POLITECNICO DI BARI

Corso di Laurea in Ingegneria Informatica e dell'Automazione

Anno Accademico 2026/27

Docente: Prof. Vincenzo Berardi

Metodi della Fisica Quantistica per l'Ingegneria

Programma d'esame

Rosso: contenuti del syllabus minimo, obbligatori per il superamento dell'esame.
Nero: contenuti ulteriori del programma.

1. Calcolo classico e calcolo quantistico

Concetto di algoritmo e modello computazionale. Differenza tra bit classico e qubit. Sovrapposizione quantistica. Ruolo di interferenza e misura. Computazione reversibile. Macchina universale. Vantaggio quantistico e suoi limiti. Architetture ibride. Ricerca non strutturata.

2. Richiami di algebra lineare e calcolo tensoriale

Vettori complessi. Matrici. Prodotto interno. Norma e ortogonalità. Matrici unitarie. Prodotto tensoriale. Autovalori e autovettori. Matrici hermitiane. Proprietà avanzate del calcolo matriciale e tensoriale.

3. Notazione di Dirac

Ket e bra. Prodotto interno. Normalizzazione e ortogonalità. Operatori lineari. Rappresentazione matriciale degli stati e degli operatori. Prodotto esterno. Risoluzione dell'identità. Elementi di matrice. Operatore aggiunto. Proiettori. Prodotto tensoriale in notazione di Dirac. Ricostruzione di matrici mediante prodotti esterni.

4. Il qubit, la sfera di Bloch e l'entanglement

Stati $|0\rangle$ e $|1\rangle$. Stato generale di un qubit. Sovrapposizione. Ampiezze di probabilità e normalizzazione. Sistemi composti di qubit. Stati separabili ed entangled. Stati di Bell. Fase relativa. Sfera di Bloch. Osservabili nel caso del qubit. Correlazioni classiche e quantistiche. Ruolo e fragilità dell'entanglement.

5. Principi della meccanica quantistica rilevanti per il calcolo quantistico

Evoluzione unitaria. Processo di misura. Regola di Born. Osservabili e operatori hermitiani. Non commutatività e principio di indeterminazione. No-cloning theorem. Stati non ortogonali e distinguibilità. Stati misti e matrice densità. Sottosistemi e traccia parziale. Evoluzione delle matrici densità. Decoerenza.

6. Il modello della computazione quantistica

Registri quantistici. Circuiti quantistici. Porte quantistiche generali a uno e più qubit. Porte di Pauli, Hadamard e CNOT. Composizione delle porte. Misura mediante shot. Funzioni classiche reversibili. Oracle quantistico. Parallelismo quantistico. Fase, interferenza e phase kickback. Risorse di un circuito quantistico. Confronto operativo fra computazione classica e quantistica.

7. Rappresentazione grafica dei circuiti quantistici

Lettura di semplici circuiti quantistici e determinazione dello stato prodotto da circuiti elementari. Porte applicate a registri multi-qubit. Porte controllate. SWAP e Toffoli. Misura e registri classici. Circuiti completi ed esercizi svolti.

8. Algoritmi quantistici

Algoritmo di Deutsch. Principio dell'algoritmo di Grover e vantaggio quadratico nella ricerca non strutturata. Promise problems e query complexity. Deutsch-Jozsa. Bernstein-Vazirani. Simon. Shor. Confronto tra gli algoritmi studiati e analisi delle risorse computazionali.

9. Rumore, errori e affidabilità del calcolo quantistico

Differenza tra circuito ideale e dispositivo reale. Significato generale del rumore e della decoerenza. Principali sorgenti di errore. Prevenzione, soppressione, mitigazione e correzione degli errori. Qubit fisici e logici. Sindromi di errore. Codice a tre qubit. Errori di fase. Fault tolerance. Surface code. Affidabilità del risultato e rapporto con il numero di shot.

10. Approfondimenti

Reversibilità e calcolo quantistico. Limiti concettuali e tecnologici dei computer quantistici. Prospettive di integrazione tra sistemi classici e quantistici.