Fundación Telefónica

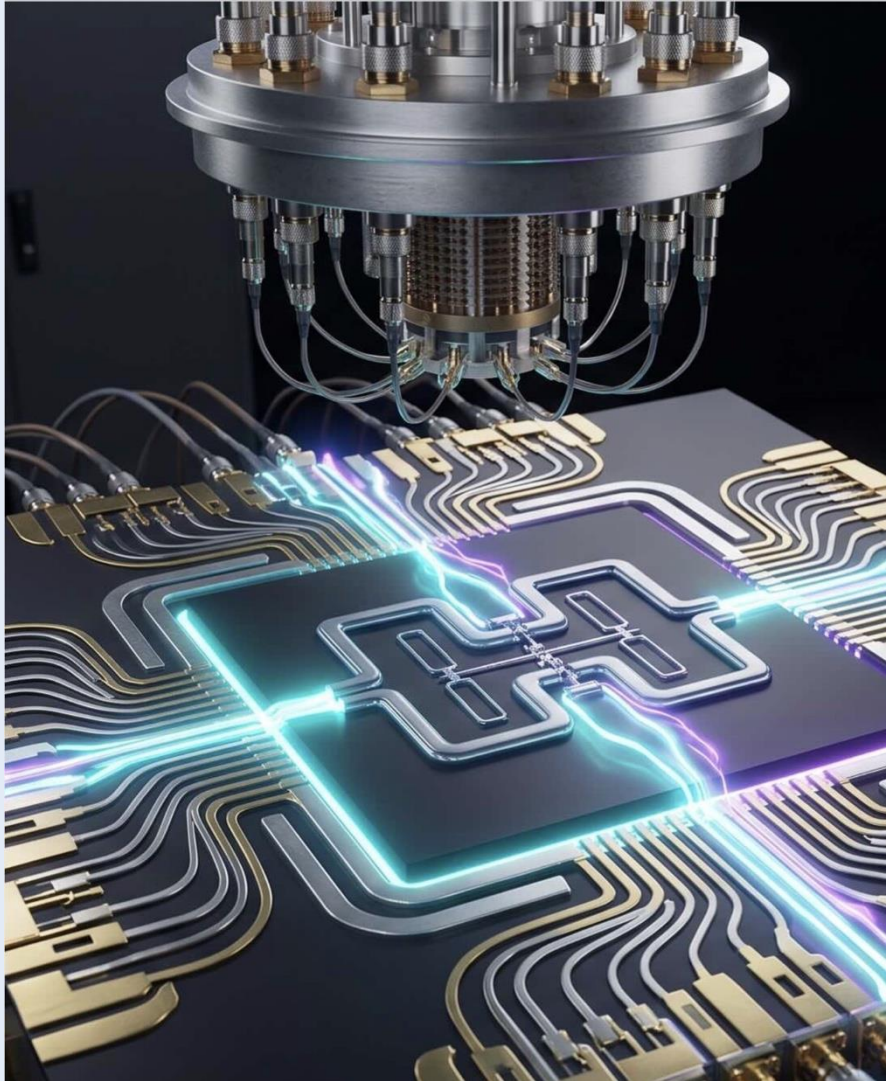
Espacio Fundación Telefónica: Revolución Cuántica
09/10/2026

Materiales cuánticos

y sus aplicaciones a las tecnologías cuánticas

Elsa Prada · Investigadora científica
Carlos Payá · Investigador predoctoral

icmm
CSIC
Consejo Superior de Investigaciones Científicas
QUDYMA



Pequeña presentación

Elsa Prada

elsaprada.github.io

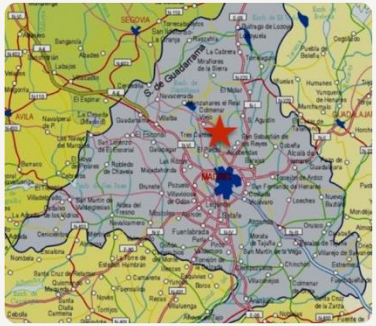
Física Teórica de la Materia Condensada y Doctora por la **Universidad Autónoma de Madrid** (UAM)

Investigadora Científica del **Consejo Superior de Investigaciones Científicas** (CSIC)

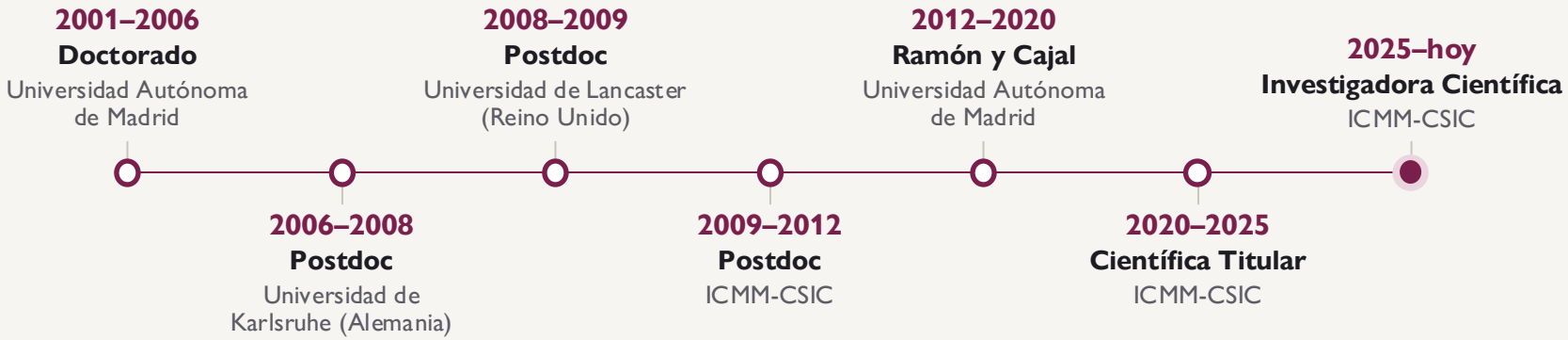
Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (ICMM)

¿Dónde?

icmm CSIC



Mi trayectoria investigadora



CV completo: elsaprada.github.io/cv

Investigación básica en España: dos vías

Universidades

VÍA 1

Vinculadas a las Comunidades Autónomas · ej. Universidad Autónoma de Madrid (UAM)

2 en 1
docencia e investigación bajo un mismo techo

17
comunidades autónomas con competencias

PhD
expiden el título de doctor

CSIC

VÍA 2

Red nacional · el ICMM, nuestro centro, en el campus de la UAM

120+
institutos repartidos por toda España

~20 %
de la producción científica nacional

3.º
organismo público de investigación de Europa

Dos vías que se cruzan: institutos mixtos CSIC–universidad, se pueden hacer tesis doctorales en institutos del CSIC

Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid

Materiales en el ICMM

Información digital
Electrónica y fotónica avanzadas
Materiales y tecnologías cuánticas

Mundo sostenible
Materiales para la energía
Medioambiente y procesos verdes

Salud
Nanoterapias y diagnóstico
Instrumentación para nanomedicina

1986
año de fundación, en el campus UAM+CSIC

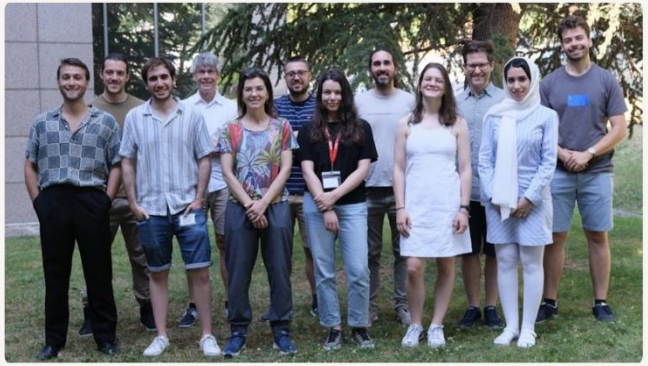
200+
investigadores de plantilla

100+
doctorandos, postdocs y tenure-track

Centro de Excelencia **Severo Ochoa** · de la investigación fundamental a la aplicación

Nuestro grupo: QUDYMA

Quantum Dynamics and Materials



Grupo **teórico**: materiales cuánticos y su respuesta cuando se les saca del equilibrio

- Ciencia de **materiales cuánticos y topológicos**
- Ciencia de **attosegundos** en materiales 2D
- Fases cuánticas en **heteroestructuras de van der Waals** y **nanoestructuras híbridas**
- **Software de simulación**: Quantica.jl, EDUS, ATATA

Las tres fronteras de la física

P. W. Anderson
«More is different»
Science, 1972

FRONTERA I **Lo muy grande** Cosmología y Astrofísica	**Enfoque** El universo a gran escala: gravedad, galaxias y origen del cosmos.	**Herramientas** Relatividad general, telescopios gigantes y astrofísica de altas energías.	**Filosofía** **Visión global**: entender cómo nació y cómo evoluciona el universo en su conjunto.
FRONTERA II **Lo muy pequeño** Partículas, Altas Energías y Física Nuclear	**Enfoque** Los constituyentes **elementales** de la materia y sus interacciones.	**Herramientas** Aceleradores como el LHC del CERN y el Modelo Estándar.	**Filosofía** **Reduccionismo**: entender el todo descomponiéndolo en sus piezas mínimas.
FRONTERA III · EMERGENCIA **Lo muy complejo** Materia Condensada y Materiales Cuánticos	**Enfoque** Estudia qué ocurre cuando un **número enorme de partículas** (por ejemplo, los electrones en un sólido) interactúan entre sí bajo las leyes cuánticas.	**El salto conceptual** A medida que aumenta el número de partículas, surgen **propiedades emergentes** completamente nuevas que no se pueden predecir estudiando las partículas aisladas.	**Relevancia** Es el territorio donde nacen los **materiales cuánticos**, que transforman los principios cuánticos fundamentales en tecnologías prácticas y aplicables.

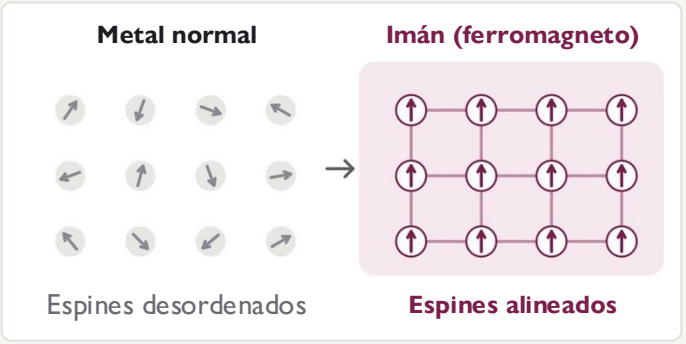
Si quieres saber lo que es la **física de la materia condensada**, sigue este link: youtube.com/watch?v=gUMVY-wFi-M

Materiales cuánticos

QUÉ SON

Materiales en los que la mecánica cuántica deja de ser invisible y gobierna lo que vemos a escala macroscópica.

Sus propiedades surgen del comportamiento colectivo de un número enorme de electrones, no de cada uno por separado.



QUÉ PROPIEDADES TIENEN

Interacción fuerte

Los electrones no van por libre: se coordinan y crean fases de la materia nuevas.

Baja dimensionalidad

En capas de un átomo de grosor, en nanohilos o en puntos cuánticos, los efectos cuánticos se amplifican.

Topología

Propiedades protegidas por la geometría de las funciones de onda: muy robustas.

Sensibilidad extrema

Pequeños cambios de presión, temperatura, o desorden provocan cambios de fase drásticos.

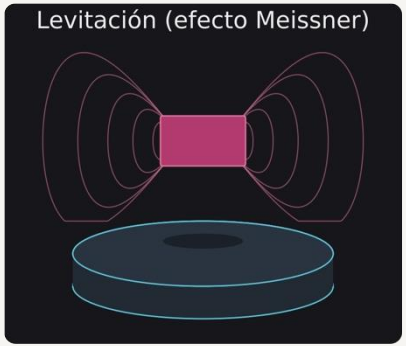
Tipos de materiales cuánticos

Topológico = protegido

Superconductores

Conducen la corriente sin resistencia y expulsan el campo magnético.

Ej.: Al, Nb, cupratos

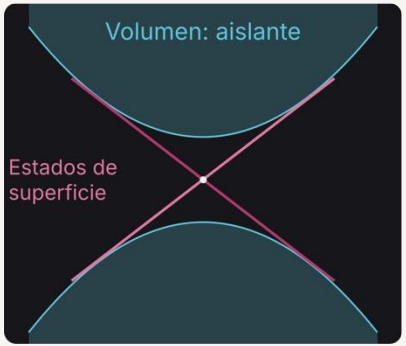


Topológico

Aislantes topológicos

Aislantes por dentro, conductores perfectos en su superficie.

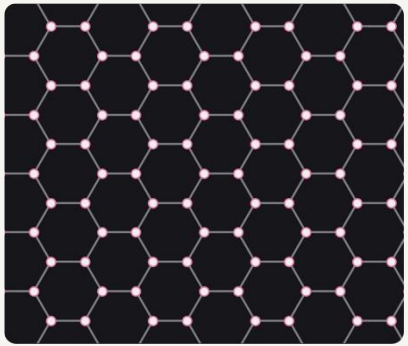
Ej.: Bi_2Se_3, HgTe



Grafeno y materiales 2D

Una capa de átomos; en el grafeno, los electrones se mueven sin masa.

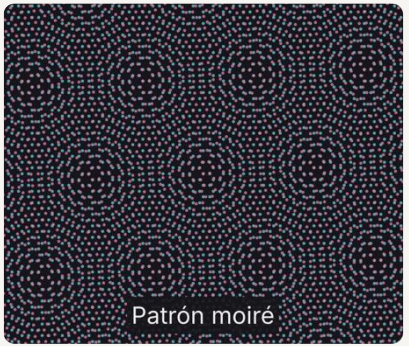
Ej.: Grafeno, MoS_2, hBN



Bicapas rotadas y van der Waals

Capas 2D apiladas como un Lego; con un giro de 1,1° surgen fases nuevas.

Ej.: Grafeno rotado



Tipos de materiales cuánticos

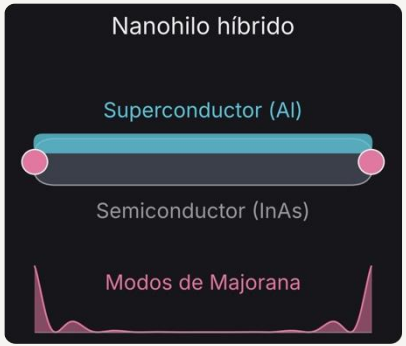
Topológico = protegido

Topológico

Nanohilos de Majorana

Semiconductor + superconductor: en sus extremos, modos de Majorana.

Ej.: InAs/Al, InSb/Al

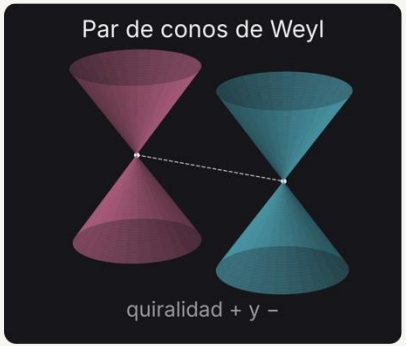


Topológico

Semimetales de Weyl

Sus electrones imitan a los fermiones de Weyl, predichos en 1929.

Ej.: TaAs, Cd_3As_2

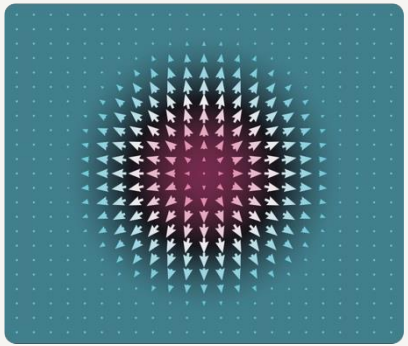


Topológico

Skyrmiones magnéticos

Remolinos de espín de pocos nanómetros, estables por su topología.

Ej.: MnSi, Co/Pt

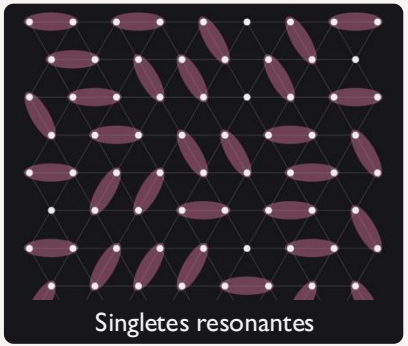


Topológico

Líquidos de espín cuánticos

Materiales magnéticos cuyos espines nunca se ordenan: quedan entrelazados.

Ej.: α-$RuCl_3$



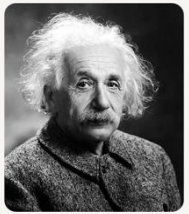
Las dos revoluciones cuánticas

1.ª REVOLUCIÓN · DESDE 1900

Entender el mundo cuántico

La cuántica explica átomos, sólidos y luz. La aprovechamos **en bloque**, como estado colectivo de la materia.

Max Planck
1900 · el cuanto de energía
Nobel 1918



Albert Einstein
1905 · el fotón
Nobel 1921

Niels Bohr
1913 · el átomo cuántico
Nobel 1922

Erwin Schrödinger
1926 · la ecuación de ondas
Nobel 1933

Transistor **Láser** **Resonancia magnética**

2.ª REVOLUCIÓN · DESDE 1980

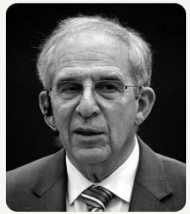
Controlar estados cuánticos

Superposición y entrelazamiento de sistemas **individuales**, convertidos en un recurso tecnológico.

John Bell
1964 · el teorema de Bell

Richard Feynman
1982 · simular la naturaleza
Nobel 1965

Alain Aspect
1982 · fotones entrelazados
Nobel 2022



Michel Devoret
circuitos cuánticos
Nobel 2025 (con John Clarke y John Martinis)

Qubits **Criptografía cuántica** **Sensores cuánticos**

Aplicaciones cuánticas: 1.ª revolución

No existirían sin la mecánica cuántica, y explotan estados colectivos de la materia.

Transistores y chips

Efecto cuántico: las bandas de energía de los semiconductores

Miles de millones en cada móvil y ordenador

Láser

Efecto cuántico: la emisión estimulada (Einstein, 1917)

Fibra óptica, cirugía, lectores de código

LED y células solares

Efecto cuántico: saltos cuánticos entre bandas de energía

Iluminación eficiente y energía fotovoltaica

Relojes atómicos y GPS

Efecto cuántico: los niveles de energía discretos del átomo

La hora oficial y la navegación por satélite

Discos duros

Efecto cuántico: el espín del electrón (magnetorresistencia gigante)

Almacenamiento masivo de datos

Superconductores

Efecto cuántico: pares de Cooper: una onda cuántica macroscópica

Resonancia magnética, aceleradores, levitación

Tecnologías cuánticas: 2.ª revolución

Controlan estados cuánticos individuales

Computación cuántica

Qubits entrelazados para resolver problemas hoy intratables.

Química, optimización

Comunicación cuántica

Información protegida por las leyes de la física: espiar deja huella.

Criptografía, internet cuántico

Simulación cuántica

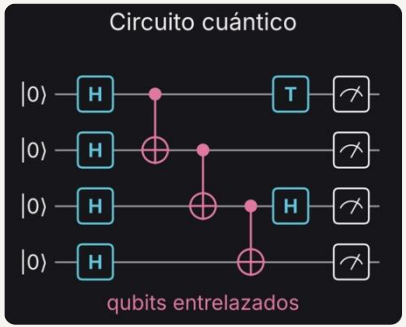
Un sistema cuántico controlado imita a otro imposible de calcular.

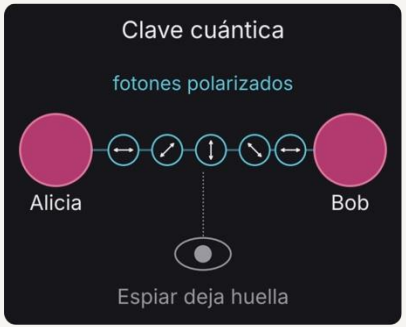
Nuevos materiales y moléculas

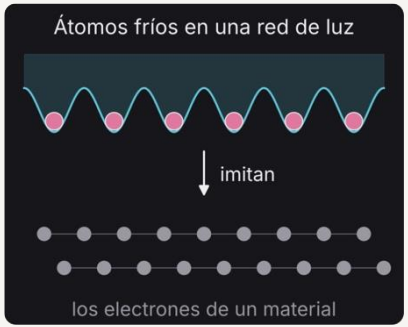
Sensores cuánticos

La fragilidad cuántica, convertida en precisión de medida récord.

Relojes atómicos, magnetómetros







Tecnologías cuánticas habilitadoras

Los materiales, dispositivos e ingeniería que hacen posibles las tecnologías cuánticas

Hardware cuántico

Los dispositivos donde viven los qubits: superconductores, semiconductores, átomos o defectos.

Uniones Josephson, puntos cuánticos

Nanofabricación de materiales

Fabricar materiales y dispositivos con precisión atómica y sin defectos.

Heteroestructuras van der Waals

Criogenia

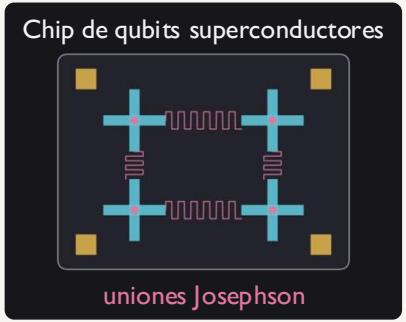
Enfriar a milésimas de grado sobre el cero absoluto para proteger la coherencia.

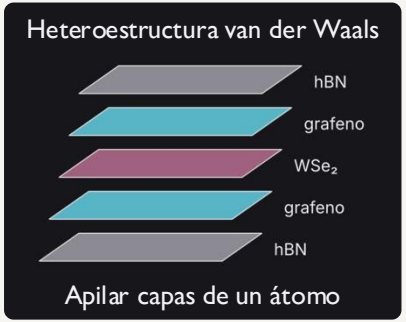
Criostatos de dilución (~10 mK)

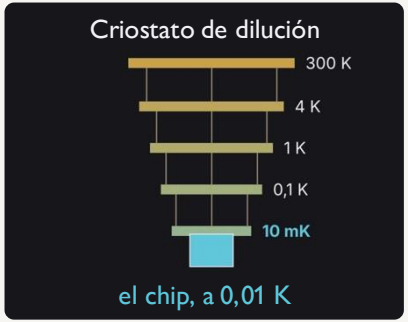
Detectores y amplificadores

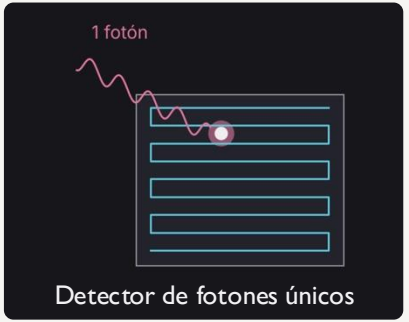
Captar señales de un solo fotón o de un solo qubit sin destruirlas.

Detectores superconductores de fotones





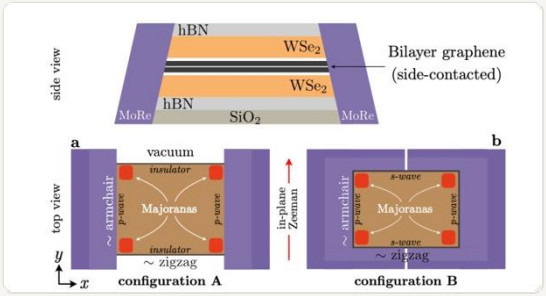




Ejemplos de materiales y dispositivos cuánticos y topológicos estudiados en nuestro grupo

Los tres son **uniones Josephson**: dos superconductores conectados a través de un material cuántico.

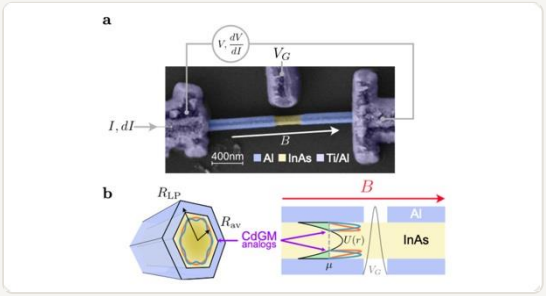
1 Bicapas de grafeno



Grafeno bicapa entre capas de WSe_2 y hBN, unido a dos superconductores. Buscamos **modos de Majorana** en sus esquinas.

Nat. Comm. 15, 856 (2024)
SciPost Phys. 14, 075 (2023)
Chem. Soc. Rev. 46, 4387 (2017)

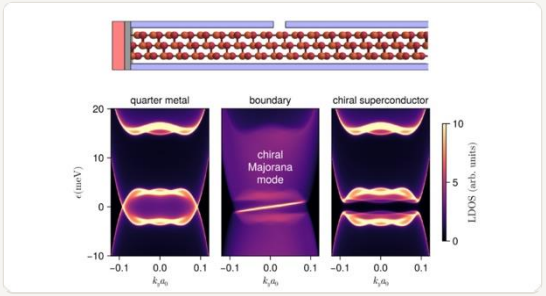
2 Nanohilos híbridos



Un hilo semiconductor (InAs) envuelto en un superconductor (Al). El campo magnético induce **estados ligados exóticos**.

arXiv:2607.18371
Phys. Rev. Lett. 134, 206302 (2025)
Nature Rev. Phys. 2, 575 (2020)

3 Grafeno romboédrico



Capas de grafeno apiladas en escalera que se vuelven **superconductoras quirales**, con un modo de Majorana en su borde.

arXiv:2606.14878

El elemento común que conecta los tres: **la superconductividad**

Del bit al qubit

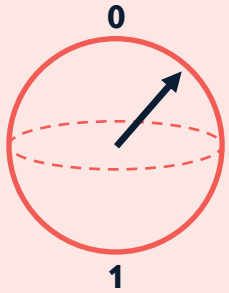
Bit

Un interruptor

Solo 0 o 1

Qubit

Una flecha



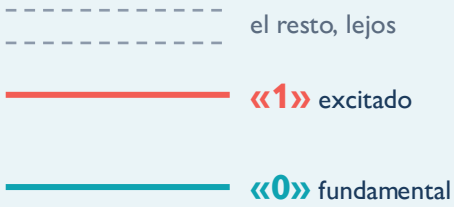
Apunta a 0, a 1 o «entre medias»

3 bits: una de sus 8 combinaciones. **3 qubits:** las 8 a la vez, cada una con su peso. Con 300 qubits, más combinaciones que átomos hay en el universo.

Un qubit es un sistema de dos niveles

1 Dos niveles

Como los niveles de energía de un átomo



Solo usamos los dos de abajo

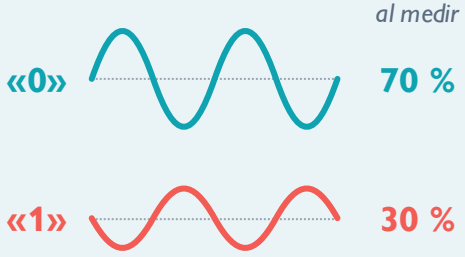
2 Saltar entre ellos

Con un fotón de la frecuencia justa

$h \cdot f = E_1 - E_0$: resonancia

3 Superposición

Puede estar en 0 y en 1 a la vez



Se mezclan ondas, no dados: pueden sumarse o anularse

Cualquier sistema con dos niveles bien separados del resto sirve de qubit.

¿De qué se hace un qubit?

Superconductores

Circuitos enfriados a 0,01 K

IBM, Google

Iones atrapados

Átomos con carga, sujetos con campos eléctricos

Quantinuum, IonQ

Átomos neutros

Atrapados con «pinzas» de luz láser

QuEra, Pasqal

Fotones

Partículas de luz que viajan por chips ópticos

PsiQuantum, Xanadu

Espines en silicio

Aprovechan la industria de los chips

Intel, Diraq

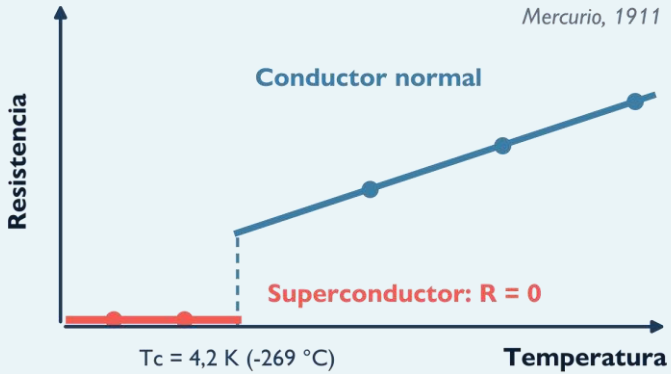
Topológicos

Basados en estados de Majorana. En investigación

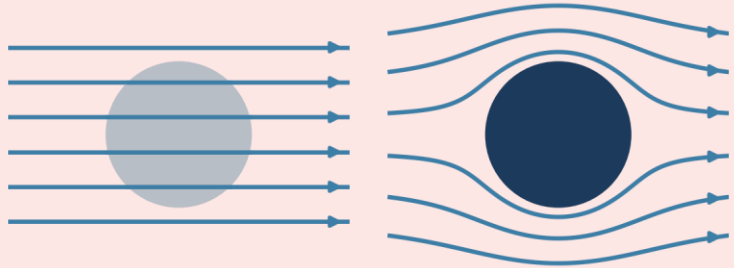
Microsoft

Superconductores: dos superpoderes

1 · Resistencia cero (1911)



2 · Efecto Meissner (1933)



T > Tc: lo atraviesa

T < Tc: lo expulsa

Expulsa el campo magnético: **¡un imán levita encima!**

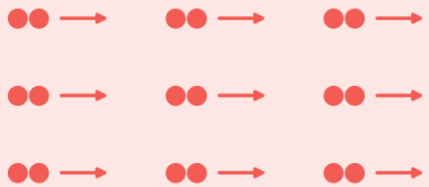
Sin resistencia no se pierde energía en calor: **$P = I^2 \cdot R = 0$**… pero solo con mucho frío.

Nobel 1913: Heike Kamerlingh Onnes, por sus estudios a muy bajas temperaturas, que llevaron a descubrir la superconductividad.

El secreto: los electrones bailan en pareja

Metal normal: cada uno a su aire

Superconductor: todos a una



1 Bailan en pareja

Con suficiente frío, los electrones forman pares de Cooper. El «pegamento»: las vibraciones de la red de iones.

2 Una sola onda

Todos los pares comparten el mismo estado cuántico: dualidad onda-corpúsculo… ¡a escala visible!

3 Sin resistencia

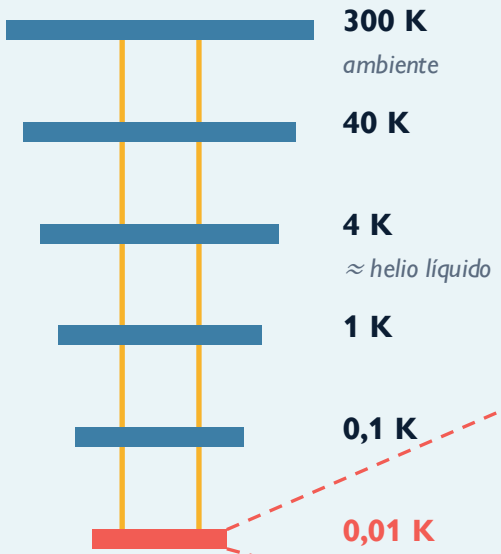
Una impureza no puede frenar a una pareja sin frenar a todo el salón.

Nobel 1972: Bardeen, Cooper y Schrieffer, por la teoría del apareamiento de los electrones. Bardeen ya tenía otro… ¡por el transistor!

Dentro del ordenador cuántico

Maqueta de la exposición

La «nevera» (criostato)



Un «muelle» eléctrico

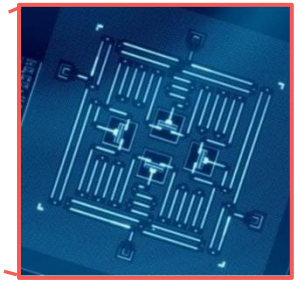
Circuito LC: oscila como un muelle (MAS), con niveles de energía cuantizados

Unión Josephson

Barrera finísima que los pares de Cooper cruzan por efecto túnel: separa el 0 y el 1

Control con microondas

Pulsos de ~5 GHz, como el WiFi, cambian el estado del qubit



Aquí va el chip, a 0,01 K: los qubits superconductores

Un circuito que ya conocéis: el LC

Circuito LC ≈ *Masa y muelle*

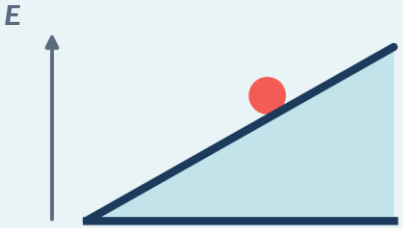
Carga q	↔ posición x
Bobina L	↔ masa m
1/C	↔ muelle k

	Masa–muelle (MAS)	Circuito LC
Oscila	$x(t) = A\cdot\sin(\omega t + \varphi)$	$q(t) = Q\cdot\sin(\omega t + \varphi)$
Frecuencia	$\omega = \sqrt{(k/m)}$	$\omega = 1/\sqrt{(LC)}$
Energía	$E = ½mv^2 + ½kx^2$	$E = ½LI^2 + q^2/(2C)$

Mismas ecuaciones, mismo baile: la energía pasa del condensador a la bobina y vuelve, como del muelle a la masa. En el chip, L y C son diminutos: **f ≈ 5 GHz**, ¡5.000 millones de vaivenes por segundo!

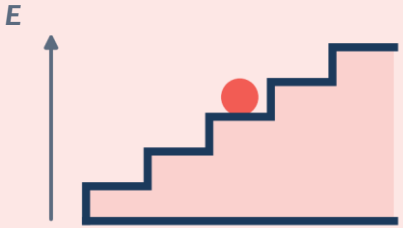
¿Qué significa «cuantizar»?

Clásico: una rampa



La amplitud A puede ser cualquiera, así que $E = \frac{1}{2}kA^2$ toma **cualquier valor.**

Cuántico: una escalera



Solo valen ciertos escalones:

$$E_n = (n + \tfrac{1}{2})\cdot hf$$

Como la luz, que llega en fotones de energía hf.

Un muelle de clase (f ≈ 1 Hz)

hf ≈ $7{\cdot}10^{-34}$ J: un rebote tiene unos 10^{31} escalones. **¡Parece una rampa!**

El circuito del chip (f ≈ 5 GHz)

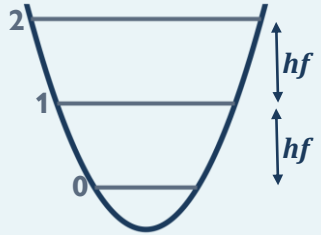
hf ≈ $3{\cdot}10^{-24}$ J: la energía del calor a ~0,24 K. Por eso lo enfriamos a 0,01 K: **para que el calor no lo haga saltar de escalón.**

La pieza clave: la unión Josephson

Clave: cada escalón mide h · f, donde f es la frecuencia a la que oscila el sistema con esa energía

1 El problema

Su f no depende de la amplitud



El pulso que sube de 0 a 1 también sube de 1 a 2, de 2 a 3…

2 Algo «no lineal»

Péndulo: a más amplitud, más lento

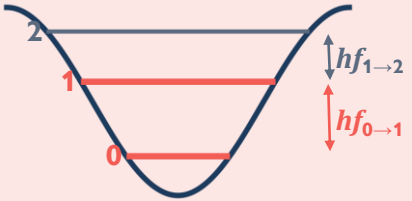
Muelle: $F = -kx$ lineal

Péndulo: $F = -mg \cdot \sin\theta$ no lineal

Unión Josephson: $I = I_c \cdot \sin\varphi$

3 ¡Un qubit!

Arriba f baja: escalones menores



Solo «suena» el salto 0→1: **¡un qubit!**

Nobel 1973: Brian Josephson, por predecir que los pares de Cooper cruzan esta barrera… ¡cuando aún era doctorando!

Nobel 2025: Clarke, Devoret y Martinis, por ver estos niveles cuantizados en un circuito.

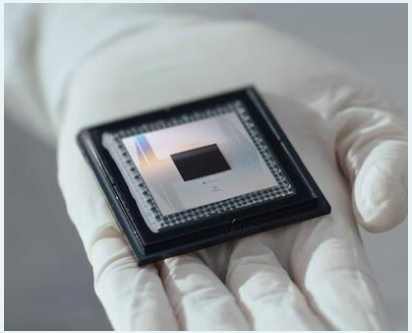
Qubit superconductor: el balance

Ventajas

- Se fabrican como los chips
- Rápidos: operan en nanosegundos
- Diseñables a la carta

Inconvenientes

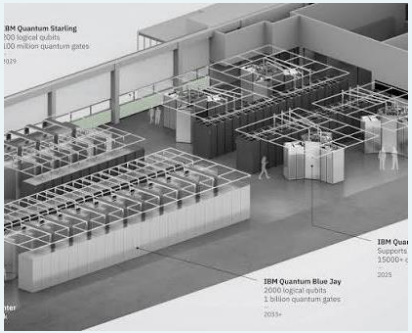
- Hay que enfriarlos a 0,01 K
- Frágiles: duran ~1 ms como mucho
- Hay que calibrarlos sin parar



Google Willow

2024 · 105 qubits

Por primera vez: más qubits, menos errores

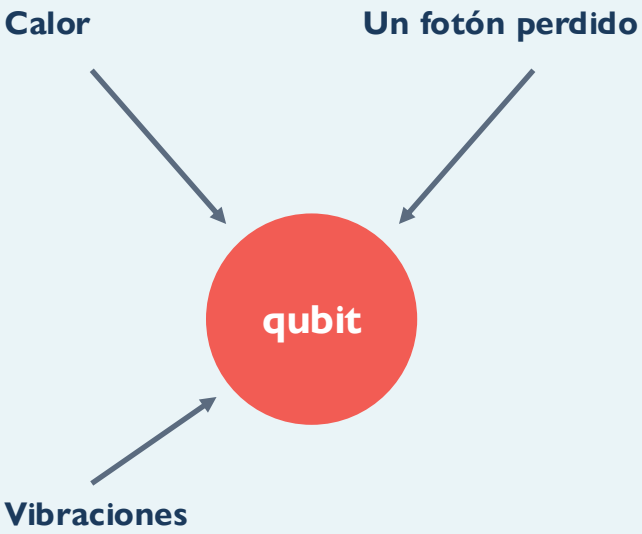


IBM Starling

2029 · 200 qubits lógicos

Ya no es un chip: ocupa una sala entera

El gran enemigo: los errores



Cualquier perturbación destruye la superposición (decoherencia)

1 **Aislar y enfriar**

Neveras a 0,01 K, blindajes, materiales muy puros

2 **Corregir errores**

Juntar muchos qubits «físicos» para hacer un qubit «lógico» fiable (Google, 2024)

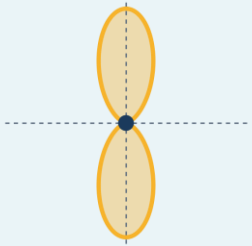
3 **Qubits protegidos por naturaleza**

Qubits topológicos con estados de Majorana… aquí entro yo

Majorana: medio electrón en cada punta

Un orbital p

Lo habéis visto en Química

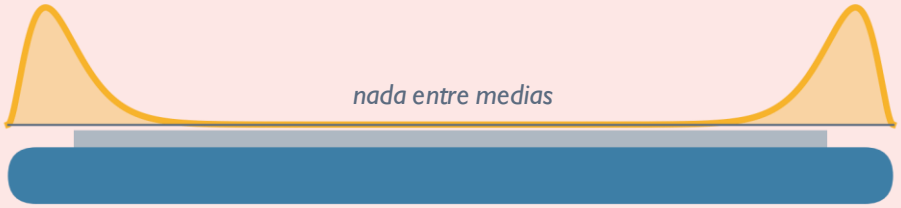


El electrón está **repartido en los dos lóbulos**

≈

El electrón del nanohilo

Semiconductor + superconductor + campo magnético



Majorana: ½ electrón **Majorana: ½ electrón**

Como el orbital p, pero con los «lóbulos» **10.000 veces más separados**

«0» no está el electrón

«1» está el electrón

Para cambiar el 0 por el 1, el ruido tendría que tocar **las dos puntas a la vez**: información protegida.

Qubits de Majorana: dónde estamos

2012 — Primeras señales

Picos compatibles con Majoranas en nanohilos (Delft)

2021 — Un tropiezo

Se retira un resultado muy citado: hacen falta pruebas mejores

2023 — Pieza a pieza

Majoranas montados con «átomos artificiales» (puntos cuánticos, Delft)

2025 — Majorana 1

Microsoft anuncia el primer chip topológico… entre críticas

2026 — Majorana 2

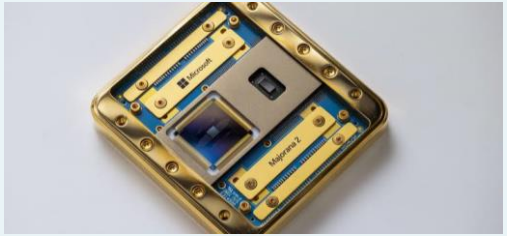
«Qubits» que duran ~20 s; el debate sigue abierto

La promesa

Información protegida «de serie»: **muchos menos qubits** para corregir errores

El reto

Demostrar sin dudas que son Majoranas: otros estados pueden imitarlos. **Ahí entra la teoría.**



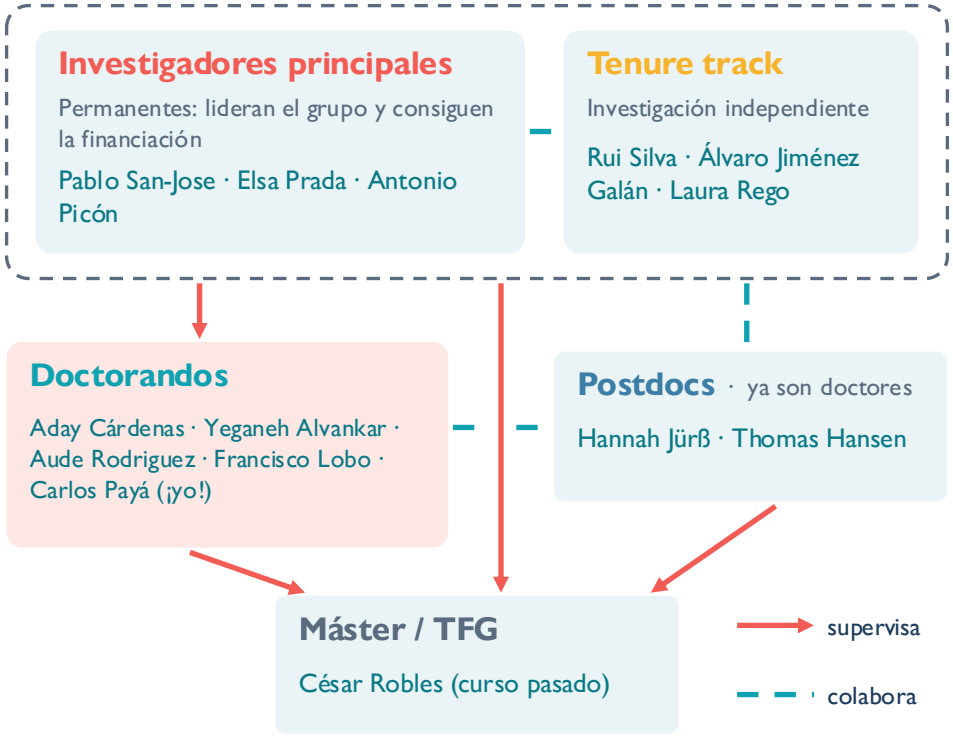
Majorana 2 (Microsoft, 2026)

GET TO KNOW ME

El día a día de un doctorando

Contado desde dentro

¿Qué es un grupo de investigación?



QUDYMA (ICMM-CSIC): teoría de materiales cuánticos. De nanohilos y Majoranas… a láseres ultrarrápidos.

No es una pirámide

Los sénior guían, pero las ideas fluyen en todas direcciones: todos aprendemos de todos.

Mi día a día

Q4Q (Quantum Materials for Quantum Technologies, ICMM): mi otro grupo, dirigido por Ramón Aguado

Mezclar formas de pensar (teoría y experimento, distintas especialidades, muchos países) es lo que más ideas nuevas genera.

Reuniones de grupo

Cada semana: avances, dudas y atascos

Programar y calcular

Papel, pizarra y mucho código. La IA ayuda a programar… pero hay que revisar lo que hace

Escribir

Artículos, informes y, al final, la tesis

Enseñar

Prácticas en la universidad y ayudar a estudiantes de TFG y máster

Seminarios

Investigadores de todo el mundo vienen a contar su trabajo

Congresos, estancias y artículos

Con mis supervisores y colaboradores en un congreso en Suiza

1

Congresos

Cuentas tu trabajo (póster o charla) a gente de todo el mundo

2

Estancias

Semanas o meses trabajando en otro grupo, en otro país

3

Artículos

Antes de publicarse, otros expertos revisan tu trabajo: revisión por pares

Mi camino hasta aquí

Yo estoy aquí

Bachillerato

Ahora

¡Estáis aquí!

Grado en Física

4 años

UAM, 2021. El TFG ya lo hice con Elsa

Máster

1 año

Materia Condensada, UAM, 2022

Doctorado

3–4 años

ICMM-CSIC. Contrato de investigador: ¡te pagan!

¿Después?

…

Postdoc, empresa, docencia, divulgación…

Consejo: hay estancias de investigación desde el instituto (Investiga I+D+i, Científic@s en prácticas) y becas durante la carrera (JAE Intro del CSIC)

Desmontando mitos

MITO	REALIDAD
Hay que ser un genio	Hace falta curiosidad y constancia. Casi siempre algo no sale… y es normal
Se investiga solo, encerrado	Trabajas en equipo, con gente de todo el mundo, y viajas a congresos
Un doctorado es seguir estudiando	Es tu primer trabajo: contrato, sueldo, y aprendes a programar, escribir y comunicar
Con Física solo puedes ser profe o investigador	Hay doctores en física en tecnología, energía, datos, finanzas, salud…

PARA TERMINAR

Cuatro ideas para llevaros

1. Los materiales cuánticos tienen **propiedades emergentes**, que nacen de la física de lo muy complejo
2. La tecnología de hoy nace de la primera revolución cuántica; **la segunda**, la que estudiamos, definirá el futuro
3. Los qubits ya existen, pero quedan **grandes retos** para construir ordenadores cuánticos revolucionarios
4. La ciencia se hace **en equipo**

Y dos preguntas…

? ¿Cómo va a cambiar la IA la investigación científica?

? Si hacéis una carrera científica, ¿iríais a trabajar a la empresa o a la academia?

CSIC Consejo Superior de Investigaciones Científicas | ICMM Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid | QUDYMA