

Puntos cuánticos: La realidad es más sorprendente que la ficción

Margarita I. Bernal-U y Vivechana Agarwal

La Dra. Margarita I. Bernal Uruchurtu es Investigadora del Centro de Investigaciones Químicas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEMor) y es integrante de la Academia de Ciencias de Morelos.

La Dra. Vivechana Agarwal, es investigadora del Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAP) de la UAEMor. Su principal línea de investigación es el desarrollo de nanomateriales base silicio, carbono y metales nobles para su aplicación como estructuras fotónicas y/o sensado óptico.

Esta publicación fue revisada por el comité editorial de la Academia de Ciencias de Morelos.

Este artículo está dedicado a nuestros estudiantes en el ICBA-UAEMor. Los futuros científicos especializados en nanociencia, nanopartículas y sus propiedades.

Moungi G. Bawendi, Louis E. Brus y Alexei I. Ekimov (Figura 1) recibieron el pasado jueves 5 de octubre una llamada muy temprano por la mañana. Los despertaron con la noticia de que los habían seleccionado como ganadores del premio de este año por el descubrimiento y síntesis de los puntos cuánticos.

En una época en la que el término cuántico se usa en la cultura popular de muchas formas y con gran frecuencia de manera gratuita o simplemente equivocada (¡Sí, tú Marvel! En ti y tu *Quantummania* estoy pensando), el enterarnos que la Academia Sueca de Ciencias otorgó el Premio Nobel de Química 2023 a tres investigadores que están tras del descubrimiento y síntesis de los puntos cuánticos puede llevarnos a imaginar efectos especiales y retos difíciles de superar. Aquí queremos contarles un poco acerca de la aventura fantástica que es explorar el mundo nanoscópico, los efectos cuánticos que lo gobiernan y las importantes aplicaciones que la nanotecnología ha encontrado para los diminutos puntos cuánticos.

parte de la milésima parte de una unidad de medición. Así, tenemos nanómetros, nanolitros, nanogramos, nanosegundos. Un nanómetro (nm) es entonces una millonésima parte de un milímetro (mm). Tome una regla o una cinta métrica con marcas cada mm e imagine dividir el espacio entre dos marcas en un millón de fragmentos iguales. Así se dará cuenta de la escala del mundo de las cosas más pequeñas que consideramos como materia: los átomos y las moléculas. Una molécula de agua, H₂O, tiene un tamaño de apenas 0.3 nm aproximadamente. En la Figura 2 podrá familiarizarse un poco más con la diversidad de escalas correspondientes a diversos objetos.

Las nanopartículas se hallan entre las moléculas individuales y los materiales macroscópicos que forman. Su composición va desde decenas de átomos agrupados en geometrías bien definidas hasta miles de átomos formando estructuras con patrones regulares. Lo fascinante en las nano partículas (NP) es que sus propiedades son diferentes a las de un átomo o molécula aislada de la misma composición y a las del material en bulto.

¿Por qué el adjetivo cuántico?

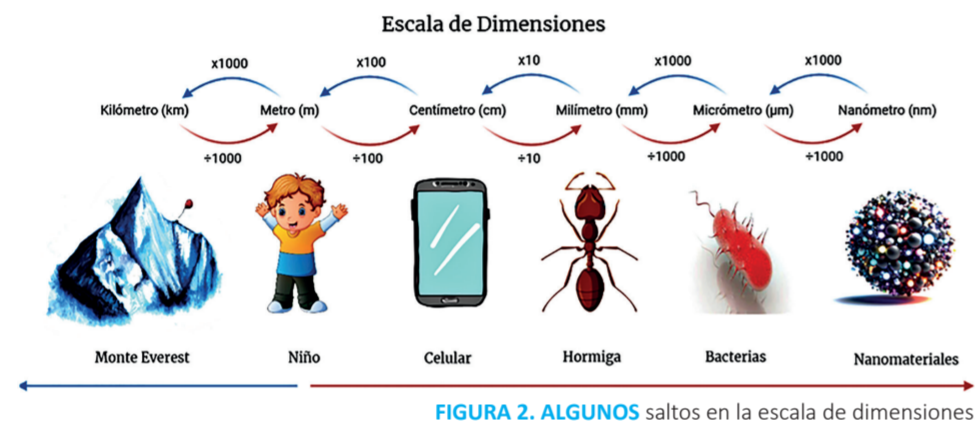


FIGURA 2. ALGUNOS saltos en la escala de dimensiones.

La física y química cuántica son los campos que se ocupan de estudiar la intrincada relación entre materia y energía en escalas muy pequeñas describiendo con ello el comportamiento de los átomos y la luz. El mundo nanoscópico es la gran cancha de los efectos cuánticos. En las NP

observar con la ayuda de un microscopio óptico hasta grandes objetos que vemos a través de telescopios pasando por los objetos ordinarios que vemos a simple vista, obedece las leyes de la Física clásica, las conocidas leyes de Newton. En contraste, los objetos de tamaño nanoscópico no obedecen las leyes clásicas. Al inicio del siglo XX, se desarrolló un conjunto de nuevas leyes para explicar su comportamiento, la *Teoría Cuántica* de la Materia. Éstas conducen a fenómenos como la dualidad onda-partícula, la superposición de estados y el entrecruzamiento cuántico. A pesar de lo alejados que estos fenómenos se hallan de nuestra intuición, todos los experimentos que se han hecho para ponerlos a prueba los han confirmado. La física cuántica ha generado grandes avances tecnológicos que están en todas partes: láseres, transistores, relojes atómicos, instrumentos para imágenes médicas. Convivimos con aplicaciones de fenómenos cuánticos de manera cotidiana. Richard Feynman, quien ganó el premio Nobel de Física en 1965 por sus contribuciones al campo de la electrodinámica cuántica, dijo: - "Hay mucho lugar en el fondo" refiriéndose a todo lo que aún hay que descubrir en el mundo nanos-

Desde el S. XIX los científicos comenzaron a estudiar cómo se comporta la luz y cómo los cristales coloreados pueden filtrar colores específicos. Al realizar experimentos con diversos vidrios se dieron cuenta que un solo dopante como el seleniuro de cadmio (CdSe) o el sulfuro de cadmio (CdS) podían conducir a cristales de diferentes colores dependiendo de las condiciones en las que los preparaban. En el siglo pasado, gracias a técnicas ópticas, fue posible confirmar que en los cristales coloreados había partículas muy pequeñas suspendidas.

La curiosidad y dedicación de los galardonados

Alexei Ekimov estaba fascinado por los vidrios de colores. Su curiosidad lo hacía preguntarse cómo era posible que una sola sustancia pudiera conducir a materiales de diferentes colores. En 1979 trabajando en el Instituto Estatal de Óptica Vasilov en Leningrado (ahora San Petersburgo) se propuso entender la composición química y la estructura de las partículas que, sin disolverse en el vidrio, le daban color. A esas partículas suspendidas se le conoce como partículas coloidales. Utilizando una forma de cloruro de cobre (CuCl), se dio cuenta de que la temperatura durante la fabricación del vidrio influye en el tamaño de las partículas coloidales, que iban desde 2 hasta 30 nm. Además, se percató que el vidrio formado absorbía luz de forma diferente dependiendo del tamaño de las partículas coloidales que quedaban atrapadas en éste. Las partículas más grandes absorbían luz de forma parecida al CuCl macroscópico, mientras que las más pequeñas la absorbían a frecuencias mayores, es decir, *corridas hacia el azul* de acuerdo con la distribución de colores en un arcoíris. Ekimov tuvo la brillante idea de explicar sus resultados como un efecto cuántico relacionado con el tamaño de las nanopartículas. Con técnicas de dispersión de rayos X pudo confirmar que el tamaño de los cristallitos de la sal de cobre suspendidos en el vidrio era nanométrico. Quizá ustedes se pregunten cómo se le ocurrió que se trataba de un efecto cuántico. En el trabajo previo de Ekimov en materiales semiconductores está la pista. En nano películas semiconductoras que había preparado antes, materiales tan delgados que se consideraban de dos dimensiones, había observado que su interacción con la luz seguía el comportamiento de un problema que aparece comúnmente en los libros de texto de cuántica: el de un electrón atrapado en una región de la que no puede escapar. La solución de ese problema, conocida por todos los físicos lleva a que mientras más confinados están los electrones en las nanopartículas, más energía deben tener los fotones de la luz para ser absorbidos y luego emitidos. En la Figura 3 se muestra un esquema simplificado de este fenómeno. El corrimiento de los espectros de absorción y de emisión hacia el azul de las partículas suspendidas en el vidrio seguía ese mismo comportamiento. ¡Había descubierto los puntos cuánticos semiconductores! En 1981 publicó su descubrimiento, pero lo hizo en una revista soviética, la cual era de difícil acceso para investigadores que no leían en ruso o en cuyos países no era posible conseguir esa revista. Éste fue el caso de Louis Brus y sus colaboradores, quienes sabían de los efectos cuánticos en materiales 2D, pero, no se habían enterado del descubrimiento de los puntos cuánticos semiconductores de Ekimov. Fue hasta 1984 cuando Louis Brus consiguió una traducción de

cópico. El artículo de Luis Mochán publicado recientemente en esta misma columna cuenta otro aspecto de este fondo y lo que podemos aprender allí (ver Lecturas Recomendadas).

Redescubriendo algo viejo

Algunos grandes artesanos de la antigüedad (2000 A.C.) obtuvieron vidrio de colores mezclando cantidades muy pequeñas de algunos contaminantes en el crisol en donde fundían a muy alta temperatura la arena sílice (SiO₂). Esos *dopantes* eran cantidades pequeñas de plata, oro u otros compuestos metálicos. Estos conocimientos también se usaron para preparar esmaltes que dan a las piezas cerámicas hermosos colores. Si bien no conocían la explicación del fenómeno observado, la experimentación y control de sus resultados resulta admirable. Los grandes maestros vidrieros sabían qué tipo de sales usar y en qué estados de oxidación para obtener tonalidades específicas: Azul-verde con cobre, violeta con cobalto, verde con cromo, ámbar con sulfuro de hierro y morado con manganeso.

El efecto de los dopantes también se observa en las piedras preciosas. Un ejemplo de esto son los rubíes: El óxido de aluminio es incoloro, pero si algunos átomos de aluminio son reemplazados por cromo, adopta colores que van desde el amarillo pálido hasta el rojo intenso. La sustitución de apenas unos pocos átomos, entre el 0.5 y el 2%, produce un cambio de color impresionante.

Los efectos cuánticos surgen cuando las partículas se encogen

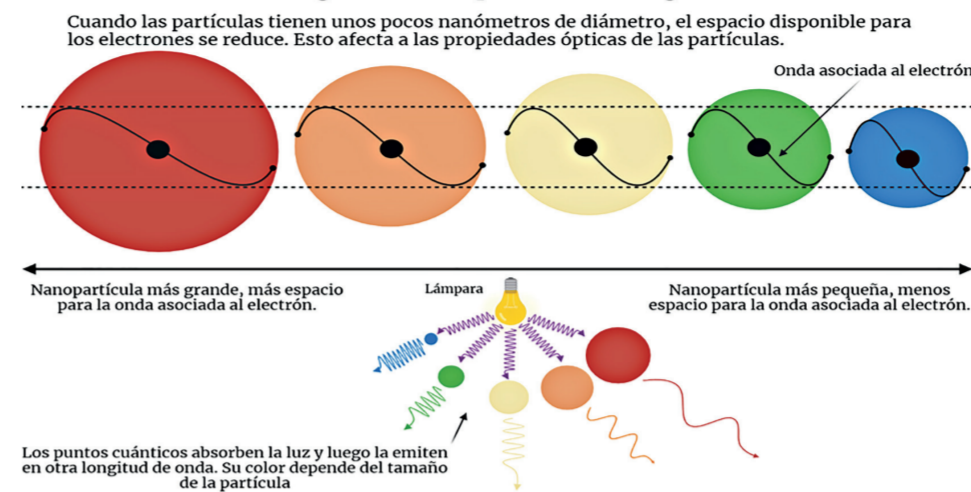


FIGURA 3. LOS puntos cuánticos son nanopartículas que por su tamaño tienen una interacción especial con la luz. Recuerda que la respuesta óptica (luz absorbida y luz emitida) depende del tamaño de las partículas en las que el electrón está confinado. (Adaptado del trabajo de Johan Jarnestad @Nobelprize.org)

los trabajos de Ekimov en Estados Unidos. A diferencia del soviético, el equipo dirigido por Brus estaba estudiando los coloides líquidos con partículas de otros metales como el cadmio, el zinc y el titanio. Buscaban preparar con ellos algunos fotocatalizadores útiles para la producción de materias primas de alto valor en síntesis química. Sin embargo, a lo que llegaron en 1983 fue al descubrimiento de los efectos de las partículas de CdS en medios líquidos. Ellos enfocaron su estudio en observar la evolución en el tiempo de las partículas suspendidas. Recién preparadas tenían un comportamiento que al día siguiente era diferente. Fueron capaces de explicar este cambio como el resultado de un aumento de tamaño de las partículas. Eran muchas y pequeñas recién preparadas, de aproximadamente 4.5 nm. Con el paso de las horas, se redisolían para agruparse en partículas de mayor tamaño, cerca de 12.5 nm. Confirmaron así que el comportamiento de absorción de la luz estaba relacionado con el tamaño de la nanopartícula. Con la esperanza de comentar su trabajo con Ekimov y sus colaboradores, le envió copias de sus publicaciones y una carta celebrando que ambos estuvieran interesados en el mismo tema. La KGB, agencia de seguridad soviética, llamó a Ekimov y A. Efron, su más cercano colaborador, para interrogarlos acerca de su colaboración con un investigador en los Estados Unidos, pero ¡ni lo conocían! No fue sino hasta 1998, después de los cambios geopolíticos que acompañaron la caída de la Cortina de Hierro, que Efron y Ekimov pudieron conocer a Brus y establecer una colaboración con él. Para que un descubrimiento pueda ser aprovechado es necesario que los resultados sean controlables, reproducibles, que satisfagan criterios de control de calidad. Ni los resultados de Ekimov ni los de Brus lo eran. Ellos lograron tener una distribución de tamaños de la que calcularon el tamaño promedio, pero su dependencia con la temperatura y la composición del medio en el que crecían era un asunto complejo de controlar. Moungi Bawendi, quien había trabajado con Brus y se instalaba como un nuevo profesor en el Instituto Tecnológico de Massachusetts propuso a su grupo de estudiantes encontrar una forma de controlar el tamaño de las nanopartículas de CdS. Después de muchos ensayos, los estudiantes que realizaban su doctorado con él, Murray y Nirmal, encontraron un procedimiento químico muy

ingenioso que los llevaba a obtener grandes cantidades de nanopartículas mono-dispersas, es decir, de un solo tamaño y estructura. Las muestras de mejor calidad se obtenían después de algunas horas de crecimiento constante. Para saber el tamaño de las partículas que se forman es necesario hacer experimentos ópticos, medir los espectros de absorción de luz. Ellos modularon la temperatura de crecimiento a partir de sus estimaciones de la distribución de tamaños. Al disminuir la temperatura el crecimiento se detiene. Para continuar el crecimiento es necesario aumentar nuevamente la temperatura. Con este procedimiento, una vez que el espectro de absorción confirmaba la presencia de partículas del tamaño deseado, una porción de la solución se extrajo del recipiente y se guardó para su uso posterior. De esta manera, fue posible obtener partículas desde 1.5 nm hasta 11.5 nm. Su método abrió la puerta a la aplicación en gran escala de los nanopuntos cuánticos. Bawendi fundó *Lumicell*, una compañía en Massachusetts que fabrica puntos cuánticos para marcar e iluminar células cancerosas durante cirugías. Los estudiantes que se han formado en su grupo, inspirados por Brus y Bawendi, son ahora científicos trabajando en compañías dedicadas a la aplicación de los nanomateriales en diferentes campos.

¿Qué tan útil puede ser un punto y más si es cuántico?

Debido a la forma particular que tienen los puntos cuánticos para emitir luz, casi tres décadas después de su descubrimiento se han vuelto herramientas muy importantes en la nanotecnología y forman parte de objetos de uso cotidiano. Al absorber luz azul, los puntos cuánticos emiten luz verde o roja, dependiendo de su tamaño. Los utilizamos en las pantallas de computadoras y de TV que funcionan con tecnología QLED (Q- de *quantum dot*, su nombre en inglés). En estas pantallas se produce luz azul empleando diodos que consumen muy poca energía (cuyo desarrollo mereció el Premio Nobel de Física en 2014) y los puntos cuánticos se utilizan para cambiar una parte de ésta por luz roja o verde. Así se cuenta con los tres colores básicos necesarios para la creación de imágenes de colores. Los puntos cuánticos también se utilizan en algunas lámparas LED para cambiar la luz blanca y fría en luz cálida con tonalidades amarillas. La emisión de luz de

los puntos cuánticos también ha sido utilizada en bioquímica y medicina mediante pares molécula-nanopartícula. La molécula que participa en algún proceso bioquímico puede activar la emisión de luz del punto cuántico, ayudando a identificar el órgano o el tejido en el que esta molécula es utilizada. Los médicos están muy interesados en utilizar este nanodispositivo para poder seguir los procesos neoplásicos, migración de las células cancerosas en el cuerpo. En química, además del uso de los puntos cuánticos para activar algunas reacciones químicas, han sido utilizados para detectar contaminantes en agua. Éstas son apenas algunas de las fantásticas aplicaciones que se han desarrollado en un periodo relativamente corto. Apenas iniciamos la comprensión de cuánto se puede hacer con puntos cuánticos. Hay algunos grupos de científicos y tecnólogos que prevén un uso futuro en dispositivos electrónicos flexibles, sensores muy pequeños capaces de detectar cantidades minúsculas de alguna substancia, celdas solares muy delgadas y también aplicaciones en el campo del encriptamiento y la seguridad de las comunicaciones. Si somos lo suficientemente curiosos, el nanomundo tiene numerosas aventuras maravillosas esperando ser descubiertas. En la Figura 4 encontrarán algunas aplicaciones de puntos cuánticos que han sido desarrolladas.

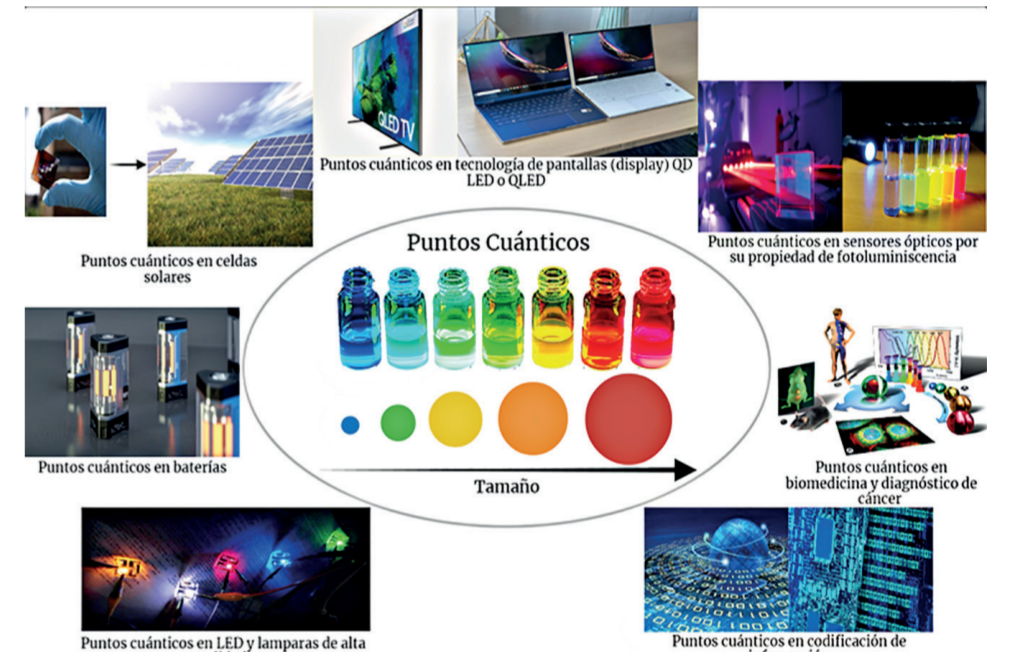


FIGURA 4. ALGUNAS aplicaciones de puntos cuánticos

diseño de las posibles aplicaciones.

Referencias

- A.I. Ekimov, A.A. Onushchenko, V.A. Tsekhomskii, Fiz. Khim. Stekla 6 (1980) 511, 265
- R. Rosetti, L. Brus, J. Phys. Chem. 86 (1982) 4470
- C B Murray, D J Norris, M.G. Bawendi, J. Am. Chem. Soc., 115 (1993), 8706-8715
- Lecturas recomendadas
- Popular Science Background "They added colour to nanotechnology", The Royal Swedish Academy of Sciences, <https://shorturl.at/bwPWY>, 04/10/2023.
- Advanced information "Quantum dots – Seeds of nanoscience", Heiner Linke, The Royal Swedish Academy of Sciences, <https://shorturl.at/cxCNO>, 04/10/2023
- En un r...atto, ahoritita, el premio Nobel de Física <https://acmor.org/publicaciones/en-un-r-atto-ahoritita-el-premio-nobel-de-f-sica#acmor>

La meta ha cambiado: Baja toxicidad sin comprometer la eficiencia



Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach

Moungi G. Bawendi



Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach

Louis E. Brus



Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach

Alexei I. Ekimov

FIGURA 1. IMÁGENES del portal del Premio Nobel <https://www.nobelprize.org>

El mundo nano ¿qué es una nanopartícula? Nano es el prefijo que utilizamos para designar una cantidad que es tan solo una millonésima

los fenómenos que tratamos de entender y sus aplicaciones son de origen cuántico. El mundo clásico, que incluye desde objetos que podemos

Esta columna se prepara y edita semana con semana, en conjunto con investigadores morelenses convencidos del valor del conocimiento científico para el desarrollo social y económico de Morelos. Desde la Academia de Ciencias de Morelos externamos nuestra preocupación por el vacío que genera la extinción de la Secretaría de Innovación, Ciencia y Tecnología dentro del ecosistema de innovación estatal que se debilita sin la participación del Gobierno del Estado.



ESTA PUBLICACIÓN FUE REVISADA POR EL COMITÉ EDITORIAL DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS DE MORELOS

Para actividades recientes de la academia y artículos anteriores puede consultar: www.acmor.org.mx
¿Comentarios y sugerencias?, ¿Preguntas sobre temas científicos? CONTÁCTANOS: editorial@acmor.org.mx