

**Informació Quàntica**

Codi: 100182  
Crèdits: 6

Titulació	Típus	Curs	Semestre
2500097 Física	OT	4	2

**Professor/a de contacte**

Nom: Alessio Celi  
Correu electrònic: alessio.celi@uab.cat

**Utilització d'idiomes a l'assignatura**

Llengua vehicular majoritària: anglès (eng)  
Grup íntegre en anglès: Sí  
Grup íntegre en català: No  
Grup íntegre en espanyol: No

**Altres indicacions sobre les llengües**

Hi haurà algunes xerrades en anglès impartides per investigadors convidats.

**Equip docent**

Gael Sentís Herrera  
Alessio Celi

**Prerequisits**

És recomenable tenir un bon domini d'àlgebra, especialment d'espais vectorials i, preferiblement, d'espais Euclidis complexos. Naturalment es recomana tenir nocions de mecànica quàntica, però el curs és autocontingut. Coneixements d'òptica quàntica són complementaris i recomanables, però no imprescindibles.

**Objectius**

L'assignatura és una introducció a la visió actual de la mecànica quàntica i els seus paradigmes. Amb la tecnologia de què avui dia disposem, molts dels efectes quàntics més paradoxals han deixat ja de ser una curiositat acadèmica i han esdevingut recursos potentíssims que seran la base de nombroses i sorprenents aplicacions pràctiques en un futur no massa llunyà. En aquest curs se'n presenten algunes: teleportació, codificació densa, criptografia i computació quàntiques, etcètera. El curs està dirigit a físics, però també a matemàtics, informàtics i enginyers. En ser un curs autocontingut es farà una introducció als fonaments de la mecànica quàntica, a la teoria clàssica de la informació, a la criptografia i a la computació clàssiques, per després poder valorar les noves aportacions de les versions quàntiques corresponents. L'assignatura té també una vessant aplicada íntimament lligada a l'òptica quàntica. Es relitzarà doncs una introducció a la teoria semiclàssica i quàntica de la interacció llum-matèria, i es descriuraran implementacions físiques de la comunicació i computació quàntiques. L'objectiu de l'assignatura no és només donar una descripció dels avenços que s'han produït en informació quàntica, sinó també proporcionar a l'estudiant les eines bàsiques per a poder continuar la seva formació de post grau en aquest camp, si aquest és el seu interès.

## Competències

- Actuar en l'àmbit de coneixement propi valorant l'impacte social, econòmic i mediambiental.
- Aplicar els principis fonamentals a l'estudi qualitatiu i quantitatiu de les diferents àrees particulars de la física
- Comunicar eficaçment informació complexa de manera clara i concisa, ja sigui oralment, per escrit o mitjançant TIC, i en presència de públic, tant a públics especialitzats com generals
- Conèixer les bases d'alguns temes avançats incloent desenvolupaments actuals en la frontera de la física sobre els quals poder-se formar posteriorment amb més profunditat
- Fer treballs acadèmics de manera independent usant bibliografia (especialment en anglès), bases de dades i col·laborant amb altres professionals
- Formular i abordar problemes físics identificant els principis més rellevants i utilitzant aproximacions, si fos necessari, per arribar a una solució que ha de ser presentada explicitant hipòtesis i aproximacions
- Introduir canvis en els mètodes i els processos de l'àmbit de coneixement per donar respostes innovadores a les necessitats i demandes de la societat.
- Planejar i realitzar, utilitzant els mètodes apropiats, un estudi o recerca teòrica i interpretar i presentar-ne els resultats
- Raonar críticament, tenir capacitat analítica, fer servir correctament el llenguatge tècnic i elaborar arguments lògics
- Treballar autònomament, tenir iniciativa pròpia, ser capaç d'organitzar-se per assolir uns resultats i planejar i executar un projecte
- Treballar en grup, assumint responsabilitats compartides e interaccionant professional i constructivament amb altres amb absolut respecte als seus drets.
- Utilitzar les matemàtiques per descriure el món físic, seleccionant les eines apropiades, construint models adequats, interpretant resultats i comparant críticament amb l'experimentació i l'observació

## Resultats d'aprenentatge

1. Aplicar el concepte de mesura quàntica (de Von Neumann o generalitzada) a problemes d'optimització de problemes senzills de discriminació, estimació i comunicació quàntiques.
2. Aplicar els axiomes de la mecànica quàntica a problemes de processament d'informació.
3. Aplicar la formulació matricial de la mecànica quàntica a protocols i algorismes quàntics.
4. Aplicar la mesura quàntica en el context de la teoria de la informació.
5. Comunicar eficaçment informació complexa de manera clara i concisa, ja sigui oralment, per escrit o mitjançant TIC, i en presència de públic, tant a públics especialitzats com generals.
6. Contrastar la teoria clàssica de la informació amb la teoria quàntica.
7. Conèixer el concepte d'entropia de Shannon i capacitat d'un canal i els teoremes corresponents.
8. Conèixer el protocol BB84 i Eckert91 de criptografia quàntica.
9. Conèixer els algorismes quàntics de Deutsch-Jozsa, Grover i Shor.
10. Conèixer els estats EPR i formular les desigualtats de Bell.
11. Conèixer implementacions físiques de portes lògiques quàntiques d'un i dos qubits.
12. Conèixer la descomposició de Schmidt d'estats quàntics bipartits.
13. Conèixer la mesura de Von Neumann i les mesures generalitzades.
14. Conèixer les versions quàntiques dels esmentats conceptes i teoremes.
15. Descriure el concepte d'estat quàntic entrellaçat, la seva caracterització i la seva utilitat en la informació quàntica.
16. Descriure les bases de la interacció llum-matèria necessàries per entendre les implementacions físiques de la criptografia i computació quàntiques.
17. Descriure les principals implementacions de computació quàntica.
18. Descriure les similituds i diferències entre criptografia i computació clàssiques i les seves versions quàntiques i la seva relació amb els principis físics en què es basen aquestes últimes.
19. Diferenciar entre estats quàntics purs i barreges estadístiques.
20. Establir els principals protocols de criptografia quàntica.
21. Fer treballs acadèmics de manera independent usant bibliografia (especialment en anglès), bases de dades i col·laborant amb altres professionals.
22. Fer un treball que relacioni els conceptes d'informació i computació quàntiques estudiats amb temes frontera actuals i presentar-ne els resultats.
23. Formular la interpretació estadística d'estats quàntics barreja.

24. Identificar les implicacions socials, econòmiques i mediambientals de les activitats academicoprofessionals de l'àmbit de coneixement propi.
25. Identificar situacions que necessiten un canvi o millora.
26. Raonar críticament, tenir capacitat analítica, usar correctament el llenguatge tècnic i elaborar arguments lògics.
27. Relacionar els fonaments de la informació quàntica amb les principals implementacions físiques actuals de criptografia i computació quàntiques.
28. Resoldre problemes sobre la caracterització de l'entrellaçament en estats quàntics mitjançant la descomposició de Schmidt.
29. Treballar autònomament, tenir iniciativa pròpia, ser capaç d'organitzar-se per assolir uns resultats i planejar i executar un projecte.
30. Treballar en grup, assumir responsabilitats compartides i interaccionar professionalment i de manera constructiva amb altres persones amb un respecte absolut als seus drets.
31. Utilitzar el concepte d'estat barreja per resoldre problemes senzills amb sistemes oberts.
32. Utilitzar la teoria quàntica de la interacció llum-matèria per entendre les característiques de les fonts quàntiques de llum.
33. Utilitzar la teoria semiclàssica de la interacció llum-matèria per entendre el refredament i atrapament de partícules, així com la implementació de portes lògiques d'un sol qubit.

## Continguts

### Part I (Aspectes teòrics)

1. Introducció
  1. Física i informació quàntiques.
  2. Axiomes de la mecànica quàntica.
2. Estats i mostres estadístiques
  1. El qubit.
  2. La matriu densitat.
  3. Sistemes bipartits.
  4. La descomposició de Schmidt.
  5. Interpretació estadística d'estats mescla.
3. Mesures i evolució temporal
  1. Mesures de von Neumann.
  2. Mesures generalitzades.
  3. Teorema de Neumark.
  4. Canals quàntics.
4. Entrellaçament i les seves aplicacions
  1. Estats EPR.
  2. Codificació densa.
  3. Teleportació d'estats.
5. Informació clàssica i quàntica
  1. Introducció a la probabilitat.
  2. Informació. Entropia de Shannon i informació mútua.
  3. Comunicació. El canal binari simètric. Capacitat d'un canal.
  4. Teoremes de Shannon.
  5. Diferència entre informació clàssica i quàntica.
  6. Entropia de von Neumann. Teorema de Shumacher.
  7. Informació de Holevo. Informació accessible i límit de Holevo.
6. Computació quàntica
  1. Màquines de Turing.
  2. Circuits i classificació de la complexitat.
  3. L'ordinador quàntic.
  4. Portes lògiques quàntiques.
  5. Algorismes de Deutsch-Josza i Simon.
  6. Cerca no estructurada: algorisme de Grover
  7. Mètode d'encryptació RSA.
  8. Factorització: algorisme de Shor.

## Part II (Implementació física)

1. Breu repàs a la interacció llum matèria
  1. Teoria semiclàssica de la interacció llum-matèria.
    1. L'àtom de dos nivells.
    2. El desdoblament AC-Stark.
    3. Les oscil·lacions de Rabi.
    4. La força dipolar de la llum.
  1. Teoria quàntica de la interacció llum-matèria.
    1. Estats del camp e.m. quàntic.
    2. El model de Jaynes-Cummings.
  2. El problema de la decoherència.
2. Comunicació quàntica.
  1. Criptografia quàntica: protocols BB84 i Ekert91.
  2. Desigualtats de Bell.
  3. Generació de fotons individuals
  4. Propagació de fotons individuals.
  5. Detecció de fotons individuals.
3. Computació i simulació quàntiques.
  1. Àtoms neutres (estat fonamental i Rydberg) en trapes dipolars
  2. Electrodinàmica Quàntica de Cavitats.
  3. Ions en trapes de Paul.
  4. Qubits superconductors.

## Metodologia

El curs s'estructura en classes de teoria, classes de problemes i activitats d'avaluació continuada.

Les classes de teoria tenen el format de presentacions *keynote/powerpoint*. Hi ha haurà algunes classes/seminaris sobre alguns temes del curs que seran presentats per investigadors del camp de la Informació Quàntica. Aquests seminaris seran generalment en anglès.

Les classes de problemes es fan habitualment a la pissarra i consisteixen en la resolució dels problemes més significatius, els enunciats dels quals es posen a disposició de l'alumnat a través del *Campus Virtual*.

Hi haurà 4 lliuraments a la part teòrica i 2 per la part d'implementació. L'objectiu és aprofundir, consolidar i estendre els coneixements dels alumnes sobre aspectes i resultats tractats al llarg del curs. Així doncs, el lliuraments podran contenir problemes o qüestions de més complexitat i extensió. Aquests s'hauran d'entregar periòdicament al llarg del curs i en les dates prèviament acordades. L'objectiu d'aquestes activitats és incentivar el treball autònom.

Tot el material: llistats de problemes, material docent addicional, resolució detallada d'alguns exercicis, així com les notícies relacionades amb el funcionament del curs, es posen a disposició de l'alumnat a través del *Campus Virtual*.

Nota: es reservaran 15 minuts d'una classe, dins del calendari establert pel centre/titulació, per a la complementació per part de l'alumnat de les enquestes d'avaluació de l'actuació del professorat i d'avaluació de l'assignatura/mòdul.

## Activitats formatives

Títol	Hores	ECTS	Resultats d'aprenentatge
Tipus: Dirigides			
Classes de problemes	16	0,64	1, 2, 3, 4, 5, 19, 24, 25, 28, 30, 31, 32, 33

Classes de teoria	33	1,32	6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 23, 24, 25, 26, 27
Tipus: Autònomes			
Estudi dels fonaments teòrics	35	1,4	6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 23, 27
Problemes per a entregar	20	0,8	1, 2, 3, 4, 5, 19, 21, 22, 24, 25, 28, 29, 30, 31, 32, 33
Resolució de problemes	40	1,6	1, 2, 3, 4, 19, 26, 28, 29, 31

## Avaluació

L'avaluació consta de les següents activitats

1. Una prova de conceptes teòrics, amb un pes del 45%
2. Una prova de selecció múltiple sobre aspectes d'implementació, amb un pes del 20%
3. Lliurament d'exercicis realitzats de forma autònoma al llarg del curs, amb un pes del 30%
4. Assistència i participació activa als seminaris específics que es faran durant el curs, amb un pes del 5%

Els alumnes que hagin estat avaluats al menys en un 66% de les activitats totals, podran presentar-se a les proves de repesca de les activitats 1 i 2. Un alumne que només hagi realitzat les activitats 3, 4 i es considerarà no avaluable.

## Activitats d'avaluació

Títol	Pes	Hores	ECTS	Resultats d'aprenentatge
Assistència i participació en seminaris especialitzats	5	0	0	22, 24, 25, 26, 30
Lliurament d'exercicis realitzats de forma autònoma	30	0	0	1, 2, 4, 5, 6, 7, 9, 12, 13, 14, 15, 19, 21, 23, 24, 25, 26, 29, 30
Prova d'avaluació de conceptes teòrics	45	2	0,08	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 12, 13, 14, 15, 19, 23, 26, 28, 31
Prova recuperació conceptes teòrics	45	2	0,08	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 12, 13, 14, 15, 19, 23, 26, 28, 31
Prova recuperació test sobre implementació	20	1	0,04	8, 10, 11, 16, 17, 18, 20, 27, 32, 33
Prova test sobre sobre implementació	20	1	0,04	8, 10, 11, 16, 17, 18, 20, 24, 25, 27, 32, 33

## Bibliografia

A través del *Campus Virtual*, es posa a disposició de l'alumnat apunts de l'assignatura en format pdf i còpia del *Keynote/Powerpoint* del curs. Per a ampliar informació es recomana la següent bibliografia:

Bàsica

### Teoria

- J. Preskill. Lectures notes on Quantum Computation. Es pot obtenir gratuïtament a la direcció: <http://www.theory.caltech.edu/people/preskill/ph229>.
- M.A. Nielsen; S.L. Chuang. Quantum Computation and Quantum Information. Cambridge Univ. Press, Cambridge 2000.

- S.M. Barnett, Quantum Information, Oxford University Press, 2009.
- A. Peres. Quantum Theory: Concepts and Methods. Kluwer, Dordrecht 1995.
- D. Applebaum. Probability and Information. Cambridge Univ. Press, Cambridge 1996.
- D. Boumeester; A. Eckert; A. Zeilinger. The Physics of Quantum Information. Springer 2000.
- D. Heiss. Fundamentals of Quantum Information. Springer 2002.

#### *Problemes*

- Steeb, Willi-Hans, and Yorick Hardy. *Problems and solutions in quantum computing and quantum information*. World Scientific Publishing Company, 2018.
- C. P. Williams; S. Clearwater. Exploration in Quantum Computing. Springer 1998

#### Avançada

- R. A. Bertlmann; A. Zeilinger. Quantum (Un)speakables. Springer 2002.
- A. Ekert; R. Jozsa. Quantum Computation and Shor's Factoring Algorithm. Rev. Mod. Phys. 68 (1996) 733.
- T.A. Cover; J.A Thomas, Elements of Information Theory, John Wiley 2006.

## **Programari**

IBM quantum composer