UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI MILANO-BICOCCA

COURSE SYLLABUS

Solid State Physics

2122-1-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 molti-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 della 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 molti-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 inviluppo
- 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: esperimeno di Onnes ed effetto Meissner Ochsenfeld
- 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 ed include la derivazione matematica in forma scritta di alcuni risultati fisici. La seconda parte dell'esame, interamente in forma orale, riguarda gli argomenti (più complessi) della Parte 3 del corso ed è mirata a verificare la comprensione di tali fenomeni, citando - eventualmente derivando - i risultati quantitativi.

Durante il periodo delle lezioni, gli studenti frequentati il corso avranno la possibilità di svolgere l'esame suddiviso in tre prove parziali, una per ciascuna parte del programma del corso. Dal momento che questo percorso assistito

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, oppure a roberto.bergamaschini@unimib.it