



UNIVERSITÀ
DI TRENTO

Dipartimento di
Fisica

Quantum Computing - parte 1

Un'introduzione sparsa,
incompleta e arbitraria

Edoardo Ballini, PhD Student



Un'approssimazione
di ordine zero



Bit classico e informazione

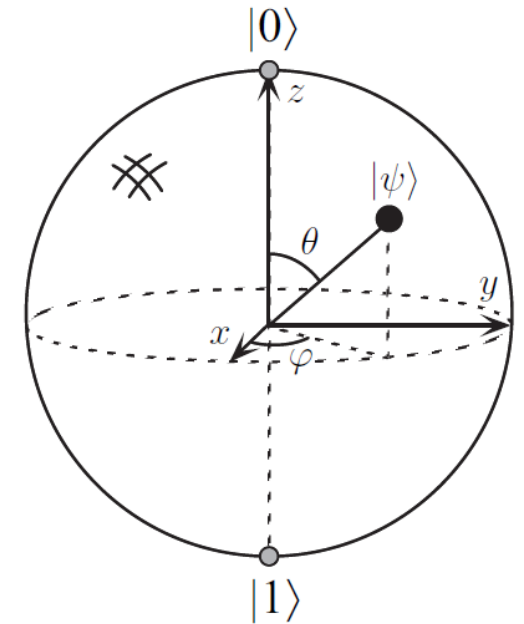
- L'unità di informazione nell'informatica e nel calcolo classico è rappresentata dal bit, un valore logico che può essere «0» o «1».
- Informazione trasportata attraverso fili e processata tramite porte logiche
- Gate logici: NOT: $0 \rightarrow 1, 1 \rightarrow 0$

Quantum bit, il Qubit

- Naturale estensione quantistica del bit;
- Sovrapposizione di «0» e «1»;
- $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$

$$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \rightarrow \cos\frac{\theta}{2}|0\rangle + e^{i\varphi}\sin\frac{\theta}{2}|1\rangle$$

- Tecnicamente, può essere implementato con un qualsiasi sistema quantistico a due livelli
- Un quantum NOT agirà $X(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) = \alpha|1\rangle + \beta|0\rangle$



Perché complicarsi la vita? Limiti del classico presenti e futuri

Legge di Moore (1965)

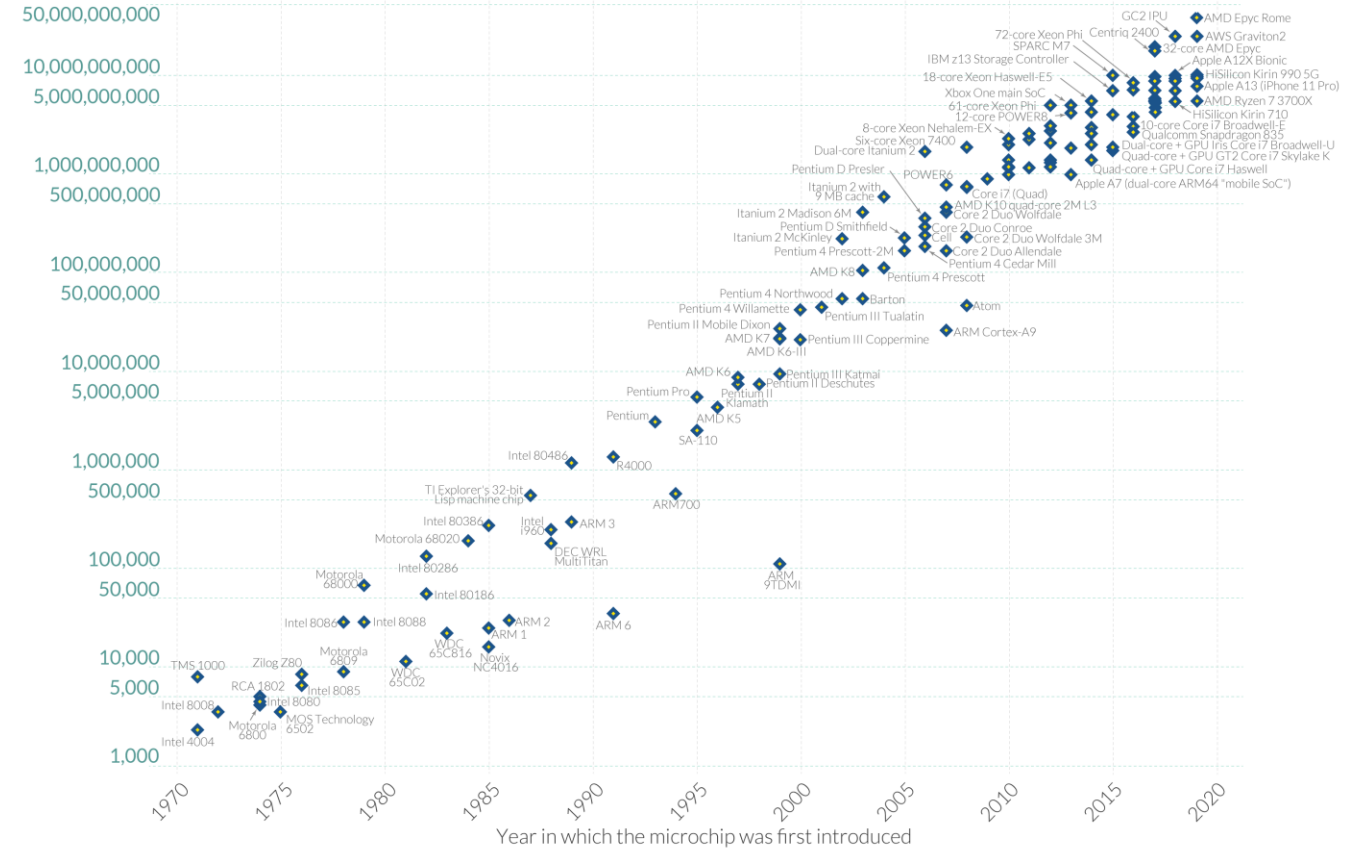
- «La complessità di un microcircuito, misurata ad esempio tramite il numero di transistor per chip, raddoppia ogni 18 mesi (e quadruplica quindi ogni 3 anni).»

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



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



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.

Perché complicarsi la vita? Limiti del classico presenti e futuri

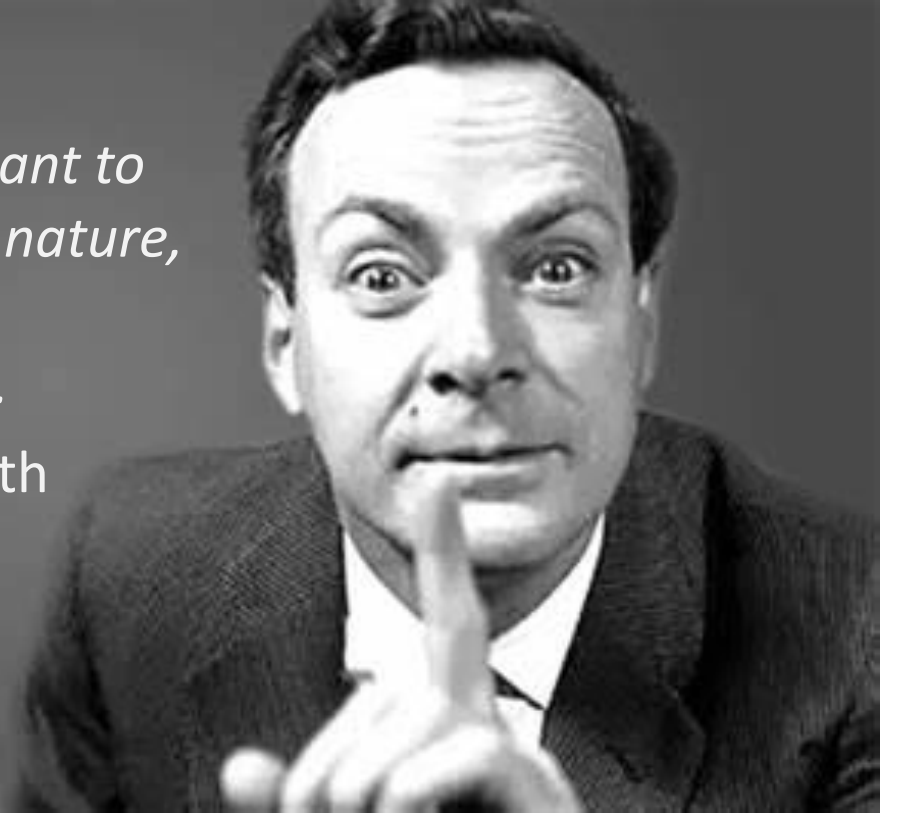
- Soluzioni in tempo polinomiale a molti problemi interessanti non sono note;
- La dimensione di sistemi fisici many body aumenta esponenzialmente
- Le grandezze in gioco nei processori attuali iniziano ad essere della scala atomica;

Perché complicarsi la vita? Limiti del classico presenti e futuri

- Soluzioni in tempo polinomiale a molti problemi interessanti non sono note;
- La dimensione di sistemi fisici many body aumenta esponenzialmente
- Le grandezze in gioco nei processori attuali iniziano ad essere della scala atomica;

Nature isn't classical, dammit, and if you want to make a simulation of nature, you'd better make it quantum mechanical.

Simulating Physics with Computers, 1982



Due cose sono infinite: lo spazio di Hilbert e la stupidità umana – semicit.

- Catena di n particelle di spin- $\frac{1}{2}$: $\dim\mathcal{H} = 2^n$;
- Per rappresentare contemporaneamente tutti gli stati possibili del sistema avremo bisogno di $n2^n$ bit classici;
- Per $n = 270$, $\dim\mathcal{H} \sim 10^{81}$;

Due cose sono infinite: lo spazio di Hilbert e la stupidità umana – semicit.

- Catena di n particelle di spin- $\frac{1}{2}$: $\dim\mathcal{H} = 2^n$;
- Per rappresentare contemporaneamente tutti gli stati possibili del sistema avremo bisogno di $n2^n$ bit classici;
- Per $n = 270$, $\dim\mathcal{H} \sim 10^{81}$;

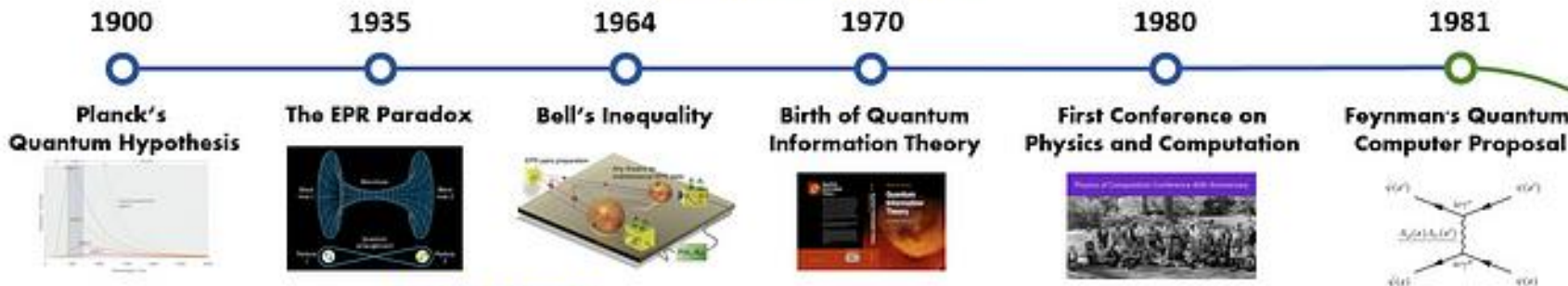


Quantum Advantage

Quantum computer programmabile può risolvere un problema che un computer classico non riuscirebbe a risolvere in un tempo ragionevole:

- Quantum Fourier Transform: $O(n^2)$ vs $O(n2^n)$;
- Algoritmo di Grover: $O(\sqrt{n})$ vs $O(n)$;
- Algoritmo di Shor:
 $O\left(\exp\left(1.9(\log N)^{\frac{1}{3}}(\log \log N)^{\frac{2}{3}}\right)\right)$ vs $O((\log N)^2(\log \log (N)))$;

Theoretical Foundations



Emergence

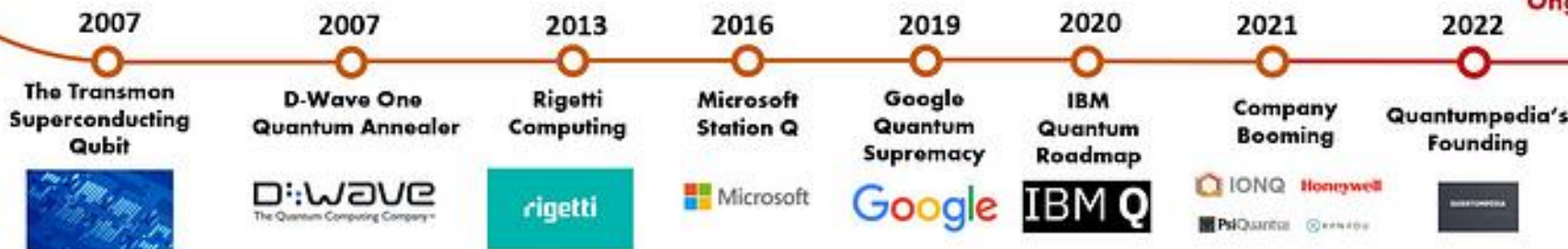


Development



Race

2004
Circuit QED Demo.



Ongoing Advancements



D:WAVE
The Quantum Computing Company™



Microsoft

Google

IBM Q

IONQ Honeywell
PsiQuantum Q-Robotics



Gli ingredienti:

- Criteri di DiVincenzo (1996);
 - ↳ Set di porte universale a 1 o 2 qubit;
- Sovrapposizione e calcolo parallelo;
- Entanglement;
- Interferenza.

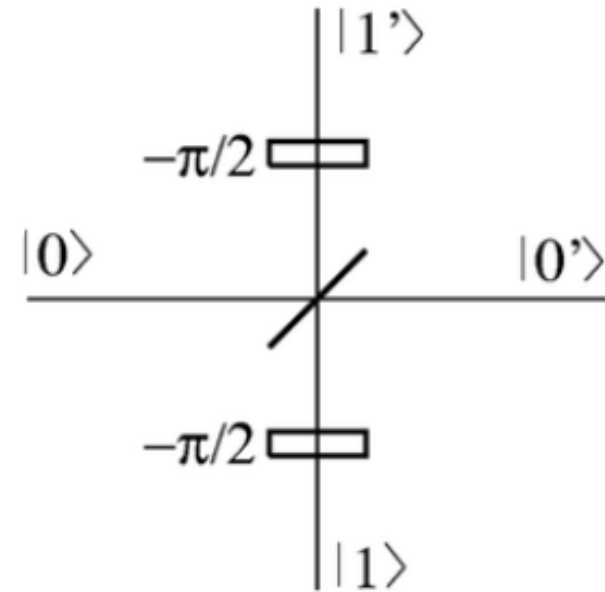


Un po' di notazione e alcuni Quantum Gates

- $|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$, $|1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$, $X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$

- $H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$

- $H|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + |1\rangle)$



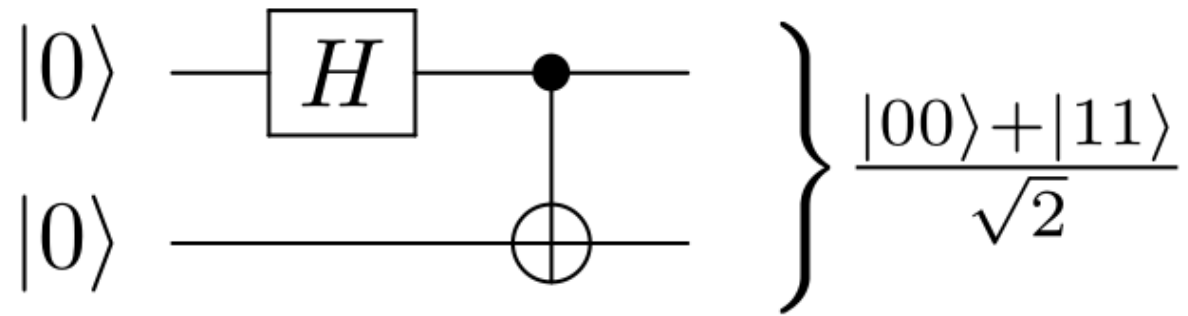
*Optical simulation of quantum logic,
PRA 1998*

Un po' di notazione e alcuni Quantum Gates

- $CNOT = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$

- $CNOT|a\rangle_c|b\rangle_{tg}: CNOT|0\rangle|b\rangle = |0\rangle|b\rangle,$
 $CNOT|1\rangle|b\rangle = |1\rangle|Xb\rangle$

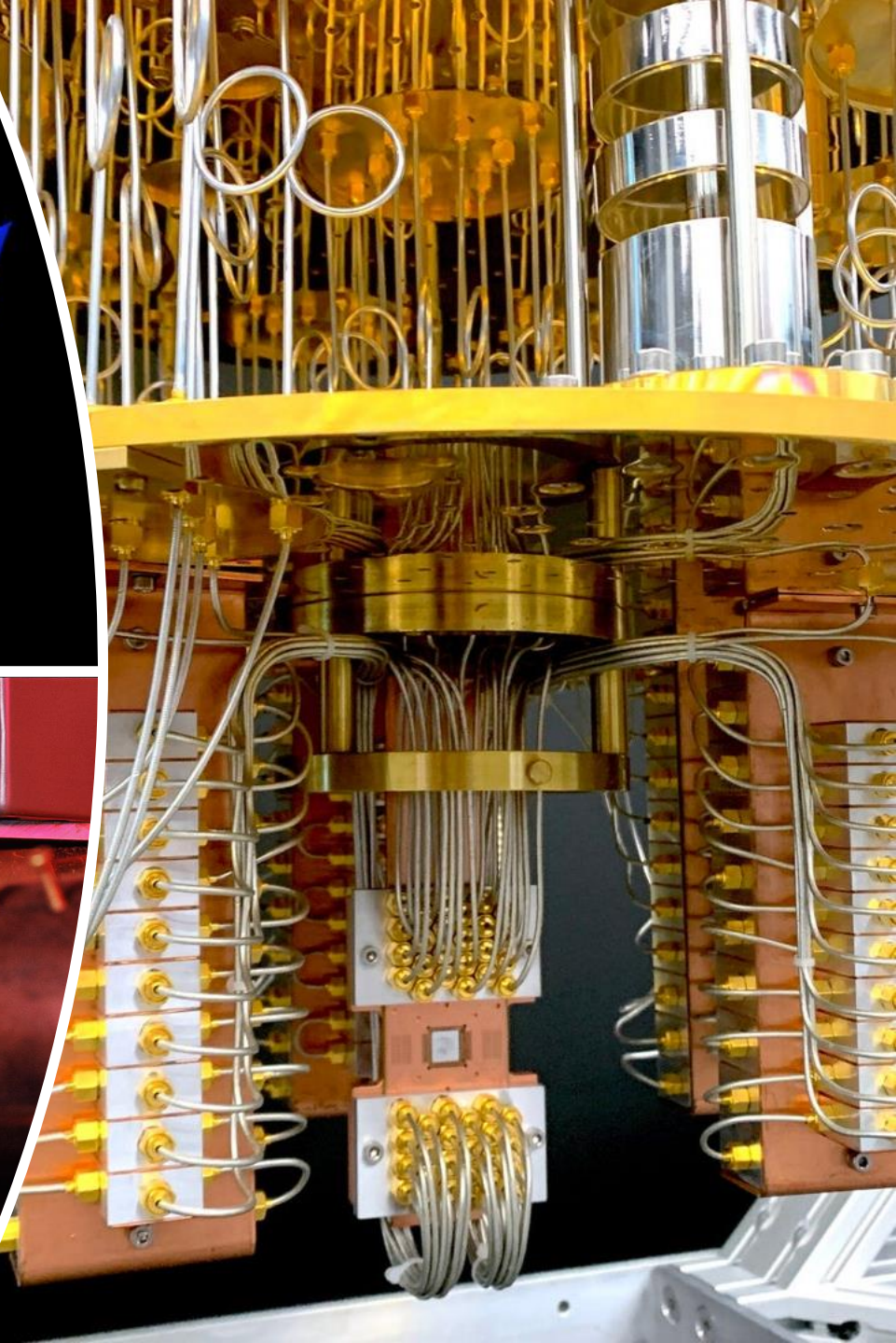
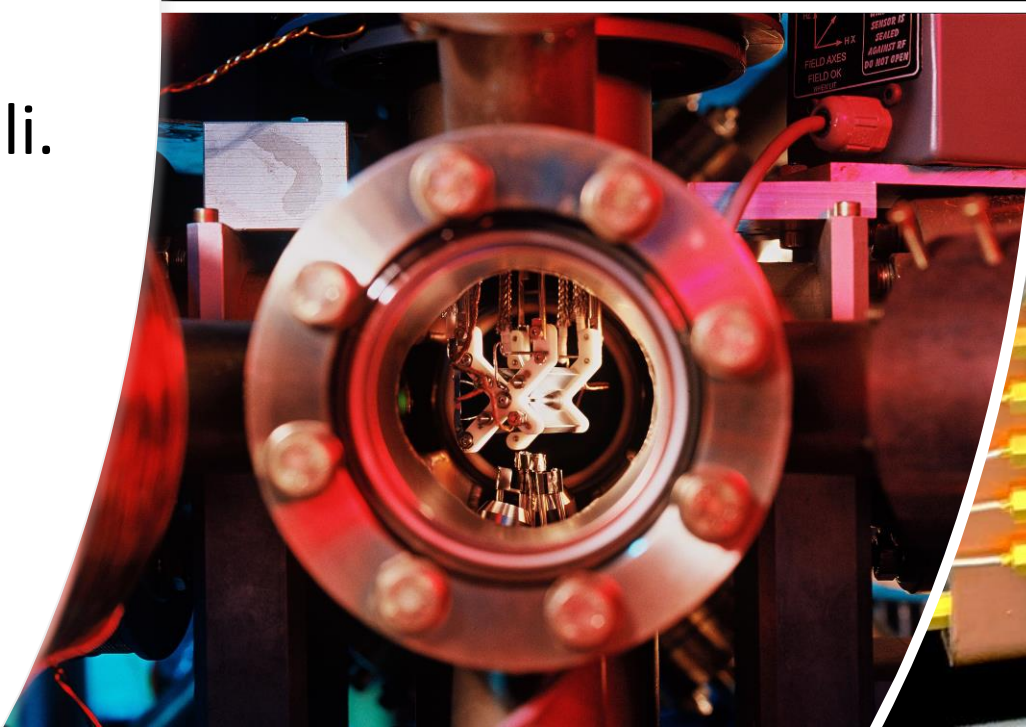
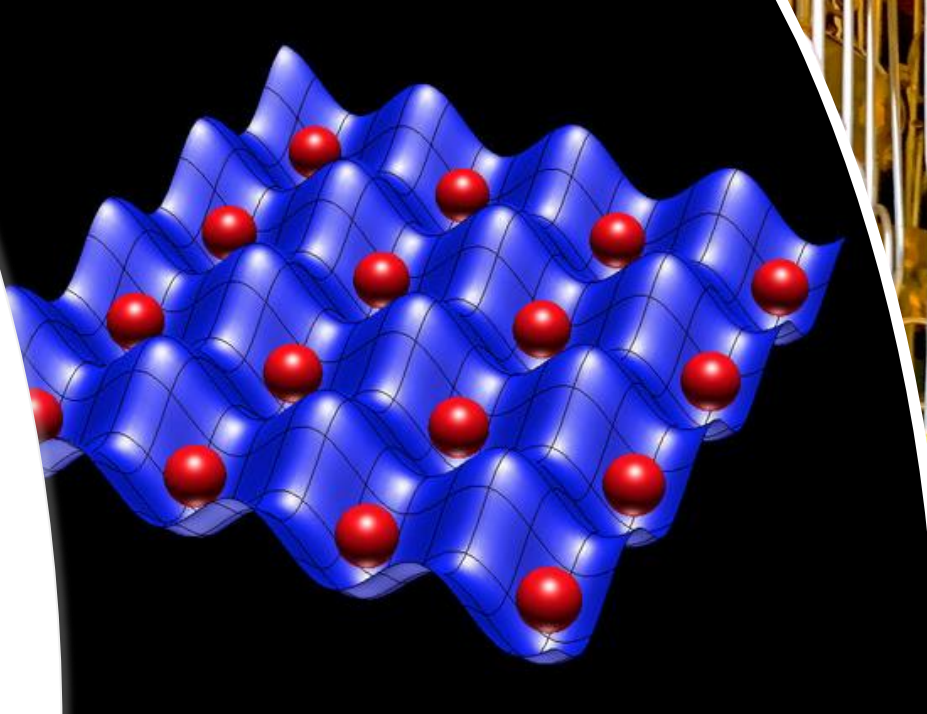
Notazione circuitale



- $|00\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + |1\rangle)|0\rangle \rightarrow \frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}}$ Lo stato non è separabile!

Tecnologie

- Superconduttori;
- Trapped ions;
- Cold atoms;
- Varie ed eventuali.





Gli altri criteri di DiVincenzo

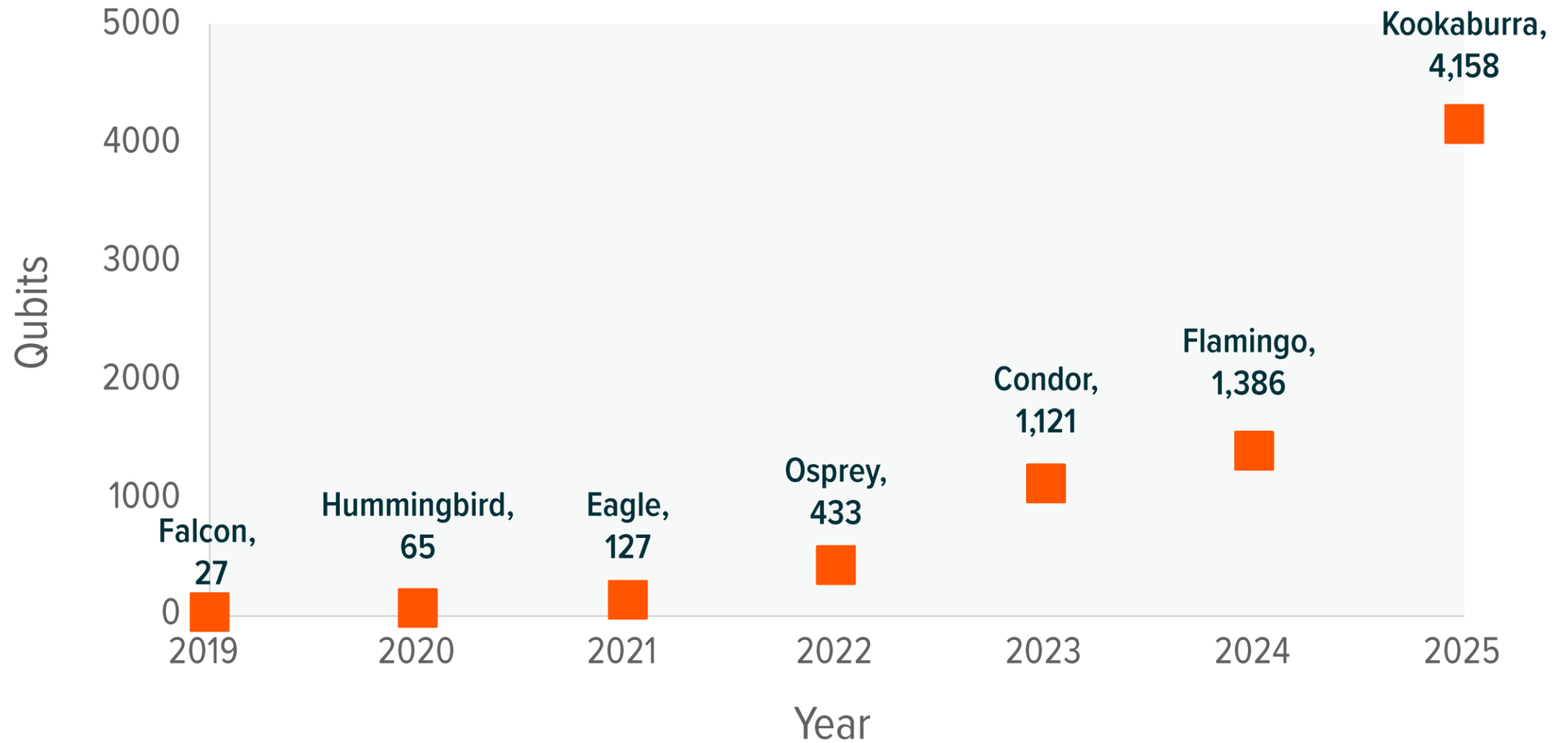
- Un sistema fisico scalabile con qubit ben caratterizzati;
- Semplice inizializzazione dei qubit;
- Tempi di decoerenza «lunghi»;
- Capacità di misurare specificamente ogni singolo qubit.

-
- Un Quantum Computer non vive isolato dal resto dell'universo;
 - L'accoppiamento provoca la perdita dell'informazione quantistica;
 - Attualmente la maggiore sfida tecnologica.
 - Bit-flip $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \rightarrow \alpha|1\rangle + \beta|0\rangle$
 - Phase-flip $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \rightarrow \alpha|1\rangle - \beta|0\rangle$



IBM QUANTUM PROCESSORS ROADMAP

Sources: Global X analysis of information derived from: IBM. (2022). Our new 2022 development roadmap.



Note: 2022 onwards includes planned processor launches.

Campi di applicazione:

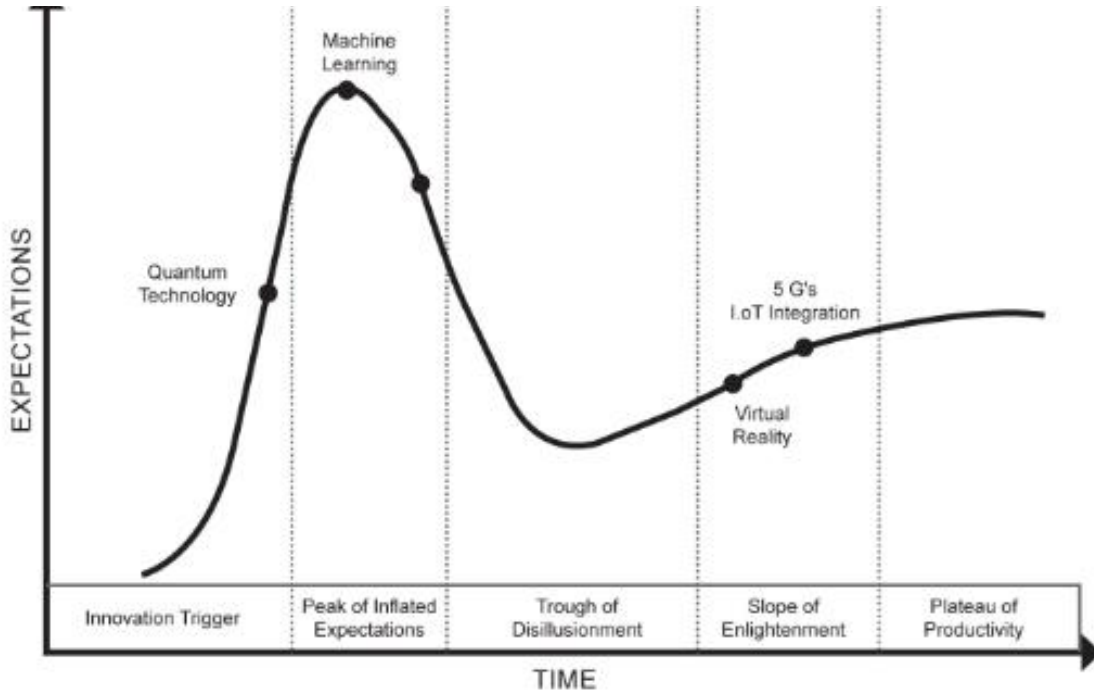
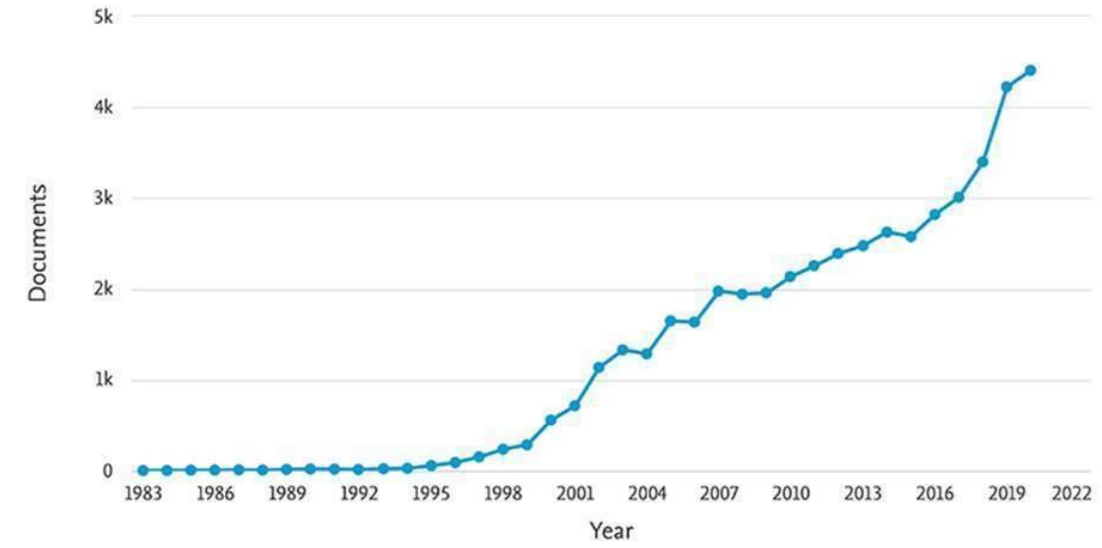
- Computing;
- Simulation;
- Criptography;

Quantum computing applications	1025
Case studies evaluation	1025
Market forecasts	1031
Healthcare	1037
Energy and chemistry	1048
Transportation and logistics	1065
Retail	1071
Telecommunications	1072
Finance	1073
Insurance	1082
Marketing	1083
Content and media	1084
Defense and aerospace	1085
Intelligence services	1088
Industry	1088
Climate change	1089
Science	1092
Software and tools vendors	1094
Service vendors	1123



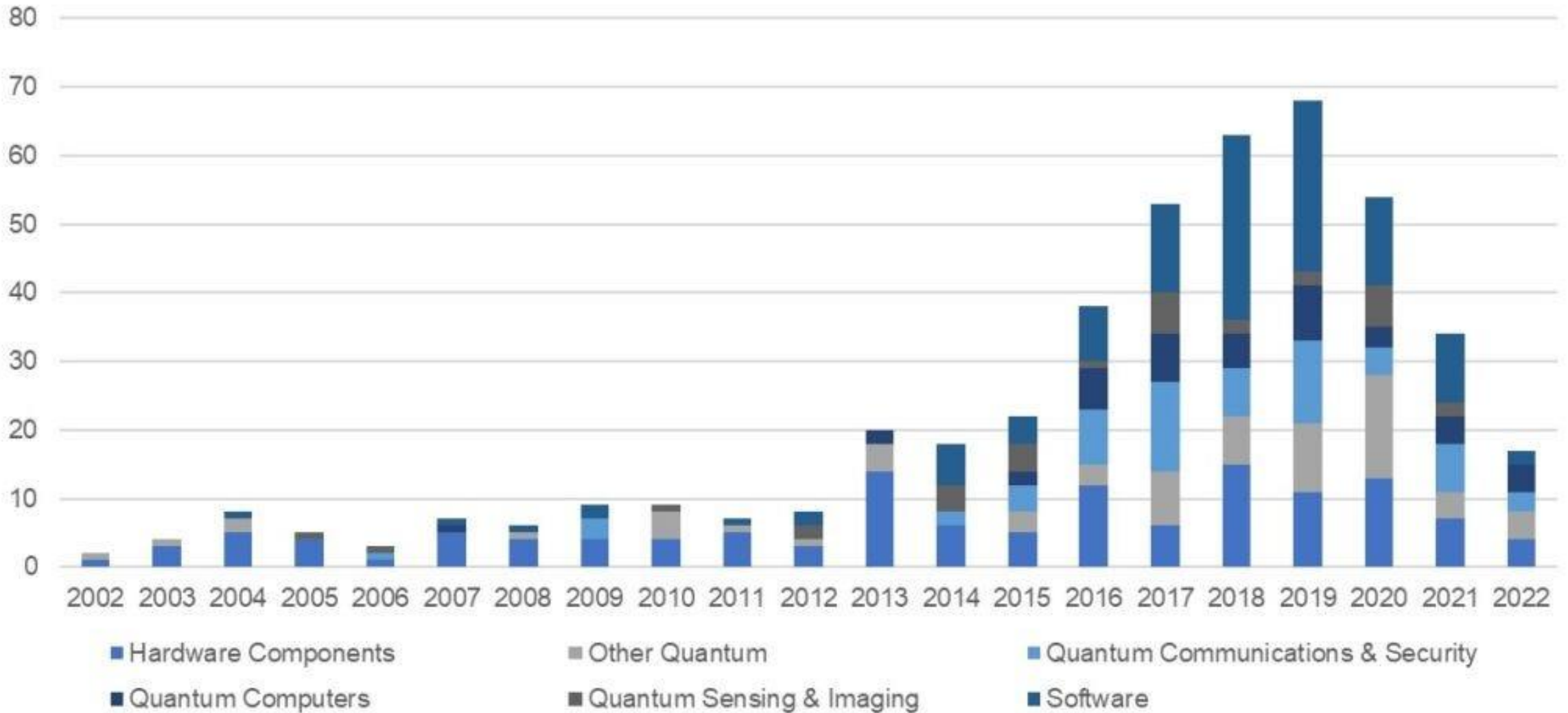
JAKE-CLARK.TUMBLR

Documents by year



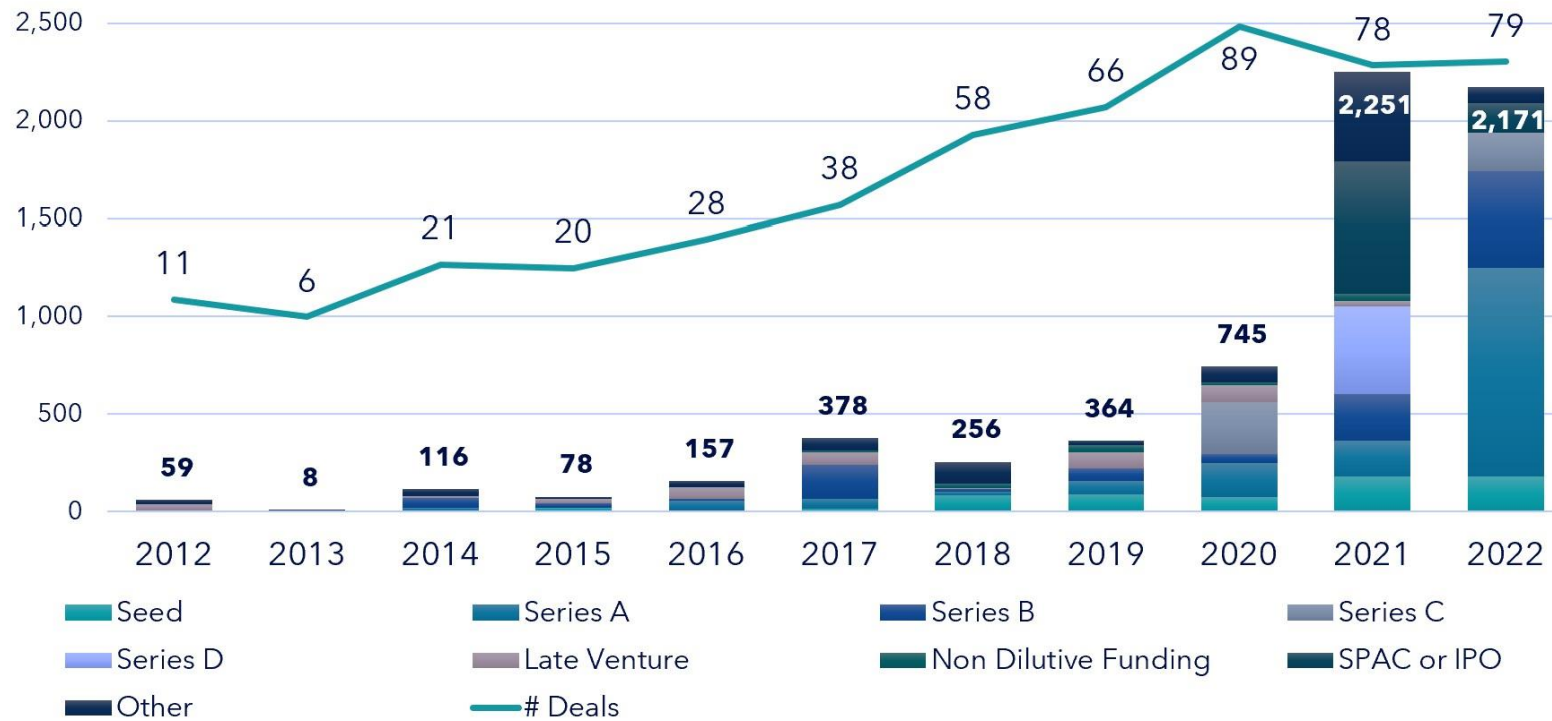
Number of Quantum Organizations by Date Founded

Source: The Quantum Insider Intelligence Platform

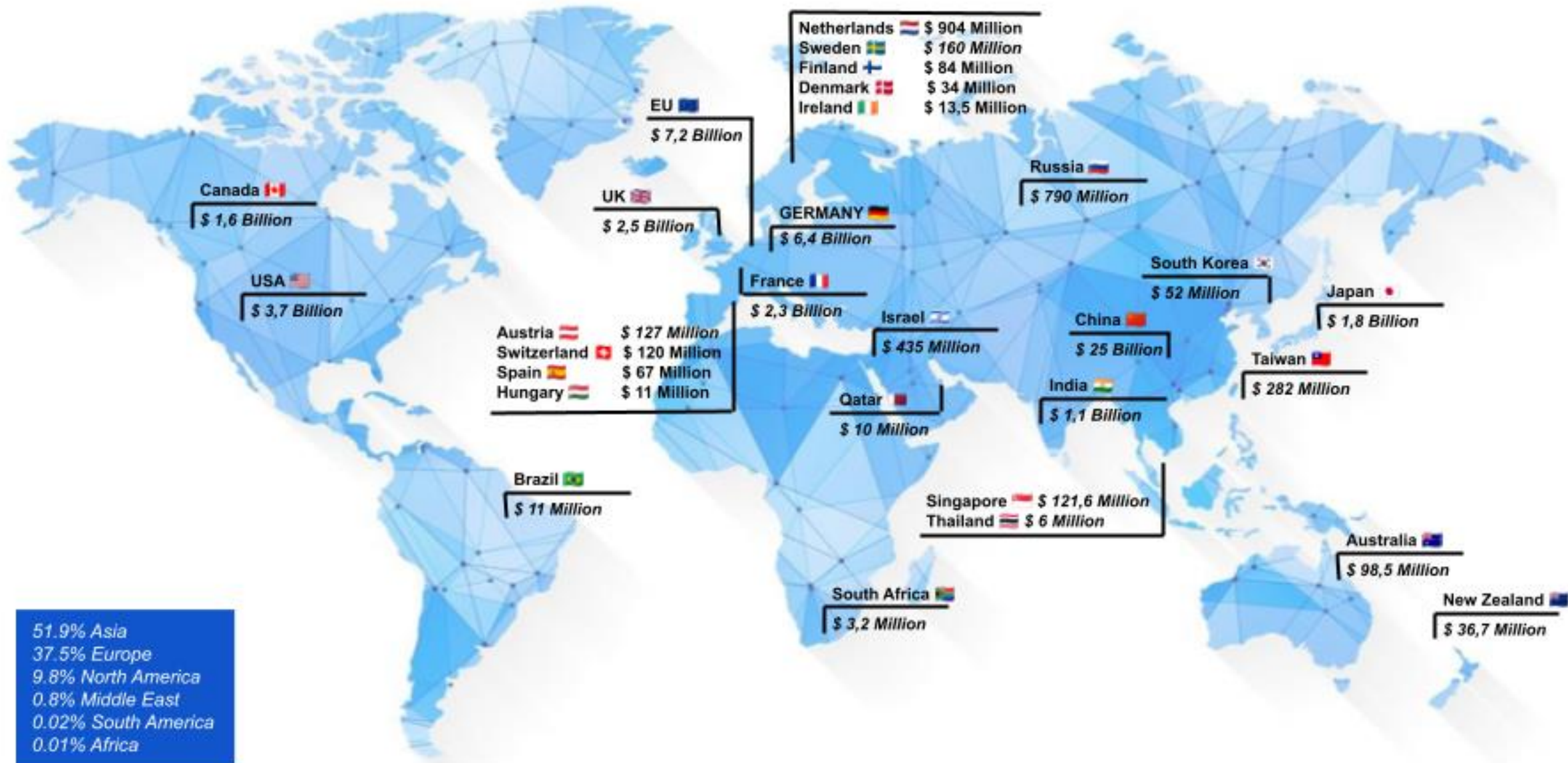


Total private investment in Quantum Technology over the past 10 years

Total Quantum Investment by Stage; in \$ millions



Source: [The Quantum Insider Intelligence Platform](#)



51.9% Asia
 37.5% Europe
 9.8% North America
 0.8% Middle East
 0.02% South America
 0.01% Africa



That's all Folks!

That's Folks!

