



GUIA DOCENT

ÒPTICA QUÀNTICA

Grau en Física

Quart Curs

**I.- DADES INICIALS D'IDENTIFICACIÓ**

Nom de l'assignatura:	Òptica Quàntica
Nom de la matèria:	Complements de Física
Crèdits ECTS:	6
Caràcter:	Optatiu
Titulació:	GRADUAT/DA EN FÍSICA
Departament:	Òptica

II.- INTRODUCCIÓ A L'ASSIGNATURA**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 que el camp és tractat clàssicament) amb la intenció de obtindre 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) que 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 l'assignatura no han sigut tractats en cap altra, amb l'excepció de l'òptica, en la que 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.

Relació amb assignatures posteriors:

Cap relació concreta amb cap assignatura posterior del grau de física.

**III.- VOLUM DE TREBALL**

Setmanes de treball: 15 setmanes.

Hores de treball de l'alumne 25 per crèdit ECTS

TIPUS D'ACTIVITAT	DESCRIPCIÓ	HORES
Assistència a classes teòrico-pràctiques	Classes magistrals dialogades i resolució de problemes. 4 hores/setmana x 11,5 setmanes	46
Assistència a seminaris teòrics	Seminaris teòrics que desenvolupen la teoria semiclàssica de la interacció llum-matèria i la teoria del làser 4 hores/setmana x 1,5 setmanes	6
Assistència a seminaris de simulació	Seminaris de simulació sobre comportament dinàmic de làsers 4 hores/setmana x 1 setmana	10
Realització de simulacions	Treball de l'estudiant consistent en la realització de simulacions d'ordinador a partir de programes subministrats pel professorat	6
Memòria sobre les simulacions	Treball de l'estudiant consistent en l'elaboració d'una memòria sobre el treball de simulació realitzat	4
Assistència a tutories individualitzades		2
Estudi-preparació de continguts teòrico-pràctics	Teoria: Problemes:	35 35
Estudi per a la preparació d'exàmens		12
Realització d'exàmens		4
TOTAL VOLUM DE TREBALL		150

IV.- OBJECTIUS GENERALS

L'òptica quàntica és la teoria més fonamental de que hom disposa per tal de descriure la llum i els processos d'interacció entre aquesta i la matèria. Es tracta d'un cos de coneixement molt important tant des d'un punt de vista fonamental com des d'un punt de vista tecnològic ja que en ella es basen dispositius tan importants como ara els làsers. A més a més, l'òptica quàntica juga un paper central en la realització pràctica de dispositius d'informació quàntica (teleportació, cifrat, computació, etc.).

El temari tracta de fer un recorregut pels aspectes més importants d'aquesta matèria sense que pugui ser, òbviament, exhaustiu. Per això es desenvolupen els aspectes fonamentals i alguns aspectes aplicats d'una forma raonablement compensada. Així, la quantització del camp i la descripció dels



estats del camp ocupen una part important del programa, però també es dedica espai a l'estudi d'altres fonts com a dispositius generadors de llum no-clàssica.

Pel que fa a la interacció llum-matèria, aquesta sol dividir-se en dos grans parts: la teoria quàntica pròpiament dita (en la que el camp, i si escau la matèria, són convenientment quantitzats), i les teories semiclàssiques (en les que usualment només es quantitza la matèria). Per tal d'evitar confusions o desenvolupaments excessivament detallats, s'ha optat per presentar la teoria quàntica en el cos principal de l'assignatura, i tractar la teoria semiclàssica a banda en seminaris i pràctiques d'ordinador. En aquests seminaris el tractament serà igualment rigorós que en el cos principal de l'assignatura, però es desenvoluparan més ràpidament els continguts i no s'esperarà dels estudiants que dominen tots els detalls. L'objectiu és que els estudiants puguin apreciar d'on provenen les equacions bàsiques de la teoria semiclàssica (equacions de Bloch i de Maxwell-Bloch) sense necessitat de dedicar-hi massa temps. Abordat d'aquesta forma, podem desenvolupar de forma simultània la teoria semiclàssica amb la teoria quàntica sense crear confusió i sense sobreçarregar de treball als estudiants. L'objectiu últim d'aquests seminaris és obtenir les equacions de Maxwell-Bloch que constitueixen la teoria semiclàssica del làser. L'estudi d'aquestes (que contenen fenòmens d'interès transversal com ara el caos determinista) es durà a terme en una sèrie de pràctiques d'ordinador.

V.- CONTINGUTS MÍNIMS

- Quantització del camp electromagnètic (Tema 1)
- Estats del camp quàntic (Temes 1, 2, 5 i 6)
- Teoria quàntica de la interacció llum-matèria (Temes 3, 4 i 7)
- Teoria semiclàssica de la interacció llum-matèria (Tema 3 i Seminaris 1 i 2)
- Teoria semiclàssica del làser (Seminaris 3 i 4 i Pràctiques de simulació)
- Fotodetecció i coherència (Tema 4).
- Entrellaçament (Tema 6)

VI.- DESTRESES QUE CAL ADQUIRIR

Assoliment d'un coneixement bàsic de

- la naturalesa quàntica de la llum.
- la interacció de la llum amb la matèria, principalment amb àtoms i molècules.

En particular, cal entendre:

- La quantització no relativista de la llum
- La varietat d'estats de la llum i saber distingir les característiques quàntiques de les clàssiques.
- Els processos bàsics d'interacció (absorció i emissió).
- El procés de fotodetecció i la seua aplicació a la caracterització d'estats.
- En què consisteix l'entrellaçament quàntic i per què és útil.
- Els fonaments de la teoria semiclàssica de la interacció llum-àtoms i la seua aplicació al làser.
- Els aspectes bàsics de la dinàmica no lineal del làser.

VII.- HABILITATS SOCIALS O TRASVERSALS

A més de les pròpies de la titulació:

- Capacitat per a comprendre i sintetitzar els problemes plantejats amb la finalitat d'arribar a la seua solució.



- Capacitat de treballar de forma organitzada. Establir plans de treball que permeten obtenir els resultats desitjats de la forma més directa.
- Habilitat en la cerca d'informació a partir de bibliografia.
- Interpretació de gràfics.
- Capacitat per a treballar en grup.
- Us de noves tecnologies.
- Capacitat per elaborar texts i memòries sobre els treballs realitzats de forma comprensible i organitzada.
- Rigor a l'hora de valorar el treball realitzat per un mateix. Ser capaç d'identificar les causes dels errors i cercar possibles solucions.
- Capacitat d'identificar i valorar la importància dels conceptes científics estudiats amb les seues aplicacions a altres camps de la ciència i a la millora del benestar social.
- Capacitat per a la comunicació científica, tant oral com escrita, en l'àmbit acadèmic i en el divulgatiu.
- Habilitat per a argüir des de criteris racionals i científics, tant en l'àmbit acadèmic como divulgatiu, evitant prejudicis.
- Actituds i valors que estableixen condicions per a desenvolupar un comportament ètic en el desenvolupament de l'activitat professional.

**VIII.- TEMARI I PLANIFICACIÓ TEMPORAL**

S'assumix quatre hores setmanals durant quinze setmanes. Tretze setmanes es dedicaran al desenvolupament dels set temes del temari normal. Les altres dues setmanes (un total de huit hores) es dedicaran als seminaris i pràctiques de computació comentats més a dalt. Aquestes últimes s'hi intercalaran de la forma més convenient depenent del ritme de desenvolupament de l'assignatura. El contingut dels temes, seminaris i pràctiques de simulació és el següent.

La planificació que es mostra a continuació és lògicament orientativa ja que, depenent del ritme d'adquisició de competències dels alumnes i del grau de maduresa dels seus coneixements previs, pot resultar convenient (o necessari) reajustar el cronograma següent.

	TEMA	Num. setmanes
1	Tema 1: Quantització del camp electromagnètic: 1.1. Variables normals del camp electromagnètic 1.2. Hamiltonià del camp EM lliure 1.3. Operadors de creació i destrucció. Estats de Fock 1.4. Fluctuacions de buit 1.5. Operador densitat	8 hores 2 setmanes
2	Tema 2: Estats coherents 2.1 Estats quasiclàssics del camp electromagnètic 2.2 Desenvolupament en la base de estats de Fock 2.3 L'operador desplaçament 2.4 Propietats físiques dels estats coherents 2.5 Propietats matemàtiques dels estats coherents 2.6 Representacions coherents de l'operador densitat	8 hores 2 setmanes
3	Tema 3: Interacció llum-àtoms 3.1. L'Hamiltonià dipolar elèctric 3.2. Interacció entre un camp clàssic i un àtom 3.3. Processos estimulats 3.4. Processos multifotònics 3.5. Teoria de Wigner-Weisskopf de l'emissió espontània	9 hores 2,25 setmanes
4	Tema 4: El model de Jaynes-Cummings 4.1. El model 4.2. Resolució de l'equació d'Schrödinger 4.3. Oscil·lacions de Rabi 4.4. Col·lapses i ressorgiments de les oscil·lacions de Rabi 4.5. Observacions experimentals	6 hores 1,5 setmanes
5	Tema 5: Fotodetecció i coherència quàntiques 5.1. L'efecte fotoelèctric 5.2. Probabilitat diferencial de fotodetecció. Fotodeteccions múltiples 5.3. Coherència temporal de 1 ^{er} ordre 5.4. Coherència temporal de 2 ^{on} ordre. <i>Bunching</i> fotoelèctric	6 hores 1,5 setmanes
6	Tema 6: Estats comprimits 6.1. Les quadratures del camp electromagnètic 6.2. Detecció homodina compensada 6.3. Operador de compressió 6.4. Estats de Caves i estats de Yuen 6.5. Generació experimental de llum comprimida	6 hores 1,5 setmanes



	6.6. Altres estats no clàssics	
7	Tema 7: Entrellaçament quàntic (<i>entanglement</i>) 7.1. Estats entrellaçats 7.2. <i>Entanglement</i> i <i>squeezing</i> 7.3. Aplicacions	3 hores 0,75 setmanes
S1	Seminari 1: Interacció semiclàssica de la llum amb àtoms de 2 nivells	3 hores 0,75 setmanes
S2	Seminari 2: Teoria semiclàssica del làser	3 hores 0,75 setmanes
S3	Seminari de simulació 1: Introducció a Mathematica/Matlab. Estabilitat lineal en el model de Lorenz	2 hores 0,5 setmanes
S4	Seminari de simulació 2: Simulació del model de Lorenz	8 hores 2 setmanes

IX.- BIBLIOGRAFIA DE REFERÈNCIA

a) Bibliografia bàsica: llibres i pàgines web

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)

b) Bibliografia complementària: llibres i pàgines web

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 i 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)

c) Altre material complementari, guies d'estudi, exercicis resoltos i proposats en la pàgina web del professor etc.

Els estudiants disposaran de material divers elaborat pel professorat, especialment per als seminaris, però també incloent apunts d'alguns temes i exercicis proposats.

X.- CONEIXEMENTS PREVIS

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



XI.- METODOLOGIA

Descriure amb detall els tipus de classe de la assignatura:

- (i) Classes teòriques o teòrico-pràctiques de pissarra
- (ii) Classes pràctiques de pissarra participatives.
- (iii) Sessions de treballs en grups reduïts

Tal com s'ha comentat més a dalt, 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.

XII.- AVALUACIÓ DE L'APRENTATGE

L'avaluació d'aquesta assignatura consta d'una part d'avaluació del treball de l'estudiant i d'una part d'avaluació mitjançant examen.

L'avaluació del treball de l'estudiant es fa sobre certes tasques fets pels estudiants al llarg del quadrimestre, tasques directament encarregades pel professor. Aquestes inclouen la resolució de problemes, l'elaboració de treballs i també, de forma específica, l'elaboració d'una memòria sobre les pràctiques de simulació. Totes aquestes tasques d'avaluació del treball de l'estudiant tenen un pes màxim del 35% del total: un 20% per a la memòria i fins a un 15% per als problemes i elaboració de treballs.

El 65% restant s'avalua mitjançant un examen escrit consistent en preguntes tant teòriques com pràctiques directament relacionades amb el temari.