo cual demostró que el haz se comportaba como si estuviera cargado negativamente.[32](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-leicester-34) [33](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-35) En 1879 propuso que estas propiedades se podían explicar con lo que él denominó «materia radiante». Sugirió que se trataba del cuarto estado de la materia, que consistía en moléculas cargadas negativamente que eran proyectadas a alta velocidad desde el cátodo.[34](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-36)

El físico británico nacido en Alemania, [Arthur Schuster](https://es.wikipedia.org/wiki/Arthur_Schuster), continuó los experimentos iniciados por Crookes colocando placas de metal paralelas a los rayos catódicos y aplicando un [potencial eléctrico](https://es.wikipedia.org/wiki/Potencial_el%C3%A9ctrico) entre ellas. El campo desviaba los rayos hacia la placa cargada positivamente, lo que evidenciaba aún más que los rayos llevaban una carga negativa. Al medir la cantidad de desviación causada por un cierto nivel de corriente eléctrica, en 1890, Schuster fue capaz de determinar la proporción masa-carga de los componentes de los rayos. Sin embargo, logró un valor que era más de mil veces lo esperado, por lo que, en aquella época, no se dio mucho crédito a sus cálculos.[32](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-leicester-34) [35](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-37)

En 1896, el físico británico [Joseph John Thomson](https://es.wikipedia.org/wiki/Joseph_John_Thomson), junto con sus colegas [John Sealy Townsend](https://es.wikipedia.org/wiki/John_Sealy_Townsend) y [Harold Albert Wilson](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Harold_Albert_Wilson&action=edit&redlink=1),[16](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-dahl-18) llevó a cabo experimentos que indicaron que los rayos catódicos eran realmente partículas únicas y no ondas, átomos o moléculas, tal como se creía anteriormente.[6](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-thomson-6) Thomson hizo buenas estimaciones tanto de la carga como de la masa, y encontró que las partículas de los rayos catódicos —a las cuales llamaba «corpúsculos»— tenían quizás una milésima parte de la masa del ion menos masivo conocido, el ion [hidrógeno](https://es.wikipedia.org/wiki/Hidr%C3%B3geno).[6](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-thomson-6) [17](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-wilson-19) Asimismo, demostró que su proporción carga-masa (e/m) era independiente del material del cátodo. Más tarde demostró que las partículas cargadas negativamente producidas por materiales radiactivos, por materiales calentados y por materiales iluminados eran universales.[6](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-thomson-6) [36](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-38) El nombre de «electrón» para estas partículas fue propuesto de nuevo por el físico irlandés [George Francis FitzGerald](https://es.wikipedia.org/wiki/George_Francis_FitzGerald) y, desde entonces, la palabra consiguió una aceptación por partes.[32](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-leicester-34)

[](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Millikan.jpg)

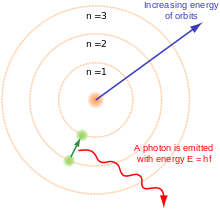
Robert Millikan

En 1896, mientras estudiaba los minerales naturalmente fluorescentes, el físico francés [Henri Becquerel](https://es.wikipedia.org/wiki/Henri_Becquerel) descubrió que estos emitían radiación sin estar expuestos a ninguna fuente de energía externa. Estos materiales [radiactivos](https://es.wikipedia.org/wiki/Radiactivos) se convirtieron en tema de estudio de interés de muchos científicos, entre ellos el físico neozelandés [Ernest Rutherford](https://es.wikipedia.org/wiki/Ernest_Rutherford), que descubrió que emitían partículas. Designó a estas partículas «[alfa](https://es.wikipedia.org/wiki/Part%C3%ADcula_alfa)» y «beta» según su capacidad de penetrar la materia.[37](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-39) En 1900, Becquerel demostró que los [rayos beta](https://es.wikipedia.org/wiki/Rayos_beta) emitidos por radio podían ser desviados por un campo eléctrico, y que su proporción masa-carga era la misma que la de los rayos catódicos.[38](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-40) Esta evidencia reforzó la idea de que los electrones existían en forma de componentes en los átomos.[39](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-BaW9091-41) [40](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-42)

La carga del electrón fue medida con más cuidado por los físicos estadounidenses [Robert Millikan](https://es.wikipedia.org/wiki/Robert_Millikan) y [Harvey Fletcher](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Harvey_Fletcher&action=edit&redlink=1) mediante su [experimento de la gota de aceite](https://es.wikipedia.org/wiki/Experimento_de_la_gota_de_aceite) (1909), cuyos resultados fueron publicados en 1911. Este experimento usaba un campo eléctrico para evitar que una gota de aceite cargada cayera como resultado de la [gravedad](https://es.wikipedia.org/wiki/Gravedad). El aparato era capaz de medir la carga eléctrica tan pequeña como de 1 a 150 iones con un margen de error del 0,3 %. Algunos experimentos similares habían sido llevados a cabo anteriormente por el equipo de Thomson[6](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-thomson-6) usando nubes de gotas de agua cargadas generadas por electrólisis,[16](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-dahl-18) y en el mismo año por [Abram Ioffe](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Abram_Ioffe&action=edit&redlink=1) el cual, de manera independiente, obtuvo el mismo resultado que Millikan usando micropartículas de metales cargadas, publicando sus resultados en 1913.[41](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-43) Sin embargo, las gotas de aceite eran más estables que las de agua debido a que su tasa de evaporación es menor, lo cual hacía que fueran más adecuadas para llevar a cabo este tipo de experimentos que duraban largos periodos de tiempo.[42](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-44)

Hacia el comienzo del siglo XX se descubrió que, bajo ciertas condiciones, una partícula cargada que se movía rápidamente causaba una condensación de vapor de agua supersaturada a lo largo de su camino. En 1911, [Charles Wilson](https://es.wikipedia.org/wiki/Charles_Wilson) usó este principio para concebir su [cámara de niebla](https://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%A1mara_de_niebla), la cual permitía fotografiar los caminos trazados por partículas cargadas tales como electrones.[43](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-45)

### Teoría atómica**[[editar](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Electr%C3%B3n&action=edit&section=3" \o "Editar sección: Teoría atómica)]**

[](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bohr_atom_model_English.svg)

El [modelo de Bohr del átomo](https://es.wikipedia.org/wiki/Modelo_de_Bohr), muestra estados de electrón con energía [cuantificado](https://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero_cu%C3%A1ntico) por el número n. Una caída de electrones a una órbita más baja emite un fotón igual a la diferencia de energía entre las órbitas.

En 1914, los experimentos llevados a cabo hasta ese momento por los físicos Ernest Rutherford, Henry Moseley, James Franck y Gustav Hertz ya habían establecido en gran medida la estructura del átomo como un núcleo denso de carga positiva rodeado por electrones de masa reducida.[44](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-smirnov-46) En 1913, el físico danés [Niels Bohr](https://es.wikipedia.org/wiki/Niels_Bohr) postuló que los electrones residían en estados de energía cuantificados; según él, esta energía estaba determinada por el [momento angular](https://es.wikipedia.org/wiki/Momento_angular) de las órbitas del electrón alrededor del núcleo. Los electrones se podían mover entre estos estados —u [órbitas](https://es.wikipedia.org/wiki/Orbital_at%C3%B3mico)— mediante la emisión o absorción de fotones a frecuencias específicas. Por medio de estas órbitas cuantificadas, Bohr explicó las líneas espectrales del átomo de hidrógeno.[45](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-47) Sin embargo, el [modelo de Bohr](https://es.wikipedia.org/wiki/Modelo_de_Bohr) fallaba en la justificación de las intensidades relativas de las líneas espectrales, y tampoco tuvo éxito para explicar los espectros de átomos más complejos.[44](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-smirnov-46)

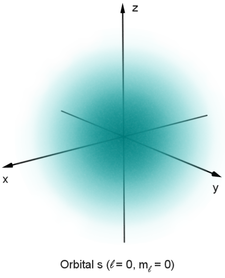
Los enlaces químicos entre átomos fueron explicados por [Gilbert Newton Lewis](https://es.wikipedia.org/wiki/Gilbert_Newton_Lewis), que en 1916 propuso que un [enlace covalente](https://es.wikipedia.org/wiki/Enlace_covalente) entre dos átomos se mantiene por un par de electrones compartidos entre ellos.[46](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-48) Más tarde, en 1923, [Walter Heitler](https://es.wikipedia.org/wiki/Walter_Heitler) y [Fritz London](https://es.wikipedia.org/wiki/Fritz_London) dieron una explicación completa sobre la formación de pares de electrones y los enlaces químicos en términos mecánico-cuántico.[47](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-Arabatzis-49) En 1919, el químico estadounidense [Irving Langmuir](https://es.wikipedia.org/wiki/Irving_Langmuir) amplió el modelo estático del átomo de Lewis y sugirió que todos los electrones eran distribuidos en «capas esféricas sucesivas (casi) concéntricas, todas de grueso idéntico».[48](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-50) Estas capas se encontraban, según Langmuir, divididas en un número de celdas en las que cada una contenía un par de electrones. Con este modelo, el científico estadounidense fue capaz de explicar cualitativamente las propiedades químicas de todos los elementos de la [tabla periódica](https://es.wikipedia.org/wiki/Tabla_peri%C3%B3dica_de_los_elementos), que ya se sabía que se parecían entre sí según la [ley periódica formulada por Dmitri Mendeléiev](https://es.wikipedia.org/wiki/Tabla_peri%C3%B3dica_de_Mendel%C3%A9yev).[49](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-51)

En 1924, el físico austriaco [Wolfgang Pauli](https://es.wikipedia.org/wiki/Wolfgang_Pauli) observó que la posible estructura en capas del átomo se podría explicar con un conjunto de cuatro parámetros que definían cada[estado cuántico](https://es.wikipedia.org/wiki/Estado_cu%C3%A1ntico) de energía, siempre que cada estado fuera habitado por no más de un electrón.)[50](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-52) El mecanismo físico para explicar el cuarto parámetro —que tenía dos posibles valores diferentes— fue provisto por los físicos holandeses [Samuel Goudsmit](https://es.wikipedia.org/wiki/Samuel_Goudsmit) y [George Uhlenbeck](https://es.wikipedia.org/wiki/George_Uhlenbeck). En 1925, Goudsmit y Uhlenbeck sugirieron que un electrón, adicionalmente al momento angular de su órbita, posee un momento angular intrínseco y un [momento dipolar magnético](https://es.wikipedia.org/wiki/Momento_dipolar_magn%C3%A9tico).[44](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-smirnov-46) [51](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-53) El momento angular intrínseco se convirtió más tarde en lo que se denominaría como [espín](https://es.wikipedia.org/wiki/Esp%C3%ADn), y explicaba la anteriormente misteriosa separación de las líneas espectrales observadas con un [espectrómetro](https://es.wikipedia.org/wiki/Espectr%C3%B3metro) de alta precisión, este fenómeno es conocido como[desdoblamiento de estructura fina](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Desdoblamiento_de_estructura_fina&action=edit&redlink=1).[52](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-54)

### Mecánica cuántica**[[editar](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Electr%C3%B3n&action=edit&section=4" \o "Editar sección: Mecánica cuántica)]**

*Artículo principal:*[Historia de la mecánica cuántica](https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_la_mec%C3%A1nica_cu%C3%A1ntica)

Tras su disertación ocurrida en 1924 de *Recherches sur la Theorie des cuánta* («Investigación sobre la teoría cuántica»), el físico francés [Louis de Broglie](https://es.wikipedia.org/wiki/Louis_de_Broglie) hizo la hipótesis de que toda la materia posee una onda similar a la de la contenida en la luz;[53](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-de_broglie-55) es decir, en unas condiciones apropiadas, los electrones y demás materia mostrarían propiedades bien de partículas o de ondas. Las propiedades corpusculares de una partícula se hacen evidentes cuando se demuestra que tiene una posición localizada en el espacio a lo largo de su trayectoria en cualquier momento.[54](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-56) Se observa en la naturaleza ondas de luz, por ejemplo, cuando un haz de esta pasa a través de rendijas paralelas y crea patrones de interferencia. En 1927, el efecto de interferencia fue demostrado con un haz de electrones por el físico inglés [George Paget Thomson](https://es.wikipedia.org/wiki/George_Paget_Thomson)con un [film](https://es.wikipedia.org/wiki/Film) delgado de metal y por los físicos americanos [Clinton Davisson](https://es.wikipedia.org/wiki/Clinton_Davisson) y [Lester Germer](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Lester_Germer&action=edit&redlink=1) usando un cristal de [níquel](https://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%ADquel).[55](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-57)

[](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Orbital_s1.png)

En [mecánica cuántica](https://es.wikipedia.org/wiki/Mec%C3%A1nica_cu%C3%A1ntica), el comportamiento de un electrón en un átomo se describe por un [orbital](https://es.wikipedia.org/wiki/Orbital_at%C3%B3mico), que es una distribución de probabilidad más que una órbita. En la figura, el sombreado indica la probabilidad relativa de «encontrar» el electrón en este punto cuando se tiene la energía correspondiente a los [números cuánticos](https://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmeros_cu%C3%A1nticos) dados.

El éxito de la predicción de Broglie llevó a la publicación en 1926 de la [ecuación de Schrödinger](https://es.wikipedia.org/wiki/Ecuaci%C3%B3n_de_Schr%C3%B6dinger) por [Erwin Schrödinger](https://es.wikipedia.org/wiki/Erwin_Schr%C3%B6dinger), que describe cómo se propagan las ondas de electrones.[56](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-58) En vez de dar una solución que determina la localización de un electrón a lo largo del tiempo, esta ecuación de onda se puede utilizar para predecir la probabilidad de encontrar un electrón cerca de una posición. Este enfoque recibió posteriormente el nombre de «[mecánica cuántica](https://es.wikipedia.org/wiki/Mec%C3%A1nica_cu%C3%A1ntica)»; se trataba de una aproximación extremadamente precisa de los estados de energía de un electrón en un átomo de hidrógeno.[57](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-59) Cuando se consideraron el espín y la interacción entre varios electrones, la mecánica cuántica permitió predecir con éxito la configuración de electrones de átomos con números atómicos más altos que el del hidrógeno.[58](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-60)

En 1928, trabajando sobre la obra de Wolfgang Pauli, el británico-suizo [Paul Dirac](https://es.wikipedia.org/wiki/Paul_Dirac) concibió un modelo del electrón, la [ecuación de Dirac](https://es.wikipedia.org/wiki/Ecuaci%C3%B3n_de_Dirac), consistente con la [teoría de la relatividad](https://es.wikipedia.org/wiki/Teor%C3%ADa_de_la_relatividad). Dirac aplicó consideraciones relativísticas y simétricas a la formulación hamiltoniana de la mecánica cuántica del campo electromagnético.[59](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-61) Para poder resolver algunos problemas de su ecuación relativista, en 1930, Dirac desarrolló un modelo del vacío como un «mar» infinito de partículas con energía negativa, el cual fue llamado «[mar de Dirac](https://es.wikipedia.org/wiki/Mar_de_Dirac)». Todo ello hizo que Dirac fuera capaz de predecir la existencia del positrón, el homólogo en la [antimateria](https://es.wikipedia.org/wiki/Antimateria) del electrón.[60](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-62) Esta partícula fue descubierta en 1932 por [Carl David Anderson](https://es.wikipedia.org/wiki/Carl_David_Anderson), quien propuso que los electrones estándar se llamaran «negatrones» y que el término «electrón» se usara como un término genérico para describir las variantes cargadas tanto positiva como negativamente.

En 1947, [Willis Eugene Lamb](https://es.wikipedia.org/wiki/Willis_Eugene_Lamb) encontró, mientras trabajaba en colaboración con el estudiante de postgrado [Robert Rutherford](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Robert_Rutherford&action=edit&redlink=1), que ciertos estados cuánticos del átomo de hidrógeno que deberían tener la misma energía se encontraban desplazados los unos respecto de los otros; esta diferencia se denomina desplazamiento de Lamb. Casi al mismo tiempo, [Polykarp Kusch](https://es.wikipedia.org/wiki/Polykarp_Kusch), que trabajaba con Henry Michael Foley, descubrió que el momento magnético del electrón es ligeramente mayor que el que predice Dirac con su teoría. Esta pequeña diferencia se llamó a posteriori [momento dipolar magnético anómalo](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Momento_dipolar_magn%C3%A9tico_an%C3%B3malo&action=edit&redlink=1) del electrón. La diferencia fue explicada más tarde por la teoría de la[electrodinámica cuántica](https://es.wikipedia.org/wiki/Electrodin%C3%A1mica_cu%C3%A1ntica) desarrollada por [Sin-Itiro Tomonaga](https://es.wikipedia.org/wiki/Sin-Itiro_Tomonaga), [Julian Schwinger](https://es.wikipedia.org/wiki/Julian_Schwinger) y [Richard Feynman](https://es.wikipedia.org/wiki/Richard_Feynman) a finales de la década de 1940.[61](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-63)

### Aceleradores de partículas**[[editar](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Electr%C3%B3n&action=edit&section=5" \o "Editar sección: Aceleradores de partículas)]**

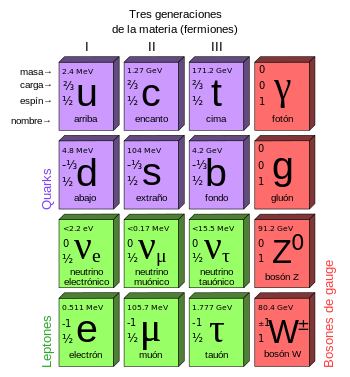
Con el desarrollo del [acelerador de partículas](https://es.wikipedia.org/wiki/Acelerador_de_part%C3%ADculas) durante la primera mitad del siglo XX, los físicos empezaron a entrar más a fondo en las propiedades de las partículas subatómicas.[62](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-64) El primer intento con éxito de acelerar electrones utilizando la inducción electromagnética fue llevado a cabo en 1942 por [Donald Kerst](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Donald_Kerst&action=edit&redlink=1). Su [betatrón](https://es.wikipedia.org/wiki/Betatr%C3%B3n) inicial alcanzaba energías de 2,3 [MeV](https://es.wikipedia.org/wiki/MeV), mientras que los betatrones posteriores podían llegar hasta 300 MeV. En 1947 se descubrió la [radiación de sincrotrón](https://es.wikipedia.org/wiki/Radiaci%C3%B3n_de_sincrotr%C3%B3n) gracias a un sincrotrón de electrones de 70 MeV de [General Electric](https://es.wikipedia.org/wiki/General_Electric); esta radiación era causada por la aceleración de los electrones a través de un campo magnético moviéndose cerca de la [velocidad de la luz](https://es.wikipedia.org/wiki/Velocidad_de_la_luz).[63](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-65)

Con una energía del haz de 1,5 [GeV](https://es.wikipedia.org/wiki/GeV), el primer colisionador de partículas de alta energía fue el [Adone](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Adone&action=edit&redlink=1), que comenzó a operar en 1968.[64](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-66) Este aparato aceleraba los electrones y los positrones en direcciones opuestas de tal manera que doblaba la energía de su colisión con respecto al choque de un electrón con un objetivo estático.[65](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-67) El [Large Electron-Positron collider](https://es.wikipedia.org/wiki/Large_Electron-Positron_collider) (LEP) del CERN, que estuvo activo de 1989 a 2000, consiguió energías de colisión de 209 GeV y llevó a cabo importantes descubrimientos para el [modelo estándar de física de partículas](https://es.wikipedia.org/wiki/Modelo_est%C3%A1ndar_de_f%C3%ADsica_de_part%C3%ADculas).[66](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-68) [67](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-69)

### Confinamiento de electrones individuales**[[editar](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Electr%C3%B3n&action=edit&section=6" \o "Editar sección: Confinamiento de electrones individuales)]**

Actualmente se pueden confinar electrones individuales en transistores CMOS ultrapequeños (L= 20 nm, W= 20 nm) que operan a temperaturas [criogénicas](https://es.wikipedia.org/wiki/Criog%C3%A9nica) (del rango de 4 K a 15 K).[68](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-70) La función de onda del electrón se extiende en una retícula semiconductora e interacciona de manera despreciable con la banda de valencia de los electrones, de tal manera que se puede tratar dentro del formalismo de partícula simplemente reemplazando su masa con el [tensor de masa efectiva](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Tensor_de_masa_efectiva&action=edit&redlink=1).

## **Características[[editar](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Electr%C3%B3n&action=edit&section=7" \o "Editar sección: Características)]**

[](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles-es.svg)

El [Modelo Estándar](https://es.wikipedia.org/wiki/Modelo_Est%C3%A1ndar) de partículas elementales: 12 [fermiones](https://es.wikipedia.org/wiki/Fermiones)fundamentales y 4 [bosones](https://es.wikipedia.org/wiki/Bosones) fundamentales. Por favor, nótese que las masas de algunas partículas son sujetas a evaluaciones periódicas por la comunidad científica. Los valores actuales reflejados en este gráfico son de 2008 y puede que no hayan sido ajustadas desde ese momento. Para el último consenso, por favor visitar el [Particle Data Group](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Particle_Data_Group&action=edit&redlink=1).

### Clasificación**[[editar](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Electr%C3%B3n&action=edit&section=8" \o "Editar sección: Clasificación)]**

En el [modelo estándar de física de partículas](https://es.wikipedia.org/wiki/Modelo_est%C3%A1ndar_de_f%C3%ADsica_de_part%C3%ADculas), los electrones pertenecen al grupo de partículas subatómicas llamado [leptones](https://es.wikipedia.org/wiki/Leptones), que se cree que son las partículas elementales fundamentales. Los electrones tienen la masa más pequeña de cualquier leptón con carga (y también de cualquier partícula cargada de cualquier tipo) y pertenecen a la primera [generación](https://es.wikipedia.org/wiki/Generaci%C3%B3n_(f%C3%ADsica_de_part%C3%ADculas)) de partículas fundamentales.[69](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-71) La segunda y tercera generaciones contienen leptones cargados —el [muon](https://es.wikipedia.org/wiki/Muon) y el [tau](https://es.wikipedia.org/wiki/Tau_(part%C3%ADcula))— que son idénticos al electrón en cuanto a la carga, el espín y las interacciones, pero tienen más masa. Los leptones difieren de los otros constituyentes básicos de la materia, los [quarks](https://es.wikipedia.org/wiki/Quarks), por su falta de [interacción fuerte](https://es.wikipedia.org/wiki/Interacci%C3%B3n_fuerte). Todos los miembros del grupo de los leptones son[fermiones](https://es.wikipedia.org/wiki/Fermiones), porque todos ellos tienen un espín semientero; puesto que el electrón tiene un espín de 1/2.[70](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-raith-72)

### Propiedades fundamentales**[[editar](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Electr%C3%B3n&action=edit&section=9" \o "Editar sección: Propiedades fundamentales)]**

La masa invariante de un electrón es aproximadamente de [9.109 × 10-31](https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%93rdenes_de_magnitud_(masa)) kg o,[71](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-CODATA-73) equivalentemente, de 5.489 × 10-4 [uma](https://es.wikipedia.org/wiki/Unidad_de_masa_at%C3%B3mica). Según el [principio de equivalencia masa-energía](https://es.wikipedia.org/wiki/Principio_de_equivalencia) de Einstein, esta masa corresponde a una energía en reposo de 0,511 [MeV](https://es.wikipedia.org/wiki/MeV). La proporción entre la masa de un [protón](https://es.wikipedia.org/wiki/Prot%C3%B3n) y la de un electrón es aproximadamente de 1836 a 1.[13](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-nist_codata_mu-15) [72](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-74) Medidas astronómicas demuestran que la proporción entre las masas del protón y el electrón han mantenido el mismo valor durante, al menos, la mitad de la [edad del universo](https://es.wikipedia.org/wiki/Edad_del_universo), tal como predice el modelo estándar.[73](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-75)

El electrón tiene una carga eléctrica de -1,602 × 10-19 [coulomb](https://es.wikipedia.org/wiki/Coulomb);[71](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-CODATA-73) esta carga se utiliza como unidad estándar de carga de las [partículas subatómicas](https://es.wikipedia.org/wiki/Part%C3%ADculas_subat%C3%B3micas). Dentro de los límites de la precisión experimental, la carga del electrón es idéntica a la del protón pero con el signo opuesto.[74](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-76) Como el símbolo 'e' se utiliza para la [carga elemental](https://es.wikipedia.org/wiki/Carga_elemental), el electrón se suele simbolizar por e- (el símbolo - indica la carga negativa). El [positrón](https://es.wikipedia.org/wiki/Positr%C3%B3n) se simboliza por e+ porque tiene las mismas propiedades que el electrón pero carga positiva.[70](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-raith-72) [71](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-CODATA-73)

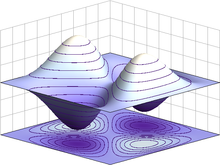
El espín ([momento angular intrínseco](https://es.wikipedia.org/wiki/Momento_angular)) del electrón es de 1/2.[71](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-CODATA-73) Esta propiedad se suele indicar, refiriéndose al electrón, como una partícula [espín -1/2](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Esp%C3%ADn_-1/2&action=edit&redlink=1).[70](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-raith-72)Para este tipo de partículas, la magnitud de espín es √3/2 ħ,[nota 3](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-77) y el resultado de la medida de la [proyección](https://es.wikipedia.org/wiki/Proyecci%C3%B3n_(matem%C3%A1ticas)) del espín sobre cualquier eje sólo puede ser ±ħ/2. De forma adicional al espín, el electrón tiene un momento magnético a lo largo de su eje[71](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-CODATA-73) [75](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-Hanneke-78) [nota 4](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-79) que es aproximadamente un [magnetón de Bohr](https://es.wikipedia.org/wiki/Magnet%C3%B3n_de_Bohr), el cual es una constante física que equivale a 9,27400915 (23) × 10-24 [joules](https://es.wikipedia.org/wiki/Joule_(unidad)) por [tesla](https://es.wikipedia.org/wiki/Tesla_(unidad)).[71](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-CODATA-73) La orientación del espín respecto al momento del electrón define la propiedad de las partículas elementales conocida como [helicidad](https://es.wikipedia.org/wiki/Helicidad_(f%C3%ADsica_de_part%C3%ADculas)).[76](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-anastopoulos-80)

El electrón no tiene ninguna subestructura conocida. Es por ello que se define como una [partícula puntual](https://es.wikipedia.org/wiki/Part%C3%ADcula_puntual) con [carga puntual](https://es.wikipedia.org/wiki/Carga_puntual) y sin extensión espacial. Si se observa un solo electrón mediante una [trampa de penning](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Trampa_de_penning&action=edit&redlink=1) se puede ver que el límite superior del radio de la partícula es de 10-22 metros. Existe una constante física llamada [radio clásico del electrón](https://es.wikipedia.org/wiki/Radio_cl%C3%A1sico_del_electr%C3%B3n), de un valor mucho mayor (2,8179 × 10-15 m); sin embargo, la terminología proviene de un cálculo simplificado que ignora los efectos de la [mecánica cuántica](https://es.wikipedia.org/wiki/Mec%C3%A1nica_cu%C3%A1ntica). En realidad, el llamado radio clásico del electrón tiene poco que ver con la estructura fundamental verdadera de esta partícula.[77](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-81) [nota 5](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-82)

Hay partículas elementales que se desintegran espontáneamente en partículas menos masivas. Un ejemplo es el [muon](https://es.wikipedia.org/wiki/Muon), el cual se desintegra en un electrón, un [neutrino](https://es.wikipedia.org/wiki/Neutrino) y un [antineutrino](https://es.wikipedia.org/wiki/Antineutrino), y que tiene una [vida media](https://es.wikipedia.org/wiki/Vida_media) de 2,2 × 10-6 segundos. Sin embargo, se cree que el electrón es estable en terrenos teóricos: el electrón es la partícula de menos masa con una carga eléctrica diferente de cero, por lo que su desintegración violaría la [conservación de carga](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Conservaci%C3%B3n_de_carga&action=edit&redlink=1).[78](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-83) El límite inferior experimental de la vida media de un electrón es de 4,6 × 1026 años, con un [intervalo de confianza](https://es.wikipedia.org/wiki/Intervalo_de_confianza) del 90 %.[79](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-84) [80](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-85)

### Propiedades cuánticas**[[editar](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Electr%C3%B3n&action=edit&section=10" \o "Editar sección: Propiedades cuánticas)]**

Como todas las partículas, los electrones pueden actuar como ondas: esto se llama [dualidad onda-partícula](https://es.wikipedia.org/wiki/Dualidad_onda-part%C3%ADcula), y se puede demostrar utilizando el [experimento de la doble rendija](https://es.wikipedia.org/wiki/Experimento_de_la_doble_rendija). La naturaleza similar a la de una onda del electrón le permite pasar a través de dos rendijas paralelas de manera simultánea y no sólo a través de una, como sería el caso de una partícula clásica. En mecánica cuántica, la propiedad similar a la onda de una partícula puede describirse matemáticamente como una función compleja, la [función de onda](https://es.wikipedia.org/wiki/Funci%C3%B3n_de_onda), que se suele denotar por la letra griega psi (ψ). Cuando el valor absoluto de esta función se eleva al cuadrado se obtiene la probabilidad de que una partícula sea observada cerca de una localización ([densidad de probabilidad](https://es.wikipedia.org/wiki/Densidad_de_probabilidad)).[81](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-munowitz-86)

[](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Asymmetricwave2.png)

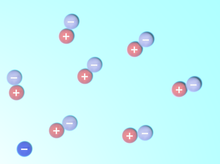
Ejemplo de una función de onda antisimétrica para un estado cuántico de [dos fermiones idénticos en una caja de 1 dimensión](https://es.wikipedia.org/wiki/Part%C3%ADcula_en_una_caja). Si las partículas conmutan las posiciones, la función de onda invierte su signo.

Los electrones son [partículas idénticas](https://es.wikipedia.org/wiki/Part%C3%ADculas_id%C3%A9nticas) porque no se pueden distinguir el uno del otro a partir de sus propiedades físicas intrínsecas. En mecánica cuántica, esto significa que un par de electrones que interaccionan deben ser capaces de intercambiar sus posiciones sin que se produzca un cambio observable en el estado del sistema. La función de onda de los [fermiones](https://es.wikipedia.org/wiki/Fermiones) —grupo dentro del que se incluyen los electrones— es [antisimétrica](https://es.wikipedia.org/wiki/Antisim%C3%A9trica), lo que significa que cambia de signo cuando se intercambian dos electrones, es decir: ψ (r1, r2) =-ψ (r2, r1) (donde las variables *r*1 y *r*2 corresponden al primer y segundo electrón, respectivamente). Como el valor absoluto no resulta modificado cuando se cambia el signo, esto corresponde a probabilidades iguales. A diferencia de los fermiones, los [bosones](https://es.wikipedia.org/wiki/Bosones) —tales como el [fotón](https://es.wikipedia.org/wiki/Fot%C3%B3n)— tienen funciones de onda simétricas.[81](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-munowitz-86)

En caso de antisimetría, las soluciones de la ecuación de onda para electrones que interaccionan resultan en una probabilidad cero de que cada par pueda ocupar la misma localización (o estado). El [principio de exclusión de Pauli](https://es.wikipedia.org/wiki/Principio_de_exclusi%C3%B3n_de_Pauli) se basa en eso: descarta que cualesquiera dos electrones puedan ocupar el mismo [estado cuántico](https://es.wikipedia.org/wiki/Estado_cu%C3%A1ntico). Al mismo tiempo, este principio también explica muchas de las propiedades de los electrones: por ejemplo, que grupos de electrones enlazados ocupen diferentes orbitales de un átomo en lugar de sobreponerse unos a otros en la misma órbita.[81](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-munowitz-86)

### Partículas virtuales**[[editar](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Electr%C3%B3n&action=edit&section=11" \o "Editar sección: Partículas virtuales)]**

Los físicos creen que el espacio vacío podría estar creando de manera continua pares de partículas virtuales —tales como un positrón y un electrón— que se [aniquilan](https://es.wikipedia.org/wiki/Aniquilaci%C3%B3n_part%C3%ADcula-antipart%C3%ADcula)rápidamente la una con la otra.[82](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-87) La combinación de la variación de energía necesaria para crear estas partículas y el tiempo durante el cual existen caen dentro del límite de detectabilidad que expresa el [principio de incertidumbre de Heisenberg](https://es.wikipedia.org/wiki/Principio_de_incertidumbre_de_Heisenberg), ΔE · Δt ≥ ħ: la energía que se necesita para crear estas partículas virtuales (ΔE) se puede «sacar» del vacío durante un periodo de tiempo (Δt) de tal manera que su producto no sea más elevado que la [constante de Planck](https://es.wikipedia.org/wiki/Constante_de_Planck) reducida (ħ ≈ 6,6 × 10-16 [eV](https://es.wikipedia.org/wiki/Electronvoltio)·[s](https://es.wikipedia.org/wiki/Segundo)). De ello se extrae, pues, que por un electrón virtual Δt es como máximo 1,3 × 10-21 s.[83](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-taylor-88)

[](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Virtual_pairs_near_electron.png)

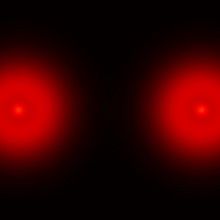
Una representación esquemática de pares electrón-positrón virtuales que aparecen de forma aleatoria cerca de un electrón (abajo a la izquierda)

Mientras existe un par virtual electrón-positrón, la [fuerza de Coulomb](https://es.wikipedia.org/wiki/Fuerza_de_Coulomb) del [campo eléctrico](https://es.wikipedia.org/wiki/Campo_el%C3%A9ctrico) del entorno que rodea al electrón hace que el positrón creado sea atraído al electrón original, mientras que un electrón creado experimenta una repulsión. Esto causa lo que se conoce como [polarización del vacío](https://es.wikipedia.org/wiki/Polarizaci%C3%B3n_del_vac%C3%ADo). El vacío se comporta, pues, como un medio que tiene una permitividad dieléctrica mayor que la unidad. En consecuencia, la carga efectiva del electrón es realmente menor que su valor real, y la carga decrece cuando aumenta la distancia respecto del electrón.[84](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-genz-89) [85](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-90) Esta polarización fue confirmada de manera experimental en 1997 mediante el [acelerador de partículas](https://es.wikipedia.org/wiki/Acelerador_de_part%C3%ADculas) japonés [TRISTAN](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=KEKB&action=edit&redlink=1).[86](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-91)Las partículas virtuales causan un efecto pantalla similar para la masa del electrón.[87](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-92)

La interacción con partículas virtuales también explica la pequeña desviación (de aproximadamente el 0,1 %) del momento magnético intrínseco del electrón respecto al magnetón de Bohr (el momento dipolar magnético anómalo).[75](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-Hanneke-78) [88](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-93) La coincidencia extraordinariamente precisa entre esta diferencia predicha y el valor determinado experimentalmente se considera uno de los grandes éxitos de la [electrodinámica cuántica](https://es.wikipedia.org/wiki/Electrodin%C3%A1mica_cu%C3%A1ntica).[89](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-94)

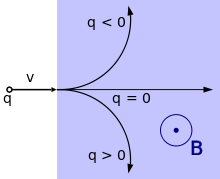
En [física clásica](https://es.wikipedia.org/wiki/F%C3%ADsica_cl%C3%A1sica), el [momento angular y el momento magnético](https://es.wikipedia.org/wiki/Momento_de_fuerza) de un objeto dependen de sus dimensiones físicas. Es por ello que el concepto de un electrón sin dimensiones que tenga estas propiedades puede parecer inconsistente. Esta aparente paradoja se puede explicar por la formación de fotones virtuales en el campo eléctrico general para el electrón: estos fotones hacen que el electrón haga un movimiento de vibración ultrarrápido (lo que se conoce como «[zitterbewegung](https://es.wikipedia.org/wiki/Zitterbewegung)»),[90](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-95) que tiene como resultado un movimiento circular limpio con precesión. Este movimiento es el que produce el [espín](https://es.wikipedia.org/wiki/Esp%C3%ADn) y el momento magnético del electrón.[14](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-curtis74-16) [91](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-96) En los átomos, esta creación de fotones virtuales explica el [desplazamiento de Lamb](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Desplazamiento_de_Lamb&action=edit&redlink=1) que se observa en las líneas espectrales.[84](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-genz-89)

### Interacción**[[editar](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Electr%C3%B3n&action=edit&section=12" \o "Editar sección: Interacción)]**

[](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:O2_MolecularOrbitals_Anim.gif)

Animación que muestra dos átomos de [oxígeno](https://es.wikipedia.org/wiki/Ox%C3%ADgeno) fusionándose para formar una molécula de O2 en su [estado cuántico](https://es.wikipedia.org/wiki/Estado_cu%C3%A1ntico) fundamental. Las nubes de color representan los [orbitales atómicos](https://es.wikipedia.org/wiki/Orbital_at%C3%B3mico). Los orbitales [2s](https://es.wikipedia.org/wiki/Orbital_at%C3%B3mico#Orbital_s) y [2p](https://es.wikipedia.org/wiki/Orbital_at%C3%B3mico#Orbital_p) de cada átomo se combinan para formar los orbitales [σ y π](https://es.wikipedia.org/wiki/Orbital_molecular#Tipos_de_orbitales_moleculares) de la molécula, que la mantienen unida. Los orbitales 1s, más interiores, no se combinan y permiten distinguir a cada núcleo.

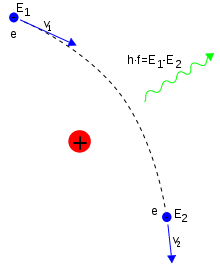
Un electrón genera un campo eléctrico que ejerce una [fuerza de atracción](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Atracci%C3%B3n_electromagn%C3%A9tica&action=edit&redlink=1) sobre una partícula de carga positiva (tal como el protón) y una [carga de repulsión](https://es.wikipedia.org/wiki/Repulsi%C3%B3n) sobre una partícula de carga negativa. La magnitud de esta fuerza se determina mediante la [ley de Coulomb](https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_del_inverso_del_cuadrado) del inverso del cuadrado.[92](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-97) Cuando un electrón está en movimiento genera un campo magnético.[93](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-munowitz140-98) La [ley de Ampère-Maxwell](https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Amp%C3%A8re-Maxwell) relaciona el campo magnético con el movimiento masivo de los electrones (la [corriente eléctrica](https://es.wikipedia.org/wiki/Corriente_el%C3%A9ctrica)) respecto de un observador. Esta propiedad de inducción, por ejemplo, es la que da el campo magnético necesario para hacer funcionar un motor eléctrico.[94](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-99) El [campo electromagnético](https://es.wikipedia.org/wiki/Campo_electromagn%C3%A9tico) de una partícula cargada de movimiento arbitrario se expresa mediante los [potenciales de Liénard-Wiechert](https://es.wikipedia.org/wiki/Potenciales_de_Li%C3%A9nard-Wiechert), los cuales son válidos incluso cuando la velocidad de la partícula es cercana a la de la luz ([relatividad](https://es.wikipedia.org/wiki/Relatividad_especial)).

[](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lorentz_force.svg)

Una partícula con carga q (a la izquierda) se mueve con velocidad *v* a través de un campo magnético *B* que se orienta hacia el espectador. Para un electrón, *q* es negativa por lo que sigue una trayectoria curvada hacia la parte superior.

Cuando un electrón se mueve a través de un campo magnético está sujeto a la [fuerza de Lorentz](https://es.wikipedia.org/wiki/Fuerza_de_Lorentz), la cual ejerce una influencia en una dirección perpendicular al plano definido por el campo magnético y la velocidad del electrón. La [fuerza centrípeta](https://es.wikipedia.org/wiki/Fuerza_centr%C3%ADpeta) hace que el electrón siga una [trayectoria helicoidal](https://es.wikipedia.org/wiki/Helicoidal) a través del campo con un radio que se llama [radio de Larmor](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Radio_de_Larmor&action=edit&redlink=1). La aceleración de este movimiento curvado induce al electrón a radiar energía en forma de radiación sincrotrón.[95](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-100) [96](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-101) [nota 6](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-102) La emisión de energía, a su vez, causa un retroceso del electrón conocido como [fuerza de Abraham-Lorentz](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Fuerza_de_Abraham-Lorentz&action=edit&redlink=1), que crea una [fricción](https://es.wikipedia.org/wiki/Fricci%C3%B3n) que ralentiza el electrón. Esta fuerza es causada por una [reacción inversa](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Reacci%C3%B3n_inversa&action=edit&redlink=1) del mismo campo del electrón sobre sí mismo.[97](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-103)

En [electrodinámica cuántica](https://es.wikipedia.org/wiki/Electrodin%C3%A1mica_cu%C3%A1ntica), la interacción electromagnética entre partículas es mediada por fotones. Un electrón aislado que no está sufriendo ninguna aceleración no es capaz de emitir o absorber un fotón real, si lo hiciera violaría la [conservación de la energía](https://es.wikipedia.org/wiki/Conservaci%C3%B3n_de_la_energ%C3%ADa) y la cantidad de movimiento. En lugar de ello, los fotones virtuales pueden transferir cantidad de movimiento entre dos partículas cargadas.[98](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-104) Este intercambio de fotones virtuales genera, por ejemplo, la fuerza de Coulomb. La emisión de energía puede tener lugar cuando un electrón en movimiento es desviado por una partícula cargada (por ejemplo, un protón). La aceleración del electrón tiene como resultado la emisión de [radiación Bremsstrahlung](https://es.wikipedia.org/wiki/Bremsstrahlung).[99](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-105)

[](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bremsstrahlung.svg)

Aquí, un electrón *e* desviado por el campo eléctrico de un núcleo atómico produce prenorradiación. El cambio de energía *E*2 − *E*1 determina la frecuencia *f* del fotón emitido.

Una [colisión inelástica](https://es.wikipedia.org/wiki/Colisi%C3%B3n_inel%C3%A1stica) entre un fotón (luz) y un electrón solitario (libre) se llama [difusión Compton](https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Compton). Esta colisión resulta en una transferencia de cantidad de movimiento y energía entre las partículas que modifica la [longitud de onda](https://es.wikipedia.org/wiki/Longitud_de_onda) del fotón en un fenómeno denominado [desplazamiento de Compton](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Desplazamiento_de_Compton&action=edit&redlink=1).[nota 7](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-106) La máxima magnitud de este desplazamiento de longitud de onda es h/mec, lo que se conoce como [longitud de onda de Compton](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Longitud_de_onda_de_Compton&action=edit&redlink=1),[100](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-107) que para el electrón toma un valor de 2,43 × 10-12 m.[71](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-CODATA-73) Cuando la longitud de onda de la luz es larga (por ejemplo, la longitud de onda de la luz visible es de 0,4-0,7 [micras](https://es.wikipedia.org/wiki/Micra)) el desplazamiento de la longitud de onda se convierte despreciable. Este tipo de interacción entre la luz y electrones libres se llama [difusión Thomson](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Dispersi%C3%B3n_Thompson&action=edit&redlink=1).[101](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-Chen1998-108)

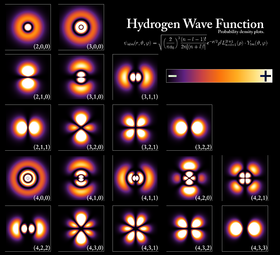
La magnitud relativa de la interacción electromagnética entre dos partículas cargadas, tales como un electrón y un protón, viene dada por la [constante de estructura fina](https://es.wikipedia.org/wiki/Constante_de_estructura_fina). Esta constante es una cantidad adimensional y representa la proporción entre dos energías: la [energía electrostática](https://es.wikipedia.org/wiki/Electroest%C3%A1tica) de atracción (o repulsión) en una separación de una longitud de onda de Compton, y el resto de energía de la carga. Tiene un valor de α ≈ 7,297353 × 10-3, que equivale aproximadamente a 1/137.[71](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-CODATA-73)

Cuando colisionan electrones y positrones se aniquilan unos a otros y dan lugar a dos o más [fotones de rayos gamma](https://es.wikipedia.org/wiki/Rayos_gamma). Si el electrón y el positrón tienen una cantidad de movimiento despreciable se puede formar un [positronio](https://es.wikipedia.org/wiki/Positronio) antes de que la aniquilación resulte en dos o tres fotones de rayos gamma de un total de 1.022 MeV.[102](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-109) [103](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-110) Por otro lado, los fotones de alta energía pueden transformarse en un electrón y un positrón mediante el proceso conocido como [creación de pares](https://es.wikipedia.org/wiki/Creaci%C3%B3n_de_pares), pero sólo con la presencia cercana de una partícula cargada, como un [núcleo](https://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAcleo_at%C3%B3mico).[104](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-111) [105](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-112)

Según la [teoría de la interacción electrodébil](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Teor%C3%ADa_de_la_interacci%C3%B3n_electrod%C3%A9bil&action=edit&redlink=1), la componente izquierdista de la función de onda del electrón forma un doblete de [isospín](https://es.wikipedia.org/wiki/Isosp%C3%ADn) débil con el [neutrino](https://es.wikipedia.org/wiki/Neutrino) electrónico. Esto significa que, durante las interacciones débiles, los neutrinos electrónicos se comportan como si fueran electrones. Cualquiera de los miembros de este doblete pueden sufrir una interacción de corriente cargado emitiendo o absorbiendo un W y ser absorbidos por el otro miembro. La carga se conserva durante esta reacción porque el [bosón W](https://es.wikipedia.org/wiki/Bos%C3%B3n_W)también lleva una carga, por lo que se cancela cualquier cambio neto durante la transmutación. Las interacciones de corriente cargadas son responsables del fenómeno de la[desintegración beta](https://es.wikipedia.org/wiki/Desintegraci%C3%B3n_beta) en un átomo radiactivo. Finalmente, tanto el electrón como el neutrino electrónico pueden sufrir una interacción de corriente neutral mediante un intercambio de [Z0](https://es.wikipedia.org/wiki/Bos%C3%B3n_Z). Este tipo de interacciones son responsables de la [difusión elástica](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Difusi%C3%B3n_el%C3%A1stica&action=edit&redlink=1) neutrino-electrón.[106](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-quigg-113)

### Átomos y moléculas**[[editar](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Electr%C3%B3n&action=edit&section=13" \o "Editar sección: Átomos y moléculas)]**

*Artículos principales:*[Átomo](https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81tomo)*y*[Molécula](https://es.wikipedia.org/wiki/Mol%C3%A9cula)*.*

[](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hydrogen_Density_Plots.png)

Densidades de probabilidad para los primeros átomos orbitales de hidrógeno, visto en sección transversal. El nivel de energía de un electrón ligado determina el orbital que ocupa, y el color refleja la probabilidad de encontrar el electrón en una posición dada.

Un electrón puede estar enlazado al núcleo de un átomo por la [fuerza de atracción de Coulomb](https://es.wikipedia.org/wiki/Fuerza_de_Coulomb). Un sistema de uno o más electrones enlazados a un núcleo se denomina [átomo](https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81tomo). Si el número de electrones es diferente a la [carga eléctrica](https://es.wikipedia.org/wiki/Carga_el%C3%A9ctrica) del núcleo, entonces el átomo se llama [ion](https://es.wikipedia.org/wiki/Ion). El comportamiento similar al de una onda de un electrón enlazado se describe por una función llamada [orbital atómico](https://es.wikipedia.org/wiki/Orbital_at%C3%B3mico). Cada orbital tiene su propio conjunto de [números cuánticos](https://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmeros_cu%C3%A1nticos) —tales como energía, momento angular y proyección del momento angular— y sólo existe un conjunto discreto de estos orbitales alrededor del núcleo. Según el [principio de exclusión de Pauli](https://es.wikipedia.org/wiki/Principio_de_exclusi%C3%B3n_de_Pauli), cada orbital puede ser ocupado hasta por dos electrones, los cuales no pueden tener el mismo número cuántico de [espín](https://es.wikipedia.org/wiki/Esp%C3%ADn).

Los electrones se pueden transferir entre diferentes orbitales mediante la emisión o absorción de [fotones](https://es.wikipedia.org/wiki/Fotones) con una energía que coincida con la [diferencia de potencial](https://es.wikipedia.org/wiki/Diferencia_de_potencial).[107](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-114) Otros métodos de transferencia orbital son las [colisiones con partículas](https://es.wikipedia.org/wiki/Colisionador_de_Hadrones) y el [efecto Auger](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Efecto_Auger&action=edit&redlink=1).[108](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-115) Para poder escapar del átomo, la energía del electrón se incrementará por sobre la energía que le liga al átomo. Esto ocurre, por ejemplo, en el efecto fotoeléctrico, en el que un fotón incidente que supera la [energía de ionización](https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_de_ionizaci%C3%B3n) del átomo es absorbido por el electrón.[109](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-grupen-116)

El momento angular orbital de los electrones está [cuantificado](https://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero_cu%C3%A1ntico). Como el electrón está cargado, produce un momento magnético orbital proporcional al momento angular. El momento magnético neto de un átomo equivale al vector suma de los momentos magnéticos de espín y orbitales de todos los electrones y el núcleo. El momento magnético del núcleo es despreciable comparado con el de los electrones. Los momentos magnéticos de los electrones que ocupan el mismo orbital (que se llaman electrones apareados) se simplifican entre sí.[110](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-117)

El [enlace químico](https://es.wikipedia.org/wiki/Enlace_qu%C3%ADmico) entre átomos existe como resultado de las interacciones electromagnéticas, tal como describen las leyes de la mecánica cuántica.[111](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-118) Los enlaces más fuertes están formados por la compartición o la transferencia de electrones entre átomos, lo que permite la formación de moléculas.[18](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-Pauling-20) Dentro de una molécula, los electrones se mueven bajo la influencia de muchos núcleos y ocupan [orbitales moleculares](https://es.wikipedia.org/wiki/Orbital_molecular), de igual manera que pueden ocupar orbitales atómicos en átomos aislados.[112](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-119) Un factor fundamental de estas estructuras moleculares es la existencia de [pares de electrones](https://es.wikipedia.org/wiki/Pares_de_electrones): se trata de electrones con espines opuestos, lo que les permite ocupar el mismo orbital molecular sin violar el principio de exclusión de Pauli (igual que ocurre en el átomo). Los diferentes orbitales moleculares tienen una distribución espacial distinta de la densidad de electrones. Por ejemplo, en pares enlazados (es decir, en los pares que enlazan átomos juntos) los electrones se pueden encontrar con mayor probabilidad en un volumen relativamente pequeño alrededor del núcleo. Por otro lado, en pares no enlazados los electrones están distribuidos en un volumen grande alrededor del núcleo.[113](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-120)

### Conductividad**[[editar](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Electr%C3%B3n&action=edit&section=14" \o "Editar sección: Conductividad)]**

[](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lightning_over_Oradea_Romania_cropped.jpg)

Un [rayo](https://es.wikipedia.org/wiki/Rayo) consiste básicamente de un[flujo de electrones](https://es.wikipedia.org/wiki/Electricidad).[114](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-121) El [potencial eléctrico](https://es.wikipedia.org/wiki/Potencial_el%C3%A9ctrico) necesario para que exista el rayo puede ser generado para un[efecto triboeléctrico](https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_triboel%C3%A9ctrico).[115](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-122) [116](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-123)

Si un cuerpo tiene más o menos electrones de los necesarios para equilibrar la carga positiva del núcleo, entonces este objeto tiene una carga eléctrica neta. Cuando hay un exceso de electrones, se dice que este objeto está cargado negativamente, por otra parte, cuando hay un defecto de electrones (menos electrones que protones en el núcleo), se dice que este objeto está cargado positivamente. Cuando el número de protones y de electrones son equivalentes, las cargas se cancelan y se dice que el objeto es eléctricamente neutro. En un [cuerpo macroscópico](https://es.wikipedia.org/wiki/Macrosc%C3%B3pico) puede aparecer una carga eléctrica si se frota, lo que se explica por el [efecto triboeléctrico](https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_triboel%C3%A9ctrico).[117](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-124)

Los electrones independientes que se mueven en el vacío se llaman electrones libres. Los electrones de metales se comportan como si fueran libres. En realidad, las partículas de los metales y otros sólidos que se denominan normalmente electrones son [quasielectrones](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Quasielectrones&action=edit&redlink=1) ([quasipartículas](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Quasipart%C3%ADculas&action=edit&redlink=1)): tienen la misma carga eléctrica, espín y momento magnético que los electrones reales pero pueden tener una masa diferente.[118](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-Liang-fu_Lou-125) Cuando los electrones libres —tanto en el vacío como en un metal— se mueven, producen un flujo neto de carga llamado [corriente eléctrica](https://es.wikipedia.org/wiki/Corriente_el%C3%A9ctrica) que genera un [campo magnético](https://es.wikipedia.org/wiki/Campo_magn%C3%A9tico). De la misma manera, se puede crear una corriente eléctrica mediante un campo magnético variable. Estas interacciones son descritas matemáticamente por las [ecuaciones de Maxwell](https://es.wikipedia.org/wiki/Ecuaciones_de_Maxwell).[119](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-126)

A una temperatura dada, cada material tiene una conductividad eléctrica que determina el valor de la corriente eléctrica cuando se aplica un potencial eléctrico. Algunos ejemplos de buenos conductores son los metales como el [cobre](https://es.wikipedia.org/wiki/Cobre) y el [oro](https://es.wikipedia.org/wiki/Oro), mientras que el vidrio y el [teflón](https://es.wikipedia.org/wiki/Tefl%C3%B3n) son malos conductores. En cualquier material dieléctrico, los electrones permanecen enlazados a sus respectivos átomos y el material se comporta como un [aislante](https://es.wikipedia.org/wiki/Aislante_el%C3%A9ctrico). La mayoría de semiconductores tienen un nivel variable de conductividad que está entre los extremos de conductor y aislante.[120](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-127) Por otra parte, los metales poseen una estructura de banda electrónica que contiene bandas electrónicas rellenadas parcialmente. La presencia de estas bandas permite a los electrones de los metales comportarse como si fueran [electrones libres o desapareados](https://es.wikipedia.org/wiki/Electrones_desapareados). Estos electrones no se asocian con átomos específicos, por lo que, cuando se aplica un campo eléctrico, tienen libertad de movimiento a través del material como si fueran un gas (lo que se denomina como [gas de Fermi](https://es.wikipedia.org/wiki/Gas_de_Fermi))[121](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-ziman-128) igual que si fueran electrones libres.

Debido a las colisiones entre electrones y átomos, la velocidad derivada de los electrones en un conductor se representa por medio de los milímetros por segundo. Sin embargo, la velocidad a la que un cambio de corriente en un punto del material causa cambios en las corrientes de otras partes del material ([velocidad de propagación](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Velocidad_de_propagaci%C3%B3n&action=edit&redlink=1)) suele ser un 75 % de la [velocidad de la luz](https://es.wikipedia.org/wiki/Velocidad_de_la_luz).[122](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-129) Esto explica porqué los impulsos eléctricos se propagan en forma de onda, su velocidad depende de la constante dieléctrica del material.[123](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-130)

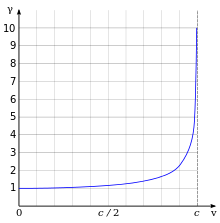
Los metales son unos conductores del calor relativamente buenos, básicamente porque los electrones deslocalizados se encuentran libres para transportar [energía térmica](https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_t%C3%A9rmica) entre átomos. Sin embargo, a diferencia de la conductividad eléctrica, la [conductividad térmica](https://es.wikipedia.org/wiki/Conductividad_t%C3%A9rmica) de un metal es casi independiente de la temperatura. Esto se expresa matemáticamente por la [ley de Wiedemann-Franz](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Ley_de_Wiedemann-Franz&action=edit&redlink=1),[121](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-ziman-128) que postula que la proporción de la conductividad térmica con respecto a la conductividad eléctrica es proporcional a la temperatura. El desorden térmico de la red metálica incrementa la [resistividad eléctrica](https://es.wikipedia.org/wiki/Resistividad_el%C3%A9ctrica) del material, lo que produce una dependencia de la temperatura por la corriente eléctrica.[124](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-durrant-131)

Cuando los materiales se enfrían por debajo de un punto llamado [punto crítico](https://es.wikipedia.org/wiki/Punto_cr%C3%ADtico_(termodin%C3%A1mica)) pueden sufrir un cambio de fase en el que pierden toda la resistividad a la corriente eléctrica, en un proceso que se conoce como[superconductividad](https://es.wikipedia.org/wiki/Superconductividad). En la [teoría BCS](https://es.wikipedia.org/wiki/Teor%C3%ADa_BCS), este comportamiento se modela con pares de electrones que entran en un estado cuántico conocido como [condensado de Bose-Einstein](https://es.wikipedia.org/wiki/Condensado_de_Bose-Einstein). Estos [pares de Cooper](https://es.wikipedia.org/wiki/Pares_de_Cooper)[125](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-132) tienen su movimiento emparejado en materia cercana mediante vibraciones de la red conocidas como [fonones](https://es.wikipedia.org/wiki/Fonones)[126](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-133) y, de esta manera, evitan las colisiones con átomos; de no ser así, se crearía resistencia eléctrica.Sin embargo, el mecanismo por el cual operan los [superconductores de alta temperatura](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Superconductores_de_alta_temperatura&action=edit&redlink=1) permanece incierto.

Cuando se confinan con firmeza los electrones dentro de sólidos conductores —que son quasipartículas— a temperaturas cercanas al [cero absoluto](https://es.wikipedia.org/wiki/Cero_absoluto), se comportan como si se dividieran en dos otras quasipartículas: [espinones](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Espinones&action=edit&redlink=1) y [holones](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Hol%C3%B3n_(f%C3%ADsica)&action=edit&redlink=1).[127](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-134) [128](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-135) El primero es el que se encarga del espín y del momento magnético, mientras que el segundo lleva la carga eléctrica.

### Movimiento y energía**[[editar](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Electr%C3%B3n&action=edit&section=15" \o "Editar sección: Movimiento y energía)]**

Según la [teoría de la relatividad especial](https://es.wikipedia.org/wiki/Teor%C3%ADa_de_la_relatividad_especial) de [Einstein](https://es.wikipedia.org/wiki/Albert_Einstein), cuando la velocidad de un electrón se aproxima a la velocidad de la luz, desde el punto de vista de un observador, su masa relativística incrementa, lo que hace que sea más y más difícil acelerarlo dentro del marco de referencia del observador. La velocidad del electrón se puede aproximar, pero nunca llegar a la velocidad de la luz en el vacío, [*c*](https://es.wikipedia.org/wiki/Velocidad_de_la_luz). Sin embargo, cuando los electrones relativísticos —es decir, electrones que se mueven a una velocidad cercana a *c*— insertados en un medio dieléctrico como el agua —en el que la velocidad local de la luz es mucho menor que *c*— viajan temporalmente más rápido que la luz en este medio. Mediante su interacción con el medio generan una luz tenue que se llama [radiación de Cherenkov](https://es.wikipedia.org/wiki/Radiaci%C3%B3n_de_Cherenkov).[129](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-136)

[](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lorentz_factor.svg)

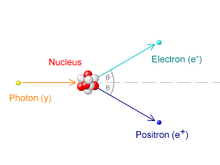
Factor de Lorentz como una función de la velocidad. Se inicia en el valor 1 y se va hasta el infinito tantas *v* como enfoques *c*.

Los efectos de la relatividad especial se basan en una cantidad conocida como el [factor de Lorentz](https://es.wikipedia.org/wiki/Factor_de_Lorentz), que se define como {\displaystyle \scriptstyle \gamma =1/{\sqrt {1-{v^{2}}/{c^{2}}}}}, donde *v* es la velocidad de la partícula. La [energía cinética](https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_cin%C3%A9tica) (*Ec*) de un electrón que se mueve a velocidad *v* es:

{\displaystyle \displaystyle K\_{\mathrm {e} }=(\gamma -1)m\_{\mathrm {e} }c^{2},}

donde *m*e es la masa del electrón. Por ejemplo, el [acelerador lineal de Stanford](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Acelerador_lineal_de_Stanford&action=edit&redlink=1) puede [acelerar](https://es.wikipedia.org/wiki/Acelerador_de_part%C3%ADculas) un electrón hasta aproximadamente unos 51 GeV.[130](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-137) Como un electrón se comporta como una onda, donde determinada velocidad poseerá una [longitud de onda](https://es.wikipedia.org/wiki/Longitud_de_onda) de [De Broglie](https://es.wikipedia.org/wiki/Dualidad_onda_corp%C3%BAsculo) que viene dada por λe=h/p, donde *h* es la [constante de Planck](https://es.wikipedia.org/wiki/Constante_de_Planck) y *p* es la cantidad de movimiento.[53](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-de_broglie-55) Para el electrón de 51 GeV mencionado anteriormente, la longitud de onda obtenida es de aproximadamente 2,4 × 10-17 m, lo suficientemente pequeña para poder explorar estructuras de tamaño muy inferior a la del [núcleo atómico](https://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAcleo_at%C3%B3mico).[131](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-138)

## **Formación[[editar](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Electr%C3%B3n&action=edit&section=16" \o "Editar sección: Formación)]**

[](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pairproduction.png)

[Producción de pares](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Producci%C3%B3n_de_pares&action=edit&redlink=1) causada por la colisión de un fotón con un núcleo atómico

La [teoría del Big Bang](https://es.wikipedia.org/wiki/Teor%C3%ADa_del_Big_Bang) es la teoría científica más aceptada para explicar las primeras etapas de la [evolución del universo](https://es.wikipedia.org/wiki/Edad_del_Universo).[132](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-139) Durante el primer milisegundo del Big Bang, las temperaturas estaban por encima de 1010 [K](https://es.wikipedia.org/wiki/Kelvin) y los fotones tenían unas energías medias superiores a un millón de eV, siendo suficientemente energéticos para poder reaccionar entre sí formando pares electrón-positrón. Del mismo modo, estos pares se aniquilaron los unos a otros y emitieron fotones energéticos:

[γ](https://es.wikipedia.org/wiki/Fot%C3%B3n) + γ ↔ [e+](https://es.wikipedia.org/wiki/Positr%C3%B3n) + e-

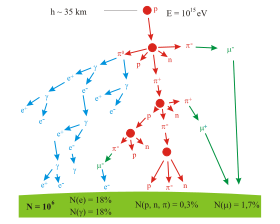
Durante esta fase de la evolución del Universo se mantuvo un equilibrio entre los electrones, los positrones y los fotones. Después de que hubieran pasado 15 segundos, la temperatura del Universo bajó por debajo del límite que permitía la formación de electrones-positrones. La mayoría de las partículas que sobrevivieron se aniquilaron unas a otras liberando [radiación gamma](https://es.wikipedia.org/wiki/Radiaci%C3%B3n_gamma), la cual recalentó brevemente el Universo.[133](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-140)

Por razones que todavía permanecen inciertas, durante el proceso de [leptogénesis](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Leptog%C3%A9nesis&action=edit&redlink=1) hubo un exceso de número de electrones respecto al de positrones.[134](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-141) Es por ello que alrededor de un electrón por cada millardo sobrevivieron al proceso de aniquilación. Este exceso coincidía con el de protones respecto al de antiprotones (condición que se conoce como [asimetría bariónica](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Asimetr%C3%ADa_bari%C3%B3nica&action=edit&redlink=1)), lo que resulta en una carga neta del Universo nulo.[135](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-142) [136](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-143) Los neutrones y protones que sobrevivieron comenzaron a participar en reacciones los unos con otros en un proceso conocido como [nucleosíntesis](https://es.wikipedia.org/wiki/Nucleos%C3%ADntesis), en el que se formaban isótopos de [hidrógeno](https://es.wikipedia.org/wiki/Hidr%C3%B3geno) y [helio](https://es.wikipedia.org/wiki/Helio) con trazas de [litio](https://es.wikipedia.org/wiki/Litio). Este proceso alcanzó su máximo después de más o menos cinco minutos.[137](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-144) Todos los neutrones sobrantes sufrieron una [desintegración beta negativa](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Desintegraci%C3%B3n_beta_negativa&action=edit&redlink=1) con una [semivida](https://es.wikipedia.org/wiki/Semivida) de un millar de segundos; durante este proceso se liberaron un protón y un electrón por cada neutrón:

[n](https://es.wikipedia.org/wiki/Neutr%C3%B3n) → [p](https://es.wikipedia.org/wiki/Prot%C3%B3n) + e- + [ν-e](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Neutr%C3%B3n_electr%C3%B3nico&action=edit&redlink=1)

Durante los 300 000-400 000 años siguientes, el exceso de electrones todavía era demasiado energético para poder enlazarse con los [núcleos atómicos](https://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAcleo_at%C3%B3mico).[138](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-145) Lo que siguió a este periodo se conoce como [recombinación](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Recombinaci%C3%B3n_molecular&action=edit&redlink=1): es decir, se formaron átomos neutrales y el Universo en expansión se convirtió transparente a la radiación.[139](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-science5789-146)

Más o menos un millón de años después del Big Bang se empezó a formar la primera generación de [estrellas](https://es.wikipedia.org/wiki/Estrella).[139](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-science5789-146) Dentro de una estrella, la [nucleosíntesis estelar](https://es.wikipedia.org/wiki/Nucleos%C3%ADntesis_estelar) tiene como resultado la producción de positrones a partir de la fusión de núcleos atómicos. Estas partículas de [antimateria](https://es.wikipedia.org/wiki/Antimateria) se aniquilan inmediatamente con electrones, lo que libera rayos gamma. El resultado neto es una reducción firme del número de electrones y un correspondiente incremento del número de neutrones. Sin embargo, el proceso de evolución estelar puede resultar en la síntesis de [isótopos radiactivos](https://es.wikipedia.org/wiki/Is%C3%B3topos_radiactivos). Algunos isótopos pueden sufrir una desintegración beta negativa por la que emiten un electrón y un antineutrón del núcleo.[140](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-147) Un ejemplo de ello es el [isótopo cobalto](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Is%C3%B3topos_del_cobalto&action=edit&redlink=1)-60 (60Co), que se desintegra para formar níquel-60 (60Ni).[141](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-148)

[](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AirShower.svg)

Una ducha al aire ampliado generada por un rayo cósmico energético que golpea la atmósfera de la Tierra

Al final de su ciclo de vida, una estrella de más de unas 20 [masas solares](https://es.wikipedia.org/wiki/Masa_solar) puede sufrir un colapso gravitatorio y formar un [agujero negro](https://es.wikipedia.org/wiki/Agujero_negro).[142](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-149) Según la [física clásica](https://es.wikipedia.org/wiki/F%C3%ADsica_cl%C3%A1sica), estos objetos estelares masivos ejercen una atracción gravitatoria lo suficientemente fuerte como para impedir que nada —ni siquiera la [radiación electromagnética](https://es.wikipedia.org/wiki/Radiaci%C3%B3n_electromagn%C3%A9tica)— escape más allá del [radio de Schwarzschild](https://es.wikipedia.org/wiki/Radio_de_Schwarzschild). Sin embargo, se cree que los [efectos mecánico-cuánticos](https://es.wikipedia.org/wiki/Mec%C3%A1nica_cu%C3%A1ntica) podrían permitir que se emitiera [radiación Hawking](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Radiaci%C3%B3n_Hawking&action=edit&redlink=1) a esa distancia. También se piensa que se crean electrones (y positrones) en el [horizonte de eventos](https://es.wikipedia.org/wiki/Horizonte_de_eventos) de estas estrellas remanentes.

Cuando se crean pares de partículas virtuales (tales como el electrón y el positrón) en las inmediaciones del horizonte de eventos, la distribución espacial aleatoria de estas partículas puede permitir que una de ellas aparezca en el exterior: este proceso se conoce como «[efecto túnel](https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_t%C3%BAnel)». El [potencial gravitatorio](https://es.wikipedia.org/wiki/Potencial_gravitatorio) del agujero negro puede entonces aportar la energía que transforma esta partícula virtual en una partícula real, lo que permite que sea radiada hacia el espacio.[143](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-150) A cambio de esto, el otro miembro del par recibe energía negativa, lo que resulta en una pérdida neta de masa-energía del agujero negro. La tasa de radiación de Hawking incrementa cuando la masa decrece, lo que lleva finalmente a la evaporación del agujero negro hasta que, al final, explota.[144](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-151)

Los [rayos cósmicos](https://es.wikipedia.org/wiki/Rayos_c%C3%B3smicos) son partículas que viajan por el espacio con altas energías. Se han documentado eventos de energías tan altas como de 3,0 × 1020 [eV](https://es.wikipedia.org/wiki/Electronvoltio).[145](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-152)Cuando estas partículas colisionan con [nucleones](https://es.wikipedia.org/wiki/Nucleones) de la atmósfera terrestre, se genera una cascada de partículas, entre ellas [piones](https://es.wikipedia.org/wiki/Pi%C3%B3n).[146](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-153) Más de la mitad de la radiación cósmica observada desde la superficie de la Tierra consiste en [muones](https://es.wikipedia.org/wiki/Muones). Estas partículas, los muones, son [leptones](https://es.wikipedia.org/wiki/Leptones) producidos en la atmósfera superior a partir de la desintegración de piones:

[π](https://es.wikipedia.org/wiki/Pion)- → [μ](https://es.wikipedia.org/wiki/Muon)− + [ν−μ](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Muon_antineutrino&action=edit&redlink=1)

A su vez, un muon se puede desintegrar para formar un electrón o un positrón:[147](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-154)

[μ](https://es.wikipedia.org/wiki/Muon)− → e- + [ν−e](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Electr%C3%B3n_antineutrino&action=edit&redlink=1) + [ν−μ](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Muon_neutrino&action=edit&redlink=1)

## **Observación[[editar](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Electr%C3%B3n&action=edit&section=17" \o "Editar sección: Observación)]**

[](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aurore_australe_-_Aurora_australis.jpg)

Las auroras están causadas principalmente por electrones energéticos precipitándose en la[atmósfera](https://es.wikipedia.org/wiki/Atm%C3%B3sfera).[148](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-155)

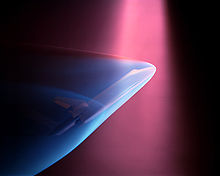
La observación remota de electrones requiere la detección de su energía radiada. Por ejemplo, en ambientes de alta energía tales como una [corona estelar](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Corona_estelar&action=edit&redlink=1) los electrones libres forman [plasma](https://es.wikipedia.org/wiki/Plasma_(estado_de_la_materia)) que radia energía debido a la [radiación de frenado](https://es.wikipedia.org/wiki/Radiaci%C3%B3n_de_frenado). El gas de electrones puede sufrir una oscilación de plasma, que consiste en ondas causadas por variaciones sincronizadas de la densidad electrónica que producen emisiones energéticas que se pueden detectar usando [radiotelescopios](https://es.wikipedia.org/wiki/Radiotelescopio).[149](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-156)

La frecuencia de un [fotón](https://es.wikipedia.org/wiki/Fot%C3%B3n) es proporcional a su energía. Cuando un electrón enlazado se mueve entre diferentes niveles de energía del átomo, este absorbe o emite fotones a frecuencias características. Por ejemplo, cuando los átomos son irradiados por una fuente con un espectro amplio, aparecen diferentes [líneas de absorción](https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADneas_de_absorci%C3%B3n) en el espectro de la radiación transmitida. Cada elemento o molécula muestra un conjunto característico de líneas espectrales (tal y como en el caso de las líneas espectrales del hidrógeno). Las medidas espectroscópicas de la magnitud y amplitud de estas líneas permite determinar la composición y las propiedades físicas de una sustancia.[150](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-157) [151](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-158)

En condiciones de laboratorio, las interacciones de electrones individuales se pueden observar mediante detectores de partículas, los cuales permiten medir propiedades específicas tales como energía, espín y carga.[109](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-grupen-116) El desarrollo de la [trampa de Paul](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Trampa_de_Paul&action=edit&redlink=1) y de la [trampa de Penning](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Trampa_de_Penning&action=edit&redlink=1) posibilita tener partículas cargas contenidas dentro de una pequeña región durante largas duraciones de tiempo, lo que permite realizar medidas precisas de las propiedades de las partículas. Por ejemplo, una vez una trampa de Penning fue utilizada para contener un solo electrón durante un período de 10 meses.[152](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-nobel1989-159) El momento magnético del electrón fue medido con una precisión de once dígitos, lo cual, en 1980, fue de una precisión mayor que la de cualquier otra constante física.[153](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-160)

Las primeras imágenes en vídeo de la distribución de energía de un electrón fueron grabadas por un equipo de la [Universidad de Lund](https://es.wikipedia.org/wiki/Universidad_de_Lund) (Suecia) en febrero de 2008. Los científicos usaron [flashes](https://es.wikipedia.org/wiki/Flash_(fotograf%C3%ADa)) de luz extremadamente cortos —llamados [pulsos de Attosegon](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Pulsos_de_Attosegon&action=edit&redlink=1)— los cuales permitieron observar el movimiento de un electrón por primera vez.[154](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-161) [155](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-Mauritsson-162) La distribución de los electrones en materiales sólidos se puede visualizar mediante la [espectroscopia de fotoemisión resuelta en ángulo](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=ARPES&action=edit&redlink=1) (ARPAS, en sus siglas en inglés). Esta técnica utiliza el [efecto fotoeléctrico](https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_fotoel%C3%A9ctrico) para medir el [espacio recíproco](https://es.wikipedia.org/wiki/Espacio_rec%C3%ADproco) (una representación matemática de estructuras periódicas que se utiliza para inferir la estructura original). El ARPES se puede usar para determinar la dirección, velocidad y difusión de los electrones dentro del material.[156](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-163)

## **Aplicaciones del plasma[[editar](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Electr%C3%B3n&action=edit&section=18" \o "Editar sección: Aplicaciones del plasma)]**

[](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nasa_Shuttle_Test_Using_Electron_Beam_full.jpg)

Un haz de electrones es dirigido hacia una maqueta del [transbordador espacial](https://es.wikipedia.org/wiki/Transbordador_STS) dentro de un [túnel de viento](https://es.wikipedia.org/wiki/T%C3%BAnel_de_viento)de la [NASA](https://es.wikipedia.org/wiki/NASA) para simular el efecto de[ionización](https://es.wikipedia.org/wiki/Ionizaci%C3%B3n) de los gases durante la[reentrada atmosférica](https://es.wikipedia.org/wiki/Reentrada_atmosf%C3%A9rica).[157](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-164)

### Haces de partículas**[[editar](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Electr%C3%B3n&action=edit&section=19" \o "Editar sección: Haces de partículas)]**

Los [haces de electrones](https://es.wikipedia.org/wiki/Haces_de_electrones) se utilizan para llevar a cabo la [soldadura por haz de electrones](https://es.wikipedia.org/wiki/Soldadura_por_haz_de_electrones),[158](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-165) la cual permite conseguir densidades energéticas de hasta 107 W·cm-2 en una región de diámetro de un rango tan pequeño como de 0,1-1,3 mm; además, normalmente no requiere disponer de ningún material de aportación. Esta técnica de soldadura se lleva a cabo en el vacío, de tal forma que el haz de electrones no interaccione con el gas antes de llegar al objetivo. Se usa para juntar materiales conductores que, de otra manera, no podrían ser soldados.[159](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-166) [160](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-167)

La [litografía por haz de electrones](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Litograf%C3%ADa_por_haz_de_electrones&action=edit&redlink=1) (EBL, en su acrónimo en inglés) es un método para grabar semiconductores a resoluciones más pequeñas que un [micrómetro](https://es.wikipedia.org/wiki/Micr%C3%B3metro_(unidad_de_longitud)).[161](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-168) Las limitaciones de esta técnica son el alto costo, el bajo rendimiento, la necesidad de operar el haz en el vacío y la tendencia de los electrones de dispersarse en sólidos. Este último problema limita la resolución a más o menos 10 nm. Por esta razón, la litografía por haz de electrones se utiliza primordialmente para la producción de pequeñas cantidades de circuitos integrados especializados.[162](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-169)

El tratamiento por haz de electrones se utiliza para irradiar materiales con tal de modificar sus propiedades físicas, así como para [esterilizar](https://es.wikipedia.org/wiki/Esterilizaci%C3%B3n_(microbiolog%C3%ADa)) productos médicos y alimenticios.[163](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-170) En [radioterapia](https://es.wikipedia.org/wiki/Radioterapia), los haces de electrones se generan con aceleradores lineales para tratar tumores superficiales. Como el haz de electrones sólo puede penetrar hasta una profundidad determinada antes de ser absorbido —normalmente hasta 5 cm por electrones de energías entre el rango de 5-20 MeV—. La [teleradioterapia](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Teleradioterapia&action=edit&redlink=1)mediante electrones es útil para tratar lesiones de la piel tales como [carcinomas basocelulares](https://es.wikipedia.org/wiki/Carcinoma). Un haz de electrones se puede utilizar para complementar el tratamiento de áreas que han sido irradiadas con [rayos X](https://es.wikipedia.org/wiki/Rayos_X).[164](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-171) [165](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-172)

Los aceleradores de partículas hacen uso de los campos eléctricos para propulsar los electrones y sus antipartículas a energías elevadas. Cuando estas partículas pasan a través de campos magnéticos emiten[radiación sincrotrónica](https://es.wikipedia.org/wiki/Radiaci%C3%B3n_sincrot%C3%B3n). La intensidad de esta radiación depende del espín, lo que causa la [polarización](https://es.wikipedia.org/wiki/Polarizaci%C3%B3n_electroqu%C3%ADmica) del haz de electrones: este proceso se conoce como [efecto Sokolov-Ternov](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Efecto_Sokolov-Ternov&action=edit&redlink=1). Los haces de electrones polarizados pueden ser útiles para diversos tipos de experimentos. La radiación sincrotrónica también se puede usar para enfriar los haces de electrones, lo que reduce la dispersión de cantidad de movimiento de las partículas. Cuando las partículas han acelerado a las energías necesarias se provoca una colisión de haces separados de electrones y positrones. Las emisiones de energía resultantes se observan con detectores de partículas y se estudian en el campo de la [física de partículas](https://es.wikipedia.org/wiki/F%C3%ADsica_de_part%C3%ADculas).[166](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-173)

### Creación de imágenes**[[editar](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Electr%C3%B3n&action=edit&section=20" \o "Editar sección: Creación de imágenes)]**

La [difracción de electrones de baja energía](https://es.wikipedia.org/wiki/LEED) (LEED, de sus siglas en inglés) es un método que consiste en bombardear un material cristalino con un brote limitado de electrones y entonces observar los patrones de difracción que resultan con tal de determinar la estructura del material. La energía necesaria para los electrones es del rango de 20 a 200 eV.[167](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-174) La técnica de [difracción de electrones reflejados de alta energía](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=RHEED&action=edit&redlink=1)(RHEED, de sus siglas en inglés) utiliza la reflexión de un haz de electrones disparado a varios ángulos pequeños para caracterizar la superficie de materiales cristalinos. La energía del haz suele estar en el rango de 8-20 keV y el ángulo de incidencia entre 1-4 °.[168](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-175) [169](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-176)

El [microscopio electrónico](https://es.wikipedia.org/wiki/Microscopio_electr%C3%B3nico) dirige un haz localizado de electrones a un objeto. Cuando el haz interacciona con el material, algunos electrones cambian de propiedades como, por ejemplo, la dirección de movimiento, el ángulo, la fase relativa y la energía. Si se toma nota de estos cambios del haz de electrones, los microscopios pueden producir una imagen a nivel atómico del material.[170](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-177) Bajo luz azul, los [microscopios ópticos](https://es.wikipedia.org/wiki/Microscopios_%C3%B3pticos)convencionales tienen una resolución limitada por la difracción de unos 200 nm;[171](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-178) en comparación, los microscopios electrónicos están limitados por la [longitud de onda de De Broglie](https://es.wikipedia.org/wiki/Longitud_de_onda_de_De_Broglie) del electrón. Esta longitud de onda, por ejemplo, es de 0,0037 nm por electrones que se aceleran en un potencial de 100 000 [voltios](https://es.wikipedia.org/wiki/Voltio).[172](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-179) El microscopio electrónico de transmisión de aberración corregida es capaz de conseguir una resolución por debajo de los 0,05 nm, que es más que suficiente para estudiar átomos individuales.[173](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-180) Esta capacidad convierte al microscopio electrónico en un instrumento de laboratorio muy útil para formar imágenes de alta resolución. Sin embargo, los microscopios electrónicos son aparatos muy caros y costosos de mantener.

Existen dos tipos principales de microscopios electrónicos: los de transmisión y los de rastreo. Los [microscopios electrónicos de transmisión](https://es.wikipedia.org/wiki/Microscopio_electr%C3%B3nico_de_transmisi%C3%B3n) funcionan de una manera similar que un [retroproyector](https://es.wikipedia.org/wiki/Retroproyector): un haz de electrones pasa a través de una banda de material y entonces es proyectado mediante lentes en un [film fotográfico](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Film_fotogr%C3%A1fico&action=edit&redlink=1) o un [detector CCD](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Detector_CCD&action=edit&redlink=1). Por otra parte, los [microscopios electrónicos de barrido](https://es.wikipedia.org/wiki/Microscopio_electr%C3%B3nico_de_barrido) producen la imagen mediante el rastreo de un haz de electrones localizado a lo largo de la muestra estudiada. La magnificación va desde 100 × hasta 1,000,000 × o más para ambos tipos de microscopios. Finalmente, el microscopio de [efecto túnel](https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_t%C3%BAnel) se basa en el efecto túnel de electrones que circulan entre un electrodo afilado y el material estudiado para generar imágenes de resolución atómica de su superficie.[174](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-bozzola_1999-181) [175](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-182) [176](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-183)

### Otras aplicaciones**[**[**editar**](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Electr%C3%B3n&action=edit&section=21)**]**

En el [láser de electrones libres](https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1ser_de_electrones_libres) (FEL, de las siglas en inglés) se hace pasar un haz de electrones relativistas a través de un par de onduladores que contienen matrices de [imanes dipolares](https://es.wikipedia.org/wiki/Im%C3%A1n_dipolar), que se caracterizan por poseer [campos magnéticos](https://es.wikipedia.org/wiki/Campo_magn%C3%A9tico) con direcciones alternadas. Los electrones emiten radiación sincrotrón que, a su vez, interacciona coherentemente con los mismos electrones. Esto conduce a una fuerte amplificación del campo de radiación a la frecuencia de resonancia. El FEL puede emitir una radiación electromagnética coherente de alto brillo con un ancho rango de frecuencias que va desde las [microondas](https://es.wikipedia.org/wiki/Microondas) hasta los rayos X suaves. Estos aparatos podrían utilizarse en un futuro para tareas de fabricación, comunicación y también para aplicaciones médicas tales como [cirugía](https://es.wikipedia.org/wiki/Cirug%C3%ADa_general) de tejidos blandos.[177](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-184)

Los electrones se encuentran en el corazón de los tubos de rayos catódicos, que han sido muy utilizados como aparatos de visualización de instrumentos de laboratorio, monitores de ordenador y televisores.[178](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-185) En un [tubo fotomultiplicador](https://es.wikipedia.org/wiki/Tubo_fotomultiplicador), cada fotón que choca con el [fotocátodo](https://es.wikipedia.org/wiki/Fotoc%C3%A1todo) inicia una avalancha de electrones que produce un pulso de corriente detectable.[179](https://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3n#cite_note-186) Los [tubos de vacío](https://es.wikipedia.org/wiki/Tubos_de_vac%C3%ADo) utilizan el flujo de electrones para manipular señales eléctricas; tuvieron un papel esencial en el desarrollo de la tecnología electrónica. Sin embargo, actualmente ya han sido reemplazados por aparatos de estado sólido tales como el [transistor](https://es.wikipedia.org/wiki/Transistor).