



1821 Universidad de Buenos Aires

Resolución Consejo Directivo

Número: RESCD-2023-54-E-UBA-DCT#FCEN

CIUDAD DE BUENOS AIRES

Viernes 17 de Febrero de 2023

Referencia: EX-2022-07223523- -UBA-DMESA#FCEN - POSTGRADO - SESIÓN
13/02/2023

VISTO:

La nota presentada por la Dirección del Departamento de Física, mediante la cual eleva la información del curso de posgrado Electrodinámica Cuántica de Circuitos para el año 2023,

CONSIDERANDO:

lo actuado por la Comisión de Doctorado,

lo actuado por este Cuerpo en la sesión realizada en el día de la fecha 13 de febrero de 2023

en uso de las atribuciones que le confiere el Artículo 113° del Estatuto Universitario,

**EL CONSEJO DIRECTIVO DE LA FACULTAD
DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES**

R E S U E L V E:

ARTÍCULO 1º: Aprobar el nuevo curso de posgrado Electrodinámica Cuántica de Circuitos de 160 horas de duración, que será dictado por el Dr. Fernando Lombardo.

ARTÍCULO 2º: Aprobar el programa del curso de posgrado Electrodinámica Cuántica de Circuitos que como anexo forma parte de la presente Resolución, para su dictado en el primer cuatrimestre de 2023.

ARTÍCULO 3º: Aprobar un puntaje máximo de cinco (5) puntos para la Carrera del Doctorado.

ARTÍCULO 4º: Establecer que el presente curso no será arancelado (CATEGORÍA 1).

ARTÍCULO 5º: Disponer que de no mediar modificaciones en el programa, la carga horaria y el arancel, el presente Curso de Posgrado tendrá una vigencia de cinco (5) años a partir de la fecha de la presente Resolución.

ARTÍCULO 6º: Comuníquese a todos los Departamentos Docentes, a la Dirección de Estudiantes y Graduados, a la Dirección de Movimiento de Fondos, a la Dirección de Presupuesto y Contabilidad, a la Biblioteca de la FCEyN y a la Secretaría de Posgrado con copia del programa incluida. Cumplido, pase a FÍSICA#FCEN y resérvese.

ANEXO

Programa

Electrodinámica cuántica de circuitos

La presente propuesta está relacionada con la creación de una materia optativa de grado en el ámbito del Departamento de Física de la FCEyN - UBA (que también puede acreditarse como curso válido para la Carrera de Doctorado en Física) llamada Electrodinámica cuántica de circuitos. Esta materia abarca temas de mucho interés en diversas ramas de la Física, y puede ser dictada a un nivel que permita acercar a los estudiantes al estado actual de investigación en este campo, introduciendo, a la vez, conceptos básicos que no están incluidos en las materias obligatorias.

La electrodinámica cuántica de circuitos (cQED) se ha convertido recientemente en la arquitectura líder para la computación cuántica. En este tipo de configuración, se puede controlar la interacción entre los sistemas cuánticos de dos niveles y el campo electromagnético. Los fotones se almacenan en un chip-resonador de radio frecuencia y los qubits están representados por SQUIDs cuya interacción con la cavidad se puede controlar con alta precisión. El campo de cQED supera a otras tecnologías ya que admite una gama más amplia de fuerzas, frecuencias de acoplamiento y flexibilidad de diseño. cQED ha florecido recientemente con las tecnologías emergentes para la ingeniería cuántica no solo por los éxitos alcanzados en la manipulación y medición sino también por sus propiedades de escalabilidad. La implementación de cQED es, de hecho, la posibilidad para lograr computación cuántica y ya se ha utilizado para manipular decenas de qubits realizando tareas que acercan esta tecnología al objetivo de la supremacía cuántica.

Los qubits basados en circuitos superconductores se caracterizan por poseer una alta coherencia cuántica y una excelente integrabilidad a gran escala por ser sistemas de estado sólido. Por otra parte, los fotones son claramente el medio más eficaz para transmitir información cuántica entre distintos qubits. Es por ello que resulta crucial poder integrar la interacción de dispositivos de qubits con la posibilidad de entrelazar su estado con el estado de uno o varias fotones.

La mayoría de los dispositivos nanoscópicos superconductores consisten en circuitos ultrapequeños de junturas Josephson, destacándose el qubit de carga, el qubit de flujo, y el qubit de fase. En todos ellos su funcionamiento se aparta del "qubit ideal" debido a (i) que son sistemas abiertos (influye el efecto del entorno: circuito externo, campos electromagnéticos, y ruido en general) y (ii) al hecho de que los dispositivos empleados tienen más de dos niveles cuánticos; ambos problemas afectan los tiempos de decoherencia del circuito. El desafío experimental ha sido entonces diseñar un dispositivo cuya dinámica de bajas energías se reduzca a dos niveles cuánticos cuyo estado pueda ser medido confiablemente, que puedan ser acoplados de manera controlada con otros qubits, que su dinámica esté lo suficientemente protegida de los efectos de ruido del entorno, y que puedan ser escaleados a un gran número de qubits. Los sistemas superconductores tienen el potencial de poder realizar la ingeniería de una computadora cuántica integrando todos los ingredientes necesarios en un circuito eléctrico que puede ser fabricado mediante técnicas estándar de litografía. En los últimos años se ha seguido el camino de implementar lo que se denomina "circuit quantum electrodynamics" (cQED). Esto consiste en acoplar qubits superconductores con fotones de frecuencia del rango de microondas, trayendo así la óptica cuántica al ámbito de un circuito de estado sólido. Este tipo de circuitos está inspirado en la "cavity quantum electrodynamics", i.e. electrodinámica cuántica en cavidades. La misma consiste en

átomos individuales que pasan por una cavidad Fabry-Perot e interactúan coherentemente con fotones que pueden ser del rango óptico o de microondas (experimentos desarrollados por S. Haroche y otros). En su versión más simple, se describe mediante el modelo de Jaynes-Cummings, que acopla un sistema de dos niveles con un oscilador armónico. En el caso de circuitos, i.e., cQED, la cavidad Fabry-Perot es reemplazada por una co-planar wave guide transmission line resonator (guía de onda coplanar o CPW), y el átomo, por un qubit superconductor, que se comporta como un átomo artificial. La CPW es fabricada típicamente también con un material superconductor, por lo que la disipación es despreciable y por ende el factor de calidad Q de la misma es muy alto. Hendiduras en la línea de transmisión actúan como los espejos de la cavidad, dando lugar a que la radiación de microondas forme ondas estacionarias. Más allá de los detalles del circuito, el resultado es que es posible fabricar dispositivos donde los parámetros del Hamiltoniano de Jaynes-Cummings pueden ser diseñados

específicamente, tanto la magnitud del acoplamiento como los parámetros del "átomo artificial" representado por el dispositivo del qubit. Es posible además, acoplar varios qubits entre sí a través de la línea de transmisión CPW.

También se ha utilizado cQED para probar las ideas principales sobre la corrección de errores cuánticos e implementar arquitecturas tolerantes a fallas. El cQED se ha utilizado para simular fenómenos cuánticos en física de la materia condensada, como redes topológicas y sistemas fuertemente interactuantes. También se ha utilizado para probar la idea detrás del efecto Casimir dinámico (DCE) que se sabe que ocurre cuando un espejo oscila de forma no adiabática generando un flujo de fotones desde un estado de vacío inicial.

Electrodinámica cuántica de circuitos será una materia de ocho horas semanales, dividida en dos días por semana, donde habrá dos horas dedicadas a las clases teóricas, y otras dos horas de problemas y consultas cada día. De esta manera, el curso otorgará el máximo puntaje tanto como materia de grado como curso para el Doctorado (5 puntos). El sistema de evaluación consistirá de una entrega de problemas, correspondientes a una guía de ejercicios seleccionados a tal fin. Luego, habrá un examen final. La exigencia en la evaluación será diferencial, respecto a los alumnos de grado y los de doctorado. A continuación desarrollará el programa de la materia. El curso está diagramado para dictarse a lo largo de las 16 semanas de un cuatrimestre típico en la FCEyN.

Electrodinámica cuántica de circuitos

Programa

Correlatividades: Física Teórica 1 y Física Teórica 2

1. Introducci3n

2.1 Cuantizaci3n can3nica

2.2.1 Ecuaciones de Hamilton

2.2.2 Observables cu3nticos

2.2.3 Evoluci3n unitaria

2.2 Sistema de dos niveles - Generadores de SU2 - Esfera de Bloch

2.3 Matriz densidad

2.4 Mediciones

2. Electrodin3mica cu3ntica en cavidades

3.5 Cuantizaci3n del campo electromagn3tico

3.6 Interacci3n luz-materia: fotones en cavidades

3.7 El modelo de Jaynes-Cummings

3. Superconductividad

4.8 Modelo microsc3pico

4.9 Modelo macrosc3pico cu3ntico

4.10 Corriente superfluída

4.11 Fase superconductora

4.12 Fase invariante de gauge

4.13 Cuantizaci3n

4.14 Junturas Josephson

4. Teorí3 de circuitos cu3nticos

5.15 Introducci3n

5.16.4 Qu3 hace y como funciona un circuito cu3ntico

- 5.16 Elementos del circuito
 - 5.17.5 Capacitor
 - 5.17.6 Inductor
 - 5.17.7 Junturas Josephson o inductores no-lineales
 - 5.17.8 Otros elementos
- 5.17 Procedimientos de cuantización
- 5.18 Resonador LC
- 5.19 Líneas de transmisión
- 5.20 Qubits: transmones y de carga
- 5.21 SQUIDs (rf y dc) y átomos artificiales
- 5.22 Qubit de flujo
- 5.23 Representación número-fase
- 5. Fotones de microondas
 - 6.24 Resonador LC
 - 6.25.9 Cuantización de la energía y fotones
 - 6.25.10 Diagonalización del Hamiltoniano
 - 6.25.11 Dinámica en el espacio de fases
 - 6.25.12 Son fotones reales?
 - 6.25 Líneas de transmisión o guías de ondas
 - 6.26.13 Condiciones de contorno periódicas
 - 6.26.14 Cavidades de microondas: $\lambda/2$ y $\lambda/4$.
 - 6.26.15 Cavidades sintonizables
 - 6.26 Cavidades tridimensionales
 - 6.27 Estados de fotones

- 6.28.16 Estados de Fock
- 6.28.17 Estados térmicos y coherentes
- 6.28.18 Estados gato de Schroedinger
- 6.28.19 Estados squeezed multimodos
- 6.28 Control Gaussiano de fotones de microondas
- 6.29.20 Driving coherente
- 6.29.21 Acoplamiento al entorno - Sistemas cuánticos abiertos - Ecuaciones maestras
- 6.29.22 Pérdidas
- 6.29.23 Amplificación
- 6.29.24 Medición de cuadraturas
- 6. Qubits superconductores
- 7.29 Qué es un qubit?
- 7.30.25 Hamiltoniano de un qubit
- 7.30.26 Representación de interacción
- 7.30.27 Decoherencia y dephasing
- 7.30.28 Relajación
- 7.30 Qubits de carga
- 7.31 Qubit transmon
- 7.32 Qubit de flujo
- 7.33 Interacción qubit-qubit
- 7.34 Coherencia en el qubit
- 7. Interacción Qubit-fotón
- 8.35 Modelos de interacción qubit-línea
- 8.36.29 Interacción dipolar

- 8.36.30 Hamiltoniano spin-bosón
- 8.36.31 Aproximación de onda rotante
- 8.36 QED en guía de ondas
- 8.37 QED en cavidades
- 8.38.32 Modelos de Rabi y Jaynes-Cummings
- 8.38 Control de cQED
- 8.39.33 Generación de un fotón
- 8.39.34 Gatos de Schroedinger en cavidades
- 8. Acoplamiento al mundo exterior
- 9.39 Cableado de sistemas cuánticos con líneas de transmisión
- 9.40 Teoría input-output
- 9.41 Relajación y dephasing del qubit
- 9.42 Disipación en el régimen dispersivo
- 9. Computación cuántica
- 10.43 Modelo de circuito cuántico
- 10.44 Tomografía
- 10.45 Modelo de errores
- 10.46 Computación adiabática
- 10.47 Landau-Zener y control adiabático

Bibliografía

Quantum Information and Quantum Optics with Superconducting Circuits; Juan José García Ripoll; Cambridge University Press (2022).

The Theory of Open Quantum Systems; H. Breuer & F. Petruccione; Oxford University Press (2003)

Circuit Quantum Electrodynamics; Alexandre Blais, Arne L. Grimsmo, S. M. Girvin & Andreas Wallraff Rev. Mod. Phys. 93, 025005 (2021)

Atomic physics and quantum optics using superconducting circuits; J. Q. You & F. Nori, Nature 474, 589-597 (2011)

Superconducting quantum bits; J. Clarke & F. Wilhelm, Nature 453, 1031 (2008)

C. M. Wilson, G. Johansson, A. Pourkabirian, M. Simoen, J. R. Johansson, T. Duty, F. Nori &

P. Delsing, Nature (London) 479, 376 (2011)

F.C. Lombardo, F.D. Mazzitelli, A. Soba & P.I. Villar, Phys. Rev. A 98, 022512 (2018); P.I. Villar & A. Soba, Phys. Rev. E 96, 013307 (2017); P.I. Villar, A. Soba & F.C. Lombardo, Phys. Rev. A 95, 032115 (2017)

J. R. Johansson, G. Johansson, C. M. Wilson & F. Nori, Phys. Rev. Lett. 103, 147003 (2009);

J. R. Johansson, G. Johansson, C. M. Wilson & F. Nori, Phys. Rev. A 82, 052509 (2010)

Digitally signed by MARTI Marcelo Adrian
Date: 2023.02.16 15:22:27 ART
Location: Ciudad Autónoma de Buenos Aires

Marcelo Marti
Secretario
Secretaría de Posgrado
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Digitally signed by DURAN Guillermo Alfredo
Date: 2023.02.17 10:37:09 ART
Location: Ciudad Autónoma de Buenos Aires

Guillermo Alfredo Duran
Decano
Decanato
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales