

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Corso di Laurea Magistrale in<br>Fisica                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                | Insegnamento / Course<br>SISTEMI DI CALCOLO QUANTISTICO / QUANTUM CALCULUS SYSTEMS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                   |
| SSD: FIS/03                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | CFU/Credits: 8 | Anno di corso: II                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Lezione (ore): 64 |
| <b>Obiettivi formativi:</b><br>Obiettivo del corso è promuovere, una sensibilità interdisciplinare che consenta di poter capire i principi fisici dell’hardware di un computer quantistico. In maniera auto-consistente sono prima richiamati aspetti fondamentali di meccanica quantistica e sui sistemi quantistici applicati, per poi approfondire aspetti sulla computazione quantistica, che usano tecnologie e concetti tradizionalmente impiegati per l’elettronica superconduttiva. Si intende proporre un percorso fenomenologico/sperimentale con il quale lo studente comprende ed applica concetti di scienza dell’informazione quantistica a reali dispositivi. Lo studente sarà in grado di realizzare una misura su qubit superconduttivo. A tale scopo saranno per esempio utilizzati programmi con software Phytion per la programmazione della sequenza di controllo di un qubit e lo studio di un risonatore.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                | <b>Training objectives:</b><br>This course is meant to encourage students to study the physical ideas, the design and the realization of frontier experiments in Solid State Physics, with a special focus in the fields of Quantum Technologies. Quantum hardware is what transforms the novel concepts of quantum computation and communication into reality. The key challenge is to control, couple, transmit and read out the fragile stage of quantum systems with great precision, and in a technologically viable way. This course aims at illustrating some aspects of this key challenge in realizing quantum hardware and technology, focusing on superconducting quantum devices. Some key notions on quantum mechanics and applied quantum systems will be introduced as a bridge to standard courses. This course aims at illustrating “quantum mechanics at work”, not only as a key to interpret nature but also as a drive to build new “machines”. The idea is to simulate the student to a creative and independent path towards the planning, design and realization of advanced experiments. |                   |
| <b>Programma sintetico (sillabo):</b><br>Introduzione: fondamenti di meccanica quantistica. Esempi di sistemi quantistici applicati, Fondamenti di superconduttività, fenomenologia. Dispositivi con superconduttori, effetto tunnel ed effetto Josephson e sua misura, non linearità in circuiti superconduttivi con esperienza di laboratorio, Elettronica superconduttiva classica, interferometri quantistici superconduttivi. Concezione di un qubit, concetti su distinzione fra caso classico e quantistico, sovrapposizione di stati quantistici, introduzione della sfera di Bloch e alle operazioni quantistiche, Entanglement, Qubit superconduttivi e loro architetture, qubit di fase, carica, di flusso, dal trasmon al fluxonium, principi di funzionamento. Realizzazione di un qubit e tecniche di nanofabbricazione. Misura di un qubit, aspetti di decoerenza e dissipazione con esperienza di laboratorio. Tecniche di read-out di qubit, amplificatori Josephson, sensori al limite quantistico. Accoppiamento qubit cavità: accoppiamento risonante e dispersivo, read-out dispersivo di un qubit in una cavità, controllo quantistico di qubit in una cavità; Integrazione qubit con elettronica superconduttiva classica<br><b>Contents:</b><br>Introduction to quantum mechanics. Breadth of archetypal applied systems: from nuclear magnetic resonance to laser amplifiers and self-sustained oscillators, Ramsey spectroscopy, meso-scale low-dimensional devices, quantum Hall effect, quantum confinement and optical pumping, conductance quantization, macroscale quantum effect devices and circuits such as Cooper-pair boxes and superconducting quantum circuits. Fundamentals of superconductivity and mesoscopic physics. Superconducting devices, the Josephson effect, non linearity in superconducting circuits. Classical superconducting electronics, superconducting quantum interference devices (SQUIDs), Quantum bits and essential concepts that distinguish quantum from classical, Quantum states superpositions: introduction of the Bloch sphere quantum operations: Entanglement. Qubit Hamiltonian engineering, Superconducting and hybrid qubits, Tunable qubit: Split transmon, Toward larger anharmonicity: Flux qubit and Fluxonium, Interaction Hamiltonian engineering, Physical coupling: Capacitive and inductive. Realization of a superconducting qubit and Nanofabrication techniques. Nanoscale Processing for Advanced Devices. Measurements techniques for qubits, decoherence, noise and dissipation. Josephson bifurcation amplifier, SQUIDs and qubit read-out. Sensors at the quantum limit. Integration between qubits and classical superconducting electronics, Qubit - cavity coupling: Resonant coupling and dispersive coupling. Amplification and feedback. Dispersive Read-out of a Qubit in a Cavity. Quantum Control of Qubits in a Cavity. Quantum state engineering and quantum gates: One qubit gates. Two qubit gates. |                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                   |
| <b>Esami propedeutici / Propaedeutic exams:</b> No                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                   |
| <b>Prerequisiti / Prerequisites:</b> - Elementi di fisica di base / Fundamentals of Physics                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                   |
| <b>Finalità e modalità di verifica dell’apprendimento</b> Esame orale / Oral examination                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                   |
| Il corso può essere erogato in lingua inglese in presenza di studenti stranieri (es. Erasmus) / The course can be given in English in presence of foreign students (e.g. Erasmus)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                   |