

L'alba dei processori quantistici

Fisica, tecnologie, applicazioni



UNIVERSITÀ
DI PAVIA

Dario Gerace
&
Francesco Tacchino

Dipartimento di Fisica, Università di Pavia

Incontri del Martedì – Pavia, 30/10/2018

Su questo seminario



UNIVERSITÀ
DI PAVIA

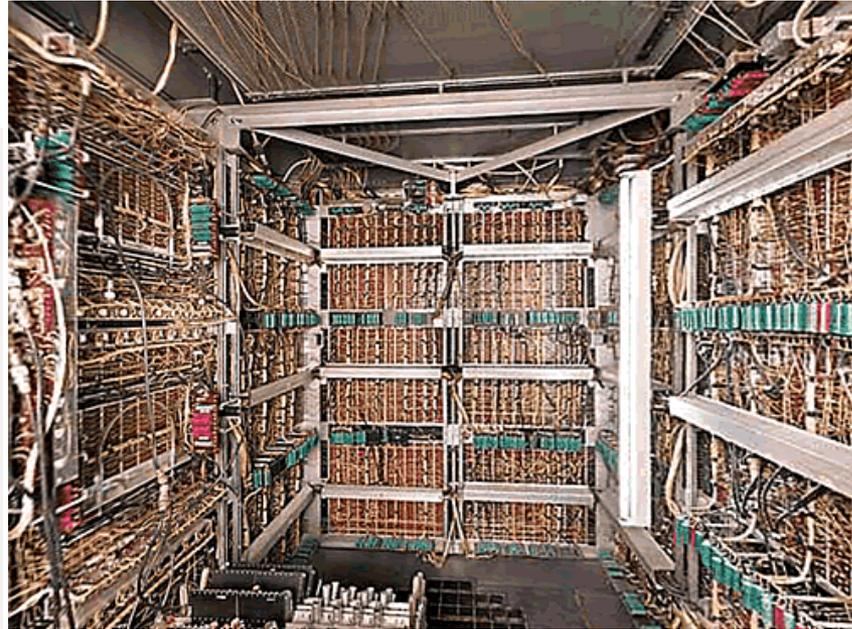
- **Premesse e motivazioni**
- **Fisica dei processori quantistici**
- **Tecnologie per processori quantistici**
- **Alcune applicazioni: “simulazioni quantistiche”**

Un po' di storia: l'alba dei calcolatori



UNIVERSITÀ
DI PAVIA

UNIVAC (~1951)



Qualche dato:

Velocità : 500 flops
(5×10^2 operazioni al
secondo)

Memoria :
circa 10^4 cifre o
caratteri alfabetici

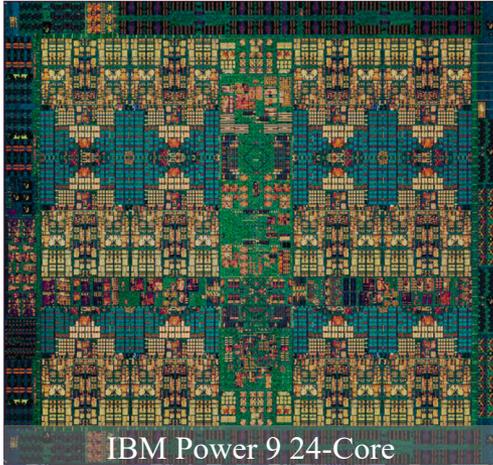
Consumo :
Alimentato con
125 kWatt

Oggi: l'era dei Supercomputers



UNIVERSITÀ
DI PAVIA

Singolo processore



IBM Power 9 24-Core

Ne contiene
2x4600 →

I.B.M. SUMMIT
– The World most powerful HPC –



Qualche dato:

Velocità:

200 PetaFlops
($2 \times 10^{17} \text{ s}^{-1}$)

RAM :

10 Pbytes (10^{16})

Alimentazione :

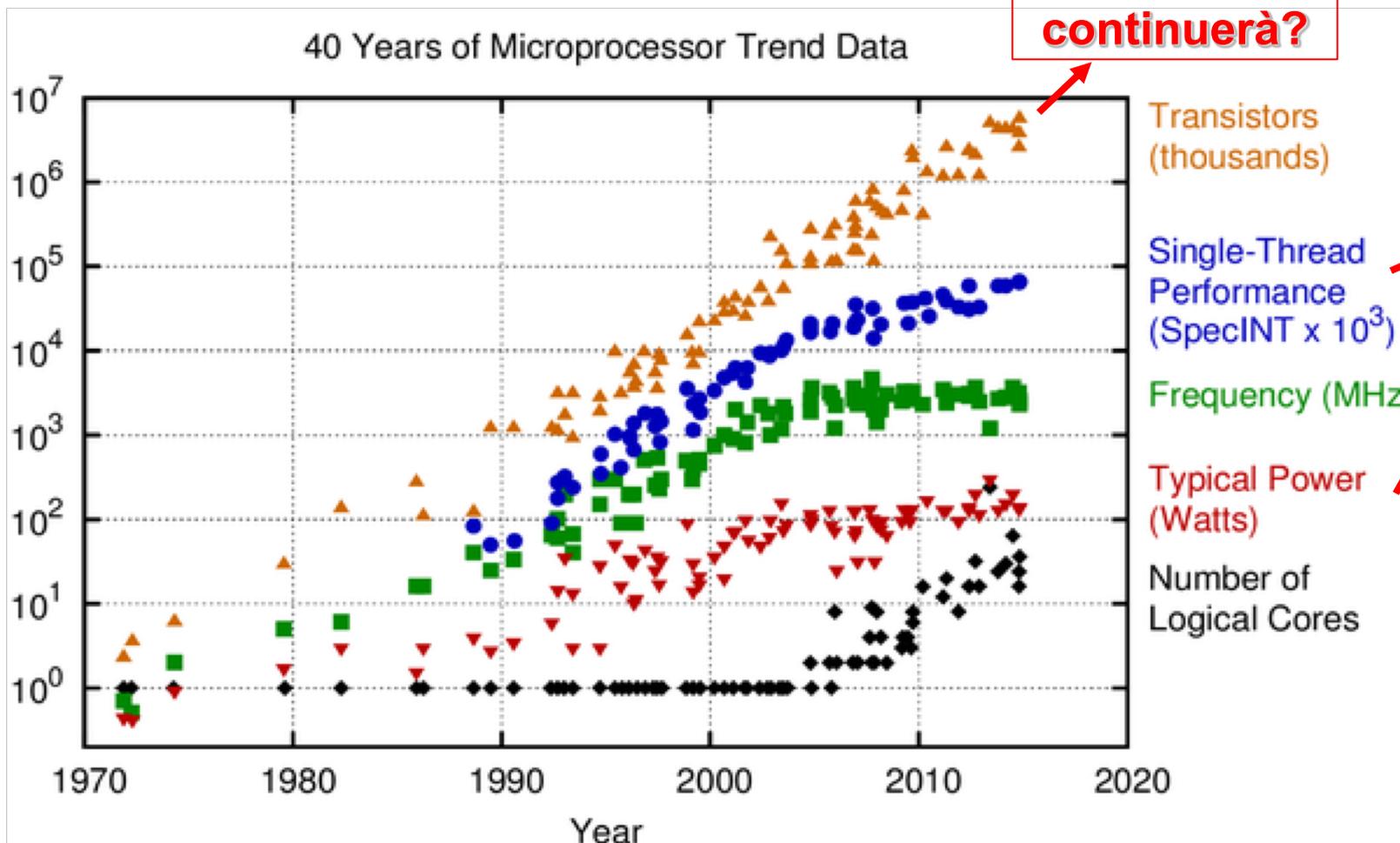
13 MWatts

Legge di Moore (Intel, ~1965)

“Il n. di componenti per chip raddoppia ogni 18 mesi”



UNIVERSITÀ
DI PAVIA



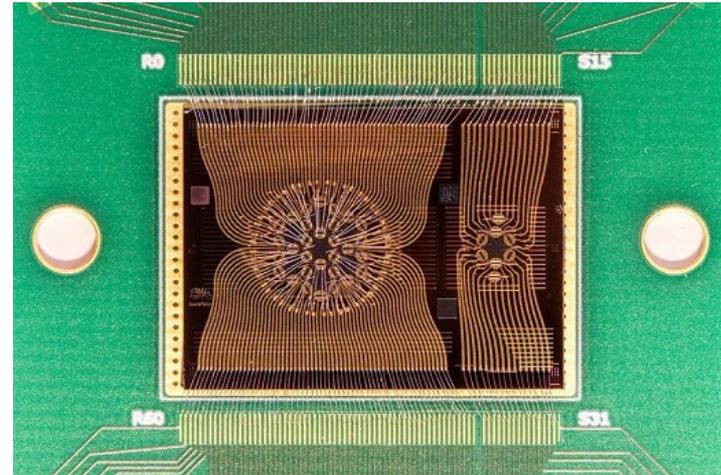
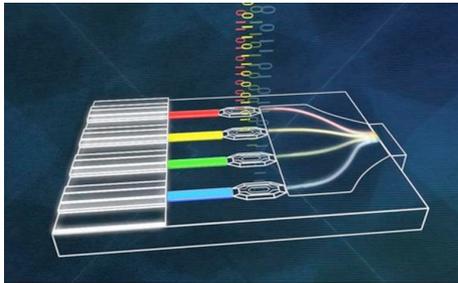
Original data up to the year 2010 collected and plotted by M. Horowitz, F. Labonte, O. Shacham, K. Olukotun, L. Hammond, and C. Batten
New plot and data collected for 2010-2015 by K. Rupp

Tecnologie alternative



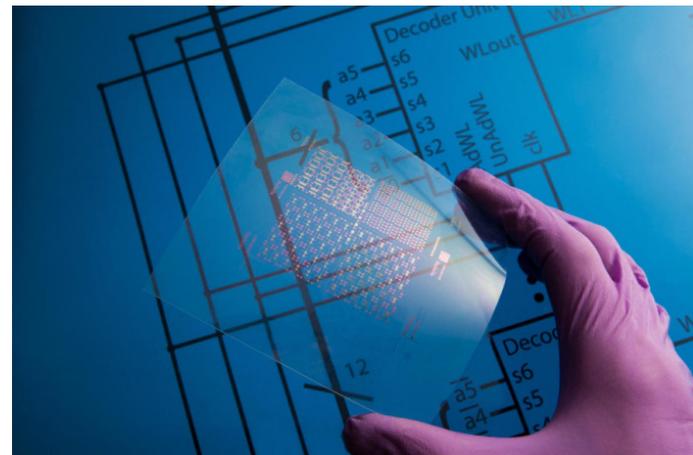
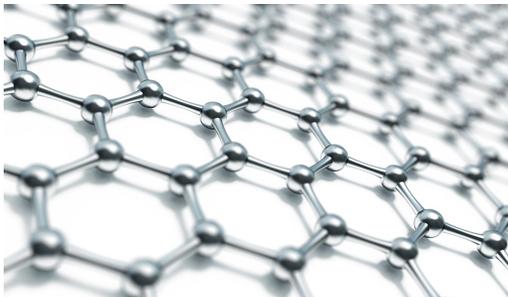
UNIVERSITÀ
DI PAVIA

➤ Fotonica integrata



Nature Comm., **8**, 636 (2017)

➤ Graphene electronics



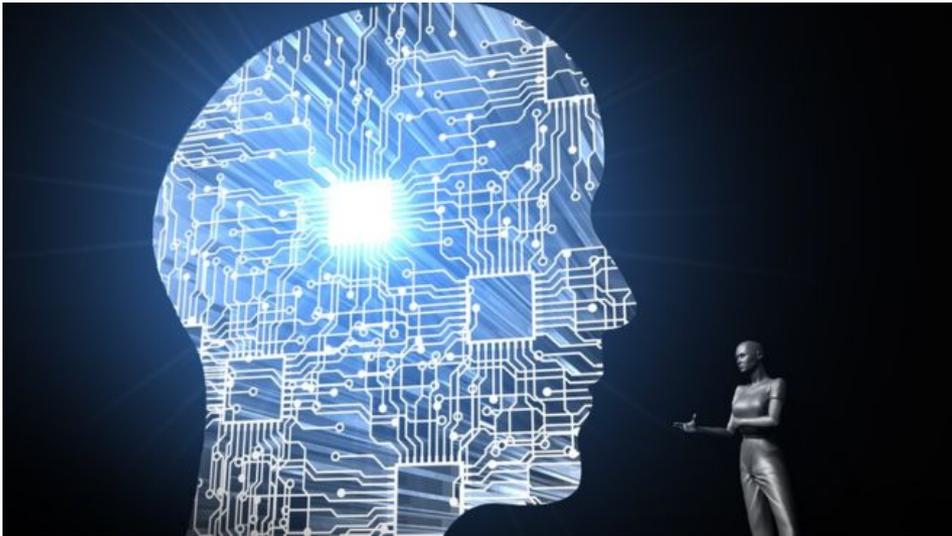
Elettronica flessibile

Oppure...

...nuovo paradigma: il processore quantistico!

Ovvero: un calcolatore digitale che sfrutti le leggi della Meccanica Quantistica

‘The race to make the World’s most powerful computer ever’



“Superfast quantum computers could speed up the discovery of new medicines, crack the most complex cryptographic security systems, design new materials, model climate change, and supercharge artificial intelligence, computer scientists say.”

Fonte: **BBC News**, Settembre 2018

<https://www.bbc.com/news/business-45273584>



UNIVERSITÀ
DI PAVIA

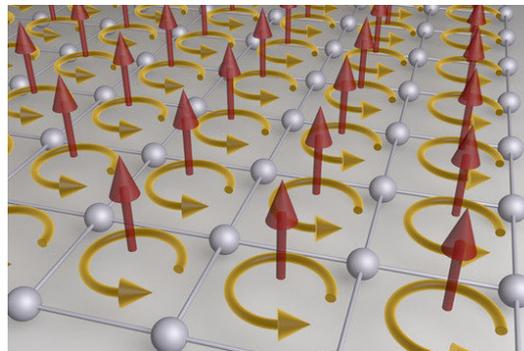
Impatto nel medio/lungo termine



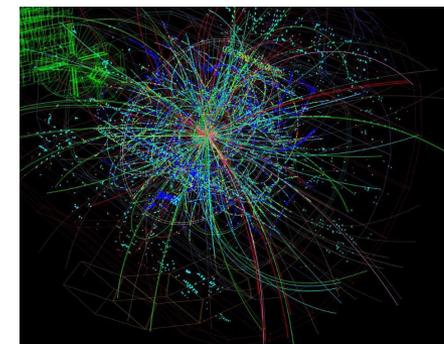
UNIVERSITÀ
DI PAVIA



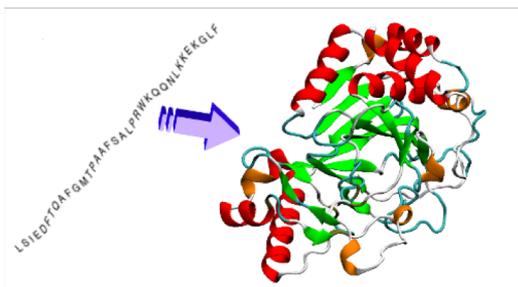
- **Crittografia**



- **Simulazioni di sistemi fisici**



- **Eventi rari @ CERN**



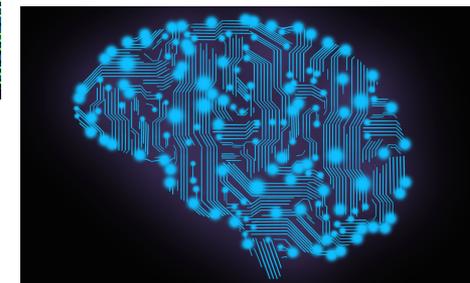
- **Protein folding**



- **Sequenziamento DNA**



- **Mercati finanziari**



- **Intelligenza artificiale**



UNIVERSITÀ
DI PAVIA

FISICA

dei Processori Quantistici

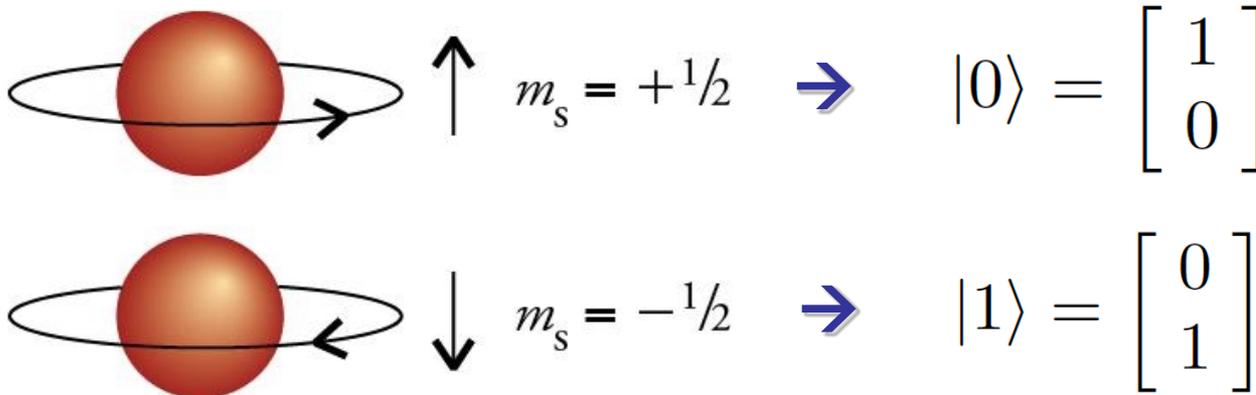
Bits & Qubits



UNIVERSITÀ
DI PAVIA

- Nei moderni processori digitali l'informazione viene codificata in stringhe di **bits 0 e 1**, in base binaria
- In un processore quantistico la base logica di codifica è costituita da **quantum bits (qubits) $|0\rangle$ e $|1\rangle$**

Esempio: particella con spin-1/2



Il Qubit e le sue proprietà

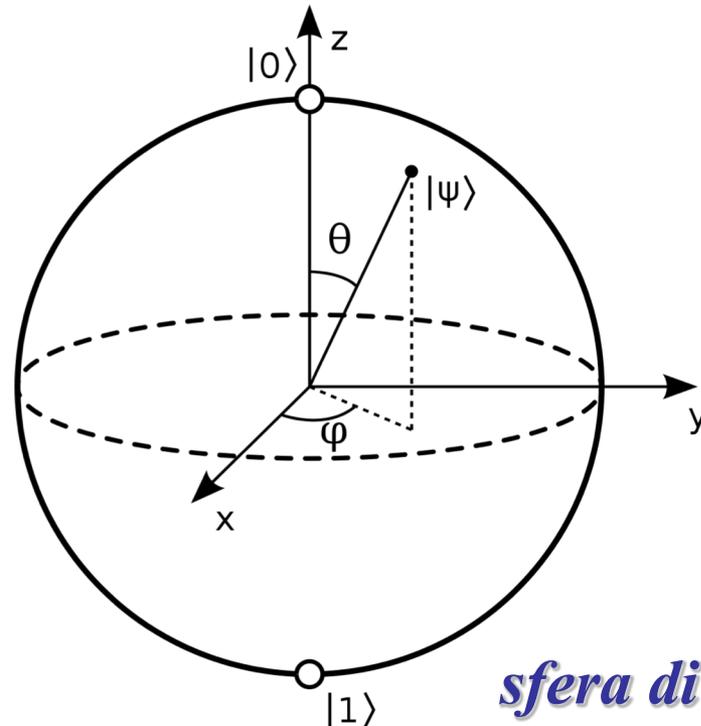


UNIVERSITÀ
DI PAVIA

- **Sovrapposizione**

$$|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$$

$$a, b \in \mathbb{C}$$



sfera di Bloch

- **Misura**

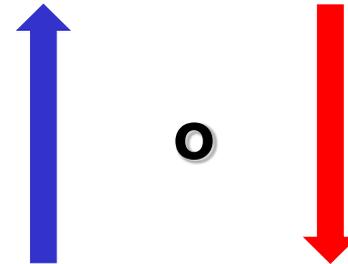
→ ciascun qubit è 'proiettato' su $|0\rangle$ o su $|1\rangle$ con probabilità $|a|^2$ e $|b|^2$ rispettivamente

Ad esempio...

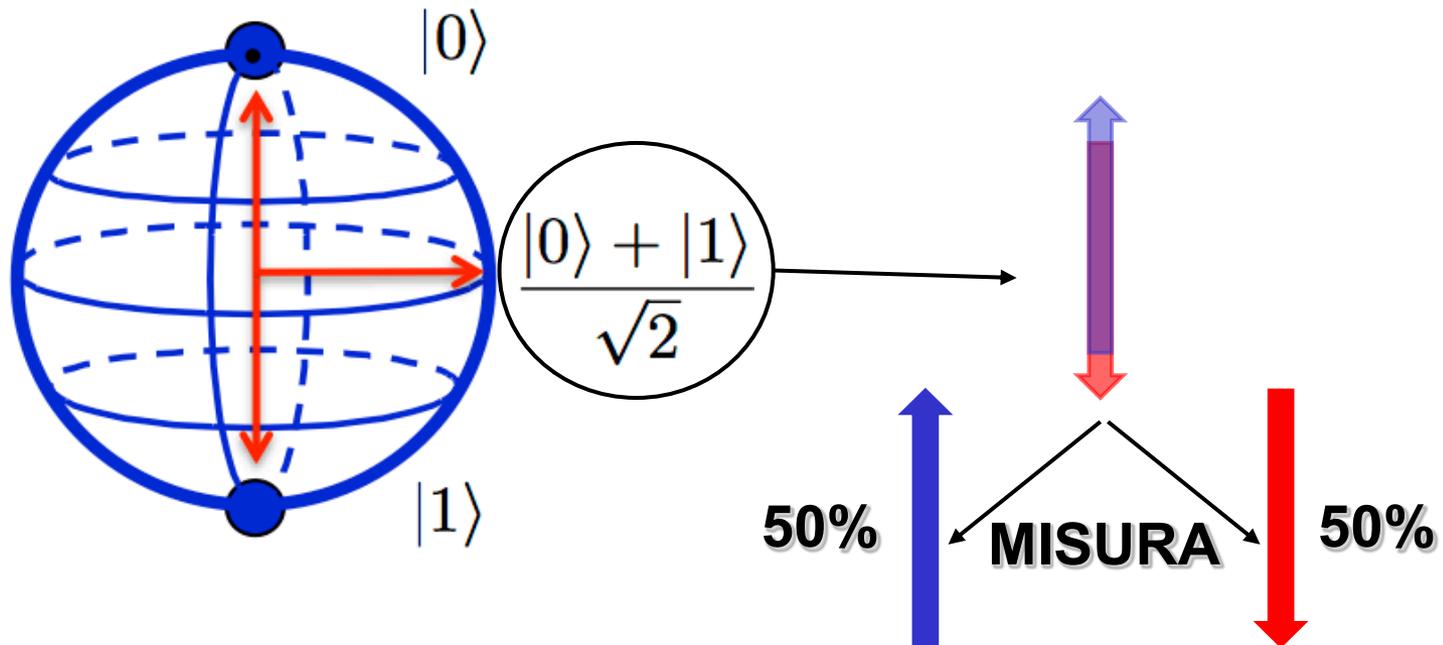


UNIVERSITÀ
DI PAVIA

Bit classico:
freccia su oppure **freccia giù**



Qubit: freccia su/giù



Memorizzare lo stato di molti qubits

1 qubit

$$a|0\rangle + b|1\rangle$$

2 numeri complessi

2 qubits

$$a|00\rangle + b|10\rangle + c|01\rangle + d|11\rangle$$

4 numeri complessi

3 qubits

$$a|000\rangle + b|100\rangle + c|010\rangle + d|001\rangle + e|110\rangle + f|101\rangle + g|011\rangle + h|111\rangle$$

8 numeri complessi



Vantaggi esponenziali!

- Numero di bit*/qubit richiesti per immagazzinare uno stato quantistico con coefficienti complessi:



UNIVERSITÀ
DI PAVIA

	bytes classici	qubits
1 SPIN-1/2	$8 \times 2^1 = 16 \text{ B}$	1
2 SPIN-1/2	$8 \times 2^2 = 32 \text{ B}$	2
3 SPIN-1/2	$8 \times 2^3 = 64 \text{ B}$	3
...
30 SPIN-1/2	$8 \times 2^{30} \sim 8 \text{ GB}$	30
...
50 SPIN-1/2	$8 \times 2^{50} \sim 8 \text{ PB}$	50
...
270 SPIN-1/2	$8 \times 2^{270} > 10^{82} \text{ Bytes !}$	270

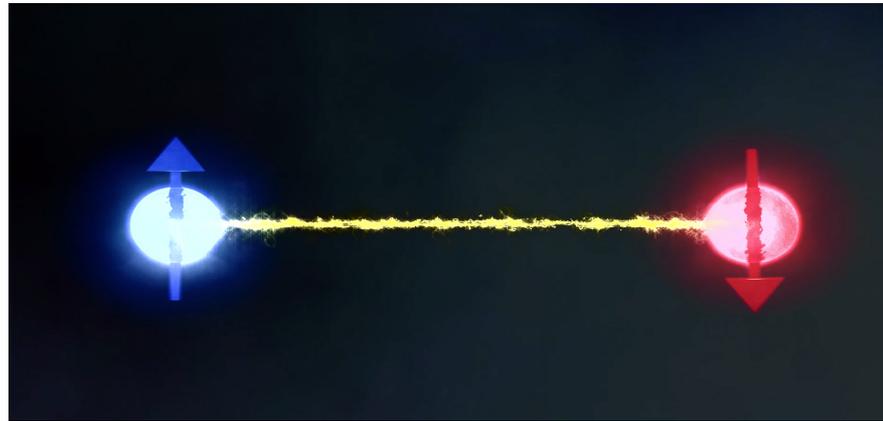
*assumendo 64 bit per ogni numero complesso (i.e. 8 bytes)

Il Qubit e le sue proprietà

- **Entanglement**

uno stato di due qubits del tipo $|\psi\rangle = \frac{|0, 1\rangle \pm |1, 0\rangle}{\sqrt{2}}$

non può essere ottenuto come prodotto di due stati di singoli qubits → si dice 'entangled'



In pratica: uno stato entangled descrive il sistema nel suo complesso e non può essere scomposto nella descrizione delle sue singole parti



Entanglement e velocità di elaborazione



UNIVERSITÀ
DI PAVIA

**Pagine con
correlazioni
classiche**



**Pagine
entangled**



Un processore quantistico sfrutta l'entanglement per svolgere operazioni molto più velocemente ('quantum speedup')



UNIVERSITÀ
DI PAVIA

(Nano)TECNOLOGIE per la computazione quantistica

Criteri di DiVincenzo (IBM, 1998)

Una architettura digitale si potrà definire “processore quantistico universale” se:

- Dispone di qubits ben definiti e arbitrariamente scalabili in numero;
- I qubits sono inizializzabili individualmente a uno stato arbitrario;
- Dispone di un set universale di porte logiche (gates) quantistiche;
- I gates durano tempi più brevi della decoerenza;
- Lo stato individuale di ciascun qubit può essere ‘letto’ in ogni momento.

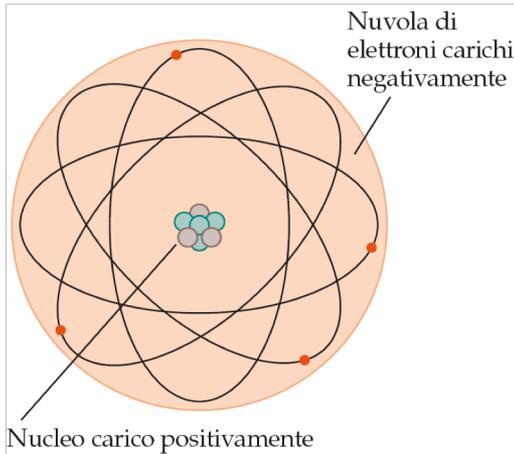


Qubits naturali

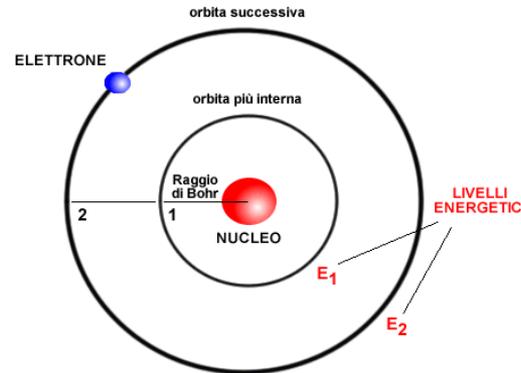


UNIVERSITÀ
DI PAVIA

➤ Atomi, ioni, molecole



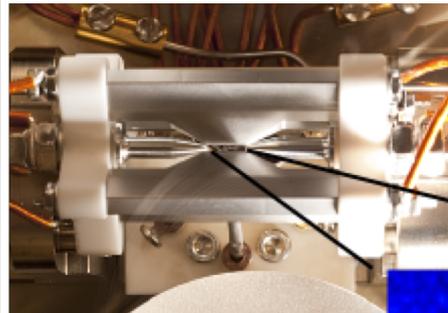
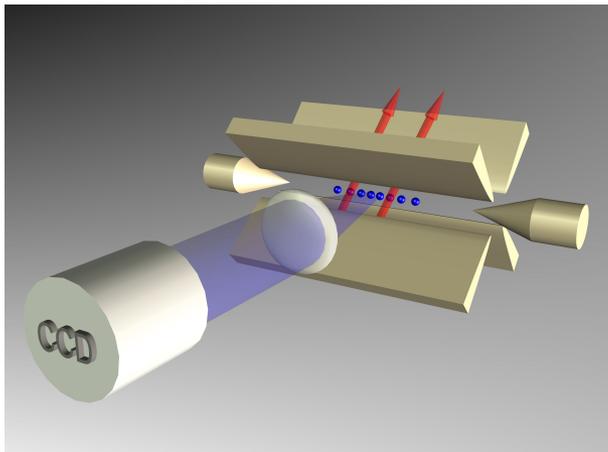
atom qubit



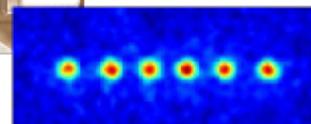
$|0\rangle =$ Elettrone in 1

$|1\rangle =$ Elettrone in 2

➤ Processori quantistici a ioni intrappolati



Tecniche di controllo e manipolazione avanzate, ma poco scalabili

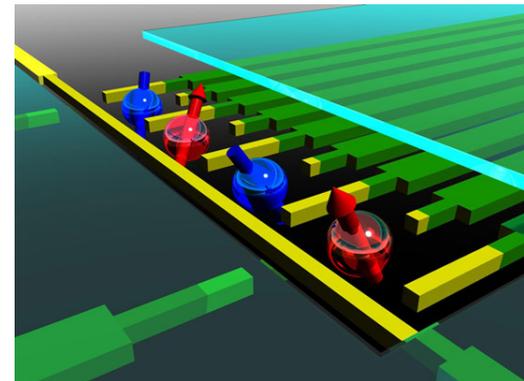
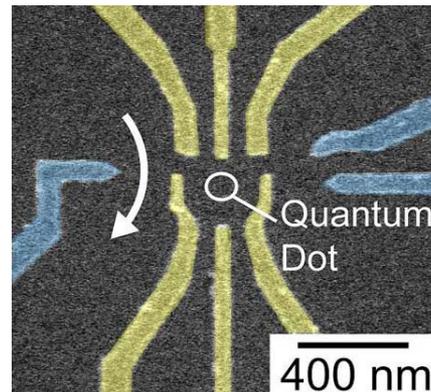


Qubits in sistemi nanostrutturati

In alternativa: realizzare sistemi artificiali che abbiano proprietà atomiche, ovvero **'atomi artificiali'**, che possano essere controllati e manipolati su un chip elettronico

➤ Elettroni confinati in nanostrutture → Atomi artificiali

Quantum dots di
semiconduttore
come qubits
artificiali



Piattaforma per
quantum computing

Per saperne di più ?

→ corso di **Nanostrutture di Semiconduttori, L.M., II sem.**

Qubits in circuiti superconduttivi (SC)

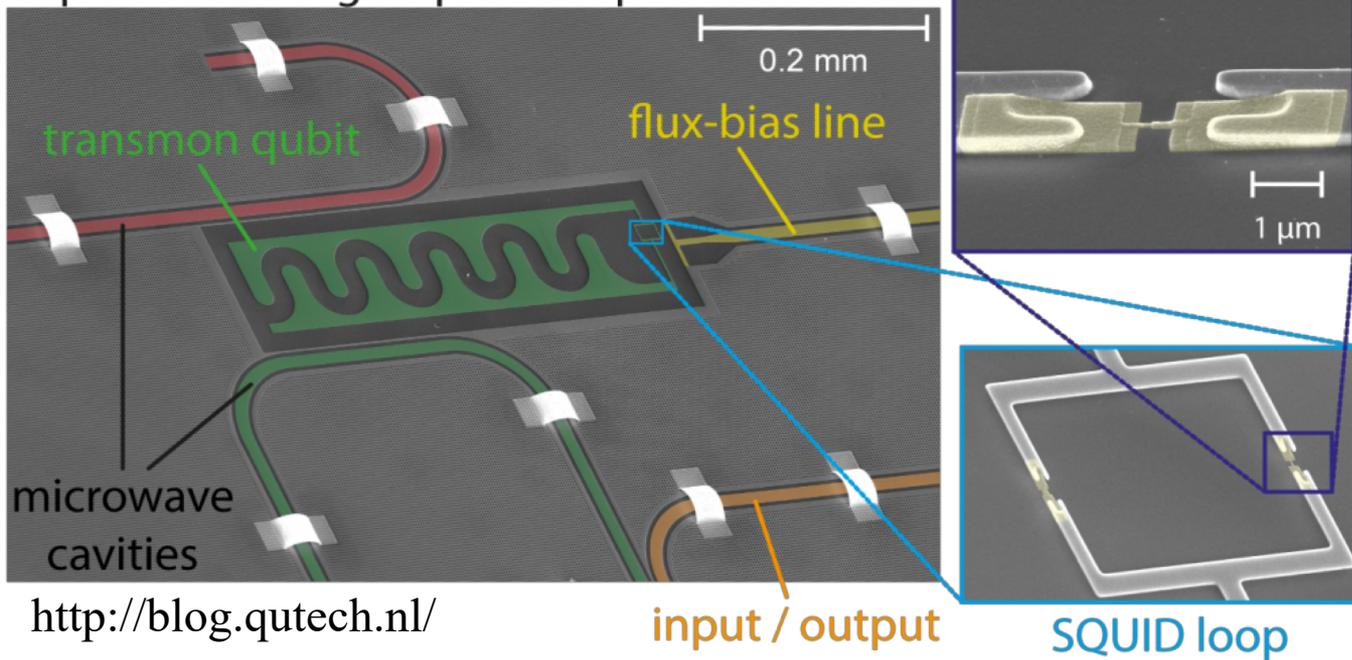
Atomi artificiali in circuiti superconduttivi

→ scelta tecnologica preferenziale come qubits



UNIVERSITÀ
DI PAVIA

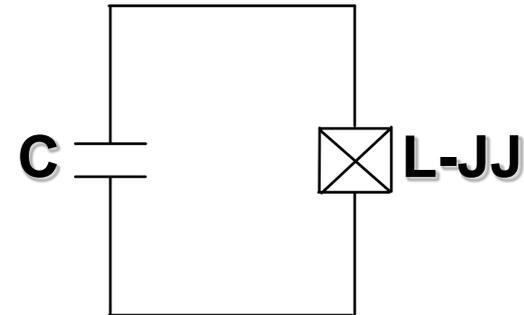
superconducting chip close up:



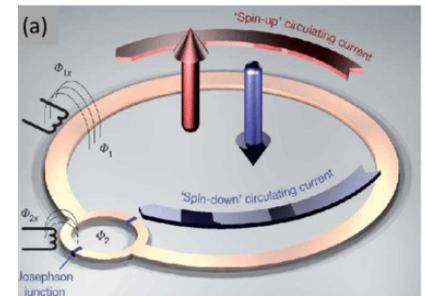
<http://blog.qutech.nl/>

- Temperatura **10-15 mK**
- Tempi di coerenza **~50-100 μ s**
- Frequenze di operazione **1-5 GHz**

Circuito LC
nonlineare



= SC Qubit



Processori quantistici operanti con tecnologia superconduttiva



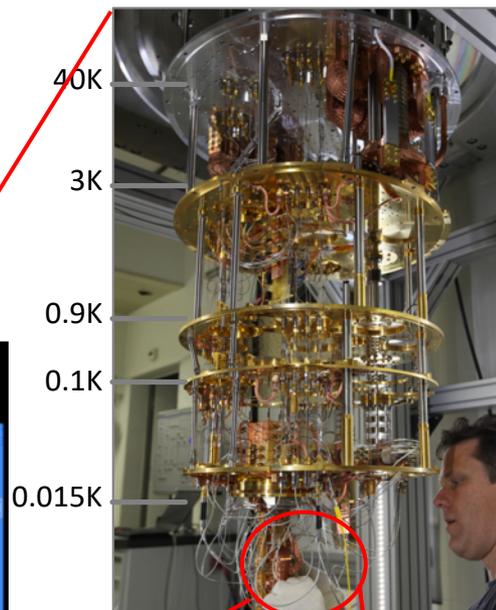
UNIVERSITÀ
DI PAVIA

Electronica microonde



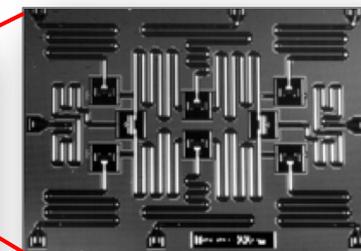
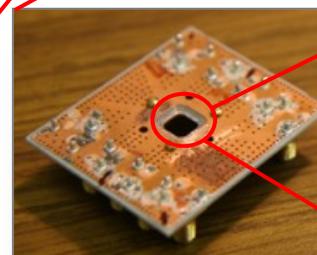
IBM

Q

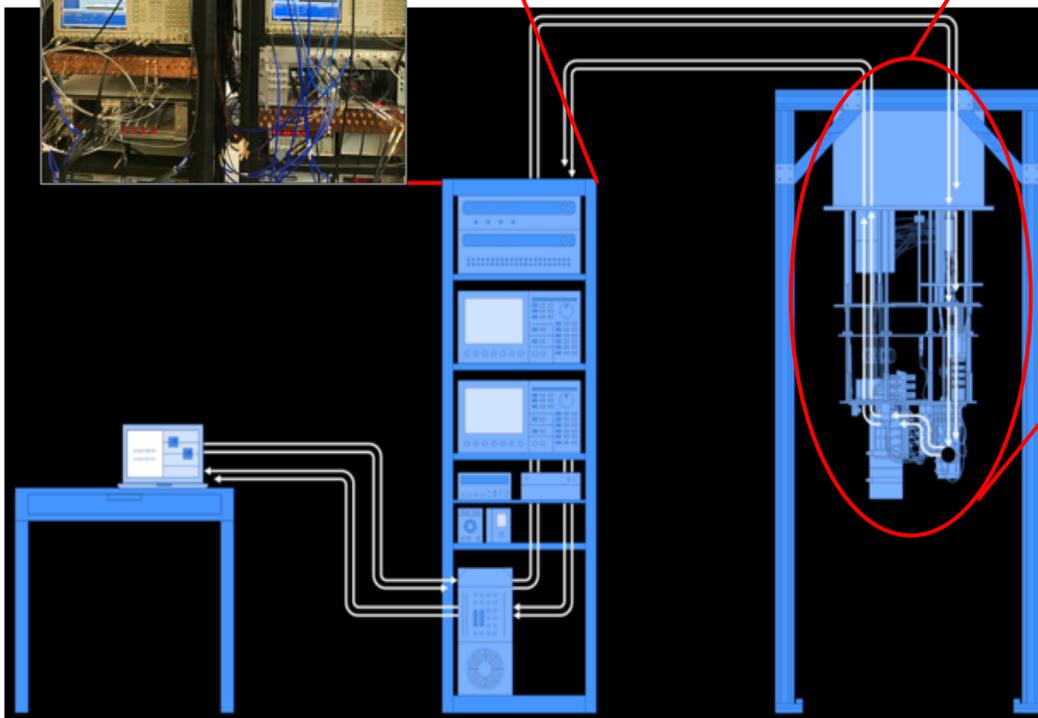


Criostato a diluizione $^3\text{He}/^4\text{He}$, per raffreddare fino a 10 - 15 mK

Quantum processor



Board con chip SC schermato da influenze e.m. esterne



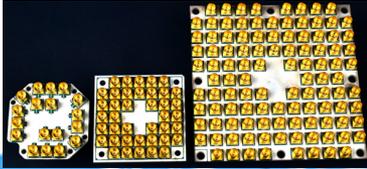
Mappa dello sviluppo di processori quantistici a superconduttore



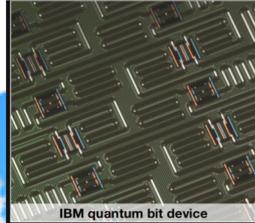
UNIVERSITÀ
DI PAVIA



49 qubits



20 qubits



CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

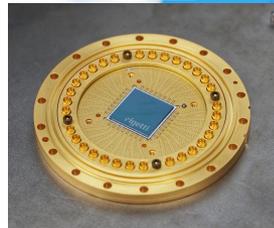


Google

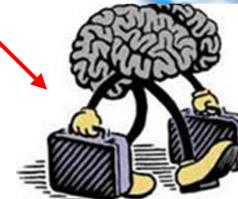


72 qubits (claim)

rigetti



19 qubits

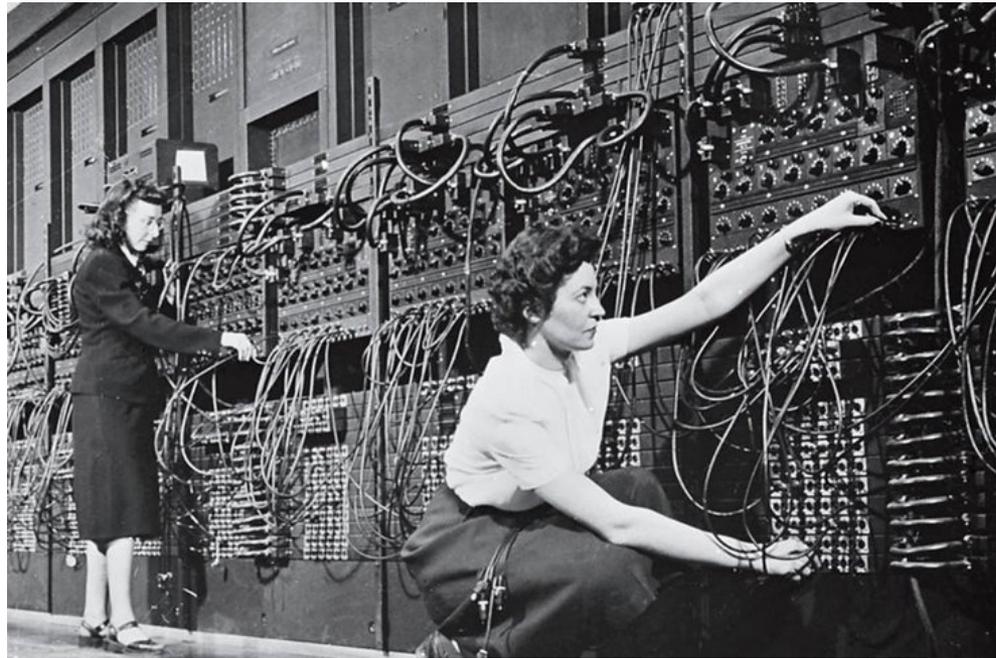


Da UNIVAC a IBM-Q



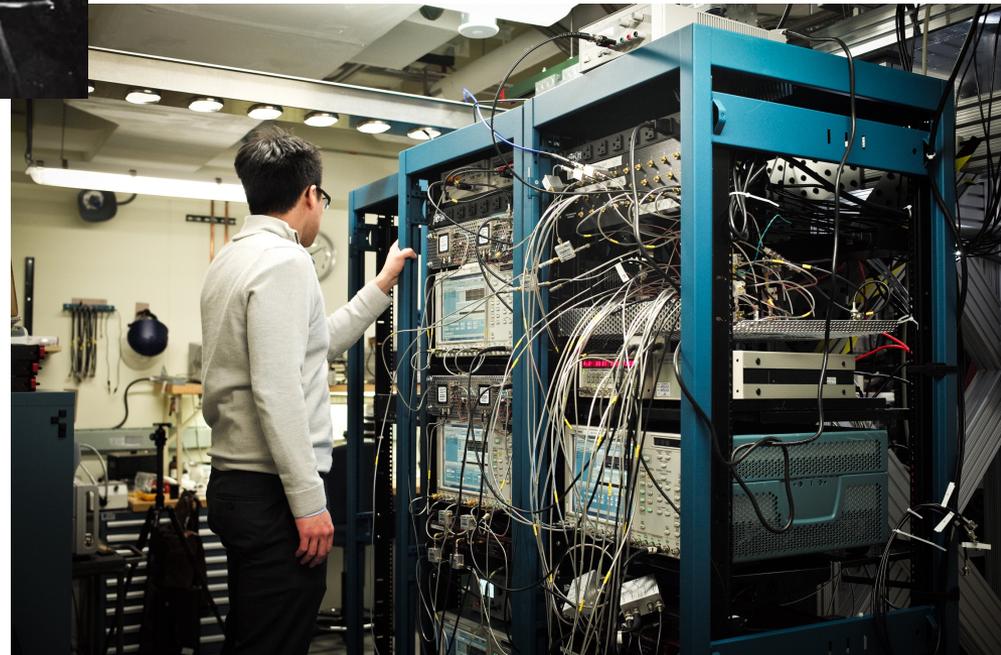
UNIVERSITÀ
DI PAVIA

UNIVAC (~1950)



Cloud quantum computing

IBM-Q (2016)





UNIVERSITÀ
DI PAVIA

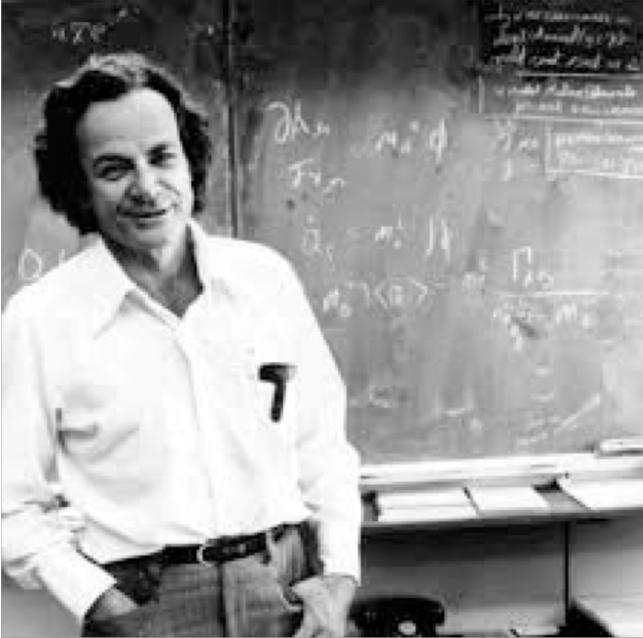
APPLICAZIONI:

**Simulazioni quantistiche
di modelli complessi**

Quantum Simulations



UNIVERSITÀ
DI PAVIA



“...Nature isn't classical, ..., if you want to make a simulation of Nature, you'd better make it quantum mechanical!”

In summary:

“Let the computer itself be built of quantum mechanical elements which obey quantum mechanical laws.”

R. Feynman, 1982

Cloud quantum computing @ IBM-Q



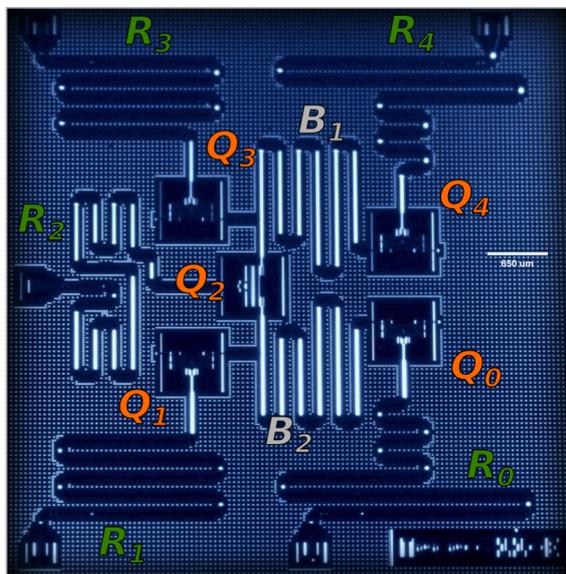
UNIVERSITÀ
DI PAVIA

IBM

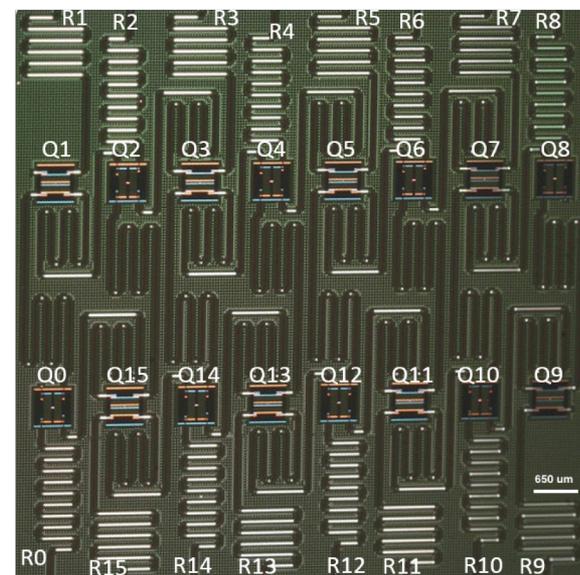
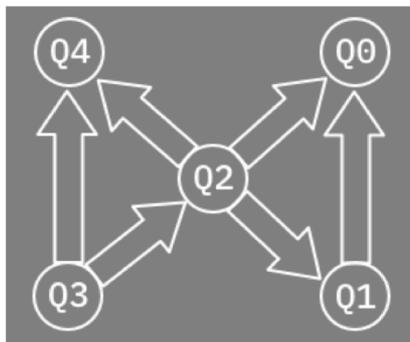
Q

- La **IBM Quantum Experience** mette liberamente a disposizione chip a 5-qubit & 16-qubit on line
- Un chip a 20 qubit è già disponibile ai partner di IBM (\$\$\$)
- Un chip da 50 qubit è atteso entro fine anno

Ad oggi è un'opportunità unica di provare veri processori quantistici on cloud



$$T_1 \approx 40 - 100 \mu s$$
$$T_2 \approx 20 - 80 \mu s$$

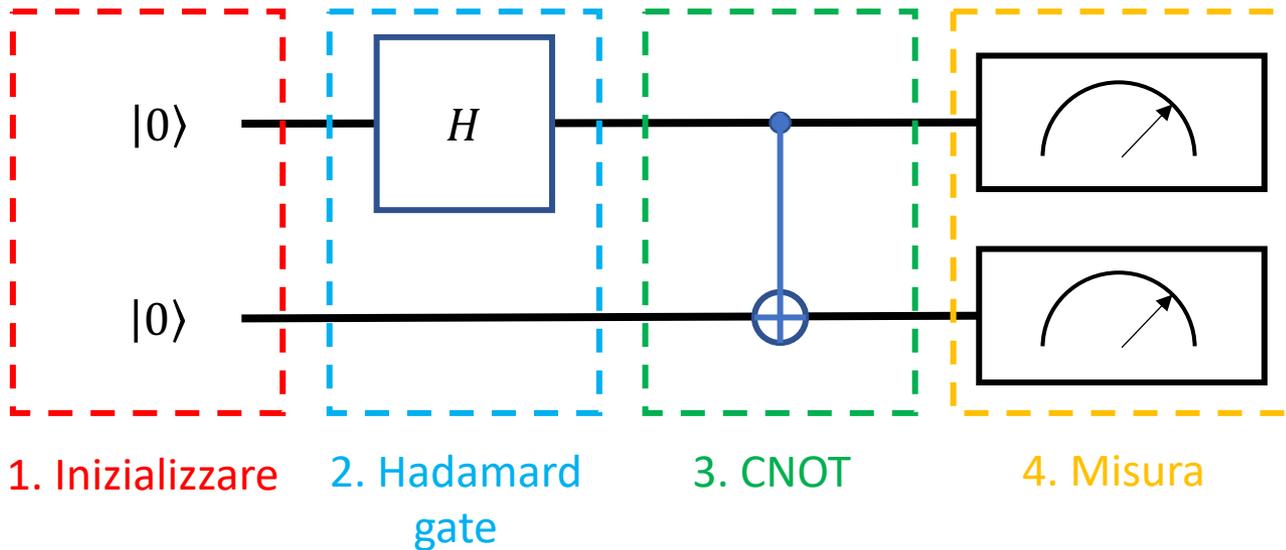


Programmare un quantum computer



UNIVERSITÀ
DI PAVIA

Obiettivo: generare uno stato entangled per due qubit $|\psi\rangle = \frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}}$



Cosa succede ai qubit:

$$|0\rangle|0\rangle \longrightarrow \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}} |0\rangle \longrightarrow \frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}} \longrightarrow \begin{array}{l} 00: 50\% \\ 11: 50\% \end{array}$$

Quantum Experience per tutti



UNIVERSITÀ
DI PAVIA

<https://quantumexperience.ng.bluemix.net/qx/experience>

IBM Q Experience

https://quantumexperience.ng.bluemix.net/qx/experience

Amazon.it Microsoft Ubi Banca PayPal It GitLab.com Gmail La Stampa The Economist Corriere della Sera La Repubblica.it Internazionale IBM Q experience Quanta Magazine

IBM Q Network Technology Learn Community Sign In

Hello Quantum

Resume Scorecard How to Play About

Hello Quantum →
Explore the building blocks of quantum mechanics through puzzles.

Welcome to the IBM Q Experience!

Explore the world of quantum computing! Check out our User Guides and interactive Demos to learn more about quantum principles. Or, dive right in to create and run algorithms on real quantum computing hardware, using the Quantum Composer and QISKit software developer kit.

Start experimenting with a quantum computer

Introducing the IBM Q Experience for Researchers

Visibility for your papers

Priority access to devices

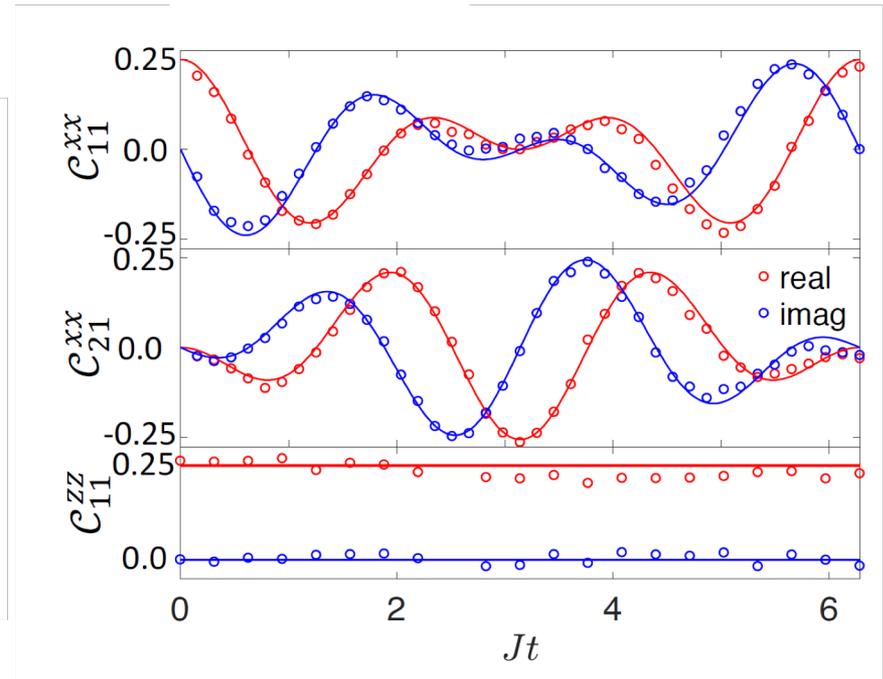
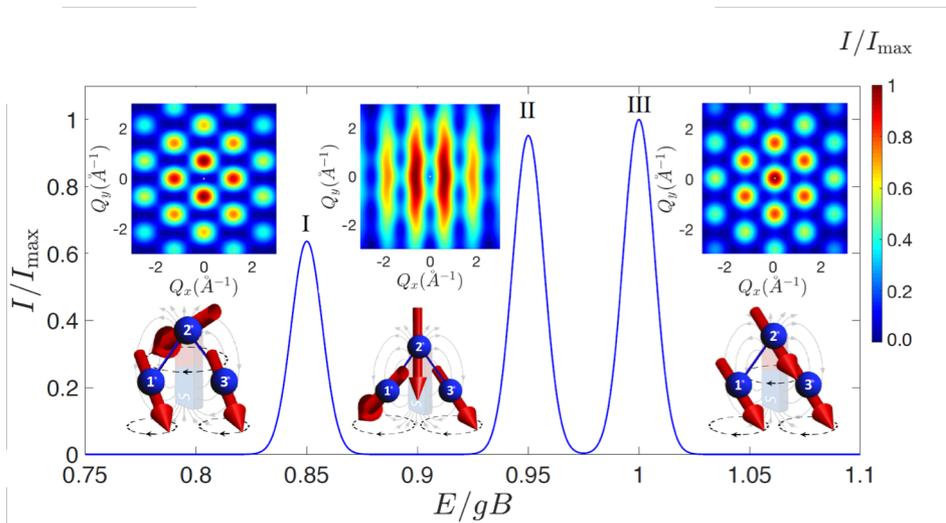
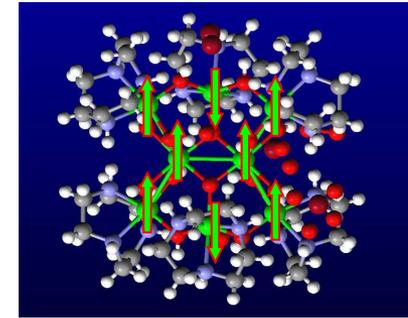
light

Cookie Preference

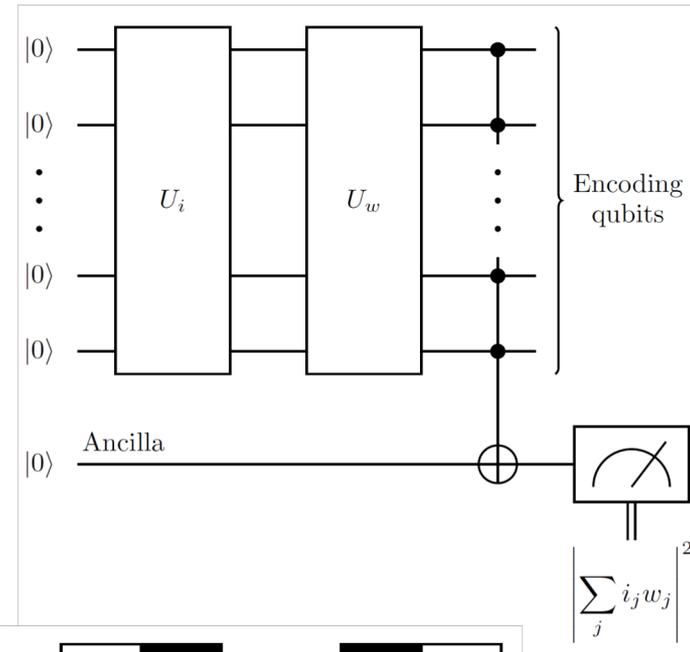
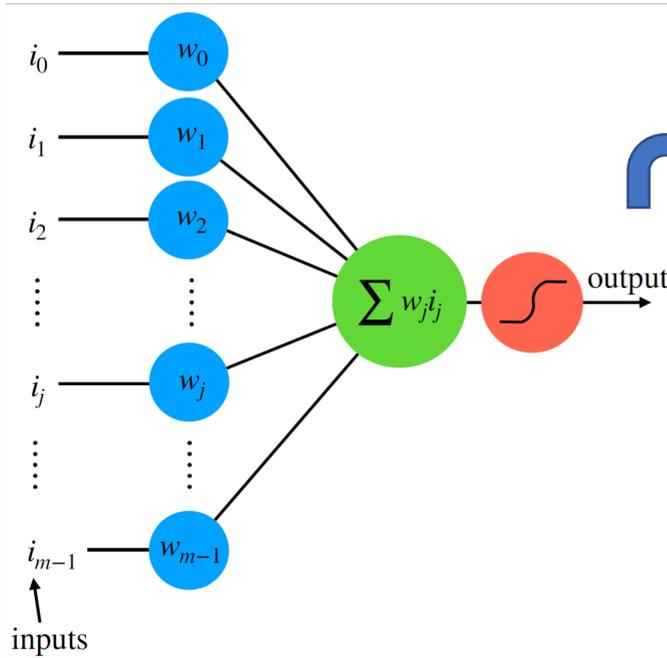
A community built for individuals who actively contribute to the advancement of the field through

I nostri primi contributi: Dai neutroni...

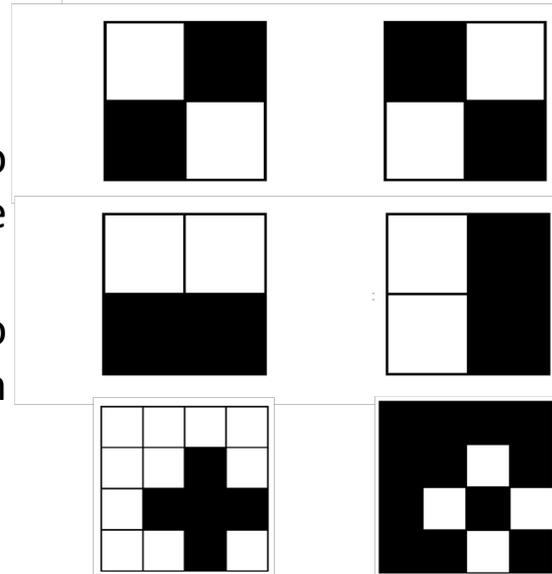
- **Obiettivo:** Studiare le proprietà di sistemi magnetici attraverso lo scattering di neutroni.
- **Problema:** Più il sistema è grande (es. molecole con molti centri magnetici), più è computazionalmente difficile simularne le proprietà dinamiche.
- **Con il quantum hardware:** simulazione quantistica digitale delle correlazioni dinamiche e fit della sezione d'urto.



...ai neuroni



- Il **perceptrone** è un modello di calcolo ispirato ai neuroni alla base delle moderne applicazioni di Artificial Intelligence.
- È un **classificatore** che può essere usato per analisi di immagini e pattern recognition.



Prospettive



UNIVERSITÀ
DI PAVIA

- Siamo probabilmente all'alba di una nuova stagione nella storia della ricerca scientifica computazionale



“N.I.S.Q.” era = Noisy Intermediate-Scale Quantum computing

- Saranno richieste figure professionali con competenze interdisciplinari e abilità di “quantum programming”

Messaggi finali



UNIVERSITÀ
DI PAVIA

- **Quantum simulation (tesi teoriche), anche in collaborazione con altri docenti**
- **Collaborazioni dirette con IBM (progetti LM+)**
news.unipv.it/?page_id=9670
- **UNIPV è in prima fila su Quantum Computing e Quantum Simulations**



Corso di Quantum Computing per PhD:

<http://fisica.unipv.it/dottorato/corso-quantum-computing.htm>