

**FITXA IDENTIFICATIVA****DADES DE L'ASSIGNATURA**

Codi: 34276
Nom: Òptica quàntica
Cicle: Grau
Crèdits ECTS: 6
Curs acadèmic: 2025-26

TITULACIONS

Titulació	Centre	Curs	Període
1105 - Grau en Física	Facultat de Física	4	Segon quadrimestre

MATÈRIES

Titulació	Matèria	Caràcter
1105 - Grau en Física	Complements de Física	OPTATIVA

COORDINACIÓ

NAVARRETE BENLLOCH CARLOS

FERRANDO COGOLLOS ALBERT

VALCARCEL GONZALVO GERMAN JOSE DE

RESUM

Descriptors: Teoria quàntica de la llum, fotons, estats coherents, llum comprimida, llum no clàssica, interacció llum-àtoms, fotodetecció, teoria del làser.

Objectius: Amb aquesta assignatura es pretén que els estudiants assoleixen un coneixement bàsic sobre la naturalesa quàntica de la llum i sobre la interacció d'aquesta (dins el domini òptic de l'espectre electromagnètic, que exclou freqüències superiors als raigs X i inferiors a les microones) amb la matèria, principalment amb àtoms i molècules. Després de quantitzar el camp, s'estudien els estats coherents del camp electromagnètic i es discuteixen les seues propietats. A continuació s'aborden els processos bàsics d'interacció (emissió espontània, emissió i absorció estimulades). Després d'estudiar la fotodetecció (essencial per entendre cabdalment la naturalesa quàntica de la llum), es presta particular atenció als anomenats «estats no clàssics» de la radiació, com ara els estats comprimits (*squeezed states*), estudiant-se la forma en que poden ser generats. També s'aborda una introducció a l'entrellaçament quàntic i a les seues implicacions en òptica quàntica.



A banda de tot això, també és un objectiu entendre els aspectes fonamentals de la teoria semiclàssica de la interacció llum-matèria (en la què el camp és tractat clàssicament) amb la intenció de obtenir les equacions fonamentals de la teoria semiclàssica del làser (equacions de Maxwell-Bloch). L'estudi d'aquesta inclou alguns fenòmens de dinàmica no lineal en l'emissió dels làsers (com ara el caos determinista) què són d'interès transversal.

Relació amb assignatures anteriors: L'òptica quàntica es basa en els cursos obligatoris d'òptica, electromagnetisme i mecànica quàntica. Els coneixements impartits en aquesta assignatura no han sigut tractats en cap altra, amb l'excepció de l'òptica, en la què es tracta la teoria del làser amb equacions de balanç d'Einstein, i la mecànica quàntica, que tracta (parcialment) alguns aspectes que són desenvolupats amb més profunditat en l'òptica quàntica.

CONEXIMENTS PREVIS

RELACIÓ AMB ALTRES ASSIGNATURES DE LA MATEIXA TITULACIÓ

No s'ha especificat restriccions de matrícula amb altres assignatures del pla d'estudis.

ALTRES TIPUS DE REQUISITS

Es recomana un coneixement bàsic de l'electromagnetisme clàssic, de la mecànica quàntica i també de l'òptica clàssica. Tots aquests coneixements s'adquirixen cursant les assignatures corresponents del grau de física.

COMPETÈNCIES / RESULTATS D' APRENENTATGE

1105 - Grau en Física

Capacitat d'aprenentatge: ser capaç d'iniciar-se en nous camps de la física i de la ciència i la tecnologia en general, a través de l'estudi independent.

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.

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.

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.

Destreses generals i específiques en llengües estrangeres: haver millorat el domini de l'anglès (o d'una altra llengua estrangera d'interès) mitjançant: accés a bibliografia fonamental, comunicació oral i escrita (anglès científicotècnic), cursos, estudis a l'estranger, reconeixement de crèdits en universitats estrangeres etc.



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.

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.

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.

Que els estudiants hagen demostrat posseir i comprendre coneixements en una àrea d'estudi que parteix de la base de l'educació secundària general, i se sol trobar a un nivell que, si bé descansa en llibres de text avançats, inclou també alguns aspectes que impliquen coneixements procedents de l'avantguarda del seu camp d'estudi.

Que els estudiants hagen desenvolupat aquelles habilitats d'aprenentatge necessàries per a emprendre estudis posteriors amb un alt grau d'autonomia.

Que els estudiants puguen transmetre informació, idees, problemes i solucions a un públic tant especialitzat com no especialitzat.

Que els estudiants sàpien aplicar els seus coneixements al seu treball o vocació d'una forma professional i posseïsquen les competències que solen demostrar-se per mitjà de l'elaboració i defensa d'arguments i la resolució de problemes dins de la seua àrea d'estudi.

Que els estudiants tinguen la capacitat d'arreglar i interpretar dades rellevants (normalment dins de la seua àrea d'estudi) per emetre judicis que incloguen una reflexió sobre temes rellevants d'índole social, científica o ètica.

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.

Saber aplicar els coneixements adquirits a l'activitat professional, saber resoldre problemes i elaborar i defensar arguments, recolzant-se en els dits coneixements.

Ser capaç de reunir i interpretar dades rellevants per emetre judicis.

DESCRIPCIÓ DE CONTINGUTS

1. Teoria Semiclàssica de la interacció llum-àtoms

1. Introducció. L'àtom de dos nivells
2. Hamiltonià d'interacció
3. Equacions d'evolució. Aproximació de l'ona rotant



4. Oscil·lacions de Rabi
5. Àtom vestit
6. Polsos
7. Dissipació. La matriu densitat. Equacions òptiques de Bloch
8. L'índex de refracció.
9. Àtoms de tres nivells. Processos a dos fotons, Raman i híper-Raman

Seminari: Teoria semiclàssica del làser

1. El làser de dos nivells en anell
2. Amplificació en un medi de dos nivells
3. El làser: emissió monomode
4. Model de Lorenz-Haken
5. Anàlisi lineal d'estabilitat
6. Pulsacions espontànies i rutes al caos

2. Quantització del camp electromagnètic lliure

1. Quantització canònica d'un oscil·lador harmònic. Operadors de creació i destrucció
2. El camp em lliure: potencials i invariància gauge
3. El lagrangià estàndard del camp em. Esquema de quantització estàndard
4. Quantització canònica d'un mode d'una cavitat Fabry-Perot
5. Hamiltonià del camp em lliure
5. Operadors camp elèctric i magnètic. Operadors moment lineal i moment angular
6. Imatges d'evolució temporal

3. Fotons i el buit quàntic

1. Estats nombre o de Fock: fotons
2. El camp elèctric d'un estat de Fock
3. El buit em. Fluctuacions quàntiques
4. L'efecte Casimir

4. Estats coherents

1. Estats quasi-clàssics del camp electromagnètic
2. Expressió dels estats coherents en la base de Fock
3. L'operador desplaçament
4. Propietats físiques dels estats coherents



5. Propietats matemàtiques dels estats coherents

5. Estats comprimits

1. Els operadors quadratura del camp
2. Detecció homodina compensada
3. Introducció a la compressió quàntica
4. L'operador de compressió
5. Conversió paramètrica a la baixa
6. Estats comprimits

6. Teoria quàntica de la interacció llum-àtoms

1. Hamiltonià dipolar elèctric
2. Processos elementals
3. Emissió espontània. Teoria de Weisskopf-Wigner
4. Decaïment. Emissió espontània en cavitats
5. Desplaçament dels nivells atòmics. El desplaçament Lamb
6. Renormalització de la massa

7. El model de Jaynes-Cummings

1. Introducció. El model de Rabi
2. El model de Jaynes-Cummings
3. Ió atrapat en interacció amb llum clàssica
4. Resolució de l'equació de Schrödinger
5. Evolució de les propietats atòmiques
6. Evolució de les propietats del camp
7. Observacions experimentals

8. Fotodetecció i coherència quàntiques

1. Introducció
2. Teoria semi-clàssica de la fotodetecció i la coherència



3. Teoria quàntica de la fotodetecció i la coherència

9. Entanglement

1. El concepte d'entrellaçament en mecànica quàntica
2. Estats purs entrellaçats: caracterització i quantificació
3. L'estat d'Einstein-Podolski-Rosen (EPR) i el seu atac a la teoria quàntica
4. Desigualtats de Bell
5. El divisor de feix com element entrellatzador.

VOLUM DE TREBALL (HORES)**ACTIVITATS PRESENCIALS**

Activitat	Hores
Teoria	60,00
Total hores	60,00

ACTIVITATS NO PRESENCIALS

Activitat	Hores
Assistència a altres activitats	0,00
Elaboració de treballs individuals o en grup	20,00
Estudi i treball autònom	50,00
Preparació de classes	0,00
Preparació d'activitats d'avaluació	0,00
Resolució de casos pràctics	20,00
Total hores	90,00

METODOLOGIA DOCENT

Aquesta assignatura té classes de dos tipus. Un es correspon amb les classes teòriques o teòrico-pràctiques en les que es potencia, tant com és possible, la participació dels estudiants. Aquest és el tipus de classe més comú en aquesta assignatura (52 de les 60 hores previstes). Durant aquestes classes el professor presenta de forma ordenada i autocontinguda (fins on és possible) els continguts dels set temes del programa.

L'altre tipus es correspon amb els seminaris i es subdividix en dos subtipus: la meitat dels seminaris són de caràcter teòric (la diferència amb les classes descrites adés radica en que no es pretén que siguin tan completes ni autocontingudes). El que es pretén és que l'estudiant n'aprenja a seguir d'una manera més



laxa els continguts d'una part de la matèria, tot potenciant la intuïció i concentrant l'esforç en l'estudi dels models deduïts. L'altra meitat dels seminaris són de caràcter pràctic ja que en ells s'apren com es construeixen i utilitzen els programes informàtics necessaris per a dur a terme les simulacions previstes.

AVALUACIÓ

L'avaluació constarà de:

1) **Examen**, la qualificació del qual (N1) podrà aplegar a 10 punts.

S'avaluarà la comprensió dels aspectes teóricoconceptuals i de formalisme de l'assignatura, la capacitat d'aplicació d'aquests a la resolució de problemes i la capacitat crítica respecte als resultats obtinguts. En tot cas es valorarà una correcta argumentació i una adequada justificació. Hi haurà un examen en cada convocatòria.

2) **Avaluació continua**, la qualificació de la qual (N2) podrà aplegar a 10 punts.

Es basarà en la realització, individualment o en grup, de simulacions numèriques, memòries, resums, resolució de problemes i qüestions i altres activitats. Podran ser objecte d'avaluació tant documents escrits, com exposicions i defenses orals, així com proves curtes escrites.

En primera convocatòria, la qualificació de l'assignatura serà $0,6 \cdot N1 + 0,4 \cdot N2$. En segona convocatòria, la qualificació de l'assignatura serà $\max\{N1, 0,6 \cdot N1 + 0,4 \cdot N2\}$. Tant en primera com en segona convocatòries és condició necessària que N1 supere el valor de 3.5 punts sobre 10 per a poder aprovar l'assignatura. Si no se supera, la qualificació final serà N1.

BIBLIOGRAFIA

- R. Loudon, The quantum theory of light (Clarendon Press, 1983)
- P. Milonni i J.H. Eberly, Lasers (John Wiley and Sons, 1988)
- Ch.C. Gerry i P.L. Knight, Introductory Quantum Optics (Cambridge University Press, 2005)
- C. Cohen-Tannoudji, J. Dupont-Roc i G. Grynberg, Photons and atoms. Introduction to Quantum Electrodynamics (John Wiley and Sons, 1989)
- H. Haken, Light (vols. 1 i 2) (North Holland, 1985)
- L. Mandel i E. Wolf, Optical coherence and Quantum Optics (Cambridge University Press, 1995)
- L. Allen and J.H. Eberly, Optical resonance and two-level atoms (Dover, 1987)
- W.H. Louisell, Quantum statistical properties of radiation (Oxford University Press, 2000)
- W. Vogel i D.-G. Welsch, Lectures on quantum optics (Akademie Verlag, 1994)
- M.O. Scully i M.S. Zubairy, Quantum Optics (Cambridge University Press, 1997)