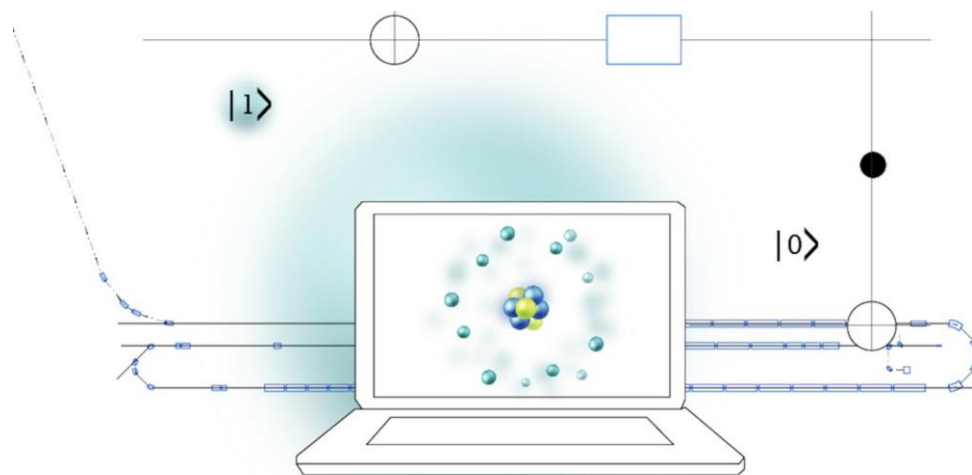


Ciência da Computação

CIC202 - Física e Modelagem Computacional

Introdução à Computação Quântica

Prof. Sandro Martini



Resumo

- 1. Introdução à mecânica quântica**
- 2. Conceito de estado**
- 3. Superposição**
- 4. Bits quânticos (qubits)**
- 5. Algoritmos quânticos**
- 6. Fabricantes**
- 7. Aplicações**
- 8. Conclusões**

Por que saber sobre Computação Quântica?

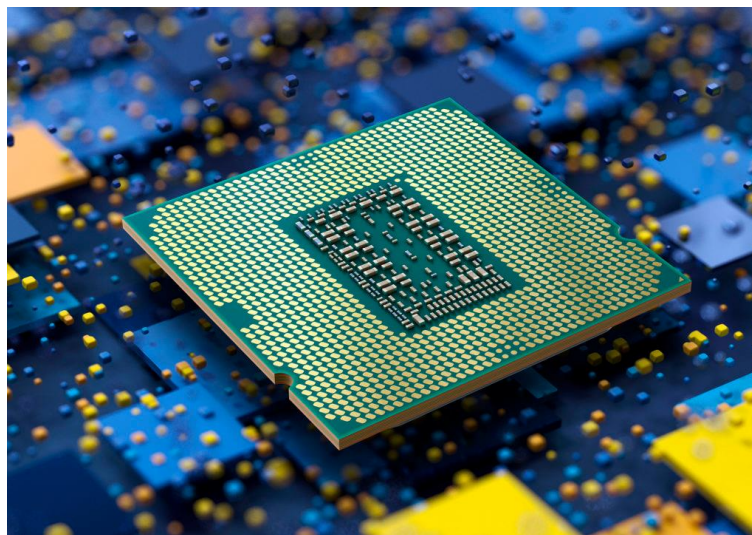
Não é uma especulação, mas uma realidade!



Entre um terço e metade de vocês estarão trabalhando, direta ou indiretamente, com computação quântica nos próximos 10 a 15 anos.

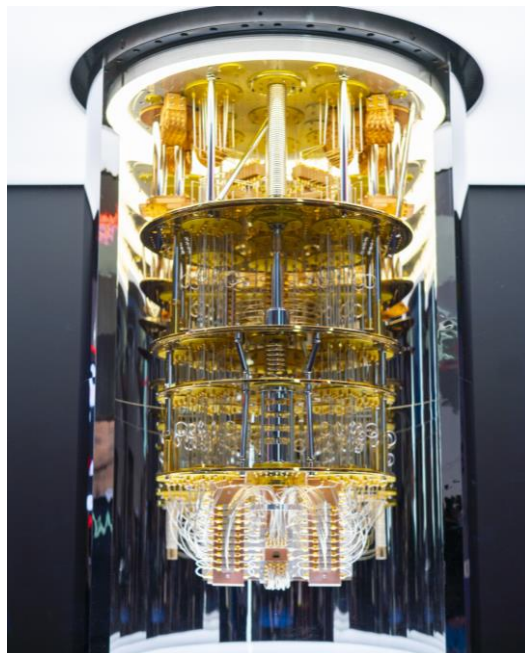
Computador Clássico

Um computador que utiliza **tensões e correntes** fluindo por **circuitos elétricos e lógicos**, que podem ser controlados e manipuladas inteiramente pela **Física Clássica**.



Computador Quântico

Um computador que utiliza as **leis da mecânica quântica** para realizar computação massivamente paralela através de **superposição, emaranhamento e decoerência**.



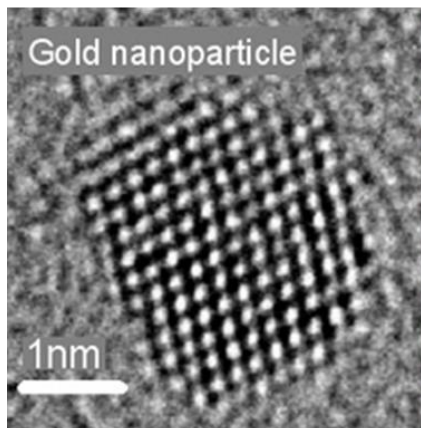
Introdução à Mecânica Quântica

Natureza: Uma questão de Escala!

$\sim 10^{-9} \text{ m}$

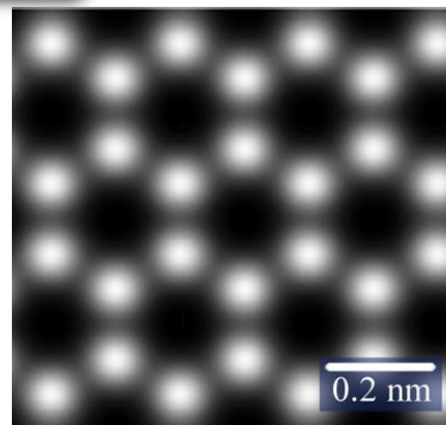
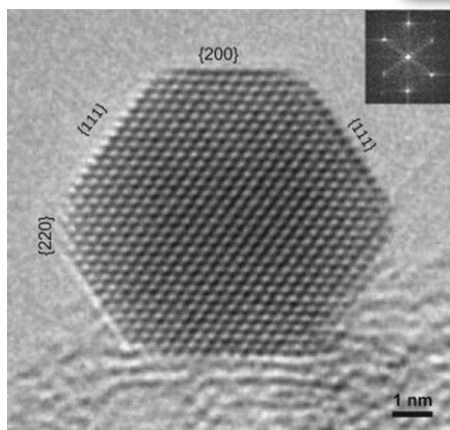
m

$\sim 10^{16} \text{ m}$



Introdução à Mecânica Quântica

Átomos



$\sim 10^{-9} \text{ m}$

A mecânica quântica é a teoria que descreve o comportamento de sistemas em nanoescala, como fótons, elétrons, átomos, moléculas, etc.

Introdução à Mecânica Quântica

Fenômenos “Estranhos”

- **Onda-Partícula**
- **Quantizado e não mais contínuo**
- **Probabilístico e não mais determinístico**
- **Princípio da Incerteza**
- **Tunelamento, Spins, etc....**

Introdução à Mecânica Quântica

"Não, você não será capaz de entender isso... Veja, meus estudantes de física também não entendem. **Isso porque eu também não entendo. Ninguém entende...** A teoria da eletrodinâmica quântica descreve a Natureza como absurda do ponto de vista do senso comum. E ela concorda totalmente com um experimento. **Então, espero que você possa aceitar a Natureza como ela é: absurda.**"

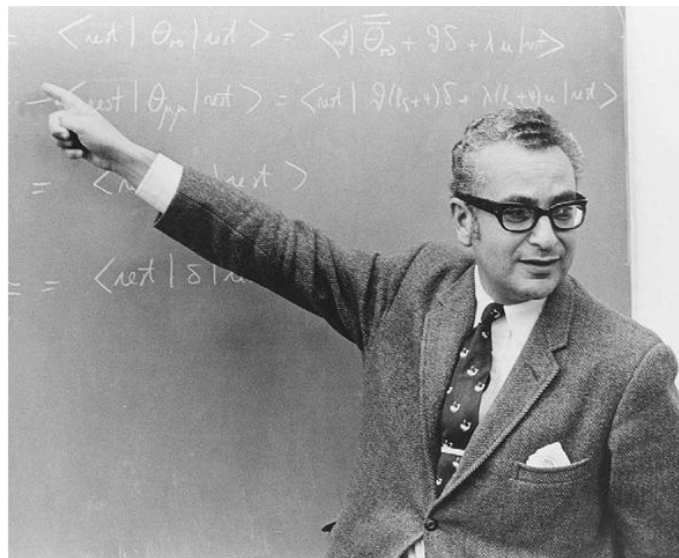
Richard Feynman
Prêmio Nobel de Física (1965)



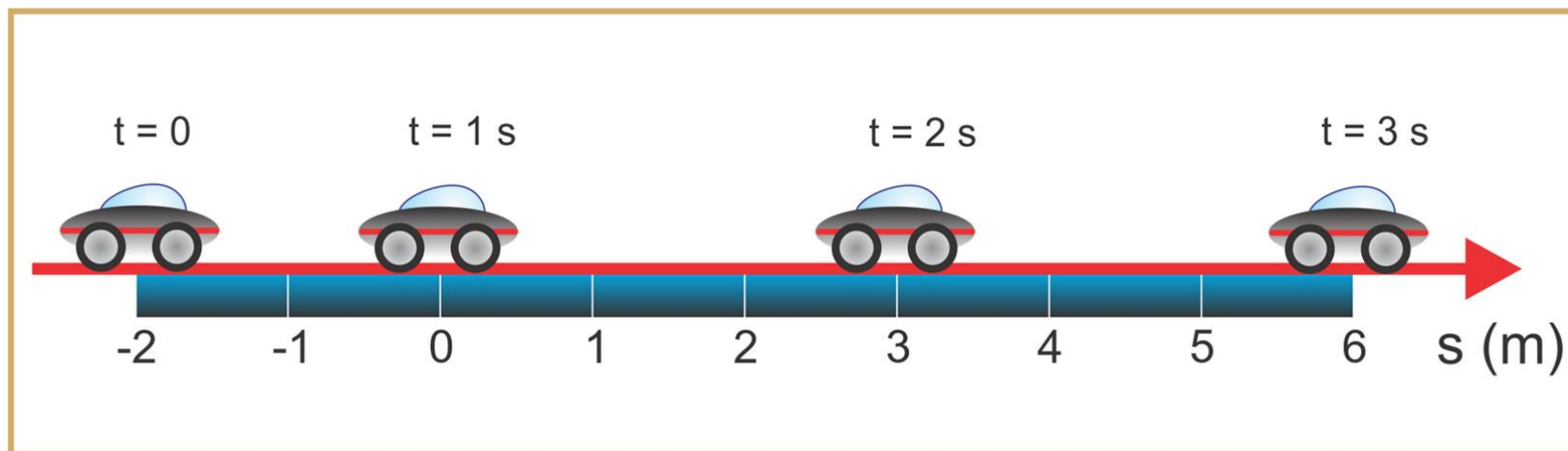
Introdução à Mecânica Quântica

"Mecânica quântica, aquela disciplina misteriosa e confusa, **da qual nenhum de nós realmente entende**, mas que **sabemos como utilizar**."

Murray Gell-Mann
Prêmio Nobel de Física (1969)



Partícula



Equações da Mecânica

Onda

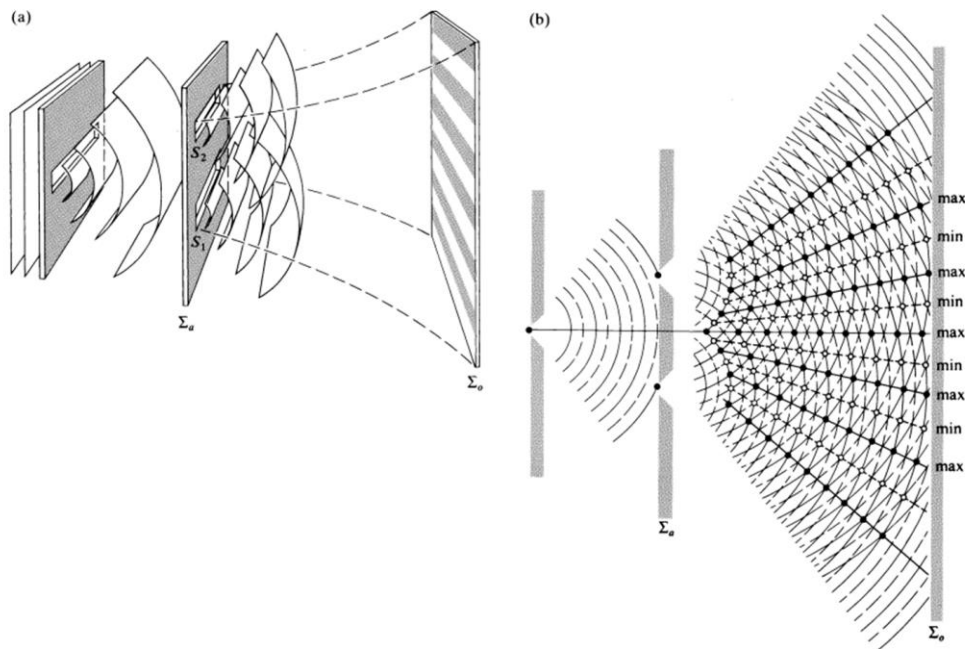


Fenômenos:

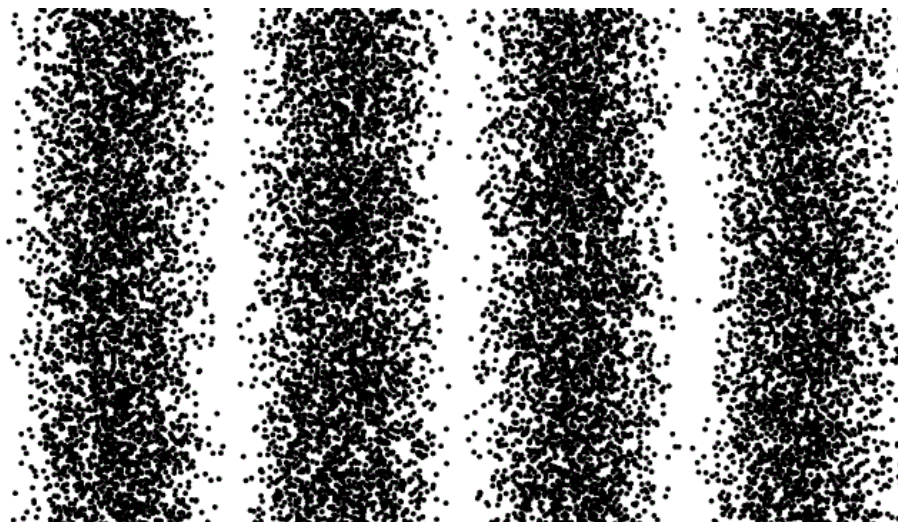
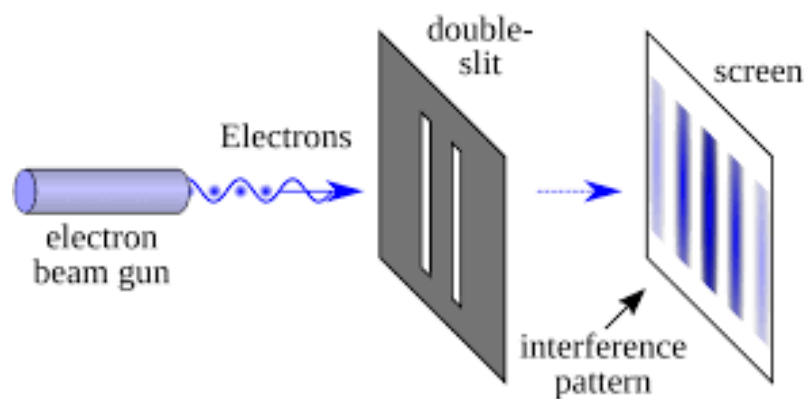
Difração: O espalhamento de ondas.

Interferência: Adição ou subtração das amplitudes das ondas.

Onda - Interferência

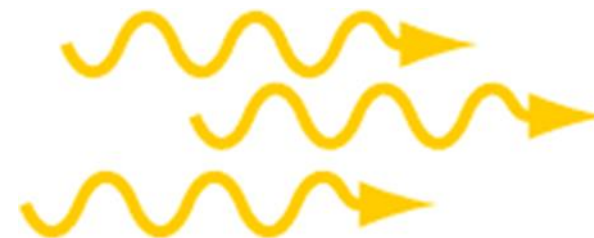


Elétron - Interferência

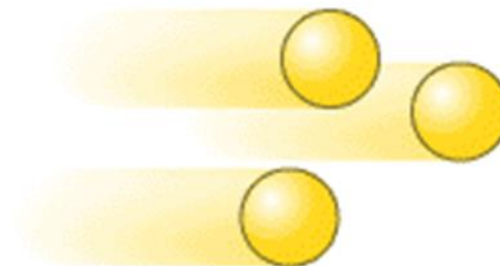


Dualidade Onda-Partícula

A Mecânica Quântica de maneira essencial é a teoria que atribui para qualquer **partícula individual**, aspectos **ondulatórios**, e para qualquer forma de **radiação**, aspectos **corpusculares**.



Ondas



ou partículas?

Equação de Schrödinger

Função de Onda

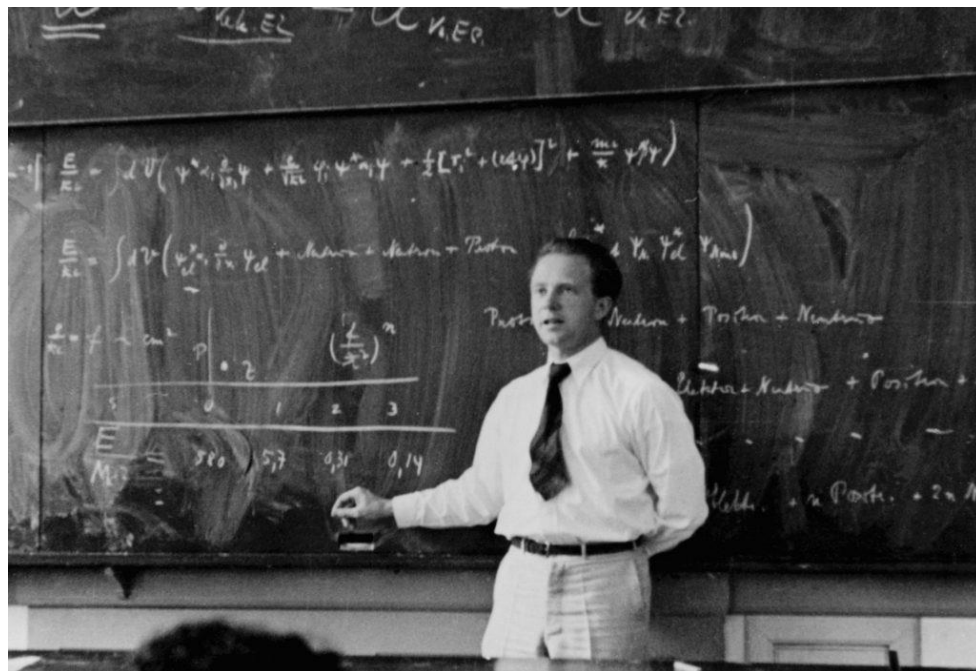
$$\Psi(\vec{r}, t)$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(\vec{r}, t) + V(\vec{r}, t) \Psi(\vec{r}, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t}$$

Mecânica Quântica: Probabilística

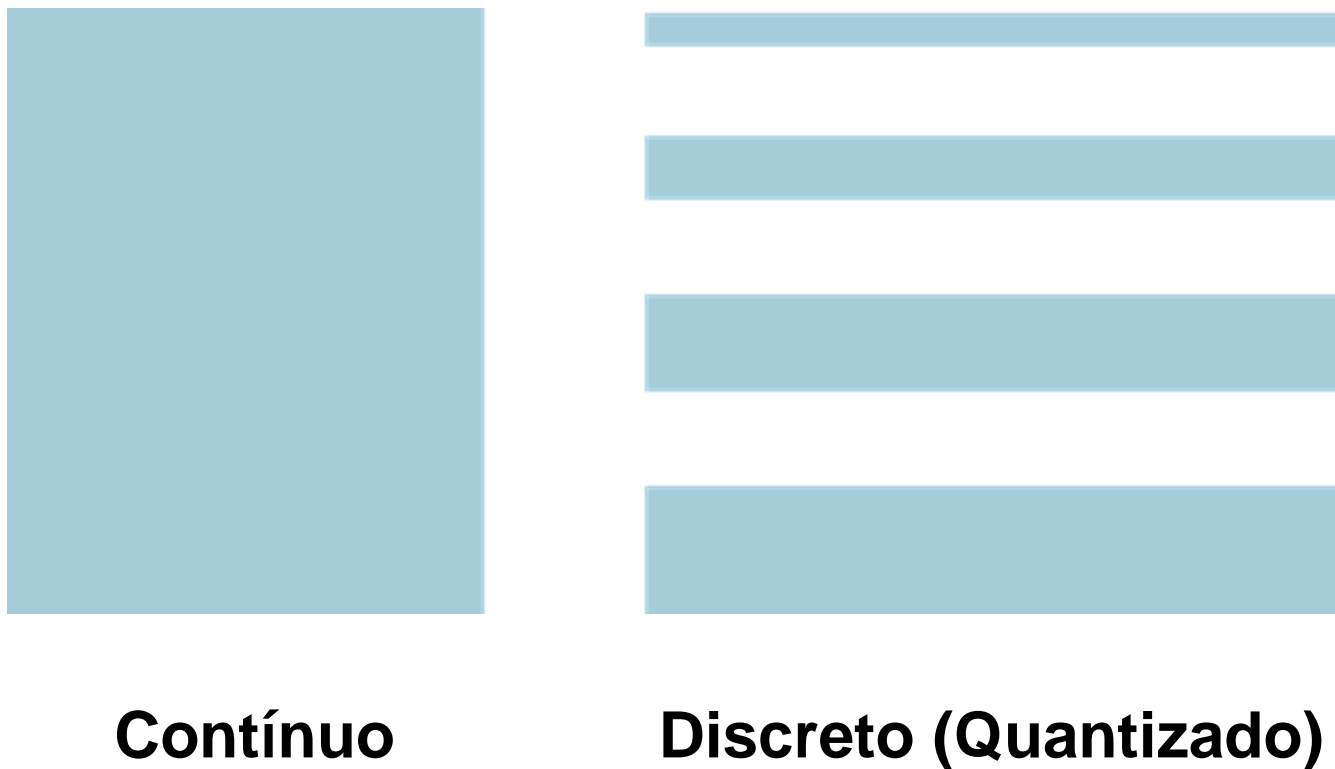
- ✓ O caráter Onda-Partícula é definido pelo ato da medição
- ✓ Não conhecemos a posição do elétron antes da medição
- ✓ Somente a probabilidade!
- ✓ Princípio da Incerteza

Princípio da Incerteza de Heisenberg

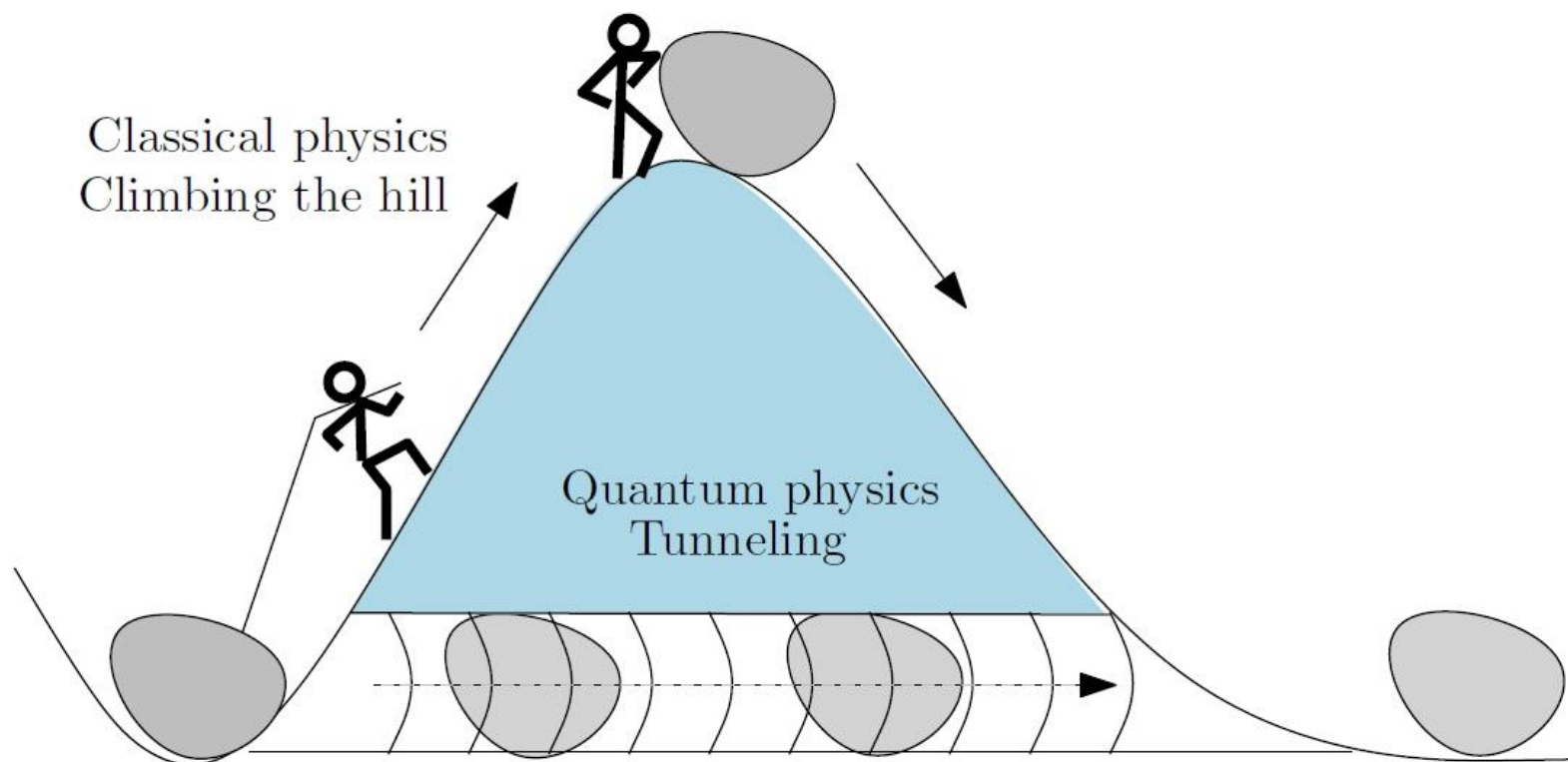


Quanto mais precisamente se tenta medir a posição de uma partícula, maior será a incerteza associada a sua velocidade, e vice-versa.

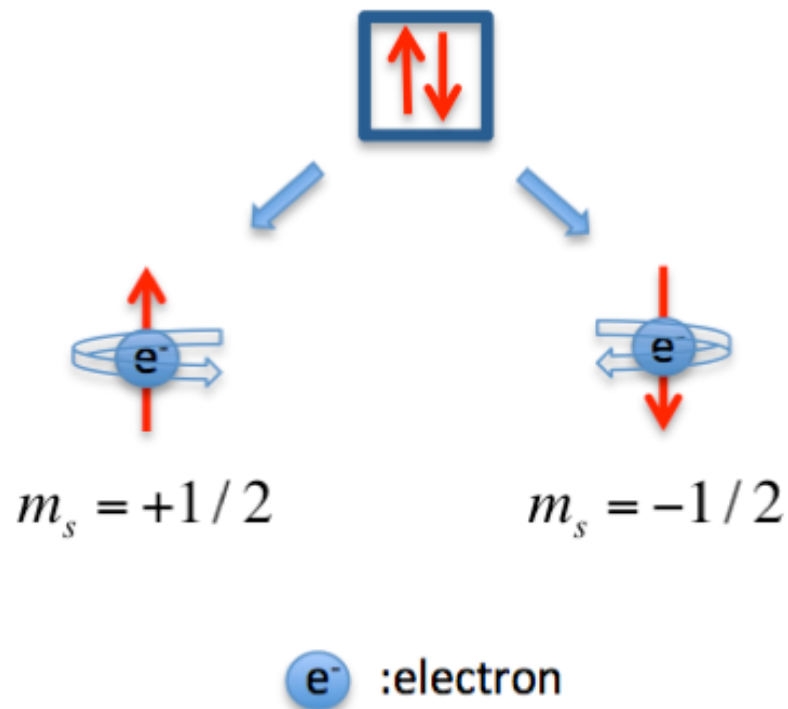
Quantização da Energia



Tunelamento



Spin



As propriedades magnéticas dos materiais se devem ao efeitos dos Spins

Conceito de Estado

Descrição das características e propriedades de um sistema físico em um determinado momento e sem ambiguidades.

Sistema Físico X

Σ um conjunto de estados clássicos finito e não vazio

X é um bit X é um dado de seis lados X é um interruptor simples

$\Sigma = \{0,1\}$ $\Sigma = \{1,2,3,4,5,6\}$ $\Sigma = \{\text{ligado, desligado}\}$

Informação

No processamento de informação pode haver incerteza sobre o estado clássico de um sistema num determinado momento.

X é um interruptor simples

$\Sigma = \{\text{ligado, desligado}\}$

$$\Pr(x = \text{ligado}) = 3/4$$

$$\Pr(x = \text{desligado}) = 1/4$$

$$\frac{3}{4} |L\rangle$$

$$\frac{1}{4} |D\rangle$$

| \rangle ket – Notação de Dirac

Informação

X é um bit

$$\Sigma = \{0,1\}$$

$$\Pr(x = 0) = 1/2$$

$$\Pr(x = 1) = 1/2$$

$$\frac{1}{2} |0\rangle$$
$$\frac{1}{2} |1\rangle$$

Mas na Mecânica Quântica...

Superposição de Estados

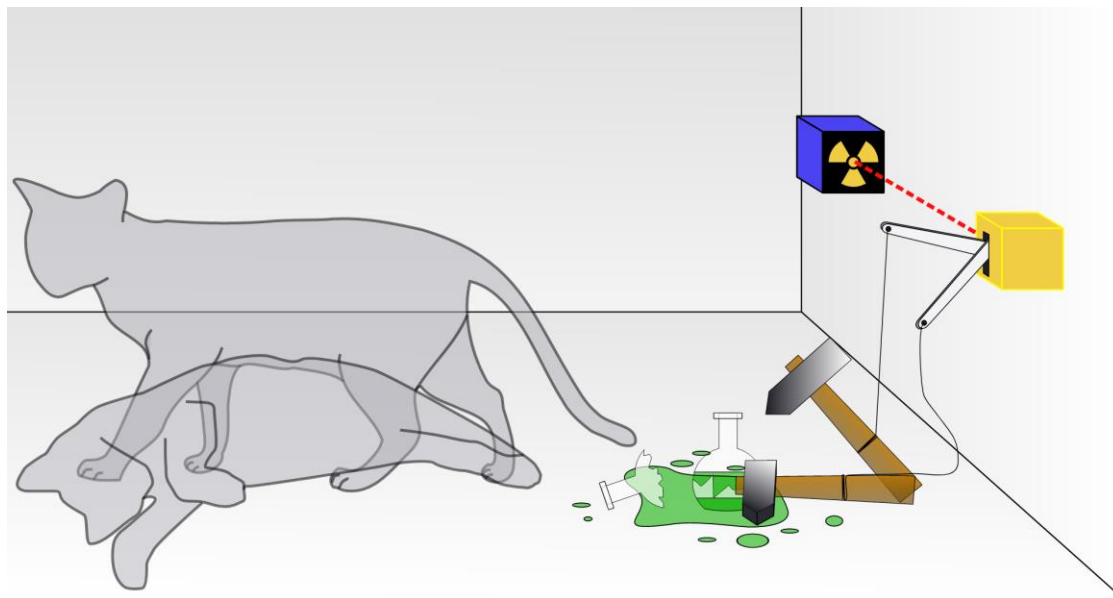
O sistema quântico pode estar em múltiplos estados

SIMULTANEAMENTE



$$|\Psi\rangle = \alpha|L\rangle + \beta|D\rangle$$

Gato de Schrödinger



Se for um “**gato clássico**”, então ele está ou morto ou vivo.

Se for um “**gato quântico**”, então ele está **simultaneamente** morto e vivo.

Superposição e Qubit

Bit Quântico: Quantum Bit - **Qubit**

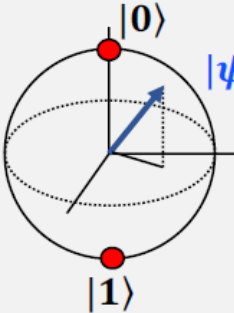
Menor unidade de informação em um computador quântico

Um bit quântico pode ser **tanto 0 quanto 1 ao mesmo tempo**

A forma geral de um estado de qubit pode ser representada por:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

Como um computador quântico é diferente?

	Classical Computer	Quantum Computer
Logic element	“Bit” : classical bit (transistor, ...)	“Qubit” : quantum bit (any coherent two-level system)
Computing	<p>“Or” 0 “Or” 1</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Classical, digital</i> states • <i>Deterministic</i> measurement: → set as 1, measure as 1 	 <p>$\psi\rangle = \alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$</p> <p> 0> “And” 1></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Quantum superposition</i> states • <i>Probabilistic</i> measurement: → If $\alpha = \beta$, 50% 0>, 50% 1>

Os computadores quânticos codificam as informações de uma maneira fundamentalmente diferente dos computadores clássicos.

Como um computador quântico é diferente?

Classical Computer

Quantum Computer

Logic element

“Bit” : classical bit
(transistor, ...)

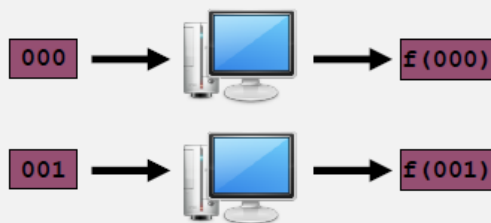
“Qubit” : quantum bit
(any coherent two-level system)

Computing

- N bits → **One N-bit state**

000, 001, ..., 111 (N = 3)

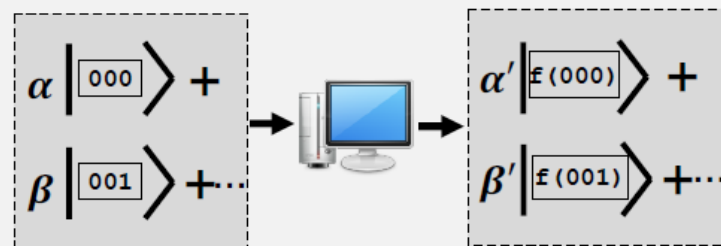
- **Classical parallelism**



- N qubits → **2^N components to one state**

$\alpha|000\rangle + \beta|001\rangle + \dots + \gamma|111\rangle$ (N = 3)

- **Quantum parallelism & interference**



Vantagens dos Qubits

- **Adicionar qubits aumenta o armazenamento e processamento de dados exponencialmente**
- **Para dobrar o poder de um computador clássico
32 bits para 64 bits**
- **Para dobrar o poder de um computador quântico
32 qubits para 33 qubits**

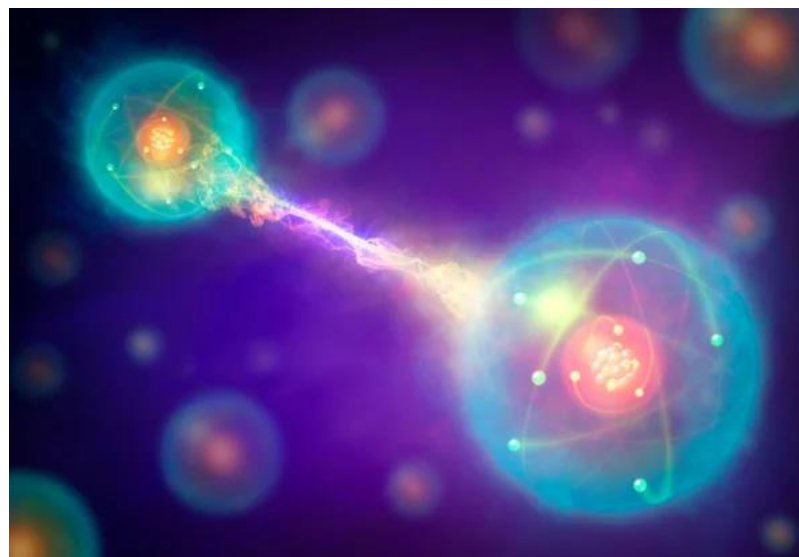
Um computador quântico duplica seu poder a cada qubit adicionado

Vantagens dos Qubits

- Um qubit representa uma unidade de armazenamento única onde tanto o 0 quanto o 1 são armazenados ao mesmo tempo (em superposição).
- Não é que um qubit esteja armazenando dois valores em espaços "fisicamente" diferentes.
- O 0 e o 1 estão no mesmo espaço "físico".

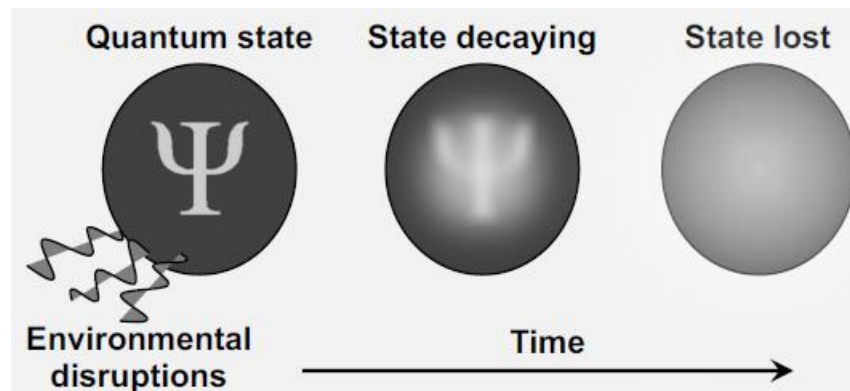
Emaranhamento (Entrelaçamento)

- **Partículas estão fortemente conectadas de uma forma especial.**
- **Mesmo que estejam separadas por uma grande distância, suas propriedades estão interligadas.**
- **Se o estado de uma delas for alterado, o estado da outra é ajustado instantaneamente.**
- **Qubits emaranhados compartilham informações correlacionadas de uma maneira instantânea.**



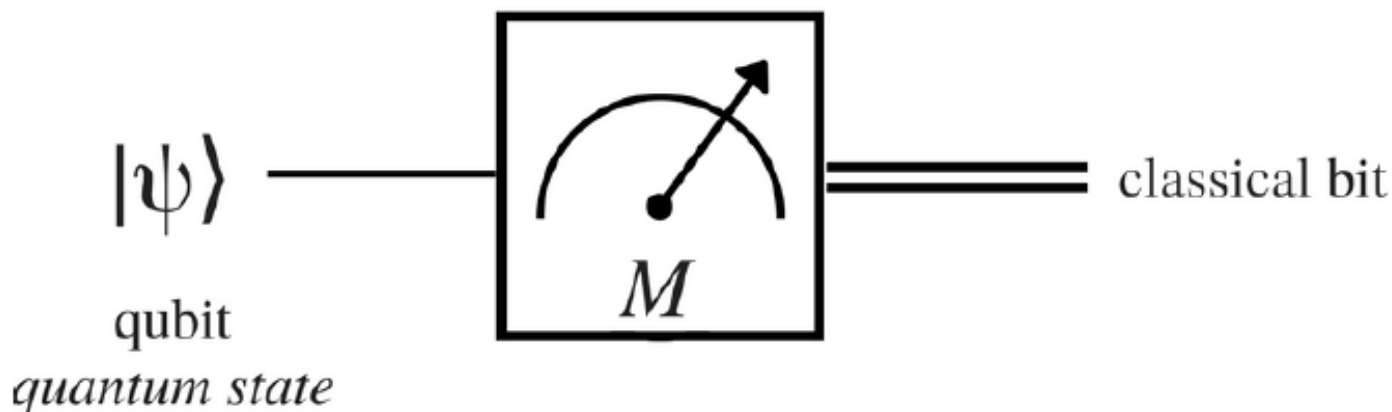
Tempo de Coerência

- Refere-se ao período durante o qual um qubit mantém sua superposição quântica.
- É o tempo em que as informações quânticas são preservadas antes que a **decoerência** ocorra e o qubit perca sua capacidade de executar cálculos quânticos de maneira precisa.
- É uma medida da estabilidade do qubit.



Medição

- Uma medida quântica é um processo de decoerência.
- Se $\Psi = \alpha_0|0\rangle + \alpha_1|1\rangle$, após a medição, temos como resultado ou $|\Psi\rangle = |0\rangle$ ou $|\Psi\rangle = |1\rangle$, e essas alternativas ocorrem com probabilidades específicas de $|\alpha_0|^2$ e $|\alpha_1|^2$, com $|\alpha_0|^2 + |\alpha_1|^2 = 1$.
- Uma medição quântica nunca produz $|\Psi\rangle = \alpha_0|0\rangle + \alpha_1|1\rangle$.



Algoritmos Quânticos

- Pode ser possível resolver um problema em um sistema quântico muito mais rápido (ou seja, usando menos etapas) do que em um computador clássico.
- A **fatoração** e a **busca** são exemplos de problemas nos quais os algoritmos quânticos são conhecidos e mais rápidos do que qualquer algoritmo clássico.
- Implicações para criptografia e segurança da informação.

Algoritmos Quânticos

- **Paralelismo quântico:** ao usar superposições de estados quânticos, o computador está executando o algoritmo em todas as possíveis entradas de uma vez.
- **Dimensão do espaço quântico:** o "tamanho" do espaço de estados para o sistema quântico é exponencialmente maior do que o sistema clássico correspondente.
- **Capacidade de emaranhamento:** diferentes subsistemas (qubits) em um computador quântico se tornam emaranhados, exibindo correlações não clássicas.

Algoritmos Quânticos

- **Grover** (busca numa lista)
- **Shor** (fatoração de inteiros)
- **Deutsch-Jozsa** (decisão)
- Bernstein-Vazirani
- HHL
- Aprendizado de máquina
- Simulação
- Otimização
- ...

Programação Quântica

LINGUAGEM	MANTENEDOR
Qiskit	IBM
Cirq	Google
QCL	AIT Austrian Institute of Technology
PyQuil	Rigetti Computing
ProjectQ	ETH Zurich e colaboradores
Q#	Microsoft
Strawberry Fields	Xanadu
Q# (Q Sharp)	Microsoft

Qiskit - IBM

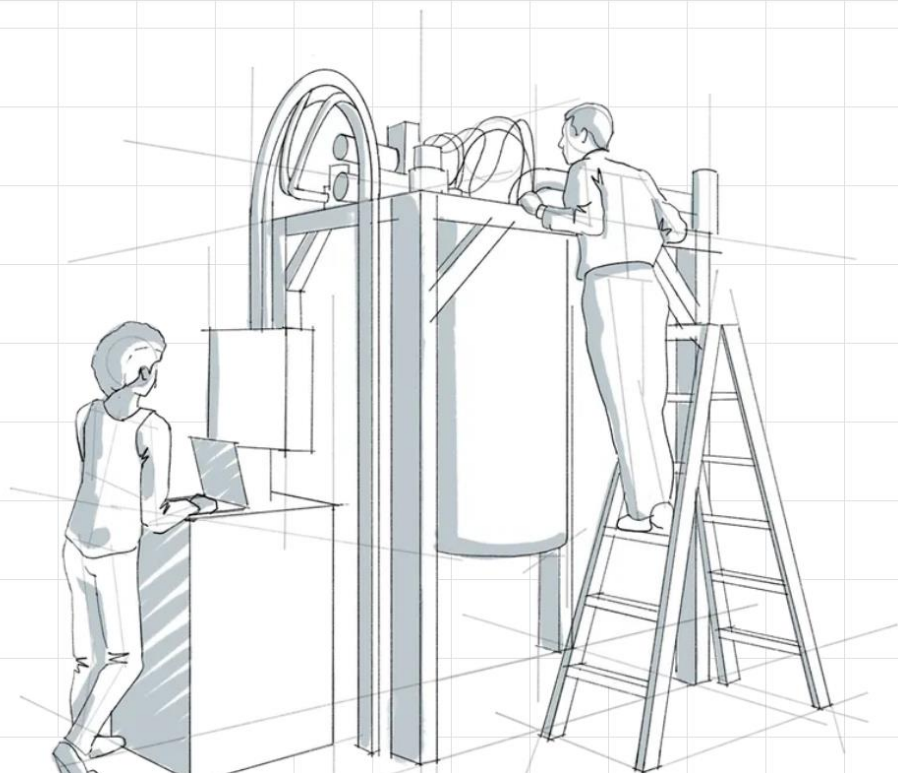
[Learn](#)[Community](#) ▾[Documentation](#) ▾[Providers](#)

qiskit 0.43.0

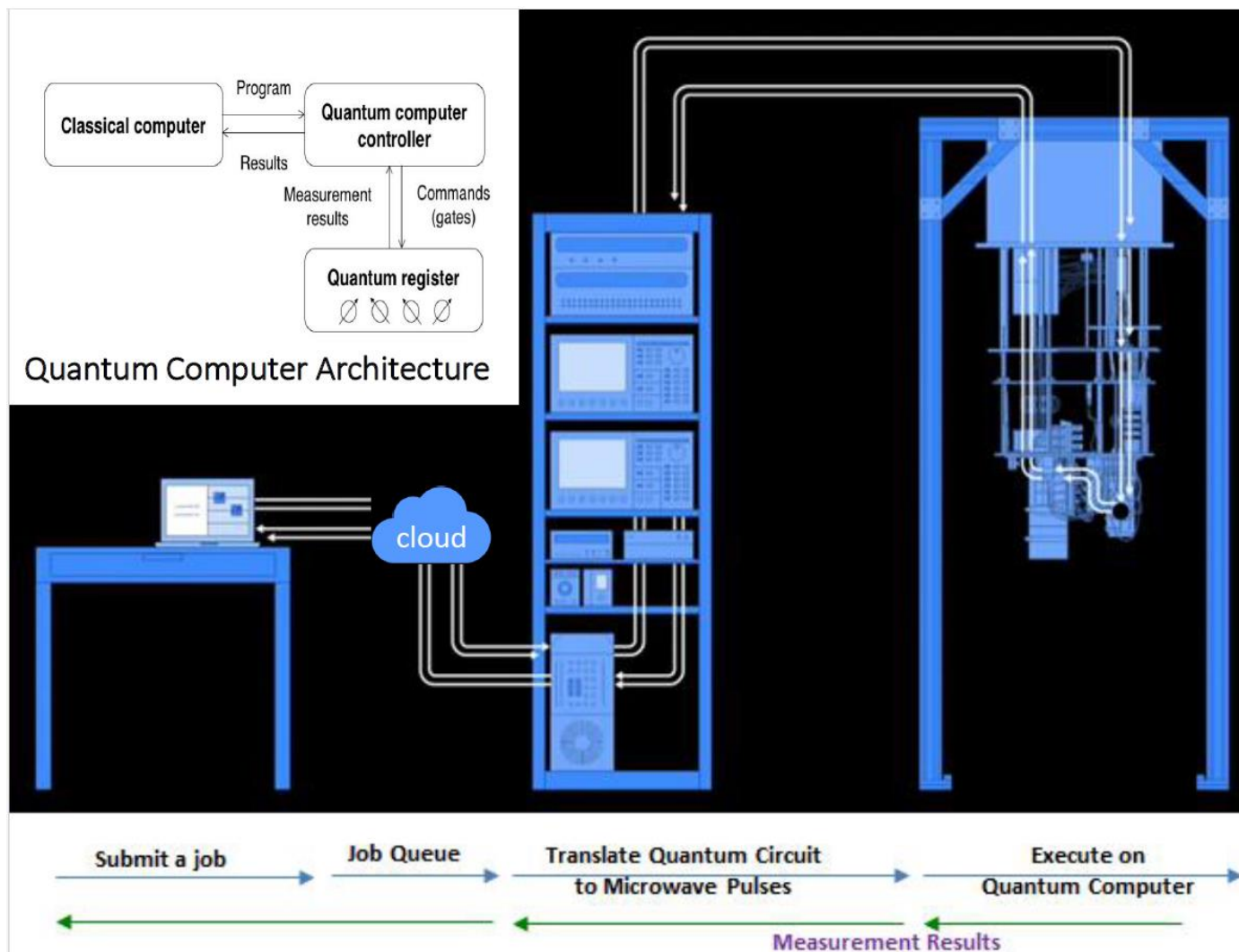
[see release notes](#)

Open-Source Quantum Development

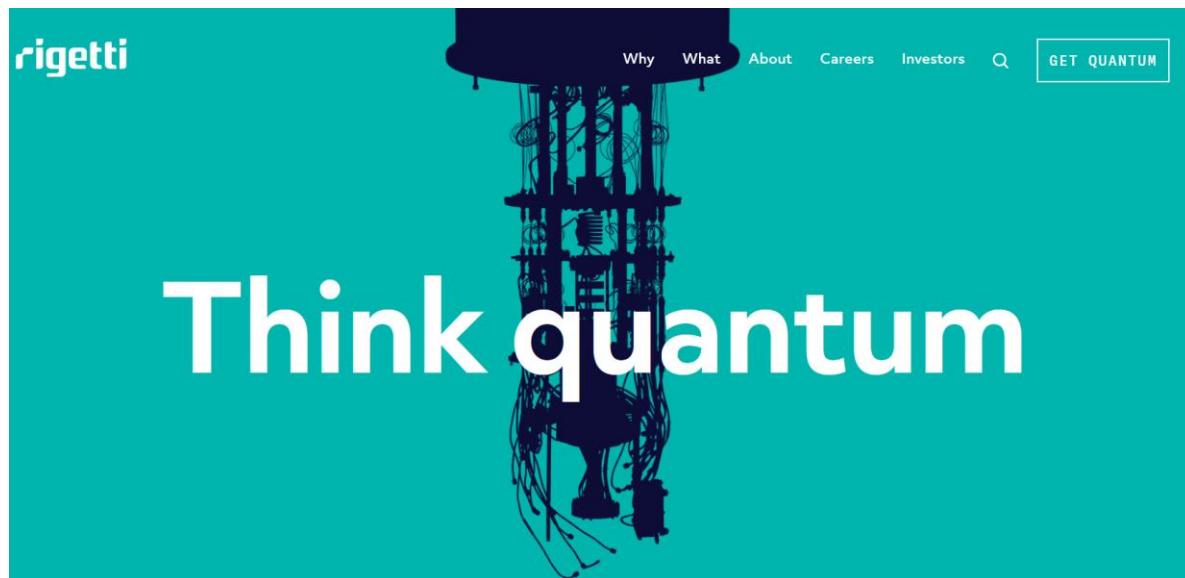
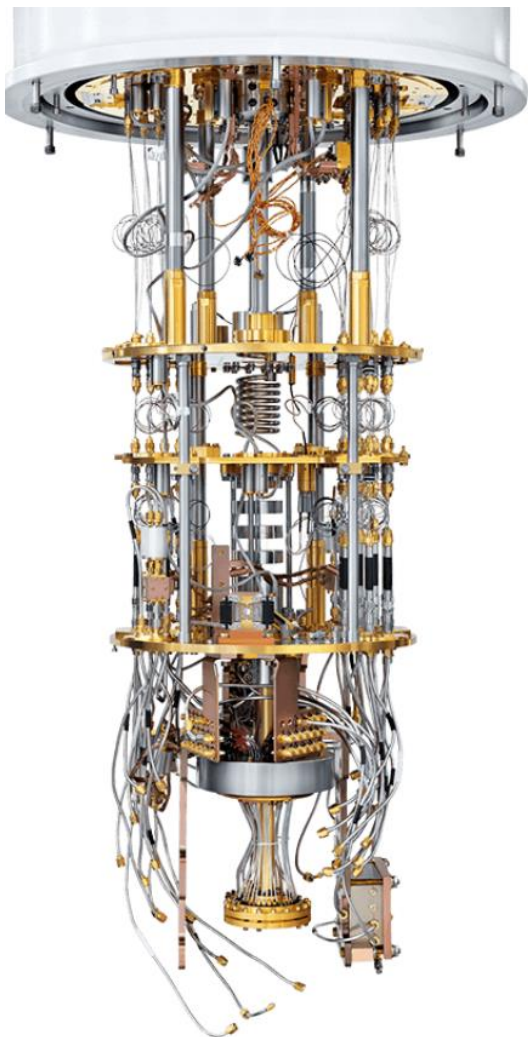
Qiskit [quiss-kit] is an open-source SDK for working with quantum computers at the level of pulses, circuits, and application modules.

[Get started](#)

Como um computador quântico funciona?



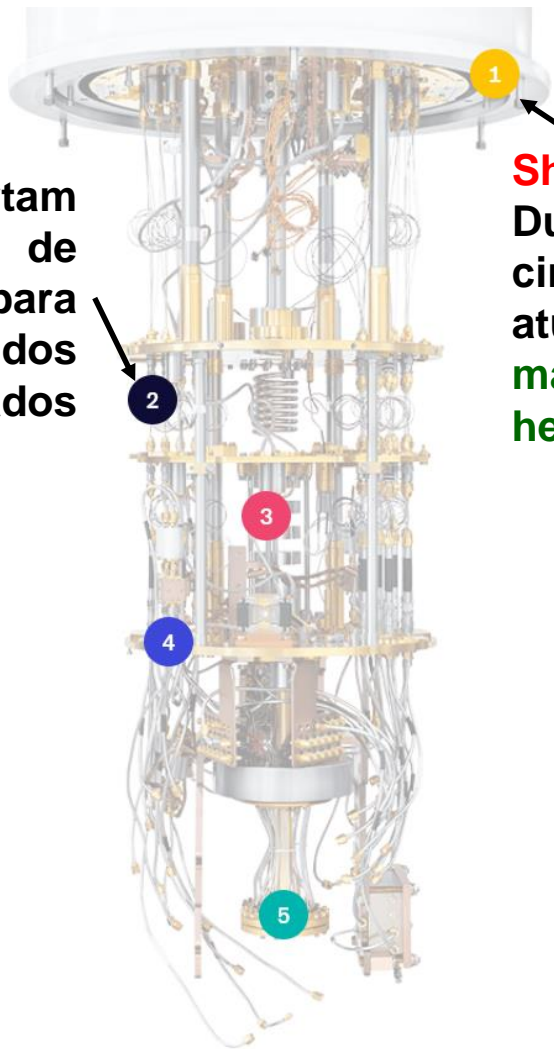
Computador Quântico: Rigetti Computing®



Computador Quântico: Rigetti Computing®

Nervos

Esses cabos que transportam fótons transmitem sinais de ida e volta do chip para realizar as operações dos qubits e retornar os resultados medidos.



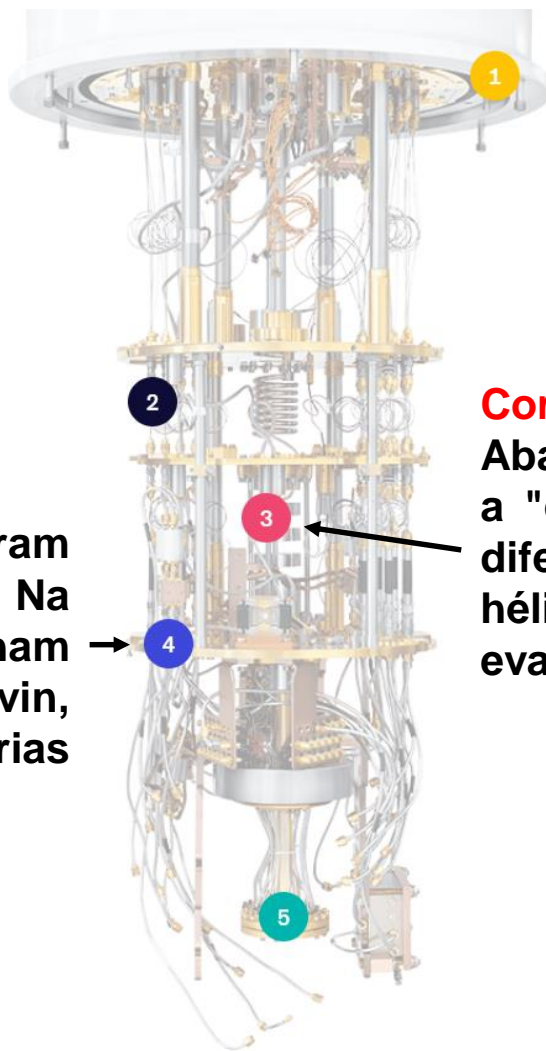
Shell

Durante a operação do computador, cinco invólucros são empilhados e atuam como **isolantes térmicos** para manter a máquina super fria e hermeticamente selada.

Computador Quântico: Rigetti Computing®

Esqueleto

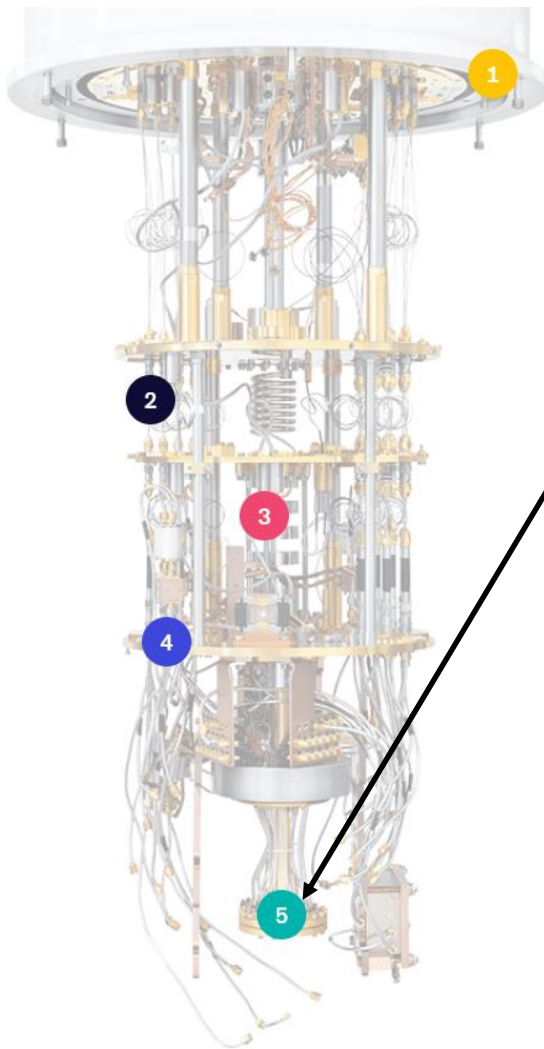
Essas placas de ouro separam as zonas de resfriamento. Na parte inferior, elas mergulham para um centésimo de Kelvin, centenas de vezes mais frias do que o espaço sideral.



Coração

Abaixo dos trocadores de calor está a "câmara de mistura". No interior, diferentes formas de hélio líquido, hélio-3 e hélio-4, separam-se e evaporam, dissipando o calor.

Computador Quântico: Rigetti Computing®

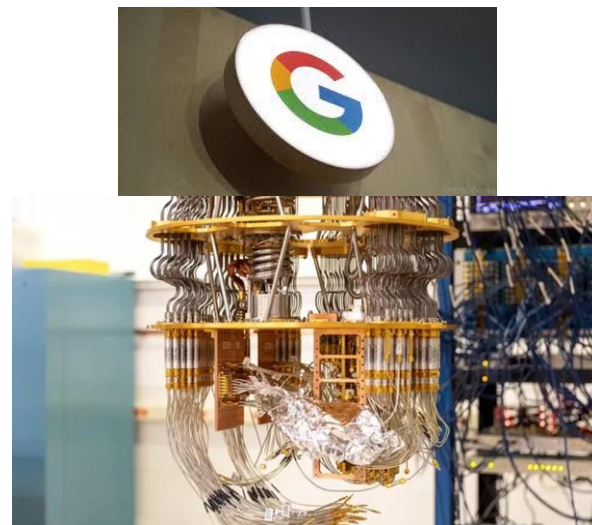


Cérebro

A unidade de processamento quântico (QPU) possui um disco de cobre banhado a ouro com um chip de silício no interior que contém o cérebro da máquina.

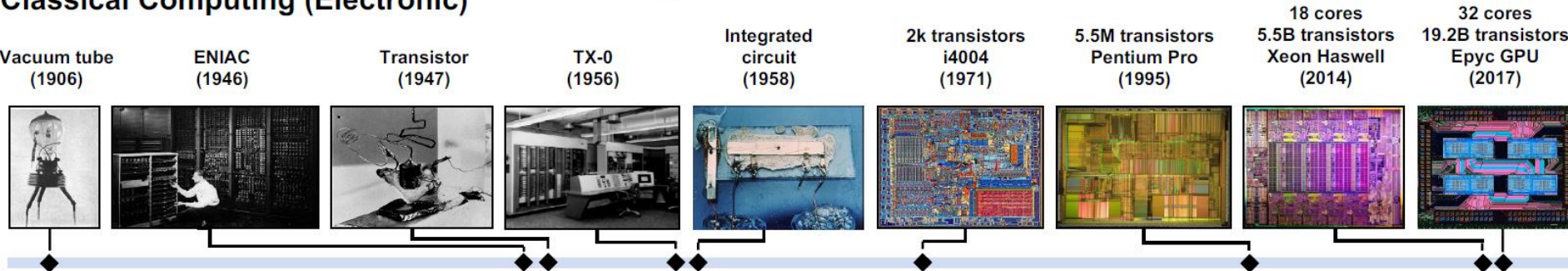


Principais Fabricantes

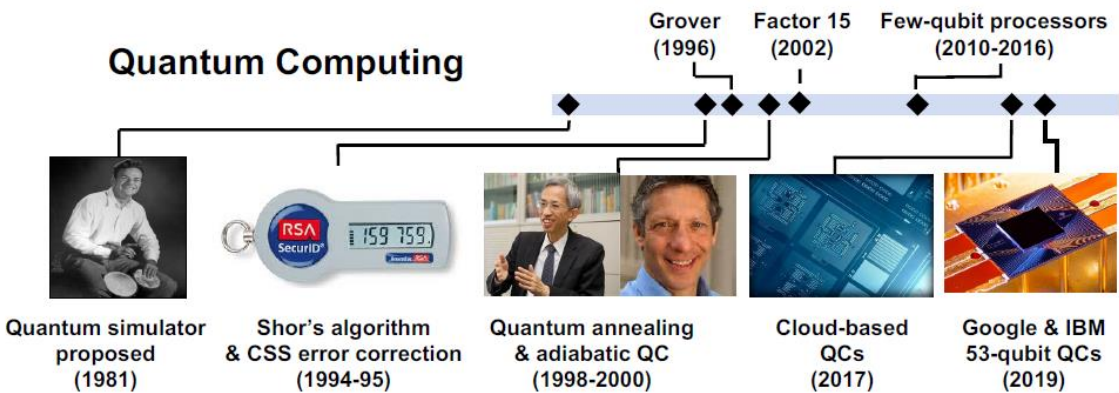


Timeline

Classical Computing (Electronic)



Quantum Computing



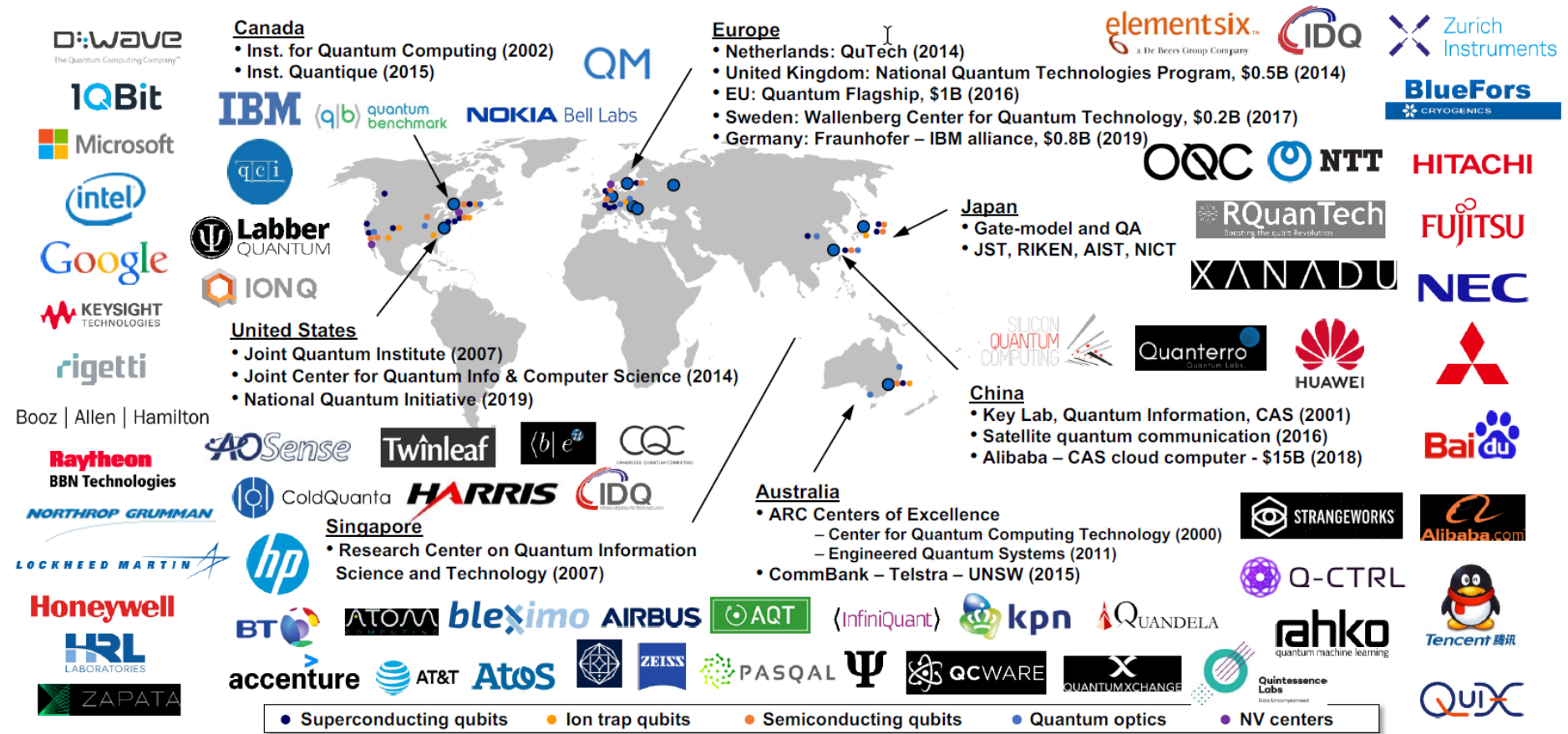
Timeline

2022

IBM revela processador
quântico de mais de 400
qubits e IBM Quantum System
Two de próxima geração



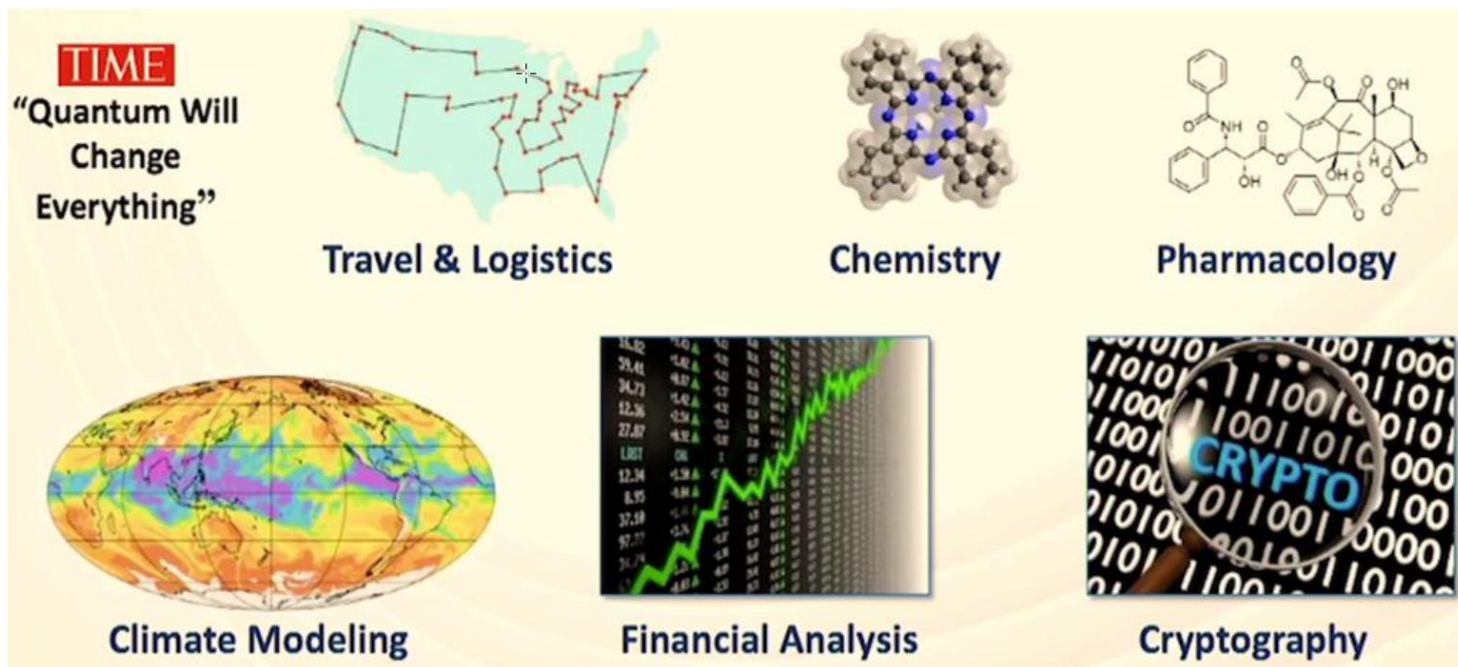
Investimento Mundial



* European Commission

Aplicações

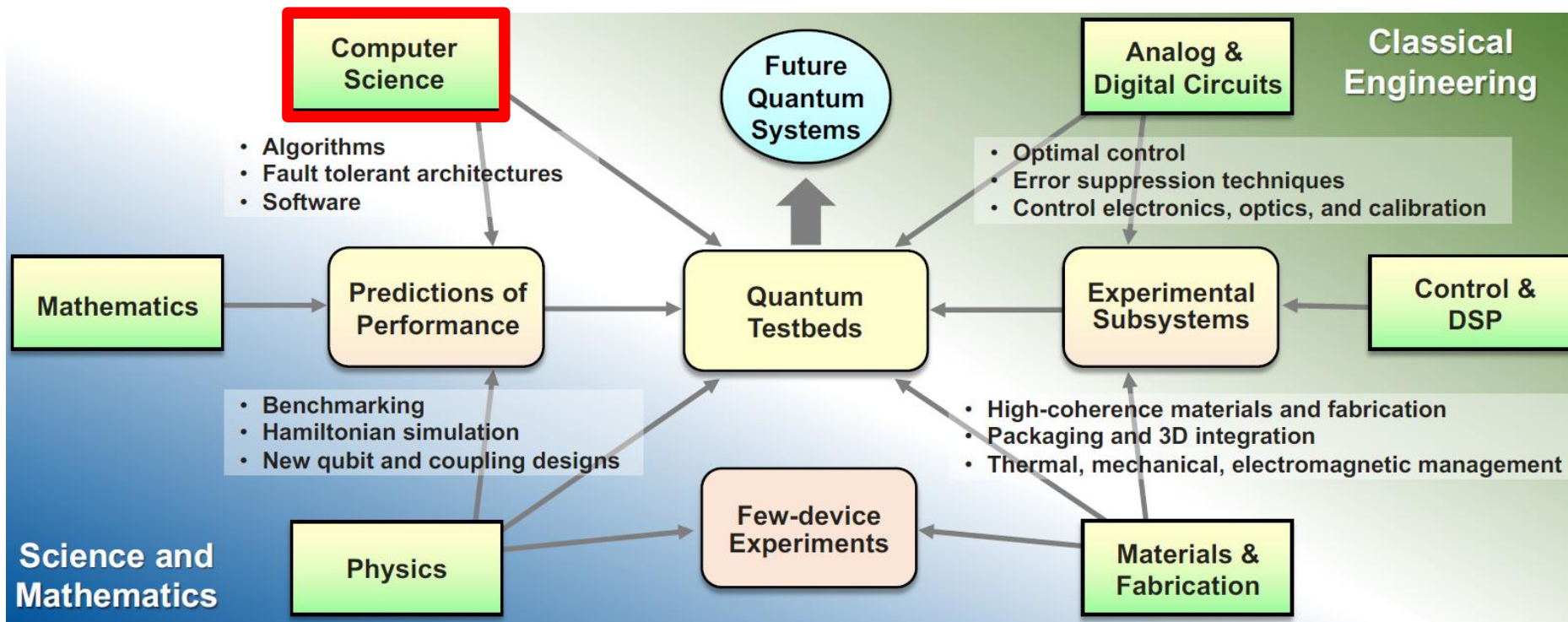
- Criptografia
- Simulação de materiais (química, farmacologia etc.)
- Otimização e logística
- **Aprendizado de máquina e inteligência artificial**



Desafios e futuro

- Escalabilidade e correção de erros
- Coerência e controle
- **Desenvolvimento de algoritmos quânticos**
- **Integração com a computação clássica**
- Padrões e interoperabilidade
- **Formação e educação**

Conclusão e perspectivas futuras



Entre um terço e metade de vocês estarão trabalhando, direta ou indiretamente, com computação quântica nos próximos 10 a 15 anos.