



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI DI MILANO-BICOCCA

## COURSE SYLLABUS

### Solid State Physics

2223-1-F5302Q001

---

#### Obiettivi

Il Corso si pone come obiettivo l'apprendimento di concetti, metodi e di modelli per la fisica dei solidi cristallini, perfetti ed infiniti. A tal fine, il Corso si compone di tre parti. Nella prima parte vengono trattati fenomeni più semplicemente descrivibili in termini di particelle non interagenti (elettroni o fononi), con particolare attenzione alle tecniche di calcolo delle grandezze macroscopiche, sulla base di variabili microscopiche. La seconda parte include quei fenomeni legati agli elettroni nel reticolo cristallino, che determinano la struttura a bande e le proprietà di trasporto, e si basa anch'essa sulla combinazione tra ragionamento fisico e analisi matematica. La terza parte è invece focalizzata su quei fenomeni più complessi, originati dall'interazione tra particelle, che danno luogo a rilevanti proprietà macroscopiche dei solidi perfetti ed infiniti. In questa fase viene posta l'attenzione sulla comprensione di concetti poco intuitivi e sulla linea ideale del ragionamento, privilegiando - anche qui - il carattere metodologico rispetto a quello antologico. La complementazione di un Testo principale con il materiale caricato sul sito del Corso, costituisce parte importante dell'insegnamento metodologico, che questo Corso della Laurea Magistrale intende dispensare.

#### Contenuti sintetici

##### Parte 1

- I. Strutture cristalline e diffrazione
- II. Dinamica reticolare
- III. Proprietà termiche dei solidi
- IV. Gas di elettroni liberi

##### Parte 2

- V. Bande elettroniche
- VI. Trasporto elettronico di carica e calore

### Parte 3

VII. Il problema a multi-elettroni ed effetti dello screening elettronico

VIII. Proprietà magnetiche dei solidi

IX. Superconduttività

## Programma esteso

### PARTE 1

#### I. Strutture cristalline e diffrazione

- Reticoli di Bravais e strutture cristalline notevoli
- Teoria della diffrazione e tecniche sperimentali
- Costruzione di reticolo reciproco e zona di Brillouin, in particolare per strutture FCC, BCC e HCP
- Calcolo delle distanze tra punti ad alta simmetria nella zona di Brillouin del Silicio.

#### II. Dinamica reticolare

- Elementi di dinamica reticolare: matrice delle costanti di forza e sue simmetrie, matrice dinamica ed equazioni di moto
- Dinamica di una catena lineare biatomica
- Costruzione e diagonalizzazione matrice dinamica per fcc monoatomico: autovalori e displacement patterns
- Modi normali, onde sonore e teoria dell'elasticità
- Fononi come modi collettivi e loro statistica.
- Scattering inelastico e misura della dispersione dei fononi tramite scattering neutronico

#### III. Proprietà termiche dei solidi

- Densità di stati vibrazionali
- Calore specifico di Debye e di Einstein
- Potenziali anarmonici e loro effetti: interpretazione qualitativa dell'espansione termica e deviazione del calore specifico dalla legge di Dulong-Petit
- Espansione termica e parametro di Gruneisen
- Conducibilità termica tramite vibrazioni reticolari

#### IV. Gas di elettroni liberi

- Modello degli elettroni liberi
- La statistica di Fermi-Dirac per gli elettroni
- Densità degli stati: definizione e calcolo per gas 3D, 2D e 1D. Andamento del potenziale chimico in T
- Contributo elettronico al calore specifico e i fermioni pesanti
- La funzione lavoro e l'emissione termica di elettroni: fisica ed applicazioni

### PARTE 2

#### V. Bande elettroniche

- Potenziale periodico, equazione centrale e stati di Bloch
- Costruzione dello schema a bande nel caso di reticolo-vuoto
- Bande nel modello di elettrone quasi-libero: apertura del gap al bordo della zona di Brillouin ed interpretazione
- Introduzione al modello Tight-Binding (TB)

- Calcolo di bande nel modello TB: ruolo dei vicini e della base di orbitali atomici e integrali di hopping
- Costruzione e diagonalizzazione della matrice tight binding a primi vicini per silicio
- Interpretazione di bande reali e loro densità di stati
- Misura della dispersione di bande per fotoemissione risolta in angolo

## VI. Trasporto elettronico di carica e calore

- Il modello semiclassico e moto degli elettroni in banda in presenza di un campo elettrico
- Il tensore di massa efficace e il concetto di buca positiva
- L'equazione di Boltzman: bilancio tra processi di drift e quelli di scattering
- L'approssimazione del tempo di rilassamento per i processi di scattering
- Meccanismi microscopici che presiedono allo scattering di cariche
- La conducibilità elettrica nei metalli
- Dipendenza della conducibilità elettrica dalla temperatura
- Trasporto di calore da elettroni e relazione di Wiederman-Franz
- Effetti termoelettrici (Peltier e Seebeck) ed applicazioni
- Moto di elettroni in campo magnetico debole: magneto-resistenza e effetto Hall
- Elettroni liberi in un campo magnetico: livelli di Landau e loro energia
- Moto degli elettroni in campo magnetico forte: tubi di Landau, oscillazioni nelle proprietà ed effetto De Haas-Van Alphen

## PARTE 3

### VII. Il problema a multi-elettroni ed effetti dello screening elettronico

- Dal sistema a più elettroni all'equazione di campo medio: equazione di Hartree
- L'equazione di Hartree-Fock e il significato del termine di scambio
- Energia del gas di elettroni liberi e interagenti
- Fondamenti della teoria del funzionale della densità: teorema di Hohenberg e Kohn e l'equazione di Kohn-Sham
- Proprietà di stato fondamentale ed eccitazioni elementari
- Oscillazioni del gas elettronico e plasmoni
- Il metodo cellulare, il potenziale muffin-tin e lo sviluppo in onde piane aumentate
- L'ortogonalizzazione degli stati di valenza sugli stati di core: onde piane ortogonalizzate e pseudopotenziale
- Stati di impurezza shallow in semiconduttori: livelli energetici e funzione involuppo
- Screening elettronico nel modello di Thomas-Fermi
- Screening elettronico nel modello perturbativo di Lindhard
- Legami e struttura cristallina nei metalli semplici e in altri solidi

### VIII. Proprietà magnetiche dei solidi

- Diamagnetismo e paramagnetismo nei solidi isolanti
- Paramagnetismo di Pauli e diamagnetismo di Landau del gas di elettroni liberi
- Modello di Stoner del ferromagnetismo itinerante per solidi metallici
- Effetto della temperatura nel modello di Stoner, temperatura di Curie
- Ferromagnetismo nei solidi isolanti e modello di Heisenberg
- Antiferromagnetismo ed anisotropia della suscettività magnetica
- Stati eccitati magnetici: onde di spin e magnoni
- Scattering neutronico, ruolo dei magnoni a bassa temperatura, domini ferromagnetici

### IX. Superconduttività

- Introduzione alla superconduttività: esperimento di Onnes ed effetto Meissner Ochsensfeld
- Equazioni di London e London: spessore di penetrazione di correnti e di campo magnetico
- Termodinamica della fase superconduttiva: energia libera, entropia e calore specifico

- Coppie di Cooper ed instabilità del mare di Fermi
- Stato fondamentale secondo la teoria di Barden-Cooper-Schrieffer (BCS)
- Esistenza del gap, sua natura e definizione di stati eccitati nella teoria BCS
- La supercorrente come stato stazionario, valore critico di corrente e campo magnetico ed effetto Meissner nella teoria BCS
- Determinazione sperimentale del gap, sua dipendenza dalla temperatura ed effetto isotopico
- Superconduttori ad alta temperatura critica

## Prerequisiti

Struttura della materia, fisica quantistica di atomi e di molecole

Introduzione elementare alla fenomenologia dei materiali

Elementi di analisi complessa, funzioni speciali, serie e trasformate

## Modalità didattica

Lezioni frontali ed esercitazioni.

## Materiale didattico

TESTO PRINCIPALE

H. IBACH AND H. LUTH, *Solids State Physics*, Springer Verlag

CAPITOLI AGGIUNTIVI PRESI DAI SEGUENTI TESTI, COME RESI DISPONIBILI SULLA PIATTAFORMA E-LEARNING O DISPONIBILI DALLA BIBLIOTECA DI ATENEO:

N.W ASHCROFT AND N.D. MERMIN, *Solid State Physics*, Saunders College Publishing

F. BASSANI E U. GRASSANO, *Fisica dello Stato Solido*, Casa Editrice Boringhieri

G. GROSSO AND G. PASTORI PARRAVICINI, *Solid state Physics*, Academic Press

A.P. SUTTON, *Electronic Structure of Materials*, Oxford University Press

J.R. HOOK and H.E. Hall, *Solid State Physics*, John Wiley & Sons

S. BLUNDELL, *Magnetism in Condensed Matter*, Oxford University Press.

## Periodo di erogazione dell'insegnamento

Primo e secondo semestre a diversa periodicità di lezioni. Le lezioni inizieranno con la seconda parte del primo semestre, per permettere al corso di azzeramento in meccanica quantistica e al corso di analisi funzionale di impartire gran parte delle nozioni necessarie a seguire questo corso. Gli studenti sono invitati quindi a seguirli con attenzione e costanza.

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

L'esame consiste di due parti, che gli studenti possono eventualmente affrontare in sessioni differenti. La prima riguarda gli argomenti della Parte 1 e 2 del corso e consiste di una prova scritta con domande aperte, inclusa la derivazione matematica di alcuni risultati fisici, seguita da un breve colloquio orale di discussione sullo scritto. La seconda parte dell'esame, interamente in forma orale, consiste di un colloquio sugli argomenti svolti a lezioni della Parte 3 del corso ed è mirata a verificare la comprensione di tali fenomeni, appoggiandosi sui risultati quantitativi, solo eventualmente derivati.

Durante il periodo delle lezioni, gli studenti frequentati il corso avranno la possibilità di suddividere ulteriormente la prima parte dell'esame in due prove parziali, una relativa agli argomenti della Parte 1 del corso e l'altra relativa agli argomenti della Parte 2. Tali prove parziali consisteranno di una prova scritta con domande aperte, inclusa la derivazione matematica di alcuni risultati fisici, seguita da un breve colloquio orale di discussione sullo scritto. Resta invariata la modalità di verifica della Parte 3 del corso in forma orale, come indicato sopra. Dal momento che questo percorso assistito tramite prove parziali richiede che gli studenti studino in parallelo allo svolgimento delle lezioni, la partecipazione attiva alle lezioni è fortemente raccomandata. Per agevolare la preparazione, organizzare e spiegare le modalità d'esame e rispondere a qualsiasi domanda sugli argomenti delle lezioni, prima di ciascun esame parziale verrà organizzato un incontro con gli studenti iscritti, e aperto a tutti gli altri.

## **Orario di ricevimento**

Per appuntamento, scrivendo una e-mail a [leo.miglio@unimib.it](mailto:leo.miglio@unimib.it), oppure a [roberto.bergamaschini@unimib.it](mailto:roberto.bergamaschini@unimib.it)

## **Sustainable Development Goals**

ENERGIA PULITA E ACCESSIBILE | IMPRESE, INNOVAZIONE E INFRASTRUTTURE

---