

### Informació Quàntica

Codi: 100182  
Crèdits: 6

| Titulació      | Tipus | Curs | Semestre |
|----------------|-------|------|----------|
| 2500097 Física | OT    | 4    | 0        |

### Professor de contacte

Nom: Ramón Muñoz Tapia  
Correu electrònic: Ramon.Munoz@uab.cat

### Utilització d'idiomes a l'assignatura

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

### Equip docent

Jordi Mompart Penina

### Prerequisits

És recomenable tenir un bon domini d'àlgebra, especialment espais vectorials i, preferiblement, espais Euclidis complexos. Es recomana, però no és imprescindible, tenir nocions de mecànica quàntica. 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, matemàtics, informàtics i enginyers, la qual cosa fa necessària 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. Caldrà doncs fer una introducció a la teoria semiclàssica i quàntica de la interacció llum-matèria. 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

- 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

- Desenvolupar estratègies d'aprenentatge autònom
- Desenvolupar un pensament i un raonament crítics i saber comunicar-los de manera efectiva tant en les llengües pròpies com en una tercera llengua
- 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
- Generar propostes innovadores i competitives en la recerca i en l'activitat professional.
- 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
- Respectar la diversitat i pluralitat d'idees, persones i situacions
- 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. Conèixer el concepte d'entropia de Shannon i capacitat d'un canal i els teoremes corresponents.
7. Conèixer el protocol BB84 i Eckert91 de criptografia quàntica.
8. Conèixer els algorismes quàntics de Deutsch-Jozsa, Grover i Shor.
9. Conèixer els estats EPR i formular les desigualtats de Bell.
10. Conèixer implementacions físiques de portes lògiques quàntiques d'un i dos qubits.
11. Conèixer la descomposició de Schmidt d'estats quàntics bipartits.
12. Conèixer la mesura de Von Neumann i les mesures generalitzades.
13. Conèixer les versions quàntiques dels esmentats conceptes i teoremes.
14. Contrastar la teoria clàssica de la informació amb la teoria quàntica.
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. Desenvolupar estratègies d'aprenentatge autònom.
20. Desenvolupar un pensament i un raonament crítics i saber comunicar-los de manera efectiva, tant en les llengües pròpies com en una tercera llengua.
21. Diferenciar entre estats quàntics purs i barreges estadístiques.
22. Establir els principals protocols de criptografia quàntica.
23. Fer treballs acadèmics de manera independent usant bibliografia (especialment en anglès), bases de dades i col·laborant amb altres professionals.
24. Fer un treball que relacioni els conceptes d'informació i computació quàntiques estudiats amb temes frontera actuals i presentar-ne els resultats.
25. Formular la interpretació estadística d'estats quàntics barreja.
26. Generar propostes innovadores i competitives en la recerca i en l'activitat professional.
27. Raonar críticament, tenir capacitat analítica, usar correctament el llenguatge tècnic i elaborar arguments lògics.

28. Relacionar els fonaments de la informació quàntica amb les principals implementacions físiques actuals de criptografia i computació quàntiques.
29. Resoldre problemes sobre la caracterització de l'entrellaçament en estats quàntics mitjançant la descomposició de Schmidt.
30. Respectar la diversitat i la pluralitat d'idees, persones i situacions.
31. Treballar autònomament, tenir iniciativa pròpia, ser capaç d'organitzar-se per assolir uns resultats i planejar i executar un projecte.
32. Treballar en grup, assumir responsabilitats compartides i interaccionar professionalment i de manera constructiva amb altres persones amb un respecte absolut als seus drets.
33. Utilitzar el concepte d'estat barreja per resoldre problemes senzills amb sistemes oberts.
34. Utilitzar la teoria quàntica de la interacció llum-matèria per entendre les característiques de les fonts quàntiques de llum.
35. 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. Desigualtats de Bell.
  3. Codificació densa.
  4. 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. Generació de fotons individuals
  3. Propagació de fotons individuals.
  4. Detecció de fotons individuals.
3. Computació quàntica.
  1. Àtoms neutres en trapes dipolars
  2. Electrodinàmica Quàntica de Cavitats.
  3. Ions en trapes de Paul.
  4. Ressonància Magnètica Nuclear.
  5. Punts Quàntics.

## 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.

## Activitats formatives

| Títol                         | Hores | ECTS | Resultats d'aprenentatge |
|-------------------------------|-------|------|--------------------------|
| <b>Tipus: Dirigides</b>       |       |      |                          |
| Classes de problemes          | 15    | 0,6  |                          |
| Classes de teoria             | 30    | 1,2  |                          |
| <b>Tipus: Autònomes</b>       |       |      |                          |
| Estudi dels fonaments teòrics | 39    | 1,56 |                          |

|                          |    |     |
|--------------------------|----|-----|
| Problemes per a entregar | 20 | 0,8 |
| Resolució de problemes   | 40 | 1,6 |

## Avaluació

L'avaluació consta de dues parts, una que consisteix en una sèrie d'activitats que contribueixen a la avaluació continuada i suposa el 30% de la nota final, i un altre d'una prova sobre el grau d'assoliment dels conceptes tractats al llarg del curs (incloent alguns aspectes de l'avaluació continuada) que suposa el 70% de la nota final. Es fa una segona prova on els alumnes poden recuperar o millorar aquest 70% de l'avaluació.

En quant a les activitats d'avaluació continuada: (i) a la part teòrica es fan 4 lliuraments de diferent tipologia on els alumnes desenvolupen autònomament alguns temes tractats molt breument a les classes o aprofundeixien en alguns resultats; (ii) a la part d'implementació física es fan dues activitats on es desenvolupen alguns aspectes tractats al llarg del curs.

Els continguts i el pes en l'avaluació estan repartits en una proporció 2:1 Teòrics vs Implementació.

## Activitats d'avaluació

| Títol                             | Pes | Hores | ECTS | Resultats d'aprenentatge                                                                                      |
|-----------------------------------|-----|-------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Avaluació del problemes entregats | 30  | 0     | 0    | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35            |
| Examen de l'assignatura           | 70  | 2,5   | 0,1  | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 25, 27, 28, 29, 31, 33, 34, 35 |
| Examen de recuperació             | 70  | 3,5   | 0,14 | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 25, 27, 28, 29, 31, 33, 34, 35 |

## 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.
- 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

- 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.