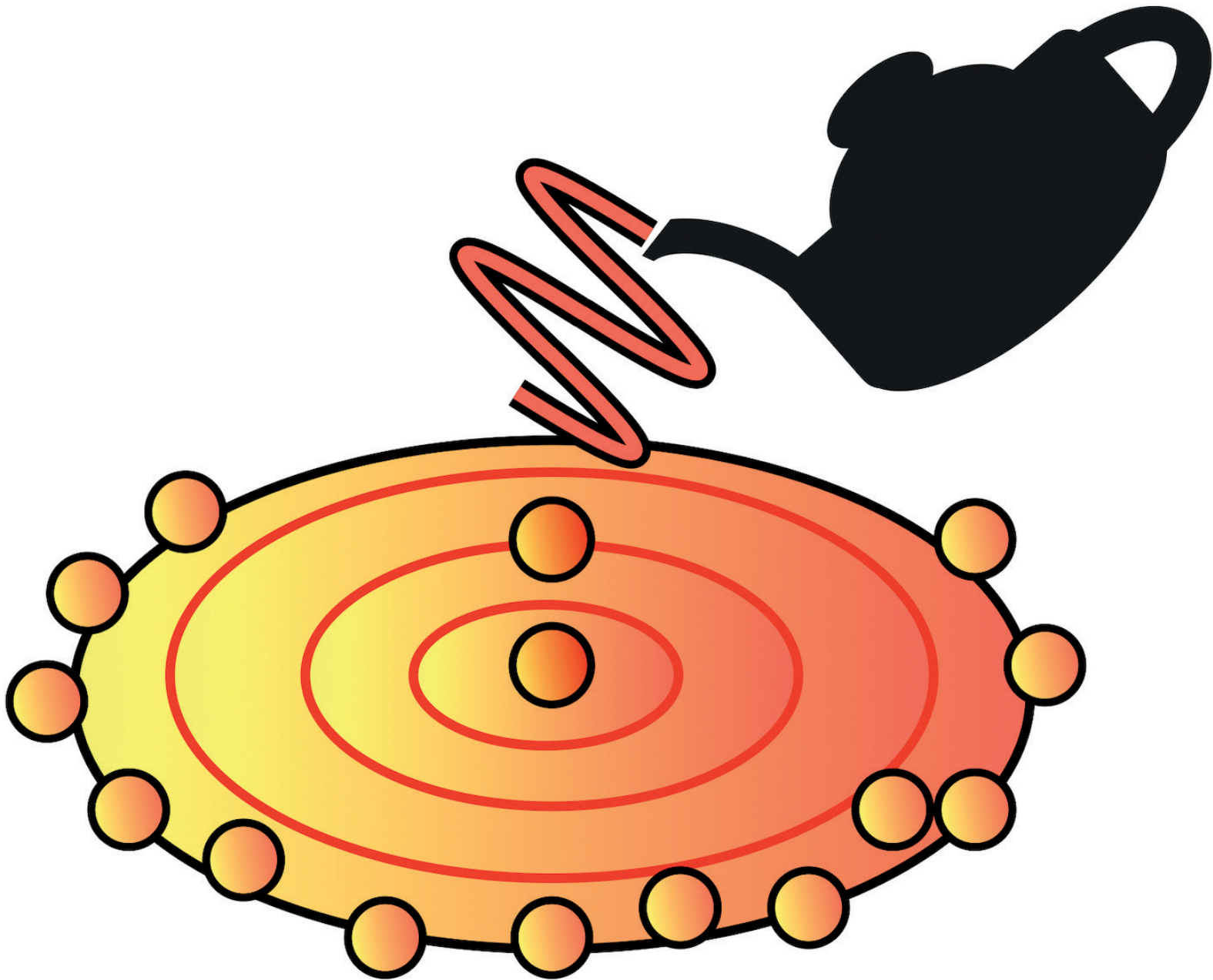


# El polaritón, cuando la luz se vuelve líquida



Miguel Angel Bastarrachea Magnani  
Departamento de Física,  
Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa



**Abstract**

This work explains the concept of polariton, a quantum quasiparticle that results from the strong coupling between light and matter and that, thanks to its hybrid character, has become a tool not only for the understanding of fundamental phenomena in quantum, condensed matter, and atomic physics but also for the design of new quantum technologies. In particular, the case of exciton-polaritons in semiconductor microcavities is reviewed, which by virtue of the strong interactions that can be generated between them and that result in novel nonlinear optical effects, their out-of-equilibrium character, their ability to form quantum macroscopic states as condensates and superfluids, and its potential to integrate new light-matter quasiparticles have earned the name of quantum fluids of light.

**Keywords:** polariton, exciton, semiconductor, Bose-Einstein condensate, quantum technologies.

**Resumen**

En este trabajo se explica el concepto de polaritón, una cuasipartícula cuántica que resulta del acoplamiento fuerte entre la luz y la materia y que gracias a su carácter híbrido se ha constituido no sólo como una herramienta para la comprensión de fenómenos fundamentales en la óptica cuántica, la materia condensada y la física atómica, también para el diseño de nuevas tecnologías cuánticas. En particular se revisa el caso de los excitones-polaritones en microcavidades semiconductoras, que en virtud de las interacciones fuertes que se pueden generar entre ellos y que derivan en efectos ópticos no lineales novedosos, su carácter fuera de equilibrio, su capacidad de formar estados cuánticos macroscópi-

cos como condensados y superfluidos y su potencial para integrar nuevas cuasipartículas de luz-materia han ganado el nombre de fluidos cuánticos de luz.

**Palabras clave:** polaritón, excitón, semiconductor, condensado de Bose-Einstein, tecnologías cuánticas.

**I. Las tecnologías cuánticas.**

El término tecnologías cuánticas engloba una serie de aplicaciones tecnológicas desarrolladas en las últimas décadas cuyos principios de funcionamiento dependen de los fenómenos únicos que la física cuántica avanzada ha revelado, cómo es el caso de la superposición y el enredamiento cuánticos (Riedel et al., 2019). Estos fenómenos, en particular, prometen revolucionar la forma en que nos comunicamos y procesamos la información. Esto incluye áreas novedosas como la simulación y el cómputo cuánticos, que han sugerido vías para resolver problemas computacionales inalcanzables con las herramientas tradicionales. Numerosos países alrededor del mundo han apostado por fuertes inversiones económicas dedicadas a la investigación básica y aplicada para explorar el potencial de estas tecnologías, incluyendo México, que recientemente se ha unido al proceso (Gómez-García et al, 2023).

El desarrollo de las tecnologías cuánticas depende de la habilidad de diseñar y controlar sistemas cuánticos interactuantes, pues las interacciones energéticas entre sus componentes hacen posible acceder a estados cuánticos novedosos que permiten aprovechar aquellos fenómenos únicos de manera eficiente. En este contexto la luz cobra un papel central pues, en general, la excitación, manipulación y detección de los sistemas cuánticos interactuantes se

realiza principalmente por medios ópticos. Aunque por mucho tiempo, desde los antiguos griegos hasta el siglo XIX se debatió cuál era la naturaleza de la luz, es decir, si estaba hecha de corpúsculos o de ondas, en la actualidad sabemos que está hecha de partículas cuánticas que se comportan como paquetes de energías bien definidas, determinadas por el color de la luz y que denominamos fotones. La dualidad onda-partícula de los fotones es resultado del carácter cuántico que comparten con las partículas materiales, en el que, dependiendo del experimento, se manifiestan a veces cómo partículas, por ejemplo, al ser detectados en un detector localizado; y a veces cómo ondas, es decir, cuando la luz presenta fenómenos cómo la difracción y la interferencia. La versatilidad de los fotones radica en que al propagarse en el vacío carecen de masa y de la capacidad de interactuar entre sí. Sin embargo, ¿qué sucedería si pudiésemos transferir propiedades fotónicas a la materia, esto es, hacerla más ligera a voluntad? O aún mejor, ¿qué sucedería si fuésemos capaces de otorgarle a los fotones la capacidad de interactuar entre sí? Esto lo responden los polaritones.

## 2. El polaritón

Los *polaritones* son cuasi-partículas cuánticas que resultan de la interacción fuerte entre la luz y la materia (Hopfield, 1958). Fueron conceptualizados primero por el físico ruso Kirill Borisovich Tolpygo en 1950, y luego por Solomon Isaakovich Pekar que los nombró “excitones de luz” en 1957. Finalmente el americano John Joseph Hopfield introdujo el término en 1958 para describir cómo una excitación óptica se transporta cuánticamente en un medio dieléctrico como un semiconductor, aunque Vladimir Moiseevich Agranovich fue quien lo popularizó a partir de 1959.

El nombre proviene de la idea de que, al viajar un fotón dentro de un sólido como un cristal, polariza sus átomos, adquiriendo propiedades de *cuasipartícula*, un concepto que se describirá más adelante.

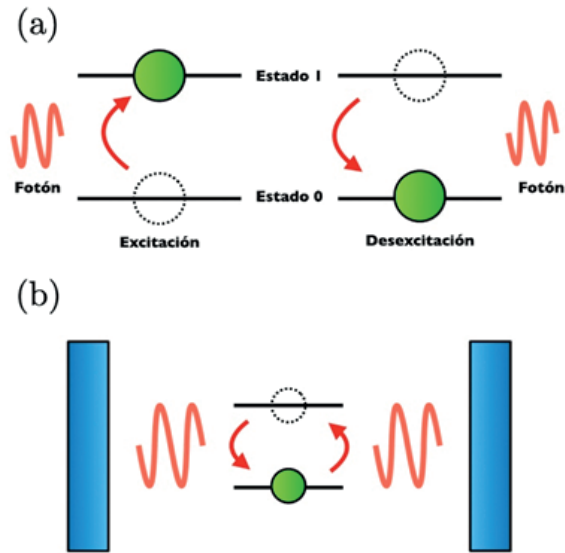


Figura 1. (a) Sistema de dos niveles interactuando con la luz. (b) Sistema de dos niveles dentro de una microcavidad.

A nivel cuántico podemos comprender de forma reducida la interacción entre la luz y la materia pensando en un sistema de dos niveles, como se ilustra en la figura 1(a), donde consideramos que el estado 0 tiene menor energía que el estado 1. Decimos que la materia se excita cuando absorbe un fotón y por tanto, sube del estado 0 al estado 1. En cambio, se desexcita cuando baja del estado 1 al estado 0 y emite un fotón en consecuencia. Mientras que la absorción lleva a una desexcitación espontánea tarde o temprano, la emisión, típicamente es un efecto irreversible o disipativo, esto es, no hay forma que el sistema de dos niveles pueda recuperar un fotón que ha emitido. Sin embargo, si logramos que, de alguna manera, el fotón emitido vuelva a ser absorbido con cada emisión sucesiva, dire-

mos que la materia y la luz se encuentran acoplados. Una forma de lograr esto es por medio de una microcavidad, un dispositivo dónde a través de un par de espejos podemos confinar a los fotones [véase la figura 1(b)]. Aunque en la actualidad hay microcavidades con un factor de calidad alto, es decir, que pueden mantener a un fotón confinado por mucho tiempo, ninguna es perfecta y también poseen disipación. Hablamos entonces de acoplamiento fuerte (*strong coupling* en inglés) cuando la energía de interacción entre la luz y la materia es mucho más grande que las tasas de disipación o desintegración de ambos. Viéndolo de manera simple, antes de que la luz se pierda ocurren muchos procesos de intercambio energético, es decir, de absorción y emisión sucesivos del fotón, de tal suerte que las excitaciones ópticas y materiales pueden mantenerse superpuestas a través del rápido intercambio de energía en un tiempo mucho mayor que el que toma para que cada una de ellas escape del sistema. El acoplamiento fuerte permite la observación de lo que se conoce como dinámica cuántica coherente y se ha convertido en la base de la arquitectura de las tecnologías y experimentos cuánticos actuales. Así, podemos considerar al sistema conjunto como un nuevo estado cuántico que se describe como una superposición cuántica entre la luz y la materia, el *polaritón*.

Cuando hablamos de una superposición cuántica nos referimos a un estado que desafía la lógica clásica tradicional. El ejemplo paradigmático es el del *gato de Schrödinger*, propuesto por Erwin Schrödinger en 1935 para discutir los problemas conceptuales que la física cuántica trajo consigo y que habían sido aparentemente zanjados por la Interpretación de Copenhague, la perspectiva formulada por Niels

Bohr, Max Born y Werner Heisenberg en 1927 que se convertiría en la visión ortodoxa de la mecánica cuántica. En este *Gedankenexperiment* o experimento pensado, se emplea un objeto macroscópico, el gato, para representar claramente lo extraño que es la superposición. Se piensa en un gato que se introduce dentro de una caja junto con un sistema de dos niveles que sirve como un interruptor de un artefacto venenoso. En el nivel 1 el artefacto venenoso no ha liberado el veneno, pero en el nivel 0 sí lo ha hecho. Luego, se prepara el sistema de dos niveles en una superposición cuántica entre ambos estados. Dentro de la caja el estado cuántico del gato y del sistema de dos niveles quedan correlacionados, por lo que el destino del gato también entra en superposición entre estar muerto por culpa del veneno liberado por el artefacto o seguir vivo. Cuando abrimos la caja, se aplica el postulado del colapso, uno de los axiomas de la cuántica bajo la Interpretación de Copenhague, que nos dice que medir al sistema, en este caso observar al gato, la superposición cuántica se colapsa aleatoriamente eligiendo sólo uno de los dos posibles estados que la componen. En este caso, sabemos que al abrir la caja encontraremos al gato vivo o lo hallaremos muerto, pero ¿cuál es el estado del gato dentro de la caja mientras no la abramos? Esencialmente, dentro de ella no podemos decir que el gato esté vivo, ni muerto, ni vivo o muerto o vivo y muerto. El estado superpuesto desafía el principio aristotélico del tercero excluido que nos dice que frente a una proposición sólo hay dos respuestas posibles: verdadero o falso. La cuántica nos desafía respondiéndonos con un “tal vez.”

De manera similar, un polaritón no es ni luz ni materia, sino una superposición de ambas. Los polaritones son entonces cua-

sipartículas híbridas que heredan las propiedades de la luz y de la materia y las poseen simultáneamente, adquiriendo una nueva identidad. Gracias a esto pueden ser controlados y detectados por medios ópticos, pero al mismo tiempo poseen la capacidad material de interactuar entre sí, algo que los fotones en el vacío carecen. Si lográramos sintonizar a voluntad sus propiedades, tendríamos entonces un recurso controlable para transferir atributos de la luz a la materia y viceversa.

Gracias a la capacidad moderna para controlar experimentalmente con precisión diversos sistemas cuánticos y sus propiedades como el número de partículas, la densidad y sus interacciones, se pueden crear polaritones en diversas plataformas. La física de polaritones se ha desarrollado vertiginosamente en las últimas dos décadas, constituyéndose como una nueva área interdisciplinaria con derecho propio que yace en la frontera entre la física atómica y molecular, el estado sólido, la materia condensada y la óptica cuántica, pues en todas estas áreas se han desarrollado técnicas para poder acoplar fuertemente a la luz con la materia. En la actualidad, existen alrededor de setenta plataformas diferentes donde se pueden realizar polaritones con diversos grados de control experimental (Basov et al., 2021).

### **3. Los excitones-polaritones.**

En la última década, la búsqueda de plataformas que permitan crear polaritones con propiedades sintonizables y que hagan posible que estos interactúen fuertemente ha llevado al terreno de las microcavidades semiconductoras (*microcavity semiconductors*), es decir, semiconductores bidimensionales dentro de una microcavidad óptica (Carusotto et al., 2013). Los

semiconductores son sólidos que poseen propiedades de conducción eléctrica y térmica intermedias entre los aislantes y los conductores. Desde mediados del siglo XX los semiconductores tomaron un papel clave en el desarrollo tecnológico, pues al doparlos con impurezas es posible manipular el exceso de portadores de carga a voluntad, impulsando el desarrollo de diferentes dispositivos clave como es el caso de los transistores de efecto de campo (FET) inventados en los años 60. Desde entonces, las aplicaciones de los semiconductores han proliferado, de los FET de metal-óxido-semiconductor o MOSFET, los diodos emisores de luz (LED) y las celdas solares hasta las tecnologías cuánticas, por ejemplo a través del uso de puntos cuánticos o pozos cuánticos en la optoelectrónica. Actualmente, los semiconductores se hallan en un momento de desarrollo histórico después de que en 2022 se promulgó en Estados Unidos la ley CHIPS (*Creating Helpful Incentives to Produce Semiconductors and Science Act*) que tiene como objetivo impulsar la producción americana local de semiconductores y la fabricación de microchips, centrales en las tecnologías de comunicación y procesamiento de información actuales (Luo, 2022).

La respuesta óptica de los semiconductores está caracterizada por el concepto de excitón. La teoría de los excitones fue formulada independientemente por Jakob Frenkel, Rudolf Peierls y Gregory Wannier quienes trataban de explicar los mecanismos a través de los cuales un sólido aislante puede absorber luz. Cuando un semiconductor absorbe energía, sus electrones, de carga negativa, se excitan subiendo de la banda de valencia a la banda de conducción dejando detrás de sí una vacancia de carga positiva que llamamos agujero o hue-

co (*hole*). Véase la fig. 2(a). El excitón es el estado ligado, es decir, una molécula, que surge cuando el electrón se ve atraído por el agujero debido a la interacción electromagnética (Coulombiana). Al tener cargas opuestas, el sistema se comporta como un pequeño sistema solar cuántico en el que el electrón y el agujero orbitan entre sí. De hecho, para ser más precisos, el sistema se comporta efectivamente como un átomo de hidrógeno pero con una energía de ligadura menor determinada por las propiedades dieléctricas del material. Podemos pensar a los excitones como partículas que viajan por el semiconductor transportando carga y energía y que describen las propiedades de baja energía en los semiconductores. Dependiendo de su tamaño se clasifican en dos tipos los excitones: Wannier-Mott y los de Frenkel Véase la fig. 2(b). Los excitones de Wannier-Mott se distribuyen a lo largo de varios átomos del material y son típicos de los semiconductores orgánicos. En cambio, cuando la excitación atómica se localiza alrededor de un sólo átomo, hablamos de un excitón de Frenkel. Estos aparecen con mayor frecuencia en moléculas orgánicas. Mientras que el excitón de Frenkel se mueve saltando de átomo en átomo, los de Wannier-Mott se mueven como si fuesen una partícula libre viajando en el semiconductor e interactuando con el potencial promedio que la estructura molecular del semiconductor le presenta.

Los excitones se forman como resultado del acoplamiento débil entre la luz y el semiconductor. Ahora bien, ¿podemos acoplar fuertemente a los excitones con la luz? Sí, pero para lograrlo se debe recurrir a las microcavidades ópticas. Éstas son pequeños resonadores ópticos que se encuentran cerca o por debajo de la longitud de onda de la luz. Las microcavidades se construyen

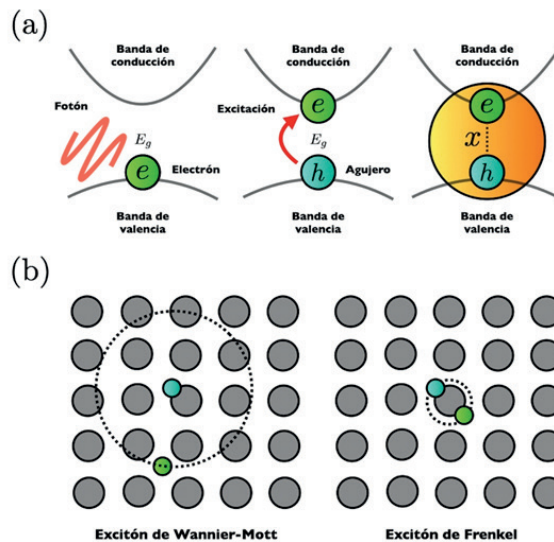


Figura 2. (a) Proceso de formación de un excitón a partir de la absorción de un fotón que excita al electrón de la banda de valencia a la de conducción del semiconductor. (b) Comparación esquemática entre los excitones de Wannier-Mott y los de Frenkel en un semiconductor modelado como red cristalina.

en general confinando la luz por medio de patrones periódicos como es el caso de las multicapas de reflectores de Bragg distribuidos (o DBR), que consisten en capas alternadas de dos materiales con índices de refracción distintos. La interferencia entre la luz reflejada y la transmitida al cruzar las distintas capas induce una región de alta reflectividad que extiende la vida de los fotones dentro de la microcavidad. Al encerrar entonces una capa delgada de un semiconductor bidimensional podemos incrementar el acoplamiento entre la luz y los excitones. Además, las microcavidades nos proporcionan dos rasgos destacables. Primero, el confinamiento de la luz induce a los fotones a ganar una masa finita efectiva dentro del semiconductor, que es del orden de diez mil veces menor que la de un electrón. En segundo lugar, típicamente la excitación óptica de las microcavidades se

genera a través de láseres externos. Las propiedades de los fotones confinados dentro de la microcavidad se pueden entonces manipular con gran facilidad. Por ejemplo, la frecuencia (color) de los fotones atrapados en la cavidad se puede cambiar en una cavidad en forma de cuña con sólo mover la posición del haz láser, cambiando así la desintonización entre la energía de la luz y de la materia, así como la masa efectiva del fotón. También, el ángulo de incidencia del láser permite cambiar el momento (dirección) de los fotones confinados dentro del semiconductor bidimensional.

Los fotones confinados entonces, pueden acoplarse fuertemente a los excitones creando en consecuencia un nuevo estado polaritónico: el *excitón-polaritón* (Carusotto et al., 2013). Véase la figura 3(a). Podemos pensarlos como fotones confinados que se revisten por los pares electrón-agujero que componen a los excitones o, desde una perspectiva pictórica, como pequeños átomos de hidrógeno de luz que viajan dentro del semiconductor bidimensional. Los excitones-polaritones se han creado en diversos materiales semiconductores bidimensionales inorgánicos como es el caso de los pozos cuánticos que permite el confinamiento de electrones y agujeros, por ejemplo aquellos contruidos con dos capas de AlGaAs (arseniuro de galio-alu-

minio) rodeadas de una capa delgada de GaAs (arseniuro de galio) o los dicalcogenuros de metales de transición (TMD por sus siglas en inglés) y en materiales orgánicos como cristales orgánicos, polímeros y proteínas fluorescentes, entre otros.

El origen fotónico de los excitones-polaritones permite que se puedan manipular a voluntad sus propiedades y que posean una masa ligera; mientras que el origen excitónico nos brinda la oportunidad de generar interacciones polaritónicas. El origen de estas interacciones proviene de los excitones. Debido a que son complejos hechos de pares electrón-agujero son susceptibles a la interacción coulombiana con otros electrones y agujeros. Las interacciones excitónicas son complejas, porque dependen de la estructura del semiconductor y eso ha llevado a una discusión aún no resuelta sobre cómo derivar de primeros principios las interacciones entre excitones-polaritones. Sin embargo, las podemos aproximar en ciertos regímenes a interacciones de contacto, en las que pensamos a los excitones como partículas que chocan entre sí. En consecuencia, los excitones-polaritones heredan la posibilidad de interactuar entre sí, un fenómeno que se traduce en la interacción entre fotones mediada por el semiconductor, algo imposible en el vacío. Véase la fig. 3(b). No sólo eso, debido a que

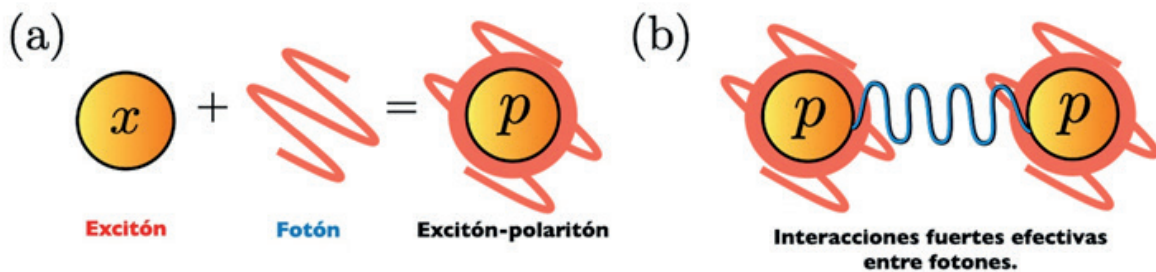


Figura 3. (a) El excitón-polaritón como superposición cuántica entre el excitón y el fotón.  
 (b) Interacción entre fotones mediada por los excitones.

podemos manipular de manera externa a los fotones, las interacciones polaritónicas también resultan sintonizables.

Uno de los resultados importantes es la generación de efectos ópticos no lineales. Decimos que un material óptico no es lineal cuando los fotones interactúan entre sí al propagarse en él, lo que se traduce, clásicamente, en que el principio de superposición de los campos electromagnéticos ya no se cumple. La óptica no lineal es clave para generar aplicaciones tecnológicas sin contar con efectos cuánticos explícitos. Manipular a voluntad las interacciones polaritónicas y diseñar nuevos estados cuánticos polaritónicos interactuantes nos otorga la capacidad de crear materiales con una respuesta óptica controlable y generar efectos no-lineales novedosos que puedan aprovechar también los fenómenos cuánticos como el entrelazamiento. Además, otra de las consecuencias de las interacciones es la creación de estados cuánticos macroscópicos, cómo se discutirá enseguida.

#### **4. Fluidos cuánticos de luz.**

La conexión entre la luz y la materia siempre ha despertado inquietud en la humanidad, mucho antes de que la física se reconociera a sí misma como una disciplina. Por largo tiempo, reflejaron la dualidad entre el alma y el cuerpo, en cuanto a que los materiales se reconocían por su extensión, esto es, la capacidad de llenar el espacio, mientras que la luz se avistaba como un espacio sin llenado que rozaba el ámbito de lo espiritual. Ahora sabemos que los fotones no son inmateriales, pues comparten la misma descripción cuántica que las partículas materiales, conectándose con ellas ontológicamente sin necesidad de explicaciones convolutas. Al hacerlos pasar por una doble rendija,

ambos muestran el célebre patrón de interferencia que revela su naturaleza ondulatoria; también, su detección se basa en su naturaleza como partículas. Los excitones-polaritones nos ofrecen una nueva perspectiva de la relación entre la luz y la materia a través de su capacidad de exhibir estados cuánticos macroscópicos.

Siendo un complejo de un electrón y un agujero que tienen carácter fermiónico, los excitones resultan ser bosones en un amplio dominio de temperatura y densidad. Los bosones son uno de los dos tipos de partículas cuánticas que se caracterizan por poder ocupar el mismo estado cuántico, a diferencia de los fermiones que, de acuerdo con el principio de exclusión de Pauli, no pueden hacerlo. Uno de los fenómenos más importantes de la física contemporánea es el condensado de Bose-Einstein. Cuando un conjunto de partículas bosónicas se encuentra a temperatura ambiente se comporta como un gas en el sentido tradicional. Sin embargo, al entrar al dominio de bajas temperaturas, los bosones individuales exhiben su carácter ondulatorio y cuántico. Esto significa que los bosones comienzan a traslaparse entre sí. Existe una temperatura crítica en la que todos los bosones del sistema se traslapan en un sólo estado cuántico, el estado base, por lo que el sistema sufre una transición de fase que se denomina condensación de Bose-Einstein, en honor a Satyendra Nath Bose y Albert Einstein que identificaron la naturaleza de los bosones en 1920. El condensado es un estado cuántico macroscópico paradigmático que define la idea de un gas cuántico, es decir, un gas capaz de exhibir propiedades cuánticas no en el pequeño mundo de la cuántica sino a nivel macroscópico.



Hasta el momento habíamos hablado de un solo excitón-polaritón, pero lo cierto es que al bombear con un láser e introducir una gran cantidad de energía en la microcavidad semiconductoras podemos manipular la densidad de excitones-polaritones creando efectivamente un gas cuántico interactuante. Pero, al ser bosones, los excitones exhiben el fenómeno de condensación de Bose-Einstein y lo heredan a los excitones-polaritones. No sólo eso, las interacciones polaritónicas, cuyo origen es excitónico, permite la aparición de otros fenómenos cuánticos macroscópicos como la superfluidez, la superconductividad, efectos topológicos, vórtices, y muchos más. Al área que abarca el conjunto de efectos en gases cuánticos polaritónicos interactuantes se denomina *fluidos cuánticos de luz*. El nombre no es accidental. Podemos pensar a estos fluidos dentro de la superposición que entraña el polaritón. Desde el punto de vista de los excitones, la presencia de la luz hace que la masa de los excitones-polaritones disminuya, impactando favorablemente en las propiedades de estos fluidos, por ejemplo, aumentando el umbral de temperatura crítica hasta, incluso, temperatura ambiente. En cambio, desde el punto de vista del fotón, los fluidos de excitones-polaritones literalmente son fluidos de luz vestida por las excitaciones materiales. Los fluidos cuánticos de luz nos brindan un panorama muy novedoso de la relación entre la luz y la materia, donde podemos pensar en que la física nos permite ahora crear condensados o superfluidos de luz.

Los fluidos de excitones-polaritones comparten muchas propiedades con los gases cuánticos de la física atómica que, literalmente, están hechos de átomos tradicionales, regularmente alcalinos, como el

litio o el potasio. Esto ha promovido un intercambio activo de conceptos y técnicas entre la física atómica, la óptica cuántica y la materia condensada, de ahí el carácter interdisciplinario de la física de polaritones. Sin embargo, también poseen particularidades que los hacen únicos y por lo que han resultado atractivos en años recientes. Además de ser condensados bidimensionales cuyas propiedades dependen del material bidimensional específico que se esté empleando como ingrediente activo en la microcavidad, en general, los fluidos cuánticos de luz son un fenómeno fuera de equilibrio que resulta del balance entre el bombeo y la pérdida de excitaciones ópticas, es decir, los fotones que entran y salen dentro de la cavidad. Como resultado, las propiedades de los fluidos de excitones-polaritones son singulares (Bloch et al., 2022). Por ejemplo, la densidad de excitones-polaritones puede presentar fenómenos de histéresis como función del bombeo, lo que ha sugerido aplicaciones como compuertas lógicas puramente fotónicas.

### 5. Cuasipartículas polaritónicas.

En la última década se ha impulsado el desarrollo de lo que se conoce genéricamente como *heteroestructuras de van der Waals* (Geim et al., 2013). Éstas son un conjunto de estructuras diferentes que se han logrado fabricar a partir de una variedad de cristales atómicos bidimensionales, que incluye al grafeno, monocapas de nitruro de boro hexagonal (hBN), monocapas de metales de transición dicalcógenos y óxidos en capas. Estos materiales se pueden emplear como los bloques de cierta compañía de juguetes daneses que, al apilarse, permiten combinar propiedades únicas y sintonizables, generalmente unidas por fuerzas de tipo van der Waals, de ahí el nombre. Entre ellas, las monocapas de TMD se han vuelto muy

atractivas por su gran versatilidad. Se componen de dos planos hexagonales de un átomo de un metal de transición (molibdeno o wolframio) que presenta un amarre covalente con un átomo calcógeno (azufre, selenio o telurio) para formar una red hexagonal con un arreglo prismático trigonal ( $\text{MX}_2$ ) [véase la fig. 4(a)] Se descubrió que las monocapas de TMD son estables termodinámicamente por lo que no se desintegran a pesar de ser una sola capa de átomos. Además, son semiconductores con banda directa del visible al infrarrojo, por lo que la transferencia de momento entre fotones y excitones-polaritones es directa otorgando mayor control en la generación de los últimos. Además, los TMD permiten emplear reglas ópticas selectivas para generar excitones-polaritones con un espín definido, es decir, el momento magnético intrínseco que poseen todas las partículas cuánticas, a través del uso de luz circularmente polarizada, añadiendo un nuevo grado de libertad útil para crear nuevos fenómenos.

Gracias a las heteroestructuras de van der Waals es posible crear nuevos estados cuánticos de muchos cuerpos. Esto implica introducir un conjunto de excitones-polaritones como impurezas dentro de otros medios, con el propósito de crear mezclas cuánticas con nuevas propiedades. La física cuántica de muchos cuerpos es una disciplina que trata de resolver el problema de determinar la dinámica de sistemas de muchas partículas que tienen interacciones complejas. Para resolver este problema de gran complejidad se recurre al concepto de *cuasipartícula*. Podemos imaginar que una partícula que está interactuando fuertemente con su medio primero lo hace con las partículas más cercanas a ella. Las partículas del medio lejos de este primer grupo, no verán directamente a la partícu-

la original, sino que la verán rodeada de aquellas partículas cercanas. Entonces, de manera efectiva, el resto del medio ve a una partícula que viaja a través de él *vestida (dressed)* por las interacciones con el grupo más cercano a ella. Gracias a esto podemos caracterizar al problema en términos de un sistema más simple hecho de cuasipartículas en sustitución del original, complejo, hecho de partículas. De hecho, los excitones y los polaritones también pueden ser pensados como cuasipartículas.

Las heteroestructuras de van der Waals permiten explorar diversos sistemas polaritónicos con interacciones fuertes y así generar novedosos tipos de cuasipartículas polaritónicas. Por ejemplo, recientemente se ha podido inyectar electrones itinerantes, es decir, un dopaje fuera de equilibrio, en un TMD dentro de una microcavidad empleando una capa de grafeno [véase la fig. 4(b)]. Los excitones-polaritones se sumergen en un gas bidimensional de electrones, también conocido como Mar de Fermi, en honor del italiano Enrico Fermi que en 1926 halló la ley estadística que los fermiones siguen a partir del principio de exclusión de Pauli, al mismo tiempo que el británico Paul Dirac. Dentro del gas de electrones, las interacciones fuertes hacen posible que los excitones-polaritones se vistan de ellos y forman lo que se conoce como polarón-polaritón (Bastarrachea-Magnani et al., 2021). El concepto de polarón fue desarrollado por el físico ruso Lev Landau en 1933 para comprender el movimiento de los electrones dentro de un sólido cristalino. Cuando el electrón se mueve produce deformaciones de la red cristalina porque los átomos vecinos que componen al sólido interactúan con él. El electrón se viste de las vibraciones del medio cristalino (los fonones) y esto le hace

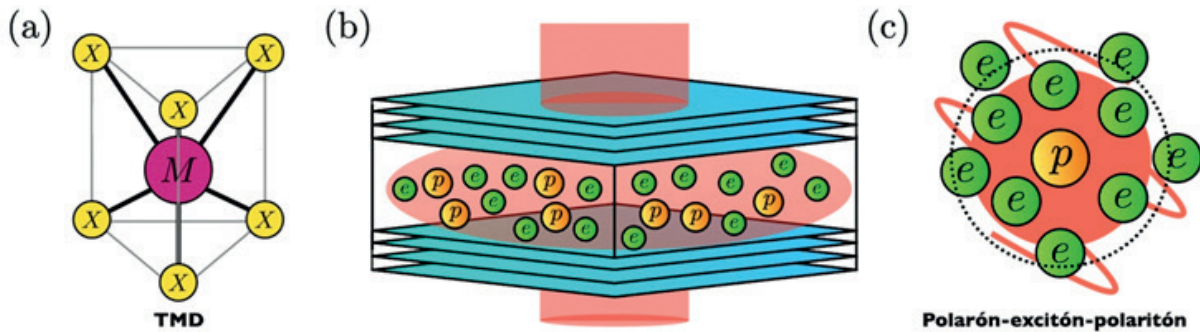


Figura 4. (a) Celda unitaria de un TMD. (b) Esquema de una microcavidad semiconductor donde los excitones-polaritones interactúan con electrones itinerantes. (c) Interpretación pictórica del polarón-excitón-polaritón.

ganar masa e interactuar de forma diferente con el medio circundante, entonces, se le piensa como un polarón. La teoría del polarón pasó del estado sólido a los gases cuánticos de la física atómica y, luego, a la física polaritónica. Entonces, decimos que un excitón-polaritón interactuando fuertemente con su medio se transforma en un polaron-polaritón de Fermi [véase la fig. 4 (c)]. En este caso, estamos transfiriendo al polaritón propiedades fermiónicas, cuando tanto el excitón como el fotón carecen de ellas siendo bosones. Esto abre una senda maravillosa y sugerente a la creación de una gran variedad de cuasipartículas y nuevos estados de la luz y de la materia. Por ejemplo, podemos sumergir a un excitón-polaritón dentro de un condensado de excitones-polaritones con un espín opuesto y entonces tendremos un polaron-polaritón de Bose. Y podemos seguir, ¿qué pasaría si mezclamos polarones de Bose y de Fermi? ¿Podemos agregar nuevas propiedades a la luz y diseñar nuevos materiales con efectos maravillosos?

En resumen, la alta sintonizabilidad de los excitones-polaritones interactuantes formados en microcavidades semiconductoras, los hace una plataforma versá-

til para explorar la creación de estados cuánticos con propiedades y aplicaciones novedosas. No sólo ofrecen una oportunidad para investigar la naturaleza fundamental de la luz y de la materia, sino también nos permiten diseñar nuevos estados cuánticos híbridos que no se encuentran directamente en la naturaleza como luz en forma condensada, superfluida y en formas más complejas e interesantes como polarones-polaritones de Fermi y de Bose, otros gases cuánticos de luz con propiedades exóticas e incluso complejos polaritónicos que incluyen moléculas de luz. Finalmente, los excitones-polaritones prometen impactar en las tecnologías cuánticas, no sólo a través de los efectos ópticos no lineales, también en el procesamiento de la información clásica y cuántica (Kavokin et al., 2022). Decimos entonces que, cuando hacemos que los fotones incidan en estos materiales cuánticos convirtiéndose en polaritones, es como si tuviésemos a nuestro alcance, al menos por un tiempo corto, luz líquida.

## Referencias

1. Basov, D. N., Asenjo-Garcia, A., James Schuck, P., Zhu, X., and Rubio, A. Polariton panorama, *Nanophotonics*; 10[2], pp.

- 549–577, 2021. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2020-0449>
2. Bastarrachea-Magnani, M. A., Camacho-Guardian, A. y Bruun, G. M., Attractive and Repulsive Exciton-Polariton Interactions Mediated by an Electron Gas, *Phys. Rev. Lett.* 126, pp. 127405, 2021. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.127405>
  3. Bloch, J, Carusotto, I., Wouters, M., Non-equilibrium Bose–Einstein condensation in photonic systems, *Nat. Rev. Phys.* 4, pp. 470-488, 2022. <https://www.nature.com/articles/s42254-022-00464-0>
  4. Carusotto, I y Ciuti, C., Quantum fluids of light, *Rev. Mod. Phys.* 85, pp. 299-366, 2013. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.85.299>
  5. Geim, A. K. y Grigorieva, I. V., Van der Waals heterostructures, *Nature* 499, pp. 419–425, 2013. <https://www.nature.com/articles/nature12385>
  6. Hopfield, J. J., Theory of the Contribution of Excitons to the Complex Dielectric Constant of Crystals, *Phys. Rev.* 112, pp. 1555-1567, 1958. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.112.1555>
  7. Gómez García, E. y Barberis Blostein, P. Iniciativa Mexicana en Tecnologías Cuánticas. Unidad de Publicaciones y Difusión del Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas, UNAM, Ciudad de México, 2023. <https://www.dicu.com.mx/imtc>
  8. Kavokin, A., Liew, T. C. H., Schneider, C., Lagoudakis, P. G., Klemmt, S., Hoefling, S., Polariton condensates for classical and quantum computing. *Nat. Rev. Phys.* 4, pp. 435-451, 2022. <https://www.nature.com/articles/nature12385>
  9. Luo, J., Close the gap in the US CHIPS and Science law, *Nature* 610, 34 (2022). <https://doi.org/10.1038/d41586-022-03122-8>
  10. Riedel, M., Kovacs, M., Zoller, P., Mlynek, J. y Calarco, T., Europe's Quantum Flagship initiative, *Quantum Sci. Tech.* 4 020501, 2019. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/ab042d>
- Lecturas recomendadas:**
1. Combescot, M. y Shiau, S.-Y., Excitons and Cooper Pairs. *Two Composite Bosons in Many-Body Physics*, Oxford University Press, Oxford, 2016.
  2. Haroche, S. y Raimond, J.-M., *Exploring the Quantum: Atoms, Cavities and Photons*, Oxford University Press, 2006.
  3. Kavokin, A. V., Baumberg, J. J., Malpuech, G., y Laussy, F. P., *Microcavities, Series on Semiconductor Science and Technology*, Oxford University Press, Oxford, 2017.
  4. Pethick, C. J. y Smith, H. *Bose-Einstein Condensation in Dilute Gases*, Cambridge University Press, Cambridge, 2008.
  5. Sakurai, J. J., y Napolitano, J., *Modern Quantum Mechanics*, Addison-Wesley, San Francisco, 2011.