



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 113º 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 FISICA#FCEN y resérvese.

## **ANEXO**

### **Programa**

#### **Electrodinámica cuántica de circuitos**

La presente propuesta est\'a relacionada con la creaci\'on de una materia optativa de grado en el \'ambito del Departamento de F\'isica de la FCEyN - UBA (que tambi\'en puede acreditarse como curso v\'alido para la Carrera de Doctorado en F\'isica) llamada Electrodin\'amica cu\'antica de circuitos. Esta materia abarca temas de mucho inter\'es en diversas ramas de la F\'isica, y puede ser dictada a un nivel que permita acercar a los estudiantes al estado actual de investigaci\'on en este campo, introduciendo, a la vez, conceptos b\'asicos que no est\'an inclu\'idos en las materias obligatorias.

La electrodin\'amica cu\'antica de circuitos (cQED) se ha convertido recientemente en la arquitectura l\'ider para la computaci\'on cu\'antica. En este tipo de configuraci\'on, se puede controlar la interacci\'on entre los sistemas cu\'anticos de dos niveles y el campo electromagn\'etico. Los fotones se almacenan en un chip-resonador de radio frecuencia y los qubits est\'an representados por SQUIDs cuya interacci\'on con la cavidad se puede controlar con alta precisi\'on. El campo de cQED supera a otras tecnolog\'ias ya que admite una gama m\'as amplia de fuerzas, frecuencias de acoplamiento y flexibilidad de dise\'no. cQED ha florecido recientemente con las tecnolog\'ias emergentes para la ingenier\'ia cu\'antica no solo por los \'exitos alcanzados en la manipulaci\'on y medici\'on sino tambi\'en por sus propiedades de escalabilidad. La implementaci\'on de cQED es, de hecho, la posibilidad para lograr computaci\'on cu\'antica y ya se ha utilizado para manipular decenas de qubits realizando tareas que acercan esta tecnolog\'ia al objetivo de la supremac\'ia cu\'antica.

Los qubits basados en circuitos superconductores se caracterizan por poseer una alta coherencia cu\'antica y una excelente integrabilidad a gran escala por ser sistemas de estado s\'olido. Por otra parte, los fotones son claramente el medio m\'as eficaz para transmitir informaci\'on cu\'antica entre distintos qubits. Es por ello que resulta crucial poder integrar la interacci\'on 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 juntas 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 escalados 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 desarrollaré 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. Introducción

2.1 Cuantización canónica

2.2.1 Ecuaciones de Hamilton

2.2.2 Observables cuánticos

2.2.3 Evolución unitaria

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

2.3 Matriz densidad

2.4 Mediciones

2. Electrodinámica cuántica en cavidades

3.5 Cuantización del campo electromagnético

3.6 Interacción luz-materia: fotones en cavidades

3.7 El modelo de Jaynes-Cummings

3. Superconductividad

4.8 Modelo microscópico

4.9 Modelo macroscópico cuántico

4.10 Corriente superfluída

4.11 Fase superconductora

4.12 Fase invariante de gauge

4.13 Cuantización

4.14 Junturas Josephson

4. Teoría de circuitos cuánticos

5.15 Introducción

5.16.4 ¿Qué hace y cómo funciona un circuito cuántico

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 cuantizaci'on

5.18 Resonador LC

5.19 L'ineas de transmisi'on

5.20 Qubits: transmones y de carga

5.21 SQUIDs (rf y dc) y 'atomos artificiales

5.22 Qubit de flujo

5.23 Representaci'on nu'mero-fase

5. Fotones de microondas

6.24 Resonador LC

6.25.9 Cuantizaci'on de la energ'ia y fotones

6.25.10 Diagonalizaci'on del Hamiltoniano

6.25.11 Din'ammica en el espacio de fases

6.25.12 Son fotones reales?

6.25 L'ineas de transmisi'on o gu'ias de ondas

6.26.13 Condiciones de contorno peri'odicas

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 Martí  
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