Avance y Perspectiva

Revista de divulgación del CINVESTAV

Entrando a un nuevo reino cuántico

Karina Galache · Thursday, February 21st, 2019

Categorías: Ciencias Exactas, Zona Abierta

La interacción entre la luz y la materia, particularmente entre fotones y átomos, ha sido un componente fundamental del desarrollo científico, y al día de hoy, es actor principal en diversas áreas de la ciencia y la tecnología. Por ejemplo, la interacción luz-materia nos ha llevado a entender fenómenos fundamentales como la fluorescencia o la radiación; pero también nos ha ayudado en el desarrollo de láseres y LEDs, que son piezas fundamentales en las tecnologías actuales. De la misma manera, el estudio de la no-linealidad de la interacción luz-materia nos ha permitido incrementar los límites de la microscopía actual. En las siguientes décadas, la manipulación y control de esta importante interacción nos llevará a una nueva revolución científica con la implementación de protocolos de comunicación cuántica y de computadoras cuánticas [1].

En muchas de estas aplicaciones es de suma importancia que la interacción luz-materia sea lo más eficiente posible, sin introducir ruido no deseado en el sistema. Utilizando simplemente términos geométricos y a nivel de primera aproximación, la probabilidad de interacción entre un fotón (confinado en un modo de diámetro d) y un átomo es aproximadamente igual a $p = ?^2/d^2$, donde ? es la longitud de onda del fotón en resonancia. Esto se puede entender como si la probabilidad de interacción representara la “sombra” que el átomo produce sobre el haz de luz. Esta probabilidad, o “sombra”, es típicamente muy pequeña en el espacio libre ($p << 1$) debido a las propiedades intrínsecas de la luz y los átomos. Sin embargo, en muchas aplicaciones es necesario que el átomo logre “ocultar” casi toda la luz ($p \sim 1$). Para resolver este problema existen diversos métodos cada uno con diferentes ventajas y desventajas.

El método más directo es el de **enfocar** el haz de luz (disminuir d) a una escala menor que la de la longitud de onda ?. Este método es limitado dado que la difracción de la luz previene alcanzar tales escalas fácilmente. Aún así, ha sido posible alcanzar valores de probabilidad de interacción de hasta $p = 0.05$ para átomos neutros. En este método, uno de los principales problemas es que es muy difícil poder mantener una interacción homogénea sobre un ensamble o grupo de átomos.

Un método alternativo es el de la Electrodinámica Cuántica de Cavidades (**Cavity-QED**), que consiste en insertar el átomo en una cavidad óptica e incrementar el número de eventos de interacción debido al “atrapamiento” del fotón dentro de la cavidad. La probabilidad de interacción en este caso está amplificada por el número de reflexiones o “rebotes” que el fotón experimenta dentro de la cavidad antes de escapar. En este caso, la probabilidad de interacción puede llegar a un

valor unitario (p=1). Actualmente este método está siendo usado para estudiar interacciones con átomos artificiales como los puntos cuánticos en semiconductores (*quantum dots*) o los centros nitrógeno-vacante en diamantes (*nitrogen-vacancy centres*). Una de las desventajas de este método es la dificultad para extraer la señal dada la gran reflectividad interna de la cavidad.

En años recientes, la combinación de átomos y guías de onda de escala nanométrica ha atraído un gran interés, dando lugar a una área de investigación conocida como Electrodinámica Cuántica de Guías de Onda (**Waveguide QED**). En estos sistemas, la interacción átomo-fotón se incrementa debido al confinamiento de la luz en la dirección transversal a la propagación mediante una onda evanescente (disminuir d) y, en algunos casos adicionalmente a la manipulación de la dispersión de la luz (luz lenta). Estas plataformas integradas pueden dar mejor escalabilidad y rendimiento que aquellas implementaciones en espacio libre o cavidades. Por ejemplo, es posible interactuar múltiples átomos al mismo tiempo en un sólo paso (sin “rebotes”) y extraer la señal fácilmente y sin pérdidas. Eventualmente, estas plataformas darán lugar a tecnologías *en chip* para el futuro desarrollo de la computación cuántica. Pero, más interesante aún, pueden llevar a nuevos descubrimientos y aplicaciones de las interacciones átomo-fotón [2].

La Electrodinámica Cuántica de Guías de Onda ha dado lugar a experimentos muy exitosos recientemente. Por ejemplo, usando estas nuevas estructuras fotónicas es posible obtener probabilidades de interacción p = 0.10, es decir 10% del haz de luz es *bloqueado* por un sólo átomo, lo cual representa una “sombra” significativa. Resultados pioneros en el atrapamiento de átomos fríos alrededor de guías de onda ya han sido reportados [3,4]. Usando estos resultados como base, se han realizado memorias ópticas acopladas a fibras ópticas comerciales [5,6]. Más aún, se han podido observar efectos colectivos dentro de estos sistemas como son la reflexión de Bragg [7] y la super-emisión de radiación en átomos [8,9]. Sin embargo, la capacidad de preparar y manipular **estados no-clásicos** de ensambles atómicos no ha podido ser realizada hasta el momento.

En el número más reciente de la revista **Nature** [10], el autor de este texto, junto con otros investigadores del Laboratorio Kastler Brossel de la Universidad Sorbonne en Paris, reportamos un gran avance en el campo de Electrodinámica Cuántica de Guías de Onda. Usando un registro atómico compuesto de cadenas de átomos individuales de Cesio (Cs) atrapados alrededor de una nanofibra, nuestro equipo reporta la generación y almacenamiento de una excitación atómica individual en un ensamble atómico y su subsecuente emisión en la forma de un fotón único guiado por la nanofibra.

En el experimento, la nanofibra está fabricada de fibra óptica comercial pero su diámetro ha sido reducido localmente a unos 400 nm. Debido a estas dimensiones, una gran parte de la luz viaja fuera de la nanofibra en forma de un campo evanescente, el cual está fuertemente localizado sobre toda la longitud de la nanofibra (1 cm). Este campo evanescente es usado para atrapar alrededor de 2000 átomos de Cesio (Cs) a una distancia de 200 nm de la superficie de la nanofibra. La nanofibra está acoplada eficientemente a fibra óptica y presenta una transmisión total de la luz superior al 99%. La figura 1 muestra a la nanofibra dentro de una cámara de ultra alto vacío.

Figura 1. Foto de una nanofibra óptica (en rojo) dentro de la cámara de vacío. La nanofibra está acoplada al exterior mediante fibra óptica comercial. La transmisión total de la nanofibra es superior al 99%. Arreglos de átomos fríos individuales pueden ser atrapados alrededor de la nanofibra (~ 200 nm de la superficie) e interactúan con luz guiada a travez de la misma fibra. Esta interfaz es una gran

plataforma integrada para la ciencia de información cuántica y Electrodinámica Cuántica de Guías de Onda. Crédito: Laboratorio Kastler Brossel – Neil V. Corzo.

Todos los átomos atrapados están preparados inicialmente en un mismo nivel energético base. Posteriormente, un campo de “escritura” externo ilumina el sistema y provoca la dispersión de un sólo fotón. La detección de éste dentro de la fibra anuncia por lo tanto la creación de una excitación colectiva única compartida por toda la cadena atómica, es decir, uno de los átomos del ensamble ha pasado a un estado excitado, pero no es posible determinar exactamente cuál es. Esto provoca que el estado cuántico del sistema sea entonces una superposición cuántica fuertemente correlacionada con el fotón. Ver figura 2.

Figura 2. Usando átomos de Cesio (Cs) atrapados alrededor de una nanofibra, investigadores del Laboratorio Kastler Brossel reportan la generación del primer estado enredado de átomos acoplados a una guía de onda y la capacidad de leer esta superposición cuántica como un fotón único que viaja en la guía de onda. Crédito: Laboratorio Kastler Brossel – Neil V. Corzo.

Para recuperar la información almacenada, un campo de “lectura” externo es enviado al ensamble atómico. El fuerte acoplamiento entre la nanofibra y los átomos permite una transferencia eficiente de la excitación colectiva en un nuevo fotón único guiado por la fibra que viaja fuera del sistema. Este experimento está basado en la propuesta pionera Duan-Lukin-Cirac-Zoller para ensambles atómicos [11].

Nuestro trabajo representa un gran logro en el emergente campo de la Electrodinámica Cuántica de Guías de Onda, ya que proyecta, por primera vez, su gran capacidad al régimen cuántico. Este sistema por sí sólo tiene aplicaciones directas en el campo de redes cuánticas ya que representa un nodo cuántico funcional conectado eficientemente a fibras ópticas para su acoplamiento. Pero además, abre una ruta para nuevos estudios de óptica no lineal y física de muchos cuerpos (Many-Body physics). En un futuro cercano se podrán diseñar nuevas formas de interacción entre múltiples átomos mediadas por fotones guiados, y así simular sistemas cuánticos de muchos cuerpos y de largo alcance.

Neil Vladimir Corzo Trejo

Cinvestav, Unidad Querétaro

Bibliografía

[1] Kimble, H. J., The quantum internet. *Nature* **453**, 1023–1030 (2008).

[2] Chang, D.?E., Douglas, J.?S., González-Tudela, A., Hung, C.-L. & Kimble, H.?J., Quantum matter built from nanoscopic lattices of atoms and photons. *Rev. Mod. Phys.* **90**, 031002 (2018).

[3] Vetsch, E. et al., Optical interface created by laser-cooled atoms trapped in the evanescent

field surrounding an optical nanofiber. *Phys. Rev. Lett.* **104**, 203603 (2010).

[4] Goban, A. et al., Demonstration of a state-insensitive, compensated nanofiber trap. *Phys. Rev. Lett*. **109**, 033603 (2012).

[5] Goban, A. et al., Atom-light interactions in photonic crystals. *Nat. Commun*. **5**, 3808 (2014).

[6] Gouraud, B., Maxein, D., Nicolas, A., Morin, O. & Laurat, J. Demonstration of a memory for tightly guided light in an optical nanofiber. *Phys. Rev. Lett*. **114**, 180503 (2015).

[7] Goban, A. et al., Superradiance for atoms trapped along a photonic crystal waveguide. *Phys. Rev. Lett.* **115**, 063601 (2015).

[8] Solano, P., Barberis-Blostein, P., Fatemi, F. K., Orozco, L. A. & Rolston, S. L. Super-radiance reveals infinite-range dipole interactions through a nanofiber. *Nat. Commun*. **8**, 1857 (2017).

[9] Corzo, N. V. et al., Large Bragg reflection from one-dimensional chains of trapped atoms near a nanoscale waveguide. *Phys. Rev. Lett*. **117**, 133603 (2016).

[10] Corzo, N. V. et al., Waveguide-Couple Single Collective Excitation of Atomic Arrays, *Nature* **566**, 359–362 (2019).

[11] Duan, L.-M., Lukin, M. D., Cirac, J. I. & Zoller, P., Long-distance quantum communication with atomic ensembles and linear optics. *Nature* **414**, 413–418 (2001).

This entry was posted on Thursday, February 21st, 2019 at 5:06 pm and is filed under Ciencias Exactas, Zona Abierta
You can follow any responses to this entry through the Comments (RSS) feed. Both comments and pings are currently closed.