

Image not found

Primeros pasos hacia la realizacion de qubits mecanicos

Un equipo internacional de investigadores obtiene resultados experimentales que validan los primeros pasos hacia la realizacion de un qubit mecanico, utilizando un resonador mecanico acoplado a un transistor de un solo electron.

June 08, 2023

La informacion cuantica (QI) y su procesamiento podrian ser el proximo punto de inflexion tecnologico del futuro, al proporcionar capacidades computacionales, seguridad y sensibilidades de deteccion sin precedentes. El qubit, unidad basica de hardware, es el componente basico de los ordenadores cuanticos y el procesamiento de la informacion cuantica. Sin embargo, a dia de hoy, todavia existe mucho debate sobre que tipos de qubits son realmente los idoneos y mejores para tal tarea.

La investigacion y el desarrollo en este campo crecen a pasos agigantados, y tienen como objetivo dilucidar que sistema o plataforma podria superar al resto. Por mencionar algunas, plataformas tan diversas como aquellas hechas con materiales superconductores con uniones de Josephson, iones atrapados, qubits topologicos, atomos neutros ultrafrios o incluso diamantes con vacantes o vacios en su estructura, constituyen el catalogo de posibles candidatos para hacer qubits. Hasta ahora, solo un punado de plataformas han demostrado tener potencial para la computacion cuantica, cumpliendo todos los requisitos del listado de control en lo que se refiere a puertas o $i\frac{1}{2}$ gates $i\frac{1}{2}$ controlados de alta fidelidad, facil acoplamiento de sistemas qubit-qubit y buen aislamiento del entorno, lo que permita estados de coherencia suficientemente prolongados en el tiempo. Los resonadores nano-mecanicos son osciladores mecanicos, como los resortes y las cuerdas (por ejemplo, las cuerdas de guitarra) que, cuando se les perturba, crean sonidos armonicos o inarmonicos segun la fuerza de la perturbacion. Se ha visto que estos nano resonadores podrian ser parte del selecto grupo de plataformas para qubits cuando se enfria el resonador hasta llegar a una temperatura lo mas cerca del cero absoluto. Pero, ¿que sucede cuando enfriamos un nano resonador hasta el cero absoluto? Los niveles de energia del oscilador se cuantifican y el resonador vibra con su movimiento caracteristico del punto-cero. El movimiento del punto-cero surge del principio de incertidumbre de Heisenberg. En otras palabras, un resonador se mantiene en movimiento incluso cuando esta en el estado fundamental de energia. En este momento, la realizacion o fabricacion

Un qubit mecánico es posible si los niveles de energía cuantificados del resonador no están espaciados uniformemente. Es decir, el desafío es mantener los efectos no lineales lo suficientemente grandes en el régimen cuántico, donde el desplazamiento del punto cero del oscilador es minúsculo. Si esto se logra, entonces el sistema puede usarse como qubit manipulándolo entre los dos niveles cuánticos más bajos sin conducirlo a estados de energía más

altos. Durante muchos años, ha habido mucho interés en fabricar un sistema qubit con un resonador nanomecánico. En 2021, Fabio Pistolesi (Univ. Bordeaux-CNRS), Andrew N. Cleland (Univ. Chicago) y el Prof. de ICFO Adrian Bachtold, establecieron un **concepto teórico de un qubit mecánico**, basado en un resonador de nanotubos acoplado a un doble punto cuántico bajo un régimen de acoplamiento ultra-fuerte. Estos resultados teóricos demostraron que estos resonadores nanomecánicos podrían convertirse en candidatos ideales para qubits, ya que tenían largos tiempos de coherencia, un "sí o sí" definitivo para la computación cuántica.

Habiendo establecido un marco teórico con el cual trabajar, ahora el desafío era fabricar un qubit a partir de un resonador mecánico y encontrar las condiciones y los parámetros apropiados para controlar las no linealidades en el sistema.

Después de varios años de trabajo exhaustivo con estos sistemas, los desafíos de realizarlos experimentalmente han dado su primera luz verde. En un estudio reciente publicado en Nature Physics, los investigadores del ICFO **Chandan Samanta, Sergio Lucio de Bonis, Christoffer Moller, Roger Tormo-Queralt, W. Yang, Carles Urgell**, dirigidos por el Prof. del ICFO **Adrian Bachtold**, en colaboración con los investigadores B. Stamenic y B. Thibault de la Universidad de California Santa Barbara, Y. Jin de la Université Paris-Saclay-CNRS, D.A. Czaplewski del Laboratorio Nacional de Argonne y F. Pistolesi de la Univ. Bordeaux-CNRS han logrado los primeros pasos pre-experimentales para la futura realización de un qubit mecánico al demostrar un nuevo mecanismo para aumentar la inarmonía de un oscilador mecánico en su régimen cuántico.

El experimento: inarmonía de ingeniería cerca del estado fundamental

El equipo de investigadores fabricó un dispositivo de nanotubos de aproximadamente 1,4 micrómetros de longitud, suspendido con sus extremos enganchados en los bordes de dos electrodos. Seguidamente, definieron un punto cuántico, un sistema electrónico de dos niveles en el nanotubo vibrante, mediante la creación electrostática de uniones de túnel en ambos extremos del nanotubo suspendido. Luego, al ajustar el voltaje en el electrodo de la puerta de entrada, permitieron el flujo de **un solo electrón** a la vez en el nanotubo. El movimiento mecánico del nanotubo se acopló al electrón único en un régimen conocido como **efecto túnel de un solo electrón**. Este acoplamiento electromecánico creó la inarmonía buscada en el sistema mecánico. Luego, fueron reduciendo la temperatura hasta llegar a milikelvins, casi el cero absoluto, haciendo entrar al sistema en un régimen

de acoplamiento ultra-fuerte en el que cada electron adicional en el nanotubo lograba desplazar la posición de equilibrio del nanotubo lejos de su amplitud del punto-cero. Con una amplitud de solo un factor de 13 sobre el movimiento del punto-cero, pudieron notar estas vibraciones no lineales. Los resultados son asombrosos, porque las vibraciones presentes en otros resonadores, enfriados hasta el estado fundamental cuantico, demostraron ser no lineales en amplitudes aproximadamente 10^6 veces mayores respecto su movimiento de punto-cero.

Este nuevo mecanismo muestra una física destacable detrás, ya que al contrario de lo que se esperaba, la inarmonía aumenta a medida que las vibraciones se enfrían más cerca del estado fundamental. Esto es justo lo opuesto a lo que se había observado hasta ahora en todos los demás sistemas de resonadores mecánicos. Tal y como comenta el primer autor del estudio Chandan Samanta, ¿cuando los investigadores comenzaron a estudiar los resonadores nanomecánicos, una pregunta recurrente era si sería posible lograr efectos no lineales en las vibraciones que se encuentran en el estado fundamental cuantico. Algunos investigadores líderes en el campo argumentaron que esto sería un desafío considerable debido a las limitaciones tecnológicas, y esta creencia se ha mantenido como el paradigma aceptado hasta ahora. En este contexto, nuestro trabajo representa un avance conceptual muy significativo porque demostramos que las vibraciones no lineales en el régimen cuantico son alcanzables. Estamos seguros de que los efectos no lineales podrían haberse mejorado aún más al acercarse al estado fundamental cuantico, pero estábamos limitados por la temperatura de nuestro criostato actual. Nuestro trabajo ha demostrado proporcionar una hoja de ruta para lograr las vibraciones no lineales en el régimen cuantico?

Al contrario de lo que se ha observado hasta ahora en otros resonadores mecánicos el equipo de investigadores encontró un método para aumentar la inarmonía de un oscilador mecánico cerca de su régimen cuantico. Los resultados de este estudio establecen los primeros pasos importantes para el desarrollo futuro de qubits mecánicos o incluso de simuladores cuánticos.

Como concluye Adrian Bachtold: Es notable que entramos en un régimen de acoplamiento ultrafuerte y observamos una fuerte inarmonía en el resonador. Pero la tasa de amortiguamiento se vuelve grande a bajas temperaturas debido al acoplamiento del resonador a un punto cuántico. En futuros experimentos que involucren el estudio de estados cati y qubits mecánicos, será ventajoso acoplar vibraciones de nanotubos a un punto cuántico doble, ya que permite fuertes no linealidades junto con estados mecánicos de larga duración. La amortiguación que surge del electron en el punto cuántico doble se suprime exponencialmente a baja temperatura, por lo que debería ser posible lograr una tasa de amortiguación de 10 Hz medida en nanotubos a baja temperatura.

Image not found

De izquierda a derecha: El Prof. del ICFO y líder del grupo Adrian Bachtold, Christoffer Moller, Chandan Samanta, Sergio Lucio de Bonis y Roger Tormo-Queralt en uno de los laboratorios del grupo en el ICFO