

**FITXA IDENTIFICATIVA****Dades de l'Assignatura**

|                      |                         |
|----------------------|-------------------------|
| <b>Codi</b>          | 34263                   |
| <b>Nom</b>           | Física de l'estat sòlid |
| <b>Cicle</b>         | Grau                    |
| <b>Crèdits ECTS</b>  | 7.5                     |
| <b>Curs acadèmic</b> | 2020 - 2021             |

**Titulació/titulacions**

| <b>Titulació</b>      | <b>Centre</b>      | <b>Curs</b> | <b>Període</b>      |
|-----------------------|--------------------|-------------|---------------------|
| 1105 - Grau en Física | Facultat de Física | 4           | Primer quadrimestre |

**Matèries**

| <b>Titulació</b>      | <b>Matèria</b>           | <b>Caràcter</b> |
|-----------------------|--------------------------|-----------------|
| 1105 - Grau en Física | 15 - Ampliació de Física | Obligatòria     |

**Coordinació**

| <b>Nom</b>                   | <b>Departament</b>                        |
|------------------------------|-------------------------------------------|
| PELLICER PORRES, JULIO       | 175 - Física Aplicada i Electromagnetisme |
| SANCHEZ ROYO, JUAN FRANCISCO | 175 - Física Aplicada i Electromagnetisme |

**RESUM**

L'assignatura de Física de l'Estat Sòlid pretén proporcionar una introducció a la física dels sòlids que familiaritze els estudiants amb les estructures cristal·lina i electrònica dels materials i la manera en què ambdós determinen les propietats bàsiques dels sòlids i les seues possibles aplicacions tecnològiques. L'Estat Sòlid és una matèria que enllaça el món macroscòpic amb el microscòpic i per tant fonamental en la formació d'un Físic. En ella s'estudien les propietats fonamentals de la matèria, relacionant-les amb el seu origen microscòpic. L'assignatura té 7.5 crèdits ECTS assignats, dels quals 6 són teòrics i 1.5 són pràctiques de laboratori.

En l'assignatura de Física Quàntica, de tercer curs, s'estudien alguns aspectes fonamentals d'Estat Sòlid, com el teorema de Bloch, l'existència de bandes d'energia (model de Kronig-Penney) i les relacions de dispersió, les condicions periòdiques de Born-von Karman, la massa efectiva o el concepte de forat. També s'estudia el model de Drude de conducció en un metall. Estos conceptes es pressuposen coneguts, encara que alguns d'ells es repassen en el context del tema corresponent. En l'assignatura es fa ampli ús de les ferramentes desenrotllades en les assignatures de Mecànica, Electromagnetisme, Termodinàmica i Física Estadística. En paral·lel a la Física de l'Estat Sòlid, els estudiants cursen la Mecànica Quàntica. Molts dels conceptes desenrotllats en esta assignatura són importants en l'assignatura d'Estat Sòlid, en



particular en l'estudi dels semiconductors, i posteriorment en magnetisme i superconductivitat. D'altra banda, la Física de l'Estat Sòlid reuneix els fonaments necessaris per a cursar altres assignatures posteriors, com la Física de Semiconductors.

El desenrotllament de l'assignatura comença analitzant la periodicitat a llarg abast i les simetries a què dóna lloc. S'estudien els distints sistemes cristal·lins i es veuen exemples d'estructures d'interès fonamental i tecnològic. Posteriorment s'analitza el fenomen de la difracció de rajos X en vidres. Es comença introduint la xarxa recíproca i les zones de Brillouin per a posteriorment descriure alguns mètodes de resolució d'estructures. A continuació s'aborda el problema denominat dinàmica de la xarxa, obtenint-se les relacions de dispersió i introduint el concepte de fonó. Es formula de forma senzilla la dispersió de Brillouin i Raman per a l'estudi dels fonons acústics i òptics respectivament. Les propietats tèrmiques dels sòlids estan íntimament relacionades amb els fonons. Es defineix la densitat d'estats de fonons, que servirà de base per a la determinació d'una sèrie de propietats tèrmiques com la capacitat calorífica, l'expansió tèrmica o els efectes d'anarmonicidad.

L'estructura electrònica dels sòlids és essencial per a conèixer el comportament electrònic i òptic. En el tema s'aborden dos models, el de l'aproximació quasi-lliure, vàlida per a metalls, i el de l'aproximació d'electrons fortament lligats, vàlid per a aïllants. S'analitza l'estructura de bandes en la primera zona de Brillouin. S'introdueixen els punts crítics. Després s'analitza algunes estructures de bandes conegudes i les seues densitats d'estats.

L'estudi dels conductors comença amb la descripció semiclàsica del transport electrònic, discutint per què uns materials condueixen l'electricitat i altres no. Es revisa el model de Drude fent èmfasi en els seus punts febles i en la necessitat d'introduir l'estadística de Fermi per a descriure el gas d'electrons. Així mateix, s'estudia la contribució dels electrons a la conducció tèrmica. Els semiconductors són la base de gran part de la tecnologia electrònica actual. Després de recordar alguns conceptes que s'han vist en Física Quàntica, com el concepte de forat i de massa efectiva, es determina la concentració d'electrons en un semiconductor i l'evolució de l'energia de Fermi en funció de la temperatura. S'estudien els semiconductors dopats.

Gran part de les propietats macroscòpiques d'un sòlid vénen donada per la seua funció dielèctrica. El tema comença descrivint la funció dielèctrica d'un conjunt d'oscil·ladors harmònics. A continuació s'exposen els diferents mecanismes de polarització en els sòlids. Es detalla la relació de la funció dielèctrica amb els paràmetres òptics. En particular, s'estudia l'absorció infraroja, els polaritons, la polarització per orientació i la funció dielèctrica dels metalls. Es descriuen les relacions de Kramers-Kronig. Finalment es fa una xicoteta introducció als materials ferroelèctrics.

L'exposició del magnetisme comença amb la teoria quàntica del diamagnetisme i paramagnetisme. El ferromagnetisme, junt amb altres variants d'ordre magnètic, és un fenomen cooperatiu, la descripció del qual requereix introduir la denominada interacció d'intercanvi. Es discuteix la teoria del camp mitjà tant del ferromagnetisme com de l'antiferromagnetisme. Es diferencia els distints comportaments magnètics a través de la susceptibilitat magnètica en funció de la temperatura.

Finalment, es dóna una visió prou completa al fenomen de la superconductivitat, partint d'alguns experiments essencials per a després fer una descripció fenomenològica de les seues propietats des del punt de vista de l'Electrodinàmica i de la Termodinàmica. S'exposa de manera simplificada l'origen de la superconductivitat. A continuació s'analitzen els distints tipus de superconductors. Finalment, es descriu l'efecte Josephson.



## **CONEIXEMENTS PREVIS**

### **Relació amb altres assignatures de la mateixa titulació**

No heu especificat les restriccions de matrícula amb altres assignatures del pla d'estudis.

### **Altres tipus de requisits**

Física General, Mecànica i Ones, Física Cuàntica, Termodinàmica i Física Estadística, Òptica, Electromagnetisme, Matemàtiques, Mètodes Matemàtics.

## **COMPETÈNCIES**

### **1105 - Grau en Física**

- Posseir i comprendre els fonaments de la física en els aspectes teòrics i experimentals, així com el bagatge matemàtic necessari per a la seua formulació.
- Saber aplicar els coneixements adquirits a l'activitat professional, saber resoldre problemes i elaborar i defensar arguments, recolzant-se en els dits coneixements.
- Desenvolupament d'habilitats d'aprenentatge necessàries per emprendre estudis posteriors amb un elevat grau d'autonomia.
- Resolució de problemes: ser capaç d'avaluar clarament els ordres de magnitud, de desenvolupar una percepció de les situacions que són físicament diferents però que mostren analogies, per permetre, doncs, l'ús de solucions conegudes a problemes nous.
- Modelització i resolució de problemes: ser capaç d'identificar els elements essencials d'un procés/situació i d'establir-ne un model de treball. Ser capaç de realitzar les aproximacions requerides amb l'objecte de reduir un problema fins a un nivell manejable. Pensament crític per construir models físics.
- Cultura general en física: haver-se familiaritzat amb les àrees més importants de la física i amb enfocaments que compreguen i relacionen diferents àrees de la física, així com relacions de la física amb altres ciències.
- Investigació bàsica i aplicada: adquirir una comprensió de la naturalesa de la investigació física, de les formes en què es du a terme, i de com la investigació en física és aplicable a molts camps diferents, per exemple l'enginyeria; habilitat per dissenyar procediments experimentals i/o teòrics per: (i) resoldre els problemes corrents en la investigació acadèmica o industrial; (ii) millorar els resultats existents.
- Cerca de bibliografia: ser capaç de buscar i utilitzar bibliografia en física i altra bibliografia tècnica, així com qualsevol font d'informació rellevant per a treballs d'investigació i desenvolupament tècnic de projectes.
- Destreses generals i específiques de llengües estrangeres: millorar el domini de l'anglès científicotècnic mitjançant la lectura i l'accés a la bibliografia fonamental de la matèria.



- Ser capaç de continuar l'estudi d'altres matèries de la física gràcies al bagatge adquirit en el context d'aquesta matèria.
- Comunicació oral i escrita: ser capaç de transmetre informació, idees, problemes i solucions mitjançant l'argumentació i el raonament propis de l'activitat científica, utilitzant els conceptes i les eines bàsiques de la física.
- Comprensió teòrica de fenòmens físics: tener una buena comprensión de las teorías y modelos más importantes (estructura lógica y matemática, apoyo experimental, fenómenos físicos descritos), en Estructura de la Materia.

## RESULTATS DE L'APRENTATGE

- Coneixement dels conceptes bàsics de simetria relacionats amb l'estructura cristal·lina.
- Coneixements de difracció de raigs X.
- Entendre les equacions bàsiques de la dinàmica del sòlid.
- Entendre l'origen de fenòmens físics com les propietats tèrmiques, elèctriques o òptiques.
- Comprendre l'origen del magnetisme i la superconductivitat.
- Maneig de les eines matemàtiques i conceptes físics necessaris per a abordar un tema d'investigació en Estat Sòlid.
- Desenvolupar la capacitat d'identificar problemes i idear estratègies per a la seua resolució.
- Desenvolupar la capacitat de planificar i organitzar el propi aprenentatge, basant-se en el treball individual a partir de la bibliografia i altres fonts d'informació.
- Avaluar la importància relativa de les diferents causes que intervenen en un fenomen físic.
- Identificar els elements essencials d'una situació complexa, realitzar les aproximacions necessàries per a construir models simplificats que ho descriuen i poder així entendre el seu comportament en altres situacions.
- Ser capaç d'efectuar una posada al dia de la informació existent sobre un problema concret, ordenar-la i analitzar-la críticament.
- Fomentar la capacitat per a treballar en grup.

## DESCRIPCIÓ DE CONTINGUTS

### 1. Estructura cristal·lina

Sòlids cristal·lins i amorfs: ordre a curta i llarga distància. Xarxes cristal·lines. Xarxa de Bravais i motiu d'una estructura cristal·lina. Simetries puntuals i la seua combinació amb la simetria de translació. Estructures cristal·lines significatives.

### 2. Difracció en estructures periòdiques

Xarxa recíproca. Primera zona de Brillouin. Dispersió de la llum per electrons i àtoms. Difracció per xarxes periòdiques: condició d'interferència de Laue i esfera de Ewald. Interpretació de Bragg de la condició de Laue. Factor d'estructura. Problema de la fase. Dispositius experimentals.





### 3. Dinàmica de la xarxa

Aproximacions adiabàtica i harmònica. Cadena lineal amb un àtom i dos àtoms en la cel·la unitat: branques acústiques i òptiques. Exemples senzills de dispersió real en un sòlid. Vector d'ones de les vibracions de la xarxa. Efectes Brillouin i Raman per a l'estudi de les maneres acústiques i òptics.

### 4. Propietats tèrmiques dels sòlids

Insuficiència de la física clàssica en la descripció de la calor específica. Concepte de fonó. Relacions de dispersió de fonons i densitat d'estats. Excitació tèrmica de fonons: energia tèrmica i calor específica. Aproximació de Debye per al sòlid harmònic. Efectes anharmònics. Dilatació tèrmica. Conductivitat tèrmica.

### 5. Estructura electrònica: teoria de bandes

Equació de Schrödinger de l'electró en un potencial periòdic: teorema de Bloch. Aproximació de l'electró quasi-lliure: metalls. Aproximació de l'electró fortament lligat: aïllants i semiconductors. Dispersió de bandes en la primera zona de Brillouin: metalls i semiconductors. Densitat d'estats: punts crítics o singularitats de Van Hove.

### 6. Metalls

Teoria semiclàssica del transport electrònic. Contribució de bandes plenes i parcialment plenes al transport. Model de Drude i problemes associats. Electrons quasi-lliures: energia de Fermi, densitat d'estats i superfície de Fermi. Contribució electrònica a la calor específica en un metall. Model de Sommerfeld.

### 7. Semiconductors

Estructura de bandes d'un semiconductor entorn al gap: masses efectives i concepte de buit. Nivell de Fermi i la seua dependència amb la temperatura. Concentració d'electrons i buits en un semiconductor intrínsec. Impureses dadores i acceptores. Dependència en temperatura del nivell de Fermi i concentració de portadors en un conductor dopat. Model de Drude en un semiconductor. Dispersió per fonons i impureses.

### 8. Dielèctrics

Corrent elèctric versus polarització elèctrica. Funció dielèctrica d'un conjunt d'oscil·ladors harmònics. Funció dielèctrica d'un sòlid: relacions de Kramers-Kronig. Funció dielèctrica i paràmetres òptics. Mecanismes de polarització. Polarització electrònica. Polarització per vibracions polars. Polarització associada a portadors lliures. Polarització per orientació. Polarització estàtica: camp local. Polarització en un material ferroelèctric.



## 9. Magnetisme

Moment magnètic d'un àtom. Diamagnetisme i paramagnetisme. La interacció d'intercanvi. Hamiltonià despí per al ferromagnetisme. Teoria del camp mitjà del ferromagnetisme i antiferromagnetisme. Dominis i cicles d'histeresis.

## 10. Superconductivitat

Propietats bàsiques. Electrodinàmica. Consideracions termodinàmiques. Descripció microscòpica. Supercorrents. Resistència nul·la i efecte Meissner. Corrent i camps crítics. Teoria de Ginzburg-Landau. Longitud de coherència. Quantització del flux magnètic. Efectes Josephson.

## VOLUM DE TREBALL

| ACTIVITAT                                       | Hores         | % Presencial |
|-------------------------------------------------|---------------|--------------|
| Classes de teoria                               | 60,00         | 100          |
| Pràctiques en laboratori                        | 15,00         | 100          |
| Preparació d'activitats d'avaluació             | 20,00         | 0            |
| Preparació de classes de teoria                 | 47,50         | 0            |
| Preparació de classes pràctiques i de problemes | 45,00         | 0            |
| <b>TOTAL</b>                                    | <b>187,50</b> |              |

## METODOLOGIA DOCENT

**Classes teòriques:** S'establiran les bases de l'Estat Sòlid, introduint els aspectes fonamentals i derivant les seues propietats elèctriques, òptiques i magnètiques.

**Classes de problemes:** Es realitzen exercicis que complementen les classes teòriques, en els quals es procurarà introduir magnituds físiques reals que ens permeten conèixer l'ordre de magnitud dels diferents paràmetres físics que adonen de les seues propietats.

**Sessions de laboratori:** Les pràctiques de laboratori es realitzaran en grups reduïts. Els estudiants treballen en grup en la presa de dades i discussió dels resultats, en una anàlisi preliminar.

## AVALUACIÓ

El sistema d'avaluació considera tant l'assimilació dels aspectes explicats en les classes de teoria i problemes com en el laboratori. L'examen escrit (80%) avaluarà la comprensió dels aspectes teòric-conceptuals i el formalisme de l'assignatura, tant mitjançant preguntes teòriques com a través de qüestions conceptuals i numèriques. També inclourà problemes que valoren la capacitat d'aplicació del formalisme i la capacitat crítica respecte als resultats obtinguts. La nota del laboratori (20%) es basa en una evolució contínua dels qüestionaris entregats.



## REFERÈNCIES

### Bàsiques

- Solid State Physics, N. W. Ashcroft y N. D. Mermin, Holt-Saunders Int. Edt., 1976.
- Solid-State Physics: An introduction to principles of Materials Science, H. Ibach y H. Lüth, Springer, 2003.
- The Oxford Solid State Basics, Steven H. Simon, Oxford University Press (2013).
- Física del estado sólido. Ejercicios resueltos. Jesús Maza, Jesús Mosqueira y José Antonio Veira. Universidad de Santiago de Compostela.

### Complementàries

- Solid State Physics, G. Burns, Academic Press, 1990.
- Solid State Physics, H. E. Hall, John Wiley & Sons, 1982.
- Quantum Theory of Solids, C. Kittel, Wiley, 1987.

## ADDENDA COVID-19

**Aquesta addenda només s'activarà si la situació sanitària ho requereix i previ acord del Consell de Govern**

METODOLOGIA DOCENT: El model de docència híbrida implantat i el percentatge de presencialitat serà el que determine la CAT del títol en funció dels recursos materials disponibles i de les condicions i normes sanitàries existents.