



Politecnico  
di Torino

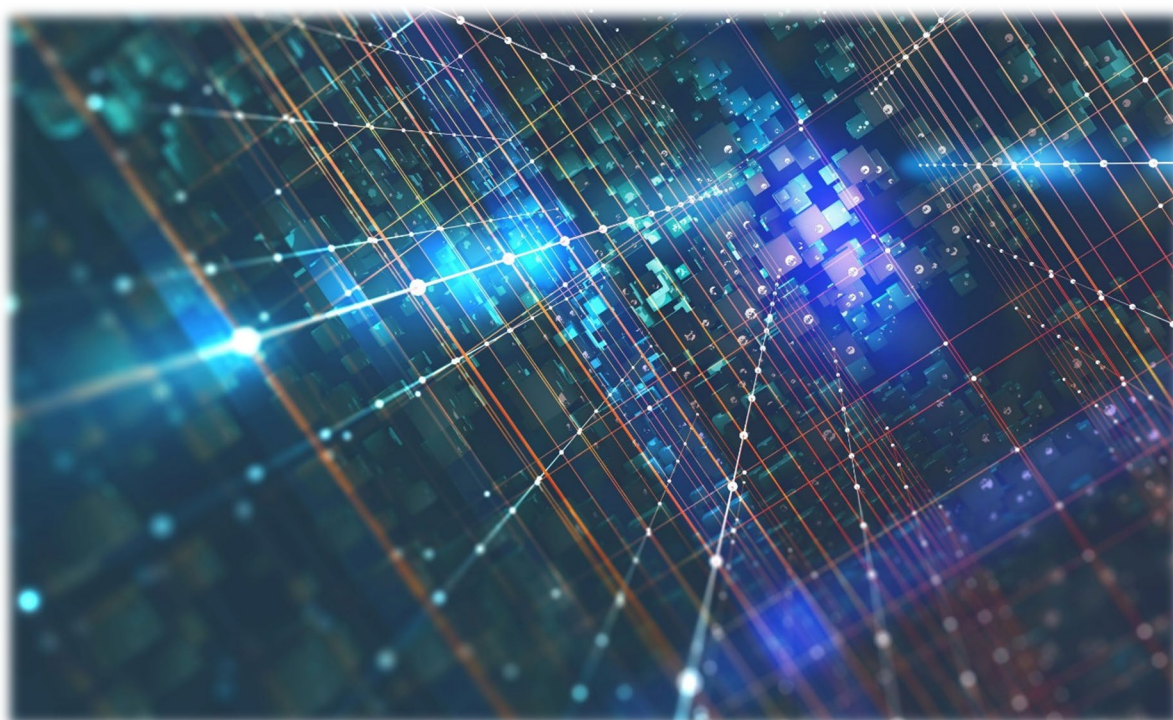


PoliTO Master School

MASTER DI SECONDO LIVELLO IN

# Quantum Communication and Computing

a.a. 2023/24 – Seconda edizione



Il Master in Quantum Communication and Computing si propone di formare persone interessate al nuovo settore nascente del Quantum. La proposta comprende una breve introduzione alle tematiche di fisica normalmente non trattate per poi passare a competenze dettagliate e prevalentemente sperimentali sia di Quantum Communication sia di Quantum Computing. La sicurezza informatica, presente come filo conduttore in entrambi i sottosectori, viene approfondita in modo particolare, con una ampia introduzione alla sicurezza informatica tradizionale prima di passare alla sicurezza quantistica e post quantistica. Completano gli insegnamenti una formazione di base in Quantum Metrology, trasversale al Computing e alla Communication, e un'introduzione alla fabbricazione dei dispositivi coinvolti nelle quantum technologies.

Il progetto si propone come un mix di didattica frontale in aula, esperienze in azienda con tirocini e pratico/laboratoriale e workshop con l'obiettivo di formare professionisti indirizzati al settore delle tecnologie quantistiche. I corsi saranno erogati in presenza. Sarà possibile frequentare da remoto sotto specifiche condizioni e, in modo analogo, sarà possibile anche accedere alle videoregistrazioni. Sarà strettamente necessaria la presenza per tutte le attività laboratoriali.

Il master è stato realizzato grazie all'aiuto progettuale ed economico di INRIM e Fondazione Links. Sono inoltre sponsor principali: Intesa Sanpaolo, TIM, Consorzio TOP-IX.



## TABELLA INSEGNAMENTI

<b>Insegnamenti</b>	<b>Settore Scientifico- Disciplinare</b>	<b>CFU</b>	<b>Ore Aula</b>
1. Introduzione alla meccanica quantistica	FIS/03	4	40
2. Quantum Computing	ING-INF/05	10	100
3. Sicurezza e sicurezza quantistica e post-quantistica	ING-INF/05	10	100
4. Quantum Communication	ING-INF/03	10	100
5. Quantum Metrology	ING-INF/07	5	50
6. Introduzione alla fabbricazione dei dispositivi quantistici	FIS/03	2	20
7. Strategie e dinamiche di sviluppo tecnologico del Quantum Computing e Communication	ING-IND/16	1	10
<i>Tirocinio/Project Work</i>		<i>12</i>	<i>300</i>
<i>Prova finale</i>		<i>6</i>	<i>150</i>
<b>TOTALE</b>		<b>60</b>	



## INTRODUZIONE ALLA MECCANICA QUANTISTICA

FIS/03 - 4 CFU (40 ore)

Docente titolare: *prof.ssa* [Anna Carbone](#)

### PRESENTAZIONE CONTENUTI DEL CORSO

Il corso intende fornire gli elementi di meccanica quantistica, i principali concetti e metodi alla base delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione quantistica e i paradigmi di calcolo quantistico. Partendo dalla esigenza di comprendere e stimare i fenomeni osservati in natura non interpretabili nell'ambito della fisica classica il corso permetterà di spostare la prospettiva verso le sfide che la ricerca teorica e applicata sta affrontando nel campo che saranno poi affrontati nei corsi che compongono il Master.

### RISULTATI ATTESI

Acquisizione dei principi fondamentali della meccanica quantistica.

Acquisizione dei concetti e strumenti elementari alla base della computazione e delle architetture quantistiche.

Abilità di affrontare e risolvere problemi elementari di interesse applicativo nell'ambito della computazione quantistica.

Comprensione dei fondamenti della teoria dei campi quantizzati e loro applicazioni.

Acquisizione delle tecniche principali per la generazione di stati ottici quantistici

### PROGRAMMA

Evidenze sperimentali e fenomenologia della meccanica quantistica.

Dualità Onda Corpuscolo.

Principio di Indeterminazione di Heisenberg.

Equazione di Schroedinger per una particella libera e in presenza di un potenziale.

Operatori. Formalismo di Dirac.

Sfera di Bloch. Qubit fondamentali.

Matrice densità.

Introduzione alla relatività ristretta.

Entanglement.

Teoria quantistica dei campi.

Quantizzazione del campo EM.

Generazione ed applicazione di stati ottici quantistici

### METODOLOGIA DIDATTICA

Le lezioni si svolgeranno in modalità frontale e sarà offerta la possibilità di seguire in remoto tutte le lezioni teoriche erogate in aula.



## QUANTUM COMPUTING

ING-INF/05 - 10 CFU (100 ore)

Docente titolare: *prof. [Bartolomeo Montrucchio](#)*

### PRESENTAZIONE CONTENUTI DEL CORSO

Il corso presenta i contenuti specifici del Quantum Computing, partendo dalle basi di meccanica quantistica ricevute.

Nella prima parte si affrontano i computer quantistici di tipo general purpose. Quindi si vede con un certo livello di dettaglio l'hardware utilizzato, anche a confronto con l'hw dei calcolatori elettronici classici.

Si passano poi in rassegna altri tipi di calcolatori, in particolare quelli di tipo quantum annealer.

L'ultima parte del corso vede la presentazione dei contenuti aziendali, sia in termini di progetti di ricerca sia in termini di progetti industriali veri e propri.

### RISULTATI ATTESI

Conoscenza degli ambienti IBM e Dwave.

Conoscenza dei principali tipi di hardware.

Conoscenza delle principali possibilità industriali al livello attuale.

### PROGRAMMA

Introduzione al Quantum Computing. I computer IBM.

Hardware per computer quantistici.

I QC di tipo quantum annealer.

Esperienze aziendali: progetti europei e ricerca in TIM.

Aspetti avanzati nell'ambiente IBM.

QC e algoritmi finanziari in Intesa Sanpaolo.

### METODOLOGIA DIDATTICA

Le lezioni si svolgeranno in modalità frontale e sarà offerta la possibilità di seguire in remoto tutte le lezioni teoriche erogate in aula. Esercitazioni di tipo hands-on.



## **SICUREZZA E SICUREZZA QUANTISTICA E POST-QUANTISTICA**

ING-INF/05 – 10 CFU (100 ore)

Docente titolare: *prof.* [Antonio Lioy](#)

### **PRESENTAZIONE CONTENUTI DEL CORSO**

Il corso introduce i concetti generali della cybersecurity (rischi, attacchi e principali tecniche di difesa) e passa poi a considerare i problemi posti dalle tecnologie quantistiche (attacchi basati su computer quantistici) ed anche le nuove opportunità offerte da queste tecniche (quantum key distribution). Il corso alterna lezioni teoriche ed esercitazioni pratiche in laboratorio, con simulazioni di computer quantistici per fini di cybersecurity

### **RISULTATI ATTESI**

Al termine del corso gli studenti saranno in grado di analizzare la sicurezza di un sistema informatico e proporre semplici soluzioni per proteggerlo.

### **PROGRAMMA**

Cybersecurity: rischi, minacce, attacchi tecnologici e non-tecnologici.

Tecniche crittografiche per la protezione dei dati: cifratura simmetrica e asimmetrica, hash crittografico, firma digitale, certificati X.509 e PKI.

Componenti di un'architettura di sicurezza: autenticazione degli utenti (password, sistemi a sfida), sicurezza di rete (firewall, IDS, VPN) e protezione applicativa (TLS).

Attacchi crittografici basati su metodi quantistici.

Tecniche di quantum key distribution e loro integrazione con sistemi di sicurezza tradizionali.

### **METODOLOGIA DIDATTICA**

Il corso è organizzato su lezioni frontali ed esercitazioni sperimentali, con l'uso di strumenti open-source in ambiente Linux e di simulatori di ambienti quantistici.



## QUANTUM COMMUNICATION

ING-INF/03 - 10 CFU (100 ore)

Docente titolare: *prof. [Roberto Gaudino](#)*

### PRESENTAZIONE CONTENUTI DEL CORSO

Il corso descrive i principali concetti e tecniche relative alla crittografia quantistica ottica. Si partirà da una parte introduttiva sulle comunicazioni in fibra ottica di tipo "classico" (cioè non crittografate a livello quantico) per poi passare a descrivere le basi della crittografia quantistica (Quantum Key Distribution, QKD) nella versione a variabili discrete.

Dopo questa parte introduttiva, il corso tratterà argomenti più specifici e in particolare:

- componentistica ottica per QKD (sorgenti e rivelatori a singolo fotone)
- tecniche di QKD avanzate (twin-field QKD, QKD a variabili continue, stabilità dei laser)
- cenni su metrologia basata su sorgenti ottiche avanzate.

### RISULTATI ATTESI

- Conoscenza introduttiva del settore delle telecomunicazioni e reti in fibra ottica di tipo tradizionale (non quantistico)
- Conoscenze e competenze specifiche delle moderne tecniche per la realizzazione di sistemi di Quantum Cryptography, con particolare enfasi alle soluzioni in fibra ottica
- Competenze sui componenti ottici chiave per i sistemi di Quantum Cryptography ottici"

### PROGRAMMA

#### PARTE RELATIVA ALLE TELECOMUNICAZIONI OTTICHE CLASSICHE

Sistemi di telecomunicazioni in fibra ottica "tradizionali" (non quantistici)

Intro sui componenti ottici per TLC: laser, fotodiodi, modulatori e amplificatori ottici

Fisica della propagazione in fibra ottica

- modi in fibra ottica
- attenuazione e bande ottiche per fibra singolo modo (SMF)
- dispersione cromatica in SMF
- polarization mode dispersion in SMF

Comunicazione in fibra ottica "tradizionali" ad alto bit rate

- sistemi "short reach" a rivelazione diretta IM-DD
- sistemi "long haul" con formati PM-QAM, amplificatori ottici e rivelazione coerente.
- cenni a reti ottiche con instradamento riconfigurabile su base lunghezza d'onda

#### PARTE RELATIVA ALLA CRITTOGRAFIA QUANTISTICA

Introduzione alla quantum information

Il qubit

Realizzazioni pratiche del Qubit

Teorema No-cloning

Tomografia degli stati quantistici



Crittografia quantistica

Quantum key distribution

Realizzazioni pratiche

Entropia di Von Neumann e quella di Shannon

Sicurezza e strategie di attacco

Componenti: Sorgenti

- Single-Photon-Sources
- sorgenti di singoli fotoni, definizioni e metriche
- piattaforme tecnologiche
- sorgenti allo stato solido: sintesi e caratterizzazione
- Stati Entangled
- Componenti: Rivelatori a singolo fotone
- rivelatori basati su semiconduttori: SPAD
- cenni di fisica delle basse temperature:
- superconduttività e criogenia
- rivelatori basati su superconduttori:
- Superconducting Nanowires SNSPD
- Transition-edge sensor TES
- Quantum Communication avanzata

Entanglement

- Stati Entangled e loro proprietà
- Realizzazioni pratiche
- Diseguaglianze di Bell e loro applicazioni
- Crittografia quantistica con stati entangled
- Protocolli
- Implementazioni pratiche



Politecnico  
di Torino



PoliTO Master School

Protocolli di comunicazione quantistica  
Quantum Teleportation di qubits  
Entanglement swapping: teletrasporto dell'entanglement  
Quantum dense coding  
Realizzazioni pratiche e misure sugli stati entangled

Descrizione dell'evoluzione degli stati quantistici  
Quantum operations  
Tomografia delle quantum operations

Problemi integrazione della QKD sulle reti in fibra reali  
Rumore di fase e stabilità (definizioni)  
Tecniche metrologiche di interesse: laser ad alta coerenza, stabilizzazione in fase delle fibre ottiche  
Distribuzione segnali di tempo  
Applicazione di tali tecniche a Twin-Field QKD

#### **METODOLOGIA DIDATTICA**

Le lezioni si svolgeranno in modalità frontale e sarà offerta la possibilità di seguire in remoto tutte le lezioni teoriche erogate in aula. Sono inoltre previste visite presso i laboratori di INRIM, dove verranno organizzate esercitazioni sperimentali.





## QUANTUM METROLOGY

ING-INF/07 - 5 CFU (50 ore)

Docente titolare: *prof. [Giovanni Costanzo](#)*

### PRESENTAZIONE CONTENUTI DEL CORSO

Il Sistema internazionale di unità (SI) è stato profondamente rivisto negli ultimi anni in modo da accogliere i più recenti progressi della metrologia quantistica, disciplina che negli ultimi trent'anni ha prodotto campioni primari con accuratezza, riproducibilità e stabilità senza precedenti. Il corso si propone di presentare agli studenti le basi teoriche e sperimentali dell'attuale SI, con particolare riferimento ai campioni di frequenza e di grandezze elettriche.

### RISULTATI ATTESI

Il raggiungimento degli obiettivi di apprendimento permetterà di sviluppare nell'allievo le conoscenze relative agli aspetti principali della meccanica quantistica necessari per affrontare la metrologia quantistica, i principi di funzionamento dei campioni atomici di frequenza a microonda ed ottici, le grandezze elettriche del Nuovo SI realizzate con effetto Hall e Josephson, e, infine, le possibilità di utilizzo dei sensori quantistici.

### PROGRAMMA

Incertezze, spettri, Allan Deviation e rumore. Campioni Primari di Frequenza al Cesio: funzionamento, caratteristiche e caratterizzazione delle cause di incertezza. Grandezze elettriche del nuovo SI: effetto Josephson e volt, effetto Hall quantistico e ohm. Interazione radiazione-materia; sistemi atomici a due livelli; equazioni di Bloch; schema di interazione Rabi; schema di interazione Ramsey; sistemi atomici a tre livelli; Coherent Population Trapping (CPT), interazione fine e iperfine; Tecniche di raffreddamento laser. Orologi ottici e confronto di frequenze ottiche, Verso la ridefinizione del Secondo nel Sistema Internazionale di Unità di Misura. Orologi ottici basati su ioni: intrappolamento di particelle cariche, raffreddamento laser di ioni. Quantum logic. Ingegnerizzazione di sistemi di spin otticamente attivi per applicazioni nella sensoristica quantistica.

### METODOLOGIA DIDATTICA

Le lezioni si svolgeranno in modalità frontale e sarà offerta la possibilità di seguire in remoto tutte le lezioni teoriche erogate in aula.



## INTRODUZIONE ALLA FABBRICAZIONE DEI DISPOSITIVI QUANTISTICI

FIS/03- 2 CFU (20 ore)

Docente titolare: *prof. [Matteo Cocuzza](#)*

### PRESENTAZIONE CONTENUTI DEL CORSO

Il corso si propone di presentare un'introduzione ai processi alla micro e nano-scala per la fabbricazione di dispositivi miniaturizzati quantistici. A partire da una descrizione delle caratteristiche dell'ambiente di cleanroom ove tali processi trovano implementazione, si procederà con una panoramica sulle principali tecniche per la deposizione e il patterning di film sottili, per l'introduzione di elementi droganti e per la realizzazione di dispositivi mediante tecniche di stampa 3D sub-micrometrica o tecnologie meno convenzionali, ma che rappresentano il naturale bacino per la realizzazione di elementi atti all'implementazione di effetti quantistici. Il corso si concluderà con la descrizione di alcuni esempi di dispositivi e relativo processo di fabbricazione: Qubit e dispositivi per il quantum computing, Parametric Amplifiers, Single Photon Detectors, Single Photon Sources, Quantum amplifiers.

### RISULTATI ATTESI

Competenze e conoscenze attese:

- conoscenza delle tecnologie di base per la fabbricazione di micro/nanodispositivi quantistici;
- conoscenza dei relativi materiali e delle tecnologie;
- conoscenza delle caratteristiche e delle problematiche dei principali dispositivi quantistici;
- capacità di comunicare in modo chiaro e univoco aspetti tecnici relativi alla progettazione e realizzazione di dispositivi quantistici, sia in forma scritta che orale, a specialisti e non specialisti;
- sviluppo di capacità di autoapprendimento per consentire allo studente di continuare ad apprendere autonomamente nuove tecniche e metodologie di progettazione e tecniche di fabbricazione, non necessariamente spiegate e descritte durante il corso.

### PROGRAMMA

MODULO TECNOLOGIE DI FABBRICAZIONE (10 h)

- Tecnologia della cleanroom
- Crescita e deposizione di film sottili: ossidazione, epitassia, CVD, ALD, PVD, elettrodeposizione
- Impiantazione
- Tecniche di attacco chimico wet e dry per film sottili e materiali bulk
- Tecniche di litografia base e avanzata
- Tecniche di nanolitografia e nanopatterning (e-beam, ion-beam, dip-pen, nanoimprinting, copolimeri a blocchi, ...)
- 3D Printing alla nanoscala (2PP)

MODULO DISPOSITIVI PER QUANTUM ELECTRONICS, COMPUTATION & METROLOGY (10 h)

- Qubit e dispositivi per il quantum computing
- Parametric Amplifiers
- Single Photon Detectors
- Single Photon Sources
- Quantum amplifiers"



Politecnico  
di Torino



PoliTO Master School

### **METODOLOGIA DIDATTICA**

Le lezioni si svolgeranno in modalità frontale e sarà offerta la possibilità di seguire in remoto tutte le lezioni teoriche erogate in aula.



Politecnico  
di Torino



PoliTO Master School

## **STRATEGIE E DINAMICHE DI SVILUPPO TECNOLOGICO DEL QUANTUM COMPUTING E COMMUNICATION**

ING-IND/16 - 1 CFU (10 ore)

Docente titolare: *prof. [Marco Cantamessa](#)*

### **PRESENTAZIONE CONTENUTI DEL CORSO**

Il corso si propone di affrontare le dinamiche tecnologiche, industriali ed economiche connesse ai fenomeni innovativi, con particolare riferimento al caso delle tecnologie IT e dei nuovi paradigmi computazionali.

### **RISULTATI ATTESI**

Il corso ha l'obiettivo di fornire agli studenti gli strumenti concettuali che servono per comprendere le dinamiche illustrate.

### **PROGRAMMA**

Il corso tratterà i seguenti argomenti: principali modelli dei fenomeni innovativi (modello lineare e sue varianti), innovazione incrementale e radicale e loro impatto sui settori industriali, dinamiche dell'innovazione (curve a s, dominant design, paradigmi e standard), cenni di strategia dell'innovazione secondo l'approccio Resource Based View.

### **METODOLOGIA DIDATTICA**

Le lezioni si svolgeranno in modalità frontale e sarà offerta la possibilità di seguire in remoto tutte le lezioni teoriche erogate in aula.