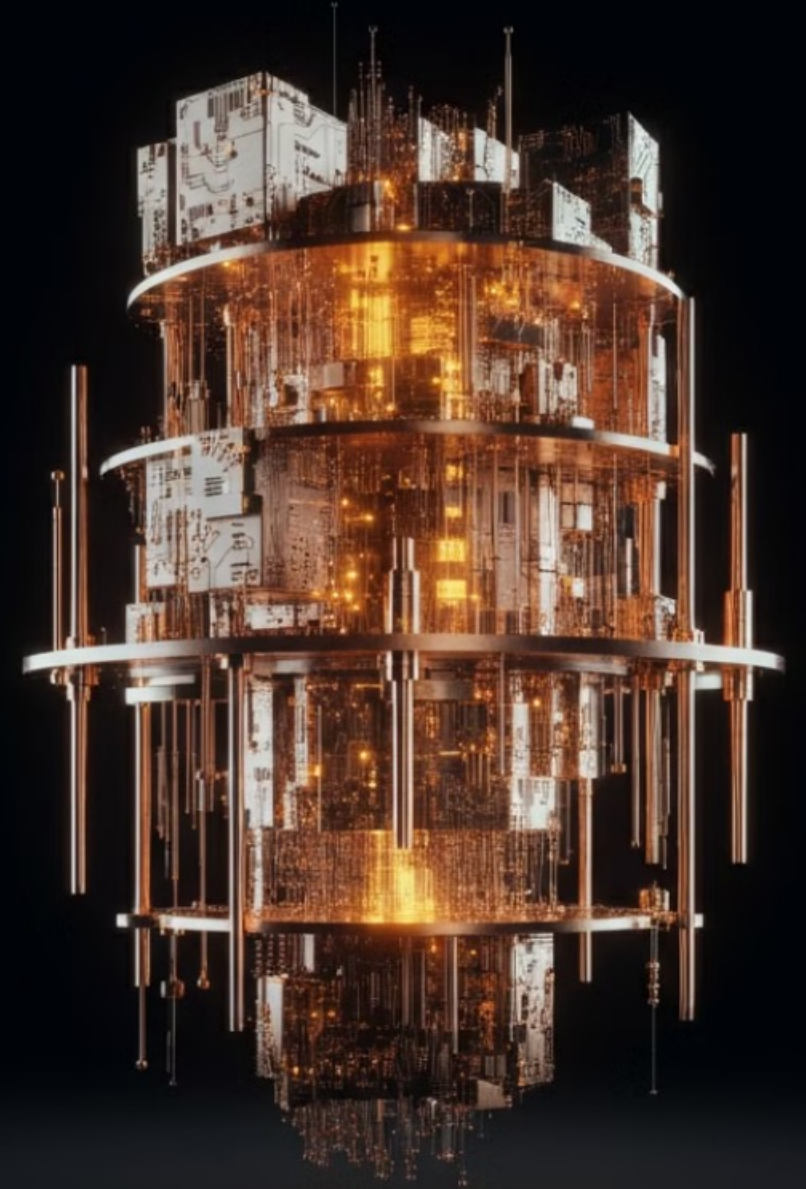


Hardware para Tecnologías Cuánticas

Pablo Solano

Universidad de Concepción



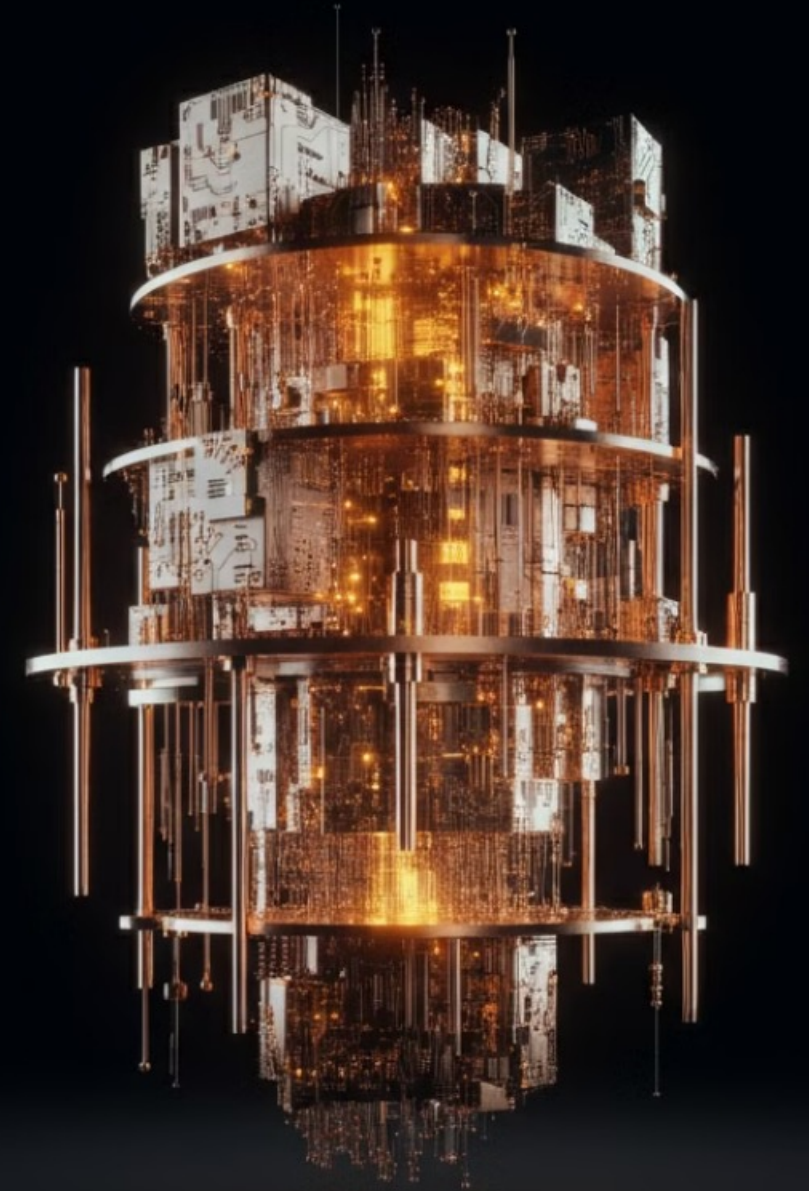
Hardware para Tecnologías Cuánticas

PARTE I: Definiciones y conceptos fundamentales

PARTE II: Implementaciones físicas de qubits

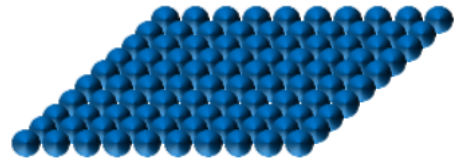
Pablo Solano

Universidad de Concepción

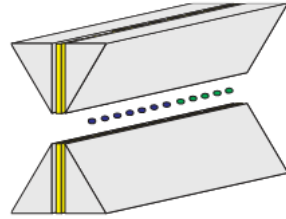


Lo que esperan aprender:

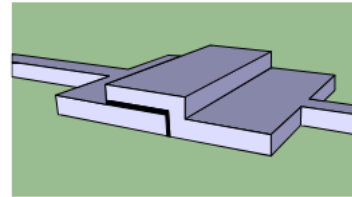
atoms



cold atoms

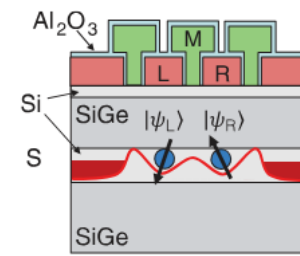


trapped ions

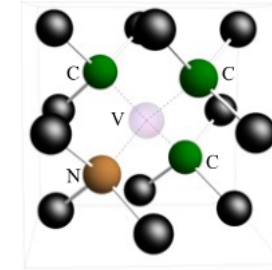


superconducting

electrons superconducting & spins

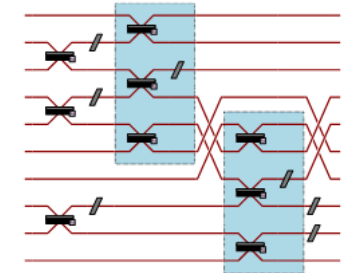


silicon



NV centers

photons



photons

Lo que les debo enseñar primero:



La información es física

Se necesitan sistemas físicos para:

- | | | | |
|---|---|---|---|
| 1 | Extraer Información
Regla, termómetro, reloj... | 2 | Almacenar Información
Libros, discos de vinilo,
discos duros... |
| 3 | Manipular Información
Ábaco, regla de cálculo... | 4 | Transmitir Información
Parlante, faro, telégrafo... |

A estos objetos físicos que hacen algunas de estas tareas se les llama coloquialmente *Hardware*.





¿Qué es un sistema cuántico?

Un sistema con **energía discreta**.

Ejemplo: fotones, fonones, espín, niveles electrónicos...

Presenta propiedades cuánticas como **superposición y entrelazamiento**.

Diferencia entre descripción clásica y cuántica

Comparación

Una pelotita vs. un electrón.

Información

El estado cuántico contiene más información que un estado clásico equivalente.

¿Qué son las tecnologías cuánticas?

Tecnologías que usan las propiedades cuánticas de un sistema para **extraer**, **almacenar**, **manipular** o **transmitir** información.

Categorías de tecnologías cuánticas



Metrología cuántica

Extracción de información con mayor precisión.



Computación cuántica

Cálculos más complejos.



Memorias cuánticas

Almacenamiento de más información.



Comunicaciones cuánticas

Comunicaciones seguras.





Perspectivas y madurez actual

Aplicaciones de tecnologías cuánticas se encuentran en etapas tempranas de Desarrollo (salvo metrología)

El impacto real que tendrán en la vida cotidiana aún es incierto.

Representación de la Información

La información puede ser representada de forma **análoga** o **digital**.

La **información análoga** utiliza valores continuos, como un disco de vinilo transmitido por la radio.

La **información digital** utiliza ceros y unos, como un podcast en el celular.

*En el contexto de este curso nos enfocaremos en la información digital y su contraparte cuántica. Sin embargo, deben saber que existen versiones de información análoga para todos los temas que abordaremos



El bit

Unidad mínima

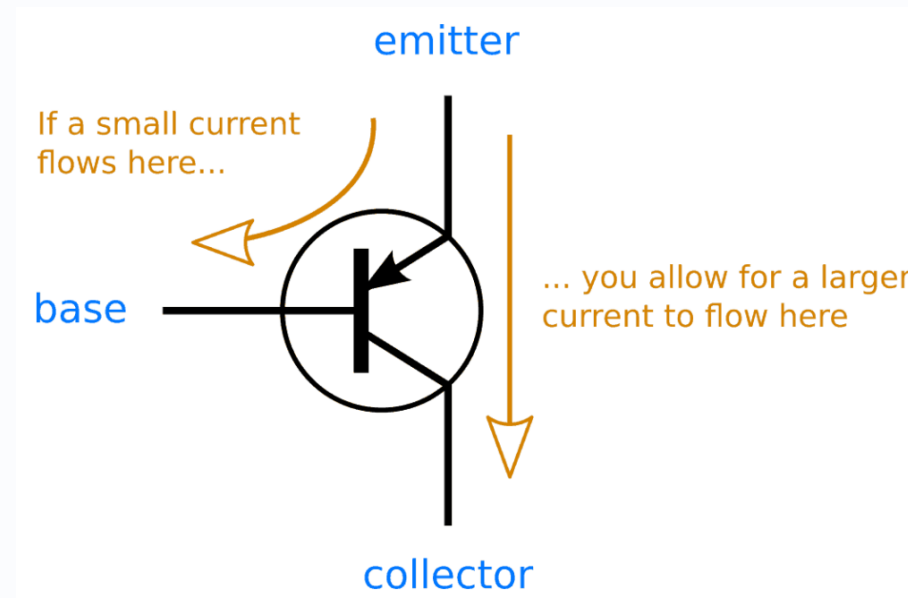
Unidad mínima de información digital, representada por 0 o 1.

Era digital

La era digital ha transformado la forma en que almacenamos, procesamos y transmitimos información.

Manipulación de bits

Voltajes y corrientes



Transistores

Moore's Law: The number of transistors on microchips has doubled every two years

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 for other aspects of technological progress in computing – such as processing speed or the price of computers.

Transistor count

50,000,000,000

10,000,000,000

5,000,000,000

1,000,000,000

500,000,000

100,000,000

50,000,000

10,000,000

5,000,000

1,000,000

500,000

100,000

50,000

10,000

5,000

1,000



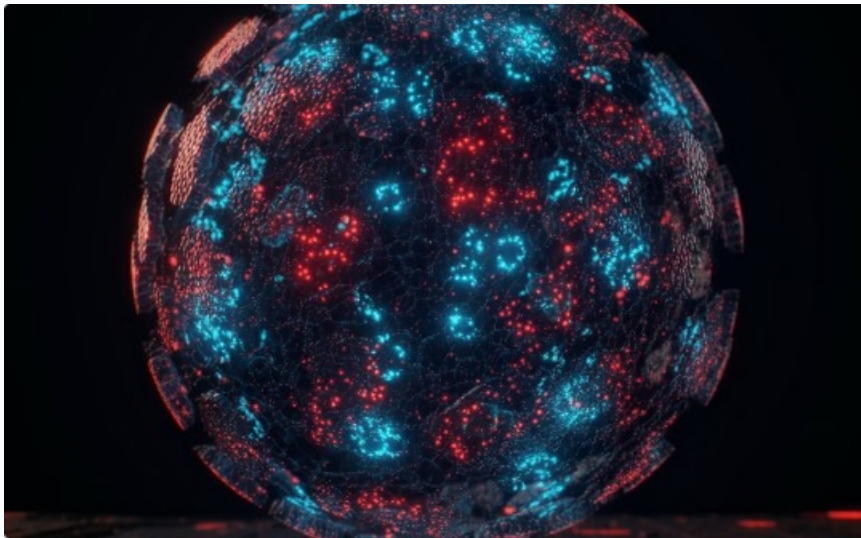
2 nm
(45 nm)

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

OurWorldinData.org – Research and data to make progress against the world's largest problems.

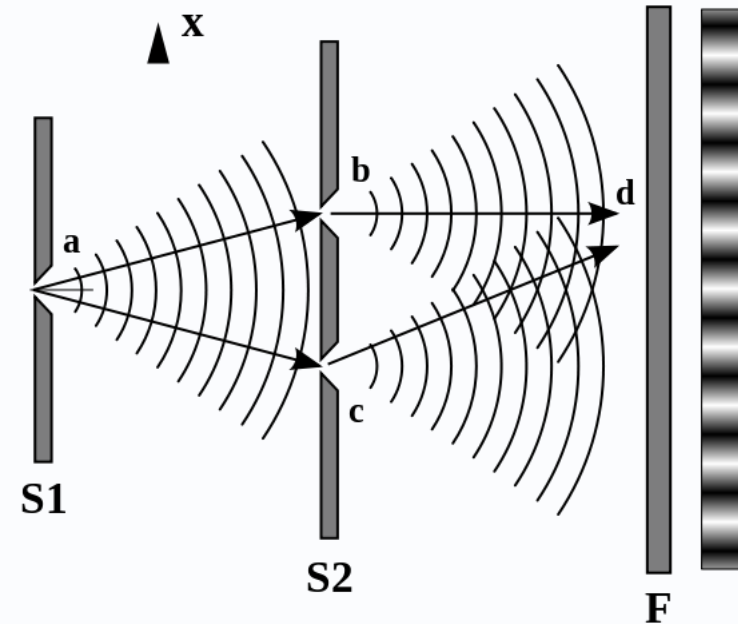
Licensed under CC-BY by the authors Hannah Ritchie and Max Roser.

El qubit (contraparte cuántica del bit)



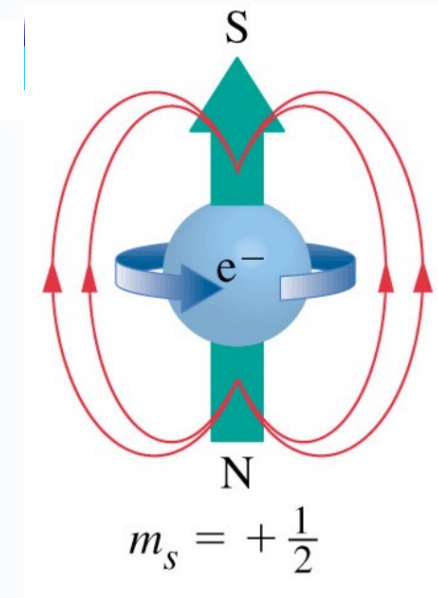
Superposición

El qubit puede estar en superposición de 0 y 1, a diferencia del bit clásico.



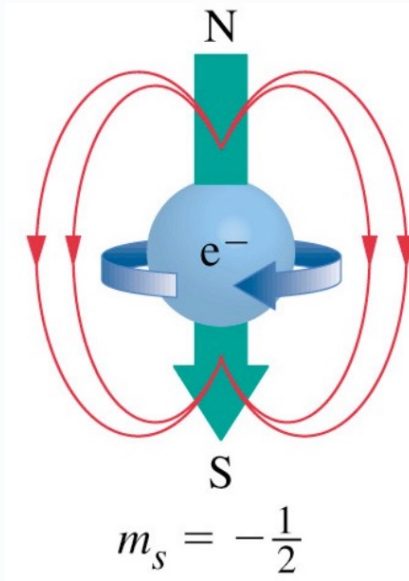
Ejemplo: Doble Rendija

El experimento de la doble rendija ilustra la superposición cuántica.



Ejemplo: Spin

El momento dipolar magnético de un electron ilustra la superposición cuántica.



El qubit: Herramientas matemáticas

$$|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$|\psi\rangle = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) |0\rangle + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) e^{i\varphi} |1\rangle$$

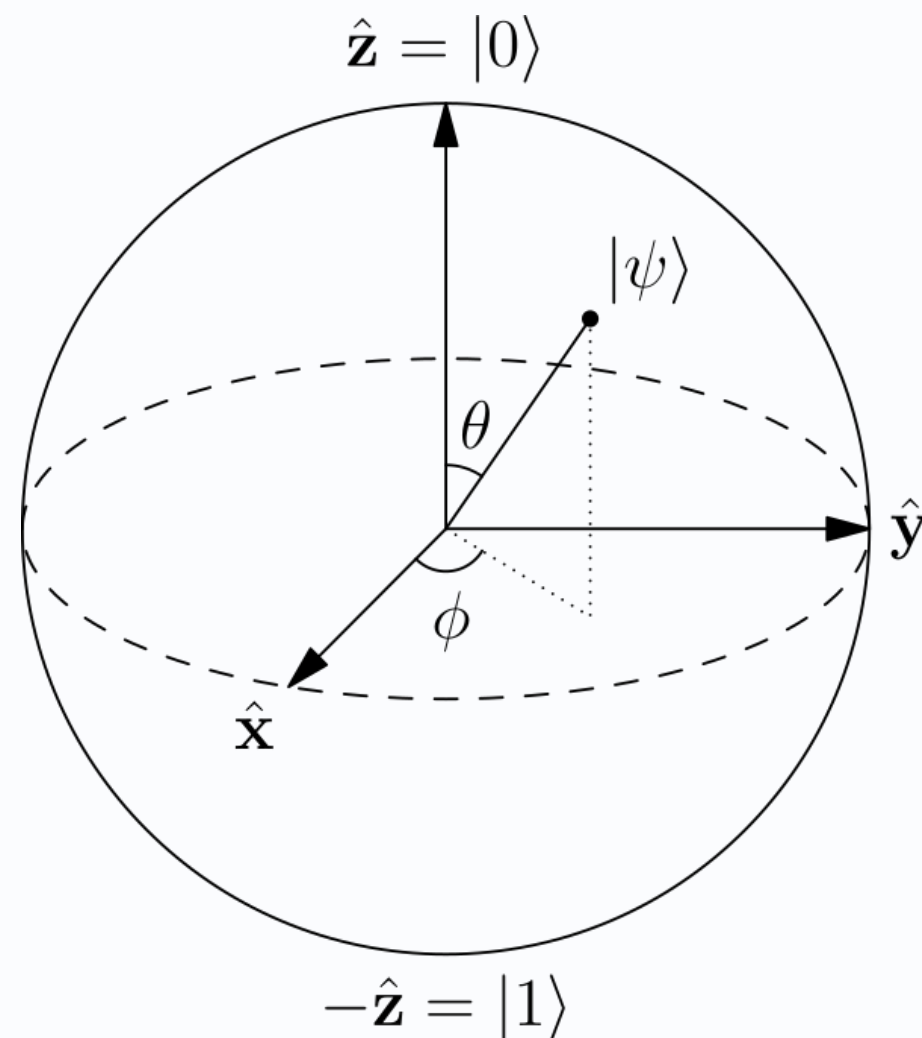
Pueden ser complejos

Amplitud

Fase

Necesitamos solo dos parámetros para representar el estado de un qubit (amplitud y fase)

Esfera de Bloch



Manipulación de un qubit

La manipulación de qubits de materia se realiza mediante campos externos (campos eléctricos, magnéticos, sonido, etc).

Amplitud

Modificada por campos externos (interacción resonante).

Fase

Modificada por diferencias de energía entre los estados del qubit.

$$|\Psi(t)\rangle = e^{-i\hat{H}t/\hbar} |\Psi(0)\rangle$$

Oscilación de Rabi

Cambio periódico de la amplitud de un qubit.

Oscilación de Ramsey

Cambio periódico de la fase de un qubit.

En computación cuántica estas manipulaciones de qubits reciben nombres como operadores de Pauli σ_x , σ_y , σ_z , compuertas de fase,...

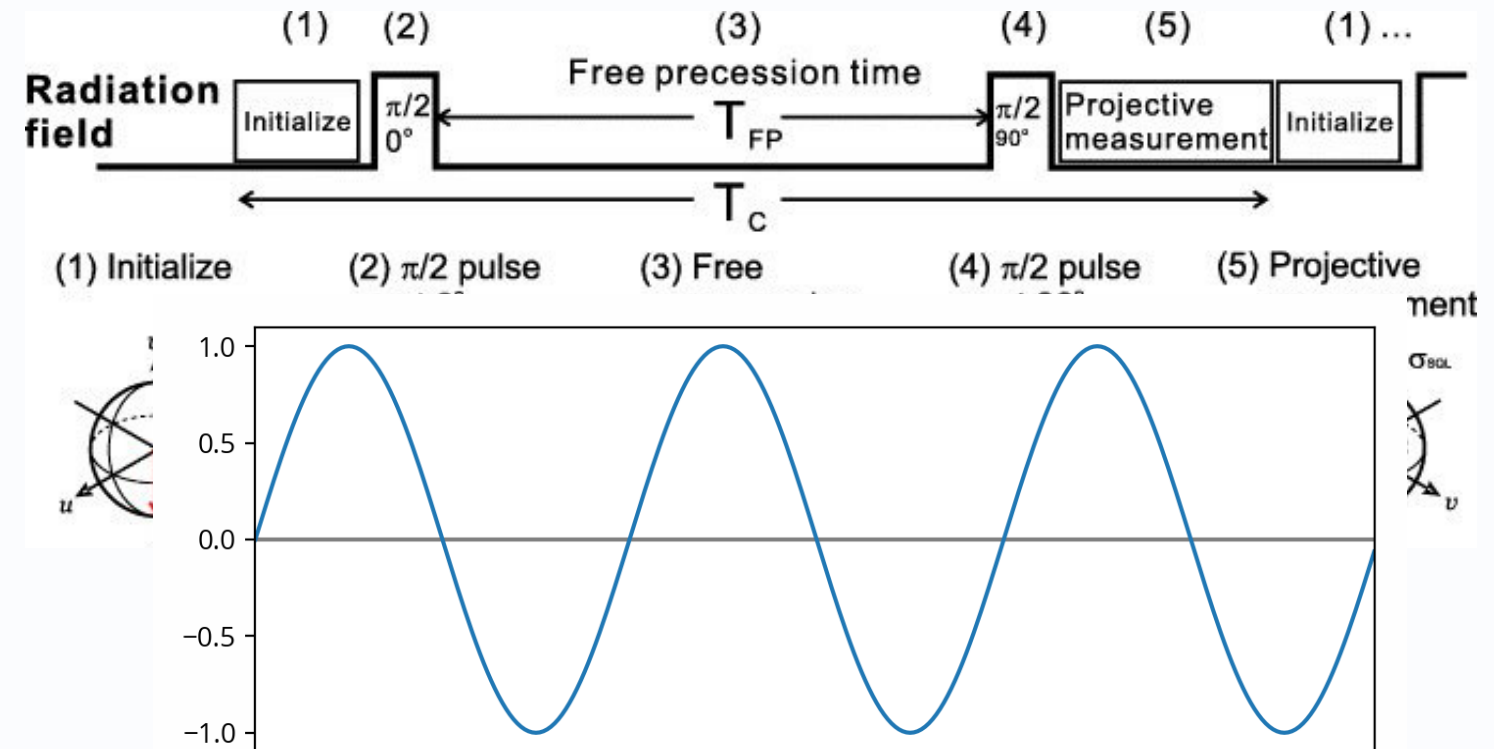
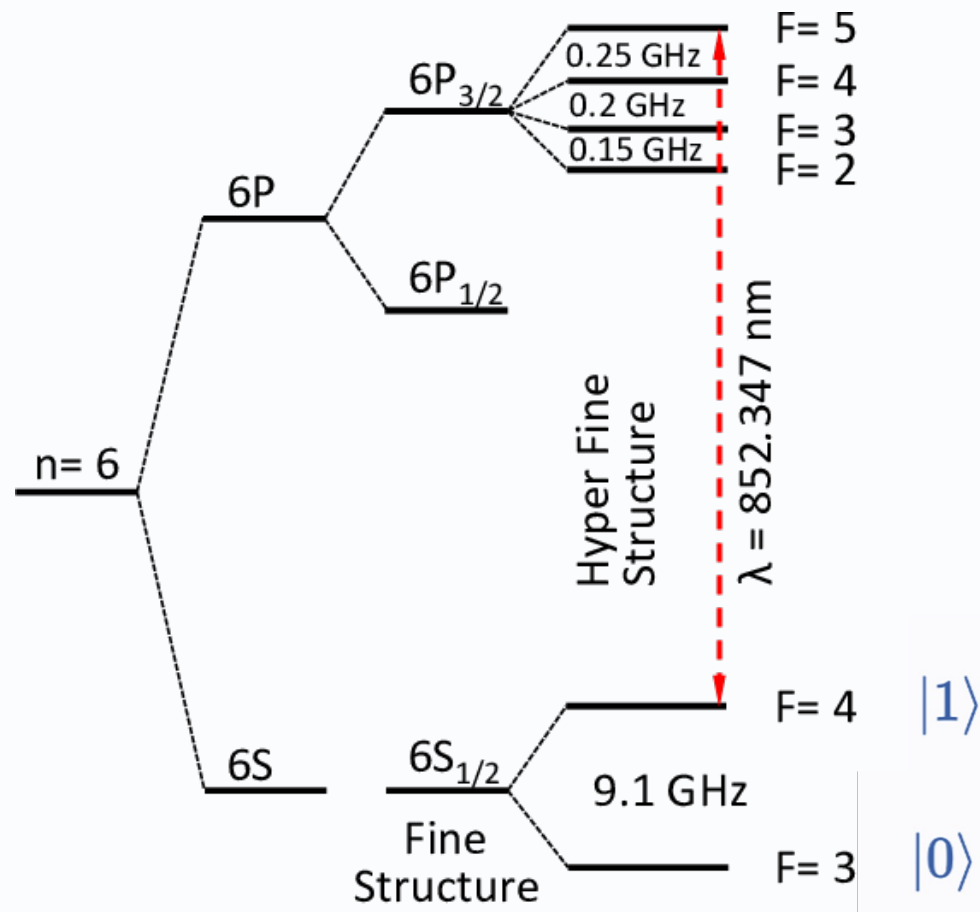


Ejemplo concreto (Reloj atómico)

Qubit vs Bit

Es fácil imaginar un qubit reemplazando bits en almacenamiento, procesamiento y transmisión. Pero la **extracción de información** con un qubit puede ser menos intuitiva.

Reloj atómico

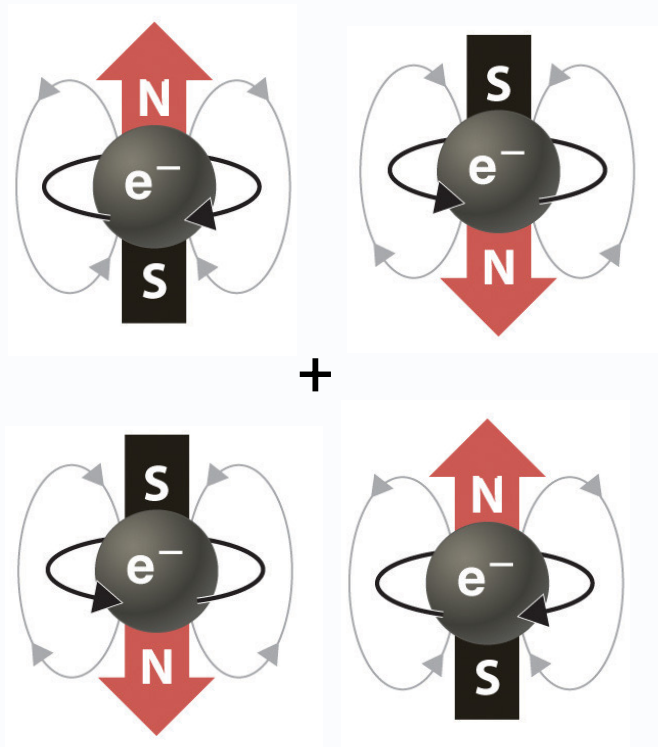


Un átomo de cesio en superposición de dos niveles hiperfinos define el segundo (9,192,631,770 Hz).

¿Cómo manipular más de un qubit? (entrelazamiento)

Cuando un qubit en superposición interactúa con otro, generan estados altamente correlacionados.

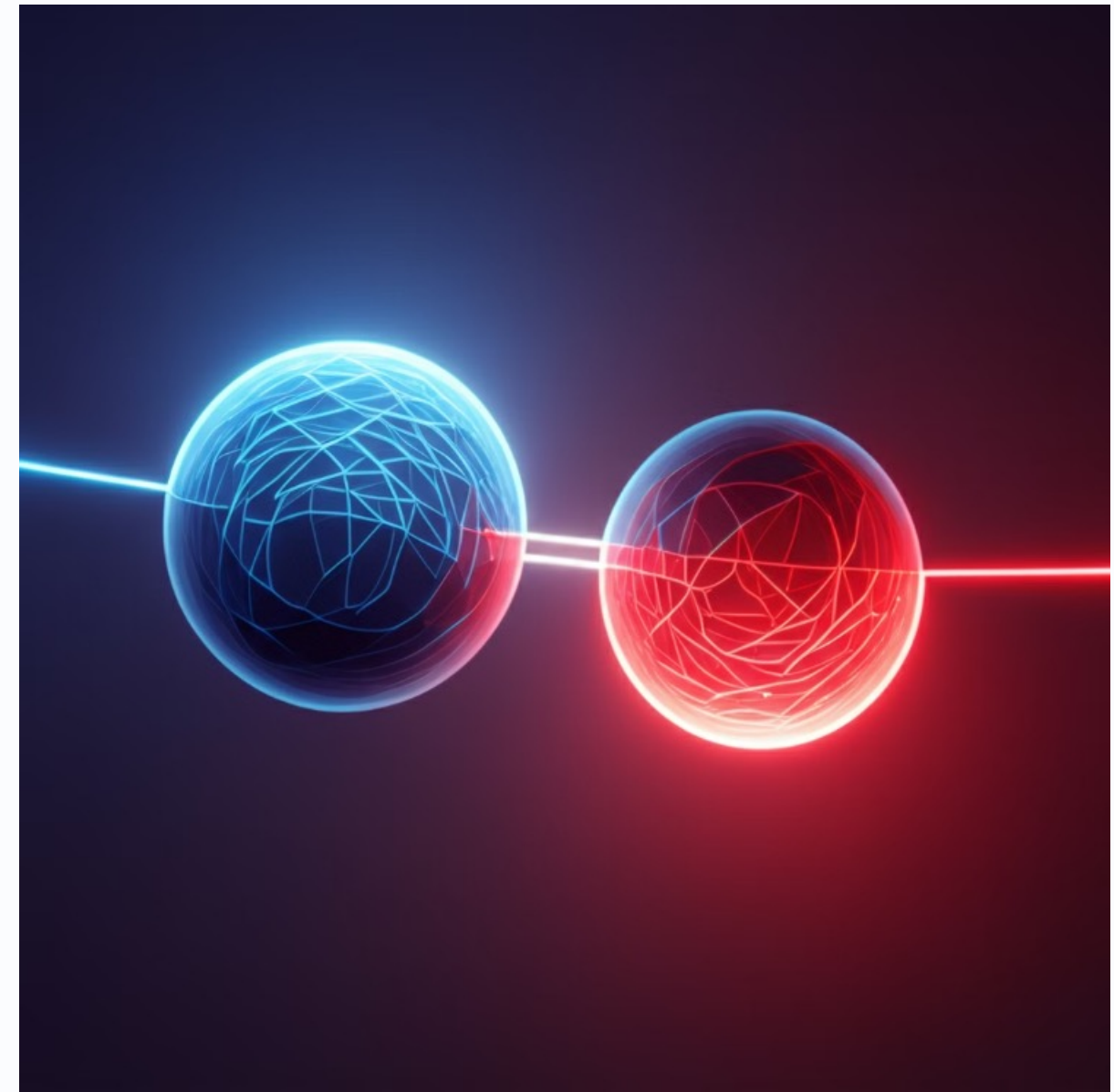
Interacción de spines



Compuertas de entrelazamiento
u operaciones no locales

Equivalente a los transistores
Para los bits

Qubits de materia no interactúan entre ellos directamente, necesitan de **campos que medien las interacciones** (eléctricos, magnéticos, sonido, etc).



¿Por qué es tan difícil controlar qubits?



Errores de manipulación

A diferencia de bits (0 o 1 fijos), el qubit tiene un continuo de valores; errores se acumulan.



Necesidad de alta fidelidad.

Decoherencia

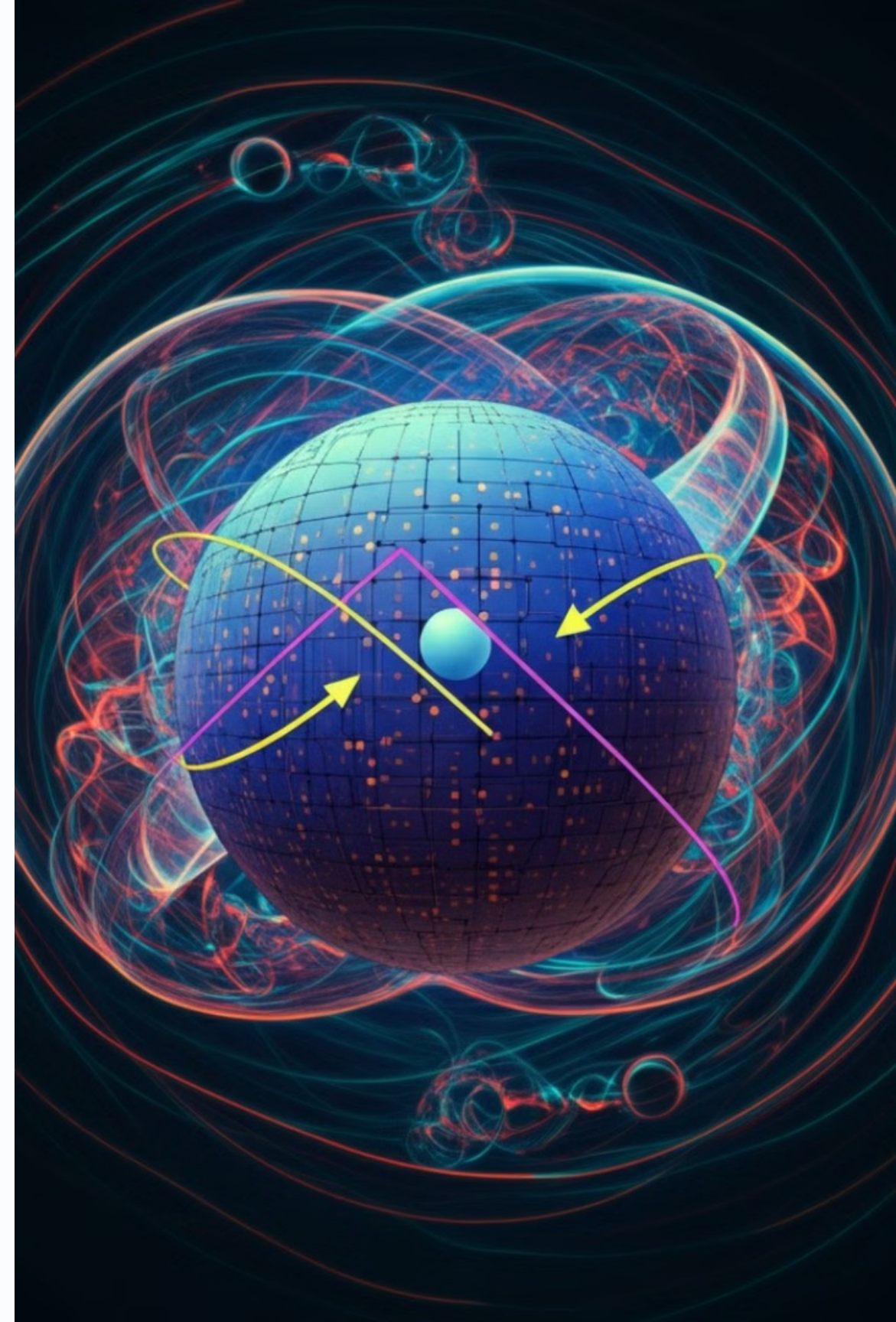


Los errores de decoherencia surgen por cómo los qubits interactúan con su entorno. Estos pueden ser errores de decaimiento o de desfaseamiento.

- Los errores de decaimiento se ven como un cambio en la amplitud del qubit y surgen porque el qubit puede transferir energía al ambiente.
- Los errores de desfaseamiento se ven como un cambio aleatorio en la fase del qubit y surgen porque las fluctuaciones del ambiente pueden hacer fluctuar el qubit.



Necesidad de corrección de errores.



¿Cómo medir un qubit?

1

Medida destructiva

Colapsa el estado a 0 o 1 con cierta probabilidad.

Reconstrucción del estado

Se necesitan múltiples mediciones para reconstruir el estado cuántico del qubit.

2

Medida no destructiva

Un sistema auxiliar extrae información del qubit.

Reconstrucción del estado

Se necesitan muchos sistemas auxiliares para obtener información suficiente.

.



¿Qué puede malir sal?

- 1 Error de inicialización
- 2 Error de compuertas de 1 qubit
- 3 Error de compuertas de 2 qubit
- 4 Error por no hacer nada (idle qubit)
- 5 Error de detección

