

# Mecánica cuántica

La **mecánica cuántica**<sup>[1][2]</sup> (también conocida como la **física cuántica** o la **teoría cuántica**) es una rama de la física que se ocupa de los fenómenos físicos a escalas microscópicas, donde la acción es del orden de la constante de Planck. Su aplicación ha hecho posible el descubrimiento y desarrollo de muchas tecnologías, como por ejemplo los transistores, componentes ampliamente utilizados en casi todos los aparatos que tengan alguna parte funcional electrónica.

La mecánica cuántica describe, en su visión más ortodoxa, cómo en cualquier sistema físico —y por tanto, en todo el universo— existe una diversa multiplicidad de estados, los cuales habiendo sido descritos mediante ecuaciones matemáticas por los físicos, son denominados estados cuánticos. De esta forma la mecánica cuántica puede explicar la existencia del átomo y desvelar los misterios de la estructura atómica, tal como hoy son entendidos; fenómenos que no puede explicar debidamente la física clásica o más propiamente la mecánica clásica.

De forma específica, se considera también mecánica cuántica, a la parte de ella misma que no incorpora la relatividad en su formalismo, tan sólo como añadido mediante la teoría de perturbaciones.<sup>[3]</sup> La parte de la mecánica cuántica que sí incorpora elementos relativistas de manera formal y con diversos problemas, es la mecánica cuántica relativista o ya, de forma más exacta y potente, la teoría cuántica de campos (que incluye a su vez a la electrodinámica cuántica, cromodinámica cuántica y teoría electrodébil dentro del modelo estándar)<sup>[4]</sup> y más generalmente, la teoría cuántica de campos en espacio-tiempo curvo. La única interacción que no se ha podido cuantificar ha sido la interacción gravitatoria.

La mecánica cuántica es el fundamento de los estudios del átomo, su núcleo y las partículas elementales (siendo necesario el enfoque relativista). También en teoría de la información, criptografía y química.

Las técnicas derivadas de la aplicación de la mecánica cuántica suponen, en mayor o menor medida, el 30 por ciento del PIB de los Estados Unidos.<sup>[5]</sup>

## Contexto histórico

La mecánica cuántica es, cronológicamente, la última de las grandes ramas de la física. Comienza a principios del siglo XX, en el momento en que dos de las teorías que intentaban explicar ciertos fenómenos, la ley de gravitación universal y la teoría electromagnética clásica, se volvían insuficientes para esclarecerlos. La teoría electromagnética generaba un problema cuando intentaba explicar la emisión de radiación de cualquier objeto en equilibrio, llamada radiación térmica, que es la que proviene de la vibración microscópica de las partículas que lo componen. Usando las ecuaciones de la electrodinámica clásica, la energía que emitía esta radiación térmica tendía al infinito si se suman todas las frecuencias que emitía el objeto, con ilógico resultado para los físicos.

Es en el seno de la mecánica estadística donde surgen las ideas cuánticas en 1900. Al físico alemán Max Planck se le ocurrió un artificio matemático: si en el proceso aritmético se sustituía la integral de esas frecuencias por una suma no continua, se dejaba de obtener infinito como resultado, con lo que se eliminaba el problema; además, el resultado obtenido concordaba con lo que después era medido.

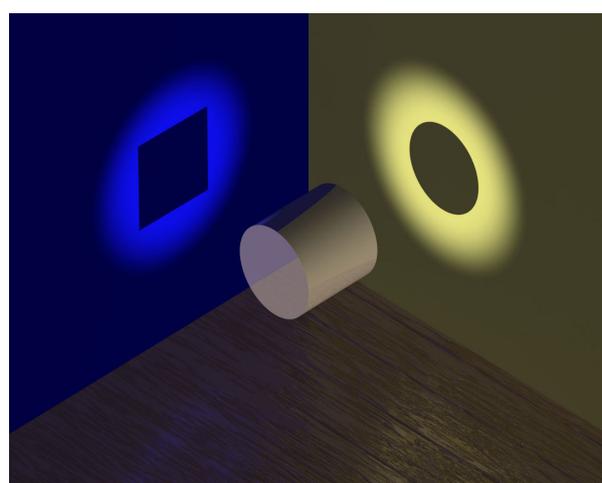


Imagen ilustrativa de la dualidad onda-partícula, en el que se aprecia cómo un mismo fenómeno puede ser percibido de dos modos distintos.

Fue Max Planck quien entonces enunció la hipótesis de que la radiación electromagnética es absorbida y emitida por la materia en forma de «cuantos» de luz o fotones de energía mediante una constante estadística, que se denominó constante de Planck. Su historia es inherente al siglo XX, ya que la primera formulación *cuántica* de un fenómeno fue dada a conocer por el mismo Planck el 14 de diciembre de 1900 en una sesión de la Sociedad Física de la Academia de Ciencias de Berlín.<sup>[6]</sup>

La idea de Planck habría quedado muchos años sólo como hipótesis si Albert Einstein no la hubiera retomado, proponiendo que la luz, en ciertas circunstancias, se comporta como partículas de energía independientes (los cuantos de luz o fotones). Fue Albert Einstein quien completó en 1905 las correspondientes leyes de movimiento en su teoría especial de la relatividad, demostrando que el electromagnetismo era una teoría esencialmente no mecánica. Culminaba así lo que se ha dado en llamar física clásica, es decir, la física no-cuántica.

Usó este punto de vista llamado por él «heurístico», para desarrollar su teoría del efecto fotoeléctrico, publicando esta hipótesis en 1905, lo que le valió el Premio Nobel de Física de 1921. Esta hipótesis fue aplicada también para proponer una teoría sobre el calor específico, es decir, la que resuelve cuál es la cantidad de calor necesaria para aumentar en una unidad la temperatura de la unidad de masa de un cuerpo.

El siguiente paso importante se dio hacia 1925, cuando Louis De Broglie propuso que cada partícula material tiene una longitud de onda asociada, inversamente proporcional a su masa, (a la que llamó momentum), y dada por su velocidad. Poco tiempo después Erwin Schrödinger formuló una ecuación de movimiento para las «ondas de materia», cuya existencia había propuesto De Broglie y varios experimentos sugerían que eran reales.

La mecánica cuántica introduce una serie de hechos contraintuitivos que no aparecían en los paradigmas físicos anteriores; con ella se descubre que el mundo atómico no se comporta como esperaríamos. Los conceptos de incertidumbre o cuantización son introducidos por primera vez aquí. Además la mecánica cuántica es la teoría científica que ha proporcionado las predicciones experimentales más exactas hasta el momento, a pesar de estar sujeta a las probabilidades.

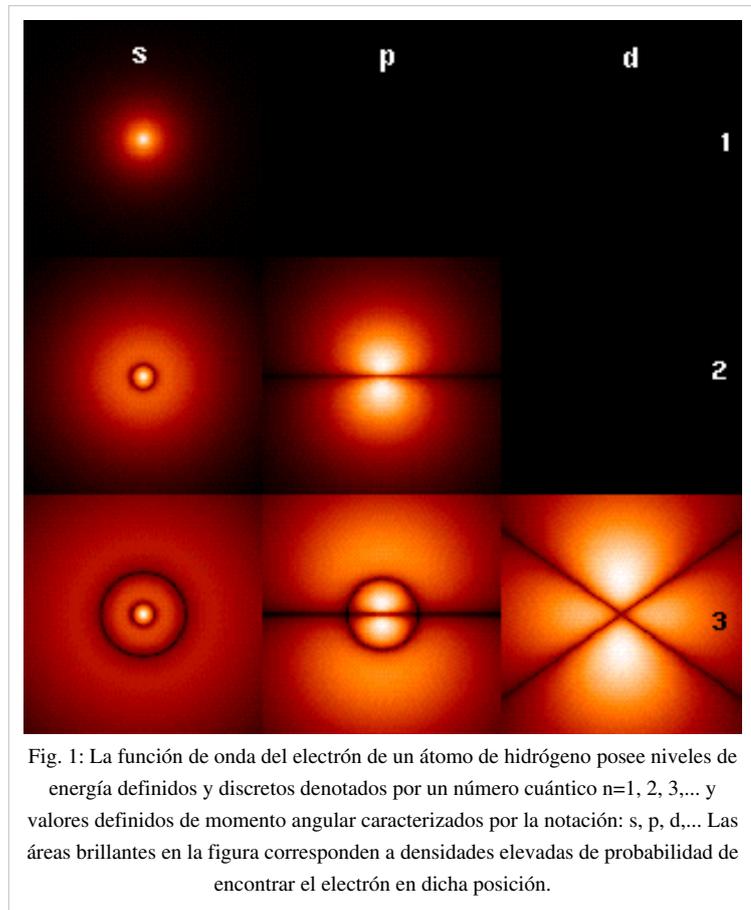
## Desarrollo histórico

La teoría cuántica fue desarrollada en su forma básica a lo largo de la primera mitad del siglo XX. El hecho de que la energía se intercambie de forma discreta se puso de relieve por hechos experimentales como los siguientes, inexplicables con las herramientas teóricas anteriores de la mecánica clásica o la electrodinámica:

- Espectro de la radiación del cuerpo negro, resuelto por Max Planck con la cuantización de la energía. La energía total del cuerpo negro resultó que tomaba valores discretos más que continuos. Este fenómeno se llamó cuantización, y los intervalos posibles más pequeños entre los valores discretos son llamados *quanta* (singular: quantum, de la palabra latina para «cantidad», de ahí el nombre de mecánica cuántica). El tamaño de un cuanto es un valor fijo llamado constante de Planck, y que vale:  $6.626 \times 10^{-34}$  julios por segundo.
- Bajo ciertas condiciones experimentales, los objetos microscópicos como los átomos o los electrones exhiben un comportamiento ondulatorio, como en la interferencia. Bajo otras condiciones, las mismas especies de objetos exhiben un comportamiento corpuscular, de partícula, («partícula» quiere decir un objeto que puede ser localizado en una región concreta del espacio), como en la dispersión de partículas. Este fenómeno se conoce como dualidad onda-partícula.
- Las propiedades físicas de objetos con historias asociadas pueden ser correlacionadas, en una amplitud prohibida para cualquier teoría clásica, sólo pueden ser descritos con precisión si se hace referencia a ambos a la vez. Este fenómeno es llamado entrelazamiento cuántico y la desigualdad de Bell describe su diferencia con la correlación ordinaria. Las medidas de las violaciones de la desigualdad de Bell fueron algunas de las mayores comprobaciones de la mecánica cuántica.
- Explicación del efecto fotoeléctrico, dada por Albert Einstein, en que volvió a aparecer esa "misteriosa" necesidad de cuantizar la energía.
- Efecto Compton.

El desarrollo formal de la teoría fue obra de los esfuerzos conjuntos de varios físicos y matemáticos de la época como Schrödinger, Heisenberg, Einstein, Dirac, Bohr y Von Neumann entre otros (la lista es larga). Algunos de los aspectos fundamentales de la teoría están siendo aún estudiados activamente. La mecánica cuántica ha sido también adoptada como la teoría subyacente a muchos campos de la física y la química, incluyendo la física de la materia condensada, la química cuántica y la física de partículas.

La región de origen de la mecánica cuántica puede localizarse en la Europa central, en Alemania y Austria, y en el contexto histórico del primer tercio del siglo XX.



## Suposiciones más importantes

Las suposiciones más importantes de esta teoría son las siguientes:

- Al ser imposible fijar a la vez la posición y el momento de una partícula, se renuncia al concepto de trayectoria, vital en mecánica clásica. En vez de eso, el movimiento de una partícula 'puede ser explicado por una función matemática que asigna, a cada punto del espacio y a cada instante, la probabilidad de que la partícula descrita se halle en tal posición en ese instante (al menos, en la interpretación de la Mecánica cuántica más usual, la probabilística o interpretación de Copenhague). A partir de esa función, o función de ondas, se extraen teóricamente todas las magnitudes del movimiento necesarias.
- Existen dos tipos de evolución temporal, si no ocurre ninguna medida el estado del sistema o función de onda evolucionan de acuerdo con la ecuación de Schrödinger, sin embargo, si se realiza una medida sobre el sistema, éste sufre un «salto cuántico» hacia un estado compatible con los valores de la medida obtenida (formalmente el nuevo estado será una proyección ortogonal del estado original).
- Existen diferencias perceptibles entre los estados ligados y los que no lo están.
- La energía no se intercambia de forma continua en un estado ligado, sino en forma discreta lo cual implica la existencia de paquetes mínimos de energía llamados cuantos, mientras en los estados no ligados la energía se comporta como un continuo.

## Descripción de la teoría bajo la interpretación de Copenhague

Para describir la teoría de forma general es necesario un tratamiento matemático riguroso, pero aceptando una de las tres interpretaciones de la mecánica cuántica (a partir de ahora la Interpretación de Copenhague), el marco se relaja. La mecánica cuántica describe el estado instantáneo de un sistema (estado cuántico) con una función de onda que codifica la distribución de probabilidad de todas las propiedades medibles, u observables. Algunos observables posibles sobre un sistema dado son la energía, posición, momento y momento angular. La mecánica cuántica no asigna valores definidos a los observables, sino que hace predicciones sobre sus distribuciones de probabilidad. Las propiedades ondulatorias de la materia son explicadas por la interferencia de las funciones de onda.

Estas funciones de onda pueden variar con el transcurso del tiempo. Esta evolución es determinística si sobre el sistema no se realiza ninguna medida aunque esta evolución es estocástica y se produce mediante colapso de la función de onda cuando se realiza una medida sobre el sistema (Postulado IV de la MC). Por ejemplo, una partícula moviéndose sin interferencia en el espacio vacío puede ser descrita mediante una función de onda que es un paquete de ondas centrado alrededor de alguna posición media. Según pasa el tiempo, el centro del paquete puede trasladarse, cambiar, de modo que la partícula parece estar localizada más precisamente en otro lugar. La evolución temporal determinista de las funciones de onda es descrita por la Ecuación de Schrödinger.

Algunas funciones de onda describen estados físicos con distribuciones de probabilidad que son constantes en el tiempo, estos estados se llaman estacionarios, son estados propios del operador hamiltoniano y tienen energía bien definida. Muchos sistemas que eran tratados dinámicamente en mecánica clásica son descritos mediante tales funciones de onda estáticas. Por ejemplo, un electrón en un átomo sin excitar se dibuja clásicamente como una partícula que rodea el núcleo, mientras que en mecánica cuántica es descrito por una nube de probabilidad estática que rodea al núcleo.

Cuando se realiza una medición en un observable del sistema, la función de ondas se convierte en una del conjunto de las funciones llamadas funciones propias o estados propios del observable en cuestión. Este proceso es conocido como colapso de la función de onda. Las probabilidades relativas de ese colapso sobre alguno de los estados propios posibles son descritas por la función de onda instantánea justo antes de la reducción. Considerando el ejemplo anterior sobre la partícula en el vacío, si se mide la posición de la misma, se obtendrá un valor impredecible  $x$ . En general, es imposible predecir con precisión qué valor de  $x$  se obtendrá, aunque es probable que se obtenga uno cercano al centro del paquete de ondas, donde la amplitud de la función de onda es grande. Después de que se ha hecho la medida, la función de onda de la partícula colapsa y se reduce a una que esté muy concentrada en torno a la

posición observada  $x$ .

La ecuación de Schrödinger es en parte determinista en el sentido de que, dada una función de onda a un tiempo inicial dado, la ecuación suministra una predicción concreta de qué función tendremos en cualquier tiempo posterior. Durante una medida, el eigen-estado al cual colapsa la función es probabilista y en este aspecto es no determinista. Así que la naturaleza probabilista de la mecánica cuántica nace del acto de la medida.

## Formulación matemática

En la formulación matemática rigurosa, desarrollada por Dirac y von Neumann, los estados posibles de un sistema cuántico están representados por vectores unitarios (llamados *estados*) que pertenecen a un Espacio de Hilbert complejo separable (llamado el *espacio de estados*). Qué tipo de espacio de Hilbert es necesario en cada caso depende del sistema; por ejemplo, el espacio de estados para los estados de posición y momento es el espacio de funciones de cuadrado integrable  $L^2(\mathbb{R}^3)$ , mientras que la descripción de un sistema sin traslación pero con un espín  $n\hbar$  es el espacio  $\mathbb{C}^{2n+1}$ . La evolución temporal de un estado cuántico queda descrita por la ecuación de Schrödinger, en la que el hamiltoniano, el operador correspondiente a la energía total del sistema, tiene un papel central.

Cada magnitud observable queda representada por un operador lineal hermítico definido sobre un dominio denso del espacio de estados. Cada estado propio de un observable corresponde a un eigenvector del operador, y el valor propio o eigenvalor asociado corresponde al valor del observable en aquel estado propio. El espectro de un operador puede ser continuo o discreto. La medida de un observable representado por un operador con espectro discreto sólo puede tomar un conjunto numerable de posibles valores, mientras que los operadores con espectro continuo presentan medidas posibles en intervalos reales completos. Durante una medida, la probabilidad de que un sistema colapse a uno de los eigenestados viene dada por el cuadrado del valor absoluto del producto interior entre el estado propio o auto-estado (que podemos conocer teóricamente antes de medir) y el vector estado del sistema antes de la medida. Podemos así encontrar la distribución de probabilidad de un observable en un estado dado computando la descomposición espectral del operador correspondiente. El principio de incertidumbre de Heisenberg se representa por la aseveración de que los operadores correspondientes a ciertos observables no conmutan.

## Relatividad y la mecánica cuántica

El mundo moderno de la física se funda notablemente en dos teorías principales, la relatividad general y la mecánica cuántica, aunque ambas teorías parecen contradecirse mutuamente. Los postulados que definen la teoría de la relatividad de Einstein y la teoría del cuántum están apoyados por rigurosa y repetida evidencia empírica. Sin embargo, ambas se resisten a ser incorporadas dentro de un mismo modelo coherente.

El mismo Einstein es conocido por haber rechazado algunas de las demandas de la mecánica cuántica. A pesar de ser claramente inventivo en su campo, Einstein no aceptó la interpretación ortodoxa de la mecánica cuántica tales como la aserción de que una sola partícula subatómica puede ocupar numerosos espacios al mismo tiempo. Einstein tampoco aceptó las consecuencias de entrelazamiento cuántico aún más exóticas de la paradoja de Einstein-Podolsky-Rosen (o EPR), la cual demuestra que medir el estado de una partícula puede instantáneamente cambiar el estado de su socio enlazado, aunque las dos partículas pueden estar a una distancia arbitraria. Sin embargo, este efecto no viola la causalidad, puesto que no hay transferencia posible de información. De hecho, existen teorías cuánticas que incorporan a la relatividad especial —por ejemplo, la electrodinámica cuántica, la cual es actualmente la teoría física más comprobada— y éstas se encuentran en el mismo corazón de la física moderna de partículas.

## Referencias

- [1] De Broglie (1926): *Ondes et mouvements*, París, Gauthier-Villars
- [2] Schrödinger, [*Quantisierung als Eigenwertproblem (Erste Mitteilung.)*], Ann. Phys., **79**, p. 361-376, (1926)1924 & 1926
- [3] Cohen-Tannoudji, Claude; Bernard Diu, Franck Lalöe (1977). *Quantum Mechanics*. vol.1 (3ª edición). París, Francia: Hermann. pp. 898. ISBN 0-471-16432-1.
- [4] Halzen, Francis; D.Martin, Alan. Universidad de Wisconsin. ed. *Quarks and Lepons: An Introductory Course in Modern Particle Physics*. Universidad de Durham (1ª edición). Canadá: Wiley. pp. 396. ISBN QC793.5.Q2522H34.
- [5] Cf. Luis Alonso, «Filosofía de la física», *Investigación y Ciencia*, 405, junio de 2010, págs. 94-96 (94).
- [6] Vitalii Isaakovich Rydник (1987). *Qué es la mecánica cuántica*. Ediciones Quinto Sol. ISBN 37693524.

## Bibliografía

- Andrade e Silva, J.; Lochak, Georges (1969). *Los cuantos*. Ediciones Guadarrama. ISBN 978-84-250-3040-6.
- Otero Carvajal, Luis Enrique: "Einstein y la revolución científica del siglo XX", *Cuadernos de Historia Contemporánea*, nº 27, 2005, INSS 0214-400-X (<http://www.ucm.es/info/hcontemp/leoc/hciencia.htm>)
- Otero Carvajal, Luis Enrique: "La teoría cuántica y la discontinuidad en la física", *Umbral*, Facultad de Estudios Generales de la Universidad de Puerto Rico, recinto de Río Piedras ([http://www.ucm.es/info/hcontemp/leoc/la teoria cuantica.pdf](http://www.ucm.es/info/hcontemp/leoc/la%20teoria%20cuantica.pdf))
- de la Peña, Luis (2006). *Introducción a la mecánica cuántica* (3 edición). México DF: Fondo de Cultura Económica. ISBN 968-16-7856-7.
- Galindo, A. y Pascual P.: *Mecánica cuántica*, Ed. Eudema, Barcelona, 1989, ISBN 84-7754-042-X.

## Enlaces externos

-  Portal:Física. Contenido relacionado con **Física**.
-  Wikimedia Commons alberga contenido multimedia sobre **Mecánica cuántica**. Commons
- Wikiversidad alberga proyectos de aprendizaje sobre **Mecánica cuántica**. Wikiversidad
-  Wikiquote alberga frases célebres de o sobre **Mecánica cuántica**. Wikiquote

### Wikilibros

-  Wikilibros alberga un libro o manual sobre **Mecánica cuántica**.
-  Wikcionario tiene definiciones para **Mecánica cuántica**. Wikcionario
- Introducción a la mecánica cuántica (<http://www.nucleares.unam.mx/~vieyra/cuant1.html#intro>)
- Mecánica de Ondas (pwg.gsfc.nasa.gov) (<http://pwg.gsfc.nasa.gov/stargaze/MQ7.htm>)
- El Nacimiento de la Mecánica Cuántica (<http://inquietudes.wordpress.com/2008/02/23/el-nacimiento-de-la-mecanica-cuantica/>)
- Breve Historia de la Física Teórica (<http://www.geocities.com/bdsp1626/Fisica.htm>)

# Fuentes y contribuyentes del artículo

**Mecánica cuántica** *Fuente:* <http://es.wikipedia.org/w/index.php?oldid=64081344> *Contribuyentes:* José, 3coma14, 4lex, Acratta, Agualin, Akma72, Alberto Lopez Viñals, Alberto5000, Alefísico, AlejandroSanchez, Alvaro qc, Amanuense, Andreasmperu, Andres Rojas, Andres arg, Angel GN, Antonorsi, Antón Francho, Arcosouros, Artheliane, Asasia, AstroNomo, Baiji, Baranda, BetoCG, Cáityagurudas, Camima, Carlos Miguel Alvarado, Catrachito, Cladin99, CleverChemist, Cobalttempest, Comae, Comakut, David0811, Davidencalada, Davius, Der Künstler, Diegusjames, Dodo, Dreitmen, Edgar waldir, Eduardosalg, Eduardosdo, Einsteinbohr, Emijrp, Fformica61, Foundling, Fradies, Gabriellocutor, Gacq, Ganímedes, Gersan2008, Gerwoman, Giragus, Googolplanck, Grupo33, Gszdl, Gusgus, Götz, HUB, Halfdrag, Helmy oved, Hispa, Humbefa, Humberto, Héctor Guido Calvo, Ialad, Igna, Isha, Ivn, JMCC1, Jarisleif, Javierito92, Jcaraballo, Jclerman, Jjafjaf, Jkbw, Jordi bernal, Jorge c2010, JorgeGG, Joseaperez, Juan Mayordomo, Juancar24578, Kismalac, Kordas, Kovan, Kyucita, LFCN, Lasai, Laura Fiorucci, Leonpolanco, Lisandrogui, Lovesk, Luis Felipe Schenone, MEGAXD, MadriCR, Magister Mathematicae, Mahadeva, Maldoror, Manroit, Manuge, Marb, Mariano12 1989, Matdroses, Mateorencarmona, Maveric149, Mimomellamo, Mofously, Moleculax, Moraleh, Moriel, Mortadelo2005, Morza, Mrkoz, Muro de Aguas, Mxn, Neodop, Netito777, Nixón, Numbo3, OrH+, Pan con queso, PedroMCh, Petruss, Peyrona, Piojoso-89, Pleira, Pollo1902, Pompilio Zigrino, Punsett, Pólux, Quijav, Raguda, Retama, Ricardogpn, Rigenea, Rimac, Rmcampero, Rosarino, RoyFocker, Rubpe19, Rage, SaeedVilla, Sanbec, Savh, SergioN, Sincro, Soulreaper, Srbanana, SuperBraulio13, Taichi, Tano4595, Technopat, Tirithel, Tokvo, Tomatejc, Tostadora, Troyas, Unic, Vic26, Wikiléptico, Wricardoh, Xabier, Xavigarz, Xosema, Xuankar, Yefri, Yeza, Yoliminina, Zorosandro, Çom3ç4ç4, 474 ediciones anónimas

# Fuentes de imagen, Licencias y contribuyentes

**Archivo:Dualite.jpg** *Fuente:* <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Dualite.jpg> *Licencia:* Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported *Contribuyentes:* Jean-Christophe BENOIST

**Archivo:HAtomOrbitals.png** *Fuente:* <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:HAtomOrbitals.png> *Licencia:* GNU Free Documentation License *Contribuyentes:* Admrboltz, Benjah-bmm27, Dbc334, Dbenbenn, Ejdzj, Falcorian, Hongsy, Kborland, MichaelDiederich, Mion, Saperaud, 6 ediciones anónimas

**Archivo:Nuvola apps katomic.svg** *Fuente:* [http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Nuvola\\_apps\\_katomic.svg](http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Nuvola_apps_katomic.svg) *Licencia:* GNU Lesser General Public License *Contribuyentes:* David Vignoni, traced by User:Stannered

**Archivo:Commons-logo.svg** *Fuente:* <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Commons-logo.svg> *Licencia:* logo *Contribuyentes:* SVG version was created by User:Grunt and cleaned up by 3247, based on the earlier PNG version, created by Reidab.

**Archivo:Spanish Wikiquote.SVG** *Fuente:* [http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Spanish\\_Wikiquote.SVG](http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Spanish_Wikiquote.SVG) *Licencia:* logo *Contribuyentes:* James.mcd.nz

**Archivo:Wikibooks-logo.svg** *Fuente:* <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Wikibooks-logo.svg> *Licencia:* logo *Contribuyentes:* User:Bastique, User:Ramac et al.

**Archivo:Wiktionary-logo-es.png** *Fuente:* <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Wiktionary-logo-es.png> *Licencia:* logo *Contribuyentes:* es:Usuario:Pybalo

# Licencia