

eurecat!

Quantum Machine Learning: La revolución cuántica en la Inteligencia Artificial



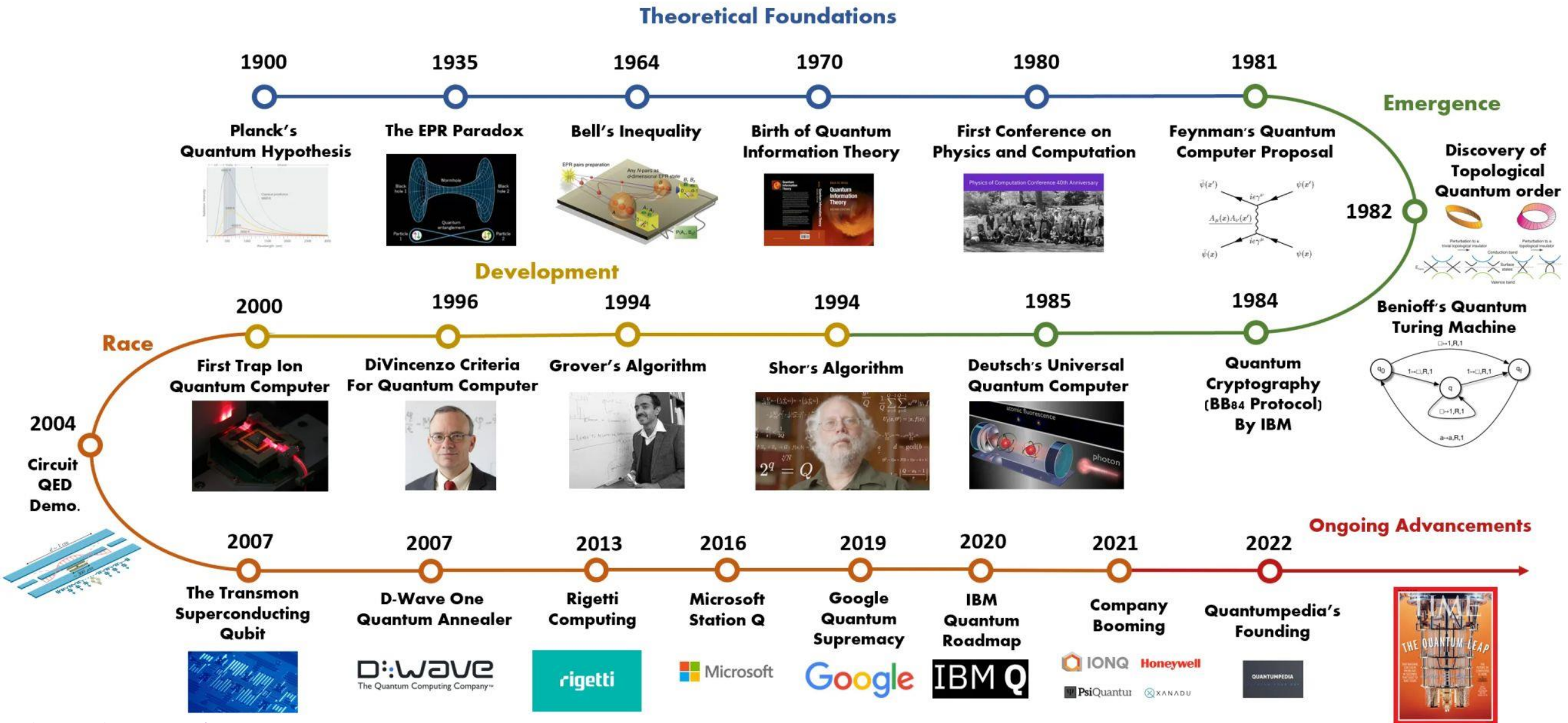
"innovating with businesses"

Adán Garriga
adan.garriga@eurecat.org





1. Breu història de la computació quàntica
2. Conceptes bàsics de la computació quàntica
3. Quantum Machine Learning
4. Aplicacions pràctiques
5. Preguntes





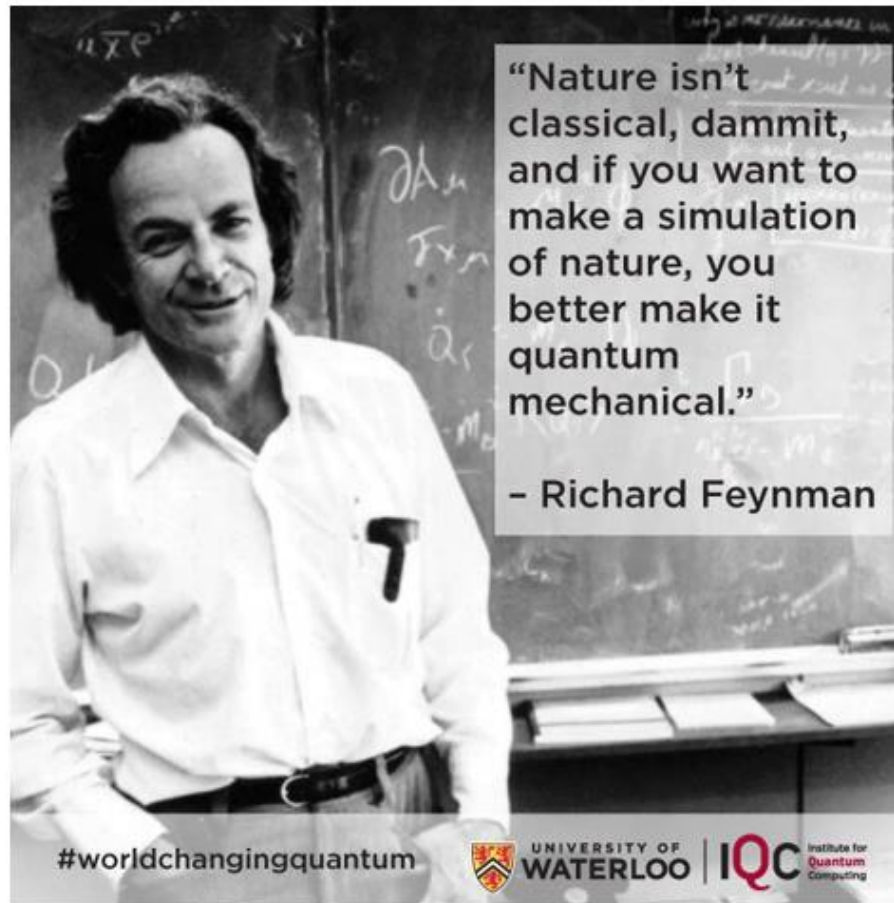
Versió colorejada de la Conferència de Solvay de 1927 (source: Rare Historical Photos)



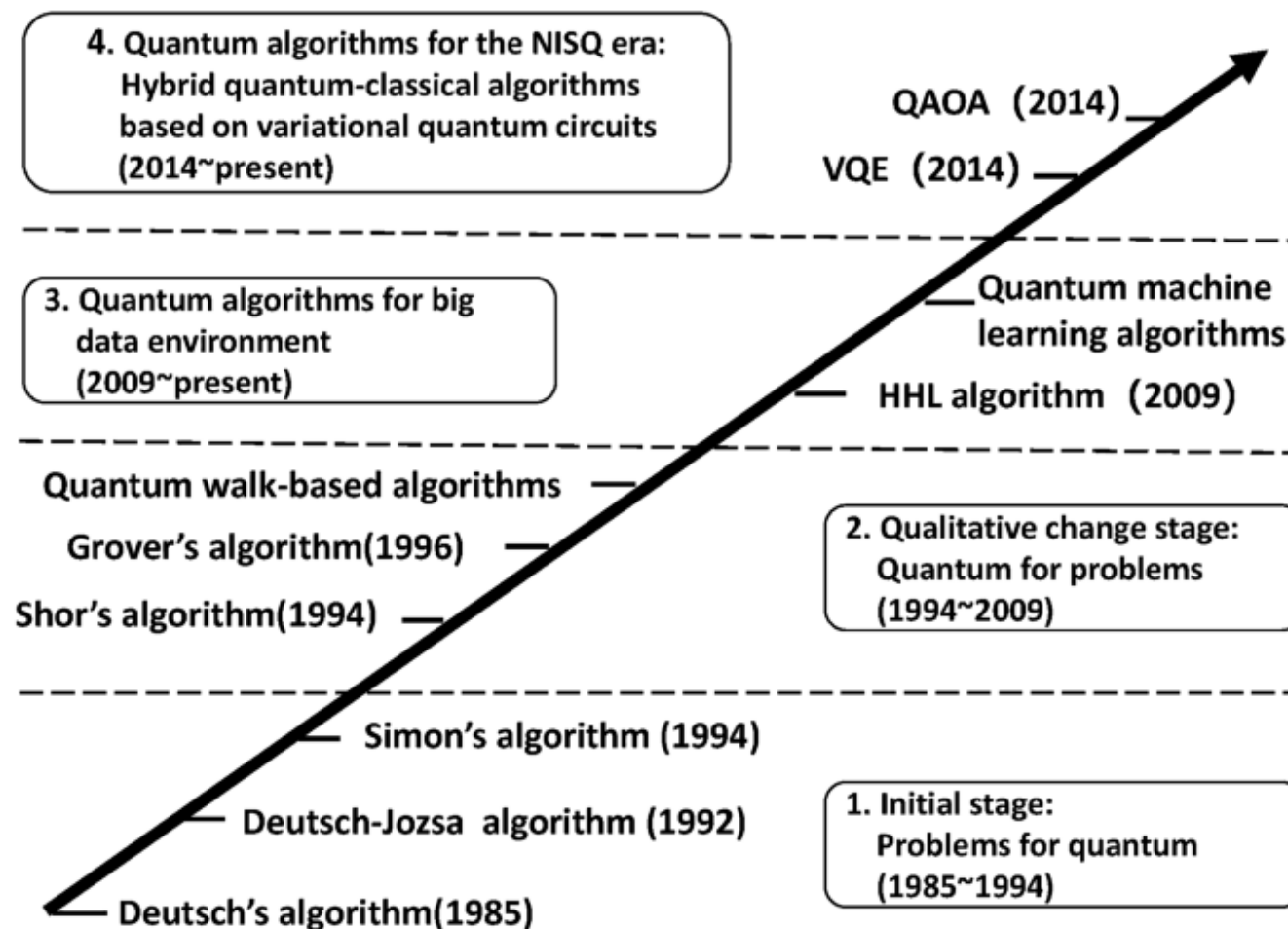
Physics of Computation Conference 40th Anniversary



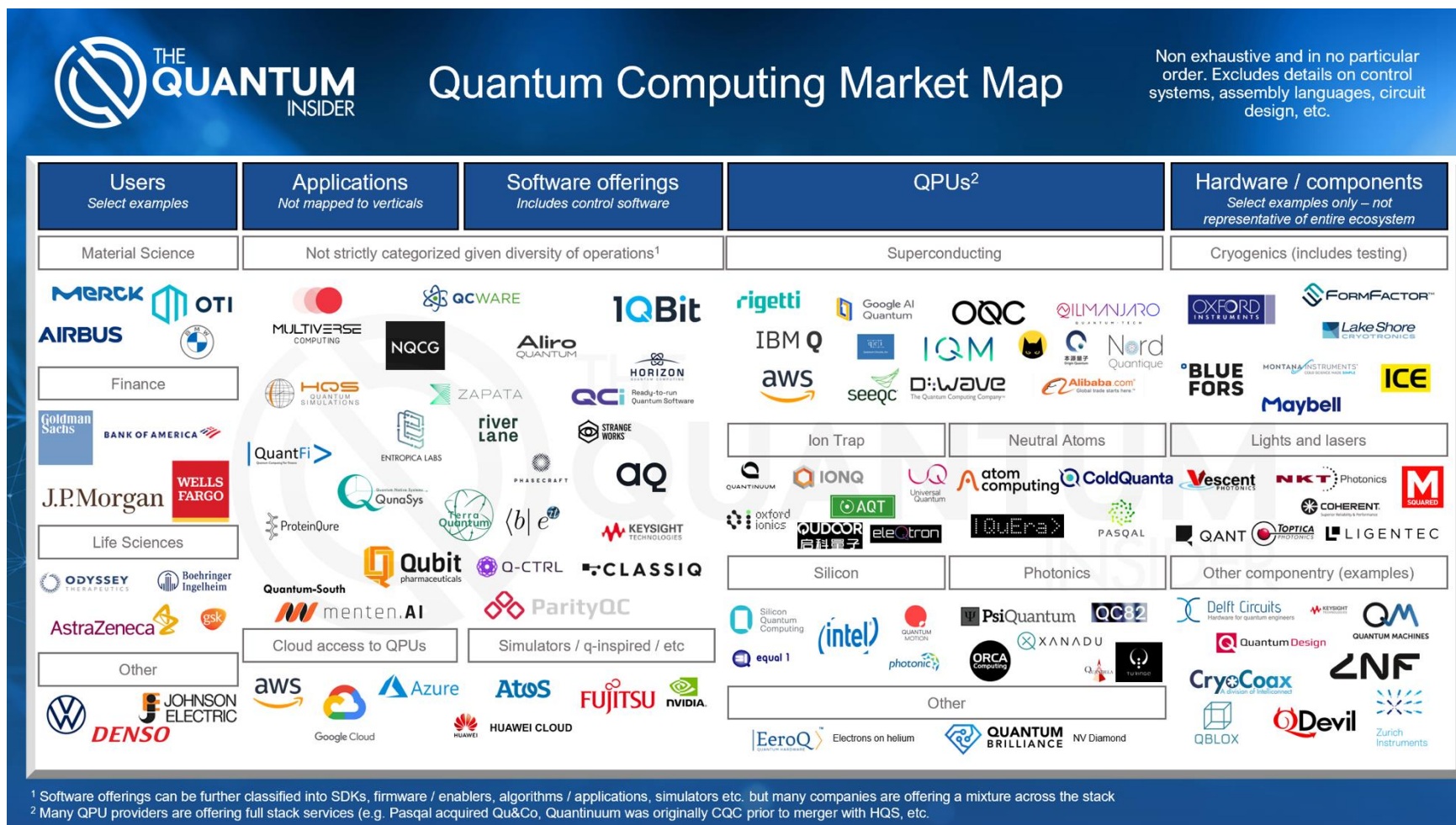
Primera conferència de física i computació (source: IBM Quantum)



Fraser mítica de R. Feynmann (source: Univ. De Waterloo)



Resum de l'evolució dels algoritmes (source: Springer)



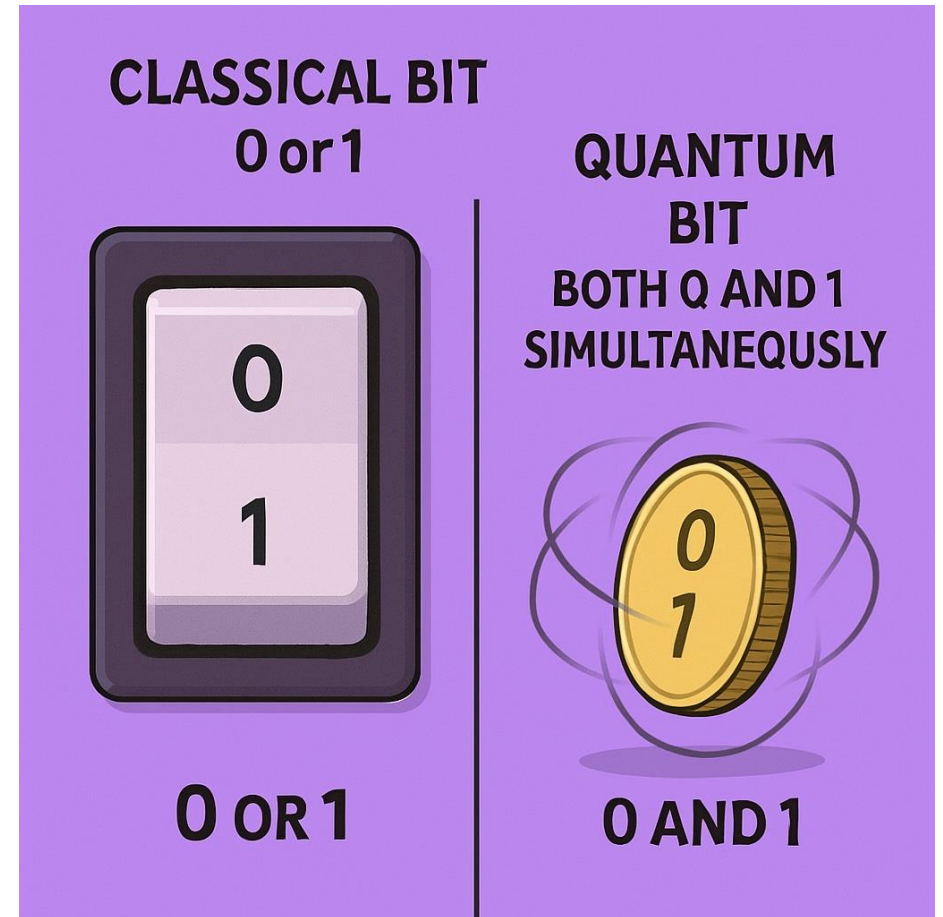
Quantum Computer Market Map (source: The Quantum Insider)

Bits Clàssics – Determinisme:

- Representen o bé 0 o bé 1
- Estats deterministes

Bits Quàntics (Qubits) – Indeterminisme:

- Poden representar 0, 1 o ambdós simultàniament
- Probabilístics (superposició quàntica)



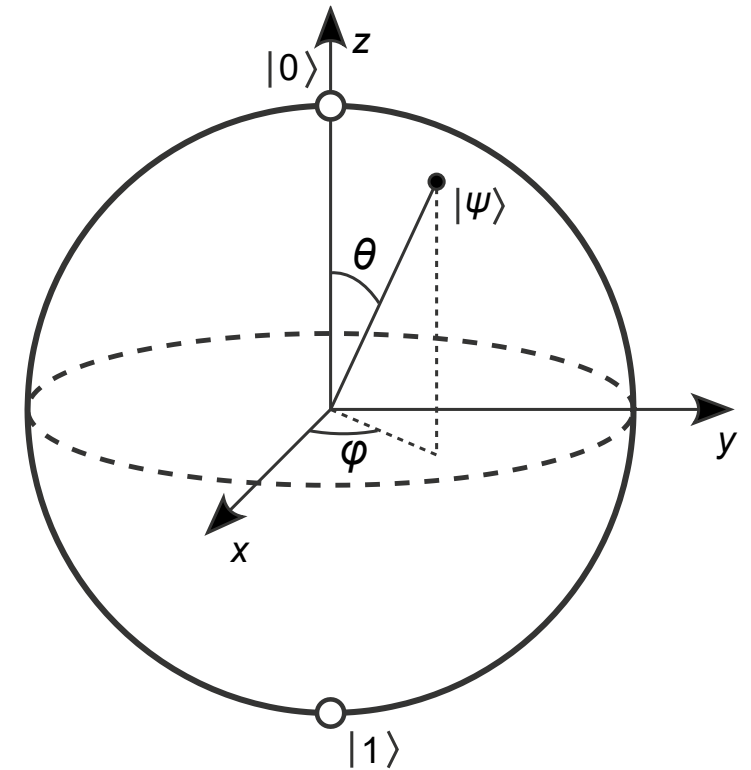


Què és la superposició:

- Els sistemes quàntics poden existir en múltiples estats simultàniament
- A diferència dels sistemes clàssics, que tenen estats definits (o 0 o 1)

Representació Matemàtica (simplificada):

- Estat d'un qubit: $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$
- Les “probabilitats” estan codificades com amplituds quàntiques (α , β)
- Representació a l'esfera de Bloch



$$|\psi\rangle = \cos \frac{\theta}{2} |0\rangle + e^{i\varphi} \sin \frac{\theta}{2} |1\rangle$$

Conceptes bàsics: mesura

La mesura col·lapsa un estat quàntic:

- De la superposició (p. ex. tant 0 com 1) $\rightarrow$ a un resultat definit (0 o 1)

El resultat és probabilístic:

- Regit per les amplituds $\rightarrow$ probabilitats
- $|\alpha|^2$ = probabilitat d'obtenir 0, $|\beta|^2$ = probabilitat d'obtenir 1

Concepte clau:

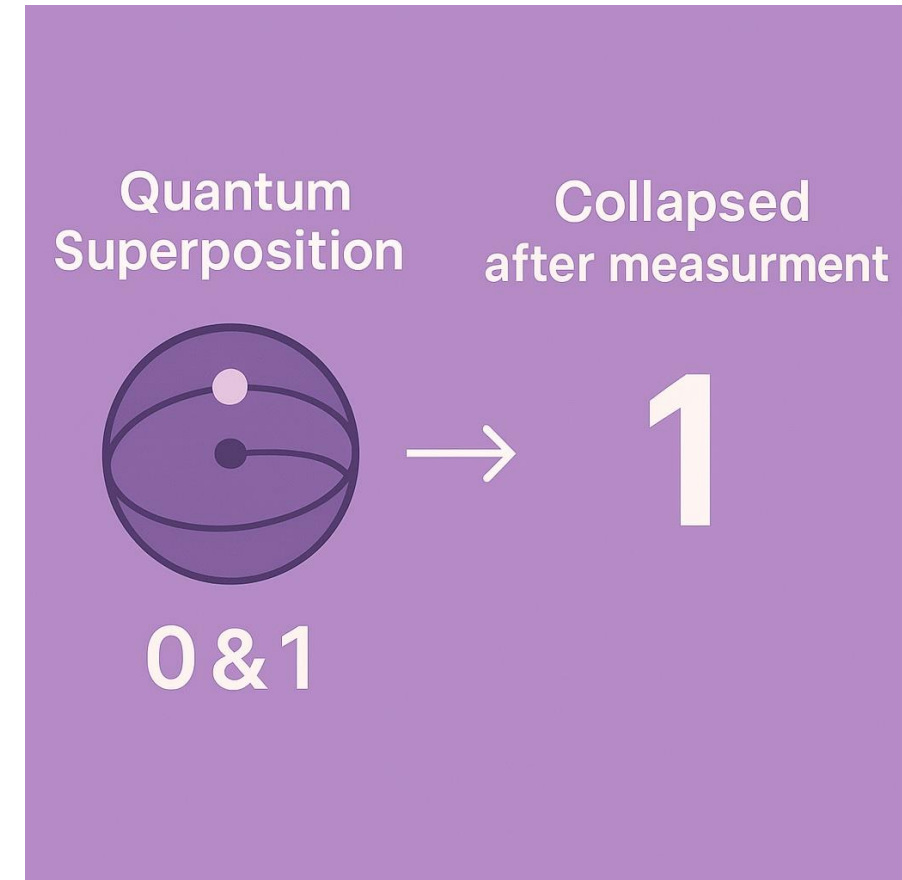
- No pots observar un qubit sense alterar-lo

Teorema de no-clonació:

- Els estats quàntics no es poden copiar perfectament

Execucions repetides = resultat estadístic

- Els algoritmes quàntics s'han d'executar diverses vegades





SCHRÖDINGER'S CAT

Alive and dead simultaneously
until observed

Conceptes bàsics: entrellaçament

Els qubits entrellaçats comparteixen un estat vinculat:

- Mesurar-ne un defineix instantàniament l'altre
- La correlació es manté fins i tot a grans distàncies

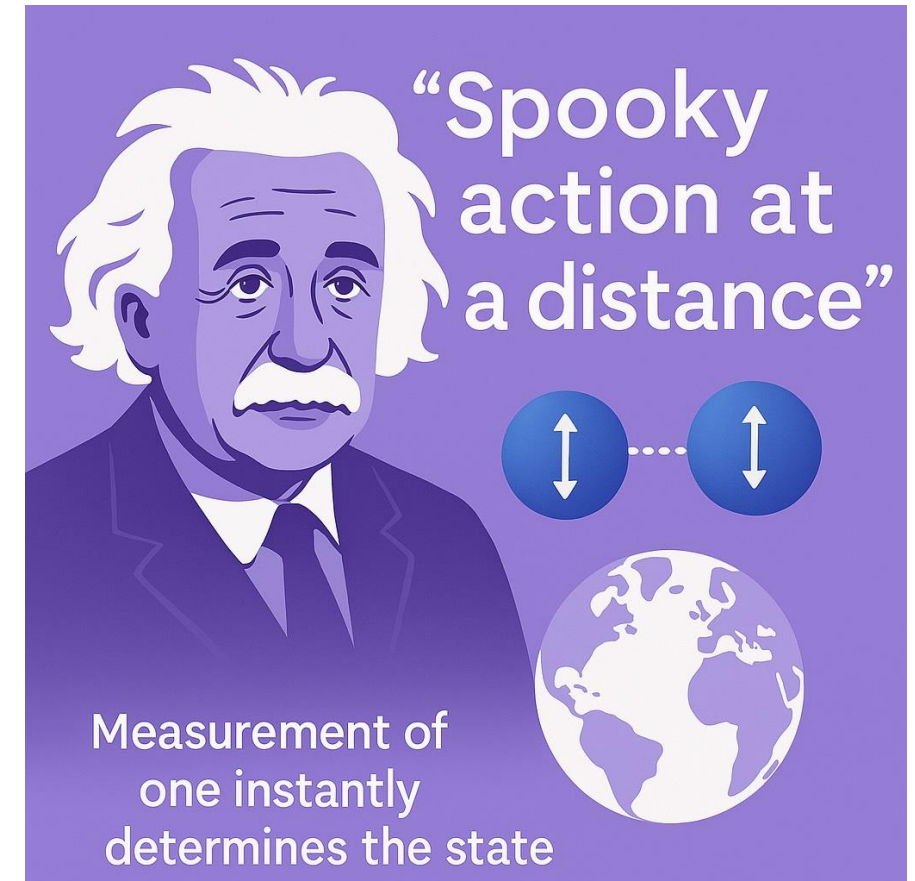
No és només una connexió forta — és quàntica!

- Els sistemes clàssics poden estar correlacionats, però no d'aquesta manera
- No hi ha cap explicació clàssica per a les correlacions d'entrellaçament

Einstein ho va anomenar “acció fantasmal a distància”

- Verificat experimentalment moltes vegades

Element clau en la computació quàntica





Conceptes bàsics: Circuits quàntics

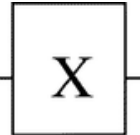
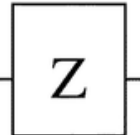
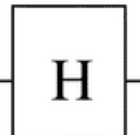
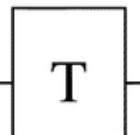
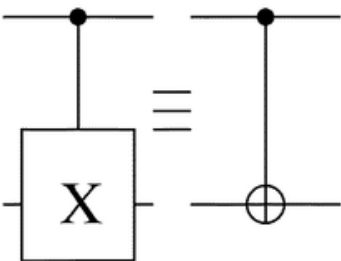
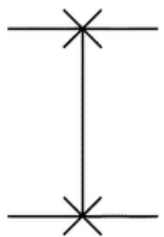
Són seqüències de **portes quàntiques** aplicades a **qubits**, que manipulen estats de superposició i entrellaçament per realitzar càlculs.

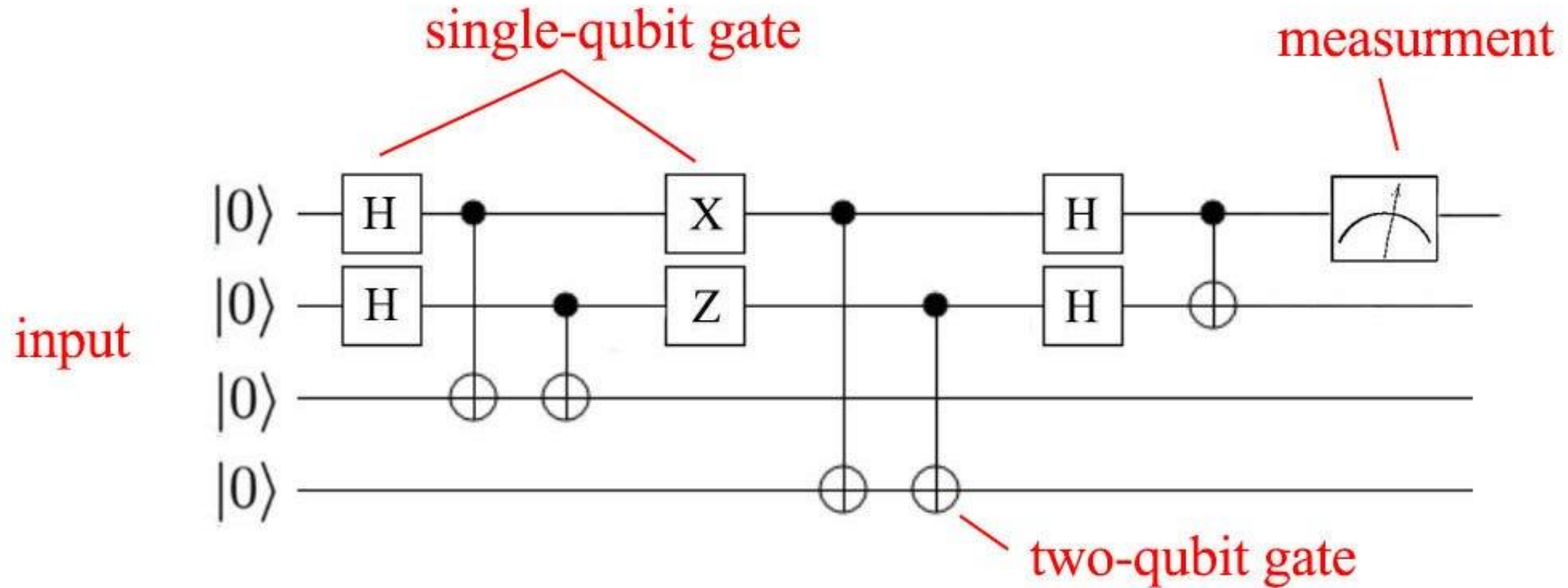
- **Components principals:**

- **Qubits:** Portadors d'informació quàntica
- **Portes quàntiques:** Operacions reversibles que transformen l'estat dels qubits
- **Mesura:** Produeix un resultat clàssic a partir de l'estat quàntic

- **Exemples de portes bàsiques:**

- **Porta X (NOT):** Inverteix $|0\rangle$ i $|1\rangle$
- **Porta H (Hadamard):** Crea superposició
- **Porta CNOT:** Genera entrellaçament entre dos qubits
- **Porta Z, Y, T:** Rotacions al voltant d'eixos del Bloch Sphere
- **Portes de múltiples qubits:** Implementen lògica condicional (com la Toffoli)

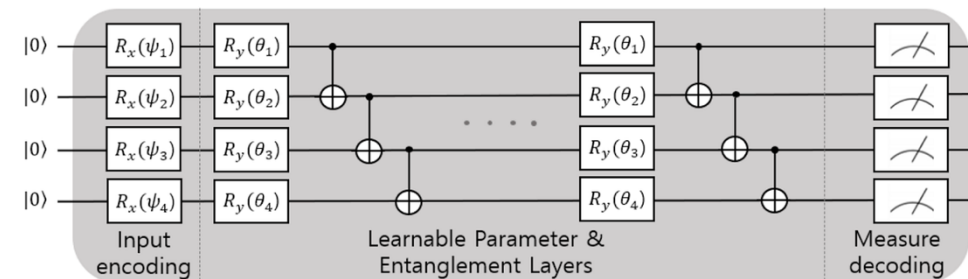
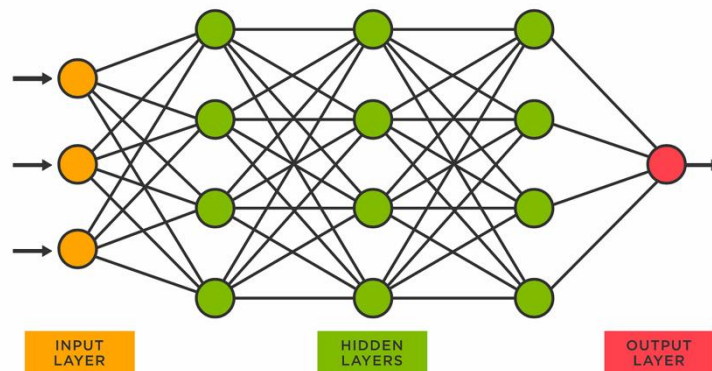
X Gate Bit-flip, Not		$\equiv$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}$	$=$	$\beta 0\rangle + \alpha 1\rangle$
Z Gate Phase-flip		$\equiv$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}$	$=$	$\alpha 0\rangle - \beta 1\rangle$
H Gate Hadamard		$\equiv$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}$	$=$	$\frac{\alpha+\beta 0\rangle + \alpha-\beta 1\rangle}{\sqrt{2}}$
T Gate		$\equiv$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\pi/4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}$	$=$	$\alpha 0\rangle + e^{i\pi/4}\beta 1\rangle$
Controlled Not Controlled X CNot		$\equiv$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix}$	$=$	$a 00\rangle + b 01\rangle + d 10\rangle + c 11\rangle$
Swap		$\equiv$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix}$	$=$	$a 00\rangle + c 01\rangle + b 10\rangle + d 11\rangle$



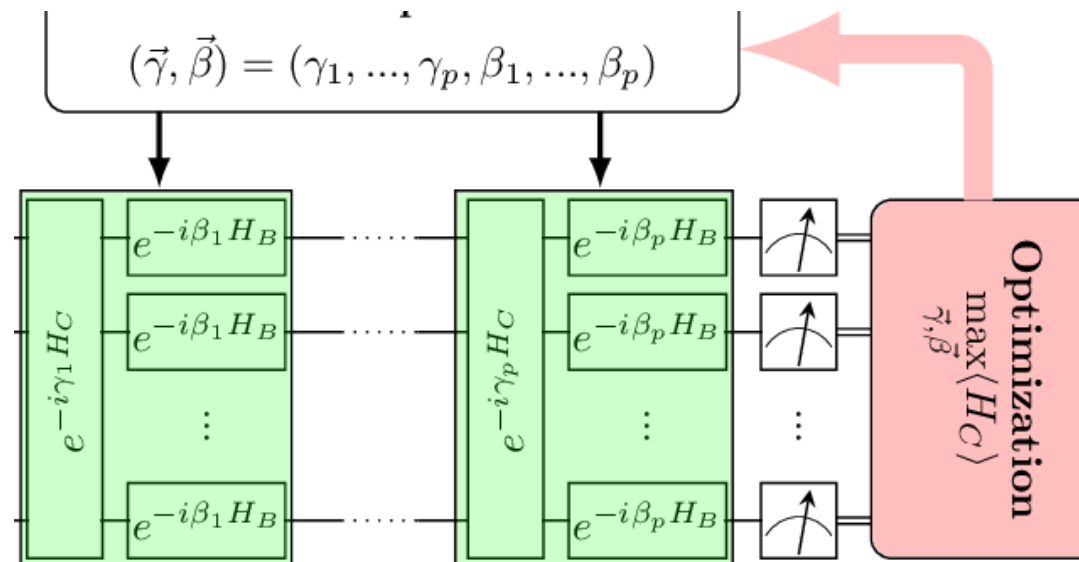


- Combina **computació quàntica** i **aprenentatge automàtic**
- Utilitza propietats com la **superposició** i l'**entrellaçament**
- Potencial per resoldre problemes d'IA de manera més eficient
- **QML = nous paradigmes d'entrenament, representació i predicció**
- Encara limitat per la tecnologia quàntica actual (soroll, pocs qubits)
- Enfocament híbrid clàssic-quàntic com a tendència dominant

- Xarxes neuronals implementades amb circuits quàntics
- Els **qubits actuen com a neurones** en superposició
- Portes quàntiques parametritzables = pesos entrenables
- Implementació habitual híbrida: la optimització dels paràmetres es fa clàssicament
- **Capacitat de representar estats complexos** de manera compacta
- Potencial per **millor generalització** i paral·lisme computacional
- Reptes: barren plateaus, soroll, escalabilitat



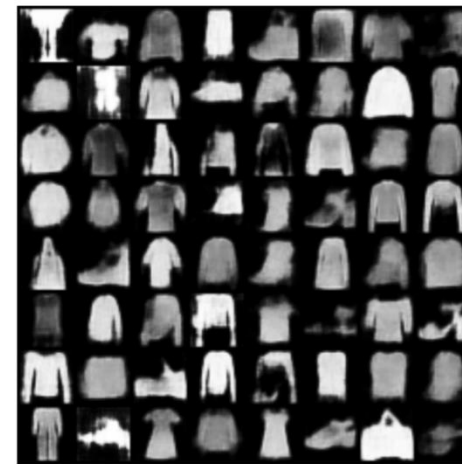
- Resol problemes d'**optimització combinatoria**
- Circuit amb capes alternades: cost + mescla
- **Paràmetres entrenats clàssicament**
- Aprofita superposició per explorar solucions
- Bons resultats en problemes com Max-Cut o spin glasses
- Apte per a logística, routing, optimització de recursos



- Adaptació quàntica dels **models generatius de difusió**
- Aprenen a desfer un procés de soroll progressiu
- Utilitzen circuits quàntics per simular la difusió
- Milloren sobre QGANs en fidelitat i estabilitat d'entrenament
- Poden generar **estats quàntics purs i mixtos**
- Aplicacions: simulació de sistemes físics, generació de dades quàntiques



(a)



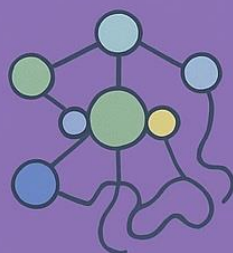
(b)

Generated images of Fashion MNIST: **a** generated by the classical architecture; **b** generated by the 4zQ architecture

(source: DOI: [10.1007/s42484-024-00224-6](https://doi.org/10.1007/s42484-024-00224-6))

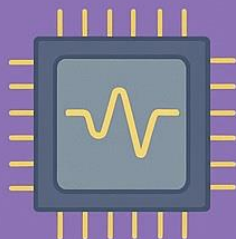


Pharmaceuticals & Healthcare: Molecules, Materials, and Medical Optimization



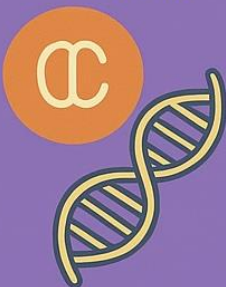
Drug discovery

- Simulate molecular binding and interactions accurately
- Predict candidate efficacy before costly lab testing



Protein folding & quantum biology

- Understand complex molecular dynamics at quantum level

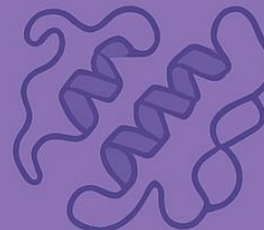


Medical materials

- Discover better compounds for implants, diagnostics, delivery systems

Healthcare operations

- Quantum optimization for scheduling, resource allocation, logistics



Genomics & data analysis

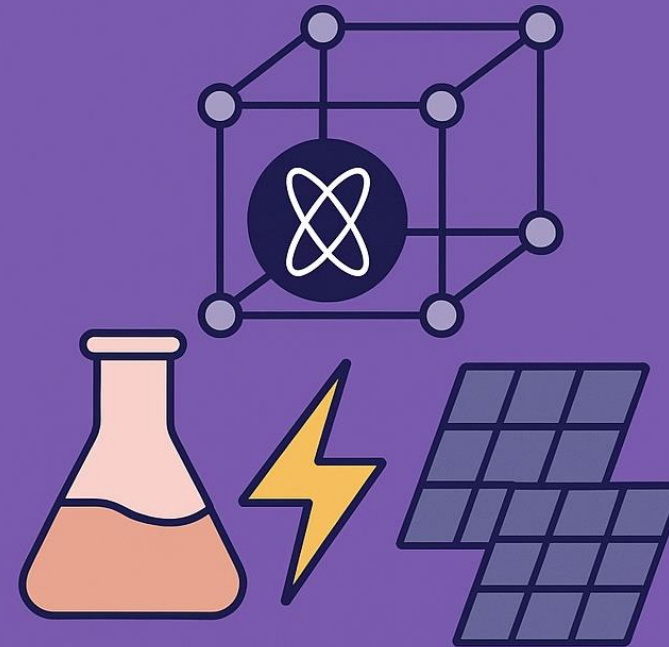
- Pattern detection in large genetic datasets using quantum ML



Leading interest from: Roche, Merck, GSK, Johnson & Johnson

Applications of Quantum Computing

- Energy and Materials
 - Quantum simulations for materials science and chemistry
 - Discovery of catalysts, better batteries, new superconductors
 - Optimize power grids, manage distribution



Logistics & Transportation

Optimizing Movement at Scale

Routing optimization:

- Solve complex problems like *Traveling Salesman*
- Efficiently route delivery trucks, cargo ships, flights

Scheduling:

- Optimize crew and vehicle assignments, maintenance slots
- Coordinate flight departures, port logistics, freight systems

Real-time decision making:

- Match supply and demand in ride-sharing, delivery (e.g. Uber, food delivery)
- Adapt to traffic, delays, weather with dynamic re-routing

Urban mobility & public transport:

- Improve transit networks, reduce congestion



Manufacturing: Smarter Design, Materials, and Supply Chains

Supply chain optimization

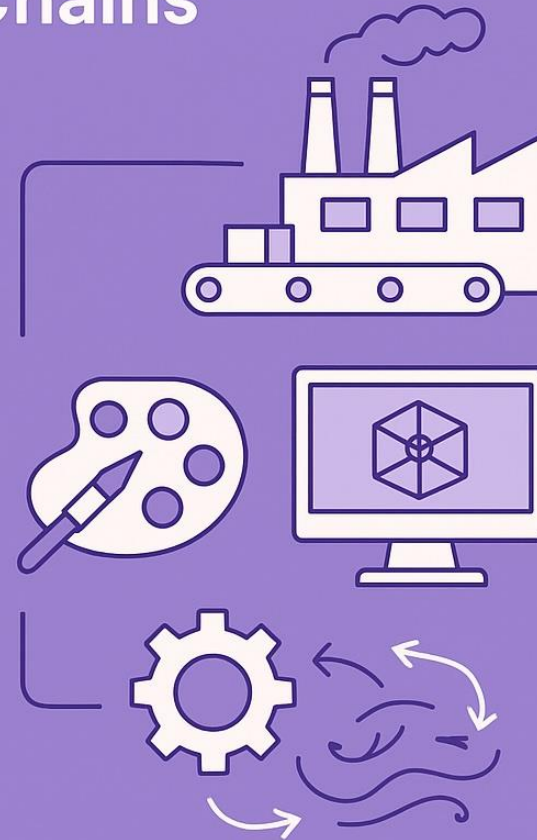
- Manage sourcing, production, inventory, and logistics efficiently
- Solve complex constraint-based planning problems

Industrial design

- Explore large design parameter spaces (e.g, aerodynamics, pipeline layouts)
- Quantum algorithms may help find better configurations faster

Multiphysics simulations

- Accelerate modeling of *fluid* dynamics, heat transfer, and mechanical stress
- Applications in aerospace, automotive, energy sectors





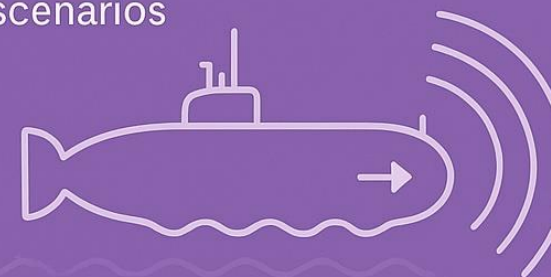
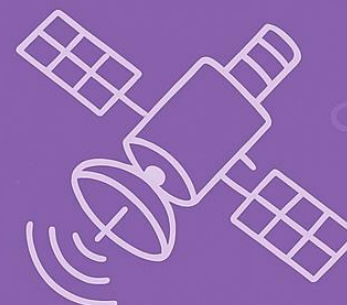
Defense & Security: Strategic Advantage and cryptographic Threats

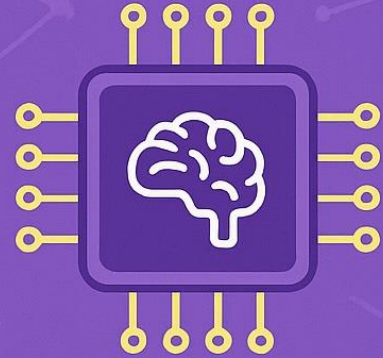


- **Cryptographic disruption:**
Shor's algorithm threatens RSA, ECC



- **Quantum-enhanced intelligence:**
Faster data analysis for pattern detection and code-breaking
- **Operational logistics & strategy:**
Optimize deployment of resources in complex scenarios
Improve mission planning under uncertainty
- **Quantum sensing:**
High-precision clocks, quantum radar, and
GPS-independent navigation





ARTIFICIAL INTELLIGENCE & BIG DATA

Smarter Models, Faster Insights

- **Quantum machine learning (QML)**
 - Use quantum circuits to represent complex data structures
 - Potential for faster model training, better expressivity
 - **Quantum-enhanced clustering & PCA**
 - Identify patterns in massive datasets more efficiently
 - **Big data analytics**
 - Process large-scale customer, sensor, or environmental data
 - Applications in marketing, climate science, finance
- Still early-stage but actively researched by Google, IBM, Amazon





Academic Research: Unlocking New Frontiers in Science

- Quantum physics & field theory
 - Simulate particle interactions, test high-energy physics models
- Astrophysics & cosmology
 - Explore early universe conditions, black hole dynamics, spacetime simulations
- Mathematics & algorithms
 - Discover new quantum algorithms, complexity theory insights
- Chemistry & biology
 - Study molecular dynamics, quantum effects in biological processes
- Quantum foundations
 - Experimental tests of quantum mechanics principles (e.g. non-locality, contextuality)



Academic institutions using quantum computing:
MIT, Caltech, Oxford, ETH Zurich, ICFO, and many more



"innovating with businesses"

Gràcies!

Adán Garriga
adan.garriga@eurecat.org

eurecat