

## Información Cuántica

Código: 100182  
Créditos ECTS: 6

Titulación	Tipo	Curso	Semestre
2500097 Física	OT	4	2

La metodología docente y la evaluación propuestas en la guía pueden experimentar alguna modificación en función de las restricciones a la presencialidad que impongan las autoridades sanitarias.

### Contacto

Nombre: Ramón Muñoz Tapia

Correo electrónico: Ramon.Munoz@uab.cat

### Uso de idiomas

Lengua vehicular mayoritaria: catalán (cat)

Algún grupo íntegramente en inglés: No

Algún grupo íntegramente en catalán: Sí

Algún grupo íntegramente en español: No

### Otras observaciones sobre los idiomas

Algunas charlas serán en inglés impartidas por investigadores invitados.

### Equipo docente

Ramón Muñoz Tapia

Alessio Celi

### Prerequisitos

Es recomendable tener un buen dominio de álgebra, especialmente de espacios vectoriales y, preferiblemente, de espacios Euclidianos complejos. Naturalmente se recomienda tener nociones de mecánica cuántica, pero el curso es autocontenido. Conocimientos de óptica cuántica son complementarios y recomendables, pero no imprescindibles.

### Objetivos y contextualización

La asignatura es una introducción a la visión actual de la mecánica cuántica y sus paradigmas. Con la tecnología que disponemos hoy en día, muchos de los efectos cuánticos más paradójicos han dejado ya de ser una curiosidad académica y se han convertido en recursos potentísimos que serán la base de numerosas y sorprendentes aplicaciones prácticas en un futuro no muy lejano. En este curso se presentan algunas: teleportación, codificación densa, criptografía y computación cuánticas, etcétera. El curso está dirigido a físicos, pero es de interés para matemáticos, informáticos e ingenieros. El curso pretende ser autocontenido, por lo que hace necesaria una introducción a los fundamentos de la mecánica cuántica, la teoría clásica de la información, a la criptografía y a la computación clásicas, para luego poder valorar las nuevas aportaciones de las versiones cuánticas correspondientes. La asignatura tiene también una vertiente aplicada íntimamente ligada a la óptica cuántica. Se realizará, por consiguiente, una introducción a la teoría semicluásica y cuántica de la interacción luz-materia, y se describirán implementaciones físicas de la comunicación y computación

cuánticas. El objetivo de la asignatura no es sólo dar una descripción de los avances que se han producido en información cuántica, sino también proporcionar al estudiante las herramientas básicas para poder continuar su formación de post grado en este campo, si éste es su interés.

## Competencias

- Actuar en el ámbito de conocimiento propio valorando el impacto social, económico y medioambiental.
- Aplicar los principios fundamentales al estudio cualitativo y cuantitativo de las diferentes áreas particulares de la física.
- Comunicar eficazmente información compleja de forma clara y concisa, ya sea oralmente, por escrito o mediante TIC, y en presencia de público, tanto a audiencias especializadas como generales.
- Conocer las bases de algunos temas avanzados, incluyendo desarrollos actuales en la frontera de la Física, sobre los que poder formarse posteriormente con mayor profundidad.
- Formular y abordar problemas físicos identificando los principios más relevantes y usando aproximaciones, si fuera necesario, para llegar a una solución que debe ser presentada explicitando hipótesis y aproximaciones.
- Introducir cambios en los métodos y los procesos del ámbito de conocimiento para dar respuestas innovadoras a las necesidades y demandas de la sociedad.
- Planear y realizar, usando los métodos apropiados, un estudio o investigación teórico e interpretar y presentar los resultados.
- Razonar críticamente, poseer capacidad analítica, usar correctamente el lenguaje técnico, y elaborar argumentos lógicos.
- Realizar trabajos académicos de forma independiente usando bibliografía, especialmente en inglés, bases de datos y colaborando con otros profesionales.
- Trabajar autónomamente, usar la propia iniciativa, ser capaz de organizarse para alcanzar unos resultados, planear y ejecutar un proyecto.
- Trabajar en grupo, asumiendo responsabilidades compartidas e interaccionando profesional y constructivamente con otros con absoluto respeto a sus derechos.
- Usar las matemáticas para describir el mundo físico, seleccionando las herramientas apropiadas, construyendo modelos adecuados, interpretando resultados y comparando críticamente con la experimentación y la observación.

## Resultados de aprendizaje

1. Aplicar el concepto de medida cuántica (de von Neumann o generalizada) a problemas de optimización a problemas sencillos de discriminación, estimación y comunicación cuánticas.
2. Aplicar la formulación matricial de la mecánica cuántica a protocolos y algoritmos cuánticos.
3. Aplicar la medida cuántica en el contexto de la teoría de la información.
4. Aplicar los axiomas de la mecánica cuántica a problemas de procesado de información.
5. Comunicar eficazmente información compleja de forma clara y concisa, ya sea oralmente, por escrito o mediante TIC, y en presencia de público, tanto a audiencias especializadas como generales.
6. Conocer el concepto de entropía de Shannon y capacidad de un canal y los teoremas correspondientes.
7. Conocer el protocolo BB84 y Eckert91 de criptografía cuántica.
8. Conocer implementaciones físicas de puertas lógicas cuánticas de uno y dos qubits.
9. Conocer la descomposición de Schmidt de estados cuánticos bipartitos.
10. Conocer la medida de von Neumann y las medidas generalizadas.
11. Conocer las versiones cuánticas de dichos conceptos y teoremas.
12. Conocer los algoritmos cuánticos de Deutsch-Jozsa, Grover y Shor.
13. Conocer los estados EPR y formular las desigualdades de Bell.
14. Contrastar la teoría clásica de la información con la teoría cuántica.
15. Describir el concepto de estado cuántico entrelazado, su caracterización y su utilidad en la información cuántica.
16. Describir las bases de la interacción luz-materia necesarias para entender las implementaciones físicas de la criptografía y computación cuánticas.
17. Describir las principales implementaciones de computación cuántica.

18. Describir las similitudes y diferencias entre criptografía y computación clásicas y sus versiones cuánticas y su relación con los principios físicos en los que se basan estas últimas.
19. Diferenciar entre estados cuánticos puros y mezclas estadísticas.
20. Establecer los principales protocolos de criptografía cuántica.
21. Explicar el codi deontològic, explícit o implícit, de l'àmbit de coneixement propi.
22. Formular la interpretación estadística de estados cuánticos mezcla.
23. Identificar situaciones que necesitan un cambio o mejora.
24. Razonar críticamente, poseer capacidad analítica, usar correctamente el lenguaje técnico, y elaborar argumentos lógicos.
25. Realizar trabajos académicos de forma independiente usando bibliografía, especialmente en inglés, bases de datos y colaborando con otros profesionales.
26. Realizar un trabajo que relacione los conceptos de la información y computación cuánticas estudiados con temas frontera actuales y presentar los resultados.
27. Relacionar los fundamentos de la información cuántica con las principales implementaciones físicas actuales de criptografía y computación cuánticas.
28. Resolver problemas sobre la caracterización del entrelazamiento en estados cuánticos mediante la descomposición de Schmidt.
29. Trabajar autónomamente, usar la propia iniciativa, ser capaz de organizarse para alcanzar unos resultados, planear y ejecutar un proyecto.
30. Trabajar en grupo, asumiendo responsabilidades compartidas e interaccionando profesional y constructivamente con otros con absoluto respeto a sus derechos.
31. Usar el concepto de estado mezcla para resolver problemas sencillos con sistemas abiertos.
32. Utilizar la teoría cuántica de la interacción luz-materia para entender las características de las fuentes cuánticas de luz.
33. Utilizar la teoría semiclásica de la interacción luz-materia para entender el enfriamiento y atrapamiento de partículas, así como la implementación de puertas lógicas de un solo qubit.

## Contenido

### Parte I (Aspectos teóricos)

#### 1. Introducción

- Física e información cuánticas.
- Axiomas de la mecánica cuántica.

#### 2. Estados y muestras estadísticas

- El qubit.
- La matriz densidad.
- Sistemas bipartitos.
- La descomposición de Schmidt.
- Interpretación estadística de los estados mezcla.

#### 3. Medidas y evolución temporal

- Medidas de von Neumann.
- Medidas generalizadas.
- Teorema de Neumark.
- Canales cuánticos.

#### 4. Entrelazamiento y sus aplicaciones

- Estados EPR.
- Codificación densa.
- Teleportación de estados.

#### 5. Información clásica y cuántica

- Introducción a la probabilidad.
- Información. Entropía de Shannon e información mutua.
- Comunicación. El canal binario simétrico. Capacidad de un canal.
- Teoremas de Shannon.
- Diferencia entre información clásica y cuántica.
- Entropía de von Neumann. Teorema de Shumacher.
- Información de Holevo. Información accesible y límite de Holevo.

## 6. Computación cuántica

- Máquinas de Turing.
- Circuitos y clasificación de la complejidad.
- El ordenador cuántico.
- Puertas lógicas cuánticas.
- Algoritmos de Deutsch-Josza y Simon.
- Búsqueda no estructurada: algoritmo de Grover
- Método de encriptación RSA.
- Factorización: algoritmo de Shor.

## Parte II (Implementación física)

### 1. Breve repaso a la interacción luz materia

- Teoría semicásica de la interacción luz-materia.
  - El átomo de dos niveles.
  - El desdoblamiento AC-Stark.
  - Las oscilaciones de Rabi.
  - La fuerza dipolar de la luz.
- Teoría cuántica de la interacción luz-materia.
  - Estados del campo e.m. cuántico.
  - El modelo de Jaynes-Cummings.
  - El problema de la decoherencia.

### 2. Comunicación cuántica.

- Criptografía cuántica: protocolos BB84 y Ekert91.
- Desigualdades de Bell.
- Generación de fotones individuales
- Propagación de fotones individuales.
- Detección de fotones individuales.

### 3. Computación cuántica.

- Átomos neutros en trampas dipolares
- Electrodinámica Cuántica de Cavidades.
- Iones en trampas de Paul.
- Resonancia Magnética Nuclear.
- Puntos Cuánticos.

## Metodología

El curso se estructura en clases de teoría, clases de problemas y actividades de evaluación continua.

Las clases de teoría tienen el formato de presentaciones keynote/powerpoint. Habrá algunas clases / seminarios sobre algunos temas del curso que serán presentados por investigadores del campo de la Información Cuántica. Estos seminarios serán generalmente en inglés.

Las clases de problemas se hacen habitualmente en la pizarra y consisten en la resolución de los problemas más significativos, los enunciados de los cuales se ponen a disposición del alumnado a través del Campus Virtual.

Habrá 4 entregas en la parte teórica y 2 en la parte de implementación. El objetivo es profundizar, consolidar y extender los conocimientos de los alumnos sobre aspectos y resultados tratados a lo largo del curso. Así pues, las entregas podrán contener problemas y cuestiones de mayor complejidad y extensión. Estos se deberán entregar periódicamente a lo largo del curso y en las fechas previamente acordadas. El objetivo de estas actividades es incentivar el trabajo autónomo.

Todo el material: listados de problemas, material docente adicional, resolución detallada de algunos ejercicios, así como las noticias relacionadas con el funcionamiento del curso, se ponen a disposición del alumnado a través del Campus Virtual.

Nota: se reservarán 15 minutos de una clase dentro del calendario establecido por el centro o por la titulación para que el alumnado rellene las encuestas de evaluación de la actuación del profesorado y de evaluación de la asignatura o módulo.

## Actividades

Título	Horas	ECTS	Resultados de aprendizaje
Tipo: Dirigidas			
Clases de problemas	16	0,64	1, 4, 2, 3, 5, 19, 21, 23, 28, 30, 31, 32, 33
Clases de teoría	33	1,32	14, 6, 7, 12, 13, 8, 9, 10, 11, 15, 16, 17, 18, 20, 22, 21, 23, 24, 27
Tipo: Autónomas			
Ejercicios a entregar	20	0,8	1, 4, 2, 3, 5, 19, 25, 26, 21, 23, 28, 29, 30, 31, 32, 33
Estudio de los fundamentos teóricos	35	1,4	14, 6, 7, 12, 13, 8, 9, 10, 11, 15, 16, 17, 18, 20, 22, 27
Resolución de problemas	40	1,6	1, 4, 2, 3, 19, 24, 28, 29, 31

## Evaluación

La evaluación consta de las siguientes actividades

1. Una prueba de conceptos teóricos, con un peso del 45%
2. Una prueba de selección múltiple sobre aspectos de implementación, con un peso del 20%
3. Entrega de ejercicios realizados de forma autónoma a lo largo del curso, con un peso del 30%
4. Asistencia y participación activa en los seminarios específicos que se realizarán durante el curso, con un peso del 5%

Los alumnos que hayan sido evaluados al menos en un 66% de las actividades totales, podrán presentarse a las pruebas de repesca de las actividades 1 y 2. Un alumno que sólo haya realizado las actividades 3 y 4 se considerará no evaluable.

## Actividades de evaluación

Título	Peso	Horas	ECTS	Resultados de aprendizaje
--------	------	-------	------	---------------------------

Asistencia y participación en seminarios especializados	5	0	0	26, 21, 23, 24, 30
Entrega de ejercicios realizados de forma autónoma	30	0	0	1, 4, 3, 5, 14, 6, 12, 9, 10, 11, 15, 19, 25, 22, 21, 23, 24, 29, 30
Prueba de evaluación de conceptos teóricos	45	2	0,08	1, 4, 2, 3, 5, 14, 6, 12, 9, 10, 11, 15, 19, 22, 24, 28, 31
Prueba de recuperación de conceptos teóricos	45	2	0,08	1, 4, 2, 3, 5, 14, 6, 12, 9, 10, 11, 15, 19, 22, 24, 28, 31
Prueba de recuperación test sobre implementación	20	1	0,04	7, 13, 8, 16, 17, 18, 20, 27, 32, 33
Prueba de test sobre implementación	20	1	0,04	7, 13, 8, 16, 17, 18, 20, 21, 23, 27, 32, 33

## Bibliografía

A través del Campus Virtual, se pone a disposición del alumnado apuntes de la asignatura en formato pdf y copia del Keynote/Powerpoint del curso. Para ampliar información se recomienda la siguiente bibliografía:

### Básica

#### Teoría

- 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.

#### Ejercicios

- 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

### Avanzada

- 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.

## Software

IBM quantum composer