

# Escuela José A. Balseiro 2023 en “Tecnologías Cuánticas: Fundamentos y Aplicaciones” 25 de septiembre – 20 de octubre 2023

## Programa

### **Semana 1 (25-29 septiembre): FUNDAMENTOS**

*Fundamentos I*, Maria Jose Sanchez, L. Tosi, L. Bruegevin

*Sistemas Cuánticos Abiertos*, Daniel Dominguez, A. Zwick

*Fundamentos II*, Augusto Roncaglia (FCEyN, UBA), L. Tosi, L. Bruegevin, V. Reparaz

*Óptica Cuántica*, Cecilia Cormick (FAMAF, UNCordoba), I. Pappuccio, A. Reynoso

### **Semana 2 ( 2-6 octubre): PLATAFORMAS**

*Circuitos Superconductores*, Leandro Tosi, D. Chafatinos, K. Ramos

*Espines y Centros NV*, Gonzalo Alvarez, A. Zwick, I. Lembo, M. Avellaneda

*Átomos Fríos e Iones Atrapados*, Christian Schmiegelow (FCEyN, UBA), I. Carraro, F. Divi

*Fotones y Comunicación Cuántica*, Miguel Larotonda (CITEDEF), A. Bruchhausen, L. Tosi

### **Semana 3 (9-13 octubre): APLICACIONES**

*Sensores Cuánticos*, Gonzalo Alvarez, Leandro Tosi

*Optomecánica Cuántica*, Alejandro Fainstein, A. Reynoso, Axel Bruchhausen, D. Chafatinos

*Corrección Cuántica de Errores*, Fernando Pastawski (PsiQuantum), R. Somma, A. Di Paolo

*Algoritmos Cuánticos*, Rolando Somma (Google), F. Pastawski, A Di Paolo

*Procesadores Superconductores*, Agustin Di Paolo, Yuri Lensky (Google), R. Somma, F. Pastawski

*Termodinámica Cuántica*

Liliana Arrachea (ICAS, UNSaM), L. Tosi

### **Semana 4 (16-20 octubre): HANDS-ON**

#### **Actividades de Laboratorio**

- Alex Fainstein y Axel Bruchhausen
- Diego Grosz
- Leandro Tosi
- Gonzalo Álvarez
- Daniel Domínguez y Majo Sánchez
- Diego Pérez y Leonardo Salazar

#### **SEMINARIOS**

Yanina Fasano (IB)

Diego Grosz (Instituto Balseiro)

Carlos Balseiro (IB) -- A confirmar

Juan Pablo Paz (Fac. Cs Exactas y Naturales, UBA) -- A confirmar

## CALENDARIO

<b>Semana 1 (25-29 sept ), 9.00-12:30hs</b>				
lunes 25/9	martes 26/9	miércoles 27/9	jueves 28/9	viernes 29/9
FUNDAMENTOS I (MJ Sanchez)	SISTEMAS CUÁNTICOS ABIERTOS (D. Dominguez)	SISTEMAS CUÁNTICOS ABIERTOS (D. Dominguez)	FUNDAMENTOS II (A. Roncaglia)	FUNDAMENTOS II (A. Roncaglia)
<b>14.00-17:30hs</b>				
lunes 25/9	martes 26/9	miércoles 27/9	jueves 28/9	viernes 29/9
FUNDAMENTOS I (MJ Sanchez)	FUNDAMENTOS I (MJ Sanchez)	OPTICA CUANTICA (C. Cormick)	OPTICA CUANTICA (C. Cormick)	OPTICA CUANTICA (C. Cormick)
<b>Semana 2 (2-6 oct), 9.00-12:30hs</b>				
lunes 2/10	martes 3/10	miércoles 4/10	jueves 5/10	viernes 6/10
CIRCUITOS SUPERCONDUCTORES (L.Tosi)	CIRCUITOS SUPERCONDUCTORES (L.Tosi)	CIRCUITOS SUPERCONDUCTORES (L.Tosi)	ESPINES y CENTROS NV (G. Alvarez)	ESPINES y CENTROS NV (G. Alvarez)
<b>14.00-17:30hs</b>				
lunes 2/10	martes 3/10	miércoles 4/10	jueves 5/10	viernes 6/10
ÁTOMOS FRÍOS e IONES ATRAPADOS (C. Schmiegelow)	ÁTOMOS FRÍOS e IONES ATRAPADOS (C. Schmiegelow)	ÁTOMOS FRÍOS e IONES ATRAPADOS (C. Schmiegelow)	FOTONES (M. Larrotonda)	FOTONES (M. Larrotonda)
<b>Semana 3 (9-13 oct), 9.00-12:30hs</b>				
lunes 9/10	martes 10/10	miércoles 11/10	jueves 12/10	viernes 13/10
SENSORES CUÁNTICOS (G. Alvarez, L.Tosi)	PROCESADORES SUPERCOND. (A. DiPaolo, Y. Lensky)	PROCESADORES SUPERCOND. (A. DiPaolo, Y. Lensky)	TERMODINÁMICA CUÁNTICA (L. Arrachea)	TERMODINÁMICA CUÁNTICA (L. Arrachea)
<b>14.00-17:30hs</b>				
lunes 9/10	martes 10/10	miércoles 11/10	jueves 12/10	viernes 13/10
OPTOMECAÁNICA CUÁNTICA (A. Fainstein)	CORRECCIÓN DE ERRORES CUANTICOS (F. Pastawski)	CORRECCIÓN DE ERRORES CUANTICOS (F. Pastawski)	ALGORITMOS CUÁNTICOS (R. Somma)	ALGORITMOS CUÁNTICOS (R. Somma)
<b>Semana 4 (16-20 oct) 9.00-12.30</b>				
lunes 16/10	martes 17/10	miércoles 18/10	jueves 19/10	viernes 20/10
LABORATORIO	LABORATORIO	LABORATORIO	EXAMEN	PREP POSTERS
<b>14.30-17.30hs</b>				
LABORATORIO	LABORATORIO	LABORATORIO	LIBRE	POSTERS

Seminarios Avanzados. 12.00-13.00hs.

## **PROGRAMA DETALLADO**

**\*\*Nombre del Curso:** Fundamentos I

**Docente:** María José Sánchez

**Ayudantes:** Leandro Tosi, Lucas Brugevin

**Cantidad de horas:** 10.5hs, 3 clases

**Breve Resumen del Curso:**

**Programa:**

C1) Repaso de Evolución temporal. Representaciones de Schrödinger, Heisenberg e interacción. Teoría de perturbaciones dependientes del tiempo. Perturbación armónica.

C2) Operador densidad. Estados puros y mixtos. Operador densidad en la base del operador posición. Ecuación de von Neumann. Matriz densidad reducida.

C3) Sistemas de dos niveles : Qubits. Esfera de Bloch. Compuertas cuánticas de un qubit. Aproximación de onda rotante.

Breve introducción a efectos de relajación y decoherencia.

**Bibliografía**

[1] J.J. Sakurai, "Modern Quantum Mechanics"

[2] B.H. Bransden & Joachim "Quantum Mechanics"

[3] Chuang & Nielsen, "Quantum computation and Quantum information"

**Pre-requisitos:**

Conceptos básicos de mecánica cuántica. Notación de Dirac. Representación matricial. Matrices de Pauli. Formalismo de Schrödinger. Oscilador armónico cuántico. Operadores de creación y destrucción. Teoría de perturbaciones independientes del tiempo.

-----

**\*\*Nombre del Curso:** Sistemas Cuánticos Abiertos

**Docente:** Daniel Dominguez

**Ayudantes:** Analia Zwick, Leandro Tosi

**Cantidad de horas:** 7hs. 2 clases

**Breve Resumen del Curso:**

Se describirán conceptos básicos de sistemas cuánticos abiertos con énfasis en las aplicaciones usuales en modelado de implementaciones físicas de qubits.

**Programa:**

**Día 1:** Definición de sistemas abiertos. Matriz densidad reducida. Ruido cuántico. Ecuación maestra cuántica (aproximaciones de Born y Markov). Relajación y decoherencia.

**Día 2:** Representación de Krauss. Ecuación de de Linblad. Aplicaciones en sistemas de 2 niveles, T1 y T2 y modelos fenomenológicos de ruido en qubits físicos.

**Bibliografía**

- Cohen-Tanoudji et al, Quantum Mechanics, 2da edicion. Libro II, Capit XIII.E-2 (Random perturbations) y Comp. EXIII.
- Le Bellac. Quantum Physics. Capit 15 (secciones 15.2, 15.3 y 15.4)
- Auletta et al, Quantum Mechanics, Capit 14 (secciones 14.2 y 14.3)

-----

**\*\*Nombre del Curso: Fundamentos II**

**Docente:** Augusto Roncaglia (Fac. Ciencias Exactas y Naturales, UBA)

**Ayudantes:** Leandro Tosi, Lucas Brugevin, Valentín Reparaz

**Cantidad de horas:** 7hs, 2 clases

**Breve Resumen del Curso:**

Introducción al entrelazamiento

**Programa:**

Introducción al entrelazamiento. Entrelazamiento para estados puros y descomposición de Schmidt. Ejemplo: sistemas de dos niveles, Base de Bell. Aplicaciones y propiedades: Teleportación, intercambio de entrelazamiento, codificación densa, desigualdades de Bell. Estados mixtos y separabilidad. Medidas y criterios de entrelazamiento.

**Bibliografía**

[1] M. Nielsen and I. Chuang, "Quantum Computation and Quantum Information"

[2] J. Preskill, Lecture Notes Quantum Information and Computation.

[3] R. Horodecki, P. Horodecki, M. Horodecki, and K. Horodecki, Quantum entanglement, Rev. Mod. Phys. 81, 865, (2009).

**Pre-requisitos:**

Conceptos básicos de mecánica cuántica: estados puros y mixtos, espacio producto tensorial, transformaciones unitarias (en particular sería bueno que ya hayan visto las transformaciones básicas de dos qubits: rotaciones, Hadamard, CNOT, sino lo incluyo), concepto de medición.

-----

**\*\*Nombre del Curso: Óptica Cuántica**

**Docente:** Cecilia Cormick (FAMAF, Universidad Nacional de Cordoba)

**Ayudantes:** Andrés Reynoso, Ignacio Pappuccio

**Cantidad de horas:** 10.hs (3 clases)

**Breve Resumen del Curso:**

El curso cubrirá temas relacionados con la descripción teórica (muy simplificada) de átomos ultrafríos interactuando con campos electromagnéticos. Estos últimos se tratarán primero clásicamente y luego en forma cuantizada. Se discutirán casos de átomos reducidos a sistemas de dos o tres niveles, comentando las aproximaciones realizadas, bajo la acción de láseres o dentro de cavidades ópticas. Se espera que estas clases permitan comprender a nivel básico algunos fenómenos esenciales en el área de la óptica cuántica, como la manipulación coherente de estados electrónicos, el bombeo óptico

y la dinámica en el modelo de Jaynes-Cummings, temas que luego reaparecerán en diferentes formas en cursos más avanzados de la escuela.

**Programa:**

**Día 1:**

Interacción semiclásica entre la luz y los átomos: Hamiltoniano de acoplamiento, tratamiento perturbativo en aproximación de onda rotante. Átomo de dos niveles: oscilaciones de Rabi, AC Stark shift. Emisión espontánea (descripción fenomenológica). Sistemas de tres niveles - configuración lambda. Procesos de dos fotones, bombeo óptico, estados oscuros.

**Día 2:**

Campo electromagnético cuantizado en volumen infinito y en una cavidad (descripción sin derivación). Estados del campo cuántico: coherentes, térmicos, con squeezing.

**Día 3:**

Electrodinámica cuántica en cavidades: Modelo de Jaynes-Cummings. Breve discusión del ancho de línea y otras condiciones sobre el modelo.

**Bibliografía**

- [1] M. Lukin, notas para el curso "Modern Atomic and Optical Physics II" (Harvard), disponibles en <http://lukin.physics.harvard.edu/teaching/>
- [2] M. Fox, "Quantum Optics" (Oxford University Press, 2006)
- [3] C. Gerry and P. Knight, "Introductory Quantum Optics" (Cambridge University Press, 2005)
- [4] G. Grynberg, A. Aspect, C. Fabre, "Introduction to Quantum Optics - From the Semi-classical Approach to Quantized Light" (Cambridge University Press, 2010)

**Pre-requisitos:**

Oscilador armónico, operadores de subida y bajada. Elementos básicos de niveles atómicos. Evolución temporal en sistemas cerrados. Teoría de perturbaciones. Representación de Schrödinger, de Heisenberg y de interacción. Aproximación de onda rotante. Matriz densidad. Evolución no unitaria.

-----

**\*\*Nombre del Curso: Plataformas: Átomos fríos y iones atrapados.**

**Docente:** Christian Tomás Schmiegelow

**Ayudantes:** Ignacio Carraro Haddad, Francisco Divi

**Cantidad de horas:** 10.5 hs (3 clases)

**Breve Resumen del Curso:**

Mediante el confinamiento y enfriamiento de átomos cerca del cero absoluto, es posible controlar sus estados cuánticos con exquisita precisión. Preparar y manipular, por ejemplo, estados tipo gato de Schrodinger, realizar compuertas lógicas cuánticas entre estados electrónicos y fabricar pequeñas máquinas térmicas de un único átomo. En este curso, sentaremos las bases empíricas y matemáticas que nos permitirán entender cómo funcionan estas plataformas y discutiremos varios experimentos icónicos realizados en las últimas décadas.

**Programa:**

### **Día 1: Átomos fríos - Fotón-movimiento - Enfriamiento láser.**

Ecuaciones ópticas de Bloch (para un átomo de dos niveles que interactúa con un láser y con el continuo de modos en el vacío). Evolución y estado estacionario. Espectro de absorción / fluorescencia. Enfriamiento Doppler: modelo cinético, melaza óptica, ecs. de Bloch. Plataformas: desacelerador de Zeeman, trampa magneto óptica, trampa óptica y trampa de iones. Extra 2: límite de retroceso y enfriamiento Sísifo. Extra 2: enfriamiento anti-Stokes en sólidos.

### **Día 2: Iones Atrapados - Fotón-fonón - Control coherente.**

Dinámica en trampas de iones. Hamiltoniano de Jaynes-Cummings y límite de Lamb-Dicke. Transiciones Raman y multipolares. Espectros de bandas laterales resueltas. Oscilaciones de Rabi de un ion con temperatura. Enfriamiento por banda lateral. Oscilaciones Coherentes, compuertas cuánticas de un ion. Compuerta cuántica de dos iones tipo Cirac-Zoller.

### **Día 3: Iones Atrapados - Fotón-oscilador. Estados no clásicos de movimiento.**

Fuerzas ópticas dependientes del espín. Redes ópticas y ondas estacionarias. Generación de estados tipo Gato. Generación de estados estrujados. Extra 1: Máquina térmica de un ion. Extra 2: Compuerta de fase para dos iones.

### **Bibliografía**

- "Quantum and Atom Optics", Steck
- "Quantum optics , An Introduction", Fox

### **Pre-requisitos:**

Los conceptos y requerimientos necesarios serán cubiertos en la primera semana de clase en el bloque de fundamentos

-----

### **\*\*Nombre del Curso: Circuitos Cuánticos**

**Docente:** Leandro Tosi

**Ayudantes:** Kelvin Ramos Villalobos, Dimitri Chafatinos

**Cantidad de horas:** 10.5hs, 3 clases

### **Breve Resumen del Curso:**

La idea del curso es describir la utilización de circuitos eléctricos como plataforma para computación cuántica. En la primera parte se discute la cuantización de circuitos, el hamiltoniano de un circuito resonante. Luego se presenta la descripción Hamiltoniana de una juntura Josephson y se sientan las bases para diferentes tipos de circuitos cuánticos. En la segunda parte se presentan diferentes ejemplos de qubits: qubit de carga y de flujo. En la tercera parte se discuten las ideas de cQED y se presentan ejemplos de realizaciones experimentales.

### **Programa:**

**Día 1:** Cuantización de Circuitos Eléctricos: modos normales de un circuito. El oscilador armónico. Hamiltoniano de una juntura Josephson.

**Día 2:** Ejemplos de circuitos de qubits superconductores: CPB y transmon, flux qubit y fluxonium, phase-qubit.

**Día 3:** cQED: Lectura del estado cuántico de un circuito. Modelo de Jaynes-Cummings, Hamiltoniano de Rabi, régimen resonante, régimen dispersivo. Manipulación de circuitos cuánticos: Control cuántico, relajación y decoherencia.

## **Bibliografía**

- [1] Devoret M. H. in "Quantum Fluctuations", S. Reynaud, E. Giacobino, J. Zinn-Justin, Eds.(Elsevier, Amsterdam, 1997) p. 351-385
- [2] Cohen-Tannoudji, C., Dupont-Roc, J. and Grynberg, G. "Atom-Photon Interactions" (Wiley, New York, 1992)
- [3] Haroche, S. and Raimond, J-M., "Exploring the Quantum" (Oxford University Press, 2006)
- [4] Nielsen, M. and Chuang, I., "Quantum Information and Quantum Computation" (Cambridge, 2001)
- [5] Esteve, D., Raimond, J-M., and Dalibard J., "Quantum Entanglement and Information Processing" (Elsevier, Amsterdam, 2004)
- [6] Walls, D.F., and Milburn, G.J. "Quantum Optics" (Springer, Berlin, 2008)
- [7] Pozar, D. M., "Microwave Engineering" (Wiley, Hoboken, 2005)
- [8] Tinkham, M. "Introduction to Superconductivity" (2nd edition, Dover, New York, 2004)
- [9] Braginsky, V. B., and F. Y. Khalili, "Quantum Measurements" (Cambridge University Press, Cambridge, 1992)
- [10] Mallat, S. M., "A Wavelet Tour of Signal Processing" (Academic Press, San Diego, 1999)

## **Pre-requisitos:**

Sistema de dos niveles. Matriz densidad. Perturbaciones dependientes del tiempo, problema de Rabi. Oscilador armónico, estados coherentes.

-----

## **\*\*Nombre del Curso: Espines y centros NV**

**Docente:** Gonzalo A. Álvarez

**Ayudantes:** Analia Zwick, Ignacio Lembo, Manuel Avellaneda

**Cantidad de horas:** 7hs, 2 clases

## **Breve Resumen del Curso:**

Se introducirán conceptos básicos de sistemas de espines, posibles plataformas, su control, y aplicaciones. Se incorporarán conceptos básicos de resonancia magnética y centros NV, y estrategias de control dinámico cuántico para manipular los espines, proteger su información y operaciones específicas con ellos. Se introducirán conceptos y herramientas para utilizarlos como sensores cuánticos, y amplificar sus señales con hiperpolarización.

## **Programa:**

**Día 1:** Conceptos básicos de sistemas de espines, posibles plataformas, su control, y aplicaciones. Conceptos básicos de resonancia magnética y centros NV. Estrategias de control dinámico cuántico para manipular los espines, proteger su información y operaciones específicas con ellos.

**Día 2:** Conceptos y herramientas para utilizar espines como sensores cuánticos, y amplificar sus señales con hiperpolarización.

## **Bibliografía**

- [1] Protecting quantum information against environmental noise. Dieter Suter and Gonzalo A. Álvarez. Rev. Mod. Phys. **88**, 041001 (2016).

[2] Quantum sensing tools to characterize physical, chemical and biological processes with magnetic resonance. Analia Zwick, and Gonzalo A. Álvarez. Journal of Magnetic Resonance Open **16-17**, 100113 (2023).

[3] Robustness of spin-chain state-transfer schemes. Joachim Stolze, Gonzalo A. Álvarez, Omar Osenda, and Analia Zwick in Quantum State Transfer and Network Engineering, edited by G. M. Nikolopoulos and I. Jex (Springer Berlin Heidelberg, 2014), pp. 149–182.

[4] Local and bulk  $^{13}\text{C}$  hyperpolarization in nitrogen-vacancy-centred diamonds at variable fields and orientations. Gonzalo A. Álvarez, Christian O. Bretschneider, Ran Fischer, Paz London, Hisao Kanda, Shinobu Onoda, Junichi Isoya, David Gershoni, and Lucio Frydman Nat. Commun. **6**, 8456 (2015).

**Pre-requisitos:**

Los conceptos y requerimientos necesarios serán cubiertos en la primera semana.

-----

**\*\*Nombre del Curso: Fotones y Comunicación Cuántica**

**Docente:** Miguel Larotonda

**Ayudantes:** Axel Bruchhausen, Leandro Tosi

**Cantidad de horas:** 7hs (2 clases)

**Programa:**

**Día 1:**

Estados de variable discreta en el laboratorio. Estados de variable continua?. Operaciones lineales con fotones, implementación de qubits en distintos grados de libertad. Interferencia de dos y más fotones. Estados multifotónicos. Fluorescencia paramétrica. Fuentes de fotones entrelazados. Fuentes de fotones únicos más complejas. Ideas básicas de metrología con estados no clásicos de luz.

**Día 2:**

Caracterización experimental de estados cuánticos. Tomografía de estados y de procesos cuánticos. Detección de fotones únicos: tecnologías existentes. Protocolo de teleportación cuántica. Protocolos de distribución cuántica de claves (QKD). Distintas implementaciones de QKD.

**Pre-requisitos:**

segunda cuantificación

-----

**\*\*Nombre del Curso: Optomecánica**

**Docentes:** Andrés Reynoso y Alex Fainstein

**Ayudantes:** Dimitri Chafatinos

**Cantidad de horas:** 3.5hs, 1 clase

**Breve Resumen del Curso:**

Se hará una breve introducción a la optomecánica en cavidades, y a la física de polaritones-excitónicos en dispositivos semiconductores.

**Programa:**



- Optomecánica cuántica en cavidades: una introducción
- Hamiltoniano optomecánico
- Disipación y driving: ecuación de Heisenberg-Langevin
- Linearización del Hamiltoniano optomecánico
- Ecuaciones de movimiento
- Biestabilidad y no-linealidades
- Retroacción dinámica, autoenergía, enfriamiento y autooscilación
- Squeezing
- Sistemas multimodo
- Ejemplos de fuerzas ópticas
- Optomecánica en dispositivos semiconductores
- Acoplamiento fuerte fotón-excitón: polaritones
- Optomecánica con polaritones

### **Bibliografía**

[1] Cavity optomechanics, Markus Aspelmeyer, Tobias J. Kippenberg, and Florian Marquardt, Rev. Mod. Phys. **86**, 1391 (2014).

[2] Optomechanics for quantum technologies, Shabir Barzanjeh, André Xuereb, Simon Gröblacher, Mauro Paternostro, Cindy A. Regal, and Eva M. Weig, Nature Physics **18**, 15 (2022).

[3] Polaromechanics: polaritonics meets optomechanics, P. V. Santos and A. Fainstein, Optical Materials Express **13**, 1974 (2023).

-----

### **\*\*Nombre del Curso: Sensores Cuánticos**

**Docente:** Gonzalo Álvarez, Leandro Tosi

**Ayudantes:** --

**Cantidad de horas:** 3.5hs, 1 clase

### **Breve Resumen del Curso:**

Presentación de los conceptos más importantes sobre sistemas cuánticos utilizados para el sensado.

### **Programa:**

Espines como sensores. Operación básica de un sensor cuántico.

### **Bibliografía**

[1] Degen, Quantum sensing, Rev. Mod. Phys. 89, 035002 (2017)

### **Pre-requisitos:**

Los contenidos de las primeras semanas

-----

### **\*\*Nombre del Curso: Corrección de errores y tolerancia a ruido**

**Docente:** Fernando Pastawski (PsiQuantum)

**Ayudantes:** Leandro Tosi, Agustín Di Paolo, Rolando Somma

**Cantidad de horas:** 7hs (2 clases)

## Breve Resumen del Curso:

Las computadoras cuánticas pueden potencialmente resolver de manera eficiente problemas para los que se desconocen soluciones clásicas. No obstante, ruido e imperfecciones afectan a los sistemas cuánticos reales poniendo en duda esta presunta ventaja cuántica. La *corrección de errores y tolerancia a fallos*, afrontan este desafío orquestrando componentes cuánticos imperfectos de manera que conjuntamente aproximen una computadora cuántica ideal. En este mini-curso, se modelan algunos de los mecanismos de ruido y algunas de las herramientas de corrección de errores y tolerancia a fallos que permiten proteger información cuántica de sus efectos.

## Programa:

### Día 1: Corrección de errores

- Canal ruidoso:
- Código de repetición
- Canal binario simétrico  $p X + (1-p) I$  ( Binary symmetric channel )
- Canal de pérdida ( loss channel )
- Distancia  $d$  de un código, notación  $[n,k,d]$
- Noción de umbral ( threshold )
- Modelo D o N o E ( Encode; Noise; Decode)

Códigos correctores lineales sobre  $Z_2$

- Matrices generadora y de control de paridad
- Observables lógicos
- Ejemplo: código de Hamming

Hacia una versión cuántica

- Código de repetición como un código cuántico ( Cat code )
- Código de distribución de secretos XOR
- Código estabilizador
- Ejemplo: Código tórico ( topológico )

Condición local para la corrección de errores

### Día 2: Tolerancia a fallos

- Operar sobre información codificada
- Compuertas transversas: Preparación, Medición, Unitarias de Pauli
- Compuerta de Hadamard
- Compuerta CNot ( Trenzado ? )

Conjunto universal digital de compuertas Clifford + T

- Síntesis de compuertas
- Inyección de estados "mágicos"
- Destilación de estados mágicos

## Bibliografía

[1] [John Preskill's lecture notes \( Chapter 7 \)](#)

[2] Nielsen and Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information* (Cambridge) ( Chapter 10 )

## Pre-requisitos:

- Operadores de Pauli I, X, Z, Y y su producto tensorial
- Producto tensorial ( exterior )
- Operadores de Clifford
- $S = [1, 0; 0, i]$
- $Cnot = ( ZX + ZI + IX + I ) / 2$
- $Cphase = ( ZZ + ZI + IZ ) / 2$

Mapas cuánticos, super-operadores, medición

-----  
**\*\*Nombre del curso: Código de superficie con procesadores superconductores**

**Docentes:** [Yuri Lensky](#), [Agustin Di Paolo](#) (Google)

**Ayudantes:** Leandro Tosi, Fernando Pastawski, Rolando Somma

**Cantidad de horas:** 7hs (2 clases)

**Programa** (dividido en intervalos de 45 min + 30 min buffer)

**Día 1:** (45 min) Códigos de estabilizadores

(45 min) Teoría del código de superficie: diseño de estabilizadores, experimentos de memoria cuántica, teoría de decodificación

(45 min) Medición de síndrome de errores y decodificación en la práctica

(45 min) Operaciones lógicas en el código de superficie

**Día 2:** (45 min) Cuantización de circuitos eléctricos

(45 min) Control cuántico del qubit transmon: compuertas de uno y dos qubits

(45 min) Medición dispersiva e introducción a circuit QED

(45 min) Práctica numérica: simulación de compuertas de dos qubits

**Bibliography:** A. Kitaev, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9707021>

E. Dennis et al., <https://arxiv.org/abs/quant-ph/0110143>

A. Blais et al., <https://arxiv.org/abs/2005.12667>

**Pre-requisitos:**

Mecánica cuántica avanzada

Elementos de información cuántica

Elementos de materia condensada y electromagnetismo

-----  
**\*\*Nombre del Curso: Teoría de computación cuántica y algoritmos cuánticos**

**Docente:** Dr. Rolando D. Somma (Google)

**Ayudantes:** Leandro Tosi, Fernando Pastawski, Agustín Di Paolo

**Cantidad de horas:** 7hs (2 clases)

**Breve Resumen del Curso:**

Introducción a la computación cuántica y algoritmos cuánticos: Aceleraciones y complejidad

**Programa:**

**Día 1:**

- Introducción al programa Google Quantum AI
- Ley de Moore y paradigmas alternativos de computación
- Fundamentos de mecánica cuántica: Rápido repaso de los postulados y la notación de Dirac
- Historia breve de la computación cuántica
- Modelos de computación cuántica: Modelo de circuitos, modelo de caja negra y modelo de control
- Teorema de Solovay Kitaev
- **Problemas: Sintetizar unitaria (15 mins); Simulación de computación clásica (15 mins)**
- Algoritmos cuánticos: Principios básicos; necesidad de corregir errores
- Clases de complejidad y complejidad cuántica
- Clases de complejidad BQP y QMA

**Día 2: (Es probable que parte del programa del segundo día lo de el primer día).**

- Algoritmos cuánticos en el modelo de caja negra:

Deutsch-Jozsa

Grover

- Algoritmos cuánticos en el modelo de circuitos:
  - o Transformada de Fourier cuántica
  - o Algoritmo de Shor
- **Problema: Estimación de fases/autovalores (30 mins)**

- Simulación de sistemas cuánticos:
  - Modelos de acceso
  - Fórmulas producto
  - Combinación lineal de operadores unitarios y procesamiento de señal cuántica
- Caminos aleatorios cuánticos
- Algoritmos cuánticos para álgebra lineal
- Algoritmos cuánticos para optimización
- Algoritmos variacionales: Limitaciones y necesidad de corrección de errores

### **Bibliografía**

- “Quantum computation and quantum information”, Nielsen & Chuang; Cambridge University Press.
- “An introduction to quantum computing”, Kaye, Laflamme, Mosca; Oxford
- “Classical and Quantum Computation”, Kitaev, Shen, Vyalyi; American Mathematical Society
- “Quantum algorithms revisited”, Richard Cleve, Artur Ekert, Chiara Macchiavello, Michele Mosca, arXiv:quant-ph/9708016
- “A fast quantum mechanical algorithm for database search”, Grover L.K. (1996), arXiv:quant-ph/9605043
- “Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer”, Shor, Peter W. (1997), arXiv:quant-ph/9508027
- “Simulating physics with computers”, R. Feynman, International Journal of Theoretical Physics 21, 467 (1982)
- “Simulating physical phenomena by quantum networks”, R.D. Somma, G. Ortiz, J. Gubernatis, E. Knill, and R. Laflamme, Phys. Rev. A **65**, 042323 (2002).
- “Efficient quantum algorithms for simulating sparse Hamiltonians”, Berry, Ahokas, Cleve, Sanders (2005), Comm. Math. Phys 270, 359–371 (2007)
- “Simulating Hamiltonian dynamics with a truncated Taylor series”, Berry, Childs, Cleve, Kothari, Somma (2015), Phys. Rev. Lett. 114, 090502 (2015)
- “Optimal Hamiltonian simulation by quantum signal processing”, Low and Chuang (2017), Phys. Rev. Lett. 118, 010501 (2017)
- “On the relationship between continuous- and discrete-time quantum walk”, Andrew Childs, Communications in Mathematical Physics 294, 581-603 (2010)
- “Quantum algorithm for systems of linear equations with exponentially improved dependence on precision”, A. Childs, R. Kothari, and R.D. Somma, SIAM Journal on Computing 46, 1920-1950 (2017)
- “Quantum simulations of classical annealing processes”, R.D. Somma, S. Boixo, H. Barnum, and E. Knill, Phys. Rev. Lett. 101, 130504 (2008)
- “A quantum approximate optimization algorithm”, E. Farhi, J. Goldstone, S. Gutmann, arXiv:1411.4028 (2014)
- “Variational quantum algorithms” M. Cerezo, et al., Nature Reviews Physics 3, 625–644 (2021)

### **Pre-requisitos:**

En orden de importancia:

Familiaridad con los postulados de la mecánica cuántica

Familiaridad con la notación de Dirac

Familiaridad con la corrección de errores cuánticos

Leve conocimiento de realizaciones físicas de computadoras cuánticas

-----

**\*\*Nombre del Curso: Termodinámica cuántica**

**Docente:** Liliana Arrachea (ICAS, Universidad Nacional de San Martín)

**Ayudantes:** Leandro Tosi

**Cantidad de horas: 7hs (2 clases)**

**Breve Resumen del Curso:**

El objetivo de este curso es presentar conceptos básicos relacionados con la descripción de la dinámica energética que tiene lugar cuando un sistema cuántico está en contacto con sistemas macroscópicos que se comportan como baños térmicos y/o reservorios de partículas, mientras que también está bajo la acción de operaciones que dependen del tiempo. Discutiremos la separación entre calor y trabajo, producción de entropía y procesos de conversión entre calor y trabajo. Presentaremos ejemplos en el contexto de procesos estacionarios y el fenómeno de la termoelectricidad. Luego discutiremos casos con procesos dependientes del tiempo.

**Programa:**

**Día 1:**

- Breve repaso de los conceptos preliminares: Sistemas cuánticos abiertos y cerrados. Descripción Hamiltoniana. Operador densidad de un sistema cuántico. Estados térmicos. Evolución temporal en mecánica cuántica: Representaciones de Heisenberg, de Schrödinger y de interacción.
- Las leyes de la termodinámica para cambios cuasiestáticos en sistemas cuánticos abiertos. Definición de calor y de trabajo.
- Ciclos cuasiestáticos y ciclo de Otto. Discusión de ejemplos implementados en sistemas cuánticos de átomos fríos.
- Dinámica de la energía en sistemas cuánticos abiertos para procesos a tiempo finito. Definición de flujos de calor, de partículas y potencias. Disipación de energía y producción de entropía.

**Día 2:**

- Ciclos a tiempo finito. Refrigeradores y motores. Eficiencia vs potencia.
- Conversión calor-trabajo en el régimen estacionario. Respuesta lineal y la teoría de Landauer-Büttiker. Termoelectricidad en sistemas cuánticos. Ejemplos en nanoestructuras.
- Teoría de respuesta lineal para sistemas con dependencias temporales lentas.
- Ejemplos de motores y refrigeradores en qubits.

**Bibliografía**

[1] Roger Balian: From microphysics to macrophysics, Springer-Verlag Berlin (2007)

-----

**\*\*Nombre del Curso: Actividades de Laboratorio**

**Docentes:** Alex Fainstein, Axel Bruchhausen, Diego Grosz , Leandro Tosi, Gonzalo Álvarez, Daniel Domínguez, Majo Sánchez, Diego Pérez, Leonardo Salazar

**Cantidad de horas: 21hs (6 clases)**

**Breve Resumen del Curso:** Cada estudiante realizará una actividad de laboratorio, en grupos de no más de cinco (5) estudiantes. El tema de la actividad será a elección en alguna de las aplicaciones de las temáticas desarrolladas (sistemas de espines, circuitos superconductores, fotones únicos y comunicación, optomecánica, teoría de dinámica cuántica de qubits) y bajo la supervisión de uno o dos docentes.

-----

**EVALUACIÓN DE LA ESCUELA:**

- Presentación de póster de la actividad de laboratorio.
- Examen final escrito de los temas desarrollados en los cursos.