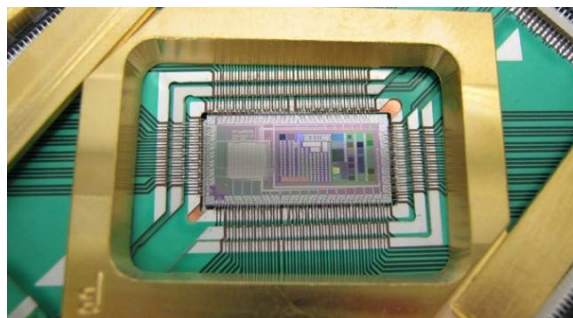
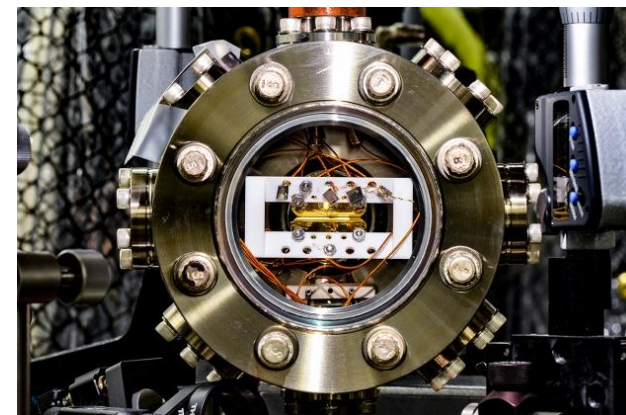


Tecnologías cuánticas: promesas y realidades

Rafael Molina Fernández
Instituto de Estructura de la Materia (CSIC)

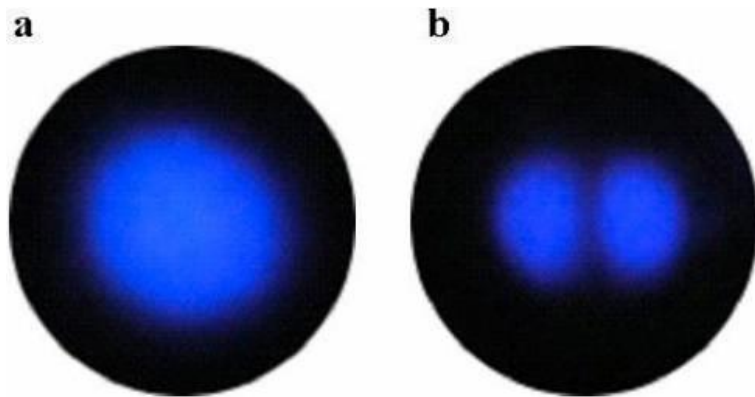


XVIII Semana de la Ciencia
Madrid 8 de noviembre de 2018

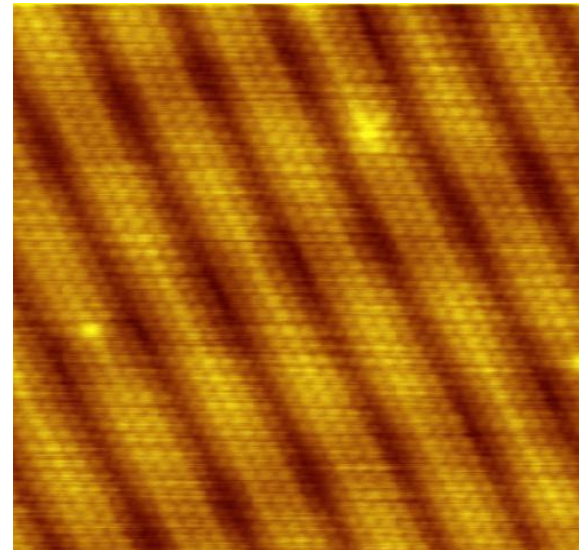


Física cuántica

- La física cuántica describe las leyes de lo muy pequeño.
- Partículas elementales, átomos, moléculas,...
- ¡Pero también conjuntos de átomos!



Mikhailovskij et al. PRB 2009

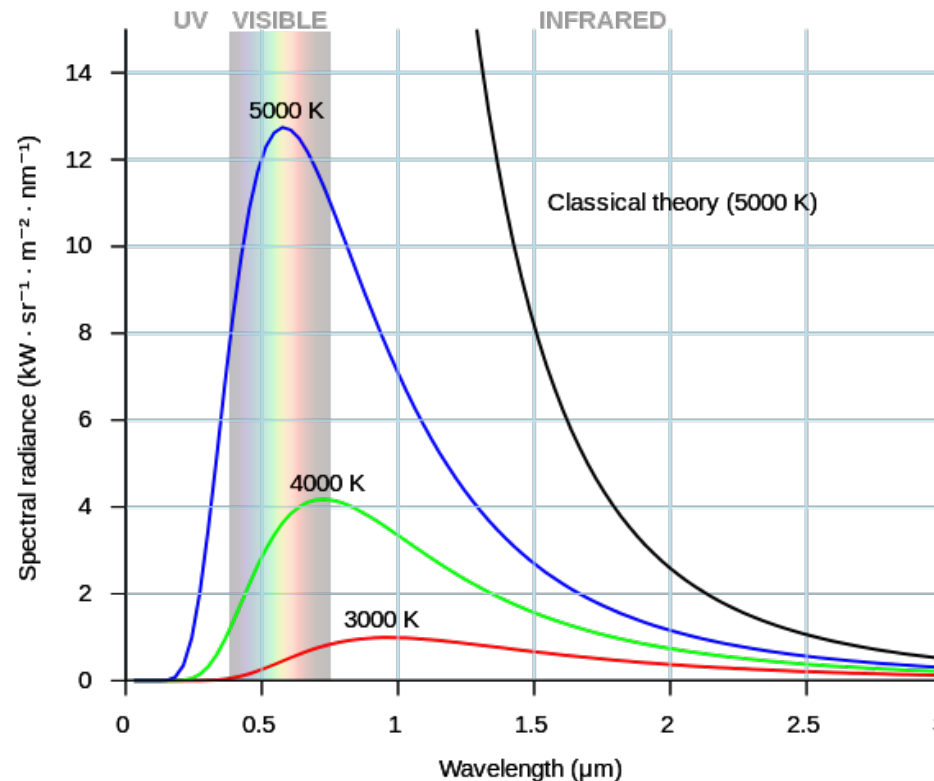


Breve **historia** de los inicios de la **física cuántica**

- Radiación del cuerpo negro
- Efecto fotoeléctrico
- Espectroscopía atómica

Breve historia de los inicios de la física cuántica

- Radiación del cuerpo negro
- Efecto fotoeléctrico
- Espectroscopía atómica

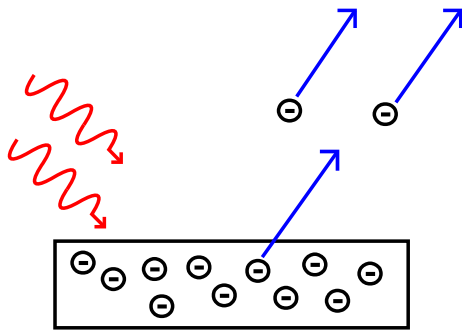


Planck 1900

Breve historia de los inicios de la física cuántica

- Radiación del cuerpo negro
- Efecto fotoeléctrico
- Espectroscopía atómica

El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por un material cuando incide sobre él radiación electromagnética (luz visible o ultravioleta)



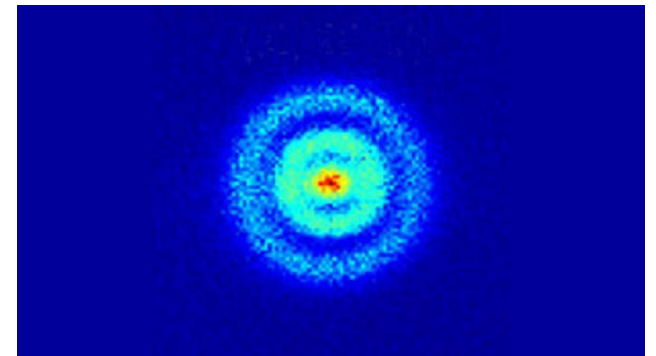
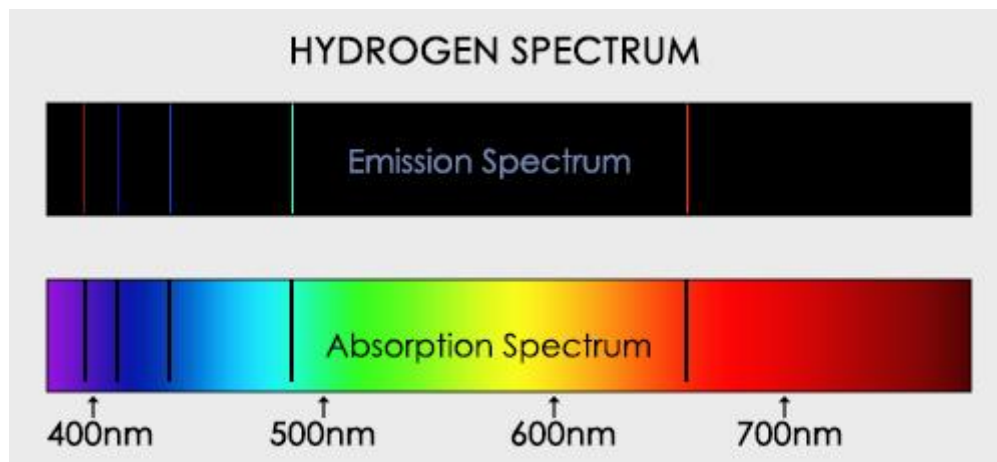
Leyes del efecto fotoeléctrico

- Para cada metal dado, existe una cierta frecuencia mínima de radiación incidente debajo de la cual ningún electrón puede ser emitido.
- Para un metal y una frecuencia de radiación incidente dados, la cantidad de electrones emitidos es directamente proporcional a la intensidad de luz incidente.
- Por encima de la frecuencia mínima, la energía cinética máxima del electrón emitido es independiente de la intensidad de la luz incidente, pero depende de la frecuencia de la luz incidente.

Einstein 1905: La luz se compone de cuantos de energía que cuando interaccionan con la materia solamente lo pueden hacer de uno en uno. La luz se comporta a la vez como onda y como partícula.

Breve historia de los inicios de la física cuántica

- Radiación del cuerpo negro
- Efecto fotoeléctrico
- Espectroscopía atómica



Bohr 1913

Schrödinger 1924

Experimento de la doble rendija

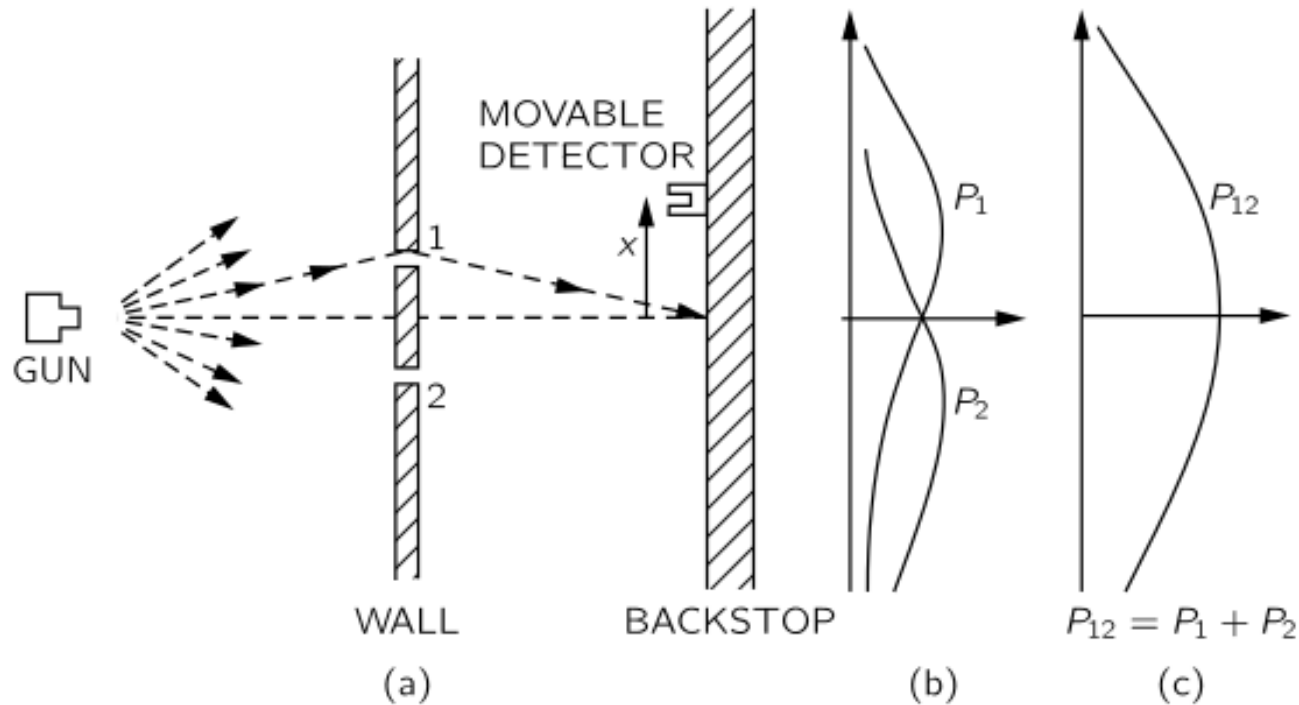


Fig. 1-1. Interference experiment with bullets.

Experimento de la doble rendija

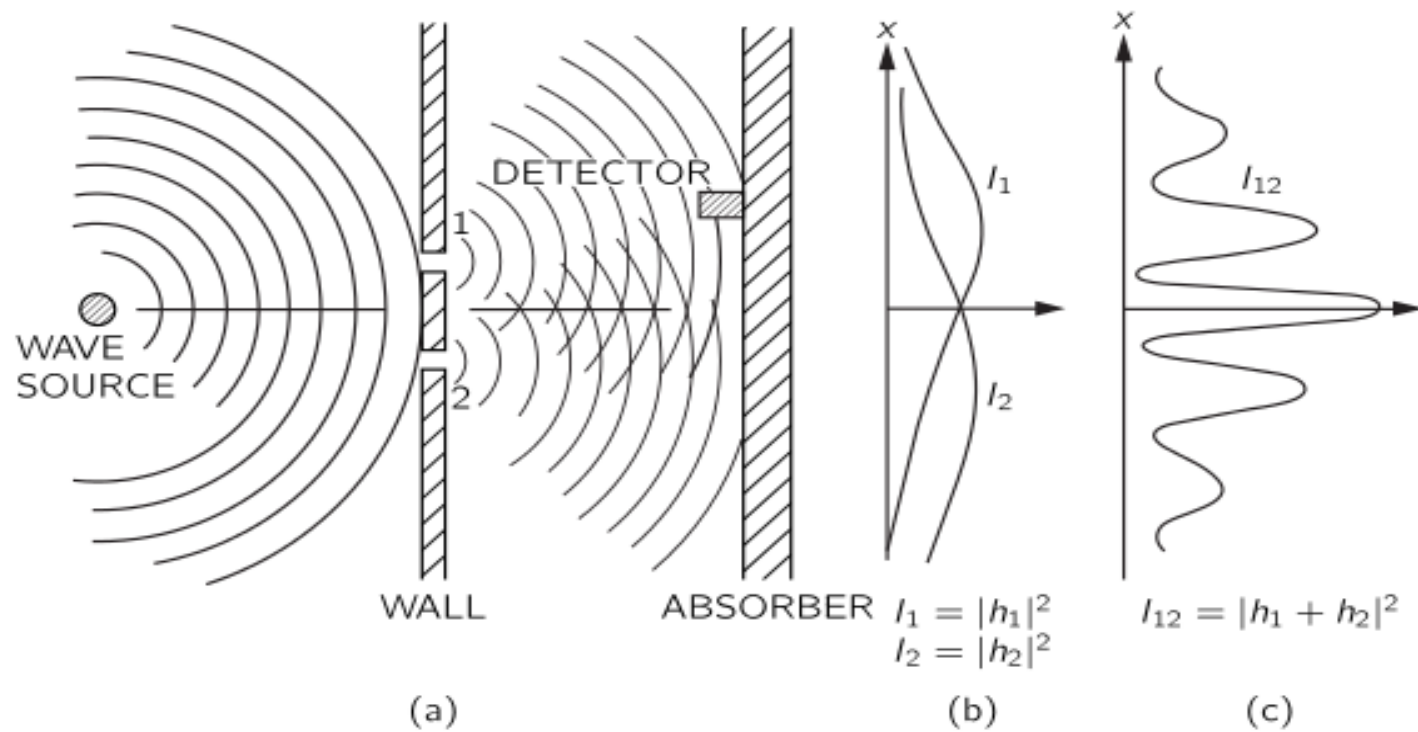


Fig. 1–2. Interference experiment with water waves.

Experimento de la doble rendija

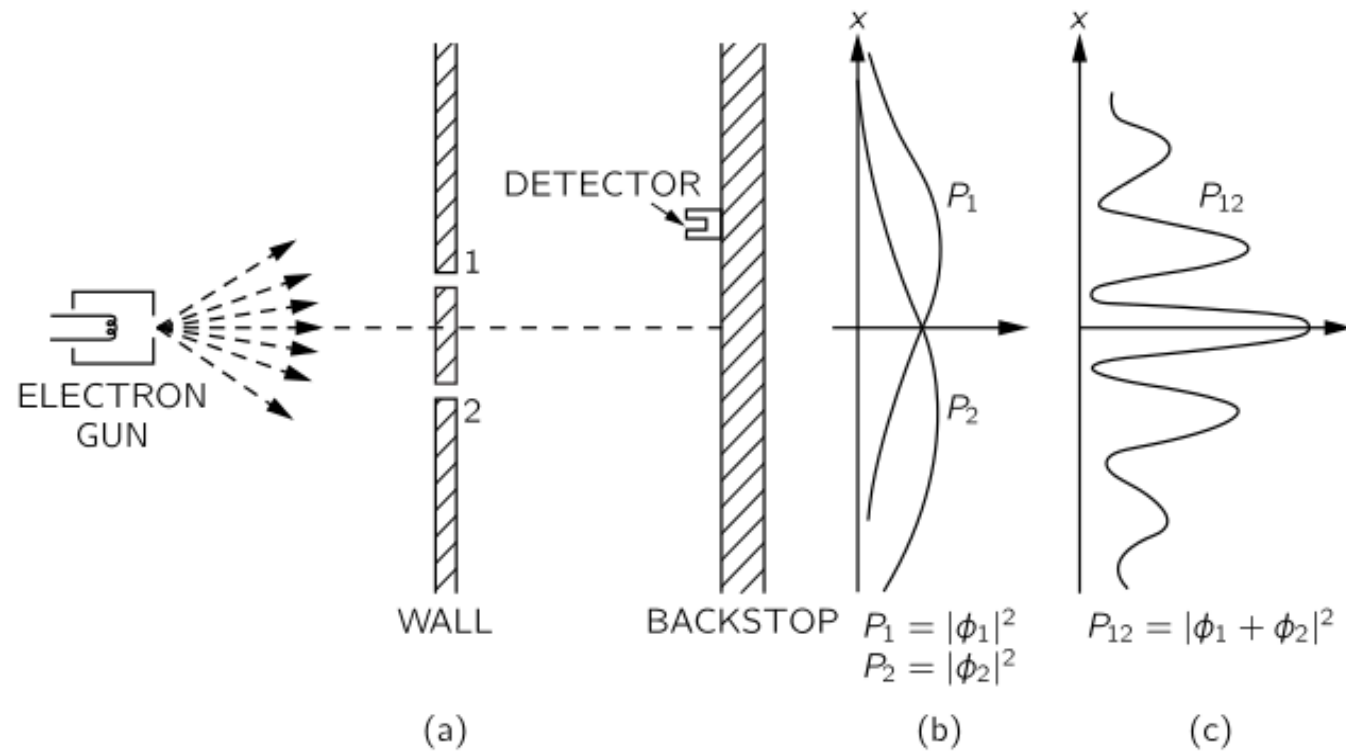


Fig. 1–3. Interference experiment with electrons.

Experimento de la doble rendija

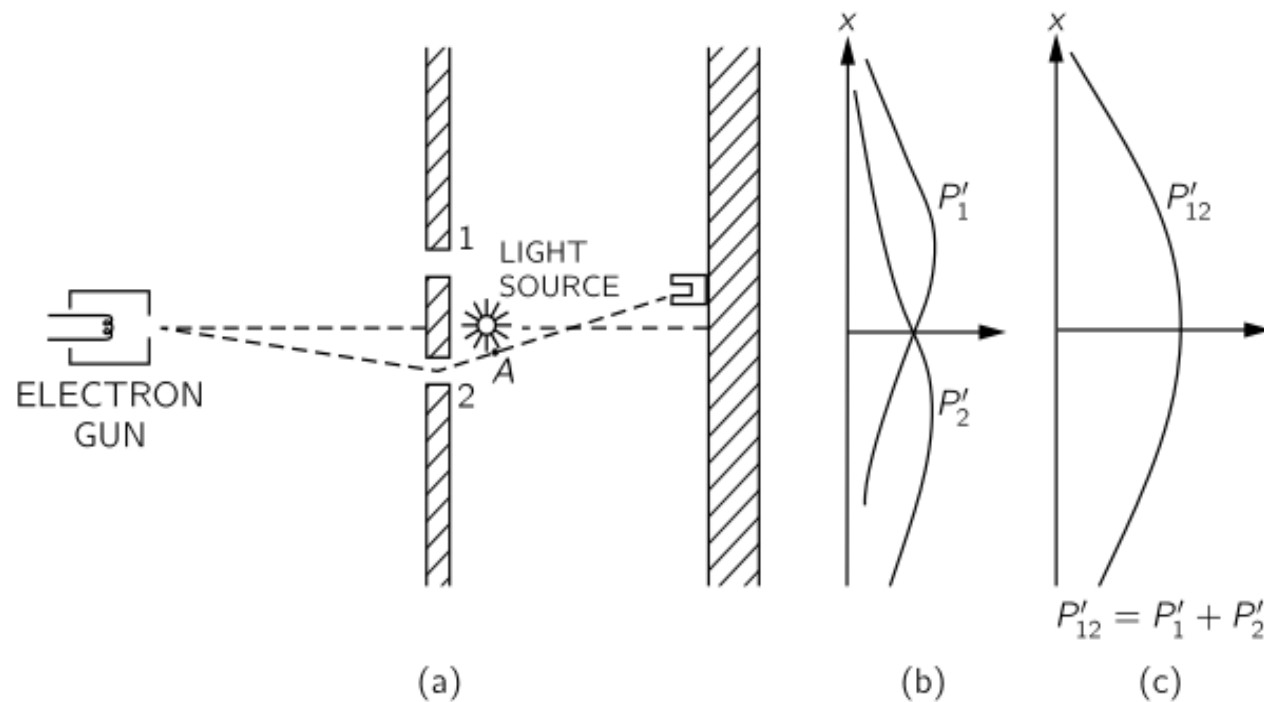
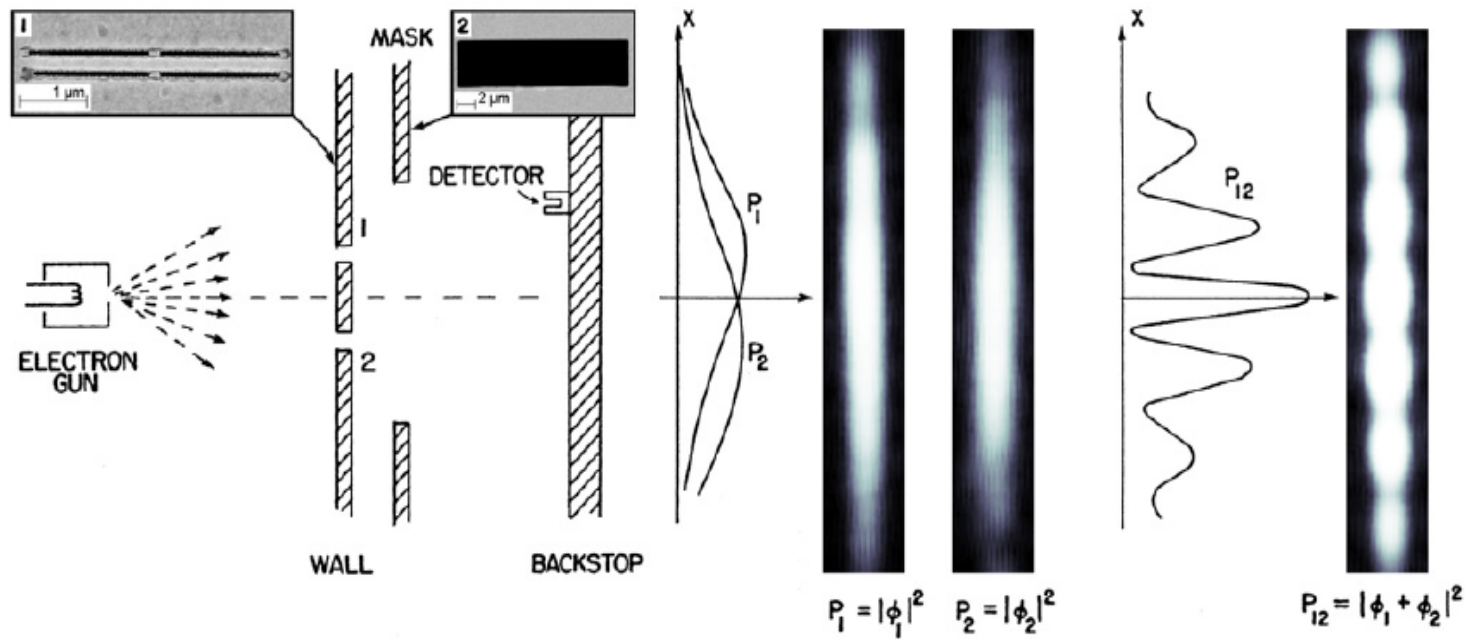
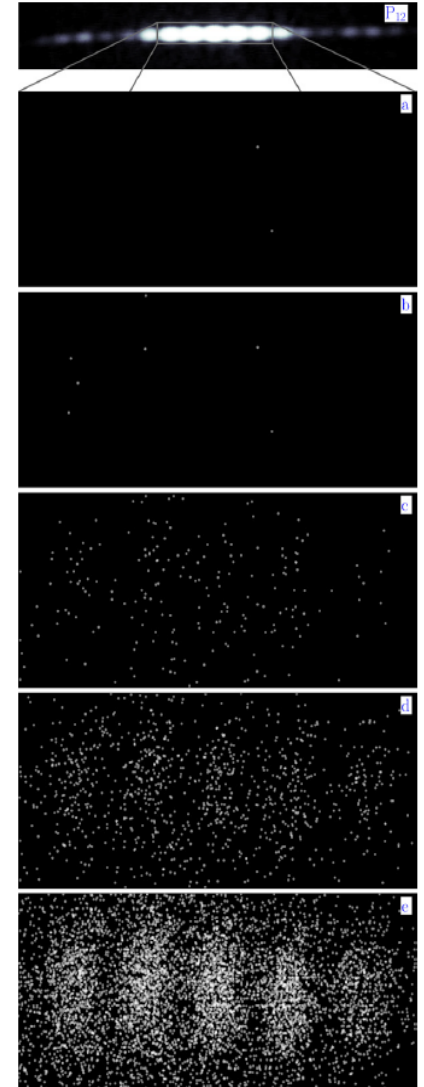


Fig. 1–4. A different electron experiment.

Experimento de la doble rendija



Bach *et al.* New Journal of Physics 15, 033018 (2013)



Principio de incertidumbre de Heisenberg y dualidad onda-corpúsculo

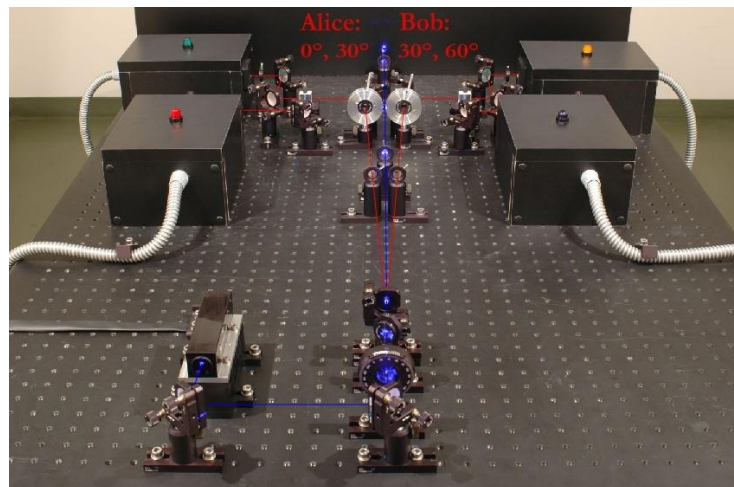
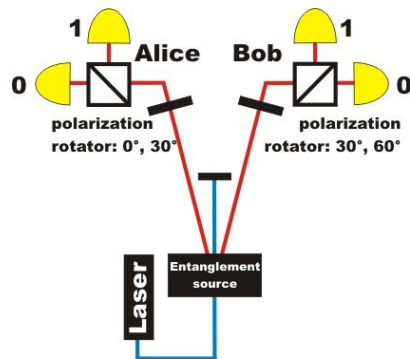
Extraños efectos cuánticos

- **Superposición:**

Los objetos pueden estar en varios estados al mismo tiempo.

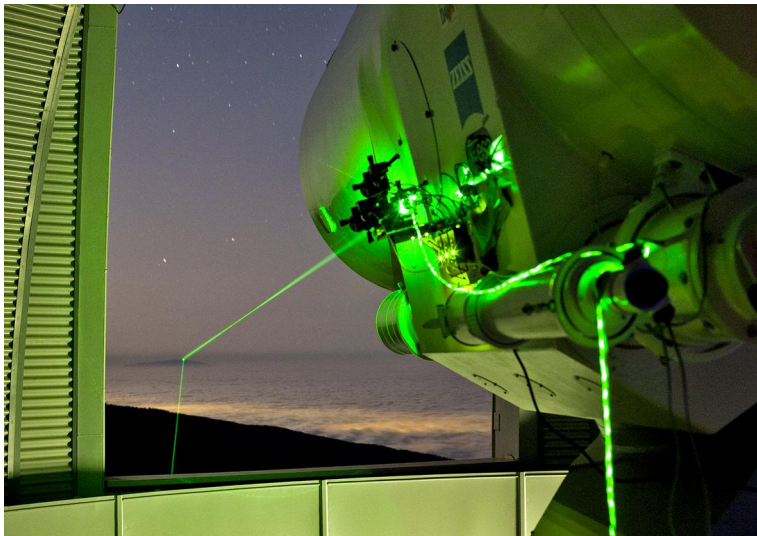
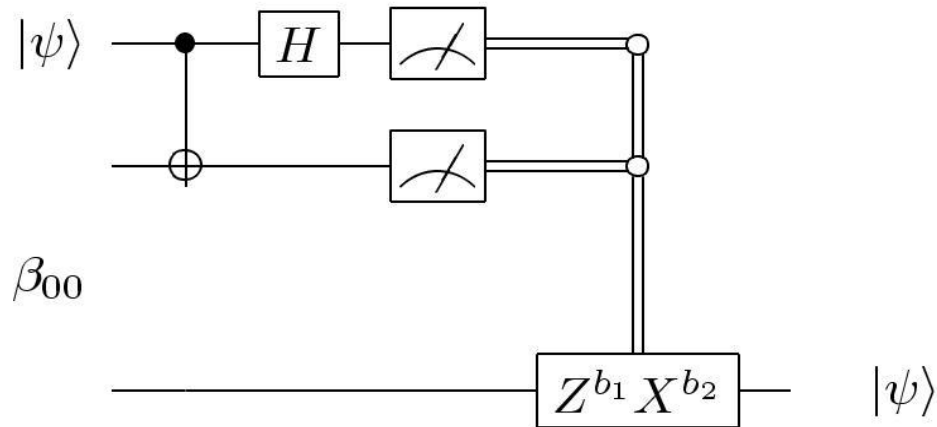
- **Entrelazamiento:**

Los objetos pueden estar profundamente conectados sin ninguna interacción física directa.

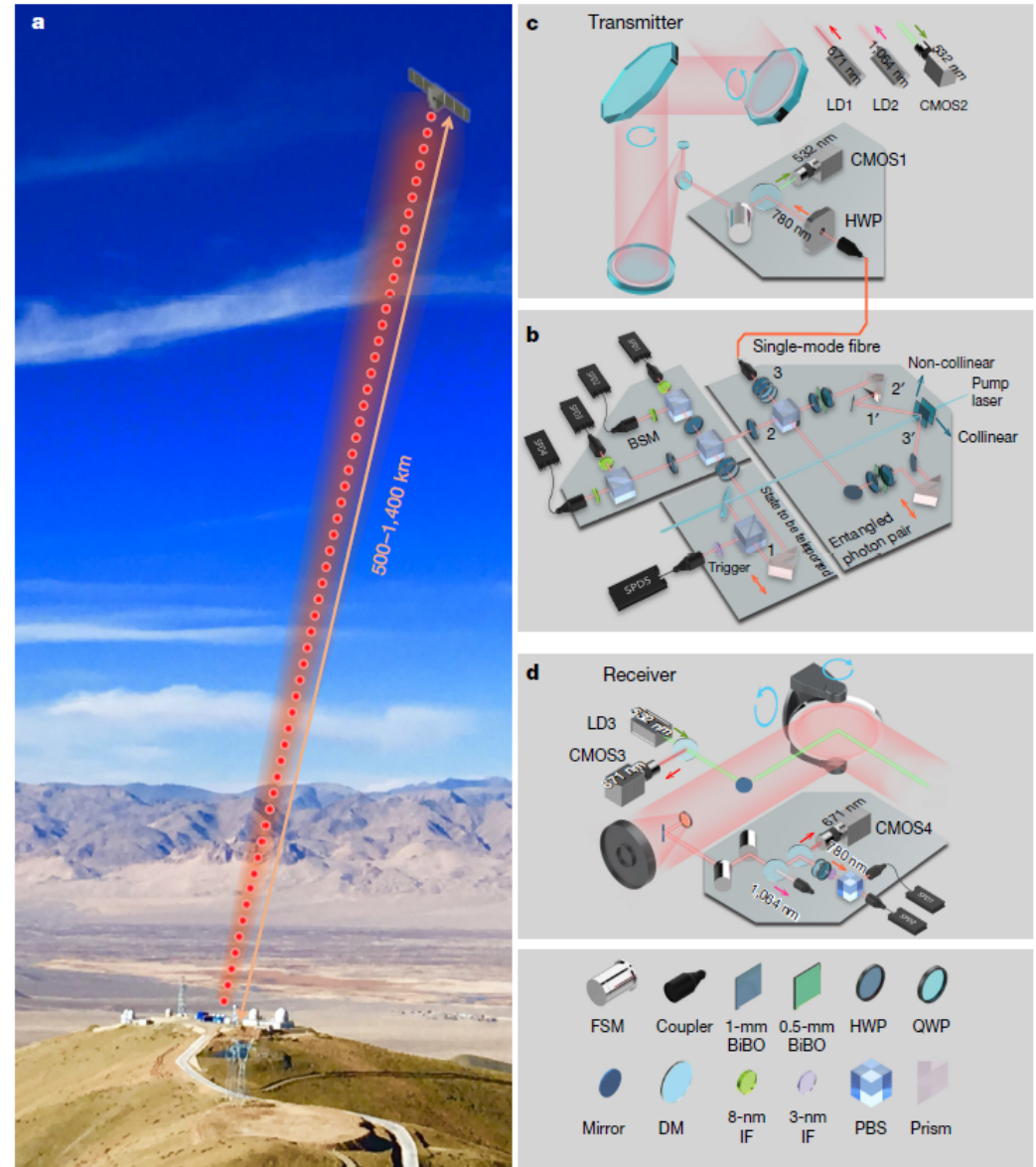


P. Brenner
Universidad de Erlangen-Nuremberg

Teleportación cuántica



2012 La Palma-Tenerife 143 Km
Xiao-Song Ma *et al.* Nature 2012



Ji Gang-Ren *et al.* Nature 2017 (1400 Km)

La primera revolución cuántica

- Vivimos en la era de la información. Nuestros conocimientos de física cuántica están en la base de la revolución tecnológica que ha llevado a esta nueva era.

El transistor

El láser

Tomografía por resonancia magnética

Células fotovoltaicas (energía solar)

Microscopía avanzada (electrónica, efecto túnel, ...)

Tecnologías basadas en el carácter discreto de la naturaleza

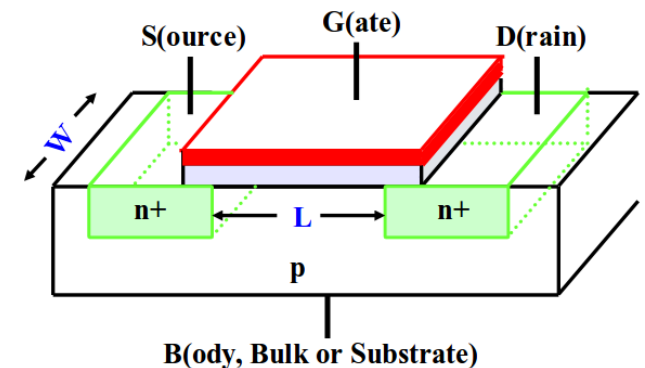
El transistor

- Es probablemente el mayor invento del s. XX
- Nuestra era de las comunicaciones y de la información se basa en el transistor de la misma forma que la revolución industrial se basó en la máquina de vapor.



Bardeen, Brattain y Shockley (Bell labs) 1947

MOSFET

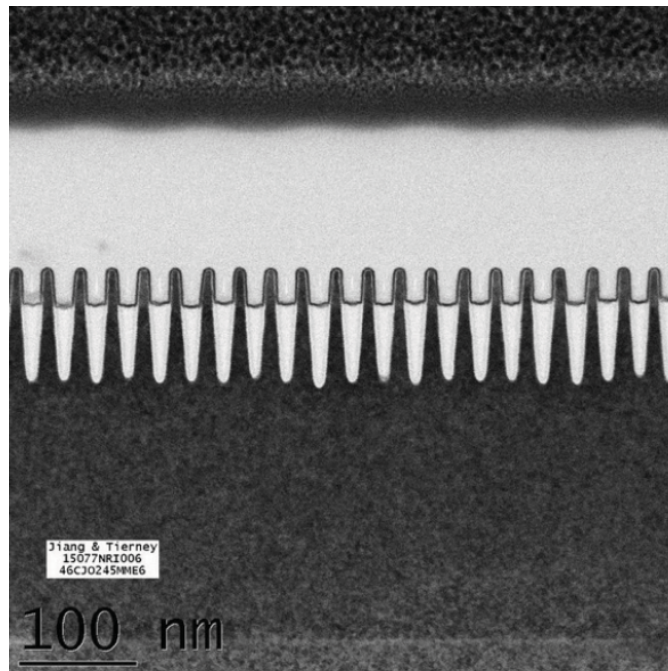


$$L = 7 \text{ nm} = 0,0000007 \text{ cm}$$

(Caben unos 50000 en el ancho de un cabello humano)

¿Necesitamos una nueva revolución tecnológica?

- Nuestra capacidad para miniaturizar los componentes electrónicos está al límite.
- Los efectos cuánticos van a ser importantes en las nuevas generaciones de componentes electrónicos.



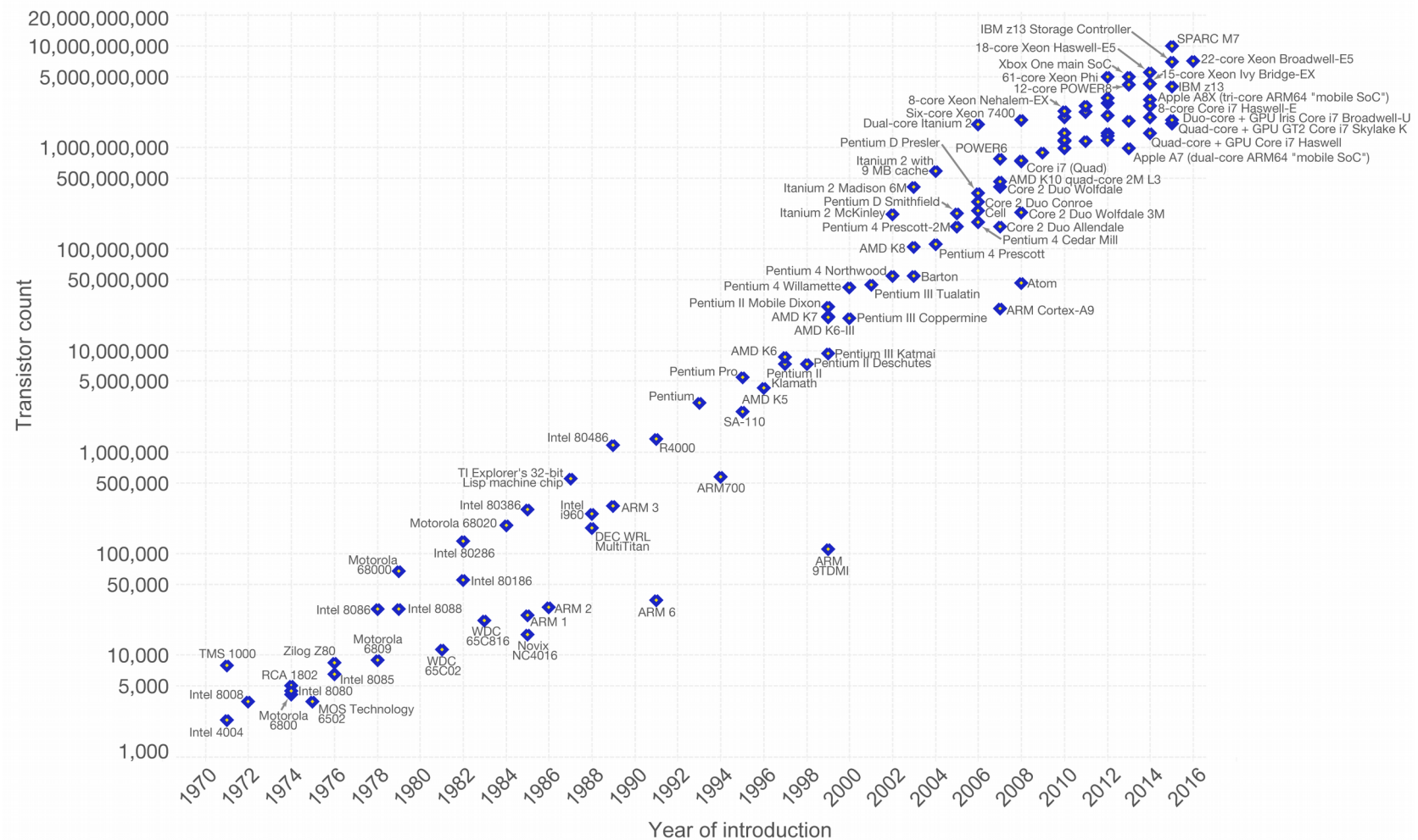
IBM
Transistores de 7 nm

Ley de Moore

Moore's Law – The number of transistors on integrated circuit chips (1971-2016)

Our World
in Data

Moore's law describes the empirical regularity that the number of transistors on integrated circuits doubles approximately every two years. This advancement is important as other aspects of technological progress – such as processing speed or the price of electronic products – are strongly linked to Moore's law.



Data source: Wikipedia (https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor_count)

The data visualization is available at [OurWorldinData.org](https://ourworldindata.org). There you find more visualizations and research on this topic.

Licensed under [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) by the author Max Roser.

Extraños efectos cuánticos

- **Superposición:**

Los objetos pueden estar en varios estados al mismo tiempo.

- **Entrelazamiento:**

Los objetos pueden estar profundamente conectados sin ninguna interacción física directa.

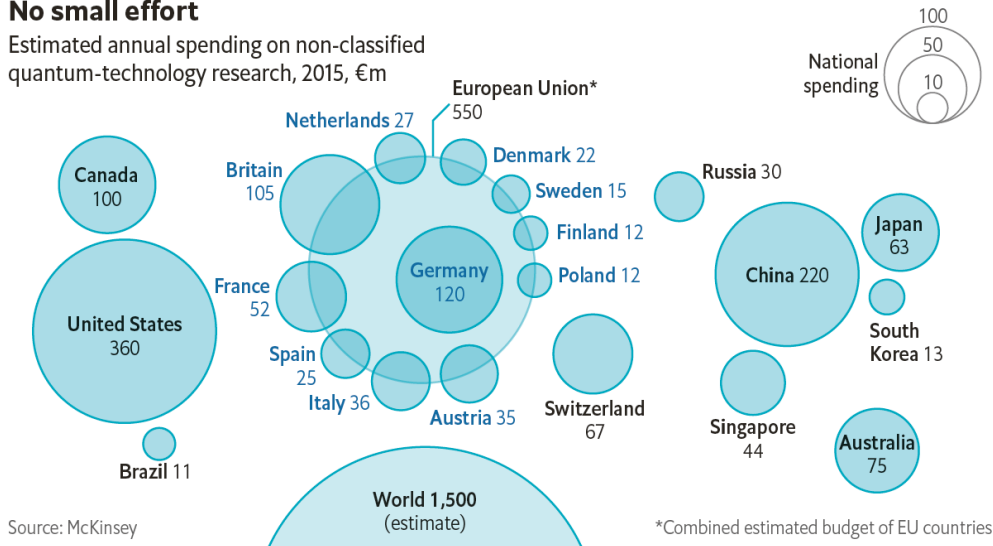
La segunda revolución cuántica

- La primera revolución cuántica la ha hecho posible: Tecnologías de enfriamiento por láser y por helio líquido y tecnologías de fabricación a escala nanométrica.
- Áreas fundamentales de trabajo
 - Metrología cuántica
 - Sensores cuánticos
 - Criptografía cuántica
 - Simulación cuántica
 - Computación cuántica

Buque insignia europeo

No small effort

Estimated annual spending on non-classified quantum-technology research, 2015, €m



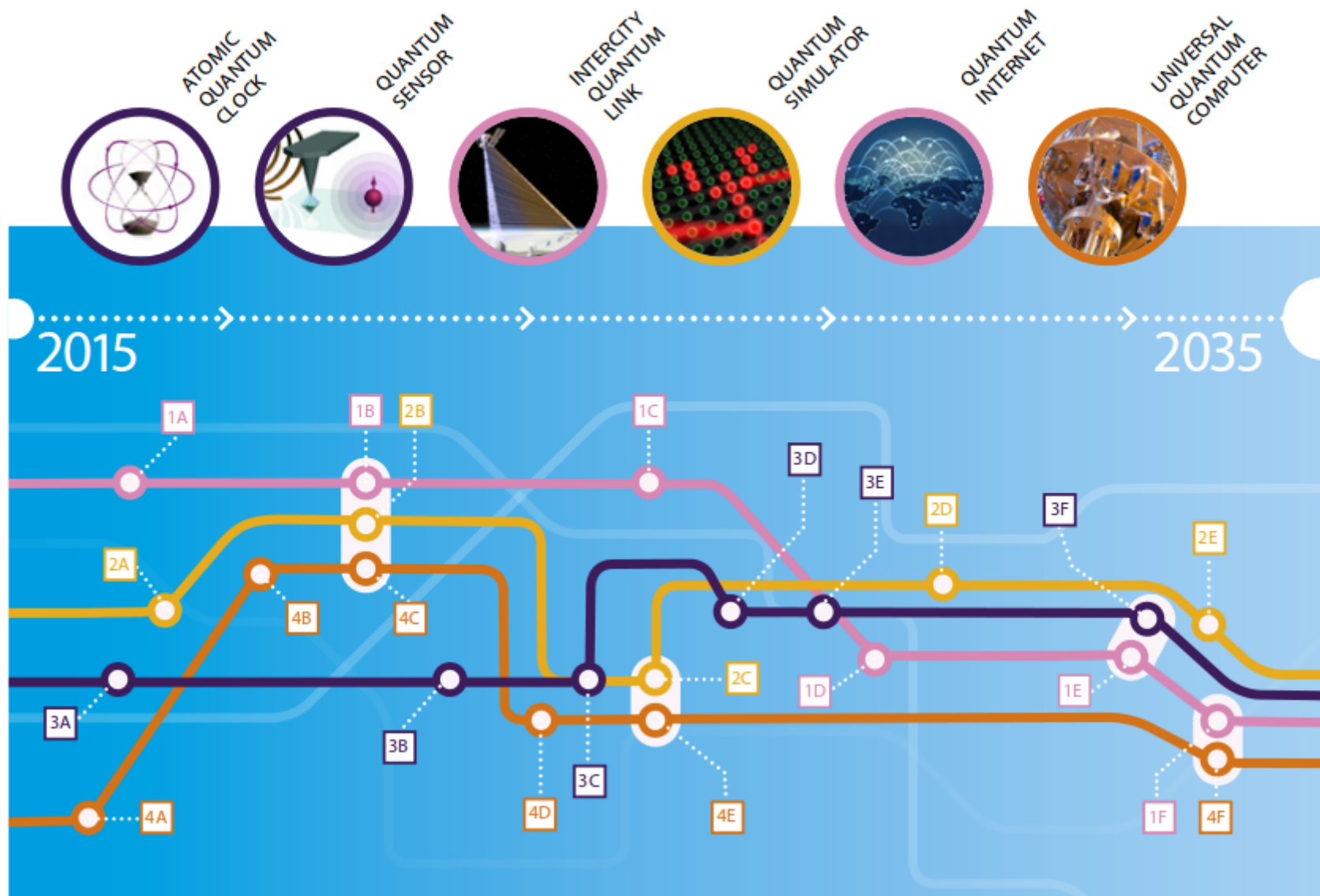
Gasto anual en el mundo en tecnologías cuánticas

The Economist

Europa necesita una inversión estratégica ahora para liderar la segunda revolución cuántica. A partir de su excelencia científica, Europa tiene la oportunidad de crear una industria competitiva para su prosperidad y seguridad a largo plazo.

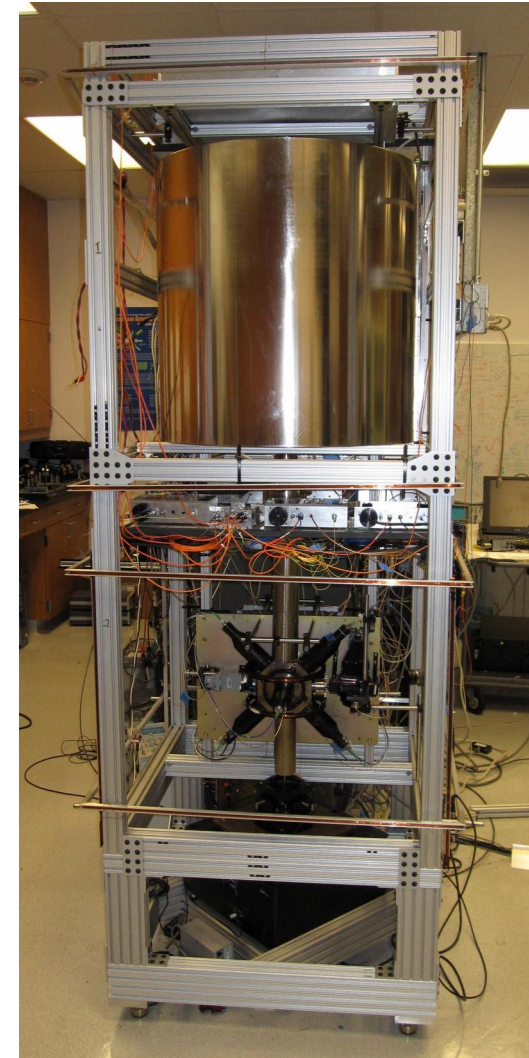
Manifiesto cuántico

Quantum Technologies Timeline



Metrología y sensores cuánticos

- Los estados cuánticos son muy frágiles y sensibles a las perturbaciones externas. Normalmente eso es una desventaja para el desarrollo de la tecnología cuántica.
- Pero esa sensibilidad es una ventaja en aplicaciones de metrología y de sensores cuánticos.
- Ejemplos actualmente en desarrollo: sensores gravimétricos, mejores relojes atómicos, magnetómetros mejorados para medir campos magnéticos en el cerebro,...



NASA, laboratorio JPL

Comunicaciones y criptografía cuántica

- Actualmente los sistemas de comunicación utilizan unos sistemas de encriptación basados en la factorización de números muy grandes en dos números primos. Desenscriptar sin la clave es muy difícil para un ordenador clásico pero no para un ordenador cuántico (algoritmo de Shor).
- En el momento en que un hacker intercepta una señal cuántica la destruye.
- Hay sistemas de comunicación cuántica ya disponibles comercialmente pero solo llegan hasta unos 300 km.



ID Quantique



2012

La Palma-
Tenerife
143 Km

Historia de la computación cuántica

- Richard Feynman 1981.

¿Pueden las propiedades de la mecánica cuántica usarse para simular sistemas físicos que los ordenadores clásicos no son capaces?

- David Deutsch 1985.

Los sistemas cuánticos se pueden utilizar como ordenadores universales, capaz de correr cualquier programa.

- Peter Shor 1991.

Algoritmo (conjunto de instrucciones) para que un ordenador cuántico descomponga un número en sus números primos de forma mucho más eficiente que un ordenador clásico.

- Peter Zoller e Ignacio Cirac 1995.

Primera implementación realista de un ordenador cuántico utilizando un sistema físico (iones atrapados).

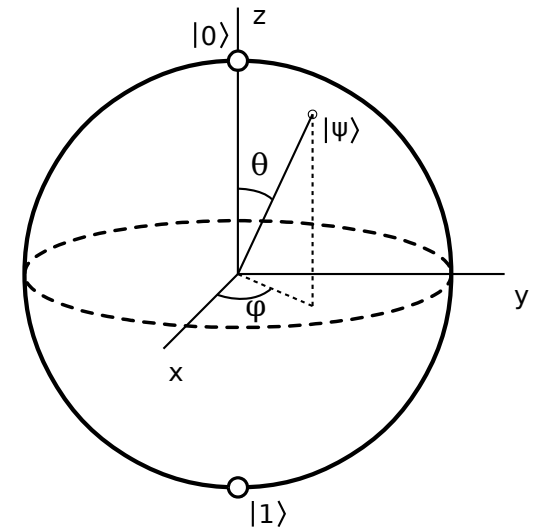


Computación cuántica

- Los ordenadores cuánticos funcionan de forma fundamentalmente diferente a los ordenadores clásicos.
- Superposición, entrelazamiento, probabilidad.

Qubits

- Bits clásicos 0 1
- Bits cuánticos (qubits) $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$



$$|\psi\rangle = \cos(\theta/2)|0\rangle + e^{i\phi} \sin(\theta/2)|1\rangle$$

$$0 \leq \theta \leq \pi \text{ y } 0 \leq \phi \leq 2\pi$$

Cuando uno lleva a cabo un cálculo en un ordenador cuántico es en cierto sentido como hacer el cálculo potencialmente en ambos casos a la vez (**paralelización cuántica**).

Teoría de la computación:

Puertas lógicas

- La teoría de la computación permite desarrollar el comportamiento de los ordenadores sin necesidad de tener en cuenta el funcionamiento físico del dispositivo.
- Tiene sus orígenes en la lógica matemática de Leibniz, Boole, etc.
- Utiliza puertas lógicas que modifican los valores de los bits

Puerta NO

Entrada	Salida
0	1
1	0

Puerta Y

Entrada A	Entrada B	Salida
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

Puerta O

Entrada A	Entrada B	Salida
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

Se pueden combinar

Puerta NOY
(NAND)

Entrada A	Entrada B	Salida
0	0	1
1	0	1
0	1	1
1	1	0

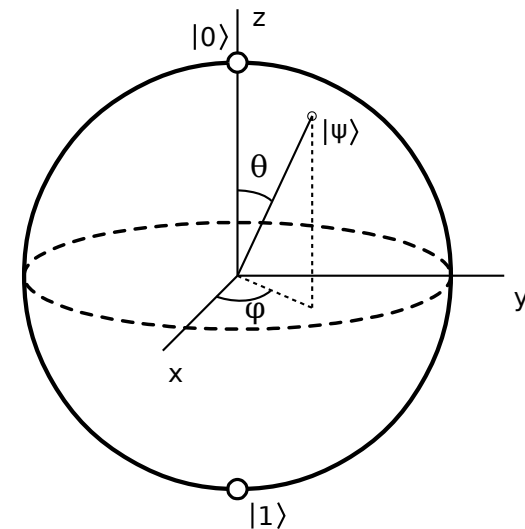
La puerta NOY es
universal

Utilizándola se puede
hacer cualquier cálculo
lógico

Puertas lógicas cuánticas

- Las puertas lógicas cuánticas son las clásicas y muchas más.
- Por ejemplo: Puerta de Hadamard

$$\text{El } |0\rangle \text{ a } \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}} \text{ y el } |1\rangle \text{ a } \frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}}$$



Si solamente se exige que se pueda aproximar de manera arbitraria cualquier operación (lo que necesitamos en la práctica) se puede demostrar que existe el **ordenador cuántico universal**. En la práctica se suelen usar tres puertas cuánticas de dos qubits.

Entrelazamiento

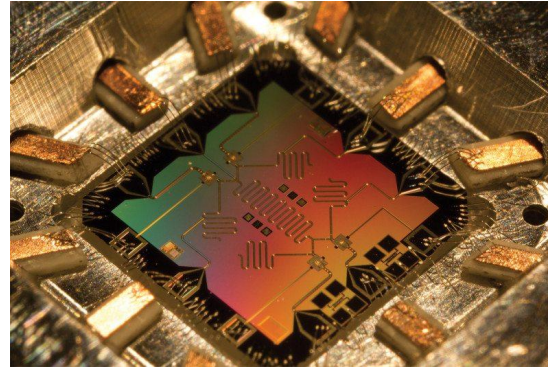
- En un ordenador clásico cada bit funciona por separado y tiene que estar aislado del resto para prevenir errores de cálculo o que un documento se corrompa.
- En un ordenador cuántico el entrelazamiento (y, por tanto, la interacción y las correlaciones) entre qubits es fundamental.
- Operar en un qubit es operar en todos los otros qubits con los que está entrelazado.
- Para describir el estado de un ordenador clásico de 50 bits se necesitan 50 bits de memoria.
- Para describir el estado de un ordenador cuántico de 50 qubits se necesitan $2^{50} = 1.125.899.906.842.624$ bits de memoria

Probabilidad

- Los resultados de un algoritmo cuántico son probabilistas. Al final de la computación tenemos una probabilidad de obtener la respuesta correcta.
- En mecánica cuántica tenemos amplitudes de probabilidad. Como las ondas están amplitudes de probabilidad pueden interferir constructiva o destructivamente. Podemos jugar con estos efectos para incrementar la probabilidad de una respuesta correcta y disminuir la probabilidad de una respuesta incorrecta.

Tecnologías físicas para crear qubits

- Anillos de cable superconductor



J.M. Martinis, Universidad de California, Santa Barbara

Ordenador cuántico de Google

(L. Lamata y E. Solano, Universidad del País Vasco)

9 qubits – 20 qubits – 72 qubits

Chao Song et al/ arXiv: 1703.10302

Universidad de Ciencia y Tecnología de China en Hefei



Probablemente el primer ordenador cuántico que consiga la **supremacía cuántica**?

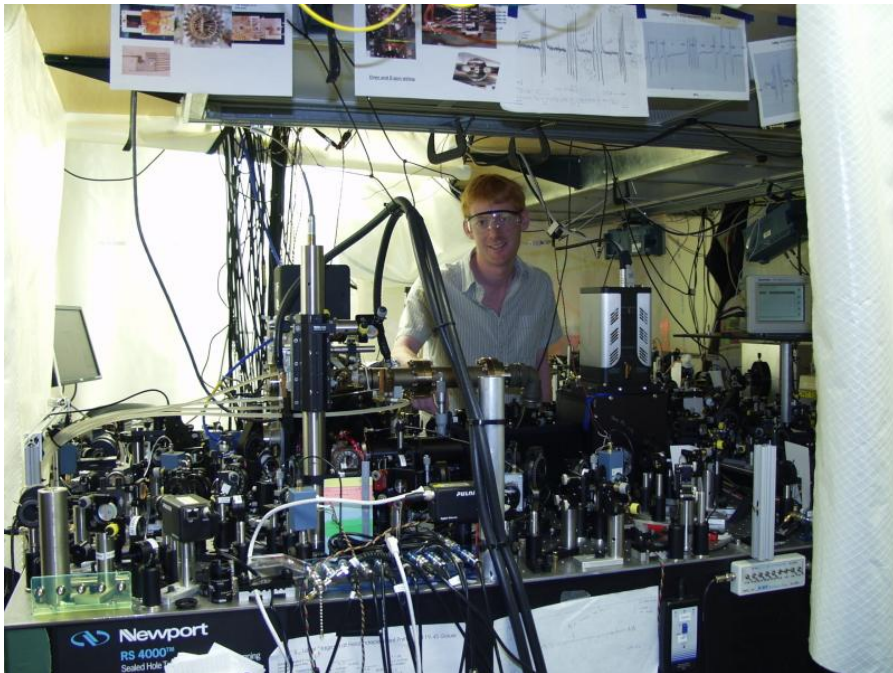
IBM 50 qubits (2017)

Intel 49 qubits (2018)

Rigetti 19 qubits (2017)

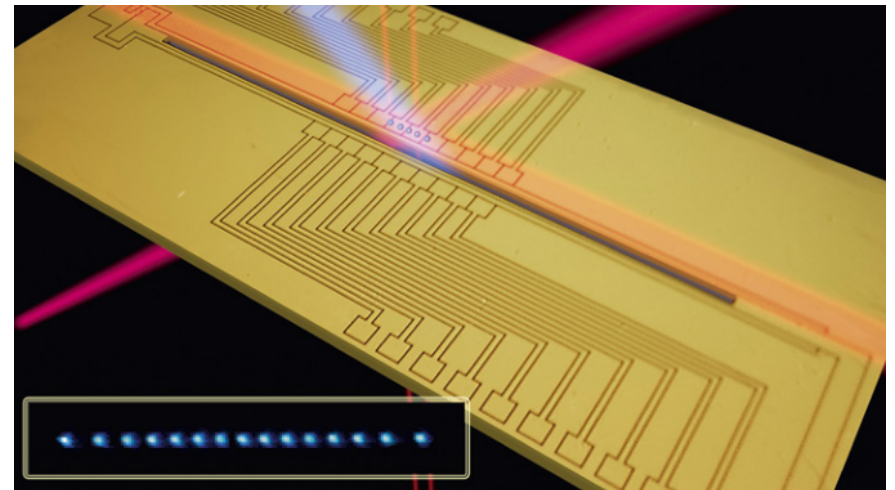
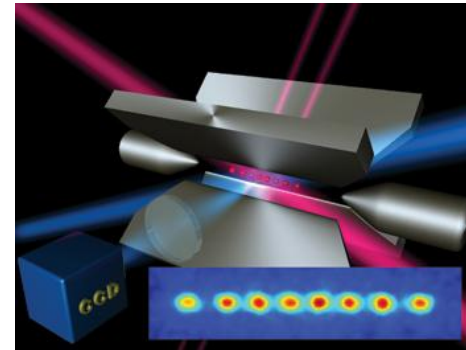
Tecnologías físicas para crear qubits

- Iones atrapados por campos magnéticos o eléctricos.



John Home

NIST, Maryland, EEUU

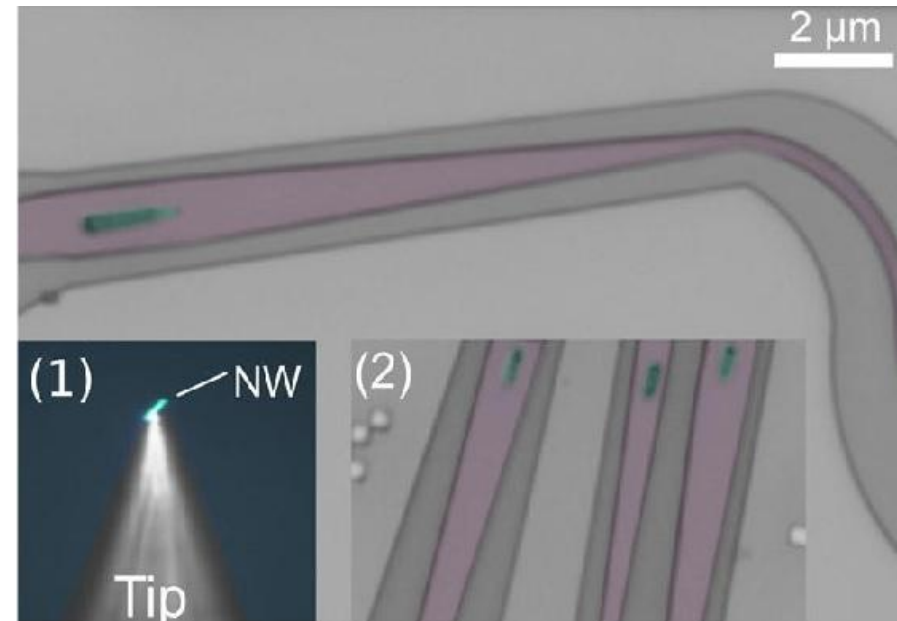
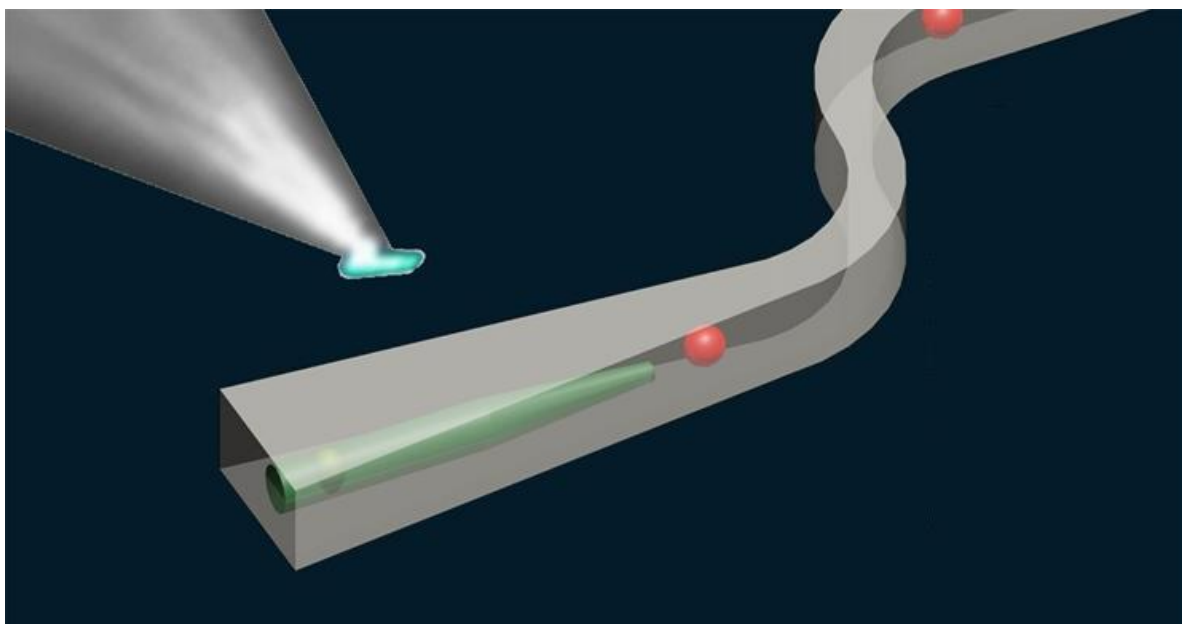


Rainer Blatt

Universidad de Innsbruck
Austria

Tecnologías físicas para crear qubits

- Fotones individuales.



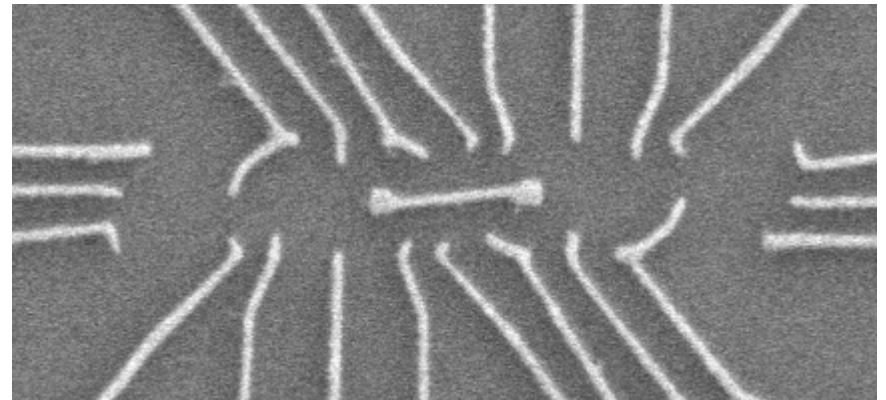
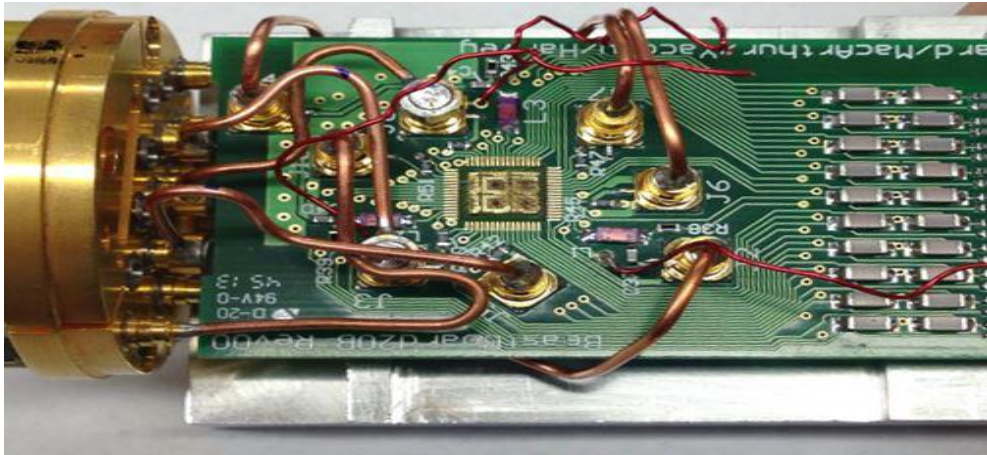
Circuitos fotónicos integrados

Zadeh et al. Nanoletters 2016

Universidad Tecnológica de Delft (Holanda)

Tecnologías físicas para crear qubits

- Puntos cuánticos.

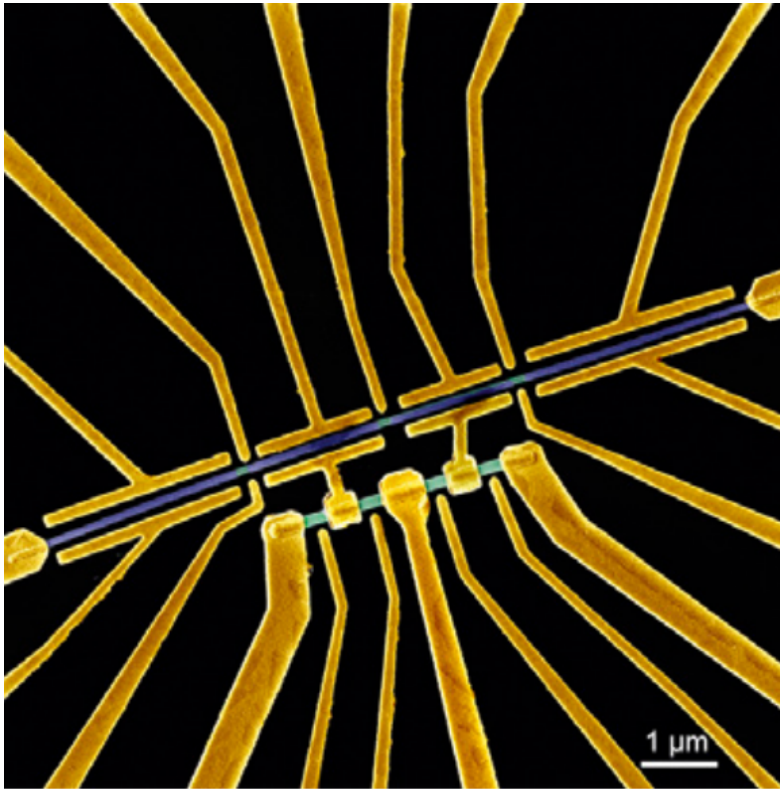


Yacoby lab, Universidad de Harvard (EEUU)

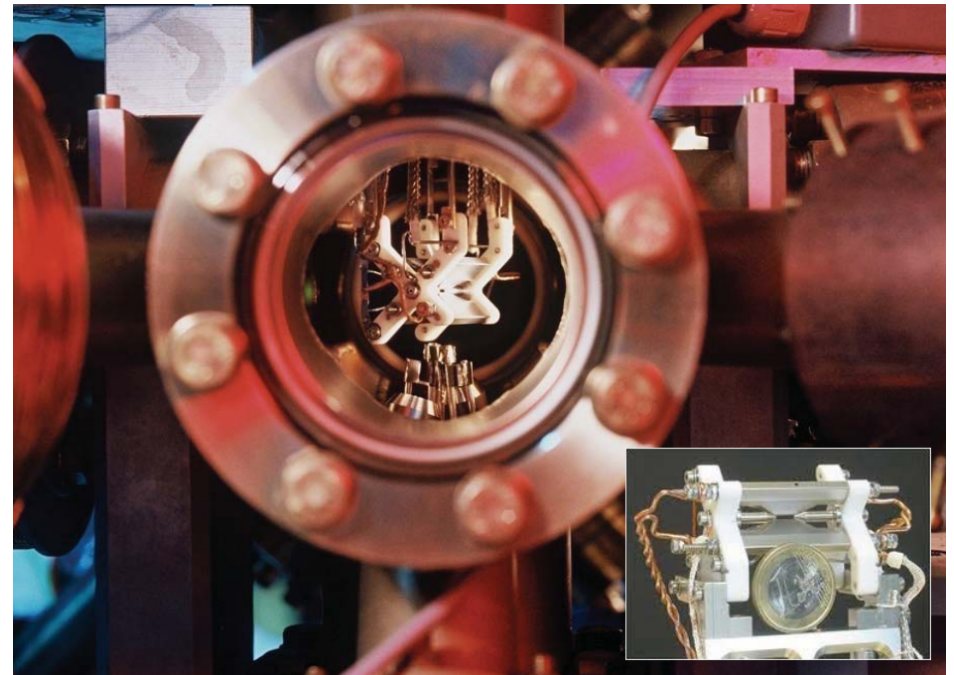
Estudios teóricos: G. Platero, R. Aguado, ICMM -CSIC

Tecnologías físicas para crear qubits

- Nuevos tipos de partículas compuestas (sistemas topológicos).



D. Ramazde, Universidad de Copenhague

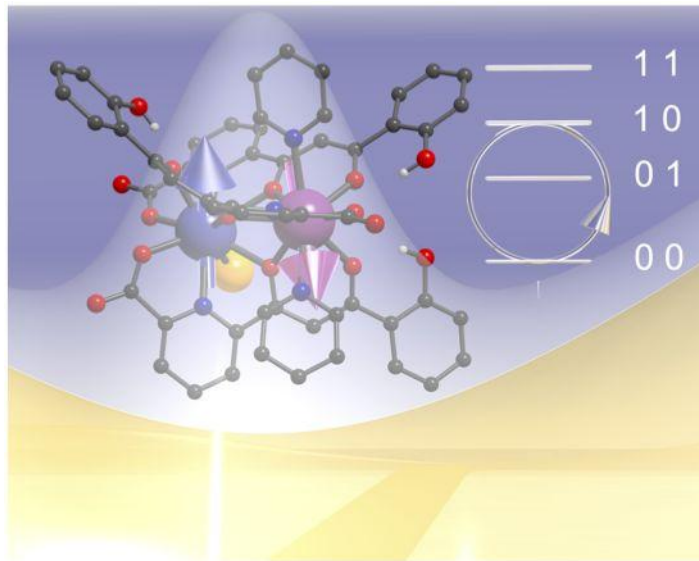


Rainer Blatt (Innsbruck)
Miguel Ángel Martín Delgado UCM

Tecnologías físicas para crear qubits

- Otros sistemas: Vacantes en diamante, moléculas magnéticas,...

Luis Vitalla, Fernando María, Universidad de Zaragoza
Fernando Luis, Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón, CSIC

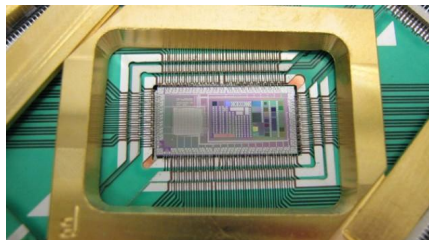


Desafíos tecnológicos

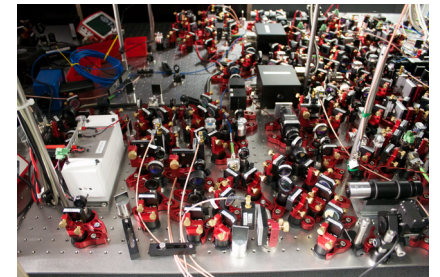
- **Decoherencia**: Los qubits son muy sensibles a las perturbaciones externas. Hay que aislarlos muy bien y probablemente deben estar a muy bajas temperaturas. Al mismo tiempo, deben interaccionar entre ellos y se tienen que poder aplicar las operaciones lógicas y medir a gran velocidad.
- Probablemente se necesitará una gran **redundancia** en el número de qubits y las operaciones a realizar para corregir errores.

Simulación cuántica

- Consiste en usar un sistema cuántico muy controlado para simular otro sistema cuántico que queremos investigar.
- Aplicaciones: diseño de nuevos materiales, nuevos medicamentos, etc.
- Es una versión dedicada del ordenador cuántico.
- Es una tecnología que está madurando rápidamente.



D-Wave



L. Tarruell, ICFO

El futuro de la tecnología

- Las aplicaciones de las tecnologías cuánticas más interesantes y las que cambiarán nuestras vidas de forma más radical todavía no las conocemos.
- De igual manera que los inventores del transistor no imaginaban que su invento permitiría los teléfonos móviles unas décadas después.

Más información:

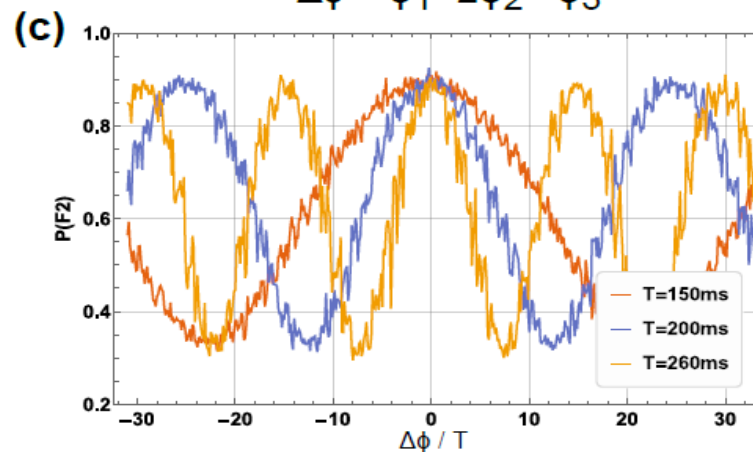
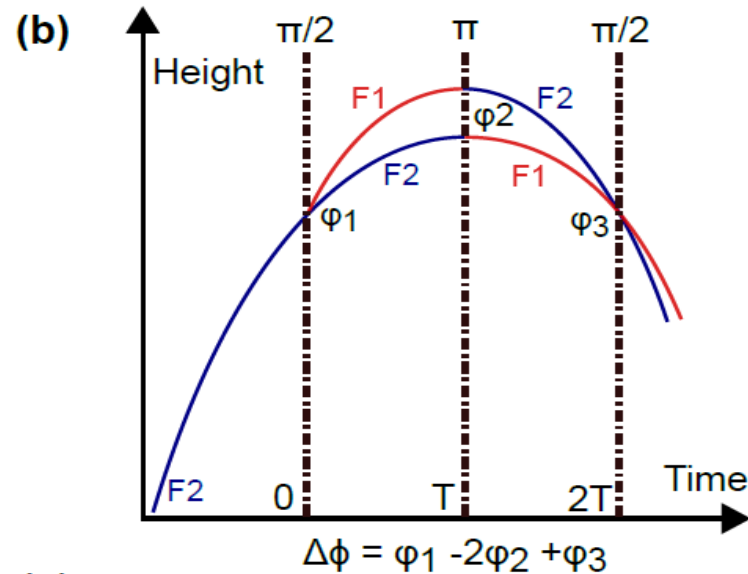
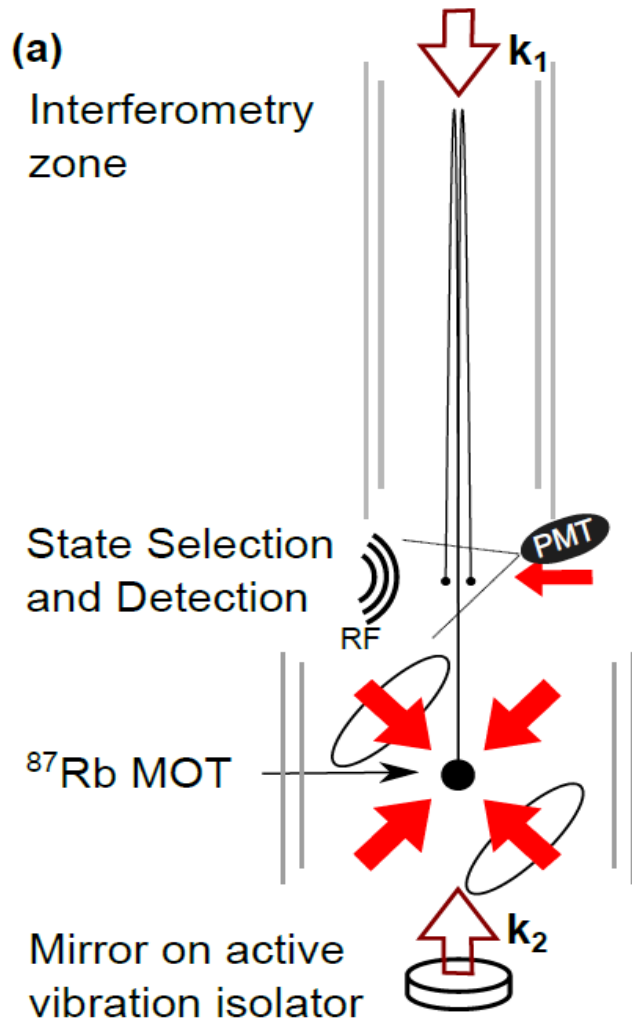


<http://www.research.ibm.com/ibm-q>

Ordenador cuántico de IBM (5 qubits)
<https://quantumexperience.ng.bluemix.net/>

<https://ai.google/research/teams/applied-science/quantum-ai>

Sensores cuánticos de gravedad



$$P_2 = \bar{P} + C/2 \cos \Delta\Phi$$

$$\Delta\Phi = (k_{\text{eff}}g - \alpha)T^2 + \Phi_L$$

$$k_{\text{eff}} = |\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2| \approx 2k$$

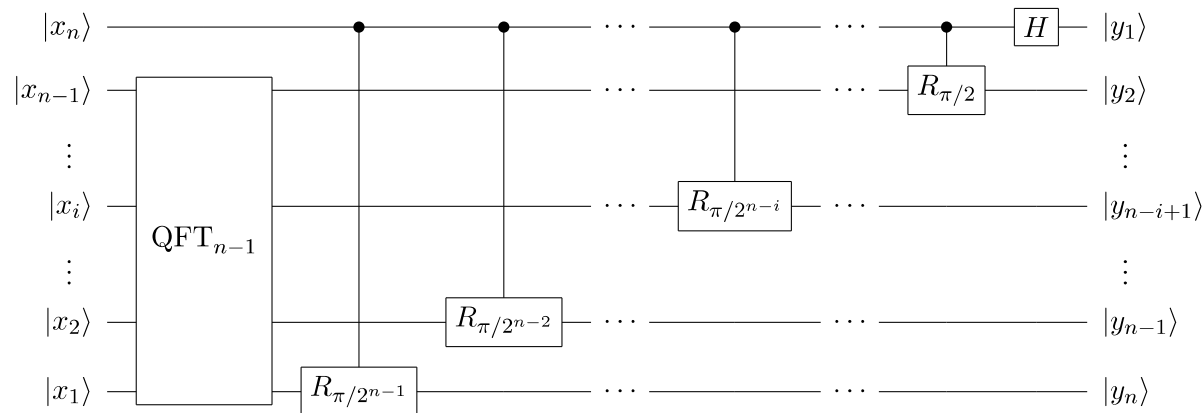
Protocolos de comunicación cuántica

Protocolo BB84

Bases	0	1
+	↑	→
X	↗	↘

Bits aleatorios de Alice	0	1	1	0	1	0	0	1
Bases de Alice	+	+	X	+	X	X	X	+
Fotones enviados por Alice	↑	→	↘	↑	↘	↗	↗	→
Bases aleatorias con las que mide Bob	+	X	X	X	+	X	+	+
Mediciones de Bob	↑	↗	↘	↗	→	↗	→	→
INTERCAMBIO PUBLICO DE BASES								
Clave secreta compartida	0		1			0		1

Transformada cuántica de Fourier



Puerta de Hadamard

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

el estado base $|0\rangle$ a $\frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}$ y el $|1\rangle$ a $\frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}}$

Puerta de fase

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\theta} \end{bmatrix}$$

el estado base $|0\rangle$ intacto y asignan el $|1\rangle$ a $e^{i\theta}|1\rangle$.

Algoritmo de Shor

- Elegir a aleatoriamente entre 0 y $N-1$, si $\text{mcd}(a,N) \neq 1$ fin
- Determinar el periodo T de la función $f(x) = a^x \bmod N$. (Usamos la transformada cuántica de Fourier).
- Si T es impar ir al paso 1.
- Si $\text{mcd}(a^{T/2}+1,N) \neq N$ fin, en otro caso ir al paso 1.