

física cuántica

La física cuántica contraviene ciertas ideas convencionales sobre la percepción de nuestro entorno y abre las puertas a un mundo paralelo donde lo infinitamente pequeño, que hasta hace poco era sólo una intuición, es capaz de transformar nuestras ideas sobre el universo entero. Un área particular del conocimiento donde los objetos de estudio pueden ser partículas y ondas al mismo tiempo. El conocimiento de esta materia abstracta no es sólo para iniciados.

la ciencia extraña

En este compendio de misterios del mundo cuántico, el reconocido escritor científico John Gribbin explica la revolución que golpeó a los físicos de principios del siglo XX, expone los misterios más complejos con un lenguaje claro y describe cómo la más extraña de las ciencias ha transformado la "cama de piedra" en tecnología moderna. Asimismo, demuestra cómo la aparente paradoja de la física cuántica, que se ilustra con la famosa historia del gato de Schrödinger que puede estar "muerto y vivo a la vez", nos ofrece una oportunidad para entender cómo funciona este mundo paralelo. Con una mirada hacia el futuro, el autor describe los prospectos del mañana, tales como las computadoras cuánticas, la criptografía cuántica e incluso la teletransportación.

CIENCIA AL DÍA

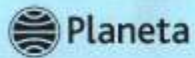
Coordinador de la serie: John Gribbin

física cuántica

guía para principiantes
sobre el mundo subatómico

JOHN GRIBBIN

Planeta



A Dorling Kindersley Book
www.dk.com

Título original: *Essential Science: Quantum physics*
Copyright ©: 2002 Dorling Kindersley Limited, A
Penguin Company
Text copyright ©: 2002 John Gribbin & Mary Gribbin
Primera edición en Gran Bretaña en 2002 por Dorling
Kindersley Limited
ISBN: 0-7513-3976-8

Primera edición en español: 2004
Traducción: Pedro García de León Rumazo
Derechos exclusivos de edición en español para México,
de acuerdo con Dorling Kindersley Ltd.

© 2004, Editorial Planeta Mexicana, S.A. de C.V.
Avenida Insurgentes Sur núm. 1898, piso 11
Colonia Florida, 03100 México, D.F.
en coedición con Dorling Kindersley Ltd.
80 Strand, London WC2R 0RL

Primera edición (México): 2004
ISBN: 970-690-802-1

DORLING KINDERSLEY, LONDRES
Editores de la serie: Peter Frances y Hazel Richardson
Diseñador DTP: Rajen Shah
Archivo de imágenes: Gemma Woodward
Ilustrador: Richard Tibbitts
Editor temático: Jonathan Metcalf
Producción artística: Philip Ormerod
Producido para Dorling Kindersley por Desing
Revolution
Editor: John Watson
Diseño: Lindsey Johns

Ninguna parte de esta publicación, incluido el diseño de la
portada, puede ser reproducida, almacenada o transmitida
en manera alguna ni por ningún medio sin permiso previo
del editor.

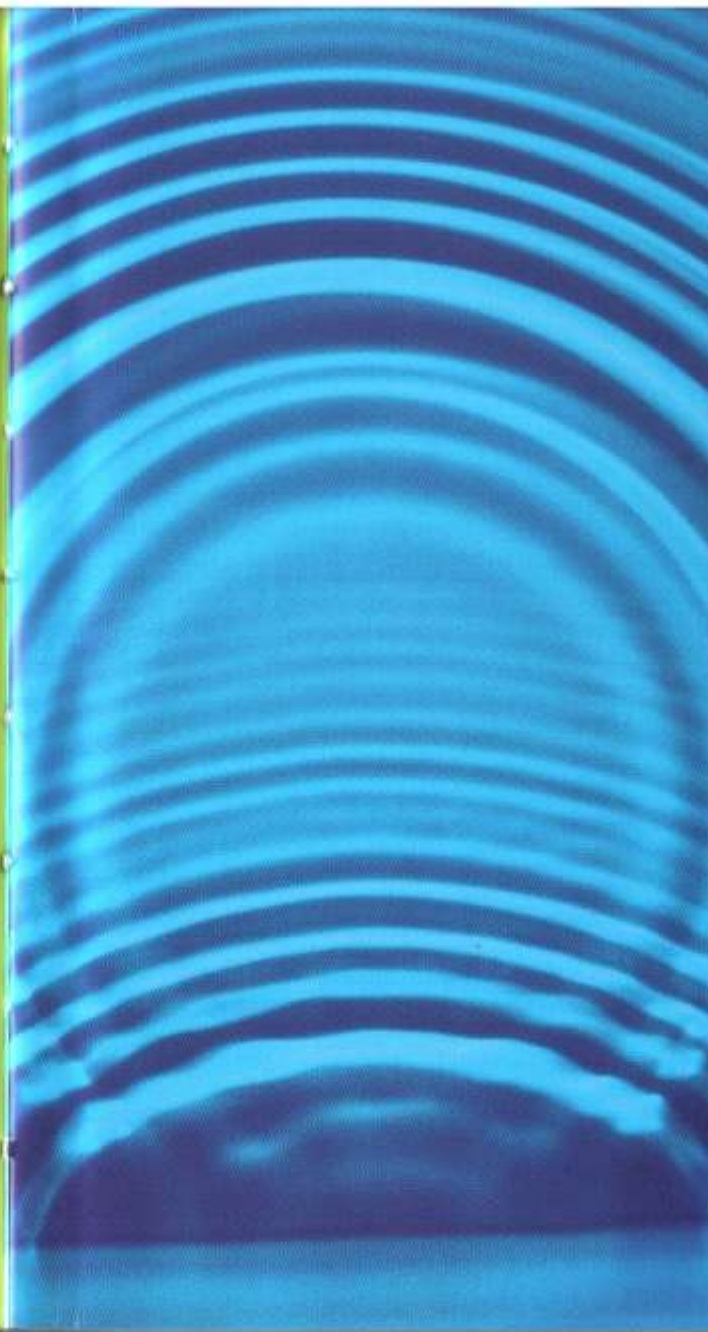
Impreso por WKT Company Ltd, China

contenido

conociendo al cuanto	4
física clásica	6
la revolución cuántica	13
saliendo de	
la oscuridad	22
el misterio central	24
la joya de la corona	35
poniendo a trabajar a	
los cuantos	39
dentro del núcleo	47
la computadora	
cuántica	52
los principios en la práctica	54
teletransportación al estilo	
cuántico	60
glosario	66
índice	69
lecturas sugeridas	72
agradecimientos	72

conociendo al cuanto

En su forma más simple, la física cuántica es el estudio de la materia y la radiación al nivel atómico, donde las cosas funcionan muy distinto de como lo hacen en "nuestro" mundo. Un ejemplo de esta diferencia se ve en los dos grandes tipos de fenómenos a los que estamos acostumbrados: las partículas y las ondas. Las partículas existen en un lugar y un tiempo determinados, y las ondas, como las ondas sonoras, se esparcen en el espacio. Al nivel atómico esta distinción no existe. Los electrones, a los que se considera partículas, también pueden comportarse como ondas. Y algunos comportamientos de la luz, a la que usualmente se le consideraba una onda, sólo pueden explicarse si la luz se presenta en forma de partículas, llamadas fotones. Otros fenómenos cuánticos incluyen la discretización de la energía, el efecto túnel, el principio de incertidumbre y el giro o "spin" de una partícula subatómica, y estamos por explorarlos a todos ellos.



haciendo olas
Mucha gente está familiarizada con la idea de que la luz viaja a través del espacio en forma de ondas como en un estanque. Esto se estableció a principios del siglo XIX. Pero en la física cuántica hay que asumir que los objetos como los electrones, considerados inicialmente como partículas, también viajan como ondas. Una propiedad clave de las ondas es que cuando pasan por una abertura pequeña se curvan hacia los lados y se esparcen en un proceso llamado difracción.

física clásica

Hacia finales del siglo XIX, los físicos pensaban que su comprensión del funcionamiento del universo físico era casi completa. Trescientos años antes, Isaac Newton había descrito las leyes con las que opera el mundo material. En



Isaac Newton

(1642-1727) estableció los fundamentos de la física con sus tres leyes del movimiento y su

Ley de Gravedad. También diseñó y mejoró el telescopio astronómico, mostró que la luz blanca está compuesta por todos los colores del arco iris, y desarrolló la idea de que la luz consiste en un flujo de partículas, como pequeños proyectiles.

subvertió: la visión clásica de la física propuesta por Newton y Maxwell.

las leyes de newton

Isaac Newton descubrió las tres leyes del movimiento que describen la forma en que todo tipo de objetos interactúan cuando chocan entre sí en el mundo cotidiano.

Estas tres leyes explican desde la forma en que los átomos y moléculas rebotan entre sí, hasta cómo es posible que

1864 James Clerk Maxwell reveló las leyes equivalentes que controlan el comportamiento de la luz y de casi todos los fenómenos electromagnéticos, lo que aparentemente completaba la historia de cómo trabajaba el universo de materia y luz. Pero pronto se descubrieron fenómenos que rebasaban las leyes de Newton y Maxwell. La "revolución cuántica" generada es el mayor suceso revolucionario en toda la historia de la ciencia. Pero para ver por qué lo fue tenemos que comprender qué fue lo que se

funcione un auto o una nave espacial. La primera ley de Newton establece que cualquier objeto permanece en el mismo lugar, o se mueve en línea recta a velocidad constante,

a menos que alguna fuerza actúe sobre él. La veracidad de esto en el mundo cotidiano no es obvia porque siempre existe una fuerza (la fricción) que tiende a frenar a los objetos. Pero los objetos que se mueven en el espacio en caída libre, como los planetas en órbita alrededor del Sol, siempre obedecen esta regla porque se mueven en un espacio casi vacío donde no existe fricción.

La segunda ley de Newton dice que cuando una fuerza actúa sobre un objeto la aceleración producida es igual a la fuerza aplicada dividida entre la masa del objeto. Por

"No sé lo que yo pueda parecerle al mundo; pero a mí me parece que he sido sólo un niño jugando a la orilla del mar, divirtiéndome en encontrar un guijarro más liso o una concha más hermosa que lo usual, mientras todo el océano de la verdad yace inexplorado frente a mí."

Isaac Newton

ejemplo, mientras más fuerte se golpee una pelota en una mesa de billar, más rápido se moverá. Pero la aceleración no se define únicamente por un incremento en la velocidad, también incluye un cambio de dirección, y puede ser una combinación de cambios en la velocidad y la dirección. Por esto, aunque la Tierra se mueve aproximadamente a una velocidad constante, también se está acelerando debido a que la fuerza de gravedad del Sol hace que constantemente se desvíe de una línea recta (la trayectoria "natural" de cualquier objeto en movimiento) y siga una línea curva, que es su órbita alrededor del Sol.



las reglas de Newton

Las leyes del movimiento de Newton se obedecen casi exactamente en una superficie casi libre de fricción. Lo más cerca que podemos llegar a esto en la Tierra es sobre la superficie perfectamente lisa de una pista de hielo. Por eso el deporte del curling es muy "newtoniano".

bolas que rebotan

La colisión entre dos bolas de billar también obedece las leyes de Newton. En una colisión entre dos de ellas, si una se desvía a la derecha, la otra debe desviarse a la izquierda.

una colisión con impulso

Si un automóvil en movimiento choca contra una pared de ladrillo, la dispersión de los ladrillos se lleva parte del impulso o "momento". Pero en una colisión frontal, el momento combinado es totalmente absorbido por los automóviles, causando mucho más daño.



La tercera ley de movimiento es la que más confusión provoca. Newton usó la palabra "acción" para referirse a la fuerza cuando dijo que a cada acción corresponde una reacción equivalente y opuesta. Por ejemplo, cuando disparo un rifle, la acción empuja la bala hacia fuera del cañón y la reacción hace que la culata golpee contra mi hombro. Esta ley explica cómo los átomos rebotan entre sí, qué ocurre cuando dos bolas de billar chocan, y por qué la colisión frontal de dos automóviles puede ser peor que estrellarse contra un muro de ladrillos, pues la combinación de las velocidades de los dos automóviles tiene que ser tomada en cuenta.

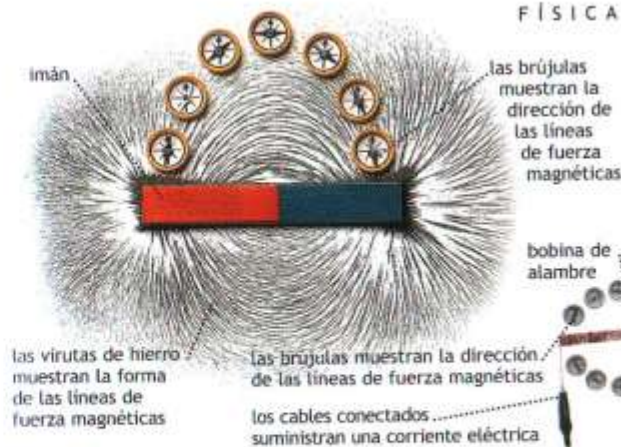
ecuaciones de maxwell

Hasta el final del siglo XIX, las tres leyes de Newton parecían definir el mundo material completamente. Incluso el comportamiento de los átomos y de los electrones recientemente descubiertos podía describirse con la combinación de las leyes de Newton y la aplicación de las fuerzas eléctrica y magnética.

Maxwell había proporcionado una explicación de estas dos fuerzas, la otra mitad del mundo físico, que parecían completar el panorama.

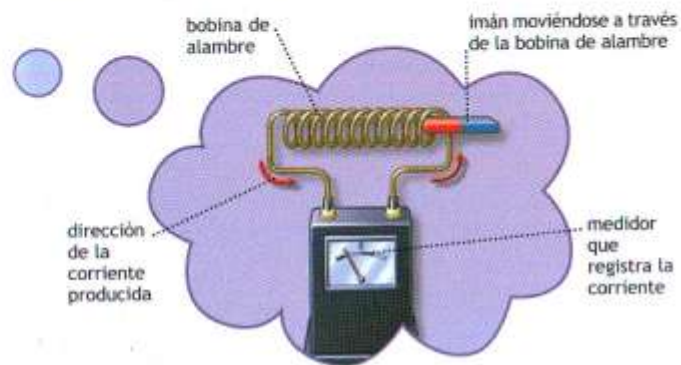
Maxwell construyó su teoría con base en los experimentos de Michael Faraday sobre la electricidad y el magnetismo.

Durante la primera mitad del siglo XIX, Faraday construyó los conceptos básicos de las líneas de fuerza, y los "campos" eléctrico y magnético. Inventó el motor eléctrico y la dinamo, y descubrió que un campo eléctrico cambiante siempre produce un campo



magnético. Un campo puede entenderse como la región donde una fuerza tiene influencia. Y puede visualizarse con lo que ocurre cuando un imán en forma de barra se coloca bajo una hoja de papel cubierta con virutas de hierro y se golpea ligeramente al papel. Las virutas se alinean en patrones curvos alrededor del imán, delineando la forma de su campo magnético. Cada una de las líneas que une el polo norte con el polo sur es una línea de fuerza.

Maxwell había sido capaz de condensar todo lo que se podía decir sobre los campos eléctricos y magnéticos en un conjunto de sólo cuatro ecuaciones, a las que se conoce como ecuaciones de Maxwell. Juegan el mismo papel en la teoría de los campos (la teoría de las fuerzas electromagnéticas)



campos de fuerza

Las líneas de fuerza magnéticas que forman el campo alrededor de un imán de barra pueden trazarse con virutas de hierro o brújulas cerca del imán. La aguja de la brújula se alinea con las líneas del campo. La corriente eléctrica fluye a través de una bobina de alambre, genera un campo de fuerza magnética similar pero sólo mientras la corriente fluye.

física dinámica

Una dinamo, o generador eléctrico, funciona con un imán y un alambre que deja fluir una corriente eléctrica. Faraday descubrió que si empujaba un imán a través de una bobina de alambre conectada a un medidor de corriente eléctrica (amperímetro), la aguja del medidor pulsaba.



El físico escocés **James Clerk Maxwell** (1831-79) descubrió el conjunto de cuatro ecuaciones que describen el

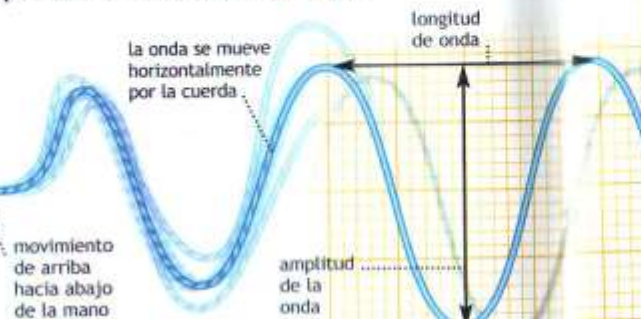
comportamiento de la radiación electromagnética en términos clásicos. Este ha sido el mayor logro de la física clásica después del trabajo de Isaac Newton. Aparte de desarrollar la descripción matemática de la luz, Maxwell describió el proceso de "tres colores" para crear imágenes a color que se usa en los receptores domésticos de televisión hoy en día.

que las leyes de Newton en la mecánica (la teoría del comportamiento de las partículas). Entre otras cosas, las ecuaciones describen lo que ocurre cuando una onda eléctrica en movimiento, que puede ser causada por un electrón oscilando en un átomo, viaja a través del espacio. Mientras la onda se desplaza, el campo eléctrico cambia en cada punto por el cual pasa. Pero un campo eléctrico que cambia crea un campo magnético. Así que una onda eléctrica genera

una onda magnética que se mueve junto con ella. Pero la onda magnética genera una onda eléctrica. Lo que en realidad ocurre es que un electrón oscilante no produce sólo una onda eléctrica sino una onda eléctrica acoplada a una onda magnética, una onda electromagnética. No existe algo así como una onda eléctrica pura o una onda magnética pura.

El balde de agua fría cayó cuando Maxwell usó sus ecuaciones para calcular la velocidad con la que

haciendo ondas
Las ondas electromagnéticas se generan cuando las partículas cargadas, como los electrones, vibran. Esto es análogo a la forma en la que se puede hacer desplazarse a una onda por una cuerda agitando su extremo.



la luz como una onda

Hace dos siglos, Thomas Young demostró que la luz es una onda (un experimento con dos rendijas). Primeramente, se hace pasar luz de un color puro a través de una rendija

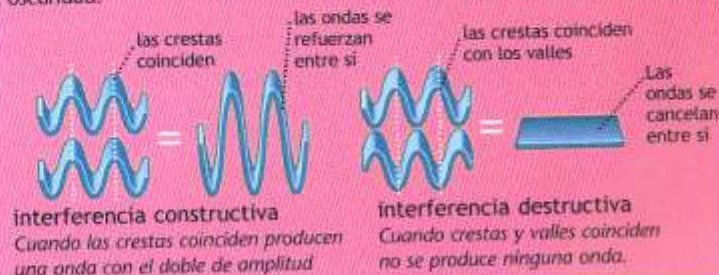
en una pantalla. Esta luz pasa a través de dos rendijas paralelas en una segunda pantalla, y finalmente llega a una tercera pantalla.

Ahi forma un diseño de franjas brillantes y oscuras. Esto se explica porque la luz viaja en una onda. Las ondas de cada una de las dos rendijas suben y bajan, y cuando se encuentran interfieren. Cuando dos ondas se emparejan producen una luz más brillante; y si están desfasadas se cancelan. Fue una sorprendente revelación ver que juntos dos haces de luz produjeran oscuridad.



haciendo ondas

A pesar de la sencilla estructura del equipo usado por Young, los resultados observados fueron una revelación.



la luz entra al prisma

luz refractada

Un simple prisma triangular de vidrio descompone la luz blanca (o la luz solar) en los colores del arco iris. Sabemos ahora que cada color corresponde a una longitud de onda diferente, y mientras más corta sea la longitud de onda mayor es la refracción.

la refracción descompone a la luz blanca en las longitudes de onda que la constituyen

una onda electromagnética debía viajar. Las ecuaciones dan una velocidad única para la onda y es la misma para todas las ondas electromagnéticas. Esta velocidad resultó ser exactamente la velocidad de la luz. Todas las ondas electromagnéticas viajan a la velocidad de la luz, y la conclusión inevitable es que la luz consiste en una onda electromagnética que viaja por el espacio.

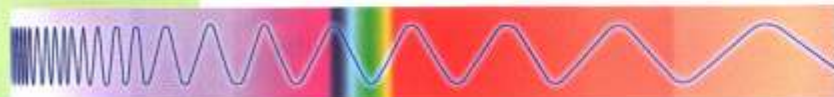
problemas con la onda de luz

Desde el trabajo de Thomas Young en Inglaterra y de Agustín Fresnel en Francia a inicios del siglo XIX ya se sabía que la luz viaja en forma de una onda. Faraday sugirió que la luz es "una especie de vibración en las líneas de fuerza", pero carecía del conocimiento matemático para descubrir cómo podría funcionar esto.

espectro electromagnético

La luz visible es sólo una pequeña parte del espectro electromagnético, que varía desde la radiación gamma, de longitud de onda muy pequeña, hasta las ondas de radio. La magnitud con la que una onda electromagnética se refracta depende de su longitud de onda.

Experimentos como los de Young muestran que la luz tiene una longitud de onda (la distancia entre dos crestas sucesivas en una onda) en el intervalo que va de alrededor de los 380 nanómetros (violeta) hasta los 750 nanómetros (rojo). Las mismas ecuaciones fueron utilizadas pronto para describir longitudes de onda mayores (como las ondas de radio) y menores (como la luz ultravioleta y los rayos X). Pero había un problema con la teoría ondulatoria de la luz. No podía explicar un fenómeno conocido como la radiación de cuerpo negro. Inicialmente parecía que esta era una irritación menor que podría ser resuelta en poco tiempo, pero al acercarse más físicos al problema este siguió creciendo.



gamma rayos X ultravioleta luz visible infrarrojo microondas ondas de radio

la revolución cuántica

La radiación de cuerpo negro recibió su nombre de una forma curiosa y distraída. En la física clásica, un cuerpo negro es un objeto que absorbe toda la luz electromagnética que cae sobre él. Si un objeto de este tipo se calienta,

irradiará energía (radiación de cuerpo negro) pero ya no sería negro. Su nombre antiguo era radiación de cavidad.

“ Las únicas leyes de la materia son las que nuestras mentes deben fabricar, y las únicas leyes de la mente han sido fabricadas para ello por la materia. ”

James Clerk Maxwell

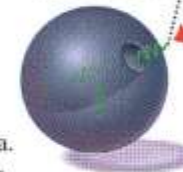
¿qué es la radiación del cuerpo negro?

Imagina una esfera grande y

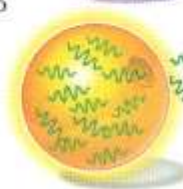
hueca donde sólo hay un pequeño agujero. Cualquier radiación que llegué al agujero lo atraviesa y se absorbe dentro de la cavidad, que actúa como un cuerpo negro. Ahora imagina que se calienta la esfera hasta que brille, primero al rojo vivo, luego al blanco, y luego en azul. El nombre "cuerpo negro" se aplica, algo confusamente, incluso a esta radiación colorida. Este ejemplo resalta una de las características más importantes de la radiación de cuerpo negro. Su color depende de su temperatura.

Ya que el color de la luz está relacionado con su longitud de onda, esto quiere decir que la intensidad de la radiación emitida a cada longitud de onda depende de la temperatura del objeto. Esto es cierto en la vida diaria, y todos

radiación que entra a la cavidad.



absorbiendo e irradiando
Una esfera fría con un hueco absorbe radiación electromagnética y se comporta como un cuerpo negro. Cuando se calienta, emite radiación electromagnética. Esta es la radiación de cuerpo negro.





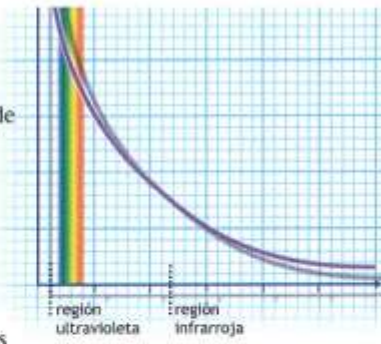
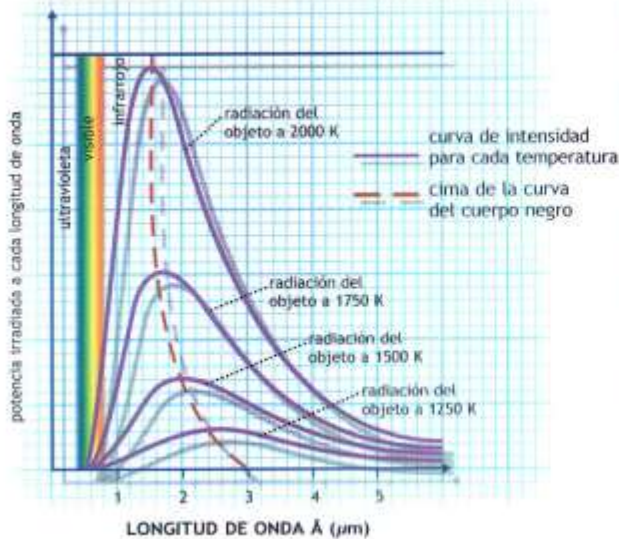
al rojo vivo

Un soplador de vidrio puede determinar la temperatura del vidrio fundido, y por tanto sus propiedades físicas, a partir de su color.

sabemos que un objeto como el radiador de un calefactor central puede irradiar calor infrarrojo sin brillar y que un pedazo de hierro al rojo vivo está más frío que uno que está al blanco. Muchos objetos irradian de forma muy parecida a un cuerpo negro, incluyendo al Sol. Es posible medir la temperatura de la superficie del Sol (alrededor de 6000K) simplemente por su color (amarillo-anaranjado) y asumiendo que es un irradiador de cuerpo negro.

Hacia 1890 se entendió esto. Cuando el espectro electromagnético de esta radiación se expresa como una gráfica (la curva del cuerpo negro), muestra una cresta suave, como una colina. A una temperatura particular, la cresta se encuentra en la misma región del espectro, es decir, a la misma longitud de onda. Pero a medida que el cuerpo negro se calienta, la cresta se mueve hacia longitudes de onda más cortas (del infrarrojo, al rojo, al naranja, al azul, y así sucesivamente).

curvas del cuerpo negro
La longitud de onda a la cual la intensidad de la radiación de un objeto caliente llega a su máximo está relacionada con la temperatura del objeto. Todas estas "curvas del cuerpo negro" tienen su máximo en la región del infrarrojo, y producen poca radiación en el espectro visible.



Pero a ambos lados de la cresta existe muy poca radiación. Esto planteó un problema que no pudo ser explicado por la física clásica: si a las ondas electromagnéticas se les trata de la misma forma (matemáticamente hablando) que a las olas del océano o a las oscilaciones de una cuerda de violín, y si se agrega energía (calor), la intensidad de la radiación producida debería ser proporcional a la frecuencia de la radiación. Mientras más alta sea la frecuencia (lo que implica una longitud de onda menor), más radiación debe haber, a cualquier temperatura. La mayor parte de la energía emitida debería estar en la región ultravioleta y la gráfica no debería tener forma de colina, pero la tiene. Esta "catástrofe del ultravioleta" desató el principio del fin de la física clásica.

curva esperada
Esta es la curva de radiación que la física clásica de Newton y Maxwell predijo. Cualquier objeto caliente debía irradiar energía principalmente a longitudes de onda muy cortas, es decir, en el extremo ultravioleta del espectro. La falla en esta predicción se conoce como la "catástrofe del ultravioleta".

la constante de planck

Frente a este fenómeno inexplicable, en 1900 el físico alemán Max Planck se vio orillado a usar el remedio desesperado de asumir que la luz podría dividirse en pequeños pedazos, piezas que se llamarían "cuantos", en vez de ser siempre una onda continua y suave, para resolver el rompecabezas del cuerpo negro. Para hacer esto, asignó una energía, E , a cada cuanto que estaba relacionado a su frecuencia, f . Su interpretación funcionó dado



Max Planck

(1858-1947) inició la revolución cuántica en 1900, cuando explicó la radiación del cuerpo negro en cuantos o pedazos de luz. Planck realmente nunca pensó que los cuantos eran partículas liberadas por átomos y la revolución que inició, pero abrió el paso al entendimiento de la importancia de la teoría de la relatividad publicada en 1905. En 1918 recibió el Premio Nobel por su trabajo científico.

que $E = hf$, donde h era una nueva constante matemática de la naturaleza, y se conoce como la constante de Planck.

Funciona como sigue. En cualquier objeto, la energía está distribuida entre los átomos. Unos pocos tienen muy poca energía y otros pocos tienen mucha, mientras que la mayoría tiene una cantidad media de energía. ¿Pero qué queremos decir con cambios "medios" cuando la temperatura aumenta? Cada átomo puede emitir radiación electromagnética en la forma de cuantos. Para valores altos de f (altas frecuencias o longitudes de onda cortas) la energía (E) requerida para emitir un solo cuanto es muy alta, y sólo unos pocos átomos la tienen. A

frecuencias bajas (longitudes de onda largas) es fácil irradiar cuantos porque para ello se requiere de menos energía. De cualquier forma, cada cuanto tiene tan poca energía (porque f es pequeña) que incluso juntando los cuantos no se contribuye demasiado al espectro. Pero a energías medias, hay muchos átomos produciendo gran cantidad de cuantos, que se acumulan para crear la colina en la curva de cuerpo negro. Todo coincidió con los experimentos para un cierto valor de h .

Planck no pensó en estos cuantos como pequeñas partículas, o balas liberadas por los átomos. Pensó que debería haber algo sobre el funcionamiento interno de los átomos que sólo les permitía emitir pulsos de luz, pero que la luz seguía siendo una onda. Esto es similar a un cajero automático: no puedes obtener cantidades diferentes o múltiplos de cien aunque existan.

entra einstein

La mayoría de los colegas de Planck pensaron que su descubrimiento, a pesar de ser útil, era sólo una especie de truco matemático, y que cuando los átomos fueran entendidos mejor sería posible descartarlo.

subiendo una escalera
Moverse en el mundo cuántico es como subir una escalera. Sólo puedes moverte en un número entero de escalones; no hay nada entre ellos sobre los que puedas apoyar el pie.



Al inicio, la única persona que tomó y usó la interpretación de Planck tal y como era fue Albert Einstein, en ese entonces un científico desconocido apenas comenzando sus investigaciones. Él demostró en 1905 que un fenómeno desconcertante en ese tiempo, conocido como el efecto fotoeléctrico que tampoco tenía explicación clásica, también podía ser entendido y tomado en cuenta si la luz



una reunión de mentes
Max Planck (izquierda) y Albert Einstein fueron los dos iniciadores de la teoría cuántica, aún cuando pertenecían a diferentes generaciones.

“Pasé diez años de mi vida probando la ecuación de Einstein de 1905, y contra mis expectativas, en 1915 tuve que sostener su clara verificación a pesar de su irracionalidad.”

Robert Millikan (1868–1953)

viajara de hecho como un flujo de partículas diminutas. En su forma más simple, el efecto fotoeléctrico consiste en que se puede producir una corriente en un circuito al hacer incidir luz sobre una placa metálica, los electrones en el metal se agitan y

crean una corriente eléctrica. Los efectos particulares que Einstein observó sólo eran consistentes con el hecho de que los electrones fueran golpeados por partículas en vez de ondas. Pero nadie más aceptó al principio la idea de estas partículas de luz, y sólo se les dio el nombre de fotones hasta 1926, después de que surgió mucha más evidencia mostrando que Einstein estaba en lo cierto.



la luz trabaja
El efecto fotoeléctrico, explicado en términos cuánticos por Albert Einstein en 1905, es la base del funcionamiento de los paneles solares de este vehículo futurista que convierten la luz solar en potencia motriz.

la luz del Sol genera una corriente eléctrica en las celdas fotoeléctricas



modelo de bohr del átomo

La evidencia que hizo que la gente tomara en serio la idea de los cuantos vino del trabajo del danés Niels Bohr. En 1911, Ernest Rutherford, de Nueva Zelanda, había descubierto que el átomo consiste en un núcleo central cargado positivamente, rodeado de una nube de electrones cargados negativamente. Era natural pensar en los electrones como si de alguna manera estuvieran "en órbita" alrededor del núcleo, de forma similar a como los planetas orbitan alrededor del Sol. Pero hay una gran diferencia. De acuerdo a la teoría clásica, una partícula cargada orbitando de esta manera debería irradiar continuamente energía electromagnética, y caer en espiral hacia el núcleo. ¿Qué los mantenía en su sitio?

Bohr decía que los electrones sólo podían ocupar ciertas órbitas alrededor del núcleo, cada una correspondiente a una cantidad de energía precisa que era múltiplo de un cuanto básico. No se permitían órbitas intermedias, porque no era posible tener fracciones de cuanto (justo como, si llevamos la analogía del dinero al límite, no hay una moneda más chica que 10 centavos, y no puedes tener 12 centavos en la bolsa). Así los electrones no podían irradiar energía continuamente y caer al núcleo.



El físico danés **Niels Bohr** (1885–1962) fue el primero en aplicar la física cuántica

para dar una descripción del átomo. Bohr desarrolló sus ideas básicas cuando trabajó con Ernest Rutherford en Manchester entre 1912 y 1916, pero hizo la mayor parte de su carrera en Dinamarca. Ahí fundó el Instituto de física teórica (después conocido como el Instituto Niels Bohr). Ganó el Premio Nobel en 1922.

fuerza invisible

Si los electrones estuvieran literalmente "en órbita" alrededor del núcleo atómico, deberían irradiar energía y caer hacia él. ¿Qué los detiene?

Lo que sí podían hacer era saltar de una órbita a la otra, ya fuera emitiendo o absorbiendo un cuanto de energía en el proceso.

La belleza de esta idea radicaba en que ya era sabido que los átomos de cada elemento producen un conjunto de líneas características en el espectro, tan distintivo como un código de barras. Las líneas corresponden a una longitud de onda precisa, lo que se traduce en una cantidad de energía precisa. Las líneas brillantes corresponden a la energía irradiada por un átomo.

El patrón de esas líneas permitió calcular las energías implicadas si los electrones estuvieran dando estos saltos dentro de los átomos, y las observaciones coincidieron con los cálculos de Bohr.

El ingrediente final del modelo del átomo

de Bohr fue su idea de que una órbita sólo tiene lugar para un cierto número de electrones. Si la órbita estaba llena, ningún electrón podía ser añadido, incluso cuando hubiera electrones en órbitas superiores que "quisieran" hacer el salto hacia niveles menores de energía. De esta forma los

“ Cualquiera que no esté impactado con la teoría cuántica no la ha entendido ”

Niels Bohr

átomos eran estables, y se explicaron los patrones de líneas distintivos en el espectro de la luz. El modelo del átomo de Bohr, presentado en 1913, hizo que la gente tomara a la física cuántica como algo más que un truco matemático; pero el progreso en esta nueva rama de la física se retrasó por la Primera Guerra Mundial. Hasta los años veinte estas ideas se unieron en una teoría cuántica completa.



código de barras elemental
Tal y como el código de barras en una lata te puede indicar el contenido, el espectro de un elemento, como el hidrógeno, te revela qué átomos están presentes.



huellas digitales de la luz

Aquí hay tres ejemplos de espectros "puros" obtenidos de tres elementos diferentes. Cada tipo de átomo caliente (excitado) produce su propio "código de barras" característico, y así los elementos que producen esta luz pueden ser identificados con certeza.

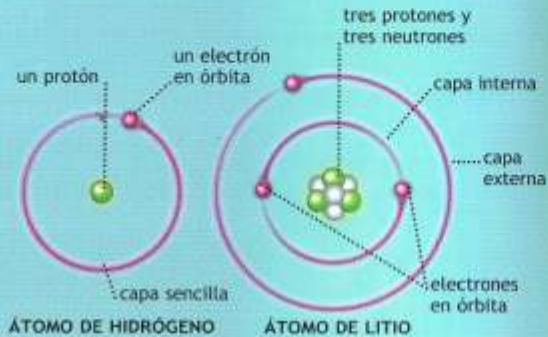
modelo de bohr

Niels Bohr describió a los electrones asociados al átomo localizados en órbitas alrededor del núcleo. Estas órbitas se encuentran por capas, sólo permiten un cierto

número de electrones en cada órbita. Una órbita llena es particularmente estable, y los átomos se combinan entre sí para formar moléculas de tal forma que comparten sus electrones para dar la ilusión de órbitas llenas.

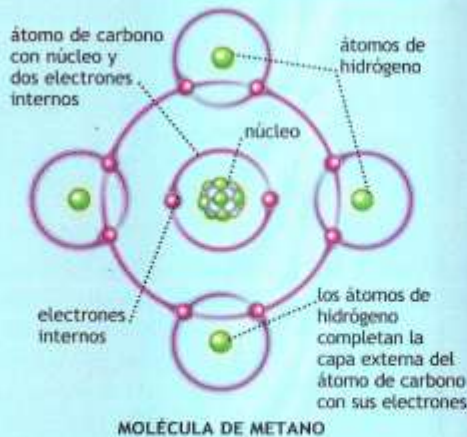
acopiando electrones y protones

Todos los átomos contienen un número igual de protones y electrones. El hidrógeno tiene un protón y un electrón, mientras el litio tiene tres de cada uno.



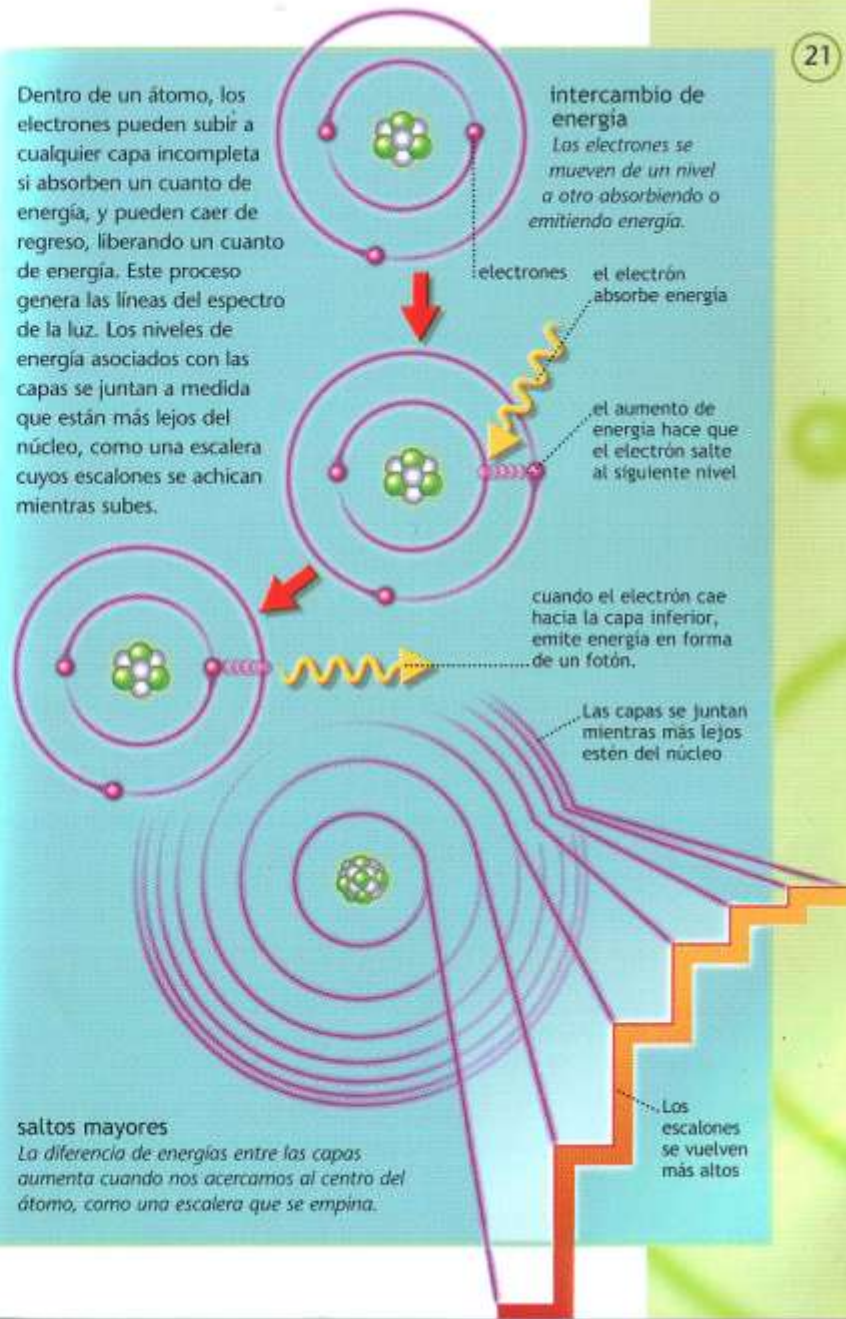
metano

Las moléculas de metano están hechas de hidrógeno y carbono. Los átomos de hidrógeno tienen un electrón, pero necesitan dos para completar una capa. Los átomos de carbono tienen una capa interna llena con dos electrones, y una capa externa a medio llenar con cuatro electrones. Así, un átomo de carbono y cuatro de hidrógeno forman una molécula de metano.



Dentro de un átomo, los electrones pueden subir a cualquier capa incompleta si absorben un cuanto de energía, y pueden caer de regreso, liberando un cuanto de energía. Este proceso genera las líneas del espectro de la luz. Los niveles de energía asociados con las capas se juntan a medida que están más lejos del núcleo, como una escalera cuyos escalones se achican mientras subes.

intercambio de energía
Las electrones se mueven de un nivel a otro absorbiendo o emitiendo energía.



saliendo de la oscuridad

El experimento de la doble rendija probó que la luz viaja como una onda, pero los experimentos de inicios del siglo XX mostraron que está hecha de partículas. Frente a estos hallazgos irreconciliables, un recurso útil es desarrollar modelos mentales para imaginar lo inimaginable. Uno de estos modelos gira alrededor de las ondas de probabilidad, lo que veremos al inicio de esta sección. La probabilidad llevó a la idea de que los electrones eran ondas y partículas a la vez, lo que a su vez llevó a la conclusión de que un sistema cuántico no existe en un estado definido de onda o de partícula hasta que se le mide, lo que a su vez estableció las bases de la noción de incertidumbre. Paradójicamente, estos hallazgos sobre la naturaleza aparentemente imposible de la energía y la materia llevaron a la electrodinámica cuántica (QED), una teoría que puede tomar en cuenta todas las interacciones entre electrones y fotones, incluyendo las que hacen brillar al Sol, y las que mantienen el ADN unido. También llevó al desarrollo del láser y los microprocesadores.



ondas difractadas

La luz monocromática (de longitud de onda única) de un láser se esparce en un patrón de difracción al pasar por una abertura, mostrando la naturaleza ondulatoria de la luz.

el misterio central



masa y energía

La distinción entre ondas y partículas en el mundo cotidiano se ve claramente en un surfista ("partícula"), en un lugar definido, montado sobre una ola extendida.

imagen de fondo

Debido a la forma en que las ondas se esparcen, dos ondas de luz pueden interferir entre sí y formar un diseño de franjas.

Uno de los más grandes físicos del siglo XX, Richard Feynman, describió el experimento de la doble rendija, que probó entre otras cosas que la luz viaja como una onda, como "el misterio central" de la física cuántica. No cabe duda que el experimento es correcto y que permite calcular la

longitud de onda de la luz. La luz es una onda. Pero en las primeras décadas del siglo XX, varios experimentos, como los estudios del efecto fotoeléctrico, mostraron con igual certeza que la luz está hecha de partículas (fotones). Muchos de estos experimentos los realizó Robert Andrews Millikan, quien se opuso a la interpretación de Einstein del efecto fotoeléctrico y se avocó a mostrar que estaba equivocado. Irónicamente, su trabajo demostró concluyentemente que Einstein tenía razón. La evidencia era mucho más contundente de lo que hubiera sido si Millikan hubiera tratado de confirmar la teoría.

un modelo de probabilidad

¿Entonces pueden explicarse los resultados del experimento de la doble rendija en términos de partículas? No. Nada de lo que hay en la experiencia diaria nos ayuda a entender.

La conclusión es que la forma en que ocurren los eventos en el mundo cuántico es totalmente diferente del mundo cotidiano de nuestra experiencia, y que la verdad sólo puede ser expresada en las ecuaciones matemáticas que permiten a



Albert Einstein

(1879-1955) es mejor conocido por sus dos teorías de la relatividad, pero

también sus contribuciones a la teoría cuántica fueron profundas, y recibió el Premio Nobel por su trabajo sobre el efecto fotoeléctrico. Después de graduarse en 1900, completó su teoría especial de la relatividad y su trabajo sobre el efecto fotoeléctrico mientras trabajaba en una oficina de patentes y hasta 1909 obtuvo un puesto universitario.

los físicos predecir cosas como los niveles de energía de los electrones en un átomo o el brillo de las franjas en un patrón de difracción.

Un modelo que a mucha gente le ha resultado útil involucra ondas de probabilidad. Si arrojaras piedras a una pared con dos huecos, el resultado serían dos montones de piedras del otro lado, uno detrás de cada hueco. No obtendrías nada parecido al patrón de difracción

que ves cuando las ondas pasan por dos agujeros. Pero si las "piedras" son fotones, y los agujeros son muy pequeños, si obtienes un patrón de difracción. Es como si hubiera una onda asociada a cada fotón. Las ondas de todos los fotones interactúan y forman un patrón de difracción, que puede ser pensado como un patrón de probabilidades, donde los fotones acabarán con más probabilidad donde las ondas interfieren para producir crestas en el patrón de difracción, y llegarán menos donde la interferencia ha causado

la cancelación de las ondas. De cualquier modo, no hay forma de predecir dónde va a caer cada fotón. Esto es extraño cuando lo pensamos en términos de fotones. Pero se vuelve aún más extraño cuando lo pensamos en términos de electrones.



comportamiento extraño

Si dos personas arrojaran muchas piedras en un montón, estarías sorprendido si acabarían alineadas en franjas como el patrón de interferencia formado por las ondas.

ondas y partículas

Al acumularse la evidencia, la luz, que era normalmente tomada como una onda, tuvo que ser contemplada como una onda y una partícula a la vez. En los años veinte, el físico francés Louis De Broglie sugirió que los electrones, al los que se les consideraba partículas, debían ser vistos como ondas y partículas a la vez. De hecho, dijo que todo debía ser visto



escultura subatómica

Al hacer que un anillo de átomos funcionara como un corral, los investigadores en los años noventa lograron atrapar electrones como ondas moviéndose sobre la superficie de un metal, tal como las ondas en la superficie de un estanque.

la pelota de tenis llega a un lugar definido

como ondas y partículas, pero que la cantidad de comportamiento ondulatorio asociado a los objetos cotidianos, como la gente o las macetas, no se observa porque tienen demasiada masa.

Usando el trabajo de Einstein sobre los fotones, se descubrió una ecuación que vinculaba las propiedades de onda y las de partícula de la luz. La ecuación dice que la longitud de onda asociada a un fotón multiplicada por su momento (su impulso) es igual a la constante de Planck h . De Broglie se dio cuenta que la ecuación es universalmente cierta, de forma que una partícula como un electrón (o cualquier otra cosa) que tenga un cierto momento también debe tener una cierta longitud de onda, que puede ser calculada con esta ecuación. A la curva que describe a esta entidad cuántica se le conoce comúnmente como la función de onda. El descubrimiento de De Broglie fue apoyado con entusiasmo por Einstein, y a finales de los años veinte se hicieron experimentos donde se midió la longitud de onda de los electrones. Esto mostró que en el mundo cuántico todo es onda y partícula a la vez.

la pelota se esparce en forma de onda y atraviesa los dos orificios a la vez

$$h = 0.00066$$
$$m = 0.0093$$

De todas formas, el reino cuántico está limitado al mundo de lo muy pequeño, porque la constante de Planck es muy pequeña. En unidades donde la masa se mide en gramos, el valor de h es de 6.6×10^{-27} (un punto decimal seguido de 26 ceros y dos seises). Ya que la ecuación de De Broglie dice que la longitud de onda de un objeto es igual a este número diminuto dividido entre su momento, y el momento está relacionado con la masa, la longitud de onda sólo será detectable en objetos con una masa diminuta. Claro está, en las mismas unidades la masa del electrón es de 9×10^{-28} gramos. Todo cuadra.

patrones de electrones

A pesar de que todo esto estaba claro para los expertos desde antes del final de los años veinte, el desafío de la dualidad onda-partícula y el elemento probabilístico hallado en la física cuántica fue retomado en los años ochenta por un equipo de científicos japoneses de los laboratorios de investigación Hitachi. Ahí realizaron el experimento de la doble rendija con electrones que eran disparados, uno por uno, a través del equipo. Los electrones se detectaron en una pantalla (como una de TV) al otro lado de las rendijas, donde cada uno marcaba un punto al llegar. La pantalla "memorizaba" el punto, de manera que se fue construyendo

la pelota deja la raqueta como un objeto definido



el tamaño importa
Los efectos cuánticos son importantes para los electrones porque, si escribes los números en las unidades apropiadas, la masa (m) de un electrón es aún menor que la constante de Planck (h).

si h fuera mayor
Si la constante de Planck fuera suficientemente grande, las pelotas de tenis se comportarían como electrones. Después de golpearlas, se disolverían en ondas al viajar de un lugar a otro, y sólo se condensarían de nuevo en partículas al golpear algo.

el corazón de la materia

Los objetos cuánticos se comportan como si fueran ondas y partículas. En un experimento en los años ochenta, se dispararon electrones, uno por uno, a través del equivalente al experimento de la doble rendija de Young. Fueron detectados en una pantalla similar a la de una televisión, donde cada uno marcaba un punto de luz que "memorizaba" la pantalla. Cada electrón se disparó como una partícula, y cada uno dejó un punto en la pantalla, confirmando su llegada como una partícula. Pero cuando se dispararon

miles de electrones a través del dispositivo, el patrón de puntos en la pantalla resultó ser el del clásico patrón de interferencia de las ondas. No es necesario entender esto. Nadie lo entiende, pero así funciona el mundo cuántico.



los electrones se disparan a través de una rendija uno por uno

los electrones interactúan después de forma desconocida con las dos rendijas

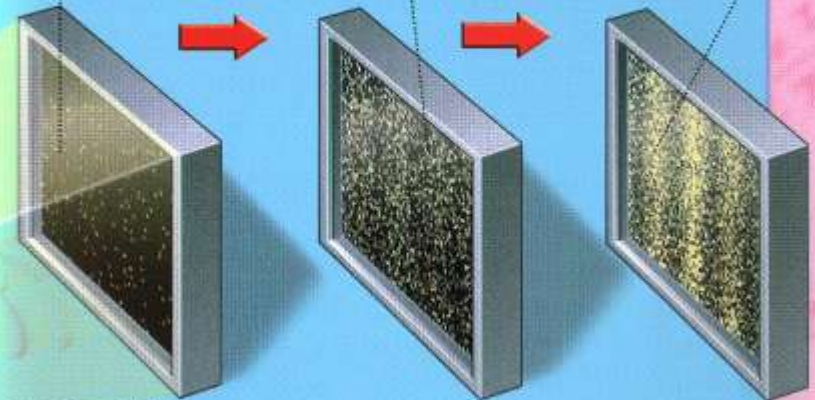
una imagen a medida que llegaron más y más electrones.

Cada uno de los electrones hizo un solo punto de luz, probando que son partículas. A medida que los electrones fueron disparados uno tras otro, los puntos de luz formaron gradualmente un patrón claro, el patrón de difracción, y no los dos "montones de piedras". Los electrones ni siquiera atravesaban el experimento juntos, pero aún así formaron el patrón característico asociado a las ondas que atraviesan dos rendijas. Era como si cada electrón supiera a dónde habían ido su predecesores, y a dónde irían los que vinieran después, además de saber su propio lugar en el patrón. Esto muestra claramente la rareza del mundo cuántico a los que no son científicos.

cada electrón se registra en la pantalla como un punto luminoso

los electrones se acumulan gradualmente en un patrón

finalmente, aparece el patrón de interferencia característico de las ondas



la onda partícula

El experimento sólo permite que pase un electrón a la vez por el aparato. Pero el patrón que se forma sólo puede ser producido por ondas que han pasado por ambas rendijas y que han interferido entre sí. Ni siquiera es el patrón que se esperaría si dos ondas separadas pasaran por una u otra de las rendijas una por una.



como crees que debería verse

como aparece el patrón real

Está claro que un electrón no "sabe" nada. Simplemente sigue las reglas ciegas de la suerte de la misma forma que un dado al ser echado no "sabe" que números han salido antes (o saldrán después) de acuerdo a la probabilidad, digamos, de que salga un tres en una de seis jugadas. El papel de la probabilidad es muy profundo en la física cuántica, algo que Einstein repudiaba al hacer el famoso comentario "no puedo creer que Dios juegue a los dados".

lanzar los dados
Un dado dando tumbos ateriza con una cara arriba de acuerdo con la reglas de la probabilidad. No tiene que "saber" qué número salió la vez anterior. Los procesos cuánticos también obedecen reglas de probabilidad.





afectando la realidad

Niels Bohr dijo que lo que escogemos medir, y el acto de medir, afectan la naturaleza de la realidad. La característica más importante de la Interpretación de Copenhague es que ninguna propiedad cuántica (como la posición de un electrón) es real hasta que se le mide.

La evidencia señala que Einstein estaba equivocado y que el mundo cuántico se rige realmente por la probabilidad.

Las conclusiones derivadas de experimentos como los de la doble rendija se desarrollaron a finales de los años veinte. En conjunto se les conoce como la Interpretación de Copenhague debido a que Niels Bohr y sus colegas en Dinamarca estuvieron involucrados cercanamente en su desarrollo (aun cuando sus ideas probablemente vinieron de Max Born, en Alemania).

La Interpretación dice que un sistema cuántico no existe en un estado definido hasta que se le mide. Por ejemplo, un electrón viajando por el experimento de la doble rendija lo hace como una onda extendida, y no tiene una localización precisa en el espacio. Es sólo cuando llega a la pantalla detectora cuando "escoge" entre las posibilidades (como un dado que finalmente se detiene en una cara) lo que hace que la función de onda "colapse", como Bohr lo expresó, en un solo punto. Usando este modelo, los objetos cuánticos viajan como ondas pero llegan como partículas.

la paradoja de schrödinger

La idea de la función de onda de un electrón resultó muy útil al unir experiencia y teoría y permitió al austriaco Erwin Schrödinger desarrollar una descripción más completa de la forma en la que se comportan los electrones en el átomo en términos de ondas. Esta descripción permitió a investigadores como el estadounidense Linus Pauling explicar todos los principios de la química (cómo interactúan los átomos para formar moléculas) en términos de la física cuántica. Esto ha llevado a los físicos a lanzar el sarcasmo de que "la química es ahora una rama de la física".

en la balanza

Llevando las ideas de Bohr al límite del absurdo, Erwin Schrödinger imaginó un gato que no estaría muerto ni vivo hasta que su estado de salud fuera "medido" de alguna forma.



En los años veinte, el físico austriaco **Erwin Schrödinger** (1887-1961) encontró una ecuación de onda que describe el

comportamiento de los objetos cuánticos como los electrones y otras "partículas". En 1933 recibió el Premio Nobel por su trabajo (junto con Paul Dirac), pero se encontraba desalentado con que la rareza de la física cuántica no pudiera expresarse en el lenguaje familiar de las ecuaciones de onda.

Schrödinger estaba satisfecho con que su función de onda trajera de regreso a la física fundamental el sentido común de las ondas habituales. Es por eso que quedó horrorizado cuando descubrió que no era posible deshacerse de los efectos probabilistas, y llegó a decir de su propia teoría, "no me gusta, y quisiera no haber

tenido nunca nada que ver con ella". Incluso imaginó un "experimento pensado", conocido hoy como la paradoja del gato de Schrödinger (aun cuando en realidad no sea una paradoja), para iluminar lo que consideró el absurdo de la

"Usted cree en un Dios que juega a los dados, y yo en un orden y una ley completos en un mundo que existe objetivamente, y que yo, en una forma altamente especulativa, intento capturar... ni siquiera el gran éxito inicial de la teoría cuántica me hace creer en el juego de dados fundamental, aun cuando estoy advertido que sus colegas más jóvenes lo interpretan como una consecuencia de la senilidad."

Albert Einstein, carta a Max Born (1926)

Interpretación de Copenhague, que literalmente, dice que un gato puede estar vivo y muerto al mismo tiempo.

Schrödinger falló en su intento de explicar totalmente los electrones en términos de ondas porque no es más cierto decir que el

electrón es una onda a decir que es una partícula.

Las entidades cuánticas como los electrones tienen propiedades que los hacen aparecer a veces como partículas

y a veces como ondas. Esto está muy relacionado con la idea de la incertidumbre cuántica.

el principio de incertidumbre

La importancia de la incertidumbre en el mundo cuántico fue estudiada por primera vez por el alemán Werner Heisenberg, en 1927. Él se dio cuenta que en este contexto, la incertidumbre es algo preciso y definido, y que está implícita en las ecuaciones que describen a objetos como los electrones.

Su análisis reveló que existen pares de propiedades de las entidades cuánticas, y que es imposible especificar valores

precisos de ambas al mismo tiempo. El par más importante de estas "variables conjugadas" es el de la posición y el momento. Sus ecuaciones muestran que una partícula (entidad cuántica) no puede tener una posición determinada con precisión y un momento determinado con precisión al mismo tiempo. Y como el momento (p) es proporcional a la velocidad ($p = mv$, donde m es la masa), esto quiere decir que una partícula no tiene una velocidad y una posición definidas simultáneamente. De hecho, la incertidumbre en la posición multiplicada por la incertidumbre en el momento siempre es mayor que la constante de Planck.

el gato de schrödinger

Erwin Schrödinger imaginó un experimento pensado para mostrar lo que consideraba absurdo de la física cuántica. Nos pidió imaginar un gato encerrado en una cámara sin ventanas con una buena provisión de alimentos y otras comodidades, pero también con lo que llamó un "aparato diabólico" consistente en un contenedor de gas venenoso conectado a una muestra de material radiactivo. Si el material radiactivo decae, el gas se libera, y si el gas se libera, el gato muere.

De acuerdo con las reglas cuánticas, es posible calcular un momento en el que hay una exacta probabilidad 50:50 de que el material radiactivo haya decaído y que el gato esté muerto o vivo. La teoría cuántica dice que si vemos dentro de la caja, ocurrirá un "colapso de la función de onda" y

la interpretación de Copenhague dice que el gato existe en una "superposición de estados"

el gato está medio vivo

el gato está medio muerto



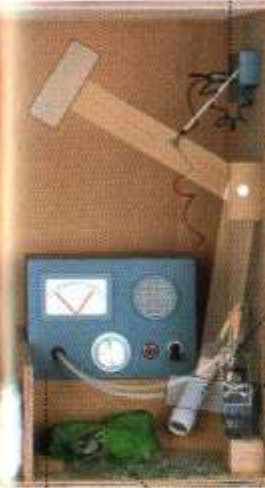
interruptor radiactivo que suelta el martillo

hay una probabilidad de 50:50 de que el martillo haya caído y roto la botella de veneno

botella de veneno

detector de decaimiento radiactivo

material radiactivo



veremos o un gato muerto o uno vivo. Pero también dice que si no vemos dentro de la caja, no sólo la muestra radiactiva sino todo el experimento, incluyendo al gato, se encontrarían en una superposición de dos posibles estados, localizados en el mismo lugar, donde el gato estaría vivo y muerto al mismo tiempo, o medio muerto y medio vivo.

El experimento pensado de Schrödinger resalta el hecho de que existe una cierta frontera entre el mundo clásico de los objetos cotidianos y el mundo cuántico de los objetos muy pequeños. Nadie sabe realmente dónde se encuentra esta frontera, o cómo desaparecen los efectos cuánticos cuando se la cruza.

¿está muerto o vivo el gato de Schrödinger? Esta maqueta de cómo podría realizarse el experimento del "gato en la caja" muestra al gato y al aparato diabólico en una superposición de estados que sólo se resolvería si se abre la caja.

y a veces como ondas. Esto está muy relacionado con la idea de la incertidumbre cuántica.

el principio de incertidumbre

La importancia de la incertidumbre en el mundo cuántico fue estudiada por primera vez por el alemán Werner Heisenberg, en 1927. Él se dio cuenta que en este contexto, la incertidumbre es algo preciso y definido, y que está implícita en las ecuaciones que describen a objetos como los electrones.

Su análisis reveló que existen pares de propiedades de las entidades cuánticas, y que es imposible especificar valores

precisos de ambas al mismo tiempo. El par más importante de estas "variables conjugadas" es el de la posición y el momento. Sus ecuaciones muestran que una partícula (entidad cuántica) no puede tener una posición determinada con precisión y un momento determinado con precisión al mismo tiempo. Y como el momento (p) es proporcional a la velocidad ($p = mv$, donde m es la masa), esto quiere decir que una partícula no tiene una velocidad y una posición definidas simultáneamente. De hecho, la incertidumbre en la posición multiplicada por la incertidumbre en el momento siempre es mayor que la constante de Planck.

el gato de schrödinger

Erwin Schrödinger imaginó un experimento pensado para mostrar lo que consideraba absurdo de la física cuántica. Nos pidió imaginar un gato encerrado en una cámara sin ventanas con una buena provisión de alimentos y otras comodidades, pero también con lo que llamó un "aparato diabólico" consistente en un contenedor de gas venenoso conectado a una muestra de material radiactivo. Si el material radiactivo decae, el gas se libera, y si el gas se libera, el gato muere.

De acuerdo con las reglas cuánticas, es posible calcular un momento en el que hay una exacta probabilidad 50:50 de que el material radiactivo haya decaído y que el gato esté muerto o vivo. La teoría cuántica dice que si vemos dentro de la caja, ocurrirá un "colapso de la función de onda" y

la interpretación de Copenhague dice que el gato existe en una "superposición de estados"

el gato está medio vivo

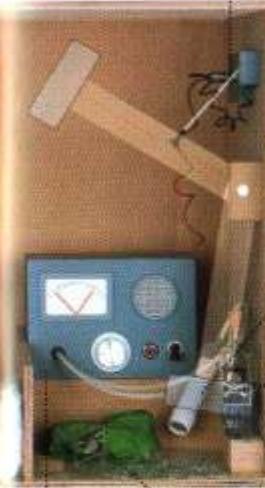
el gato está medio muerto



interruptor radiactivo que suelta el martillo

hay una probabilidad de 50:50 de que el martillo haya caído y roto la botella de veneno

botella de veneno



detector de decaimiento radiactivo

material radiactivo

veremos o un gato muerto o uno vivo. Pero también dice que si no vemos dentro de la caja, no sólo la muestra radiactiva sino todo el experimento, incluyendo al gato, se encontrarían en una superposición de dos posibles estados, localizados en el mismo lugar, donde el gato estaría vivo y muerto al mismo tiempo, o medio muerto y medio vivo.

El experimento pensado de Schrödinger resalta el hecho de que existe una cierta frontera entre el mundo clásico de los objetos cotidianos y el mundo cuántico de los objetos muy pequeños. Nadie sabe realmente dónde se encuentra esta frontera, o cómo desaparecen los efectos cuánticos cuando se la cruza.

¿está muerto o vivo el gato de Schrödinger? Esta maqueta de cómo podría realizarse el experimento del "gato en la caja" muestra al gato y al aparato diabólico en una superposición de estados que sólo se resolvería si se abre la caja.



Werner Heisenberg (1901–76), uno de los padres fundadores de la teoría cuántica, descubrió el principio de incertidumbre, que dice no es posible

medir con precisión la posición y la velocidad a nivel cuántico. Opacó su prestigio al ser el científico más capaz que permaneció en Alemania cuando los nazis llegaron al poder y al trabajar en el proyecto de la bomba atómica alemana durante la segunda guerra mundial. De cualquier modo, su grandeza fue reconocida con el Premio Nobel en 1932.

no puedes conocer ambos. Si la constante de Planck fuera lo suficientemente grande, los automóviles se comportarían como

electrones. Podrían tener una velocidad definida pero no una posición definida, o tener una posición definida pero no una velocidad definida.

¿Sabe lo rápido que viajaba?

No, ¡pero sé exactamente dónde estoy!



Nunca notamos a la constante de Planck en la vida diaria por lo pequeña que es, pero para los electrones es muy importante. La incertidumbre que rodea la posición y el momento no es simplemente el resultado de una dificultad para medirlos en algo tan pequeño como un electrón; un electrón en sí mismo no "sabe" con precisión dónde está y hacia dónde va. Este paquete de ideas (la incertidumbre, la probabilidad, la dualidad onda-partícula y el colapso de la función de onda), todos

asociados con el experimento de la doble rendija, es la esencia de la naturaleza del mundo cuántico. No te preocupes si te provoca un dolor de cabeza. Nadie entiende a la física cuántica. Lo que importa es que las ecuaciones asociadas a estas ideas tienen muchas aplicaciones prácticas, que funcionan las entiendas o no. Empezaremos

la discusión de aquellas aplicaciones con la joya de la corona de la física cuántica. Esto es la

teoría conocida como electrodinámica cuántica, que es la teoría más exitosa, en términos de su concordancia con los experimentos hechos aquí en la Tierra, de toda la ciencia.

la joya de la corona

El logro que corona a la física cuántica es la muy precisa descripción de la forma en que interactúan las partículas cargadas eléctricamente entre sí y con los campos electromagnéticos. Esto quiere decir que la electrodinámica cuántica, o QED (por sus siglas en inglés), describe todo lo de la materia que no describe la gravedad. El mundo cotidiano está hecho de átomos y moléculas, que interactúan entre sí a través de los electrones más externos de los átomos. La QED es capaz de tomar en cuenta todas las interacciones que involucran electrones, y por eso la QED es todo lo que se necesita para tomar en cuenta todo el mundo cotidiano. La QED explica por qué el océano es azul, cómo ocurren

“Todos estos cincuenta años de cavilación consciente no me han acercado a la respuesta de la pregunta ‘¿Qué son los cuantos de luz?’ Hoy en día cualquier Tomás, Juan o Pedro cree que lo sabe, pero está equivocado.”

Albert Einstein

lo que existe dentro del núcleo de un átomo y, como veremos, incluso ahí la QED provee el arquetipo en el que se basan otros modelos. Sin el ejemplo de la QED, estos modelos no tendrían sustento.



en el corazón de las cosas

La electrodinámica cuántica abarca cada aspecto que vemos a nuestro alrededor. Explica el color del mar, y la forma en que los químicos reaccionan.

puntos clave

- Las objetos cuánticos pueden comportarse como partículas y ondas
- Hay una incertidumbre inherente al mundo cuántico
- No podemos notar los efectos cuánticos en la experiencia cotidiana porque la constante de Planck es demasiado pequeña

Las raíces de la QED se establecieron en la década de 1930, cuando dos físicos, el alemán Hans Bethe y el italiano Enrico Fermi, sugirieron que las interacciones entre partículas cargadas podían describirse en términos de fotones (unidades de luz) que se intercambiaban entre las partículas. La versión completa de la teoría emergió en la siguiente década del trabajo de tres físicos, Sin-itiro Tomonaga en Japón, y Julian Schwinger y Richard Feynman en Estados Unidos. Las tres versiones desarrolladas son equivalentes matemáticamente, pero el tratamiento de Feynman es más fácil de entender en términos físicos, y se ha vuelto la versión estándar de la QED.

diagramas de feynman

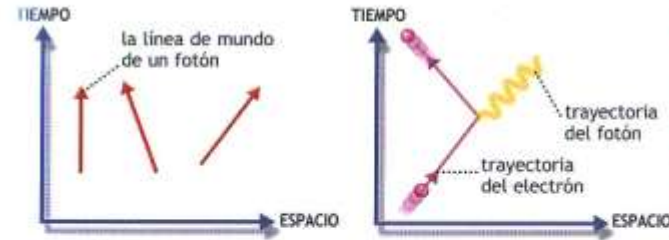
La física de la QED puede entenderse a partir de las figuras llamadas diagramas de Feynman. En ellas se representa a las trayectorias de los electrones en forma de líneas, conocidas como "líneas de universo" que se trazan entre una coordenada de tiempo y otra de espacio. Una línea vertical

representa a un electrón estático porque su posición en el espacio no cambia. Mientras menor es la pendiente de la línea de universo, mayor es el cambio de posición en el tiempo, y por tanto más rápido es el movimiento. Un fotón asociado con el campo de un imán puede introducirse en un diagrama de Feynman. El fotón puede mostrarse interactuando con un electrón que viaja en línea recta, y desviarlo a una nueva trayectoria. Esta versión simple de la QED predice que una propiedad conocida como el



Richard Feynman (1918-88), el mayor físico de su generación, fue uno de los

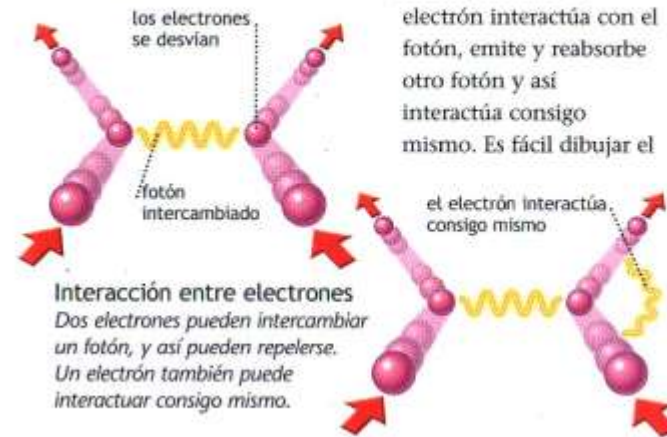
fundadores de la electrodinámica cuántica. Inventó los diagramas que describen el mundo cuántico, y durante 40 años inspiró a jóvenes físicos con sus enseñanzas. Recibió el Premio Nobel en 1965 y fue un miembro clave en el consejo que investigó el desastre del Challenger en 1986.



momento magnético del electrón tiene un valor de exactamente 1.

No importa lo que sea en realidad el momento magnético (puedes tomarlo como la medida de qué tan fácilmente puede girarse un electrón en un campo magnético), pero lo que sí importa es que es posible medir esta propiedad con mucha precisión en un experimento. Los experimentos muestran que el momento magnético es ligeramente mayor a uno, por lo que esta versión simple de la QED no puede ser la última palabra.

Feynman mostró cómo podía ser mejorado este sencillo modelo, y realizó un esquema para resaltar lo que estaba ocurriendo. En el siguiente paso del



Interacción entre electrones
 Dos electrones pueden intercambiar un fotón, y así pueden repelerse. Un electrón también puede interactuar consigo mismo.

cálculo, mientras el electrón interactúa con el fotón, emite y reabsorbe otro fotón y así interactúa consigo mismo. Es fácil dibujar el

las "líneas de mundo"
 En un diagrama de Feynman representan la posición de las partículas en el espacio a través del tiempo. Un electrón puede emitir o absorber un fotón, y cambiar de dirección.



teóricos
 Visto aquí con Richard Feynman (derecha), Paul Dirac (1902-84) desarrolló una primera versión de la QED e introdujo la idea de las antipartículas. Feynman concibió una teoría completa de la QED, completando el trabajo comenzado por Dirac.

esquema y difícil hacer los cálculos matemáticos. Cuando los cálculos de esta interacción se realizaron se obtuvo que el momento magnético debía ser ligeramente mayor a 1,

“Hay al menos una simplificación. Los electrones se comportan en este contexto de la misma forma que los fotones; ambos son extraños, pero exactamente de la misma forma. Por lo tanto se necesita mucha imaginación para apreciar su comportamiento, porque vamos a describir algo que es totalmente diferente de cualquier cosa que conozcan.”

Richard Feynman (1967)

cuenta el efecto de cuatro fotones emitidos y absorbidos, el valor predicho del momento magnético es de 1.00115965246, mientras que el mejor valor experimental es de 1.00115965221. La teoría y el experimento coincidían con una precisión de una parte en diez

aunque no tan grande como el valor medido. No hay razón para que el electrón no pueda emitir dos (o más) fotones, uno tras el otro, y reabsorberlos. Cada fotón extra admitido en los cálculos aproxima aún más el valor calculado al valor medido.

Feynman pudo probar que por cada fotón extra que se agrega al cálculo, la “corrección” es ligeramente menor, pero siempre en la dirección correcta. Para cuando se ha tomado en



separando
cabellos

Para igualar la precisión de los cálculos realizados con la OED, la distancia entre Nueva York y Los Ángeles, que es de 3961 km (2462 millas), tendría que ser medida hasta el grosor de un cabello humano, que es de 0.2 mm (1/127 pulgadas).

decimales
0.00000001 por
ciento. Esta es la
coincidencia más
precisa entre

la teoría y la observación que se haya logrado en cualquier experimento y una fuerte evidencia de que el edificio de la física cuántica está construido sobre cimientos firmes, y que podemos usarla con confianza para predecir (o explicar) el comportamiento de átomos y moléculas.



poniendo a trabajar a los cuantos

Un resultado de la incertidumbre cuántica (el principio que dice que una partícula no puede tener un momento y una posición precisas al mismo tiempo) es el proceso llamado efecto túnel. Éste explica entre otras cosas por qué brilla el Sol. Las estrellas, como el Sol, liberan energía a través del proceso de fusión nuclear. Para que los núcleos se fusionen, dos núcleos cargados

positivamente (en el caso más sencillo, dos núcleos de hidrógeno, que tienen un protón cada uno) deben unirse. Pero de acuerdo con la teoría clásica del electromagnetismo esto es imposible porque dos partículas con carga positiva se repelen y no podrían fusionarse. La física cuántica brindó una explicación de cómo la fusión debía ser posible. Debido a la incertidumbre cuántica, si dos protones se acercan mucho, no hay la certeza de que se toquen, y pueden o no fusionarse. Otra forma de pensar en esto es en términos de ondas. Si las dos entidades cuánticas pueden acercarse lo suficiente como para que sus funciones de onda se traslapen, pueden atraerse debido a la interacción de las funciones de onda. Esto se llama “efecto túnel” porque las dos partículas se acercan en oposición a la barrera eléctrica



núcleo de helio (dos protones y dos neutrones)

se emite un fotón

luz solar

explicación
cuántica

Una estrella como el Sol libera energía al forzar a los protones, de cuatro en cuatro, a formar un núcleo de helio. Este fue un gran rampecabezas, hasta que se aplicó la teoría cuántica al problema, porque la temperatura interna del Sol no es lo suficientemente alta como para que esto ocurriera sin la ayuda de la incertidumbre cuántica.



bajo presión

La elasticidad de un resorte puede ser vencida por un apretón más fuerte, tal y como la repulsión eléctrica entre los protones en un núcleo puede ser superada por la fuerza fuerte.

saliendo por el túnel

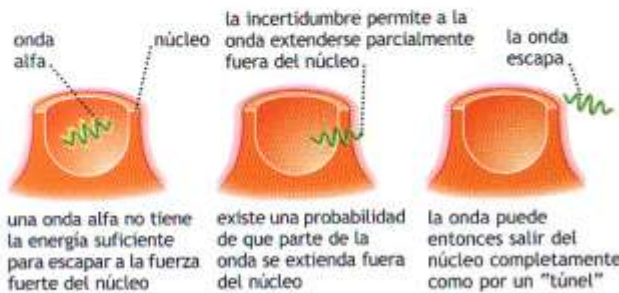
Las partículas atrapadas dentro del núcleo de un átomo por la fuerza fuerte pueden escapar debido a la propiedad ondulatoria asociada a la incertidumbre cuántica.

de la física clásica que se interpone entre ellas, pero son capaces de crear un "túnel" a través de ella.

Si la física cuántica no operara dentro de las estrellas, el Sol no brillaría y no estaríamos aquí. El mismo efecto túnel ocurre en reversa, permitiendo a las partículas salir del núcleo en el decaimiento radiactivo, o en la fisión nuclear. Las partículas en el núcleo se mantienen juntas por una fuerza llamada "fuerza nuclear fuerte", que tiene un alcance corto (por eso los núcleos son pequeños) pero que supera la repulsión eléctrica de los protones una vez que se tocan (tal y como puedes superar la tendencia de un resorte a expandirse comprimiéndolo con tus dedos). El efecto es como si las partículas estuvieran en lo profundo del cráter de un volcán y que tuvieran que escalar para salir, y que una vez sobre el borde del cráter fueran repelidas fuertemente por la fuerza eléctrica. El efecto túnel permite a las partículas escapar de ciertos núcleos sin tener la suficiente energía para escalar esta barrera.

decaimiento aleatorio

En una colección de núcleos potencialmente radiactivos, no decaen todos al mismo tiempo de esta manera. Cada núcleo decae al azar obedeciendo las precisas leyes de la probabilidad. Cada elemento radiactivo tiene un tiempo característico llamado vida media.



En una vida media la mitad de los núcleos decae, y así sucesivamente. Así que si empiezas con 128 núcleos con una vida media de 10 minutos, después de 10 minutos habrán decaído 64, en los próximos 10 minutos decaerán 32, en los siguientes 10 minutos decaerán 16 y así sucesivamente (todas estas son estimaciones promedio; en una muestra real los números pueden variar ligeramente). Pero es imposible decir de antemano si algún núcleo en particular va a decaer inmediatamente, en 10 minutos, en media hora, o cuando sea. El decaimiento es tan al azar como echar un dado, y Einstein odiaba esta idea.

Y también Schrödinger, quien se basó en esto y tomó la idea del colapso de la función de onda en su famosa paradoja del gato (ver página 32).

el puente de hidrógeno

La física cuántica también actúa en el corazón de la vida. La forma en la que los átomos se combinan para formar moléculas se explica totalmente con la física cuántica, que describe cómo los átomos comparten los electrones para obtener las combinaciones más estables. A las conexiones entre los átomos que forman las moléculas se les llama enlaces, y sólo involucran a los electrones externos de la nube que flota alrededor del núcleo. Pero hay un caso especial. Un átomo de hidrógeno consiste en un protón y un solo electrón, que gracias a su naturaleza cuántica, se las arregla para envolver al protón. No hay capas internas de electrones que cubran al protón cuando su único electrón se comparte con otro núcleo en un enlace químico convencional.



reacción en cadena

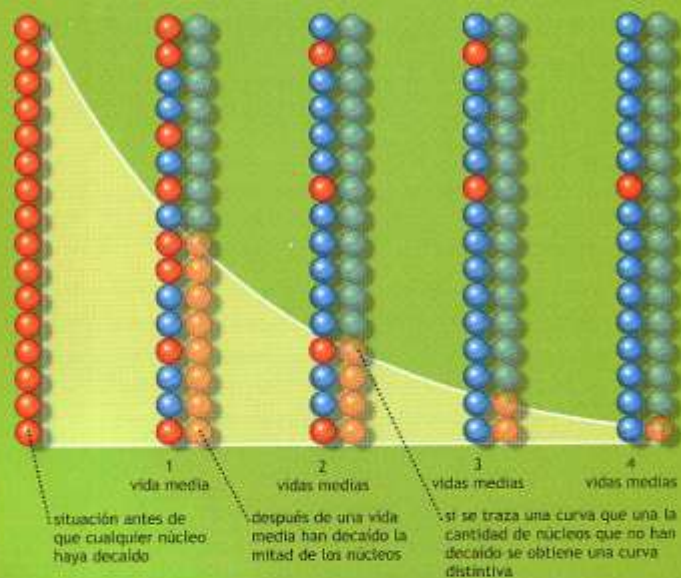
En un reactor nuclear, los núcleos inestables de los elementos radiactivos (como el uranio) absorben neutrones, haciéndolos dividirse en dos partes casi iguales,

liberando energía. Como productos secundarios de esta fisión se liberan más neutrones que a su vez provocan que más núcleos se dividan. Se llega a mantener un balance cuando cada núcleo que se divide sólo desencadena la división de otro núcleo, creando así una reacción en cadena sostenida.

decaimiento y vida media

Cuando un átomo (para ser estrictos, un núcleo) experimenta un decaimiento radiactivo, lo hace siguiendo las reglas de la probabilidad. Es como si el átomo echara una moneda al aire, y decayera al salir cruz, y no lo hiciera al salir cruz. Y que después siguiera jugando. Esto quiere decir que entre un número grande de

átomos, una cierta porción siempre decaerá después de un cierto tiempo. Los físicos miden esto en términos del tiempo que le toma decaer a la mitad de los átomos en una muestra, y a esto le llaman vida media. Cada tipo de núcleo radiactivo tiene su propia vida media que lo distingue.



decaimiento radiactivo

El tiempo que abarca una vida media puede ir de menos de una millonésima de segundo a millones de años dependiendo del elemento. Mientras más corta es la vida media, más radiactivo es el

elemento. Por ejemplo, el nitrógeno-16, que aparece en las centrales nucleares, tiene una vida media de siete segundos mientras que la del carbono-14, que determina la antigüedad del material orgánico es de 5730 años.

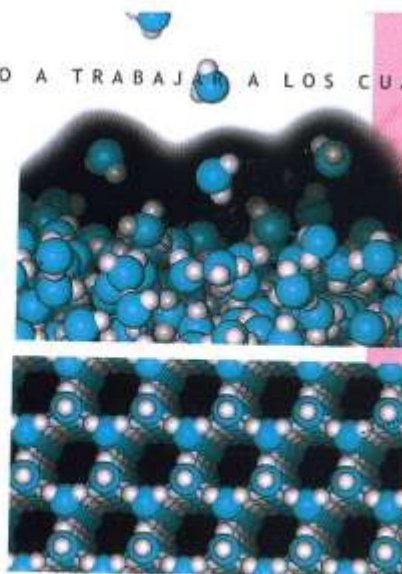
El resultado es que parte de la carga positiva del protón queda expuesta al mundo exterior, pero sólo en parte, porque la función de onda del electrón sigue envolviendo al protón aún cuando está más concentrada en el enlace. En la visión clásica de los electrones esto no podría ocurrir; el electrón tendría que estar de un lado del núcleo o de otro. Como

resultado de este recubrimiento parcial, los átomos de hidrógeno que tienen un enlace por un lado muestran en efecto una fracción de la carga positiva por el otro, y esto puede atraer a los electrones de la nube que cubra otra molécula. El resultado es que pueden formar, lo que se

“ Cuando se trata de los átomos, el lenguaje sólo puede usarse como en la poesía. Al poeta tampoco le importa tanto describir hechos como crear imágenes.”

Niels Bohr (1922)

llama un puente de hidrógeno, una especie de enlace entre las dos moléculas que es mucho más débil que un enlace convencional. La fuerza del puente de hidrógeno depende de las propiedades cuánticas de los electrones y se puede calcular; tiene alrededor de un décimo de la fuerza de un enlace común, y esto coincide con las medidas experimentales, confirmando una vez más que la física cuántica funciona en el mundo real. Pero la mayor importancia del puente de hidrógeno está en que es lo que mantiene unido al ácido desoxirribonucleico (ADN). El ADN, la molécula de la vida, está hecho de dos hebras enrolladas (la famosa doble hélice) unidas a lo largo por

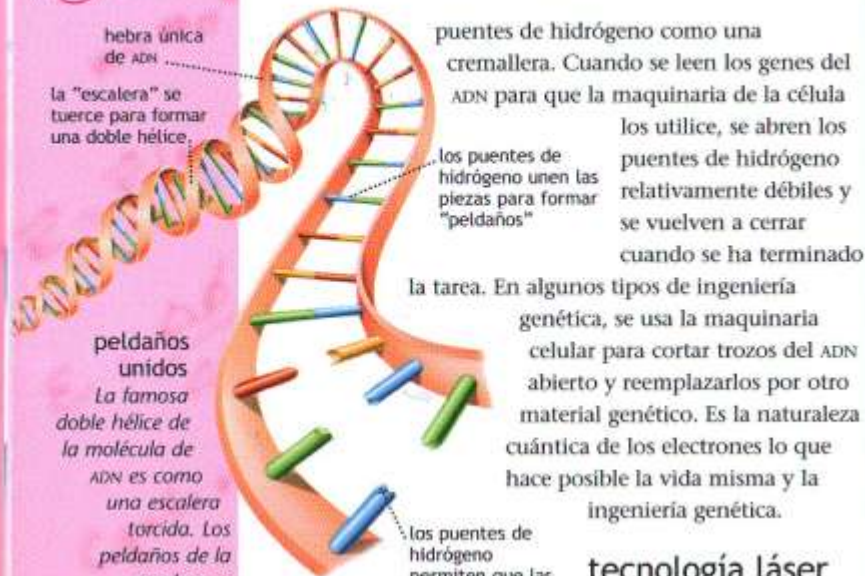


en el agua líquida, las moléculas tienen enlaces más holgados y se evaporan de la superficie

cuando el agua se congela, las moléculas cristalizan en una red abierta

líquido y sólido

En la fase líquida del agua no se pueden formar puentes de hidrógeno permanentes entre las moléculas porque poseen demasiada energía y se mueven demasiado rápido. Pero cuando el agua se congela los puentes de hidrógeno permanentes encajan en su lugar formando una red cristalina muy abierta. Es por esto que el hielo a 0 °C es menos denso que el agua y por lo que el hielo flota en el agua.



alta energía
Un electrón salta hacia un nivel más alto de energía cuando se le excita así como un niño salta de alegría.



los electrones también son importantes en la electrónica y especialmente en la fabricación de los microprocesadores. Por ejemplo, el comportamiento de algunos circuitos depende crucialmente de la habilidad de los electrones para cruzar barreras por el efecto túnel.

Pero uno de los ejemplos más nítidos de la aplicación de la física cuántica en la vida diaria es el láser, un dispositivo que se encuentra en cualquier reproductor de discos compactos.

Cuando una colección de átomos o de moléculas se calienta, adquieren energía (se "excitan"), y sus electrones internos suben a niveles más altos de energía.

tecnología láser

Las propiedades cuánticas de

Si se dejan enfriar, estos electrones saltan de regreso a niveles más bajos de energía irradiando luz de una forma más o menos aleatoria para producir la curva del cuerpo negro (ver página 14). Pero si se alimenta una pequeña



cantidad de radiación con la energía exacta en el material correcto, el efecto obtenido es levantar los electrones en cada átomo (o al menos en muchos átomos) del material al mismo estado excitado que sus vecinos. Cuando regresan a su estado inicial cada átomo emitirá un fotón con exactamente la misma cantidad de energía (lo que implica la misma longitud de onda). Son todos estos miles de millones de fotones avanzando al mismo tiempo lo que forma el haz intenso de pura luz monocromática de un láser (el nombre viene de la Amplificación de Luz por Emisión de Radiación Estimulada, por sus siglas en inglés).

El principio es muy sencillo, de hecho se remonta hasta algunos cálculos hechos por Einstein en 1916. Pero la dificultad tecnológica que implica el llevar muchos átomos al mismo estado excitado y mantenerlos ahí hasta disparar la descarga de energía resultó tan grande que los primeros láser no fueron desarrollados sino hasta 40 años después de los cálculos de Einstein. Hoy en día puedes conseguir uno para colgarlo en tu llavero. No hay mejor ejemplo de cómo la física cuántica se ha integrado a la vida diaria desde los tiempos de Einstein y Bohr. Pero aún hay aspectos del mundo cuántico por ser explorados y convertidos en nuevas tecnologías para el futuro.



exhibición láser
La primera exhibición pública de un espectáculo usando el láser ocurrió el 9 de mayo de 1969 en el Mills College en Oakland, California. Hoy en día se mueve a los rayos láser con espejos controlados por imanes electrónicamente mucho más rápido de lo que el ojo humano puede percibir.

versión miniatura
Un pequeño láser de bolsillo unido a un llavero es un ejemplo de la tecnología cuántica basada en una idea de Einstein que hoy es un lugar común.

cómo funciona un láser

La luz láser se crea al excitar electrones con una fuente débil de energía. Cuando se excitan muchos electrones, otro pulso de energía

actúa como un detonador que hace que todos los átomos caigan al mismo nivel simultáneamente. Esto lleva a que todos emitan luz con la misma longitud de onda.



láser apagado

El aparato del láser consiste en una varilla de rubi con espejos semiplataados a ambos lados junto a una fuente de luz.



emisión de luz

Algunos de los electrones excitados caen a niveles menores de energía, emitiendo fotones en todas direcciones.



encendido

Cuando se enciende la fuente, la luz penetra al rubi y "excita" a los electrones de varios átomos.



fotones paralelos

Los fotones que viajan a través de la varilla rebotan en los espejos, provocando que más átomos emitan fotones.



rayo láser

Cuando se acumula la energía, se libera por un extremo como un rayo intenso de luz de una sola longitud de onda.



cirugía láser

Los láser tienen muchos usos en la cirugía de los ojos, que incluye la recolocación de retinas desprendidas y la cauterización de vasos sanguíneos en la retina.

dentro del núcleo

Para la década de 1960, existía evidencia indirecta, surgida de los experimentos, de que los protones y los neutrones que conforman el núcleo de un átomo no son realmente partículas fundamentales (indivisibles), sino que poseen estructura interna. Por el contrario los electrones sí parecen ser partículas fundamentales sin estructura interna. A través de los años muchas ideas se sugirieron como modelos de lo que ocurre dentro de los protones y los neutrones, a los que se les llama colectivamente nucleones. Una de estas posibilidades, a la que se le conoce como el modelo de los quarks, fue ideada por George Zweig en 1963. Zweig trabajó en Caltech y luego en el CERN en Ginebra. Otro modelo fue desarrollado por Murray Gell-Mann, quien trabajó independientemente en Caltech y no estaba al tanto del trabajo de Zweig, quien se había ido antes de publicar sus resultados. En ese

entonces, este era el único candidato entre varios modelos especulativos, pero acabó por destacarse porque, años después, los experimentos lo confirmaron como una buena descripción de lo que ocurre dentro de los neutrones y protones. Estos experimentos se llevaron a cabo en el Acelerador Lineal de Stanford (SLAC) en California a finales de los años sesenta.



el hallazgo de los quarks

El Acelerador Lineal de Stanford (SLAC) se ubica en un tubo recto de 3.5 km de largo que atraviesa el campo de California (arriba). La fotografía inferior muestra a los científicos

trabajando en el túnel del acelerador. Este aparato dio la primera evidencia contundente de la existencia de los quarks.





gran detector

Un gigantesco imán de bobina descansa en el centro del gran detector del SSC; este aparato registra las partículas generadas en el acelerador lineal.

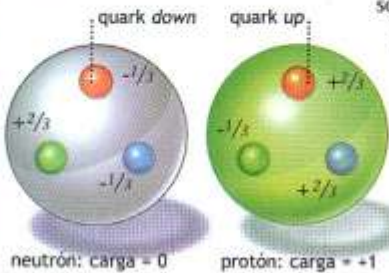
arriba y abajo

Un neutrón tiene dos quarks down con una carga de $-1/3$, y un quark up, con una carga de $+2/3$, resultando con una carga nula. Un protón tiene dos quarks up y un quark down, dándole una carga de $+1$. Up y down, arriba y abajo, son nombres dados por los físicos por simple capricho.

Implicaron disparar electrones en un tubo evacuado (al vacío) de 3.5 km (alrededor de 2 millas) de largo, y observar cómo eran dispersados por nucleones (protones o neutrones). Los datos mostraron que los electrones hacían saltar pequeñas partículas de los núcleos. Richard Feynman llamó a estas partículas "partones", un nombre escogido para no favorecer a ninguno de los modelos especulativos, queriendo decir simplemente que estas partículas eran parte de un nucleón. Pero pronto quedó claro que el comportamiento de estas partículas encajaba exactamente en las predicciones de la teoría de los quarks.

colores y pegamento

En su forma moderna, el modelo de los quarks dice que cada nucleón está compuesto por tres quarks (tomado de los "Tres quarks para Muster Mark" en el libro *Finnegan's Wake* de James Joyce). Los quarks tienen una propiedad análoga a la carga eléctrica, pero existe en tres variedades y no en dos (positiva y negativa). A estas variedades se les ha llamado usando nombres de colores, únicamente por conveniencia. En realidad los quarks no tienen color, y se pudo utilizar los nombres Juan, Pedro y José. Los colores que se escogieron



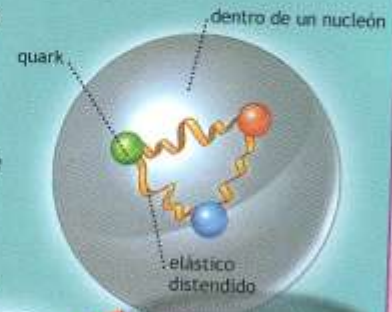
son el rojo, el verde y el azul. Siempre hay un quark de un color en un nucleón, y los tres colores se cancelan efectivamente de manera que sólo tienen un efecto

libertad asintótica

Los quarks están confinados dentro de un nucleón (protón o neutrón) como si estuvieran atados por elásticos enormemente fuertes. Cuando los quarks están juntos, el elástico se encuentra distendido y se pueden mover libremente. A esto se le llama libertad asintótica. Si tratas de apartarlos, el elástico se estira, y mientras más los jales, más resistencia hará el elástico. Es por esto que un quark no puede existir por su cuenta.

una fuerza (como el impacto de una partícula) empuja a los quarks hacia afuera

el "elástico" se estira y jala a los quarks de regreso



fuerzas restrictivas
Cuando los quarks están juntos, no interfieren entre sí y se mueven libremente. Cuando se apartan, se jalan el uno al otro y su libertad se restringe.

débil sobre otras partículas. Pero los quarks también pueden tener carga eléctrica.

De la misma forma en que las fuerzas electromagnéticas se transfieren por fotones entre las partículas cargadas, las fuerzas de color entre los quarks se transfieren por partículas análogas a los fotones, llamadas gluones (de *glue*, pegamento en inglés) porque mantienen a los quarks juntos, y esta unión es muy fuerte. Mientras que la fuerza eléctrica se debilita cuando las partículas cargadas se alejan, la fuerza de pegamento se intensifica cuando se aparta a dos quarks. De la misma forma en que se vuelve más difícil

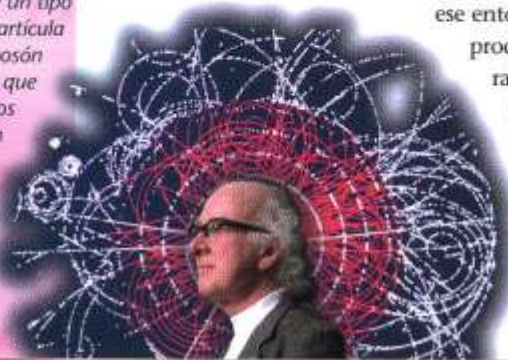


quedan pegados

La fuerza que mantiene a los quarks juntos dentro de un nucleón puede escapar del nucleón y afectar a los quarks del nucleón vecino. Es esta fuga la que se detecta como la fuerza fuerte que mantiene juntos a los núcleos atómicos.

rastreando al bosón

El físico británico Peter Higgs, desarrolló un modelo para explicar por qué las partículas tienen masa, y predice la existencia de un tipo de partícula (llamado bosón de Higgs) que los científicos aún están buscando.



estirar un elástico mientras más estirado esté. El resultado es que los quarks nunca pueden escapar del núcleo y tener una existencia independiente.

Este paquete de ideas se modeló de forma parecida a la electrodinámica cuántica, y se conoce como la cromodinámica cuántica, o QCD. La fuerza de pegamento entre los quarks se fuga de los nucleones para afectar relativamente poco a sus vecinos, y se traduce en la fuerza fuerte que mantiene al núcleo unido. La verdadera fuerza de color es mucho más fuerte que la fuerza nuclear "fuerte", que vence a la repulsión eléctrica de los protones a escala nuclear.

decaimiento nuclear

Hay una interacción más que afecta el comportamiento de las partículas en el mundo cuántico, y la forma en que funciona resalta la razón por la que los físicos prefieren el término "interacción" en vez de "fuerza". La interacción débil, como se le conoce, también actúa únicamente a la escala de los núcleos y los nucleones. Su propiedad más importante es que es responsable de algunos de los procesos involucrados en el decaimiento radiactivo y esto puede verse mejor con el ejemplo del decaimiento beta, en el que un neutrón se convierte en un protón.

El proceso toma su nombre de cuando fue descubierto en los últimos años del siglo XIX. En ese entonces la radiación producida era llamada radiación beta (a otro tipo de radiación ya se le había llamado radiación alpha) y después se descubrió que esos "rayos beta"

son en realidad un flujo de electrones veloces.

En el decaimiento beta, un neutrón (ya sea por su cuenta o dentro de un núcleo) se transforma en un protón expulsando un electrón y una partícula llamada neutrino. Es importante notar que no hay forma de que el electrón y el neutrino hayan estado "dentro" del neutrón. Lo que ocurre es que la energía total del neutrón se reordena en la energía total del protón más la energía total de un electrón y la de un neutrino. La forma en que un neutrón logra esto es expulsando (de uno de los quarks que lo conforman) la partícula que es la "portadora de la fuerza" de la interacción débil, análogamente al fotón en la QED y al gluón de la QCD. Pero esta partícula, llamada bosón intermediario, lleva una unidad de carga negativa. La energía del bosón se convierte rápidamente en la energía total de un neutrino y de un electrón. El electrón se queda con la unidad de carga negativa, así que para tener un balance el neutrón resultante queda con una unidad de carga positiva y se ha convertido en un protón. Existe también un bosón similar, que lleva una unidad de carga positiva, y otro que no tiene carga y que realizan otros tipos de interacción débil.

El descubrimiento de los tres bosones en los experimentos realizados en el CERN en 1983, después del triunfo de la QCD en la década anterior, forman el sello de lo que se ha vuelto el modelo estándar del mundo cuántico. Todo lo que hay en la Tierra puede ser explicado en término de quarks, electrones y sus neutrinos asociados, y cuatro interacciones: la gravedad, el electromagnetismo, la interacción nuclear débil y la interacción nuclear fuerte.



fotografiando partículas
El detector UA1 del CERN, (mostrado arriba durante su construcción en 1981), tiene el tamaño de una casa. Cuando los rayos de partículas chocan al centro del detector, producen una lluvia de otras partículas, que son rastreadas por el conjunto del UA1. Después una computadora genera una imagen de la lluvia de partículas. La imagen (arriba a la izquierda) muestra la primera detección en 1983 de una partícula Z, uno de los bosones intermedios.

la computadora cuántica

En 1965 Gordon Moore, cofundador de Intel, predijo que el número de transistores se duplicaría cada 18 meses. Esta predicción, conocida como la "ley de Moore", se ha comprobado hasta el momento, pero está por expirar ya que se está desarrollando un transistor con sólo tres átomos de grosor. Dentro de poco se alcanzarán las limitaciones físicas del uso de átomos para fabricar piezas que funcionen. El siguiente paso lógico es efectuar las operaciones de memoria y de procesamiento dentro de una computadora cuántica usando átomos y moléculas. Donde las computadoras actuales usan "bits" que existen en uno de dos posibles estados (0 ó 1), las computadoras codificarían la información en bits cuánticos, o qubits. Un qubit puede ser un 1 o un 0, o estar simultáneamente en una superposición de 0 y 1, o en algún estado intermedio. Como una computadora cuántica puede contener estos estados múltiples simultáneamente, tiene el potencial para ser millones de veces más poderosa que las más poderosas supercomputadoras existentes.



¿será pronto obsoleto? Vemos aquí parte del circuito de un microprocesador ampliado 200 veces. Las computadoras cuánticas pueden hacer que pronto esto parezca tan anticuado como hoy nos parecen las computadoras de bulbos.

los principios en la práctica



Las computadoras modernas ya dependen de las propiedades cuánticas de los electrones y de los átomos para el funcionamiento de los microprocesadores. Pero varios equipos alrededor del mundo trabajan en la posibilidad de una verdadera computadora cuántica, que sería un desarrollo tan grande comparado con las mejores computadoras actuales como los son estas con relación al ábaco. La mejor manera de ilustrar cómo funcionaría un aparato de este tipo es con la idea de la superposición de estados. Aunque es discutible que un gato pueda estar en una superposición de estados, no hay duda de que un electrón sí puede existir en esta dualidad simultánea. Por ejemplo, un electrón en un átomo es capaz de existir en alguno de dos estados: el estado base de menor energía o un estado excitado hacia el cual pueda saltar si obtiene la energía necesaria. Estos estados pueden corresponder a los números 0 y 1 del código binario estándar de las computadoras.



a la cabeza
Las computadoras y el ábaco son mundos separados en cuanto a su capacidad de cálculo, pero la computadora cuántica sería un adelanto aún mayor.

el futuro cercano
Un contenedor con moléculas de una computadora cuántica se carga en un aparato de resonancia magnética nuclear, donde un programa de pulsos de radiofrecuencia guiará a las moléculas para llevar a cabo un cálculo.

Esta unidad cuántica de información es llamada algunas veces punto cuántico. Si se ilumina al átomo con luz de la longitud de onda precisa justo el tiempo necesario, se puede crear la situación en la que hay una probabilidad 50:50 de que el electrón se encuentre en cualquiera de los dos estados. En la física cuántica esto es lo mismo que decir que el electrón está en una superposición de estados.



aún más chico
El circuito que carga esta hormiga es más poderoso que una computadora del tamaño de un cuarto de 1960. Pero los sistemas cuánticos permitirán una miniaturización mucho mayor cuando un solo electrón realice el trabajo de millones.

el límite de la velocidad

El hecho de que puedan existir puntos cuánticos en una superposición de estados abre la posibilidad de construir computadoras poderosas usando un pequeño número de componentes físicos. Lo que importa al determinar el poder de una computadora es el número de interruptores que pueden constituir su memoria y el largo de las secuencias de ceros y unos que pueden manejarse en el código binario de sus programas, sus cálculos y sus respuestas. Aún con la tecnología de los microprocesadores hay limitaciones en la capacidad de las computadoras porque los electrones tienen que viajar de un interruptor a otro dentro de la memoria. Esto toma tiempo, lo que limita la velocidad de la computadora. Las corrientes eléctricas también generan calor, lo que limita el tamaño que puede tener la memoria en términos físicos sin fundirse. Los científicos de la computación están tratando de usar nuevos componentes como el láser para transportar la información, pero incluso este tipo de tecnología es limitada en comparación con el poder del cómputo cuántico.



demasiado caliente para manejarse
La miniaturización trae sus propios problemas. Al empacar los componentes en muy poco espacio, uno de los límites de la computadora actual es la temperatura que alcanzan.

cuarteto cuántico
Cuatro computadoras por una. En una computadora cuántica cada dígito binario cuántico (qubit) equivale a cuatro interruptores comunes (bits)...

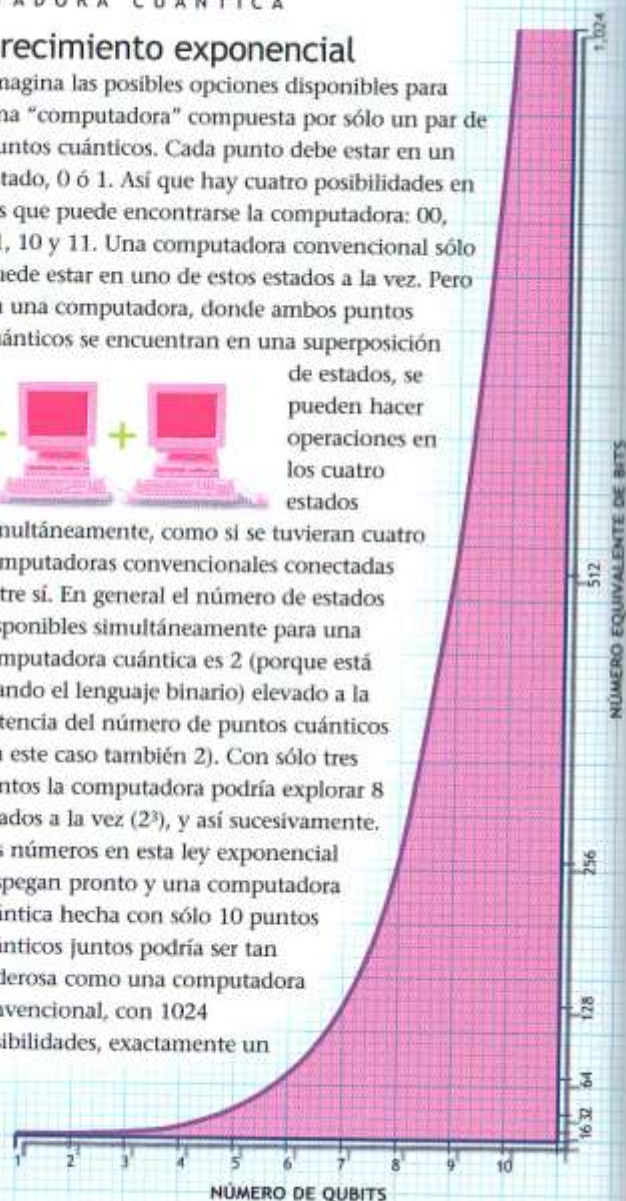


... pueden hacer operaciones en los cuatro estados

crecimiento exponencial

Imagina las posibles opciones disponibles para una "computadora" compuesta por sólo un par de puntos cuánticos. Cada punto debe estar en un estado, 0 ó 1. Así que hay cuatro posibilidades en las que puede encontrarse la computadora: 00, 01, 10 y 11. Una computadora convencional sólo puede estar en uno de estos estados a la vez. Pero en una computadora, donde ambos puntos cuánticos se encuentran en una superposición

de estados, se pueden hacer operaciones en los cuatro estados simultáneamente, como si se tuvieran cuatro computadoras convencionales conectadas entre sí. En general el número de estados disponibles simultáneamente para una computadora cuántica es 2 (porque está usando el lenguaje binario) elevado a la potencia del número de puntos cuánticos (en este caso también 2). Con sólo tres puntos la computadora podría explorar 8 estados a la vez (2^3), y así sucesivamente. Los números en esta ley exponencial despegan pronto y una computadora cuántica hecha con sólo 10 puntos cuánticos juntos podría ser tan poderosa como una computadora convencional, con 1024 posibilidades, exactamente un



crecimiento geométrico
...pero si tienes el doble de bits, no duplicas la capacidad de la computadora, lo elevas al cuadrado. La capacidad crece exponencialmente, así que sólo 10 puntos cuánticos (qubits) son equivalentes a un kilobit convencional.

kilobit. Una computadora cuántica con sólo un kilobit de memoria física actuaría virtualmente como una máquina con 101024 bits de memoria, un número mucho mayor que el número de átomos en el universo. Podría ser más poderosa que una computadora convencional hecha con todos los átomos del universo visible.



Cuando **Peter Shor** (nacido en 1959) enfrentó el problema de romper códigos de seguridad que implican números primos grandes, fue capaz de probar que una computadora cuántica podría resolver en segundos un problema que le tomaría meses a una computadora convencional. ¡Ahora lo que debo hacer es construirla!

rompiendo códigos

Existen problemas para saber cómo conectar los puntos cuánticos de manera correcta, cómo programar estas máquinas, y cómo interpretar sus resultados. Pero se están encontrando soluciones con computadoras cuánticas hechas de pocos qubits, y los físicos saben se ha probado matemáticamente que estas computadoras totalmente desarrolladas van a funcionar. Un punto clave de esta demostración muy técnica surgió del trabajo de Peter Shor.

Shor estaba interesado en la forma en la que se pueden utilizar computadoras cuánticas para romper códigos de seguridad. Existe un tipo particular de código que se obtiene

“El hecho de que experimentos tan sencillos puedan llevar a conclusiones tan definitivas sobre la naturaleza de la realidad, y la profundidad de estas conclusiones, es la cosa más extraña que conozca. Es extraño y es raro. Pero no misterioso, como dice mucha gente, porque creo que lo entendemos.”

David Deutch, físico de Oxford (2000)

al multiplicar números primos muy grandes. El resultado es un número mucho mayor, y el código sólo puede encontrarse al encontrar los dos números primos que lo generaron. Un proceso llamado factorización. Este proceso llevaría meses o incluso años

rompiendo códigos

Este teleimpresor Geheimschreiber de la segunda guerra mundial usaba ruedas, palancas, cables y engranes para producir dos mil millones de configuraciones posibles. El código fue roto

por el matemático sueco, Arne Beurling, quien sólo podía acceder a material interceptado. Los métodos actuales para crear códigos requerirían computadoras cuánticas para quebrarlos.

respuesta universal

Una computadora cuántica del tamaño de una computadora portátil sería tan potente como una computadora convencional hecha con todos los átomos del universo. Nuestro problema podría estar en entender la respuesta.



usando computadoras convencionales. En 1994 Shor demostró que una computadora cuántica puede resolver este problema "adivinando" posibles factores y multiplicándolos para comprobar que

generen el número original. Esta es más o menos la forma en la que funciona una computadora convencional, comprobando una posibilidad tras otra, pero en una computadora cuántica cada intento (una cadena de ceros y unos) correspondería a uno de los estados superpuestos, de manera que la computadora haría todos los intentos y llevaría a cabo todos los cálculos simultáneamente. Shor mostró que todos los intentos incorrectos se cancelarían entre sí, mientras que las respuestas correctas se reforzarían entre sí, de manera que sólo una solución saldría de la máquina. Todas las respuestas incorrectas se destruyen entre sí.

errores permitidos

Una computadora cuántica perfecta podría ser aún más impresionante. Resolvería simultáneamente todos los problemas que sea capaz de resolver, y daría la respuesta a todas las preguntas que sea capaz de contestar, dado que sepamos programarla y que podamos interpretar los resultados. Este prospecto está muy lejos, pero de cierta forma implica que se necesitaría crear una sola computadora cuántica completa y



hacerla funcionar una sola vez y luego dedicarnos durante generaciones a interpretar el resultado.

Pero al nivel que estamos quisiéramos lograrlo dentro de nuestras vidas, no importaría si la máquina comete algunos errores. Por ejemplo, algunos de los puntos cuánticos podrían

“La información clásica es como la información de un libro... la información en los sistemas microscópicos reales es más como la información en un sueño. Está ahí de alguna manera, pero si tratas de contarle a alguien sobre tu sueño no podrás recordarlo en la misma forma que tenía antes de contarlo.”

Charles Bennett, físico estadounidense (2000)

caer fuera de la superposición de estados debido al efecto del ruido aleatorio dentro de la máquina y llevar a respuestas incorrectas. Pero una máquina de este tipo sería tan rápida que sólo requeriría obtener una vez la respuesta correcta en mil intentos. Para

vencer este problema particular, podrías poner a funcionar la computadora mil veces antes del desayuno y luego multiplicar todas las posibles respuestas en una computadora común para ver qué factores realmente producen el número grandísimo en el que estás interesado.

Una computadora así de imperfecta pero con esa rapidez, sería invaluable en las áreas de espionaje militar, político e industrial, y no cabe duda que el financiamiento para estos proyectos continuará. Muy probable que se estén logrando avances aunque no oigamos nada. Y una vez que las computadoras cuánticas existan, su calidad mejorará. Entonces, su inmensa capacidad nos podrá ayudar a volver parte de la realidad práctica otras extrañas posibilidades cuánticas.

*espionaje al viejo estilo
Aplicar la capacidad de una computadora cuántica al descubrimiento y decodificación de información secreta podría volver obsoleto el papel del espía tradicional.*



teletransportación al estilo cuántico

Lo más raro del mundo cuántico es la forma en la que una entidad como un electrón parece estar en varios lugares al mismo tiempo. En el experimento de la doble rendija, por ejemplo, un solo electrón pasando por el aparato parece "saber" sobre todo el dispositivo experimental, y el lugar que ocupa en él. A esto se le llama no localidad,



al mismo tiempo en distintos lugares. En el mundo cuántico, los conceptos de "localidad" del sentido común se rompen y una partícula puede estar en más de un lugar al mismo tiempo.

porque el electrón no está localizado en ningún punto en particular. Únicamente cuando la partícula interactúa con algo (como la pantalla de televisión) la función de onda colapsa y se vuelve localizada.

el fenómeno de la no-localidad

Un electrón en el átomo está interactuando con el núcleo, de manera que no sólo está localizado al quedarse dentro del átomo, sino que se encuentra localizado en un nivel particular de energía. Pero las entidades cuánticas pueden prepararse en estados donde sólo interactúan muy limitadamente con otras entidades cuánticas, y su no-localidad se muestra con toda su fuerza.

El físico irlandés John Bell visualizó varios experimentos para demostrar la no-localidad de los cuantos. Muchos equipos experimentales asumieron el reto de volver realidad estas ideas, y la prueba definitiva la llevó a cabo un grupo de principios de los ochenta en París.

En estos experimentos se induce a un átomo a emitir dos fotones simultáneamente en direcciones opuestas. El origen

colapso de colores

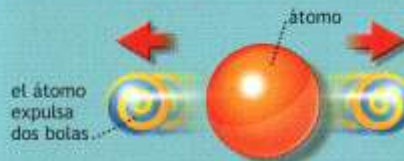
La no-localidad cuántica puede ser descrita metafóricamente con bolas de colores. Imagina que las bolas sólo pueden tener dos colores, amarillo o azul. Debido a la "ley de la conservación del color" un átomo sólo puede emitir dos bolas al mismo tiempo, y tiene que haber

una de cada color. Pero la física cuántica dice que el color de una bola no se decide hasta no verlo, que es una forma de "medirlo". Las dos bolas que salen en direcciones opuestas del átomo están en una superposición de estados, azul y amarillo mezclados para dar verde, hasta que se realice la "medida".

Ahora supongamos que ves el color de una de las bolas. La función de onda colapsa y se ve, por decir algo, azul. Pero

por la ley de la conservación del color, esto significa que la otra bola, que ya está lejos, debe colapsar hacia el estado amarillo exactamente

al mismo tiempo. Las bolas se comportan como una partícula aun cuando no estén en el mismo lugar.



se emiten los objetos cuánticos. Dos "bolas" de color indeterminado salen expulsadas del átomo.



cada bola está en una mezcla de amarillo y azul a menos que se le observe



en el momento en que se le observa la bola colapsa a uno de los dos posibles colores



El físico irlandés **John Bell** (1928-90) ideó un experimento para demostrar la naturaleza no local del mundo. Su trabajo mostró que en principio debía ser posible hacer medidas en dos objetos cuánticos (como los fotones) que hubieran estado en contacto alguna vez, y descubrir si se mantendrían "al pendiente" uno del otro una vez alejados. Estos experimentos los realizó finalmente Alain Aspect en París y demostraron que los sistemas cuánticos son no locales.

común de estos fotones implica que están correlacionados y que, de acuerdo con las ecuaciones de la física cuántica, permanecen "enredados" aún cuando se encuentren alejados, tal y como si constituyeran una sola partícula. Estos experimentos demostraron que al medir las propiedades de uno de los fotones a un lado del laboratorio se afectaba instantáneamente al otro fotón del otro lado del laboratorio. Es a través de estos experimentos que se pudo ver el funcionamiento de la no-localidad.

Para mediados de los noventa, los investigadores en Ginebra habían extendido estos experimentos y enviaron a los fotones a través de

una fibra óptica de 10 km (6.2 millas) de largo. Estos experimentos siguen mostrando la no-localidad. Los dos fotones se comportan como una sola partícula aún cuando están separados por 10 km. Estos son resultados genuinos, y no simplemente predicciones teóricas.

transmitiendo mensajes codificados

Pero aunque hay una influencia que conecta a los dos fotones instantáneamente, ninguna información útil puede transmitirse entre ellos más rápido que la velocidad de la luz. La detección del fotón A perturba al fotón B de una forma aleatoria. Las observaciones pueden mostrar que el fotón B ha sido perturbado indicando que algo le ha ocurrido al fotón A, pero no puede revelar con precisión lo que le ha ocurrido.

Pero si se nos envía por un medio convencional (carta, correo electrónico, o paloma mensajera) alguna



información (incompleta) sobre lo que se le ha hecho al fotón A, podemos juntarla con nuestra observación del fotón B para acabar con más información de la que habríamos obtenido por sólo una de las dos vías. Esto tiene implicaciones para la criptografía y como resultado está atrayendo un financiamiento considerable. En principio, un mensaje secreto se puede mandar en dos partes, ninguna de ellas con un significado propio, y una de ellas con enredamiento cuántico. El mensaje completo no viaja más rápido que la luz porque se requieren las dos mitades, pero el enredamiento cuántico no puede ser interceptado sin modificarlo.

Incluso es posible que el "mensaje" se encuentre en la misma partícula original, el fotón A, una forma de teletransportación, aunque no exactamente la que ocurre en *Star Trek*, llevando a varios físicos a bromear, "es teletransportación Jim, pero no la que conocemos" (James Tiberius Kirk, personaje de la serie televisiva *Star Trek*, nota del trad.) . La posibilidad fue planteada por Charles Bennett del IBM Research Center en Yorktown Heights, Nueva York, en un artículo publicado en 1993. Desde entonces los experimentos han confirmado que la idea funciona, al menos a la escala del laboratorio.

más de una copia

La idea depende del hecho de que si un objeto es indistinguible de otro en todos sus aspectos, entonces es ese mismo objeto. Cuando haces una fotocopia, tienes dos objetos y sabes cual es el original. Pero si el original se destruyó en el proceso, y la "copia" era idéntica en todos los aspectos al original, entonces no sería realmente una copia. Sería el original.

La teletransportación cuántica funciona de esta manera. Dos fotones enredados se preparan de la forma usual. Uno se



medio mensaje viaja por un medio convencional

mientras la otra mitad viaja más rápido que la luz

un mensaje en dos mitades
La no localidad cuántica implica que cuando un "objeto" es perturbado, otro responde instantáneamente sin importar lo lejos que esté. Para entender esta reacción, y su significado, tendrías que esperar a que más información te llegue por una vía convencional.

hecho científico

Hasta ahora los experimentos de teletransportación sólo han involucrado a protones y electrones. Para teletransportar un ser humano vivo la computadora necesitaría tener información sobre cada partícula en cada átomo del cuerpo humano. ¡Un error y podría ser un cuerpo muerto el que mandaría Scotty! (Montgomery, Scott Star Trek)

puntos clave

- La exactitud de la física cuántica ha sido probada con muchos decimales.
- Las computadoras cuánticas harán que una computadora portátil sea más poderosa que todas las computadoras que hay en la Tierra juntas.
- Ya se ha logrado "teletransportar" fotones individuales a través de 10 km (6.2 millas)



lleva a un lugar remoto (la Luna quizás).

Al otro se le permite interactuar con un electrón y toda la información sobre esta interacción (que destruye el estado original del fotón) se almacena. La interacción habrá cambiado el estado cuántico del fotón que está en una caja en la Luna, pero nadie lo sabe allá. Los resultados de la interacción entre el fotón y el electrón en la Tierra pueden mandarse a la Luna, en un cohete, con un rayo láser u otro método convencional que no implique viajar más rápido que la luz. Con esta información, un hábil físico en la Luna podría perturbar al fotón en la

caja de manera que la perturbación elimine los cambios debidos al enredamiento, y obtener así una copia exacta del primer fotón. De hecho, bajo cualquier examen concebible, se trata del primer fotón.

Debe enfatizarse que esto ya se ha realizado para un par de fotones separados por unos metros. A este nivel es poco útil para un fotón porque el proceso completo es mucho más lento que la velocidad de la luz, y sería más rápido mandar al electrón a través del cuarto de forma convencional.

Pero demuestra que en principio es posible transportar una copia exacta de un objeto físico de esta forma a través



El físico estadounidense **David Bohm** (1917-92) fue uno de los primeros en

apreciar la naturaleza esencialmente no local de la física cuántica. Sus ideas fueron ampliamente ignoradas de los años cincuenta a los ochenta, pero fueron rescatadas gracias a John Bell y Alain Aspect. Ellos son la vanguardia en lo que se refiere a las aplicaciones prácticas de los fenómenos cuánticos.

de cualquier distancia en el espacio, con la condición provisional de que el proceso debe realizarse a menor velocidad que la de la luz.

impuestos a la cuántica

Cuando estas ideas se vuelven prácticas seguro afectarán nuestras vidas en un futuro no muy lejano. Hace más de 150 años, poco después de haber inventado el motor eléctrico, un importante político de ese entonces le

“Creo que puedo decir con seguridad que nadie entiende la mecánica cuántica... no te pongas a repetir, si puedes evitarlo: ‘¿pero cómo puede ser así?’ porque ‘te irás por una coladera’ hacia un callejón sin salida del que nadie ha escapado. Nadie sabe cómo puede ser así.”

Richard Feynman, *The character of physical law*, BBC (1965)

ganancia generada por las computadoras cuánticas, la criptografía cuántica, la teletransportación cuántica, y otros aparatos que ni siquiera se han soñado. Los viajes casi instantáneos, las computadoras genuinamente inteligentes y “realidades virtuales” perfectas están probablemente a la vuelta de la esquina. Como dijo Arthur C. Clarke: “cualquier tecnología suficientemente avanzada es indistinguible de la magia”. Tendremos a la magia entre nuestros dedos dentro de un centenar de años.

**un futuro inimaginable**

El motor eléctrico empezó como un juguete. Ni siquiera Michael Faraday, su inventor, pudo predecir que llevaría a los trenes que viajan a 350 km/h (217 m/h).

nuevos horizontes

Antes de la invención de la máquina de vapor, el mundo humano había cambiado muy poco en mil años. Ahora, el poder de los cuantos está abriendo la puerta a una era de cambios sin precedentes y posibilidades inimaginables.



glosario

Å

Unidad equivalente a la diezmilésima parte de un milímetro, ó 0.000000001 metros.

átomo

El ladrillo más pequeño de un elemento químico. Todos los átomos de un elemento en particular son idénticos entre sí. Cada átomo está compuesto por un pequeño núcleo central, con carga positiva, rodeado por una nube de electrones con carga negativa. El número de electrones en la nube compensa la cantidad de carga negativa en el núcleo, de forma que el átomo es eléctricamente neutro.

bosón intermedio

Nombre común de la tres partículas (W^+ , W^- , y Z^0) que son portadoras de la interacción débil, jugando el papel equivalente al de los fotones en la interacción electromagnética.

campo

La influencia a distancia de una fuerza como la electromagnética a través del espacio.

catástrofe del ultravioleta

Predicción de la mecánica clásica que implicaba que un objeto caliente debía irradiar grandes cantidades de energía a longitudes de onda cortas, a cualquier temperatura. Esto supuso una catástrofe para la física clásica que mostró el camino hacia la física cuántica ya que no coincidía con la forma en la que irradia un cuerpo negro.

color

Una propiedad de los quarks equivalente a la carga en las partículas con carga eléctrica. También conocida como carga de color. No tiene nada que ver con el color en la vida cotidiana.

constante de Planck

Constante fundamental que relaciona la energía de un fotón a su frecuencia a través de la ecuación $E=hf$. La constante, h , aparece en muchas ecuaciones de la física cuántica.

cromodinámica cuántica (QCD)

Teoría que describe cómo interactúan los quarks intercambiando gluones. Nombre escogido en analogía a la electrodinámica cuántica (QED).

cuanto

La más pequeña unidad de algo que se pueda tener. Originalmente usada para nombrar al cuanto de luz, ahora llamado fotón.

cuanto de luz

Fotón.

cuerpo negro

Un objeto que es un perfecto absorbedor de radiación.

decaimiento radiactivo

El proceso en el que un núcleo o una partícula inestable se transforma en otra partícula, o núcleo, usualmente expulsando otra partícula como un electrón o una partícula alfa.

diagrama de Feynman

Una representación de la forma en la que las partículas

interactúan entre sí intercambiando cuantos portadores de fuerza, como los fotones.

difracción

La forma en la que las ondas se curvan alrededor de las esquinas, o se esparcen desde un agujero pequeño como en el experimento de la doble rendija.

discretización

En términos matemáticos un conjunto discreto es uno que no es continuo y que sólo tiene valores definidos y aislados. Los números naturales (1, 2, 3, ...) son discretos, a diferencia de los números reales (la unión de los naturales y todos los números fraccionarios, como π) que son continuos. Las cantidades cuánticas son discretas, aumentan por cuantos definidos. Esta discretización de las cantidades físicas constituyó el inicio de la revolución cuántica.

ecuación de Schrödinger

Ecuación de onda que describe el comportamiento de cualquier objeto cuántico, incluyendo a los electrones (y otras "partículas") en términos de la mecánica cuántica.

efecto fotoeléctrico

Expulsión de electrones de una superficie metálica cuando se la ilumina.

electrodinámica cuántica (QED)

La teoría cuántica que describe cómo interactúan las partículas cargadas con los fotones.

electrón

Una entidad fundamental, identificada como una pieza de materia que es componente del átomo por el físico británico J.J. Thomson en los años 1890. Ha sido concebida usualmente como una partícula pequeña, pero uno de los impresionantes descubrimientos de la física cuántica es que los electrones también de comportan como ondas.

elemento

Una sustancia que no puede romperse en sustancias más sencillas por métodos químicos.

experimento de la rendija de Young

Otro nombre para el experimento de la doble rendija, debido a Thomas Young, quien llevó a cabo el experimento con luz al final del siglo xviii.

experimento pensado

Un experimento imaginario llevado a cabo sólo "en la mente" diseñado para demostrar lógicamente algún punto de vista. La Paradoja del Gato de Schrödinger es un ejemplo clásico.

física clásica

Las leyes de la física que se aplican a los fenómenos que cambian suave y continuamente, en especial las Leyes de Newton y las Ecuaciones de Maxwell.

física cuántica

Las leyes de la física que se aplican a escalas muy pequeñas (típicamente de escala atómica hacia abajo) donde los cambios no ocurren suave y continuamente sino en pasos unitarios y separados (discretos), o cuantos.

fotón

Partícula de luz, es también el portador de la fuerza electromagnética.

fuerza nuclear fuerte

La fuerza que mantiene a los protones y neutrones juntos para formar el núcleo atómico.

función de onda

Ecuación que describe las propiedades de un objeto cuántico, como un electrón, en términos cuánticos.

gluón

Entidad cuántica que juega el papel equivalente en la cromodinámica cuántica al del fotón en la electrodinámica cuántica.

h

Letra usada para denotar la constante de Planck.

interacción

Cualquiera de las cuatro fuerzas de la naturaleza: gravedad, electromagnetismo, y las fuerzas nucleares débil y fuerte.

interacción débil

La "fuerza" responsable de algunos tipos de decaimiento radiactivo.

Interpretación de Copenhague

El conjunto de ideas que describen al mundo cuántico en términos de probabilidad, incertidumbre, y el "colapso de la función de onda".

K

Unidad de temperatura equivalente a los grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) pero que tiene el cero a la mínima temperatura alcanzable ($-273^{\circ}\text{C} = 0\text{ K}$).

láser

Rayo poderoso de luz de una sola frecuencia (viene de las siglas en inglés de Amplificación de luz por

emisión de radiación estimulada).

Leyes de Newton

Las leyes de la mecánica que funcionan en la vida diaria, describen desde la forma en la que chocan las bolas de billar hasta el funcionamiento de un cohete.

libertad asintótica

Término técnico para llamar a la forma en la que decrece la fuerza de pegamento (o de color) entre los quarks a medida que se juntan.

mecánica clásica

La descripción del funcionamiento del mundo cotidiano usando las Leyes de Newton y las Ecuaciones de Maxwell.

mecánica cuántica

La descripción del funcionamiento del mundo a escalas muy pequeñas en términos de las leyes de la física cuántica.

mecánica matricial

Una versión de la mecánica cuántica formulada a partir de objetos matemáticos llamados matrices.

mecánica ondulatoria

Una versión de la mecánica cuántica basada en la ecuación de onda descubierta por Erwin Schrödinger.

momento

El impulso que mantiene a un objeto en movimiento. Es proporcional a la velocidad y a la masa.

neutrón

Una de las partículas que forman el núcleo de un átomo. Con casi la misma masa que el protón, pero sin carga eléctrica.

nivel de energía

Un estado cuántico asociado a una energía particular. Usado

comúnmente para describir los estados cuánticos disponibles para un electrón dentro de un átomo. Una entidad como el electrón salta de un nivel a otro sin pasar por ningún estado intermedio, este es el famoso salto cuántico.

no localidad

La forma en la que un objeto cuántico, como un electrón, se "esparce" mientras no interactúa, de manera que no se puede decir que esté localizado en un punto.

núcleo

La materia central de un átomo, hecho de protones cargados positivamente y neutrones eléctricamente neutros.

núcleón

Nombre genérico para protones y neutrones que forman en conjunto al núcleo atómico.

órbita

En general es la trayectoria de algún objeto moviéndose bajo la influencia de otro. En la física cuántica se refiere usualmente a la trayectoria que sigue un electrón bajo la influencia del núcleo de un átomo.

partícula alpha

Objeto constituido por dos protones y dos neutrones unidos por la fuerza nuclear fuerte. Equivalente a un núcleo de helio (un átomo de helio sin sus electrones), pero es una unidad tan estable que se comporta como una partícula independiente.

partícula Z

Uno de los bosones intermedarios (ver también partículas W).

partículas virtuales

Las partículas intercambiadas por las partículas "reales" durante las interacciones. Un ejemplo son los fotones que portan la interacción electromagnética entre dos electrones. Únicamente existen mientras portan la fuerza.

partículas W

Dos de los bosones intermedarios (ver también partícula Z)

patrón de interferencia

Diseño producido por la interferencia, como el de franjas claras y oscuras en el experimento de la doble rendija.

punto cuántico

El equivalente a un interruptor en una computadora cuántica. A diferencia de los interruptores comunes, un punto cuántico puede existir en una superposición de estados.

salto cuántico

El menor cambio posible que puede efectuar un sistema. Este cambio implica la elección al azar entre un conjunto de cambios posibles.

quark

Partícula fundamental a un nivel inferior al del protón y el neutrón. Hay tres quarks en cada protón y otros tres en cada neutrón.

qubit

Cuanto equivalente a un bit (dígito binario) en computación. Un bit sólo puede tener el valor 0 ó 1, pero un qubit también puede existir en un estado mixto, parte 1 y parte 0.

radiación

Cualquier tipo de energía que viaje por el espacio. La luz es

un tipo de radiación electromagnética.

radiación beta

Nombre antiguo para llamar a un flujo de electrones rápidos.

radiación de cavidad

Nombre antiguo de la radiación de cuerpo negro.

radiación de cuerpo negro

Radiación emitida por un cuerpo negro caliente.

radio de Bohr

La distancia mínima a la cual puede "orbitar" un electrón alrededor de un núcleo en el modelo ideado por Niels Bohr. Aún cuando el modelo el una descripción imperfecta del átomo, este dato (5.29×10^{-11} m) sigue siendo una buena estimación del tamaño de un átomo.

rayos gamma

Radiación electromagnética con energía muy alta. Corresponde a longitudes de onda muy cortas, de 10^{-10} m (1 Å) a 10^{-14} m.

rayos x

Radiación electromagnética con longitudes de onda en el intervalo de 12×10^{-8} m a 12×10^{-12} m, ligeramente mayores a las de los rayos gamma.

salto

Ver salto cuántico.

superposición de estados

Estado de un sistema cuántico donde su función de onda está compuesta por una mezcla de ondas correspondientes a diferentes posibilidades físicas.

vida media

El tiempo que le toma decaer a la mitad de los átomos (estrictamente a los núcleos) en una muestra de material radiactivo.

índice

a

absorción 13
 acelerador lineal de Stanford 47-8
 aceleradores 47
 ácido desoxirribonucleico (ADN) 43-4
 ADN, ver ácido desoxirribonucleico
 agua líquida 43
 átomos 16-21, 66
 átomos de carbono 20
 atrapando electrones 26

b

Bell, John 60, 62
 "bombeo" de electrones
 Bennett, Charles 63
 Bethe, Hans 36
 Bohm, David 64
 Bohr, Niels 18-21, 30-1, 66
 Born, Max 30, 31
 bosones 50-1, 66
 bosones intermedarios 51, 66, 68

C

campos de fuerza 9-10, 19, 67
 campos magnéticos 9-10, 19, 67
 capas 46
 cargas de color 48-50, 66
 catástrofe del ultravioleta 15, 68
 células fotoeléctricas 17
 caos 51, 60
 cirugía 46
 cirugía del ojo 46
 Clarke, Arthur C. 65
 códigos de barras 19
 "colapso" de la función de onda 30, 34, 61
 colisión de automóviles 8
 colisión frontal 8
 colisiones 7-8
 colisiones con impulso 8
 computadoras 52-9
 computadoras cuánticas 52-9

constante de Planck 15-17, 33-4, 67
 enviando mensajes codificados 57-9, 63
 crecimiento exponencial 56-7
 criptografía 57-9, 63
 cromodinámica 50, 67
 cromodinámica cuántica 50, 67
 cuantos 15-16
 cuerpo negro 66
 curvas 14-15, 45
 radiación 12-15, 66
 curvas del cuerpo negro 14-15, 45

d

De Broglie, Louis 26-7
 decaimiento 40-2, 68, 50-1
 decaimiento aleatorio 40-1, 42
 decaimiento radiactivo 40-2, 50, 68
 detectores 48, 51
 Deutsch, David 57
 diagramas de Feynman 36-8, 66
 difracción 11, 25, 28-9, 66
 dinamos 9
 Dirac, Paul 36, 37
 doble hélice 44
 doble rendija, experimento 11, 24, 27-9, 68
 dualidad onda-partícula 26-9

e

ecuación de onda 26, 30-3
 ecuaciones
 De Broglie 26
 Maxwell 10-12
 Schrödinger 30-3
 de onda 26, 30-3
 efecto fotoeléctrico 17, 67
 efecto túnel 39-41
 Einstein, Albert 25
 láser 45
 luz 16-17
 probabilidad 29, 31
 eléctrica
 barrera 39-40
 carga 48-50

corriente 9-10, 17
 eléctrico
 campo 9-10, 67
 motor 9
 electrodinámica 34-8, 68
 electrodinámica cuántica 34-8, 68
 electromagnetismo 10-12
 espectro 12
 fuerza 67
 interacciones 51
 ondas 10-12
 radiación de cuerpo negro 14-15
 electrones 66
 atrapados 26
 enlaces 43
 experimento de la doble rendija 27-9
 interacciones 36-8
 láser 46
 masa 27
 modelo de Bohr 18-21
 momento magnético 36-8
 niveles de energía 16-21
 no-localidad 60-5
 probabilidad 25
 electrodinámica cuántica 36-8
 elementos 19-66
 energía
 capas 21
 intercambio 21
 líneas espectrales 19
 masa 24
 niveles 16-21, 66
 Planck 15-16
 enlaces 20, 41, 43-4
 espectro 19
 enredamiento 62-4
 entidades 33, 63-5
 entidades, objetos cuánticos 33, 34-8
 espectro de sodio 19
 espionaje 59
 estados excitados 44-6
 estrellas 14, 39-40
 experimento de Aspect 61
 experimentos pensados 30-3, 68

f

Faraday, Michael 8-9, 12, 65
 Fermi, Enrico 36
 Feynman, Richard
 acelerador lineal de Stanford 48
 diagramas 36-8, 66
 experimento de la doble rendija 24
 electrodinámica cuántica 24
 impuestos a la materia cuántica 65
 física clásica 6-12, 66
 fisión nuclear 40-2
 fotones paralelos 46
 fotones 67
 experimento de la doble rendija 29
 Einstein, Albert 17
 enredamiento 62-4
 interacciones de intercambio 36
 láser 46
 no-localidad 62-4
 probabilidad 25
 reproducción 64-5
 Fresnel, Agustín 12
 fuerza de "pegamento" 48-50, 67
 fuerza de color 48-50, 66
 fuerza nuclear débil 48-51, 67, 68
 fuerza nuclear fuerte 40, 48-50, 51, 67
 fuerzas
 campos 9, 10, 67
 color 48-50, 66
 electromagnética 67
 gravedad 51, 67
 líneas de 9-10
 nuclear 40, 48-51, 67, 68
 nuclear débil 48-51, 67, 68
 nuclear fuerte 40, 48, 50, 51, 6
 pegamento 48-50, 51
 restrictiva 49
 función de onda 68
 colapso 30, 34, 61
 fusión 39-40

g

gato de Schrödinger 30-3
 Gell-Mann, Murray 47
 generadores 9

genes 44
 glosario 66-8
 gluones 48-50, 67
 gravedad 51, 67

h

Heisenberg, Werner 32-4
 hidrógeno
 estructura atómica 20
 hielo 43
 Higgs, Peter 50
 huellas digitales 19

ijk

imanes 9
 impuestos a la materia cuántica 65
 interferencia 11, 24, 29, 67
 interferencia constructiva 11
 interferencia destructiva 11
 Interpretación de Copenhague 30-1, 32-3, 66

l

láser 44-6, 67
 "ley de la conservación del color" 61
 leyes del movimiento 6-8
 libertad asintótica 49, 67
 límites de velocidad de las computadoras 55-7
 líneas de fuerza 9-10
 líneas espectrales 19
 litio 19, 20
 longitud de onda
 luz visible 12
 luz
 emisión 46
 experimento de la doble rendija 11
 láser 46
 longitud de onda 12, 13-15, 26
 ondas 11, 12, 26-9
 partículas 16-17, 26-9
 refracción 12
 velocidad 12

m

masa 24-27
 máximo de potencia 14-15
 Maxwell, James Clerk 6, 9-11

mecánica clásica 66
 mecánica cuántica 68
 mecánica matricial 67
 mecánica ondulatoria 68
 metano 20
 microondas 12
 microprocesadores 44
 Millikan, Robert 17
 miniaturización 44-5
 moléculas 20, 43
 moléculas de agua 43
 momento 26, 33-4
 momento magnético 36-8
 Moore, Gordon 52
 movimiento, Leyes de Newton 6-8

n

neutrones 20-1, 47-9, 67
 Newton, Isaac 6-8, 67
 no localidad 60-5, 67
 nuclear
 decaimiento 50-1
 fuerzas 40, 48-51, 67, 68
 fusión 39-40
 reactores 41
 núcleo 47-51, 67, 41-2
 nucleones 47-51, 67
 números primos 57-8

op

ondas alpha 40
 ondas de radio 12
 ondas
 efecto túnel 40
 electromagnéticas 10-12
 función 26
 luz 11, 12, 26-9
 partículas 26-9
 probabilidad 25
 órbitas 18-21, 67
 paneles solares 17
 partículas alpha 66
 partículas cargadas 36
 partículas virtuales 68
 partículas W 51, 67, 68
 partículas Z 51, 67, 68
 partículas
 alpha 66
 de luz 16-17, 26-9
 interacciones de intercambio 36

ondas 26-9
 probabilidad 24-5
 virtuales 68
 W 68
 Z 51, 67, 68
 partones 48
 Pauling, Linus 31
 picos y valles 11
 Planck, Max 15, 17
 posición/momento 33-4
 potencia máxima 14-15
 Primera Ley de Newton 7
 principio de incertidumbre 32-4, 39
 prismas 12
 prismas de vidrio 12
 probabilidad 24-5
 Born 31
 dualidad onda partícula 27-9
 efecto túnel 40
 experimento de Aspect 61
 Interpretación de Copenhague 30-5
 protones 20-1, 47, 48-9
 puntos 55-9, 68
 puntos cuánticos 55-9, 68

q

QCD ver cromodinámica cuántica
 QED ver electrodinámica cuántica
 quarks 48-50, 68
 qubits 52, 56, 57

r

radiación 12-15, 68
 radiación beta 51, 66
 radiación de cavidad 12, 66
 rayos
 rayos beta 50-1
 rayos gamma 12, 67
 rayos infrarrojos 12, 14-15
 rayos ultravioletas 12
 rayos x 12, 68
 reacción en cadena 41
 reacciones 41
 reacciones químicas 35
 reactores nucleares 41
 recubrimiento 43
 refracción 12
 reproducción de fotones 64-5
 ruptura de códigos 57-9
 Rutherford, Ernest 18

S

Schrödinger, Erwin 30-3, 68
 Schwinger, Julian 36
 Segunda Ley de Newton 7
 Shor, Peter 57
 SLAC ver Acelerador Lineal de Stanford
 sol 14, 39, 40
 superposición de estados 30-3, 54-9, 68

t

teletransportación 60-5
 Tercera Ley de Newton 8
 Tomonaga, Sin-itiro 36

V

variables conjugadas 33
 varilla de rubí 46
 velocidad 33-4
 velocidad de la luz 12
 vida media 41-2, 67

xy

Young, Thomas 11, 12, 28-9, 68

Z

Zweig, George 47