



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI DI MILANO-BICOCCA

## COURSE SYLLABUS

### Quantum Materials

2425-1-F1701Q151

---

#### Obiettivi

Un materiale quantistico è un materiale le cui proprietà elettroniche o magnetiche sono originate da effetti quantomeccanici non banali, per i quali approssimazioni semi-classiche, che non considerano il carattere completo del sistema, non offrono una descrizione soddisfacente delle peculiarità osservate.

Il corso presenta i principi fisici alla base delle proprietà dei materiali quantistici, consentendo così di comprendere questi materiali in dettaglio. Verranno trattati in dettaglio diversi sistemi di materiali: dai superconduttori, il prototipo di materiale quantistico, all'effetto hall quantistico intero e agli isolanti topologici, che mostrano una stretta connessione delle loro proprietà elettroniche con invarianti derivati dalla topologia. Per ciascuna classe di materiali verranno brevemente discusse alcune applicazioni tecnologiche.

#### Obiettivi

- Conoscenza dettagliata dei concetti e degli approcci di base nella ricerca sui materiali quantistici.
- Comprendere i fenomeni emergenti nei materiali quantistici
- Comprendere gli effetti della topologia e delle simmetrie sulle proprietà elettroniche quantistiche dei materiali
- Acquisizione di capacità comunicative verbali e scritte in concetti avanzati di fisica quantistica.

#### Contenuti sintetici

- Introduzione: Materiali quantistici per tecnologie quantistiche.
- Teoria dei Superconduttori di Ginzburg Landau e BCS
- Effetto Hall quantistico intero
- Topologia e fase Berry
- Invarianti topologici e proprietà fisiche

## Programma esteso

### 1) Introduzione:

- i materiali quantistici come strumento per le moderne tecnologie quantistiche.
- Panoramica dei prerequisiti del corso, dei contenuti delle lezioni, dei libri di testo/letteratura e dei metodi di valutazione.

### 2) Superconduttori:

- Interazione elettrone-fonone e coppie di Cooper
- Teoria di Ginzburg-Landau
- Teoria BCS della superconduttività
- Effetto Josephson e SQUIDS
- Q-Bit quantistici superconduttori

### 3) Effetto Hall quantistico intero:

- Livelli Landau
- Teoria di Laughlin dell'effetto Hall quantistico
- Perché 2D, disordine e localizzazione sono importanti
- Teoria della percolazione semiclassica
- Stati del bordo IQHE

### 4) Topologia:

- Fase di Berry, connessione e curvatura
- Fase di Berry per gli elettroni nei cristalli
- Applicazioni della fase di Berry: effetto Aharonov-Bohm, polarizzazione dei cristalli, elettroni cristallini in campo elettrico uniforme
- Numeri Chern
- Simmetrie di inversione temporale e di inversione: simmetria spezzata in Honeycomb Lattice
- IQHE senza livelli Landau
- Invarianti topologiche
- Superconduttori topologici

## Prerequisiti

Concetti di meccanica quantistica e fisica dello stato solido.

## Modalità didattica

Lezioni erogative frontali alla lavagna e/o slides.  
-46 ore di lezione erogate interamente in presenza.  
L'insegnamento verrà erogato interamente in lingua inglese.

## Materiale didattico

Le diapositive saranno messe a disposizione degli studenti attraverso la presente piattaforma e-learning.

Testi principali:

- Efthimios Kaxiras & John D. Joannopoulos (2019) Quantum Theory of Materials, Cambridge University Press. doi 10.1017/9781139030809:

- Michael Tinkham, Introduction to superconductivity, Dover ISBN 0486435032

Per approfondimenti:

- Girvin, S., & Yang, K. (2019). Modern Condensed Matter Physics. Cambridge University Press. doi:10.1017/9781316480649
- P. G. De Gennes (1999) Superconductivity of Metals and Alloys, Westview Press, ISBN 0-7382-0101-4
- Raffaele Resta, Geometry and Topology in Electronic Structure Theory, Notes, <http://www-dft.ts.infn.it/~resta/gtse/draft.pdf>
- A. Bernevig with T. L. Hughes, Topological Insulators and Topological Superconductors, Princeton University Press (2013).
- János K. Asbóth, László Oroszlány, András Pályi (2016). A Short Course on Topological Insulators: Band Structure and Edge States in One and Two Dimensions. Springer

Articoli scientifici

Diversi argomenti del corso sono anche ben presentati in articoli scientifici, come ad esempio:

- Von Klitzing K (1986) The quantized Hall effect, Reviews of Modern Physics 58, 519
- R. B. Laughlin (1981) Quantized Hall conductivity in two dimensions, Phys. Rev. B 23, 5632
- Feliciano Giustino et al (2020) The 2021 quantum materials roadmap. J. Phys. Mater. 3 042006.
- B. Keimer & J. E. Moore (2017) The physics of quantum materials. Nature Physics 13, 1045–1055.
- Hasan MZ, Kane CL (2010) Colloquium: Topological insulators. Reviews of Modern Physics, 82(4):3045–3067.
- Haldane FDM (1988) Model for a Quantum Hall Effect without Landau Levels: Condensed-Matter Realization of the "Parity Anomaly", Phys Rev. Lett. 61, 2015

## **Periodo di erogazione dell'insegnamento**

Secondo semestre

## **Modalità di verifica del profitto e valutazione**

Prova orale.

Colloquio con discussione degli argomenti trattati durante le lezioni.

Verrà valutata la capacità di esporre gli argomenti trattati a lezione in tutti i loro aspetti concettuali e formali incluse le derivazione dei risultati.

Non sono previste valutazioni in itinere.

## **Orario di ricevimento**

Dal lunedì al venerdì a qualsiasi ora lavorativa (previo appuntamento con il docente via email).

## **Sustainable Development Goals**

ISTRUZIONE DI QUALITÀ

