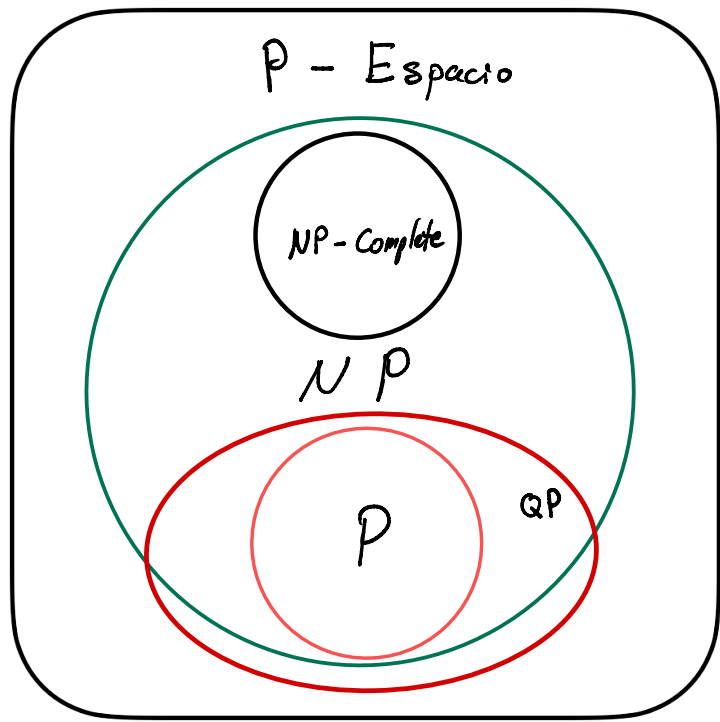


# Computación Cuántica: oportunidades y perspectivas

Dr. Antonio Hernández-Garduño

ITAM - septiembre 2021

# Complejidad y Computación Cuántica



# Potencial Impacto de la C. Cuántica



## PHARMACEUTICALS

Improve the efficiency of early-phase drug design and discovery



## CHEMICALS

Accelerate development of new chemicals



## FINANCE

Reduce risk through improved portfolio insight



## AEROSPACE & DEFENSE

Develop new aircraft materials and military technology



## OIL & GAS

Optimize production and expedite exploration



## DATA CENTER

Accelerate machine learning and analysis of large data sets.



## MANUFACTURING

Gain visibility into design and production limitations

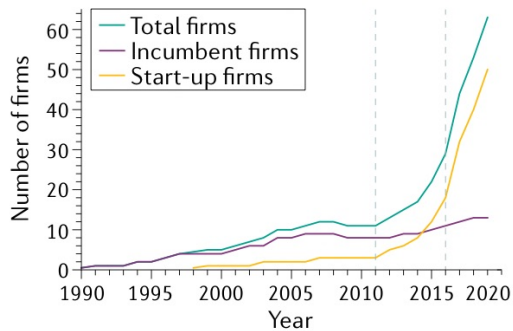


## TELECOMMUNICATION

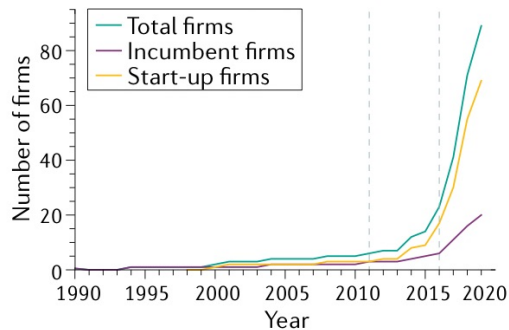
Optimize antenna efficiency and bandwidth utilization

# Tendencias comerciales de la C. Cuántica

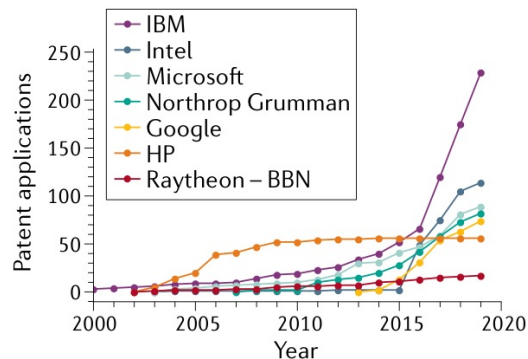
**a Hardware focused**



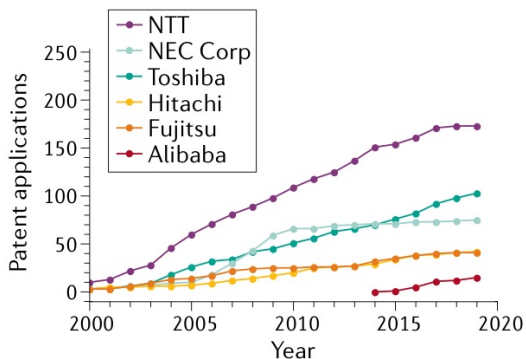
**b Software focused**



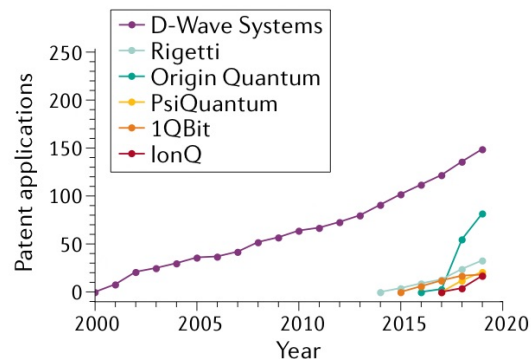
**c North American incumbents**



**d Asian incumbents**



**e Start-up firms**



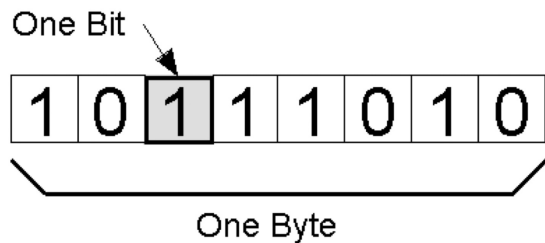


¿Qué es la

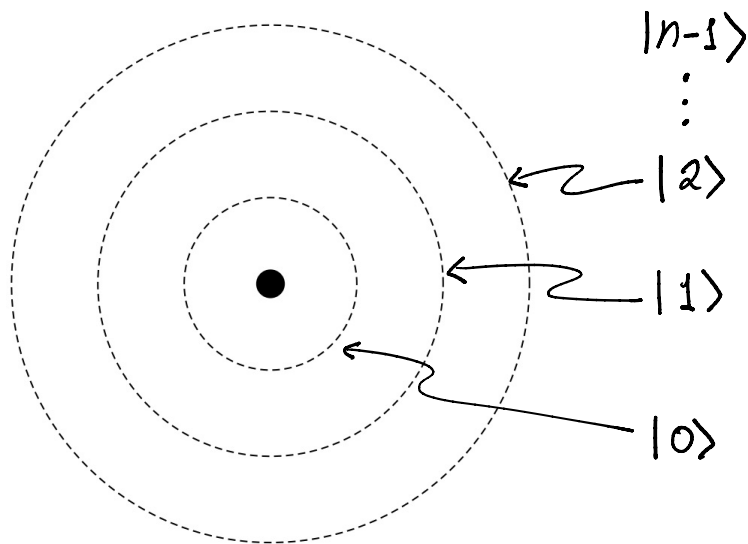
Computación Cuántica?

# Informática Cuántica

## Bit



## Qudit



Caso  $n=2$ : "Qubit"

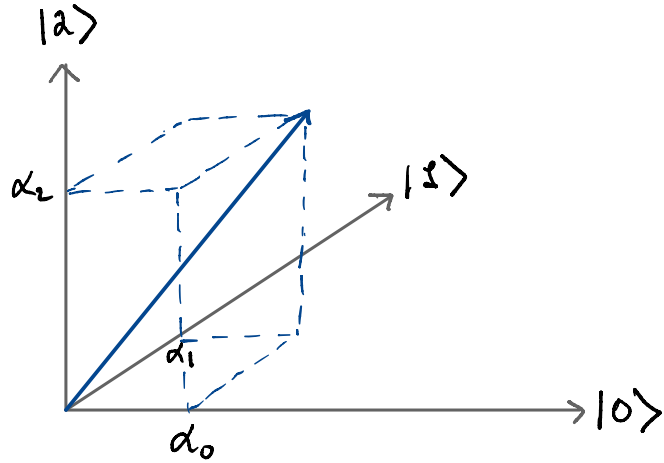
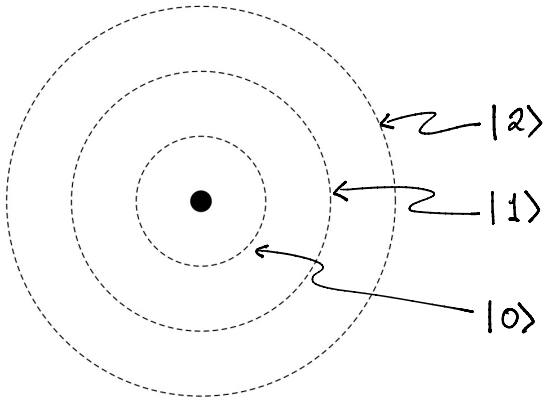
# Manipulación de la información

usando principios cuánticos

Supremacía  
cuántica

- Superposición
- Entrelazamiento
- Reversibilidad
- Medición

# Superposición



$$\text{Estado: } |\psi\rangle = \alpha_0 |0\rangle + \alpha_1 |1\rangle + \alpha_2 |2\rangle$$

$$\alpha_k \in \mathbb{C}, \quad k=0, 1, 2$$

# Amplitudes de Probabilidad y Medición

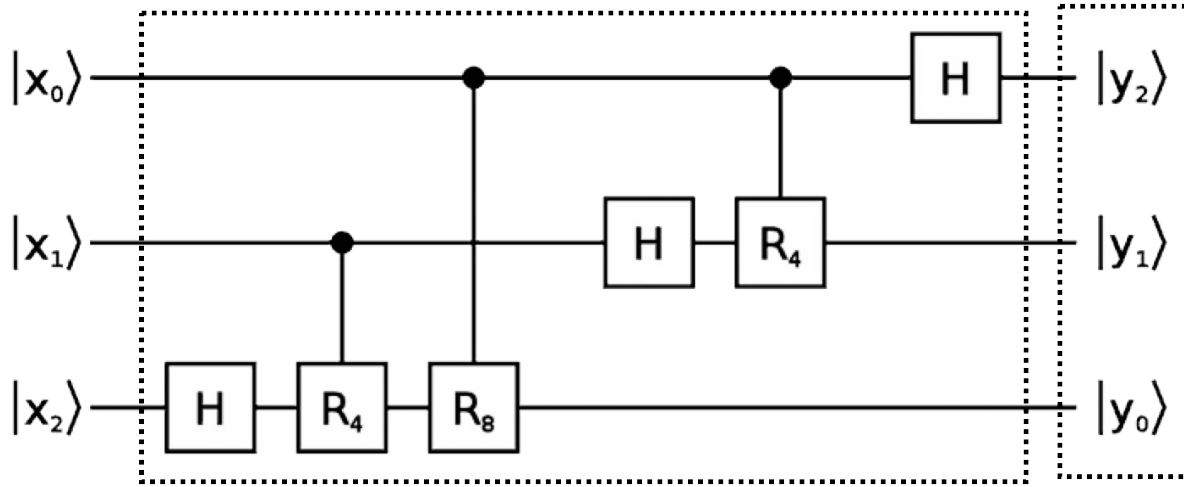
$$|\psi\rangle = \alpha_0 |0\rangle + \alpha_1 |1\rangle + \alpha_2 |2\rangle$$

"amplitudes de probabilidad"

$$\left( \begin{array}{l} \text{Probabilidad de } \underline{\text{observar}} \text{ el sistema} \\ \text{en el estado } |k\rangle \end{array} \right) = |\alpha_k|^2$$

Después de la medición:  $|\psi\rangle \xrightarrow{\uparrow \text{"colapso"}} |k\rangle$ ,  $k=0, 1 \text{ ó } 2$ .

# Evolución del los Qubits

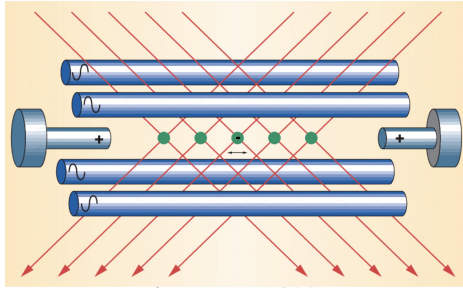


↑  
operador unitario  
(reversible)

↑  
medición  
(no-reversible)

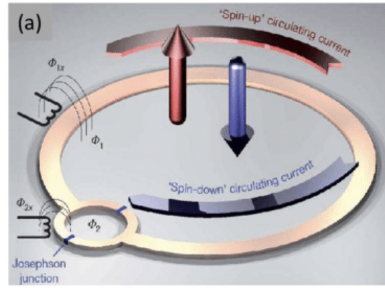
# Qubits : implementación física

Trampa de Iones



fuelle: DOI 10.1109/2.816267

Superconductores

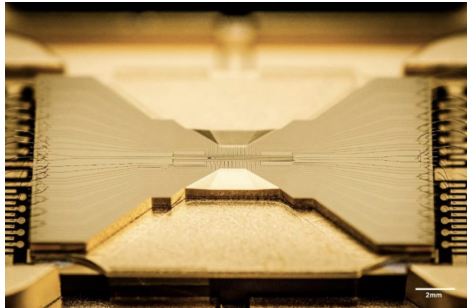


fuelle: arXiv:1204.2821v2

Fotones polarizados

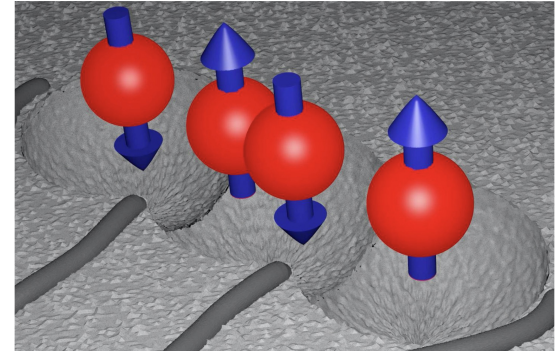


fuelle: Chao-Yang Lu, University of Science and Technology of China



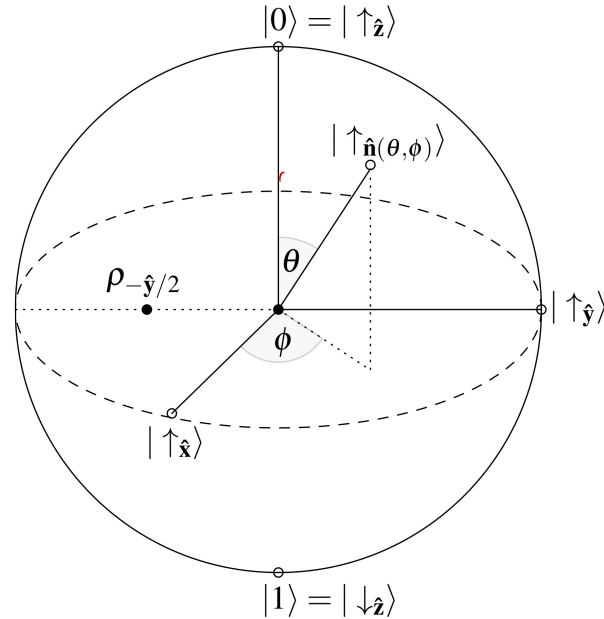
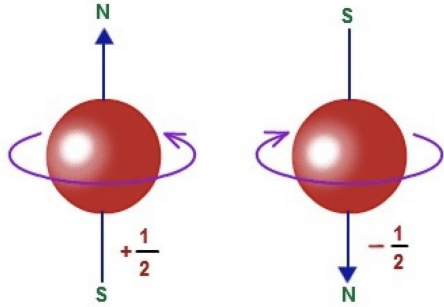
fuelle: Kai HUDEK, IONQ

Spin Qubit :



fuelle: Maximilian Russ/Guido Burkard

# Qubit: Visualización geométrica

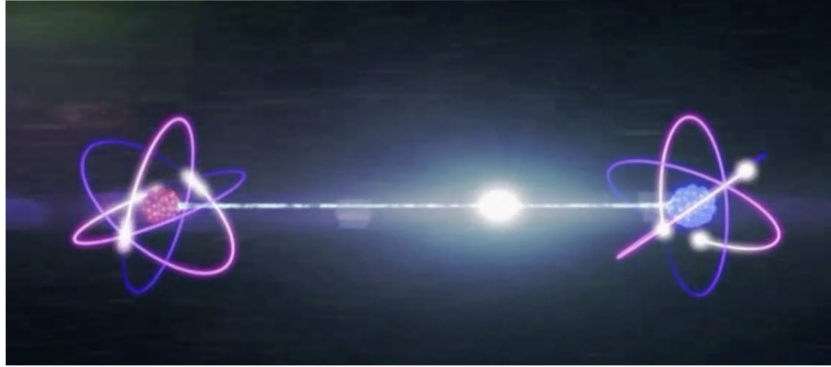


fuente: Scherer, W. Mathematics of Quantum Computing, Springer 2019



más de un qubit...

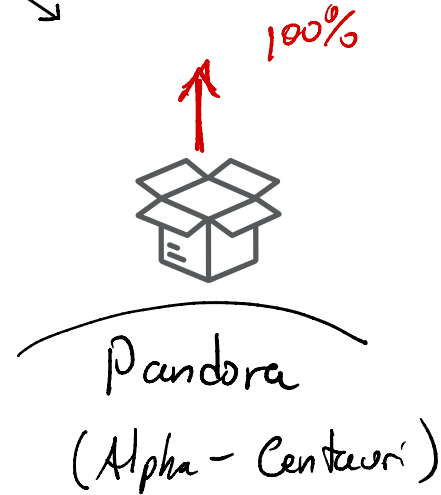
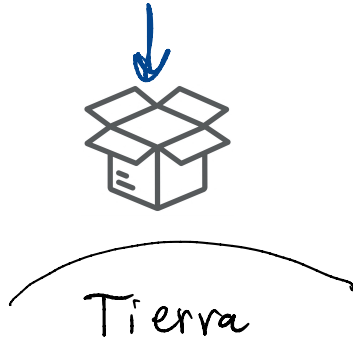
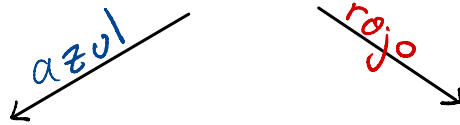
# Entrelazamiento

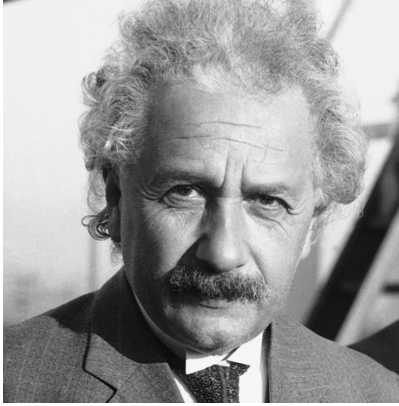


fuelle: [blogs.umass.edu](https://blogs.umass.edu)

**Entrelazamiento:** Dos sistemas están en un caso especial de superposición, llamado entrelazamiento (entanglement) si la medición de un sistema está correlacionado con el estado del otro sistema de una manera que es más fuerte que las correlaciones del mundo clásico. En otras palabras, los estados de los dos sistemas no son separables.

Ejemplo:  $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |\uparrow \downarrow\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |\downarrow \uparrow\rangle$





MAY 15, 1935

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 47

## Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received March 25, 1935)

In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality. A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty, without disturbing the system. In quantum mechanics in the case of two physical quantities described by non-commuting operators, the knowledge of one precludes the knowledge of the other. Then either (1) the description of reality given by the wave function in

quantum mechanics is not complete or (2) these two quantities cannot have simultaneous reality. Consideration of the problem of making predictions concerning a system on the basis of measurements made on another system that had previously interacted with it leads to the result that if (1) is false then (2) is also false. One is thus led to conclude that the description of reality as given by a wave function is not complete.

J. Bell  
(1964)



sin entrelazamiento:

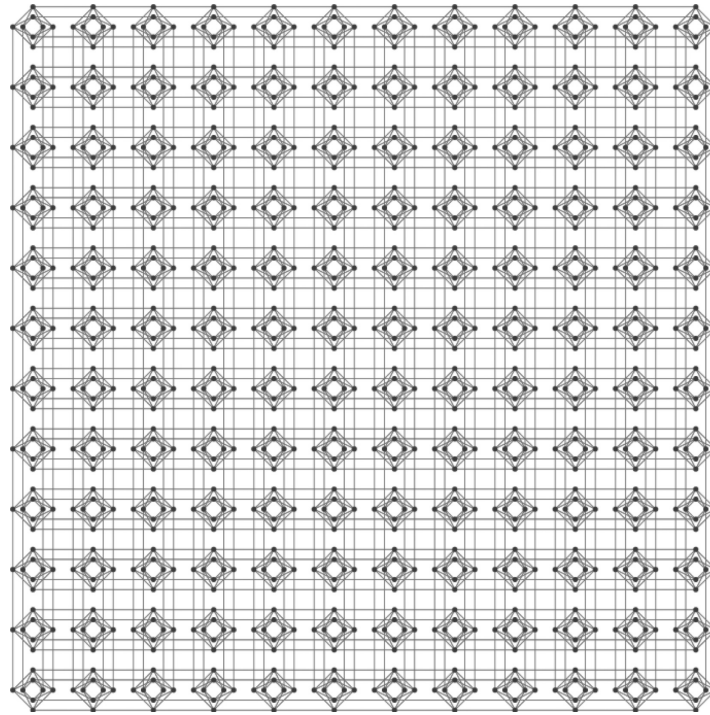
$$\begin{array}{ccccccc} |q_1\rangle & |q_2\rangle & |q_3\rangle & \dots & |q_N\rangle \\ \mathbb{C}^2 & \oplus & \mathbb{C}^2 & \oplus & \mathbb{C}^2 & \oplus \dots \oplus & \mathbb{C}^2 \end{array}$$

$$\dim(\mathcal{H}) = 2^N$$

con entrelazamiento:

$$\begin{array}{ccccccc} |q_1\rangle & |q_2\rangle & |q_3\rangle & \dots & |q_N\rangle \\ \mathbb{C}^2 & \otimes & \mathbb{C}^2 & \otimes & \mathbb{C}^2 & \otimes \dots \otimes & \mathbb{C}^2 \end{array}$$

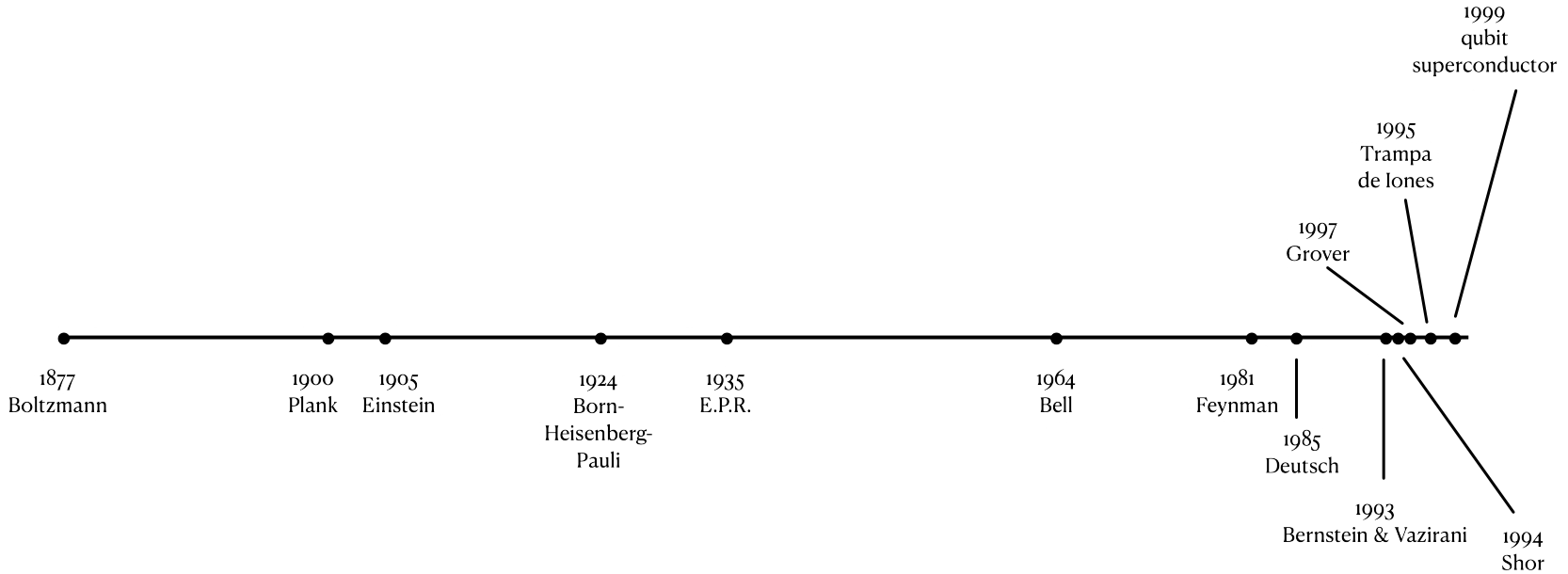
$$\dim(\mathcal{H}) = 2^N$$



fente: Georg Hahn

Información "cuántica" se guarda en las  
las correlaciones entre los qubits.

# Un poco de historia

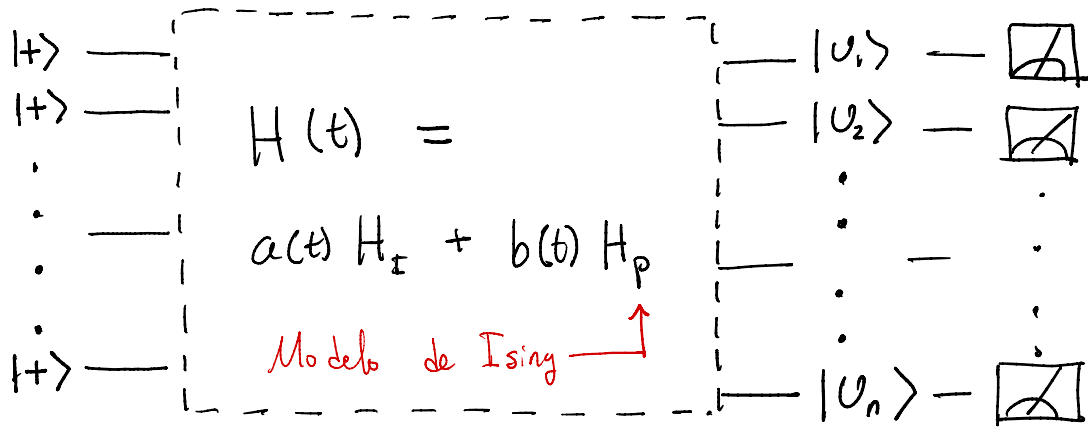


# Oportunidades

- Algoritmos cuánticos
- Optimización
- Impacto en negocios
- Laboratorio (óptica)



# Quantum Annealing



Hamiltoniano inicial:  $H_I = \sum_{i=1}^n \sigma_i^X$ ,

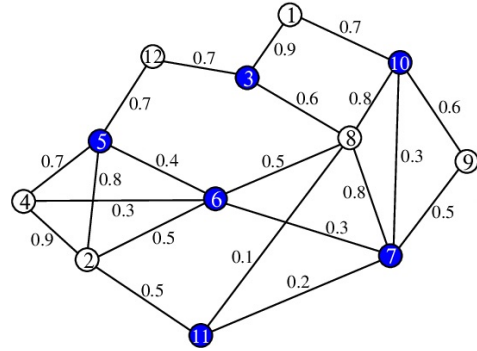
Hamiltoniano del problema:  $H_P = \sum_{i \in V} h_i \sigma_i^z + \sum_{(i,j) \in E} J_{ij} \sigma_i^z \otimes \sigma_j^z$

$a(t): 1 \rightarrow 0$ ,  $b(t): 0 \rightarrow 1$

# Modelo de Ising (QUBO)

Gráfica  $G = (V, E)$

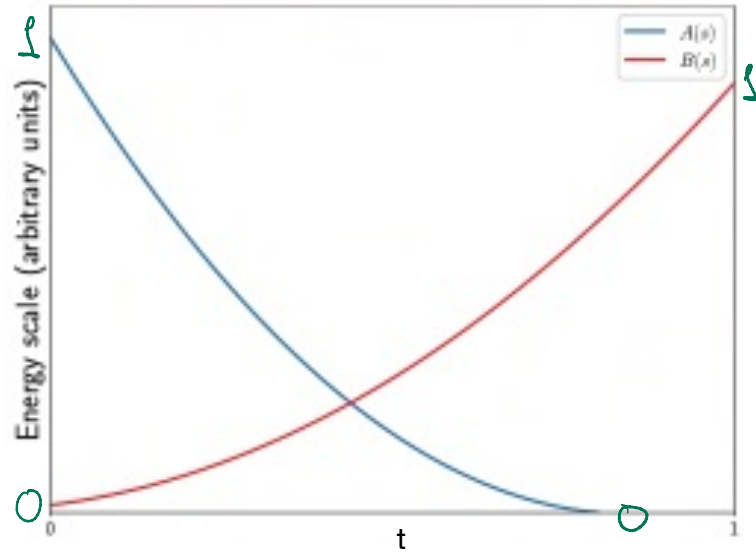
$$n = |V|$$

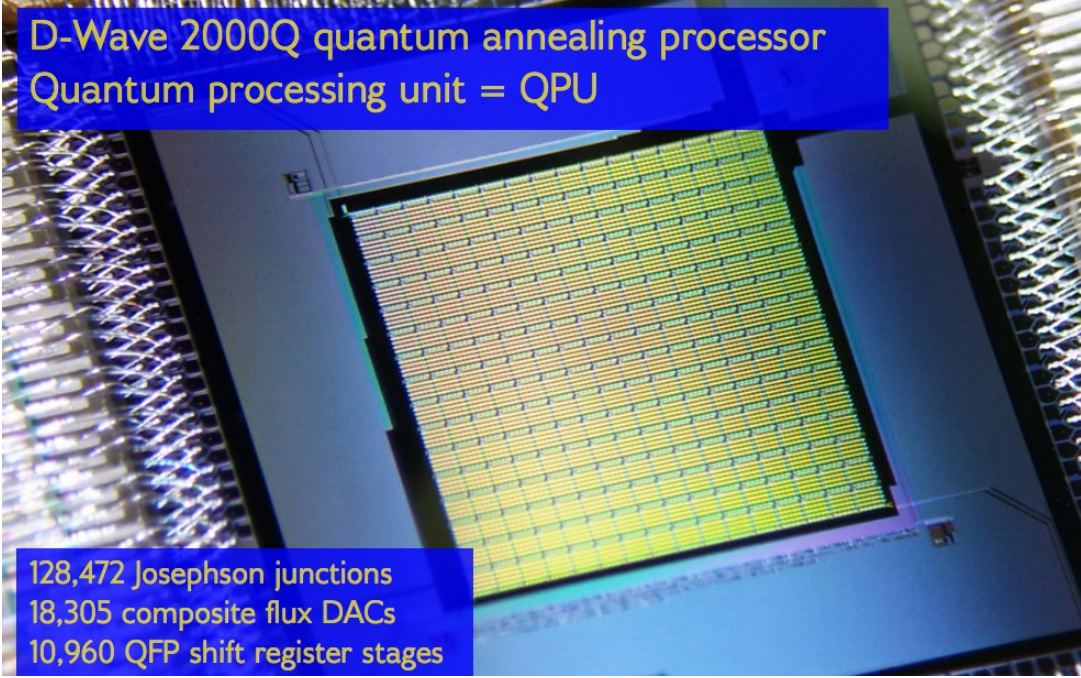


Problema: Encontrar el vector  $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $x_i \in \{\pm 1\}$ , tal que minimice la función de energía:

$$E(x) = \sum_{i \in V} h_i x_i + \sum_{i,j \in E} J_{ij} x_i x_j$$

# Evolución de coeficientes $a(t)$ , $b(t)$





D-Wave 2000Q quantum annealing processor  
Quantum processing unit = QPU

128,472 Josephson junctions  
18,305 composite flux DACs  
10,960 QFP shift register stages

# Ejemplo: repartición equitativa

Se tiene una colección  $S = \{n_1, n_2, \dots, n_N\}$   
de números positivos.

Problema: partir  $S$  en dos conjuntos "equilibrados".

$$S = R \cup (S \setminus R)$$

tal que 
$$\sum_{n_i \in R} n_i \approx \sum_{n_i \in (S \setminus R)} n_i$$

# Ejemplo: repartición equitativa

Se tiene una colección  $S = \{n_1, n_2, \dots, n_N\}$  de números positivos.

Problema: partir  $S$  en dos conjuntos "equilibrados".

$$S = R \cup (S \setminus R)$$

$$\text{tal que } \sum_{n_i \in R} n_i \approx \sum_{n_i \in (S \setminus R)} n_i$$

$$\text{Función de energía: } H = A \left( \sum_{i=1}^N n_i s_i \right)^2$$

$$\text{Quantum Annealing: } s_i \mapsto \sigma_i^z \quad \begin{array}{c} \uparrow \\ \oplus \\ \downarrow \end{array} \quad \begin{array}{c} \uparrow \\ \otimes \\ \downarrow \end{array}$$

# Oportunidades usando Quantum Annealing

Problemas de Partición	Problemas de empacamiento	Problemas con desigualdades	Problemas de coloreo	Ciclos Hamiltonianos	Problemas de árboles
Partición numérica	Cubierta exacta	Cubierta de conjuntos	Coloreo de gráficas	Generalización del "puente de Könisberg"	Árbol generador mínimo con constricción de grado máximo
Partición de gráficas	Empacamiento de conjuntos	Knapsack con pesos enteros	Cubierta de Clique	Vendedor viajero	Árboles de Steiner
Cliques	Cubrimiento de vértices		Secuenciación de trabajos		Conjunto de vértices con retroalimentación
	SAT				Conjunto de aristas con retroalimentación

Referencia: A. Lucas, Ising formulations of many NP problems, *Front Phys* 2 (2014)

# Quantum Lab ITAM

**Misión:** Ofrecer un espacio para la divulgación, aprendizaje, investigación y discusión de temas de computación cuántica, y su impacto en la sociedad y las empresas.

**Visión:** La computación cuántica promete ser una nueva plataforma de innovación que impactará el futuro tecnológico de la sociedad moderna. Las actividades de este laboratorio buscan que el ITAM esté a la vanguardia de esta revolución.





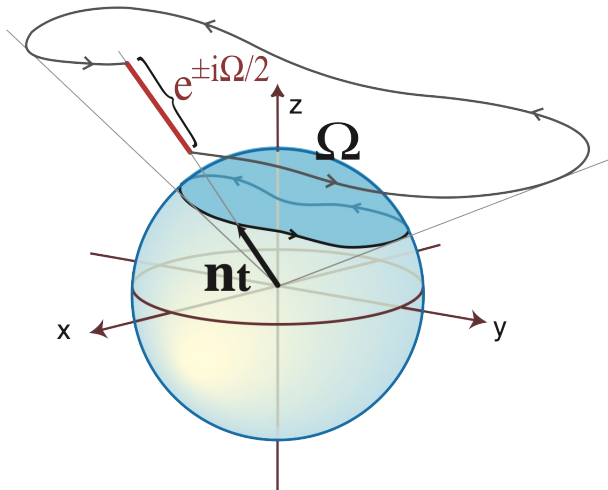
## **Proyectos (Semestre Otoño 2021)**

- Construcción de una trampa de iones
- Curso de Computación Cuántica en edX
- Curso de mecánica cuántica en edX
- Experimentos de polarización
- Implementación del algoritmo de Shor (Wolfram Language/Qiskit)
- Problemas de optimización
- Simulación de algoritmos cuánticos con QuESTlink
- Sistemas Operativos
- Traducción del Qiskit Textbook

## **Proyectos anteriores**

- Trampa de iones
- TaQu Fever (MIT iQuHACK)
- ITAMeet (qinder)
- Cursos en línea sobre álgebra lineal y computación cuántica

# Holonomic Quantum Computation



$$H(\lambda_t)|\Psi_n(\lambda_t)\rangle = \epsilon_n(\lambda_t)|\Psi_n(\lambda_t)\rangle$$

$$|\Psi(t_f)\rangle = e^{i\chi_\gamma}|\Psi(t_i)\rangle$$

$$\chi_\gamma = \oint_\gamma \langle\phi|d\phi\rangle = \iint_\Sigma \mathcal{F}d\sigma$$