

# La física cuántica en la vida diaria

por

**Juan Gonzalo Muga Francisco, Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea**

## Contenidos

1. Introducción
2. Un poco de historia
  - 2.1. Los comienzos
  - 2.2. Evolución y descubrimientos más destacados
3. El transistor
4. El láser
  - 4.1. Orígenes
  - 4.2. Aplicaciones
5. Otras aplicaciones de la mecánica cuántica
6. El futuro: ¿ordenadores cuánticos?

## 1. Introducción

La mecánica cuántica ha sido la teoría física más influyente del siglo XX, y se asoma al siglo XXI con enorme pujanza, no sólo porque gracias a ella entendemos mejor los constituyentes básicos y las propiedades de la materia o de la radiación, sino porque ha permitido el desarrollo de la tecnología que nos rodea. Curiosamente,

está muy extendida la creencia de que las manifestaciones de la naturaleza cuántica de la materia en el mundo macroscópico, y por tanto en la vida diaria, no son muy importantes. He oído abundantes comentarios en este sentido a personas con educación científica, ingenieros, químicos o físicos. El propósito de este artículo es poner de manifiesto lo contrario.

Repasemos brevemente una jornada ordinaria de un personaje urbano imaginario. Probablemente se despertará con un **reloj digital**, calentará el desayuno con un **horno de microondas**, e irá al trabajo en un coche controlado en parte por una serie de **chips** escuchando la **radio**. Ya en el trabajo se conecta a un **ordenador**. En prácticamente cualquier gestión que deba realizar, bancaria o administrativa, le atenderán detrás de la pantalla de otro ordenador conectado seguramente a una **impresora** y a una **red de información** local o externa, y a lo largo del día hará alguna **llamada telefónica**. De vuelta al hogar pasa por un supermercado donde los precios se registran mediante un **lector láser de los códigos de barras**, y en casa verá la **televisión**, que funciona mediante transistores, y cuya señal se recibirá en breve por cable de fibra óptica gracias a láseres de semiconductores, o escuchará música grabada en un **disco compacto**. El ordenador también ha entrado en nuestras casas como pasatiempo, como fuente de información o ayuda para estudiantes.

Muchos de estos objetos deben su invención (el láser, el transistor), o su estado de desarrollo actual (la televisión, la radio, las comunicaciones telefónicas), a los conocimientos básicos sobre la materia y la radiación que proporciona la mecánica cuántica. En otros casos la mecánica cuántica explica su mecanismo básico de funcionamiento (el horno de microondas). Sin duda el transistor y el láser son las grandes estrellas de esta historia. Su impacto social y económico es enorme. A partir de los años noventa se fabrican al año miles de millones de láseres de semiconductores, y las ventas de todo tipo de aparatos con circuitos electrónicos suponen billones de dólares al año. A pesar de todo esto la mecánica cuántica es una ciencia desconocida para la gran mayoría. Podemos definirla como la Ciencia de lo increíblemente pequeño, de cosas como electrones, protones y neutrones, que son las partículas que forman los átomos (la teoría cuántica abarca también a los quarks, las partículas que constituyen los protones y neutrones, a los fotones, y a sus interacciones con la materia). Los átomos a su vez forman las moléculas y casi toda la materia ordinaria. Un átomo es realmente muy pequeño, en un milímetro cabrían diez millones de átomos puestos en fila, y de hecho el átomo es enorme si lo comparamos con su núcleo, que es 100.000 veces más pequeño que el átomo. Las

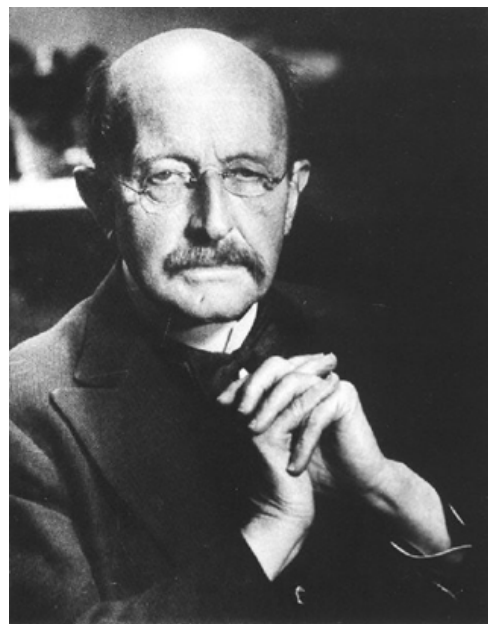
dimensiones de los objetos del mundo, cuántico son tan pequeñas que su comportamiento es a menudo radicalmente distinto del que estamos acostumbrados a ver en los objetos de la escala humana. Por esto la mecánica cuántica es a veces tan misteriosa y tan interesante.

## 2. Un poco de Historia

### 2.1. Los comienzos

Todo comenzó hace justamente cien años, en Diciembre del año 1900, cuando Max Planck presentó ante la Sociedad Alemana de Física su teoría de la radiación del cuerpo negro. A finales del siglo XIX se creía que con la termodinámica y las teorías sobre el movimiento y el electromagnetismo, que constituyen lo que hoy entendemos como “física clásica”, podía explicarse prácticamente cualquier cosa. Es cierto que quedaban algunos flecos sin aclarar, pero todos confiaban en que terminarían resolviéndose con las leyes conocidas. Uno de estos cabos sueltos consistía en explicar la distribución de la radiación emitida por un cuerpo

caliente o incandescente, que en equilibrio térmico es una distribución universal independiente de la naturaleza del material, y caracterizada por la temperatura del cuerpo (cuerpo negro). Debido a esta dependencia al calentar una barra de hierro, la espiral de una cocina eléctrica, por ejemplo, primero vemos un color rojo oscuro, luego un rojo más claro... si siguiéramos calentando podríamos pasar al amarillo y al azul. Estos colores corresponden a las frecuencias en las que se emite con más intensidad en cada temperatura. El problema lo había planteado otro físico alemán, Kirchoff un profesor de Planck, cuarenta años antes, pero desde entonces no se había progresado mucho con las teorías clásicas.



*Max Planck*

Planck encontró la fórmula que describía la distribución, y una explicación teórica de la misma. Su teoría era revolucionaria, aunque sería más exacto decir

que fue el comienzo de una revolución, porque en aquel momento nadie, ni siquiera Planck, se daba cuenta de la verdadera trascendencia de aquel descubrimiento. Tu vieron que pasar casi treinta años hasta que se desarrolló el bloque de la teoría cuántica. Las ideas cuánticas, como la que planteó Planck en su ley de radiación eran algo completamente contrario a lo que se creía hasta entonces y encontraron cierta resistencia, incluso él mismo se resistía a aceptar su propuesta. La hipótesis central para obtener la distribución correcta era que la energía no se emite ni se absorbe en cantidades arbitrarias, sino solamente en paquetes o cuantos, es algo así como el dinero y las monedas. Cuando compramos o vendemos algo intercambiamos un número de monedas de peseta, de duro, de cien, el dinero está empaquetado en estas unidades, y no podemos comprar algo que valga, por ejemplo, 10,287 pesetas. Con la energía emitida o absorbida pasa algo parecido. En este caso la energía de cada paquete depende de la frecuencia, a mayor frecuencia más energía. La energía de un cuanto es el producto de la frecuencia por la constante de Planck,

$$\text{energía} = h \cdot \text{frecuencia}$$

$$E = h\nu.$$

$h$  es una constante importantísima de la naturaleza, que aparece una y otra vez en las ecuaciones de la teoría cuántica. Si el valor de  $h$  fuera despreciablemente pequeño, podría ocurrir una transferencia prácticamente continua de energía como se esperaba en la física clásica. De hecho  $h$  es muy pequeña, y muchos fenómenos físicos pueden explicarse suponiendo que es cero, es decir con las leyes de la física clásica. Pero en realidad no es cero, como se pone de manifiesto en otra gran cantidad de fenómenos, algunos de ellos de enorme importancia en la sociedad actual.

La paradoja es que Planck comenzó una revolución sin querer, no tenía espíritu de revolucionario. Cuando introdujo la constante  $h$  lo hizo, según sus propias palabras, “en una acto de desesperación”, y durante años estuvo intentando obtener la distribución de radiación prescindiendo de esa hipótesis. Además, Planck creía que la cuantificación o empaquetamiento afectaba solamente al proceso de absorción o emisión, pero no a la energía una vez absorbida o emitida. El proceso sería análogo a un grifo de agua que gotea: el agua sale en gotas, en paquetitos de agua, pero antes de salir o al llegar a la fregadera se junta con las demás y cada gota desaparece.

En realidad fueron otras personas quienes se tomaron más en serio los cuantos de Planck. Einstein fue más allá que Planck al afirmar que la luz, no solamente se

absorbía o emitía en cuantos, sino que existía en forma de cuantos, los fotones. Con esta hipótesis pudo explicar en 1905, con 26 años y trabajando en una oficina de patentes en Suiza, el efecto fotoeléctrico, que es lo que ocurre en las células fotoeléctricas que todos conocemos. Cuando se iluminan liberan electrones.



*Albert Einstein*

Tratar a la luz como cuantos, como partículas, era una especie de herejía, puesto que durante todo el siglo XIX se había acumulado evidencia experimental a favor de la interpretación ondulatoria de la luz. Pero la explicación del efecto fotoeléctrico y otros efectos que se estudiaron por aquellos años daban la razón a Einstein. Por ejemplo, en 1913 Bohr pudo explicar las frecuen-

cias discretas de luz que absorbe o emite el átomo de Hidrógeno (su espectro) suponiendo que las energías posibles del átomo eran discretas, e igualando las energías de las frecuencias observadas (según la fórmula de Planck), con las diferencias de energía de los niveles atómicos. Este es el comienzo de la relación, a partir de entonces indisoluble, entre la espectroscopía y la estructura cuántica de la materia. Sin embargo la “explicación” de Bohr era un tanto rudimentaria, y de nuevo incompatible con las leyes clásicas, todo lo cual producía un gran desasosiego en la comunidad científica. Esto no impidió que Planck, Einstein, y el propio Bohr recibieran el premio Nobel en 1918, 1921, y 1922. Aunque nadie entendía muy bien todo aquello, se reconocía que algo extraño pero importante estaba ocurriendo. Para terminar de complicar las cosas, de Broglie presenta su tesis doctoral en La Sorbona, en 1924. En ella expone que, si las ondas de la luz pueden comportarse como partículas (los fotones), también las partículas materiales deberían asociarse a una onda, cuya frecuencia dependería de la constante de Planck y sería inversamente proporcional al momento de la partícula. Las longitudes de onda asociadas a electrones de velocidad moderada deberían hallarse, según su fórmula, en la región de los rayos X. A los miembros del tribunal de la tesis esta hipótesis les parecía una extrapolación totalmente injustificada, y su primera reacción fue suspenderle, pero Einstein, que ya era famoso e influyente, se mostró entusiasmado con el trabajo de de Broglie, y pudo convencerles finalmente de que le aprobaran. Aquella idea descabellada se comprobó experimentalmente muy poco después. Davisson y Germer, de los laboratorios Bell, bombardearon níquel cristalizado con elec-

trones. La película colocada detrás del níquel mostraba patrones de interferencia, bandas oscuras y claras como las que aparecen cuando se lanzan rayos X en vez de electrones. Estos mismos patrones de interferencia habían sido utilizados por Young cien años antes para probar que la luz tenía naturaleza ondulatoria. No sólo eso, el trabajo de de Broglie, que recibió el premio Nobel en 1929, fue la semilla para que **Erwin Schrödinger** encontrara una ecuación de ondas que describe no sólo el átomo de Hidrógeno, que es el que Bohr pudo abordar con su teoría preliminar, sino todos los átomos, todas las moléculas, y los sólidos. Esta es una de las ecuaciones más importantes de la física, y por supuesto en ella aparece la constante  $h$ . En el modelo de Schrödinger los electrones no giraban en torno al núcleo en órbitas discretas definidas, como en la teoría de Bohr, sino que venían descritos por una onda deslocalizada. Los niveles permitidos del átomo de Bohr correspondían simplemente a las energías en las que podía formarse una onda estacionaria. A pesar de que la ecuación de Schrödinger predice correctamente las longitudes de onda observadas espectroscópicamente, la naturaleza exacta de esta onda fue, y sigue siendo, muy discutida. En un primer momento Schrödinger era partidario de identificar a la onda con el electrón, pero pronto se comprendió que esta interpretación no era posible. Hoy en día entendemos que los dos aspectos, el corpuscular y el ondulatorio, son complementarios. Sobre este punto insistió mucho Bohr, que fue un personaje clave durante los años en los que se gestó la teoría cuántica. Cuando detectamos fotones, o electrones o átomos, detectamos partículas localizadas, lo que ocurre es que las ecuaciones que predicen estas detecciones son ecuaciones de ondas que nos dan la probabilidad de encontrar estas partículas en determinadas posiciones o estados. Así, la distribución de estas detecciones en una pantalla obedece a patrones de interferencia típicamente ondulatorios. (La interpretación probabilista de las ondas de Schrödinger se debe a **Max Born**.) En general no podemos imaginar a la partícula cuántica como una partícula en el sentido ordinario de la palabra porque su aspecto ondulatorio hace que se comporte de manera realmente extraña. Por ejemplo, es capaz de atravesar una pared sin tener, según los criterios clásicos, energía suficiente para hacerlo, esto es lo que se conoce como efecto túnel; o puede moverse hacia atrás aunque nosotros la hayamos empujado hacia adelante y no encuentre ningún obstáculo en su camino (efecto reflujó). También, de alguna forma, “se entera” de cosas que pasan en zonas alejadas, zonas a las que una partícula ordinaria no podría tener acceso, es como si se empeñara en estar deslocalizada, como una onda, hasta el mismo momento de la detección, en el que siempre aparece localizada. Otro aspecto importante es que no podemos preparar a las partículas cuánticas en estados que nos parecen perfectamente naturales en la escala de los objetos ordinarios. Por

ejemplo, no podemos preparar una partícula cuántica precisando al mismo tiempo su posición y su velocidad (**principio de incertidumbre o de indeterminación de Heisenberg**).

Estas y otras paradojas llevaron a Bohr y a muchos de los fundadores (en particular a Born y Heisenberg), aunque no a todos, a renunciar a una imagen concreta de lo que es o hace la partícula antes de la medida. Según el grupo liderado por Bohr, que se conoce como **escuela de Copenhague**, la **teoría cuántica sólo nos ayuda a predecir los resultados de las medidas pero nada más, no nos da una imagen de cómo es el mundo “en realidad” cuando nadie mide.**

Para algunos, esta filosofía positivista era, y es, suficiente; pero para otros, entre los cuales estaban nada menos que Einstein, de Broglie, y Schrödinger, la renuncia de la escuela de Copenhague a una imagen concreta y realista del mundo cuántico antes de la medida es prematura. El debate entre Einstein y Bohr continúa, aunque hasta el momento nadie ha logrado proporcionar una imagen plenamente satisfactoria de las partículas cuánticas anterior a la medida, y la mayoría de los físicos adopta un pragmatismo cercano a las tesis de Bohr.

## **2.2. Evolución y descubrimientos más destacados.**

El bloque conceptual y matemático de la teoría se construyó en los años veinte. Poco después de que Schrödinger presentara su ecuación no relativista, Paul Dirac produce en 1928 una ecuación para el electrón en la que sintetiza los principios cuánticos y la relatividad especial de Einstein. Basándose en esta ecuación predice en 1931 la existencia de la antipartícula del electrón, el **positrón**. Desde finales de los setenta los positrones se utilizan en medicina en la técnica conocida como **tomografía de emisión de positrones**, que recoge la radiación emitida cuando los positrones de materiales radioactivos administrados al paciente se combinan con electrones de células cercanas. Es particularmente útil para detectar cáncer, enfermedades coronarias y cerebrales.

La mecánica cuántica comenzó a aplicarse muy pronto con éxito a átomos, moléculas y sólidos, un proceso que continúa hoy en día con moléculas o sólidos cada vez más complejos. La mecánica cuántica se usa por ejemplo para diseñar fármacos, para diseñar nuevos materiales y predecir sus propiedades.

En los cuarenta la segunda guerra mundial frena muchos estudios pero acelera otros, se produce la primera bomba atómica y el primer reactor nuclear. Poco después de finalizar la guerra **Feynman** y otros investigadores crearon la electrodinámica cuántica (1948), que describe la emisión y absorción de fotones por los electrones. También en esta época se crea el primer **transistor** (1947), que puede considerarse como el “invento del siglo”, y se descubre la **resonancia magnética nuclear** (1946), sobre los que hablaremos más adelante. En los cincuenta se descubren al **máser** y el **láser**; en los sesenta se obtiene evidencia experimental de que los protones y neutrones no son partículas elementales sino que están formados por **quarks**, esto fue el origen de la teoría actual para describir la física nuclear y de partículas, el **modelo standard**. En 1981 se consiguen las primeras imágenes de átomos individuales mediante la **microscopía basada en el efecto túnel**. Desde mediados de los ochenta el desarrollo de los ordenadores, los láseres y de la electrónica permite estudiar a los átomos a temperaturas ultra-frías, y realizar experimentos que confirman las extrañas predicciones sobre el comportamiento de las partículas microscópicas que se habían formulado muchos años antes.

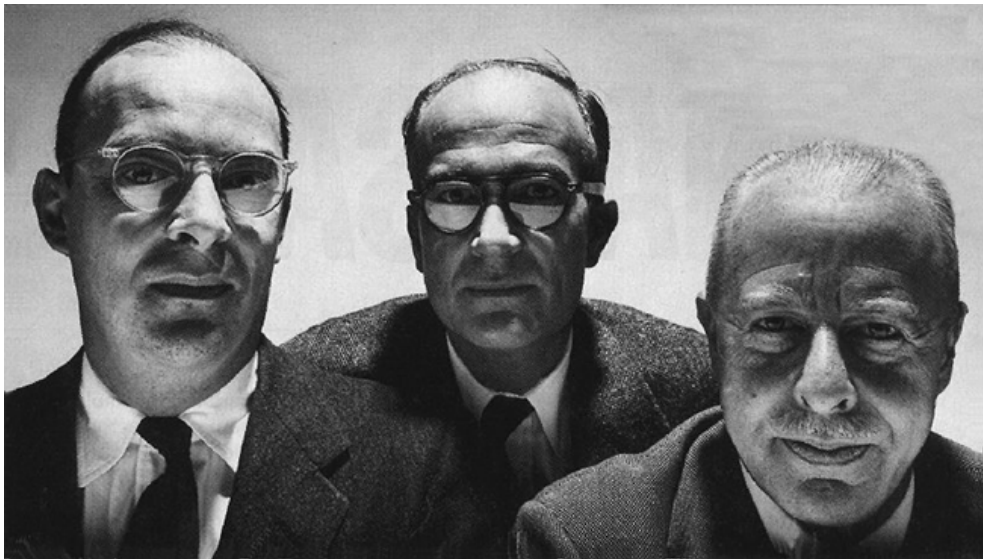
La teoría cuántica se ha comprobado con mediciones muy precisas. Uno de los experimentos más precisos, es decir con mayor número de cifras iguales entre el valor medido y la predicción teórica corresponde precisamente a la electrodinámica cuántica. Se trata de una medida de cierta propiedad magnética del electrón. La precisión conseguida equivaldría a medir la distancia entre Bilbao y Nueva York con un error del orden de la anchura de un pelo humano. La teoría cuántica es sin duda la teoría más exitosa de la historia de la ciencia en cuanto a sus aplicaciones, pero después de cien años de evolución es muy posible que nos siga deparando sorpresas. Aún no entendemos satisfactoriamente, por ejemplo, cuestiones tan básicas como el tiempo en el que ocurren los sucesos.

### **3. El transistor**

Es un dispositivo hecho de material semiconductor que puede regular o amplificar una corriente eléctrica. Sustituye a la válvula o tubo de vacío, que necesitaba mucha más energía y espacio para funcionar, y además era mucho más frágil. Fue desarrollado por **Bardeen, Shockley y Brattain**, del Departamento de Física de Estado Sólido de los laboratorios Bell en 1947. Los transistores, integrados desde 1958 en chips, controlan todo tipo de aparatos y procesos: motores de coche, teléfonos móviles, computadoras, televisiones, instrumentos musicales, hornos de microondas, relojes, impresoras, tarjetas de identificación, satélites, misiles, cadenas



automáticas de fabricación, redes de gas... Podríamos considerar al transistor como la neurona electrónica de nuestra sociedad; es el elemento que permite en última instancia la actual revolución informática y de comunicaciones. Se estima que se fabrican en torno a 500 millones de transistores cada segundo. La enormidad de esta cifra puede entenderse si tenemos en cuenta que el corazón de un ordenador, su procesador, es un chip que integra unos treinta millones de transistores. Es evidente que nuestra vida diaria sería muy diferente sin el transistor. Su influjo es apabullante: abarca nuestra forma de trabajar, de disfrutar del ocio, las tareas domésticas, las transacciones bancarias y comerciales, el transporte, o las telecomunicaciones. Y



*Bardeen, Shockley, y Brattain.*

todo ello no hubiera sido posible sin el desarrollo de la física del estado sólido, una rama de la mecánica cuántica cuyo primer objetivo fue entender la conducción electrónica en los metales, debido a las limitaciones del electromagnetismo clásico para explicarla. El primer estudiante de doctorado de Heisenberg, el suizo Felix Bloch, supuso que los electrones que transportan la corriente estaban sometidos a un potencial periódico producido por el resto de electrones y núcleos de la red, y resolvió la correspondiente ecuación de Schrödinger. Estas soluciones llevaron a la *teoría de bandas*, sobre la que descansa la física de estado sólido, y según la cual existen zonas de energía (bandas) permitidas y otras prohibidas para los electrones de conducción. Pudo comprenderse entonces, entre 1928 y 1933, la diferencia entre conductores, aislantes, y semiconductores. Wigner y Seitz realizaron los primeros cálculos realistas de una estructura de bandas para el sodio. Los avances

posteriores, hasta llegar al transistor tuvieron lugar fundamentalmente en Estados Unidos, donde se combinaron poderosos intereses económicos de diversos sectores industriales (eléctrico, de comunicaciones, metalúrgico o fotográfico), con el trabajo de importantes físicos cuánticos, algunos americanos (Slater, Condon, van Vleck, Rabi), otros venidos de Europa (Wigner, Bloch, Bethe), que proponían teorías y cálculos cada vez más precisos de propiedades de sólidos interesantes para esta industria. Los tres inventores del transistor pueden relacionarse directamente con eminentes teóricos cuánticos: Bardeen estudió mecánica cuántica con van Vleck en Wisconsin y con Wigner en Princeton; Shockley fue estudiante de doctorado en el grupo de Slater en Massachusetts, que en los años treinta se dedicó a aplicar la mecánica cuántica para entender las propiedades eléctricas magnéticas y térmicas de metales y otros materiales. Por último, Brattain asistió a un curso que Sommerfeld impartió en Michigan en 1931 sobre teoría electrónica de los metales.

## **4. El Láser**

### **4.1. Orígenes**

En los años cuarenta y cincuenta Charles Townes y Arthur Schawlow estaban interesados, de forma independiente, en la espectroscopía de microondas, ya que la interacción entre la radiación de microondas y las moléculas permite determinar su estructura. Ninguno de ellos había planeado inventar el láser; lo que querían era desarrollar un dispositivo que generara ondas de longitud de onda corta para estudiar estructuras moleculares, pero las técnicas disponibles no se lo permitían. A Townes, que había estado ligado durante mucho tiempo a la investigación relacionada con el radar, se le ocurrió usar moléculas, en vez de un aparato, para generar las frecuencias deseadas. Se dio cuenta de que se podía usar para este fin la **emisión estimulada** que Einstein había predicho en 1917. Se trata de uno de los fenómenos básicos de la interacción cuántica entre la radiación y la materia (junto con la emisión espontánea y la absorción), por la cual un fotón en resonancia con un salto entre niveles cuánticos de algún sistema material (un átomo, una molécula, un semiconductor...) estimula su desexcitación (paso a un nivel inferior de energía) y la emisión de un fotón gemelo, con la misma frecuencia, fase y dirección que el incidente. Townes fue capaz de usar este proceso para amplificar la emisión de microondas de las moléculas de amoníaco y produjo el primer máser (acrónimo inglés de microwave amplification by stimulated emission of radiation).

La cuestión era si se podría utilizar la emisión estimulada para longitudes de onda mucho menores, en particular en el espectro visible. Schawlow, cuñado de Townes, pensó que colocando un par de espejos, uno en cada extremo de una región con átomos o moléculas excitadas la luz rebotaría de un lado a otro produciendo un haz de frecuencia pura y muy direccional, ya que los fotones en otras direcciones se escaparían de la cavidad. Haciendo uno de los dos espejos semitransparente se lograba además la salida del haz. En 1958 Townes y Schawlow publicaron un artículo que establecía los principios del láser (light amplification of stimulated emission radiation). Ya era sólo cuestión de tiempo encontrar los materiales apropiados y el mecanismo de bombeo adecuado para excitar a los átomos o moléculas dejándolos preparados para la emisión estimulada. Tras la publicación, multitud de laboratorios en Universidades y empresas se pusieron a trabajar. El primer láser lo construyó el físico americano Theodore Maiman, de la compañía Hughes Aircraft, con rubí sintético. Hoy en día existe una variedad enorme de láseres, basados en distintos medios materiales y mecanismos de bombeo. Pueden funcionar de forma continua o pulsada; su potencia y frecuencias son también muy variadas, desde el infrarrojo hasta el ultravioleta cercano.

## 4.2. Aplicaciones

*Salud y tecnología médica.* Los láseres se han convertido en herramientas indispensables en numerosos procedimientos médicos terapéuticos y diagnósticos. Un haz láser puede enfocarse con precisión en lesiones oculares, o sobre la piel, y puede dirigirse hacia cualquier órgano de forma mínimamente invasiva con fibra óptica. El uso de los láseres en medicina se ha desarrollado rápidamente por dos razones: primero, debido a la existencia de una gama muy amplia de láseres que permiten ajustar la longitud de onda o los pulsos de la radiación a las necesidades de cada problema clínico; en segundo lugar, se ha logrado entender mejor la interacción entre el láser y los tejidos.

Los láseres encuentran también muchas aplicaciones en oftalmología, por ejemplo para corregir defectos en la visión debidos a pequeñas anomalías en la curvatura de la córnea, o en operaciones de cataratas. Los láseres se usan además como bisturí. Sus parámetros pueden ajustarse para cortar y proporcionar suficiente calor para causar la coagulación, con lo que se consigue minimizar el sangrado. Se usan también con éxito en ginecología. La precisión del láser permite destruir sólo el tejido dañado y preservar el resto.

*Tecnología de la información y comunicaciones.* Las redes de telecomunicaciones modernas (teléfono, televisión, internet) se basan en el láser y en la fibra óptica, que es más eficaz, más barata, y requiere menos mantenimiento que las redes basadas en el cableado de cobre. La fibra óptica comenzó usándose en telecomunicaciones a larga distancia, pero hoy estamos a punto de recibirla ya en el hogar. La información transmitida se codifica mediante pulsos de láseres de semiconductores. El primer láser de semiconductores continuo comercial que operaba a temperatura ambiente se creó en 1975 abriendo la puerta al uso de láseres para transmitir conversaciones telefónicas codificadas. En 1988 se tendía el primer cable de fibra óptica transoceánico.

*El disco compacto.* Los métodos de almacenamiento óptico son posibles gracias a la investigación para obtener láseres de semiconductores de bajo costo y sobre la interacción entre el láser y películas delgadas. Se venden 8.000 millones de dólares de discos compactos al año. La información se almacena en un CD en la forma de muescas poco profundas con anchuras de unos miles de átomos en una superficie de polímero cubierta con una película delgada reflectante. La información digital, representada por la posición y longitud de las muescas se lee ópticamente con un láser de semiconductores.

*Energía.* La mayor parte de la energía que consumimos se obtiene quemando combustibles fósiles. Dada su cantidad limitada y su potencial contaminante es esencial optimizar la combustión. Para este fin los láseres y el conocimiento de los procesos moleculares que tienen lugar en el horno son importantes. El interior de un horno es un ambiente hostil en el que es difícil colocar aparatos sin que se destruyan o dañen. Sin embargo, por medio del láser, es posible averiguar externamente la temperatura, el movimiento de las partículas, la composición molecular, y las velocidades de reacción.

*Otros usos del láser.* El láser es una herramienta muy versátil en muchas otras industrias y aplicaciones de todo tipo. Se usa por ejemplo para cortar o grabar piezas metálicas, cerámicas, plásticas, de madera o tela, con velocidades y precisiones mucho mayores que las alcanzadas con otras técnicas; en satélites para transmitir información; como lectores de códigos de barras, en impresoras; en espectroscopios para analizar la composición de muestras; para medir distancias y tiempos con gran precisión; en giroscopios; como punteros; en holografía, o como “pinzas ópticas” para manipular pequeñas partículas. Esta última aplicación es de gran interés en distintas ramas de la biología, para manipular bacterias, células, orgánulos celulares, o moléculas individuales de DNA.

## 5. Otras aplicaciones de la Mecánica Cuántica

*Diseño de fármacos.* La teoría molecular está contribuyendo al diseño de moléculas bioactivas, que incluyen fármacos, herbicidas y pesticidas.

*Resonancia magnética.* Esta técnica de visualización de los tejidos se basa en provocar con un campo magnético constante y otro oscilante resonancias magnéticas en ciertos núcleos atómicos, particularmente del hidrógeno (protones. Nuestro cuerpo contiene mucha agua, y cada molécula de agua dos átomos de hidrógeno.) La resonancia se refiere a un aumento de la absorción cuando se consigue la adecuada combinación de intensidad de campo y frecuencia. La ventaja con respecto a los rayos X es que el paciente no se ve expuesto a una radiación peligrosa, y además pueden conseguirse imágenes tridimensionales. Esta técnica descansa en un efecto puramente cuántico: la discretización o cuantificación de la energía debida a la acción del campo constante sobre el protón, que puede considerarse como un pequeño imán. Pero a diferencia de los imanes clásicos, no es posible cualquier orientación (y energía) con respecto al campo externo, sino sólo dos orientaciones discretas y sus correspondientes energías. En resonancia, la frecuencia del campo oscilante coincide con la frecuencia que corresponde según la fórmula de Planck al salto energético entre los dos niveles (normalmente en la región de frecuencias de radio). La espectroscopía de resonancia magnética es una técnica usada por los químicos de forma rutinaria como herramienta de análisis, ya que los diversos entornos químicos de los protones afectan las frecuencias de resonancia de distinta manera; también se emplea para determinar estructuras de proteínas o de sólidos. Felix Bloch (el mismo físico que contribuyó decisivamente al nacimiento de la teoría de bandas) y Edward Purcell descubrieron independientemente el fenómeno de resonancia magnética en 1946 (y recibieron el Nobel en 1952). Entre 1950 y 1970 se usó fundamentalmente como técnica de análisis químico. En 1971 se mostró que los tiempos de relajación de la resonancia magnética de diferentes tejidos variaba, lo que disparó el interés por aplicar la técnica en medicina.

*Energía nuclear.* La física nuclear es una rama de la mecánica cuántica. El conocimiento de la estructura y procesos nucleares ha permitido controlar, para bien y para mal, enormes energías. No en vano muchos destacados teóricos cuánticos, (por ejemplo Feynman, Wheeler, un antiguo colaborador de Bohr, o E. Fermi) liderados por R. Oppenheimer, trabajaron en el proyecto Manhattan durante la segunda guerra mundial para producir la primera bomba atómica en la que se fisiónaba uranio. Simultáneamente se llevaba a cabo la investigación sobre el uso pacífico de esa energía: Enrico Fermi consiguió la primera reacción nuclear en cadena controlada

en 1942.

En 1952 Estados Unidos creaba una bomba aún más mortífera, 1000 veces más potente que la de fisión lanzada en Hiroshima, basada en la fuente de energía del sol y las estrellas, la fusión de átomos de deuterio y tritio para formar helio. La contrapartida “civil” –un reactor de fusión– no ha llegado a realizarse, posiblemente por las dificultades que entraña, pero también por la falta de interés de los gobiernos. En cualquier caso la producción de energía por fisión nuclear está en claro retroceso, y es impopular debido a los problemas de seguridad que ha generado, no sólo por los temidos accidentes nucleares sino por la peligrosidad de los residuos radioactivos.

*El horno de microondas.* Ya hemos comentado al hablar del máser la importancia de la espectroscopía de microondas para determinar estructuras moleculares. El horno de microondas se basa en los mismos principios que la espectroscopía de microondas, aunque su invención no está ligada a esta espectroscopía. **Percy Spencer**, un inventor de la empresa Raytheon Corporation trabajaba en 1946 en un proyecto relacionado con el radar. Estaba probando un nuevo tubo de vacío llamado magnetrón cuando descubrió que una barra de caramelo que llevaba en su bolsillo se había derretido. Luego probó a poner maíz cerca del tubo y observó con asombro cómo saltaban las palomitas por todo el laboratorio; después colocó un huevo, y se calentó tan rápido que explotó en la cara de un colega curioso. Había nacido una nueva forma de cocinar y calentar alimentos. En el horno de microondas se produce radiación de microondas, con la frecuencia adecuada para hacer rotar las moléculas de agua, que tiene una parte cargada positivamente y otra negativamente. En cada ciclo de oscilación del campo eléctrico la molécula tiende a alinearse con el campo (típicamente se producen 2450 millones de ciclos por segundo). Este movimiento genera fricción a través de choques e interacciones con las moléculas vecinas, y por tanto calor. La radiación de microondas, y no otra cualquiera, es la adecuada para esta tarea porque la rotación molecular está cuantizada, es decir, no todas las energías de rotación están permitidas, sino sólo un conjunto discreto. La diferencia entre niveles permitidos cae precisamente dentro de la zona de microondas del espectro electromagnético.

Finalmente, otra aplicación interesante de la mecánica cuántica es la de los relojes atómicos, y en general la **metrología**, es decir la especificación precisa de todos los patrones de medida. Los relojes atómicos se usan por ejemplo en el sistema **GPS**, que nos permite conocer con gran precisión el punto geográfico en el que estamos.

## 6. El futuro: ¿ordenadores cuánticos?

En cierto sentido todos los ordenadores actuales son cuánticos, puesto que su funcionamiento se basa en el transistor. Sin embargo, convendremos en llamarlos clásicos, en la medida en que usan como unidad elemental para almacenar información el bit, que es en la práctica un sistema físico que puede estar en dos estados (digamos 0 y 1). En un hipotético ordenador cuántico se substituiría el bit clásico por el bit cuántico, más rico que el clásico porque el sistema puede estar en cualquier superposición de los estado 0 y 1. La consecuencia de esta posibilidad es que en teoría existen ciertas operaciones para las cuales un ordenador cuántico sería muchísimo más rápido que uno clásico. El problema estriba en conseguir y manipular muchos de estos bits cuánticos en la práctica, y no es nada fácil, porque una perturbación muy pequeña del entorno hace que las propiedades del bit cuántico se pierdan. En este momento no se sabe con certeza si los ordenadores cuánticos van a poder realizarse algún día, pero lo que se puede ganar es tanto que muchos grupos de investigación en todo el mundo están dedicados a intentarlo.

De todas formas existen otros caminos por los que la informática y la mecánica cuántica vuelven a encontrarse, incluso si se mantiene el bit clásico como unidad básica. En las últimas décadas la potencia de los ordenadores ha crecido con una velocidad vertiginosa, doblándose cada dos años. Este aumento de potencia se debe esencialmente a la miniaturización constante del transistor. Esta miniaturización hasta el momento ha conseguido realizarse con éxito pero el proceso tiene un límite físico, porque a partir de ciertos tamaños (decenas de nanómetros) los efectos cuánticos no pueden despreciarse, por ejemplo los electrones atravesarían barreras por efecto túnel, y de hecho el transistor tal como lo conocemos dejaría de funcionar. Una opción es diseñar nuevos tipos de transistores que usen estos efectos cuánticos; también es posible que el transistor llegue a substituirse por otro tipo de unidades mejor adaptadas a las nuevas escalas.

## Bibliografía

[1] [www.pbs.org/transistor](http://www.pbs.org/transistor) (Historia del transistor.)

[2] J. G. Muga y C. R. Leavens, *Arrival time in quantum mechanics*, Physical Reports 4 (2000) 353. (Sobre aspectos fundamentales pendientes de resolver en mecánica cuántica.)

[3] [www.cis.rit.edu/htbooks/nmr](http://www.cis.rit.edu/htbooks/nmr), [www.cis.rit.edu/htbooks/mri](http://www.cis.rit.edu/htbooks/mri) (Excelentes introducciones interactivas a la resonancia magnética y a su aplicación en medicina.)

[4] [www.colorado.edu/physics/2000](http://www.colorado.edu/physics/2000) (Introducciones interactivas al láser, y al horno de microondas.)

[5] [www.bae.ncsu.edu/bae/courses/bae590f/1995/mullen](http://www.bae.ncsu.edu/bae/courses/bae590f/1995/mullen) (Sobre la tomografía de emisión de positrones.)

[6] J. M. Sánchez Ron, *El Siglo de la Ciencia*, Taurus, Madrid, 2000, capítulos II (Ciencia, tecnología y sociedad), V (la física cuántica, disciplina del siglo) y VII (El poder de la energía nuclear).