



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

# Prima e seconda rivoluzione quantistica a confronto tra modelli di oggetto e interazione

Pavia, 29.11.2023

**Olivia Levrini e Sara Satanassi**

Dipartimento di Fisica e Astronomia «A. Righi»

# La seconda rivoluzione quantistica

“We are living in an extraordinary age.[...] Missing out on this revolution without giving it further attention would be as much a shame as remaining ignorant of the Newtonian revolution or the Darwinian revolution, had we been their contemporaries. For the conceptual revolution taking place today is of no lesser importance. It completely overturns **our previous pictures of nature** and will doubtless give rise of **new technologies that will simply look like magic.**”

“Had we lived at the time of the Newtonian revolution, would we have wished to understand what was going on? Today quantum physics gives us the opportunity to live through a conceptual revolution of similar importance.”

Gisin, N. (2014). Quantum chance. Springer, p.xi



Che cosa sta succedendo?

Quale tipo di rivoluzione è in corso?

Quali sono le novità concettuali, sperimentali e tecnologiche che la rivoluzione in corso sta apportando?

**L'obiettivo:** prenderci del tempo per immergerci nell'attualità e trovare alcune chiavi di lettura per ripensare all'impatto concettuale e culturale di quanto sta avvenendo



- Introduzione alla seconda rivoluzione quantistica (Sara)
- Approccio per un confronto tra la prima e la seconda rivoluzione (Olivia)
- Uno sguardo sulla prima rivoluzione (Olivia)
- Uno sguardo sulla seconda rivoluzione (Sara)







ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

# Introduzione alla seconda rivoluzione quantistica

Now, what kind of physics are we going to imitate? First, I am going to describe the possibility of simulating physics in the classical approximation, a thing which is usually described by local differential equations. But the physical world is quantum mechanical, and therefore the proper problem is the simulation of quantum physics—which is what I really want to talk about, but I'll come to that later. So what kind of simulation do I mean?

about. I want to talk about the possibility that there is to be an *exact* simulation, that the computer will do *exactly* the same as nature. If this is to be proved and the type of computer is as I've already explained, then it's going to be necessary that *everything* that happens in a finite volume of space and time would have to be exactly analyzable with a finite number of logical operations. The present theory of physics is not that way, apparently. It allows space to go down into infinitesimal distances, wavelengths to get infinitely great, terms to be summed in infinite order, and so forth; and therefore, if this proposition is right, physical law is wrong.

That's fine. That would be good physics if you could predict something consistent with all the known facts and suggest some new fact that we didn't explain, but I have no specific examples. So I'm not objecting to the fact

## Simulating Physics with Computers

Richard P. Feynman

*Department of Physics, California Institute of Technology, Pasadena, California 91107*

*Received May 7, 1981*



**1980** - Benioff propone il primo modello di computer basato sulle teoria dei quantistica, dimostrando che un computer quantistico è teoricamente possibile.

**1982** - Feynmann pose l'attenzione sul problema della simulazione di sistemi quantistici attraverso calcolatori classici, proponendo che un simulatore quantistico meglio descriverebbe la realtà

**1995** - Shor sviluppa un algoritmo che dimostra come i protocolli crittografici in uso siano vulnerabili ai computer quantistici

**1985** - Deutsch sviluppa l'idea di computer quantistico universale e ne descrive le caratteristiche dal punto di vista matematico.

**1998** - Ricercatori dell'università di Oxford eseguono per la prima volta un algoritmo quantistico su un computer composto da 2 qubit.

**2001** - IBM e l'università di Stanford usano un computer a 7 qubit per fattorizzare il numero 15 con l'algoritmo di Shor.

**2009** - Costruzione del primo processore quantistico elettronico. Il chip contiene 2 qubit ed è realizzato con atomi di alluminio in un circuito superconduttore.

**2013** - NASA, GOOGLE e un consorzio di università lanciano il Quantum Artificial Intelligence Lab (QuAIL) per progettare computer e algoritmi quantistici per l'AI.

**2012** - Preskill conia il termine "supremazia quantistica".

**2019** - IBM lancia il suo primo computer quantistico per scopi scientifici e commerciali. GOOGLE annuncia la quantum supremacy del suo processore.



# OGGI: IL RITMO DEL CAMBIAMENTO

## Top Headlines

### Physical Effect Also Valid in the Quantum World

Jan. 20, 2023 — Physicists have experimentally proven that an important theorem of statistical physics applies to so-called 'Bose-Einstein condensates.' Their results now make it possible to measure certain ...

### Blast Chiller for the Quantum World

Jan. 18, 2023 — The quantum nature of objects visible to the naked eye is currently a much-discussed research question. A team has now demonstrated a new method in the laboratory that could make the quantum ...

### Can You Trust Your Quantum Simulator?

Jan. 18, 2023 — Physicists have developed a protocol to verify the accuracy of quantum ...

### 'A Perfect Little System': Physicists Isolate a Pair of Atoms to Observe P-Wave Interaction Strength for the First Time

Jan. 11, 2023 — Physicists have taken a first step in understanding quantum emergence -- the transition from 'one-to-many' particles -- by studying not one, not ...

### New Quantum Dots Study Uncovers Implications for Biological Imaging

Dec. 5, 2022 — Researchers report the synthesis of semiconductor 'giant' core-shell quantum dots with record-breaking emissive lifetimes. In addition, the lifetimes can be tuned by making a simple ...

### New Instrument Measures Supercurrent Flow, Data Has Applications in Quantum Computing

Dec. 5, 2022 — An extreme-scale nanoscope is beginning to collect data about how pulses of light at trillions of cycles per second can control supercurrents in materials. The instrument could one day help optimize ...

### Quantum Algorithm of the Direct Calculation of Energy Derivatives Developed for Molecular Geometry Optimization

Dec. 5, 2022 — Researchers have successfully extended the quantum phase difference estimation algorithm, a general quantum algorithm for the direct calculations of energy gaps, to enable the direct calculation of ...

Tempo della ricerca oggi

[https://www.sciencedaily.com/news/matter\\_energy/quantum\\_computi](https://www.sciencedaily.com/news/matter_energy/quantum_computi)

(...)



# OGGI: IL RITMO DEL CAMBIAMENTO

Summaries

Headlines

## Tiny Materials Lead to a Big Advance in Quantum Computing

**Jan. 27, 2022** — Researchers used the 2D material hexagonal boron nitride to build much smaller capacitors for superconducting qubits, enabling them to shrink the footprint of a qubit by two orders of magnitude ...

## Studying the Big Bang With Artificial Intelligence

**Jan. 25, 2022** — Artificial intelligence is being used for many extremely complex tasks. So why not use machine learning to study particle physics? As it turns out, this is not easy, because of some special ...

## Towards Quantum Simulation of False Vacuum Decay

**Jan. 20, 2022** — By shaking an optical lattice potential, researchers have realized a discontinuous phase transition in a strongly correlated quantum gas, opening the door to quantum

## Newly Discovered Type of 'Strange Metal' Could Lead to Deep Insights

**Jan. 12, 2022** — A new discovery could help scientists to understand 'strange metals,' a class of materials that are related to high-temperature superconductors and share fundamental quantum attributes with ...

## Photon Pairs Are More Sensitive to Rotations Than Single Photons

**Jan. 12, 2022** — Quantum states of light have enabled novel optical sensing schemes, e.g., for measuring distance or position, with precisions impossible to achieve with classical light sources such as lasers. The ...

## Ions in the Machine: How Simple Liquids Like Water Can Perform Complex Calculations

**Jan. 11, 2022** — To demonstrate the potential of chemical dynamics as a computing resource, researchers developed a method for building physical reservoirs based on the electrochemical reactions of solutions placed ...

## Integrated Photonics for Quantum Technologies

**Jan. 7, 2022** — An international team of leading scientists has compiled a comprehensive overview of the potential, global outlook, background and frontiers of integrated photonics. The paper is a roadmap for ...

## Magnetic Surprise Revealed in 'Magic-Angle' Graphene

**Jan. 6, 2022** — Magnets and superconductors don't normally get along, but a new study shows that 'magic-angle' graphene is capable of producing both superconductivity and ferromagnetism, which could ...

## Physicists Watch as Ultracold Atoms Form a Crystal of Quantum Tornadoes

**Jan. 5, 2022** — Physicists have directly observed ultracold atoms forming 'quantum tornadoes' in a spinning fluid of ultracold atoms. The observations record a key crossover from classical to quantum ...

## The First Topological Acoustic Transistor

**Jan. 5, 2022** — Researchers have designed and simulated the first

(...)

[https://www.sciencedaily.com/news/matter\\_energy/quantum\\_computi](https://www.sciencedaily.com/news/matter_energy/quantum_computi)



# La rivoluzione come ne parlavano e ne parlano i giornali





# LA MACCHINA DEI QUANTI

LUCA TREMOLADA

Una macchina che non obbedisce alle leggi della fisica classica. Che risolve problemi impossibili anche per i calcolatori più potenti, talmente sofisticata da poter guardare alla realtà con un approccio meccanico-quantistico. Insomma, una macchina che non esiste ma che tutti i più grandi dipartimenti di fisica stanno studiando. L'anno scorso una serie di scoperte pubblicate su altrettanti articoli scientifici hanno accorciato i tempi di quello che da vent'anni è considerato un miraggio: il computer quantistico, una macchina che differisce da quello tradizionale in quanto ogni suo elemento logico elementare, o "qubit", può assumere allo stesso istante numerosi stati. Per capire meglio, prendiamo una moneta, una volta lanciata mostrerà o testa o croce, o zero o uno per usare ad esempio il codice binario. Il qubit si comporta in modo diverso. Una volta lanciata la moneta non si fermerà, continuerà a ruotare su se stessa mostrando contemporaneamente multiple quantità di informazioni.

La ricerca su un sistema così difficile anche solo da immaginare è stata finora costante teorica. Ora sta conoscendo inattese accelerazioni e si comincia addirittura a vedere qualche cosa. Negli Stati Uniti e precisamente in California a Santa Barbara un team di fisici ha spiegato su Nature come sono riusciti a costruire un dispositivo attraverso cui osservare gli effetti della meccanica quantistica su un fotone. A Bristol sono andati oltre, realizzando un chip fisico che ha compiuto l'impresa di far compiere a due fotoni una tipica operazione quantistica, una "passeggiata quantica". Il chip ottico che a differenza dei precedenti funziona a temperatura ambiente ha praticamente dimezzato i tempi della ricerca dando un nuovo importante impulso.

Ma è da Berlino che arrivano le novità più interessanti. I fisici della Humboldt University sono arrivati al primo prototipo di macchina quantistica. Lo hanno fatto sfruttando l'eccitazione atomica che si ottiene nei nanodiamanti, raccolta ed elaborata da nanostrutture ottiche chiamate cristalli fotonici. A capo del team Janik Wolters primo firma dell'articolo pubblicato su Applied Physics Letters. Ma altre scoperte si attendono proprio dal gruppo di Nano Optics, particolarmente prolifico nell'ultimo anno. Una decina gli studi pubblicati nel 2010, i più interessanti sulla fotonica. Da questo gruppo di lavoro ci si attendono importanti novità sul computer quantistico. Ma per come si sta strutturando la ricerca è più probabile assistere a una serie di piccole-grandi scoperte in tutte il mondo che andranno poi a confluire nella realizzazione di un chip, su cui, a dire il vero, pochissimo si può dire con certezza. Janik Wolters si sbilancia, dichiarando che finalmente sono stati compiuti passi decisivi. Allargando lo sguardo non si può non constatare che il percorso resta ancora lungo ma per la prima volta i filoni di ricerca sono particolarmente chiari.



21 aprile 2013

## L'intreccio quantico che non teme il «rumore»

di Marco Passarello

L'entanglement quantistico è il meccanismo per cui tra due particelle o molecole che interagiscono si può creare un legame che rimane attivo anche quando vengono allontanate, e fa sì che, quando una delle due assume uno stato, questo venga replicato istantaneamente anche nell'altra. Si tratta di uno degli aspetti più controversi della meccanica quantistica, che Einstein rifiutò come «inquietante azione a distanza», ma della cui esistenza i fisici sono ormai convinti. Proprio in questi giorni un esperimento condotto a Vienna ha escluso di fatto una delle ultime possibilità teoriche che si trattasse di un fenomeno solo apparente. Si tratta quindi di una realtà, sulla quale gli scienziati intendono fondare tecnologie dal grandissimo potenziale come i computer quantistici. Resta un problema: l'entanglement si perde rapidamente nel caso ci sia del "rumore" dovuto, per esempio, alla presenza di altre particelle. Un esperimento italiano, però, ha dimostrato che questo non è sempre vero.

Realizzato da Marco Genovese, responsabile del programma di ricerca sull'ottica quantistica presso l'Inrim (Istituto nazionale di ricerca metrologica) di Torino, e descritto in un articolo pubblicato su «Nature», l'esperimento realizza per la prima volta la cosiddetta illuminazione quantistica, un concetto teorizzato nel 2008 dal fisico Seth Lloyd del Mit. Si tratta di una variazione sulla tecnologia del radar, cioè quella che permette di rilevare la presenza di un oggetto illuminandolo con un fascio di onde elettromagnetiche (in questo caso luce laser), e percependo un'eco di ritorno. Nell'illuminazione quantistica i fasci sono due, creati in modo che ciascun fotone di uno dei fasci sia in stato di entanglement con un fotone dell'altro. Uno dei due fasci è diretto verso un rivelatore di riferimento, mentre l'altro è puntato verso lo spazio di misura, nel quale vengono diffusi artificialmente dei disturbi luminosi.

Normalmente, data la presenza dei disturbi, sarebbe impossibile distinguere l'eco di un piccolo oggetto, che verrebbe coperto dal rumore di fondo. Con l'illuminazione quantistica, però, è possibile filtrare il rumore, tenendo conto solo dei segnali che, a causa dell'entanglement, sono correlati con identici segnali sul fascio di riferimento. Una tecnica la cui efficacia è stata verificata dall'esperimento italiano. Questo metodo potrebbe in futuro essere usato per creare radar più precisi in quanto immuni dai disturbi, anche se il professor Genovese ammonisce che si tratta di risultati ottenibili solo in prospettiva: «Abbiamo dimostrato che si può ottenere un vantaggio attraverso la correlazione quantistica, ma l'utilizzo pratico è un'altra cosa». L'importanza dell'esperimento è soprattutto nell'aver dimostrato che l'entanglement può essere sfruttato anche in presenza di un rumore di fondo preponderante. «Questo può dare un'indicazione, sia pure indiretta, che anche nel calcolo quantistico, normalmente reso impossibile dalla presenza di rumore dovuto a interazione con l'ambiente, sia possibile superare il problema. Insieme a un gruppo inglese stiamo cercando di chiarire meglio tutte le implicazioni dell'esperimento».







GADGET

# Il futuro? Gli exascale computer

19/04/2015

Attualmente D-Wave ha realizzato una macchina che opera con 512 qubit, ma difficilmente, secondo Laforenza, si avrà tuttavia un vero e proprio computer quantistico commerciale, se non per usi molto particolari come l'analisi dei dati criptati, prima di venti anni. E questo anche perché, oltre ai problemi legati all'hardware e alla fragilità intrinseca dei qubit, la “realizzazione di applicazioni software per questo tipo è macchine presenta elementi di complessità decisamente maggiori rispetto ai calcolatori convenzionali”.

<https://www.ilsole24ore.com/art/che-fine-ha-fatto-legge-moore-i-tempi-lunghi-ma-non-lunghissimi-chip-quantistico->





Paolo Gila, 2016

La Quantum Technology, questo il nome della disciplina nel suo complesso, che cambierà la vita quotidiana e dell'industria, è dunque la nuova avanguardia su cui anche la Commissione Europea – e conseguentemente il nostro CNR e l'Istituto di misurazioni INRIM di Torino – ha deciso di puntare con un programma specifico la cui dotazione sarà di un miliardo di euro in un decennio.

«In questo settore – sottolinea Massimo Inguscio, presidente del CNR – l'Italia potrà assumere un ruolo di riferimento già nella fase preparatoria del progetto, grazie alle sue eccellenze e alla sua competenza scientifica».

Il CNR ha per il momento stanziato un milione e mezzo di euro sullo sviluppo del programma, mentre è stato costituito un consorzio di venti agenzie nazionali in Europa, denominato QuantEra, che ha raccolto 20 milioni di euro per un bando sulla Quantum Technology. In questa realtà la figura di spicco è un italiano, Tommaso Calarco, direttore del Centro per le Scienze e le Tecnologie Quantistiche dell'Università di Ulm e Stoccarda, che veste anche la giacca di presidente del comitato scientifico di Qute-Europe, il tavolo europeo per il coordinamento degli scienziati sulle applicazioni quantistiche. La matematica e il

«La bomba  
sta per  
scoppiare»





Il Quantum Manifesto - scritto l'anno scorso raccogliendo le voci di migliaia di scienziati europei - chiama l'Europa a spingere lo sviluppo e l'applicazione delle tecnologie quantistiche per ottenere «una trasformazione che permetta un avanzamento nella scienza, nell'industria e nella società». Con il termine “quantistico” ci si riferisce a processi che si del nostro mondo: elettroni, fotoni, atomi o nanostrutture. Si può sfruttare la loro natura intrinseca e in molti casi controintuitiva in algoritmi e protocolli potenzialmente in grado di generare grandi innovazioni: dalla riduzione della complessità dei calcoli sui quali si basa la moderna crittografia, alle comunicazioni sicure su scala globale e ai sensori di movimento e di gravità locale di grande precisione, a beneficio della navigazione e dell'analisi del sottosuolo.

La risposta della Comunità europea al Manifesto è stata entusiastica:

Ma è necessario che questa opportunità di cambiamento venga compresa anche al di fuori dei laboratori, dato che queste tecnologie hanno lo scopo di fornire un vantaggio competitivo a chi riesce a sfruttarle e convertirle - prima di altri - in prodotti innovativi. Auspicio per questo un vostro diretto intervento!

Paolo Villoresi



29/04/2017





Università di Padova e Cnr-Ifn

Caro Villoresi,

ha ragione a sottolineare l'innovazione quantistica e la ringrazio di averne sintetizzato il significato. Il potenziale di queste tecnologie nella cybersicurezza e in altre questioni di frontiera, è straordinario. Il miliardo che l'Europa intende investire in questa ricerca è significativo. E fa bene a sottolineare le grandi competenze italiane in materia. Ma con la crescita della complessità e della velocità d'innovazione, anche il sistema dell'informazione si deve aggiornare per consentire all'ecosistema della ricerca, dell'industria e della finanza di sincronizzarsi col ritmo dettato dallo sviluppo della tecnologia più avanzata.

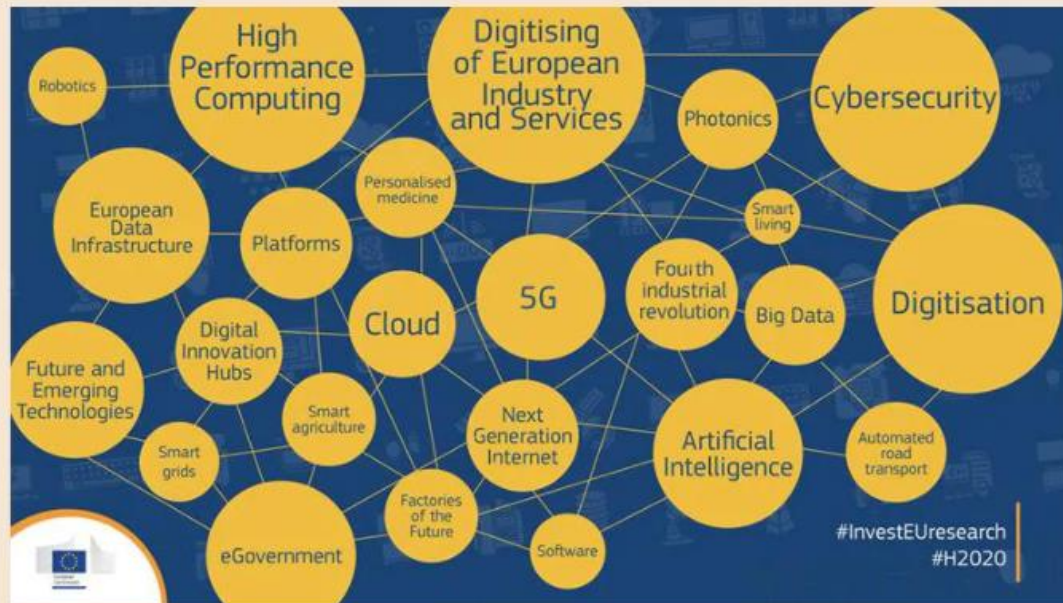




# La scommessa da un miliardo di euro dell'Europa sulle tecnologie quantistiche

di Luca Tremolada

12/02/2018



🕒 3' di lettura

Utilizzare le proprietà della luce a livello quantistico per scoprire in tempo reale la presenza di attacchi e violazioni delle

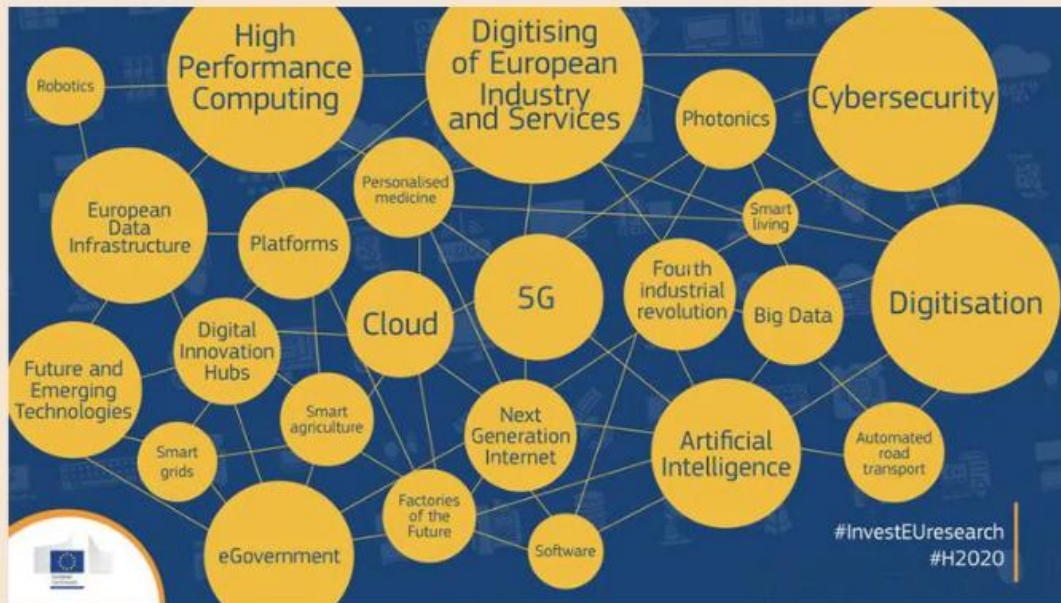
<https://www.ilsole24ore.com/art/la-scommessa-un-miliardo-euro-dell-europa-tecnologie-quantistiche-AEhwkswD>



# La scommessa da un miliardo di euro dell'Europa sulle tecnologie quantistiche

di Luca Tremolada

12/02/2018



🕒 3' di lettura

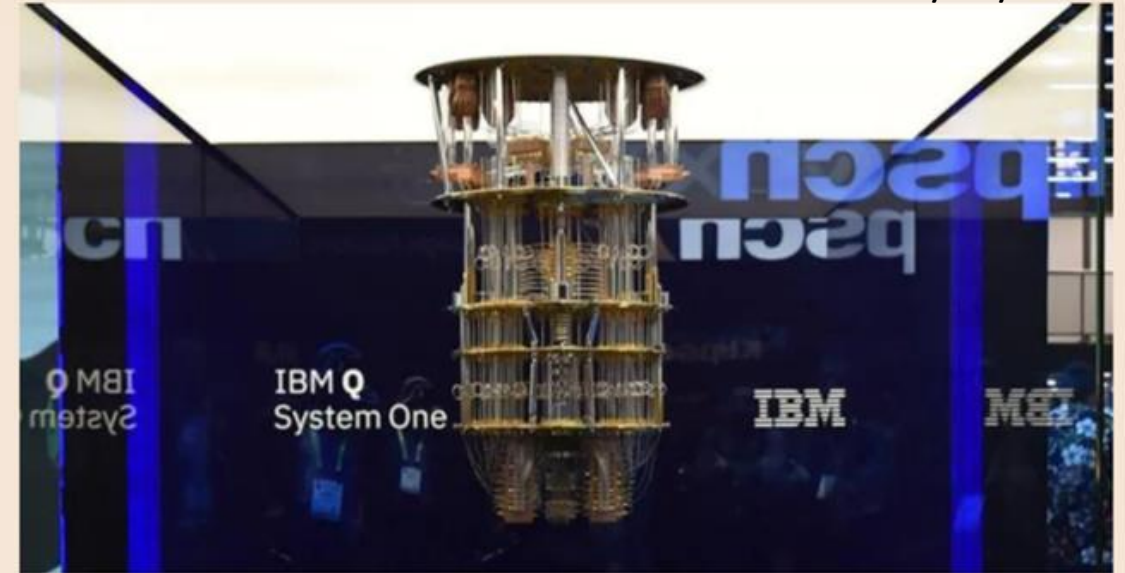
Utilizzare le proprietà della luce a livello quantistico per scoprire in tempo reale la presenza di attacchi e violazioni delle

<https://www.ilsole24ore.com/art/la-scommessa-un-miliardo-euro-dell-europa-tecnologie-quantistiche-AEhwkswD>

# Cosa è e come funziona il computer quantistico? I numeri della nuova informatica

di Luca Tremolada

17/01/2019



🕒 5' di lettura

Possiamo serenamente dire che questa volta è davvero iniziata la corsa alla supremazia nel computer quantistico. Due le notizie rilevanti. La prima al Consumer Electronic Show di Las Vegas dove

<https://www.ilsole24ore.com/art/cosa-e-e-come-funziona-computer-quantistico--numeri-nuova-informatica-AEOSIREH>





## La scommessa da un miliardo di euro dell'Europa sulle tecnologie quantistiche



🕒 3' di lettura

Utilizzare le proprietà della luce a livello quantistico per scoprire in tempo reale la presenza di attacchi e violazioni delle

<https://www.ilsole24ore.com/art/la-scommessa-un-miliardo-euro-dell-europa-tecnologie-quantistiche-AEhwkswD>

## Cosa è e come funziona il computer quantistico? I numeri della nuova informatica

IBM realizza il primo computer quantistico, adatto all'uso commerciale, ma anche scientifico. **Q System One** potrà essere utilizzato da centri di ricerca e grandi compagnie o istituti di credito. Non si tratta di uno dei computer più potenti, ma mostra per la prima volta le applicazioni pratiche di questo tipo di calcolatori

[Exploring Quantum Neural Networks](https://ai.googleblog.com/2018/12/exploring-quantum-neural-networks.html)  
<https://ai.googleblog.com/2018/12/exploring-quantum-neural-networks.html>

Possiamo serenamente dire che questa volta è davvero iniziata la corsa alla supremazia nel computer quantistico. Due le notizie rilevanti. La prima al Consumer Electronic Show di Las Vegas dove

<https://www.ilsole24ore.com/art/cosa-e-e-come-funziona-computer-quantistico--numeri-nuova-informatica-AEOSIREH>



# Alla scoperta del DNA delle nuove tecnologie

Blockchain, AI, Extended Reality e Quantum Computing.  
Nuove leve di crescita per le aziende

29/07/2019



🕒 3' di lettura

Quattro tecnologie che guideranno l'innovazione del prossimo futuro e che le aziende non possono (più) sottovalutare:

Distributed Ledger, e quindi la blockchain e il suo registro

Quattro tecnologie che guideranno l'innovazione del prossimo futuro e che le aziende non possono (più) sottovalutare: Distributed Ledger, e quindi la blockchain e il suo registro inviolabile; l'Artificial Intelligence con i suoi algoritmi predittivi e le sue interfacce interattive; l'Extended Reality e gli strumenti di realtà virtuale e realtà aumentata; il Quantum Computing e le sue

capacità di elaborazione dati multiple e simultanee. Nel rapporto Technology Vision 2019, Accenture codifica queste tecnologie in una sigla (DARQ) e le descrive come uno dei trend che caratterizzeranno la nascita di un'era post-digitale, in cui l'adozione di soluzioni innovative, come spiega Valerio Romano, Intelligent Cloud & Infrastructure Lead di Accenture Italia, “non sarà più un vantaggio competitivo, bensì il requisito minimo per entrare e rimanere in gioco”. In un contesto in cui molte delle

grandi aziende stanno già affrontando la trasformazione digitale, la domanda da porsi, secondo gli esperti, è quali di queste tecnologie utilizzare e come integrarle nel proprio core business. Si

<https://www.ilsole24ore.com/art/dall-intelligenza-artificiale-quantum-computing-scoperta-dna-tecnologie-emergenti-ACG4aga>





SERVIZIO | POTENZA DI CALCOLO

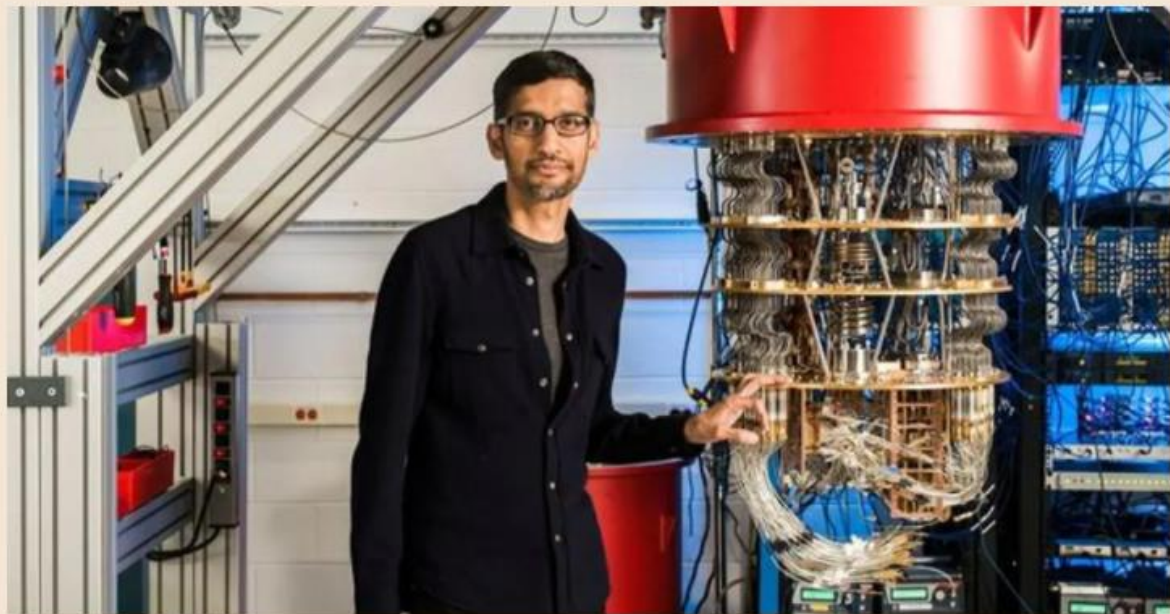


# Il computer quantistico è realtà. Supremazia di Google ma Ibm non ci sta

24/10/2019

Risolto in 200 secondi un calcolo che un supercomputer tradizionale risolverebbe in 10.000 anni. Google conquista la supremazia nel quantum computing ma Ibm non ci sta e non ci crede.

di Luca Tremolada



<https://www.ilsole24ore.com/art/il-computer-quantistico-e-reale-supremazia-google-ma-ibm-non-ci-sta-ACqLDlu>

Article | Published: 23 October 2019

## Quantum supremacy using a programmable superconducting processor

Frank Arute, Kunal Arya, [...] John M. Martinis

*Nature* **574**, 505–510(2019) | [Cite this article](#)

**796k** Accesses | **655** Citations | **6038** Altmetric | [Metrics](#)

### Abstract

The promise of quantum computers is that certain computational tasks might be executed exponentially faster on a quantum processor than on a classical processor<sup>1</sup>. A fundamental challenge is to build a high-fidelity processor capable of running quantum algorithms in an exponentially large computational space. Here we report the use of a processor with programmable superconducting qubits<sup>2,3,4,5,6,7</sup> to create quantum states on 53 qubits, corresponding to a computational state-space of dimension  $2^{53}$  (about  $10^{16}$ ). Measurements from repeated experiments sample the resulting probability distribution, which we verify using classical simulations. Our Sycamore processor takes about 200 seconds to sample one instance of a quantum circuit a million times—our benchmarks currently indicate that the equivalent task for a state-of-the-art classical supercomputer would take approximately 10,000 years. This dramatic increase in speed compared to all known classical algorithms is an experimental realization of quantum supremacy<sup>8,9,10,11,12,13,14</sup> for this specific computational task, heralding a much-anticipated computing paradigm.

<https://www.nature.com/articles/s41586-019-1666-5>

Commento | OLTRE USA CINA

# L'Europa ritrovi la **sovranità** tecnologica

Tre sono i pilastri fondamentali: potenza di calcolo, controllo dei nostri dati, connettività sicura

di Thierry Breton

23 agosto 2020

Unione Europea

sovranità

Stati Uniti d'America

Regno Unito

Galileo Galilei

🔖 Salva

💬 Commenta



(Fotolia)

🕒 4' di lettura

L'Europa ha fatto una scelta storica, quella della solidarietà per affrontare la crisi e finanziare la ripresa e la ricostruzione. La

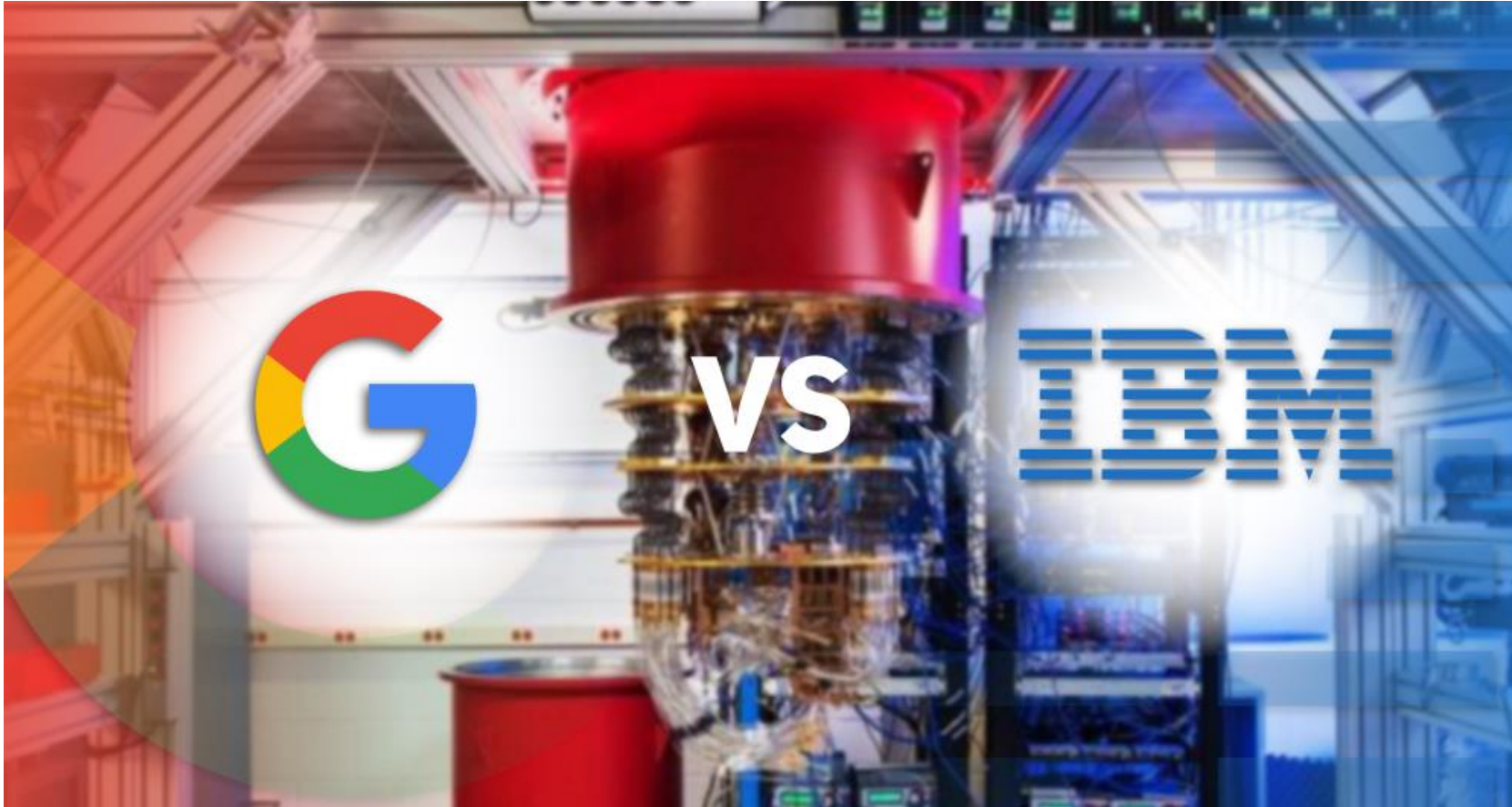
## Gettare le fondamenta della **sovranità** tecnologica

Dinanzi alla **“guerra tecnologica”** tra gli Stati Uniti e la Cina, l'Europa deve, fin da ora, gettare le fondamenta della sua sovranità per i prossimi 20 anni. Ma attenzione: non si tratta affatto di cedere a tendenze dannose e controproducenti all'isolamento o al protezionismo, che sono contrarie ai nostri interessi, ai nostri valori e alla nostra cultura. Si tratta piuttosto di compiere scelte essenziali per il nostro futuro, sviluppando tecnologie e alternative europee senza le quali non vi è né autonomia né sovranità. Quando in passato si è mobilitata, unita, intorno a grandi progetti industriali, l'Europa ha dimostrato di essere in grado di svolgere un ruolo di primo piano sulla scena mondiale. È giunto il momento di riprendere queste iniziative comuni.





# *Il dibattito: a clash of The Titans*



<https://www.geeksforgeeks.org/who-will-win-the-quantum-supremacy-debate-google-or-ibm/>



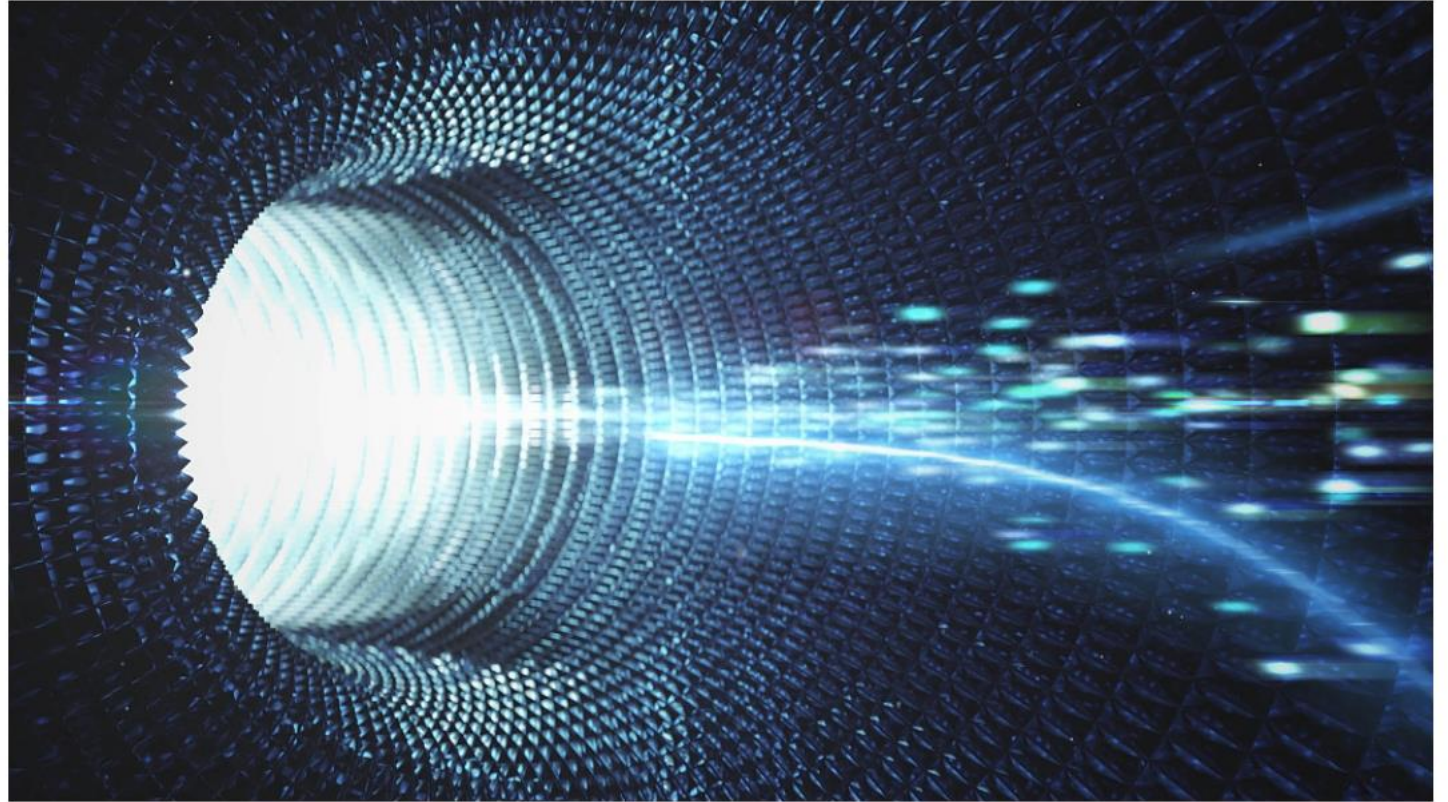
Technology 22:40, 21-Oct-2020



# China to include quantum technology in its 14th Five-Year Plan

Updated 22:57, 21-Oct-2020

By Cao Qingqing



<https://news.cgtn.com/news/2020-10-21/China-to-include-quantum-technology-in-its-14th-Five-Year-Plan-UM1KUIk80M/index.html>





# La Cina batte Google e conquista la supremazia quantistica

05/12/2020

Computer quantistico a 76 Qubit

Il computer Jiuzhang usa particelle di luce per eseguire in 200 secondi un calcolo che richiederebbe 600 milioni di anni



<https://www.lastampa.it/tecnologia/idee/2020/12/05/news/la-cina-batte-google-e-conquista-la-supremazia-quantistica-1.39622411>

<https://www.focusuniverse.com/supremazia-quantistica-la-cina-batte-google/>

INTERNET

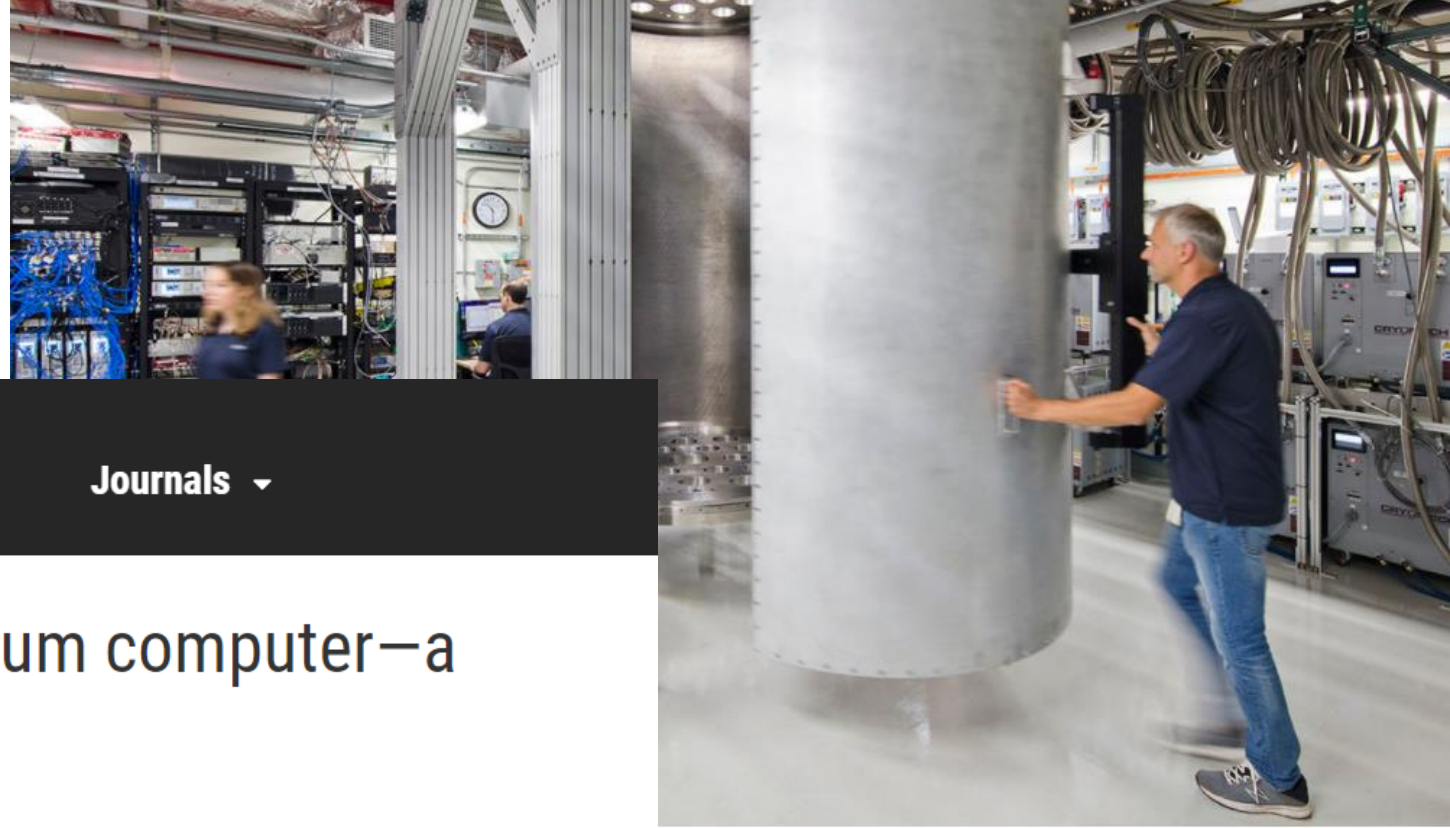
*Secondo quanto riportato dalla pubblicazione su Science, il computer quantistico cinese “Jiuzhang” è 10 miliardi di volte più veloce nel calcolo del miglior prototipo di quantum computer a 53 qubit sviluppato da Google. Il segreto è nella fotonica.*

<https://www.key4biz.it/computer-quantistico-nuovo-record-cinese-grazie-ai-fotoni/334006/>



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

# IBM Quantum Condor



Science

Contents ▾

News ▾

Careers ▾

Journals ▾

quantum computer with 1 million qubits. CONNIE ZHOU/IBM



17



## IBM promises 1000-qubit quantum computer—a milestone—by 2023

By **Adrian Cho** | Sep. 15, 2020, 5:45 PM

For 20 years scientists and engineers have been saying that “someday” they’ll build a full-fledged quantum computer able to perform useful calculations that would overwhelm any conventional supercomputer. But current machines contain just a few dozen quantum bits, or qubits, too few to do anything dazzling. Today, IBM made its aspirations more concrete by publicly announcing a “road map” for the development of its quantum computers, including the ambitious goal of building one containing 1000 qubits by 2023. IBM’s current largest quantum computer, revealed this month, contains 65 qubits.

<https://www.sciencemag.org/news/2020/09/ibm-promises-1000-qubit-quantum-computer-milestone-2023#:~:text=Today%2C%20IBM%20made%20its%20aspirations,this%20month%2C%20contains%2065%20qubits.>





<https://www.hdblog.it/hardware/articoli/n547113/ibm-quantum-computing-supremazia-google-qubit/>

# Record per il computer quantistico di IBM, Google e Cina pronte a stracciarlo

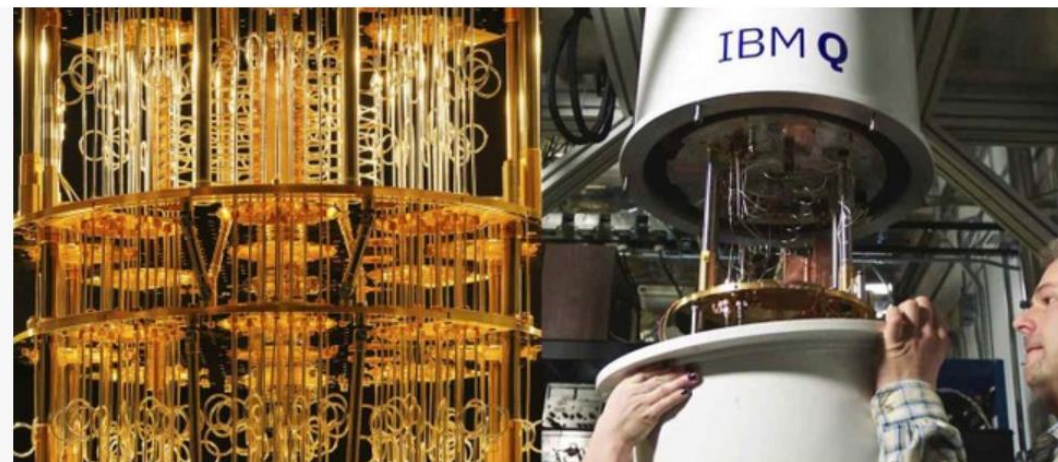
16 Novembre 2021 40

La corsa alla **supremazia quantistica** è in atto da tempo, ormai, con gli Stati Uniti da una parte e la Cina dall'altra a battere e controbattere presunti record che - se veri - spalancherebbero le porte a una nuova era del calcolo computazionale. **IBM** non vuole essere da meno, anzi, rilancia e annuncia **Eagle, il super processore a 127 qubit**. Detto in parole povere, sarebbe in grado di *fare cose* che un computer "normale" svolgerebbe se fosse grande tanto quanto la Terra.

L'annuncio, in realtà, non è proprio ufficiale, ma ha tutti i crismi per poterlo definire tale: ne ha parlato infatti il CEO Arvind Krishna ad "Axios on HBO", anticipandone alcuni aspetti salienti. "*È più potente di qualsiasi altra cosa*", afferma il numero uno di Intel, convinto che il quantum computing possa diffondersi realmente nel giro di pochi anni. Ed è per questo che la *corsa alla supremazia quantistica* non è solo un affare scientifico, avendo infatti risvolti economici decisamente importanti. Diciamo che la *supremazia quantistica può portare alla supremazia economico-finanziaria*.

## GOOGLE PER LA SUPREMAZIA QUANTISTICA

Chi è fortemente impegnato nel calcolo quantistico è **Google**, che di recente **ha persino inaugurato un campus a Santa Barbara** (California) dove lavorano tecnici e ricercatori impegnati a sviluppare soluzioni a dir poco avveniristiche. L'obiettivo nel lungo termine - quanto lungo ad oggi non è dato sapere - è di raggiungere il milione di qubit. Ad oggi parrebbe impossibile, pura fantascienza: si pensi che l'azienda di Mountain View fino a poco



## LA CINA NON RESTA A GUARDARE, ANZI. E L'ITALIA...

**La Cina, intanto, si autoproclama potenza quantistica mondiale**, affermando di aver sviluppato un computer 10 miliardi di volte più potente del Sycamore di Google. Si tratterebbe di un risultato incredibile, su cui però aleggiavano dubbi sulla effettiva veridicità. Così fosse, l'obiettivo di Mountain View con 1 milione di qubit sarebbe *già vecchio*. Niente proclami, invece, **per l'Italia**, che però mostra grandi capacità conoscitive in questo campo: ne è una prova in tal senso **il lavoro che sta eseguendo il CNR di Milano** che potrebbe contribuire alla tanto auspicata accelerazione delle prestazioni dei computer quantistici del futuro.





# Quantum computing: arriva Osprey, il chip da 433 qubit di Ibm

L'ultimo processore Ibm per il calcolo quantistico promette di triplicare i qubit del suo predecessore e sfrutta un nuovo modello di cablaggio che potrebbe risolvere alcuni dei problemi di instabilità dei qubit.

di Nicoletta Boldrini

10 novembre 2022

<https://www.ilsole24ore.com/art/quantum-computing-arriva-osprey-chip-433-qubit-ibm-AEVw7nFC>

Un anno fa l'annuncio di Eagle, il primo processore quantistico con più di 100 qubit, ora il debutto di Osprey, il nuovo chip che possiede più del triplo dei qubit del suo predecessore (ben 433 bit quantistici - qubit). Non si arresta la corsa di IBM verso il primo computer quantistico universale con oltre 1.000 qubit (si chiamerà Condor ed il suo arrivo è previsto nel 2023). Tra gli obiettivi dichiarati, seppur decisamente difficili da raggiungere, arrivare ad avere un sistema quantistico con oltre 4.000 qubit entro il 2025.

Alcuni dei problemi più critici dei computer quantistici sono da sempre legati alla loro instabilità (i qubit sono molto fragili e volatili, perdono velocemente le loro qualità quantiche a causa di vibrazioni, surriscaldamento, onde elettromagnetiche e altre "interferenze"), e all'enorme quantità di energia necessaria per il funzionamento ed il raffreddamento; basti pensare che il primo computer quantistico messo a disposizione da IBM in cloud, nel 2016, per consentire a chiunque di sperimentare le potenzialità del quantum computing, è formato da un





## Technology

# Record-breaking quantum computer has more than 1000 qubits

Atom Computing has created the first quantum computer to surpass 1000 qubits, which could improve the accuracy of the machines

By [Alex Wilkins](#)

📅 24 October 2023

The world's first quantum computer to exceed 1000 qubits has more than double that of the previous record holder, [IBM's Osprey machine, which has 433 qubits](#). Though having more qubits doesn't necessarily mean better performance, large numbers of them will be [needed for future error-free quantum computers that are useful](#), unlike today's noise-filled research machines.

The largest quantum computers, such as those from IBM and Google, use superconducting wires cooled to extremely low temperatures for their [quantum](#) bits, or qubits. But the record-breaking machine from California-based start-up Atom Computing, which has 1180 qubits, uses neutral atoms trapped by lasers in a 2-dimensional grid.

<https://www.newscientist.com/article/2399246-record-breaking-quantum-computer-has-more-than-1000-qubits/>

## Atom Computing: 1180 qubit

I più grandi computer quantistici, come quelli di IBM e Google, utilizzano cablaggi superconduttori raffreddati a temperature estremamente basse per i loro bit quantistici, o qubit. La macchina da record della start-up californiana Atom Computing, che ha 1180 qubit, utilizza atomi neutri intrappolati da laser in una griglia bidimensionale.

<https://www.ai4business.it/quantum-computing/ecco-il-quantum-computer-da-oltre-1000-qubit/>



# Record-breaking quantum computer has more than 1000 qubits

<https://www.technologyreview.com/2023/05/25/1073606/ibm-wants-to-build-a-100000-qubit-quantum-computer/>

Atom Computing has created the first quantum computer with more than 1,000 qubits. It could improve the accuracy of calculations.

By [Alex Wilkins](#)

📅 24 October 2023

The world's first quantum computer with more than 1,000 qubits has been unveiled. The previous record holder had 62 qubits. More qubits doesn't need more error-correction, but it does need more qubits needed for future error-corrected machines.

The largest quantum computer ever built, a 1180-qubit machine from California-based start-up Atom Computing, uses neutral atoms trapped by lasers in a 2-dimensional grid. superconducting wires cooled to extremely low temperatures for their quantum bits, or qubits. But the record-breaking machine from California-based start-up Atom Computing, which has 1180 qubits, uses neutral atoms trapped by lasers in a 2-dimensional grid.

## COMPUTING

# IBM wants to build a 100,000-qubit quantum computer

The company wants to make large-scale quantum computers a reality within just 10 years.

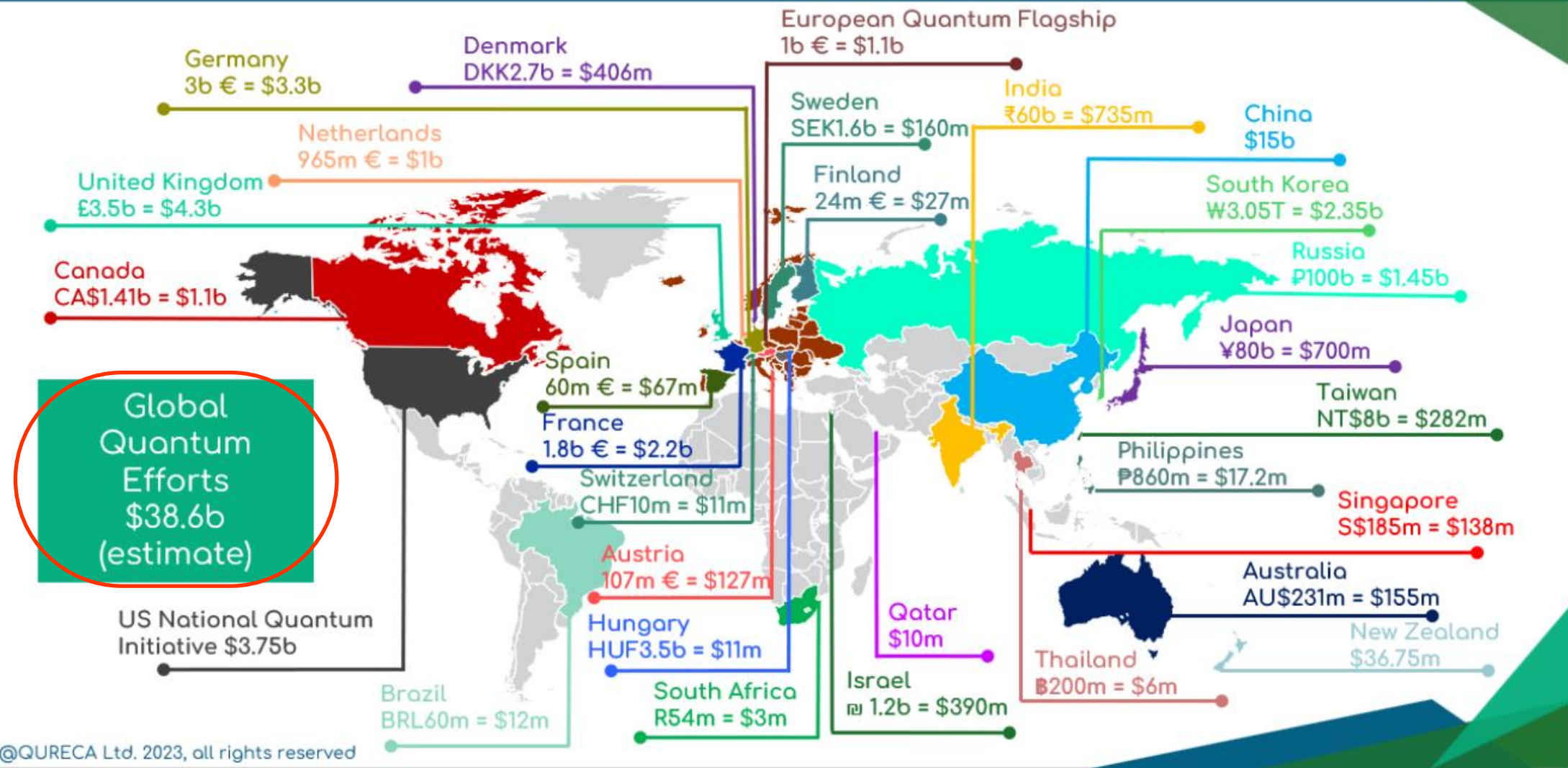


By **Michael Brooks**

May 25, 2023



# Quantum effort worldwide



# Non c'è solo l'AI generativa, l'economia del computer quantistico non smette di crescere

7/10/2023

Secondo uno studio di McKinsey il valore economico generato nell'automotive, nella chimica, nelle scienze della vita e nei servizi finanziari potrebbe raggiungere 1.270 miliardi entro il 2035

## Il ruolo del quantum computing

Gli esperti della società americana hanno considerato tre diverse componenti e la più rilevante (il 90% del giro d'affari previsto nel 2040 deriverà da questo segmento) è il quantum computing, e quindi i sistemi che sfruttano le leggi della meccanica quantistica per fornire un miglioramento esponenziale delle prestazioni delle applicazioni di analisi dei dati e per abilitare potenzialmente contesti di calcolo completamente nuovi. Non meno importanti, anche se meno impattanti a livello economico, sono le altre due "anime" del fenomeno mappate da McKinsey: le soluzioni di quantum communications che garantiscono il trasferimento crittografato delle informazioni e il cosiddetto *quantum sensing*, la nuova generazione di sensori che andranno a rilevare e misurare variabili di diversa natura con una sensibilità superiore rispetto a quella disponibile oggi.

<https://www.ilsole24ore.com/art/non-c-e-solo-l-ai-generativa-l-economia-computer-quantistico-non-smette-crescere-AFUO2II>





# CHE COSA EMERGE?

RILEVANZA DEL  
TEMA

MULTI –  
DIMENSIONALITÀ



*IN EUROPA*



# In Europa la svolta c'è stata nel 2016 con il Quantum Manifesto



<https://qt.eu/app/uploads/2018/04/930>

[56 Quantum-Manifesto WEB.pdf](#)



# Quantum Manifesto

*“Technologies based on the laws of quantum mechanics, [...], will lead to a wave of new technologies that will create many new businesses and help solve many of today’s global challenges. [...] Quantum technologies could result in revolutionary improvements in terms of capacity, sensitivity and speed, and will be the decisive factor for success in many industries and market”*

*[...]*

*“This Manifesto calls upon Member States and the European Commission to launch a €1 billion flagship-scale initiative in Quantum Technology, preparing for a start in 2018 within the European H2020 research and innovation framework programme. It is endorsed by a broad community of industries, research institutes and scientists in Europe.”*

*[...]*

*“An ambitious, long-term, flagship-scale initiative combining education, science, engineering and innovation across Europe is needed in order to unlock the full potential of quantum technologies, to accelerate their development and to bring commercial products to public and private markets.”*





# Quantum Manifesto

*“This initiative aims to place Europe at the forefront of the second quantum revolution [...] bringing transformative advances to science, industry and society. It will create new commercial opportunities addressing global challenges, provide strategic capabilities for security and seed as yet unimagined capabilities for the future. As is now happening around the world, developing Europe’s capabilities in quantum technologies will create a lucrative knowledge-based industry, leading to long-term economic, scientific and societal benefits. It will result in a more sustainable, more productive, more entrepreneurial and more secure European Union.”*

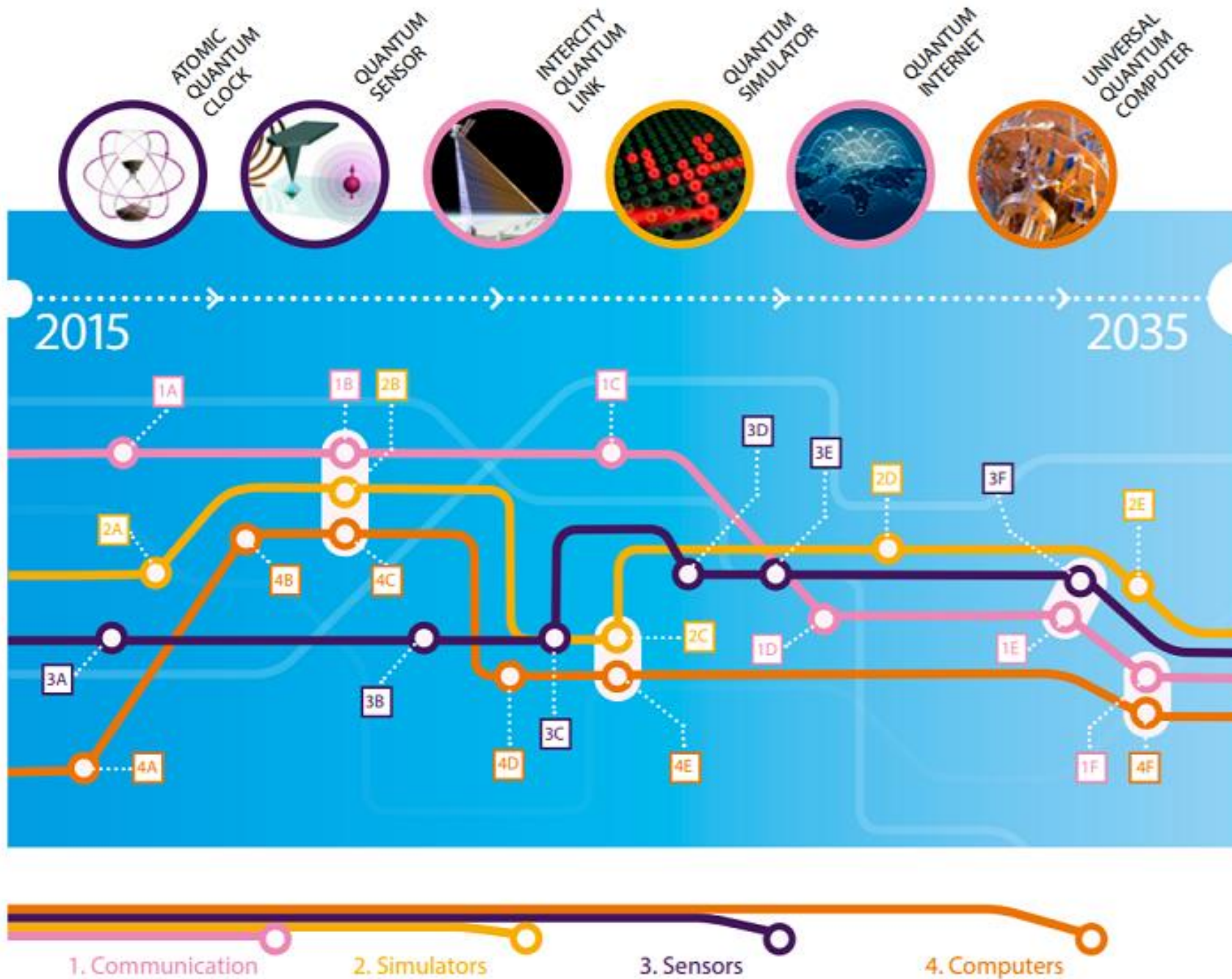


# Quantum Manifesto

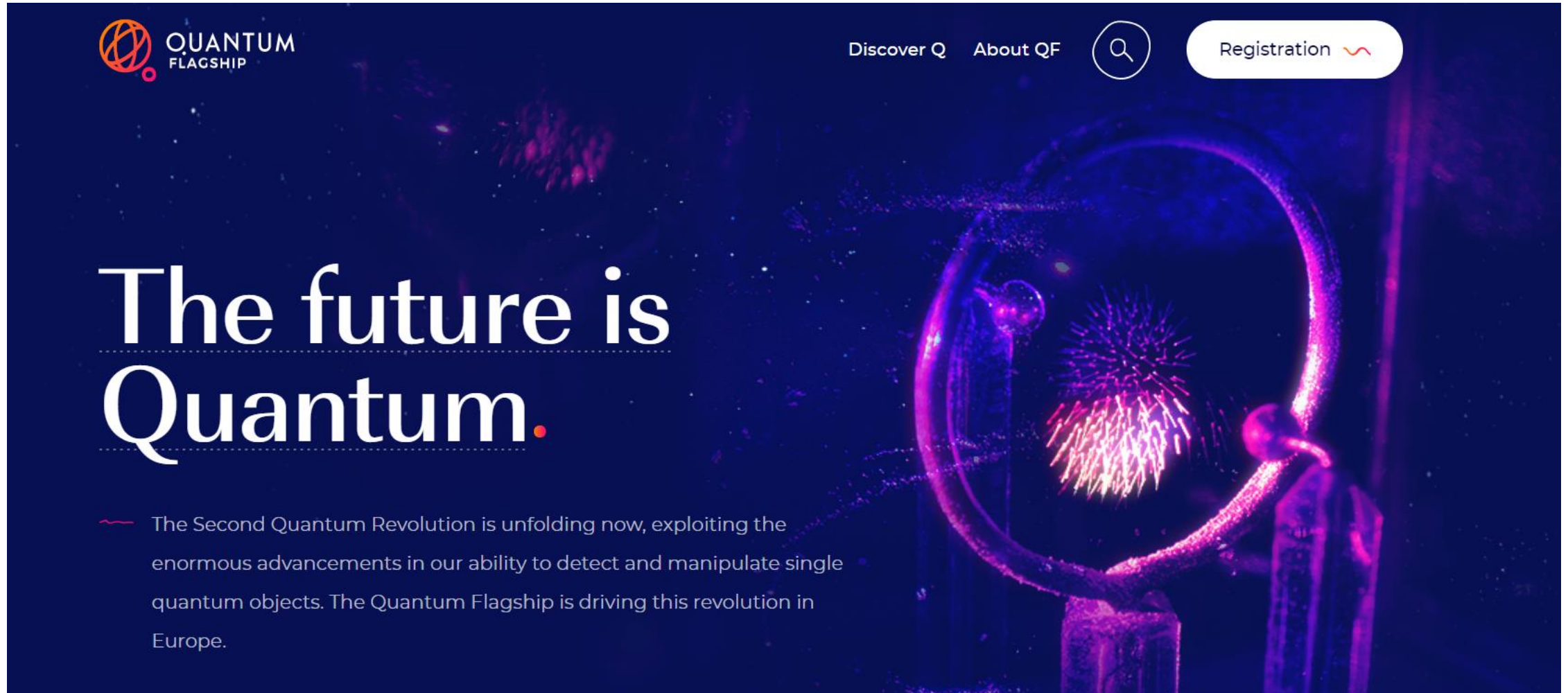
- Avviare un'industria quantistica europea competitiva per posizionare l'Europa come leader nel futuro panorama industriale globale;
- Espandere la leadership scientifica europea e l'eccellenza nella ricerca quantistica;
- Rendere l'Europa una regione dinamica e attraente per imprese innovative e investimenti nelle tecnologie quantistiche;
- Utilizzare e valorizzare dei progressi che portano le tecnologie quantistiche per fornire soluzioni migliori alle grandi sfide in settori quali energia, salute, sicurezza e ambiente.







# A seguito la risposta: QUANTUM FLAGSHIP



**QUANTUM FLAGSHIP**

Discover Q About QF

Registration

# The future is Quantum.

The Second Quantum Revolution is unfolding now, exploiting the enormous advancements in our ability to detect and manipulate single quantum objects. The Quantum Flagship is driving this revolution in Europe.

<https://qt.eu/>



<https://youtu.be/NUgRXtvJaUI>

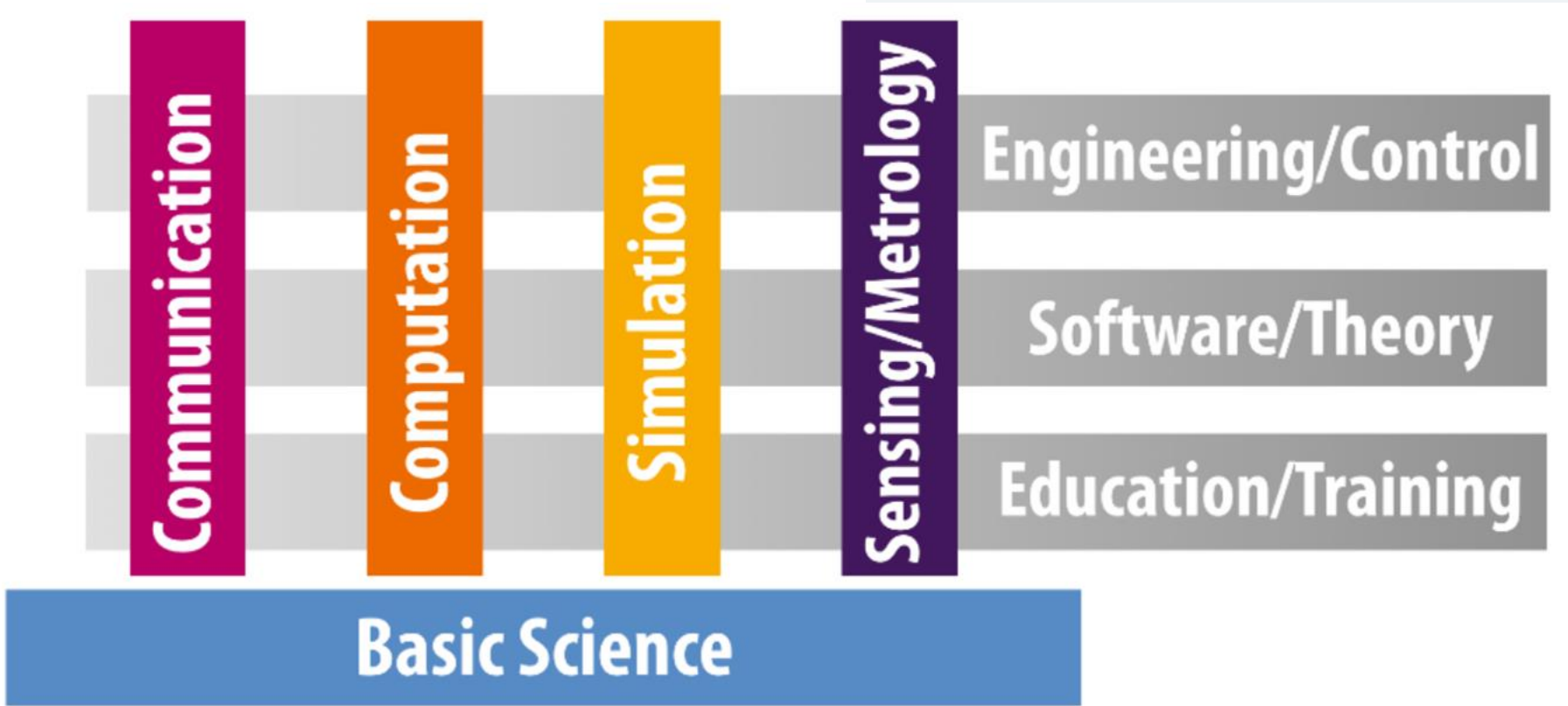


<https://qt.eu/>

# About the Quantum Flagship.

The Quantum Flagship was launched in 2018 as one of the largest and most ambitious research initiatives of the European Union. With a budget of at least €1 billion and a duration of 10 years, the flagship brings together research institutions, academia, industry, enterprises, and policy makers, in a joint and collaborative initiative on an unprecedented scale.





**QUATTRO PILASTRI**



# Comunicazione quantistica

La sicurezza della comunicazione è di importanza strategica per consumatori, imprese e governi.

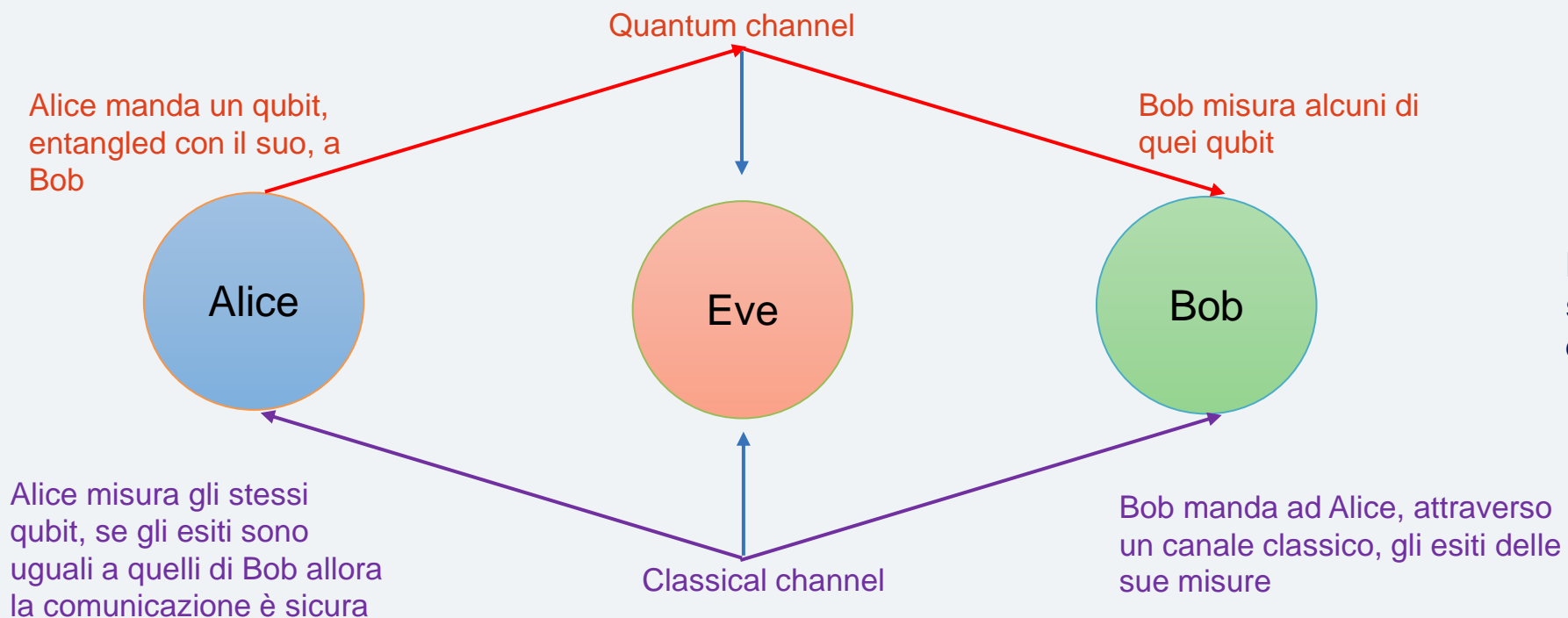
I sistemi crittografici attuali si basano sull'algoritmo RSA. Questi sistemi, attualmente sicuri, non lo sono all'attacco di un ipotetico hacker che utilizza un computer quantistico. Questo ha portato allo sviluppo di metodi di crittografia immuni agli attacchi dei computer quantistici e oggi disponibili in commercio.





# Comunicazione quantistica: crittografia

- Comunicazione classica: qualcuno può sentire!
- La comunicazione quantistica può essere estremamente sicura per il teorema del **no-cloning**.



**Eve non può “origliare” lo stato quantistico di Alice e Bob senza disturbare !**



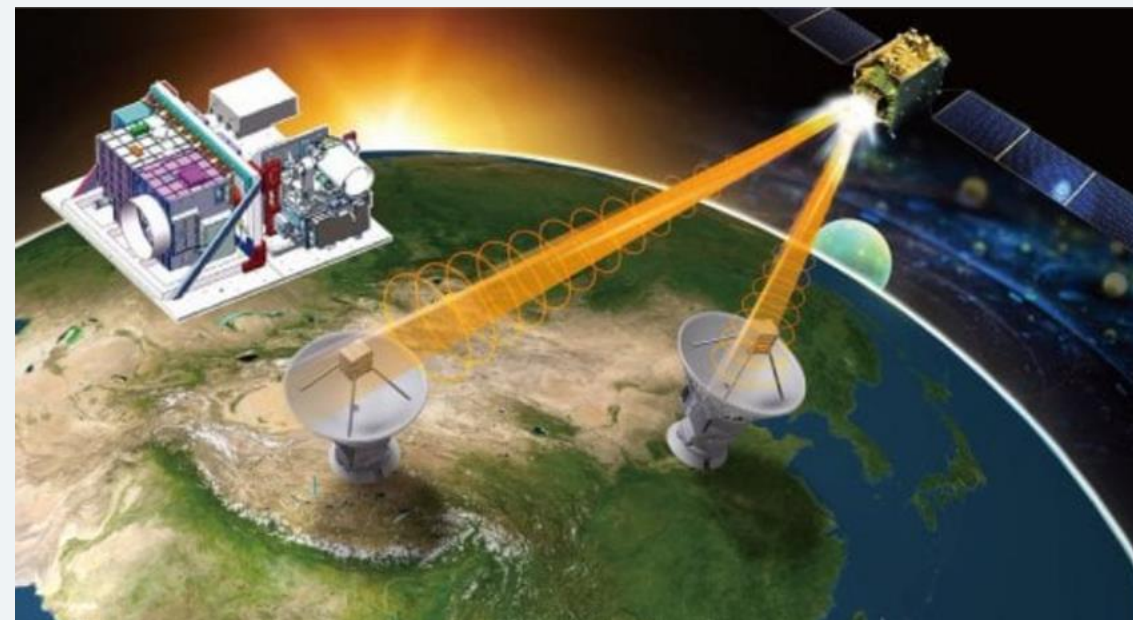


# Comunicazione quantistica: teletrasporto

Oggi è possibile teletrasportare da una parte all'altra dello spazio **lo stato** di un qubit.

- Teletrasporto di uno stato di un fotone da una parte all'altra del Danubio nel 2004;
- L'ESA (European Space Agency) è riuscita a teletrasportare lo stato di fotoni dall'osservatorio di Tenerife a quello di Palma di Maiorca, nelle Isole Canarie, distante ben 143 km (2012);
- È stato lanciato in orbita il satellite cinese Micius e nel 2017 i ricercatori sono riusciti a mettere comunicazione il satellite e con la Terra;
- Giugno 2021 collegate due città cinesi distanti tra loro 511 km.

Il teletrasporto quantistico è alla base dell'internet quantistico (<https://qutech.nl/research-engineering/quantum-internet/>).



# G20, a Trieste prima prova di comunicazione quantistica anti-hacker

La dimostrazione pubblica di comunicazione quantistica si è svolta con un collegamento audio-video criptato tra Italia, Slovenia e Croazia, che risponde alle nuove esigenze di sicurezza

Condividi 42

Tweet



Trieste, G20 digitale. Giorgetti: "Su sicurezza rafforzare risposta governi"

05 agosto 2021

C'è la ricerca italiana alla base della prima dimostrazione internazionale di **comunicazione quantistica anti hacker** che sarà condotta oggi a Trieste, nella tappa scientifica del G20. La demo si è svolta fra tre stati, Italia, Slovenia e Croazia e si è sviluppata su  **fibre ottiche** che collegano tre nodi (Trieste, Lubiana e Fiume) per una distanza compresa tra gli **80 e i 100 Km**.

Il collegamento criptato con tecnologia

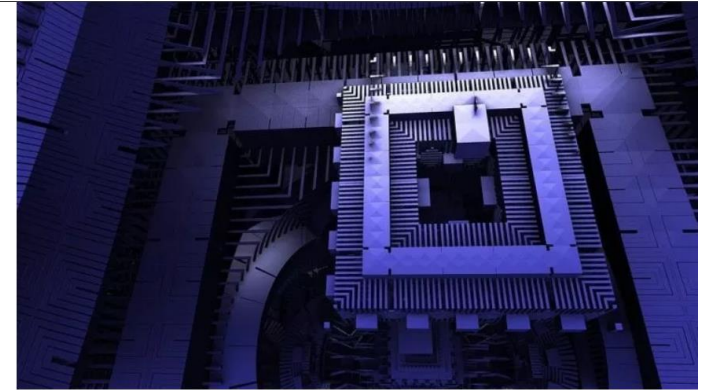
[https://www.repubblica.it/cronaca/2021/08/05/news/g20\\_a\\_trieste\\_comunicazione\\_quantistica\\_e\\_cybersicurezza-313041035/](https://www.repubblica.it/cronaca/2021/08/05/news/g20_a_trieste_comunicazione_quantistica_e_cybersicurezza-313041035/)

R CONTENUTO PER GLI ABBONATI



## G20, ecco perché la comunicazione quantistica può difendere i dati dagli hacker

dal nostro inviato Beniamino Pagliaro



*Per il fisico Angelo Bassi "Anche se dovessero essere rubati non possono essere decifrati perché criptati". Al summit di Trieste l'esperimento: una video-conferenza triangolata tra Italia, Slovenia e Croazia ha viaggiato su fibre ottiche che collegano i tre nodi per una distanza tra gli 80 e i 100 chilometri*

La comunicazione quantistica può rappresentare una risposta efficace alle crescenti minacce di gruppi criminali interessati a rubare dati sensibili di cittadini e imprese. Il fisico che ha guidato la prima dimostrazione di comunicazione quantistica internazionale al G20 di Trieste, **Angelo Bassi**, del dipartimento di Fisica dell'Università di Trieste, è convinto - come spiega in un'intervista a *Repubblica* - che la tecnologia possa diventare un alleato importante per governi e aziende che sempre più spesso sono ricattati dopo un'intrusione nei loro database, [come è successo di recente anche con i dati sanitari della Regione Lazio](#).

La teoria dei quanti, da cui derivano i computer quantistici o la comunicazione quantistica, studia il moto e le interazioni di sistemi fisici microscopici. La comunicazione quantistica usa le leggi dei quanti per proteggere i dati: i fotoni rappresentano





# Computer quantistici

Si tratta di macchine utilizzate per risolvere difficili problemi computazionali, come attività di ottimizzazione, ricerche su database, apprendimento automatico e riconoscimento delle immagini. Sfruttando la nuova unità di base (QUBIT) e altre proprietà quantistiche come l'entanglement, un computer quantistico agisce come un enorme dispositivo in grado di gestire grandi quantità di dati e di performare un numero esponenzialmente elevato di calcoli contemporaneamente. Esistono già molti algoritmi che sfruttano questo potere e che ci consentiranno di affrontare problemi che nemmeno i più potenti supercomputer classici risolverebbero mai.







# COMPUTAZIONE QUANTISTICA

## A cosa servono i computer quantistici?

- I computer quantistici sono universali ovvero possono simulare ogni sistema quantistico, dati abbastanza qubit e tempo.

Questo ha applicazioni nella chimica quantistica, nella biologia quantistica, nella scienza dei materiali e in tanti altri campi.

- I computer quantistici possono anche risolvere uno dei problemi più difficili ovvero il problema di fattorizzazione dei numeri molto più velocemente dei computer classici.  
Questa è la base per la maggior parte delle piattaforme di sicurezza attuali!

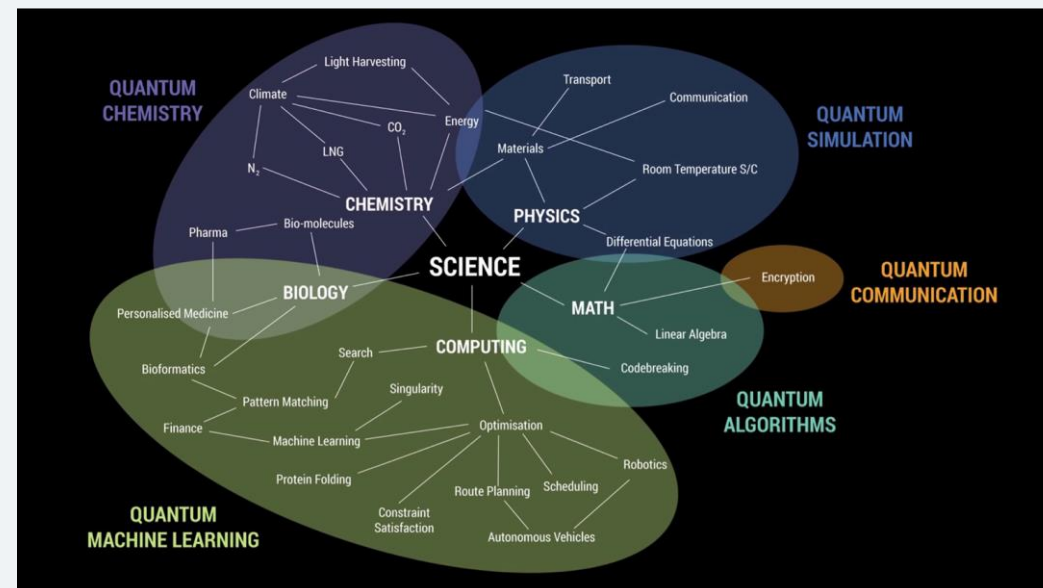


Image credit: <http://opentranscripts.org/transcript/towards-quantum-computer/>

**What are the prime factors of the numbers...**

$$15 = 3 \times 5$$

$$663 = 3 \times 13 \times 17$$

$$2257 = 37 \times 61$$

$$30297 = 3 \times 10099 \quad (!!!)$$



# COMPUTER QUANTISTICO: POTENZIALITÀ

## Esempio: **Folding proteico**

Il folding proteico è il processo di ripiegamento molecolare attraverso il quale le proteine ottengono la loro struttura tridimensionale.

Soltanto una volta terminato il ripiegamento le proteine possono assumere la loro funzione fisiologica.

Perché è un problema:

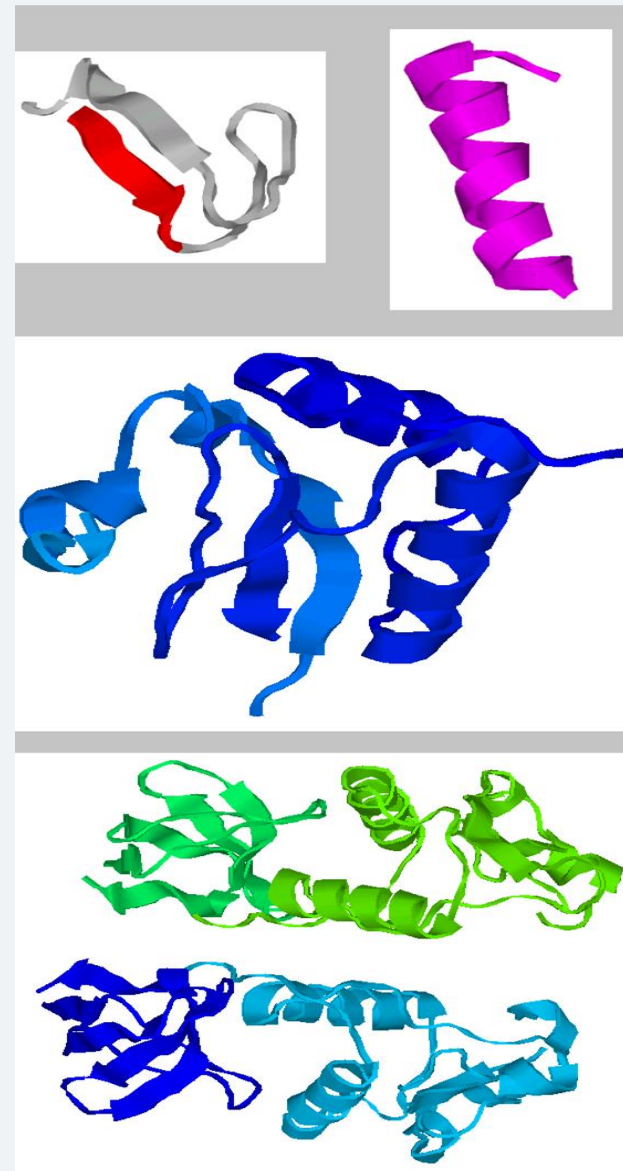
Possiamo pensare una proteina come una catena di amminoacidi. Supponiamo sia formata dal 100 amminoacidi, che ciascuno possa assumere

2 configurazioni  $\rightarrow 2^{100}$  diverse possibili configurazioni.

Ma quanto tempo richiede un computer per trovare la configurazione giusta?

Supponiamo che in computer debba provare tutte le configurazioni possibili e supponiamo che ogni prova richieda  $2^{-12}$ sec. Per l'intera ricerca un computer richiederebbe  $2^{100} \cdot 2^{-12} \approx 40 \cdot 10^9$  anni  $\rightarrow$  quasi tre volte l'età stimata dell'Universo!!

<https://protein-folding-demo.mybluemix.net/>



<https://physicsworld.com/a/quantum-approach-reveals-faster-protein-folding/>

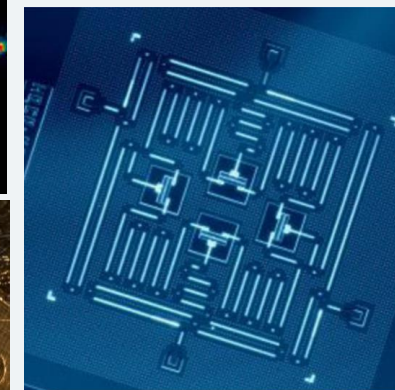
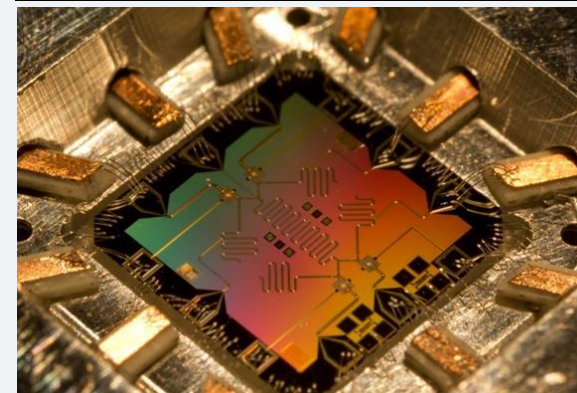
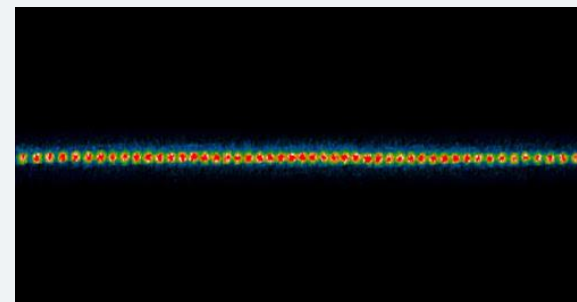


# Computer quantistici: costruire e controllare Qubit

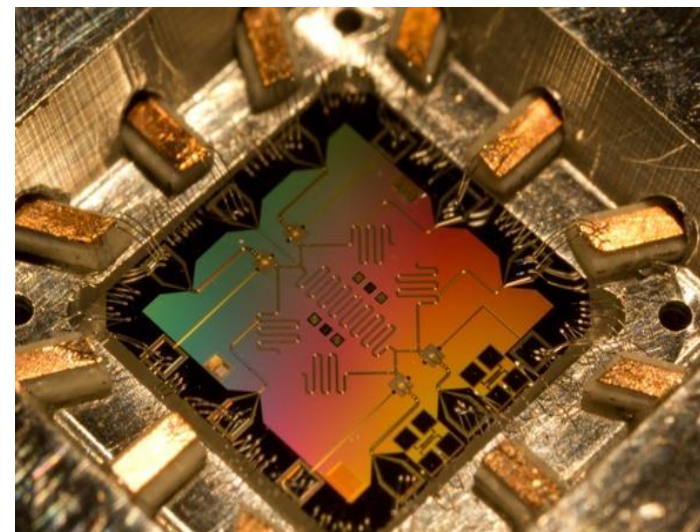
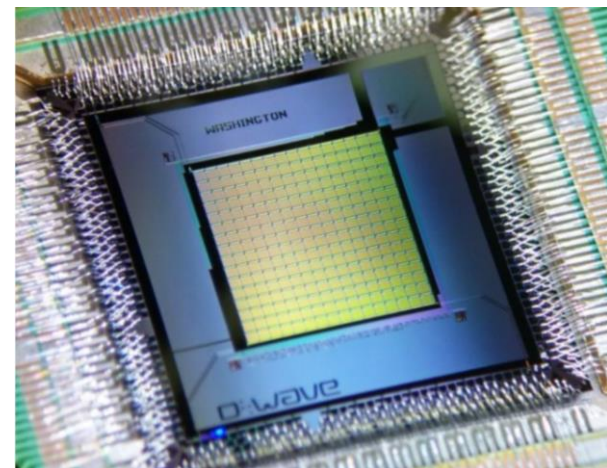
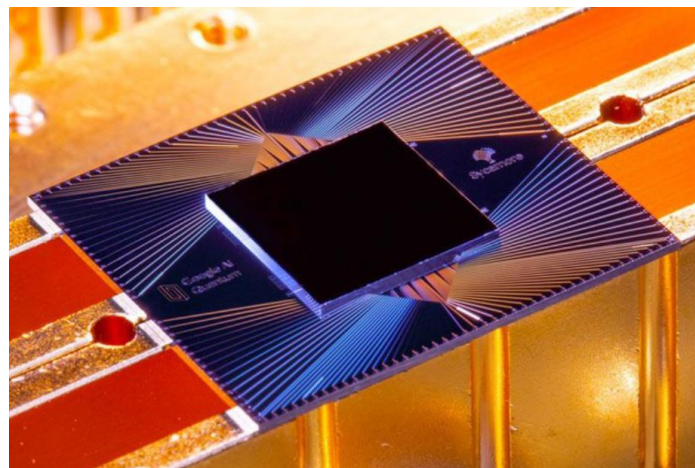
**Possiamo costruire i qubit da:**

- Circuiti superconduttori
- Atomi neutri
- Ioni intrappolati
- Fotoni
- ...e da molti altri sistemi quantistici!

Comunque, i qubit sono *molto sensibili* al **rumore** e **all'interazione con l'ambiente esterno** (problema della decoerenza). Questo rende ancora oggi una sfida la costruzione di un computer quantistico. C'è pertanto un enorme bisogno di una migliore ingegneria e tecnologia.







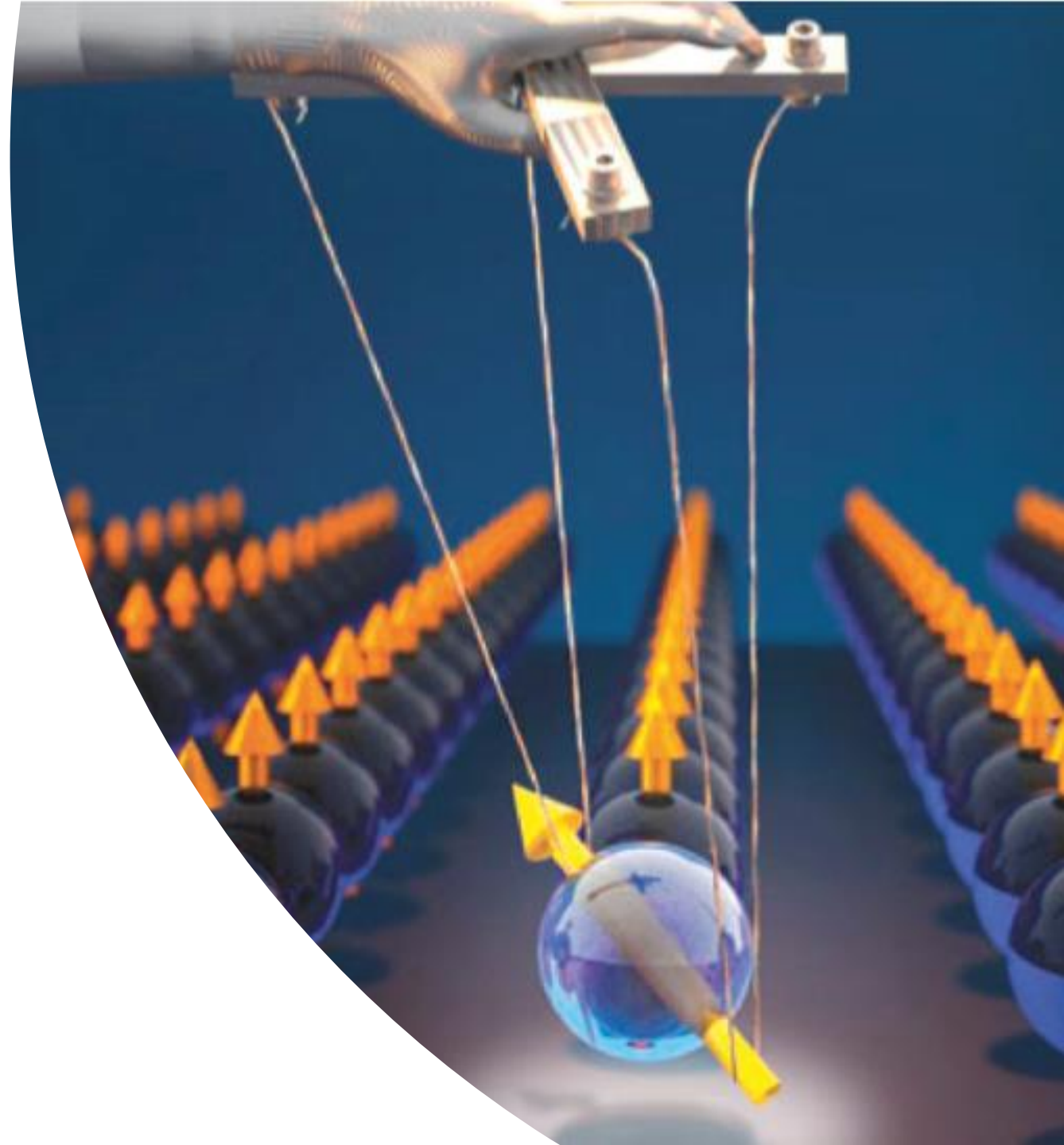
<https://www.cs.virginia.edu/~robins/Quantum Computing with Ions.pdf>  
<https://www.ibm.com/blogs/research/2017/11/qubit-explained/>  
<https://www.ibm.com/easytools/runtime/hspx/prod/public/X0027/PortalX/it/page/pageTemplate?s=78c374df5c884363b46454a5ffefb5d9&c=5ee2c50e1f374725b08d9f24b2fc6027%3Flnk%3Dithpv18l2>



# Simulatori Quantistici

La simulazione consente di esplorare nuovi processi o proprietà, può essere utilizzata come strumento per progettare nuovi materiali utili in più settori, come quello dell'energia o dei trasporti.

Il loro principale vantaggio rispetto ai computer quantistici per tutti gli usi è che i simulatori quantistici non richiedono il controllo completo di ogni singolo componente, e quindi sono più semplici da costruire.





# Simulazione quantistica

*“Now, what kind of physics are we going to imitate? [...] the physical world is quantum mechanical, and therefore the proper problem is the simulation of quantum physics. [...] I want to talk about the possibility that there is to be an exact simulation, that the computer will do the same as nature”*

*Richard Feynman*

Possiamo provare a studiare dei sistemi direttamente, ma qualche volta risulta difficile.

Per esempio, il comportamento degli elettroni in un materiale (come i superconduttori) è difficile da studiare perché gli elettroni sono così “piccoli e veloci” e i materiali hanno dei difetti difficili da controllare. Quindi abbiamo creato sistemi con atomi freddi che imitano questi sistemi difficili da studiare.

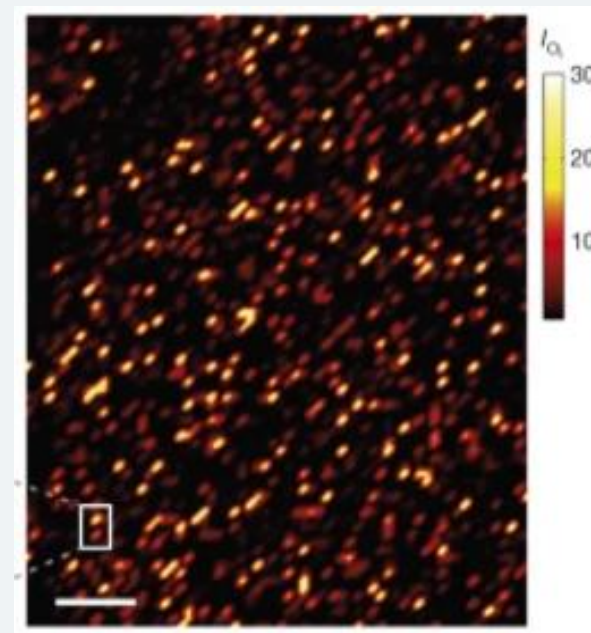


Image credit: G. Campi, et al. Nature 525, 359, (2015).





# Simulazione quantistica

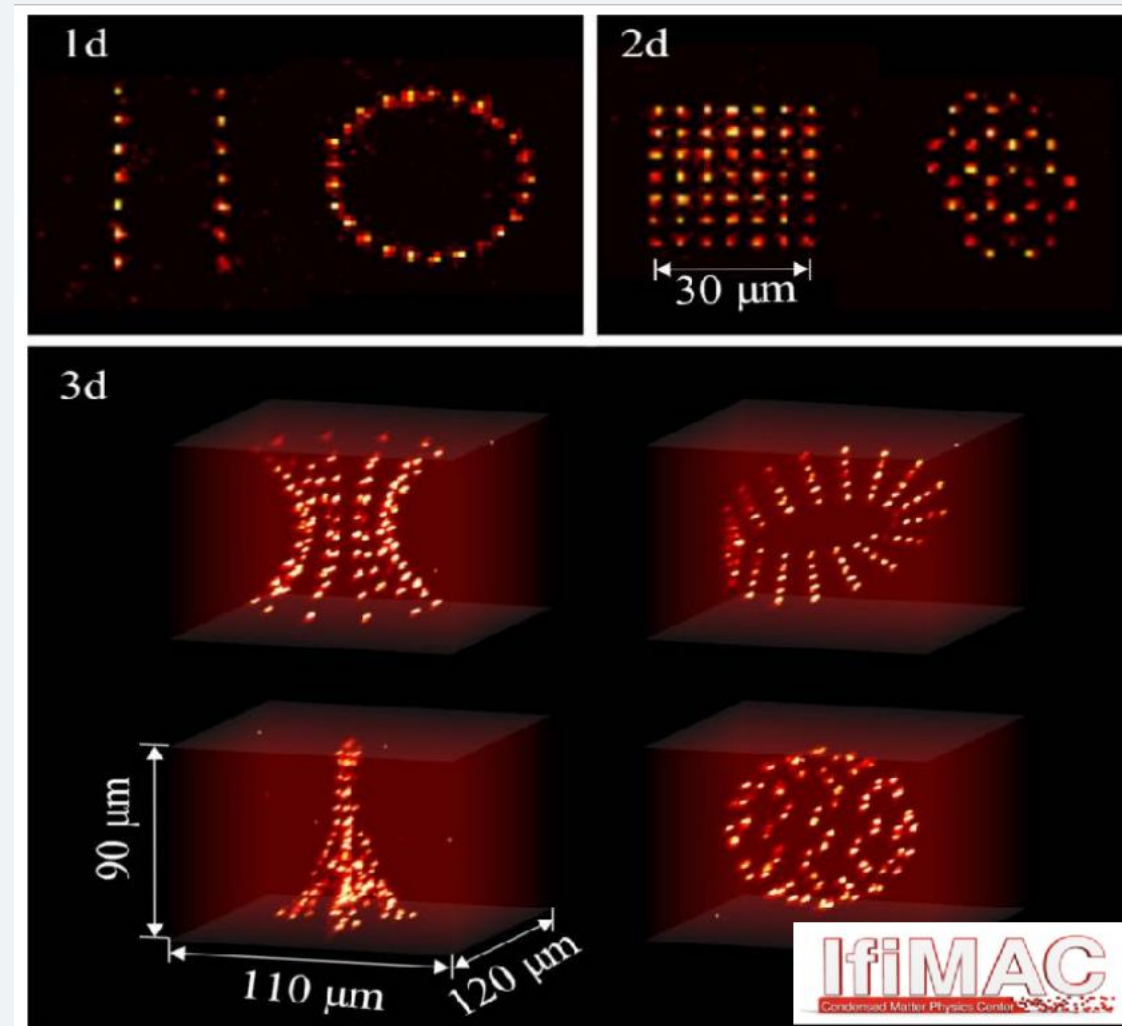
Manipolazione di singoli atomi/ioni freddi, intrappolati da un potenziale ottico (laser).

Versatilità:

- geometrie diverse
- diverse velocità di “hopping”
- interazione variabili
- gradi di libertà interni
- statistiche diverse (bosone, fermioni, ...)

Simulazione di una vasta gamma di modelli:

- sistemi di fisica della materia
- modelli di interazioni fondamentali (particelle e gravità)



# Sensori quantistici

I sensori quantistici sfruttano alcune proprietà della fisica quantistica (come la sovrapposizione e / o l'entanglement) per ottenere una maggiore sensibilità e risoluzione. Troveranno ampio uso nelle aziende ed istituzioni pubbliche che si occupano di progetti di costruzione; ad esempio, per misurare i vuoti sottoterra o per rilevare depositi minerali. Saranno inoltre utilizzati per fornire diagnosi non invasive. Potranno migliorare notevolmente le tecnologie di imaging, ad esempio, consentendo immagini a risoluzione più elevata attraverso l'uso della luce squeezed o creando la capacità di produrre un'immagine misurando un singolo fotone che è entangled con un secondo.





# Quantum sensing and metrology

- L'**interferenza atomica** può essere usata per rilevare il moto.
- Gli atomi possono essere  **$10^{10}$**  volte più sensibili!
- Gli atomi, oscillando a frequenze molto precise, ci permettono di realizzare sensori e orologi estremamente precisi.
- Possiamo persino posizionare questi dispositivi nello spazio!

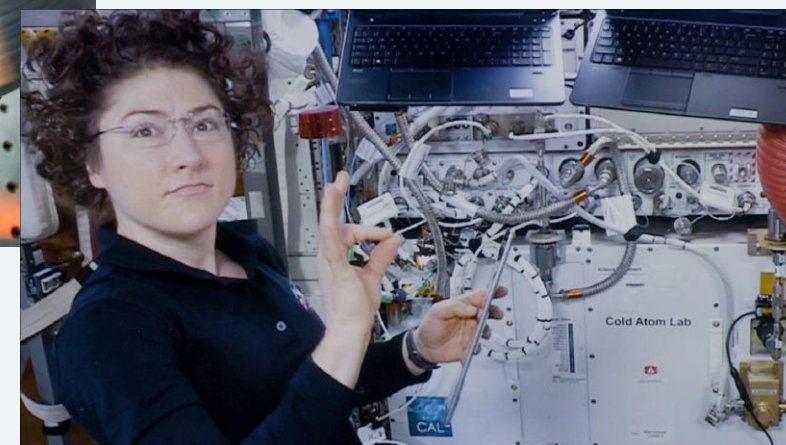
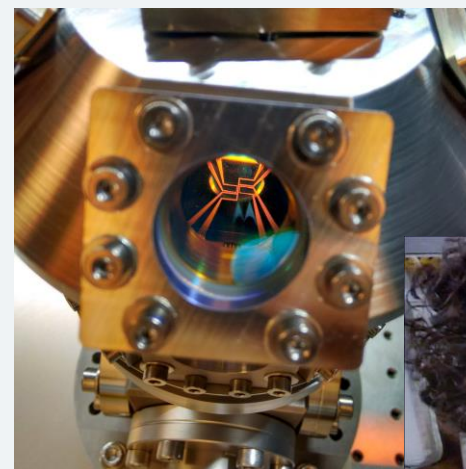
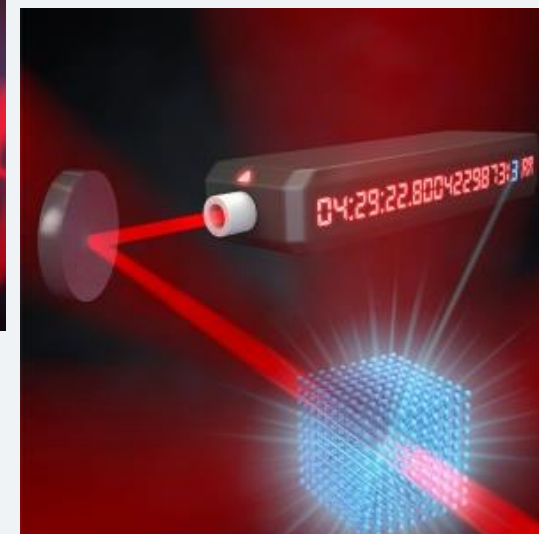
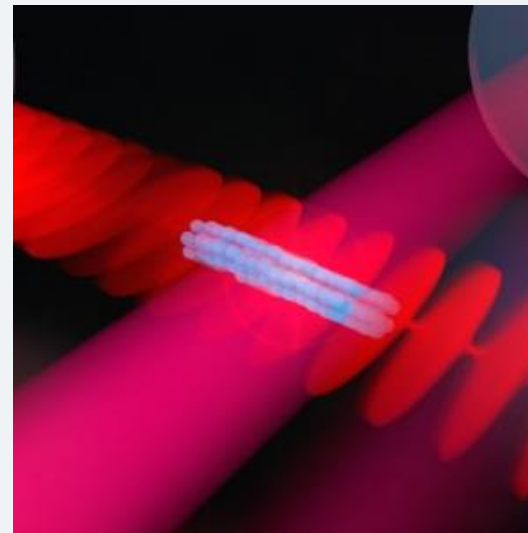


Image credit: jila.colorado.edu, ESA, NASA





# Controllo e imaging dei singoli atomi

I microscopi ci permettono di vedere il mondo microscopico... per cui perché non provare per i singoli atomi?

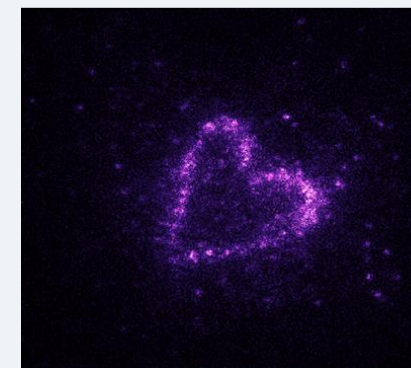
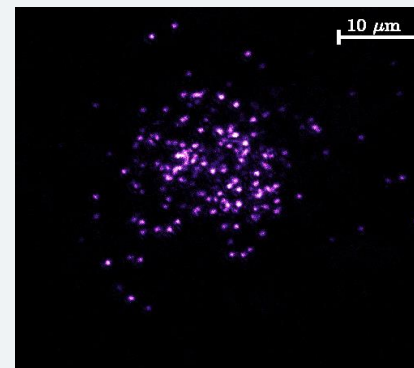
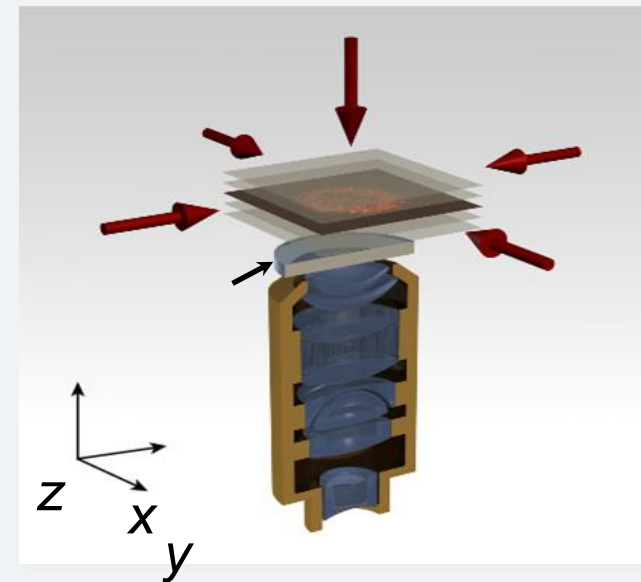
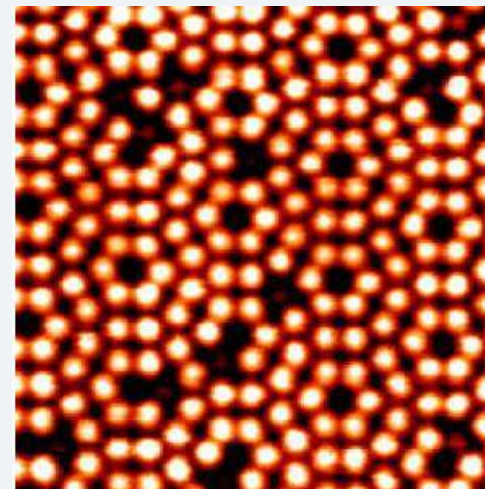
*Come possiamo farlo?*

**Step 1:** intrappolare gli atomi in un reticolo ottico (proprio come con l'orologio)

**Step 2:** Posizionare gli atomi vicino ad un microscopio

**Step 3:** Fare loro una foto!

Noi controlliamo con la **luce** la posizione degli atomi, gli stati quantistici e il movimento.



# QUANTUM TECHNOLOGY APPLICATIONS



## Ultra-precise clocks

Navigation systems  
Smart energy grids  
Timestamp financial transactions

## Medical Imaging Techniques



Nuclear magnetic imaging  
Detailed visualization  
Advancing Imaging Techniques



## Simulators

Quicker drug development  
New materials

## Quantum Key Distribution



Most Secure Communications  
Eavesdropping detection



## Sensors

Oil and gas exploration  
High-precision geodesy and navigation

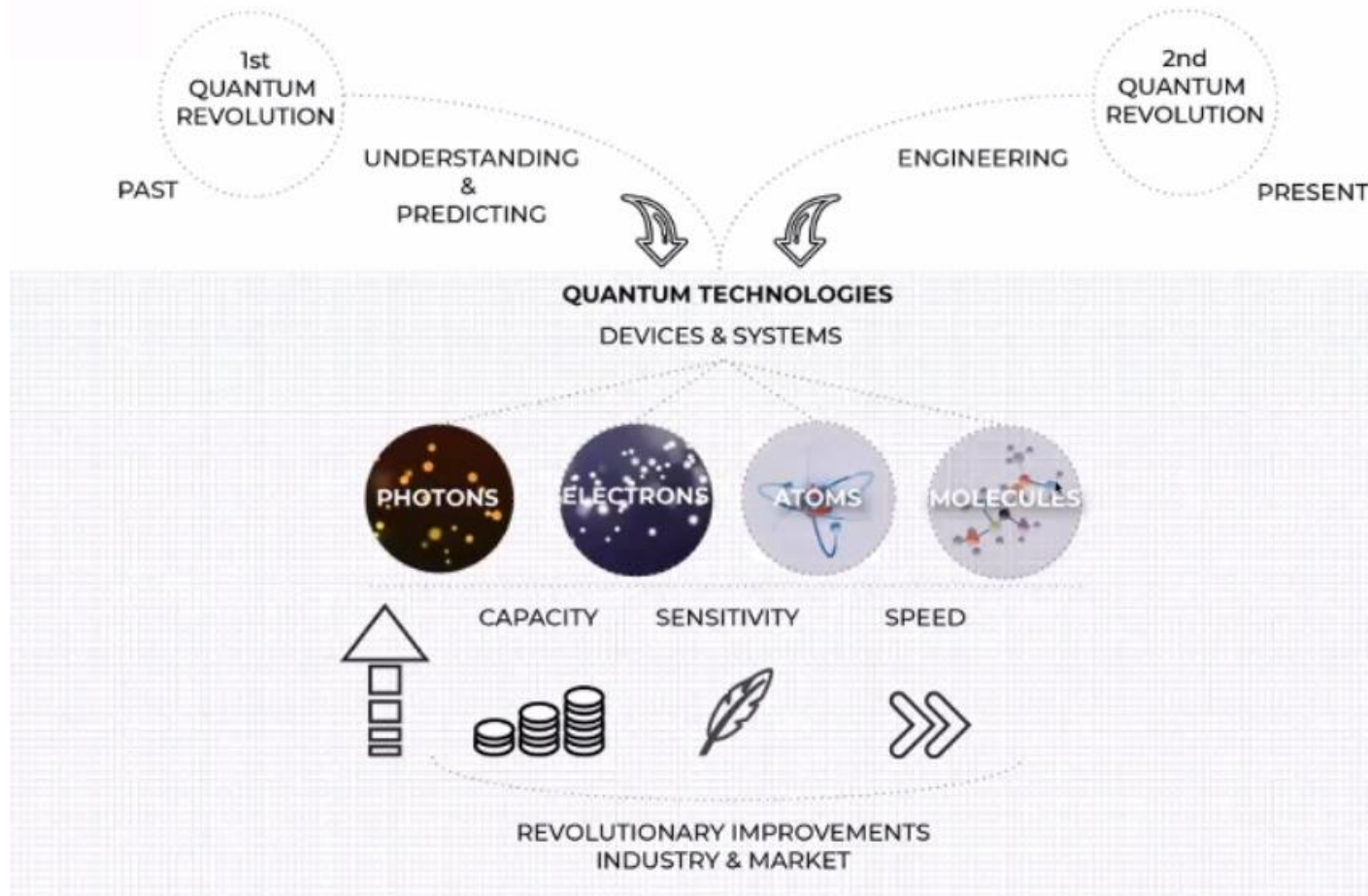
## Quantum Computing



Machine Learning  
Artificial Intelligence  
Big data

# RICAPITOLANDO

## WHAT ARE QUANTUM TECHNOLOGIES?

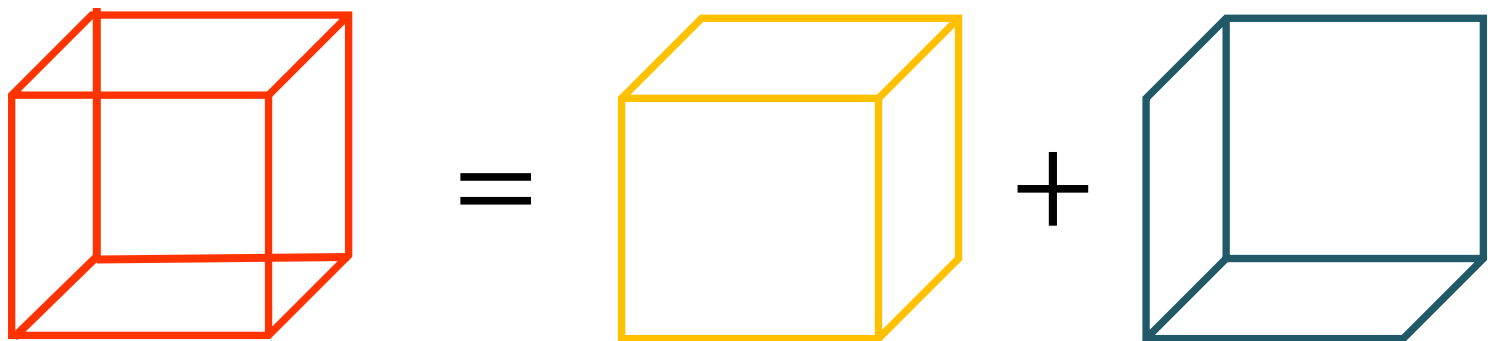


E' possibile manipolare dei singoli quanti: singoli fotoni, elettroni, atomi e molecole.

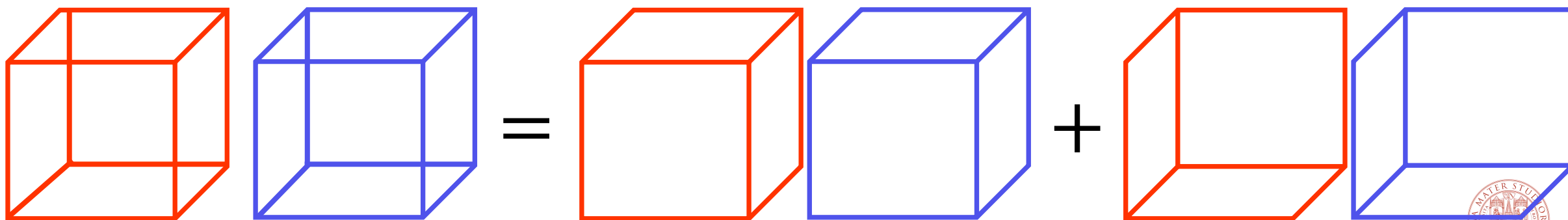
Si possono sviluppare tecnologie che hanno un potere computazionale, una sensibilità nelle misure, una velocità di calcolo e una sicurezza nelle comunicazioni che non si ha nelle tecnologie di oggi.



*Principio di sovrapposizione*

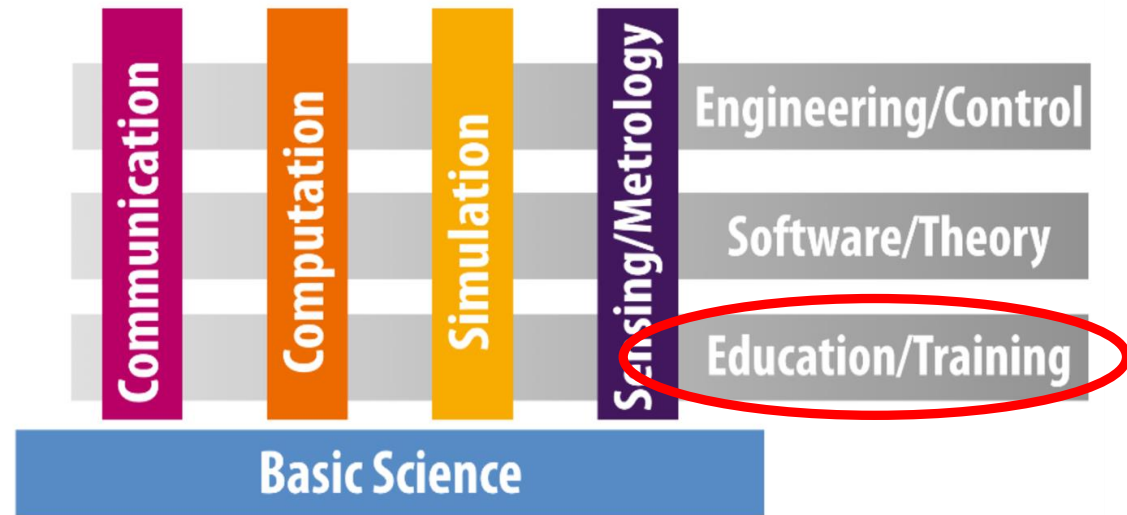
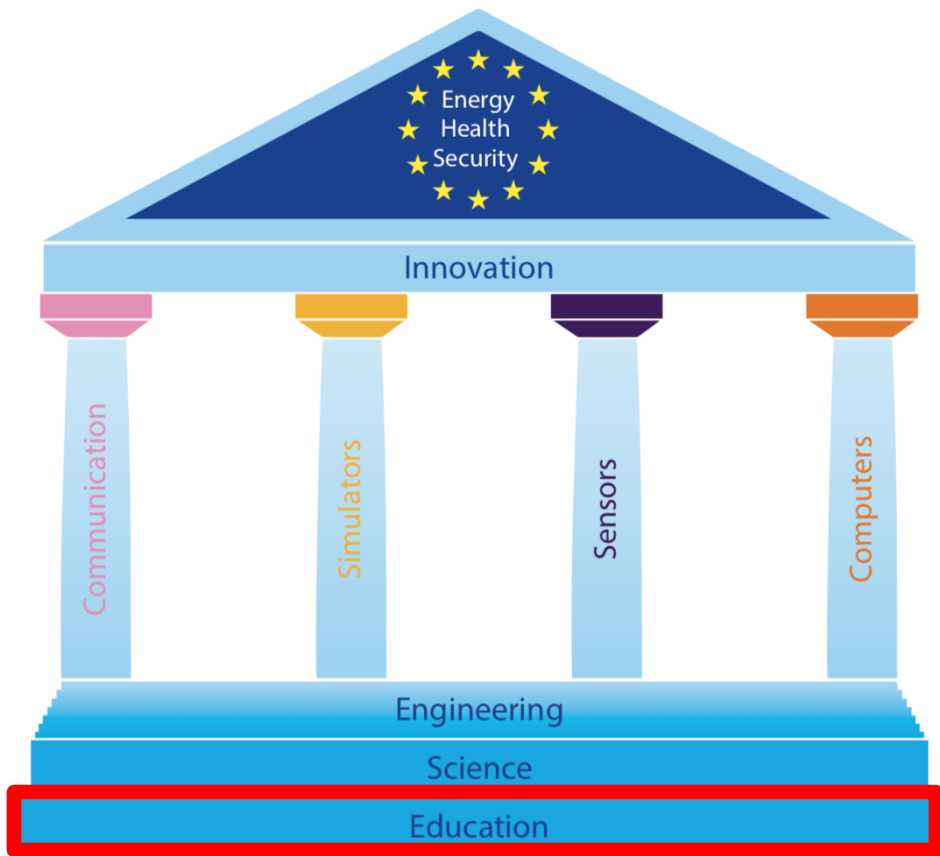


*Entanglement*



# ***E la didattica e la ricerca in didattica?***

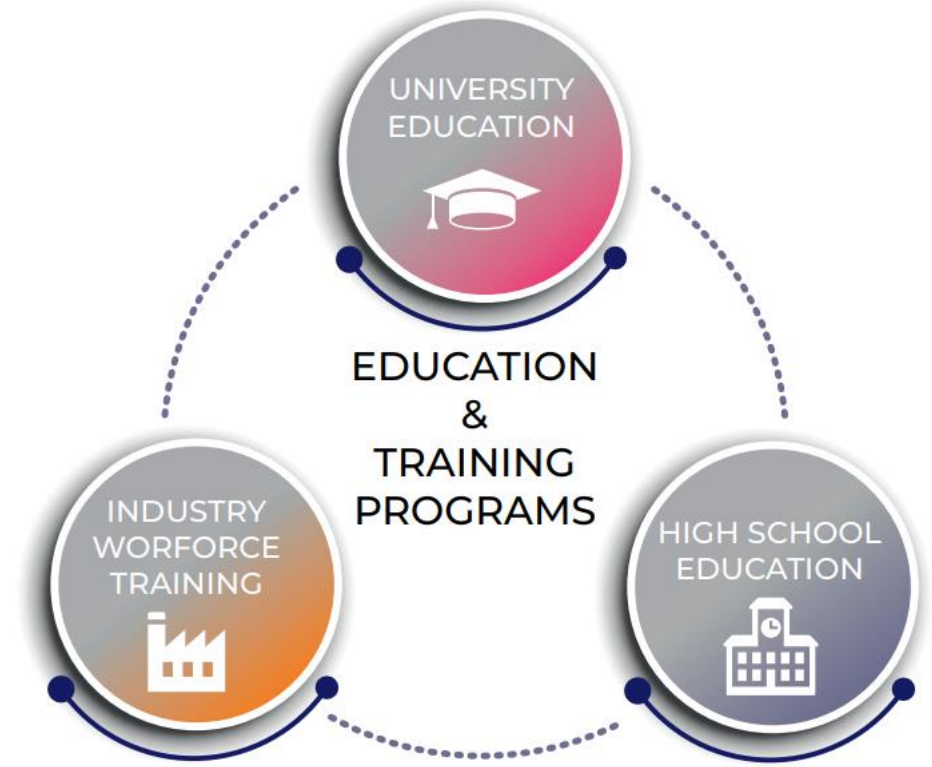








The creation of a learning ecosystem embracing the concepts of quantum physics at all levels ranging from school up to the working environment is required, not just for a quantum-ready workforce to emerge, but for a well-informed society with knowledge and attitudes towards the acceptance of quantum technologies.



# Le aree di lavoro

- Formazione di impresa
- Didattica universitaria (programmi di dottorato, corsi per laurea magistrale...)
- Gender and minorities issues
- Outreach (educazione della cittadinanza, alfabetizzazione quantistica, educazione informale e formale)



# Le aree di lavoro

- Formazione di impresa
- Didattica universitaria (programmi di dottorato, corsi per laurea magistrale...)
- Gender and minorities issues
- Outreach (educazione della cittadinanza, alfabetizzazione quantistica, educazione informale e formale)

L'università di Bologna dal 2019:

- PLS con studenti di scuola secondaria
- Corsi di formazione insegnanti

In collaborazione con l'università di Pavia e l'università di Como dal 2020:

- Corsi PCTO (sia summer/spring school, sia percorsi online)
- Corsi di formazione insegnanti







ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

# Prima e Seconda Rivoluzione a confronto

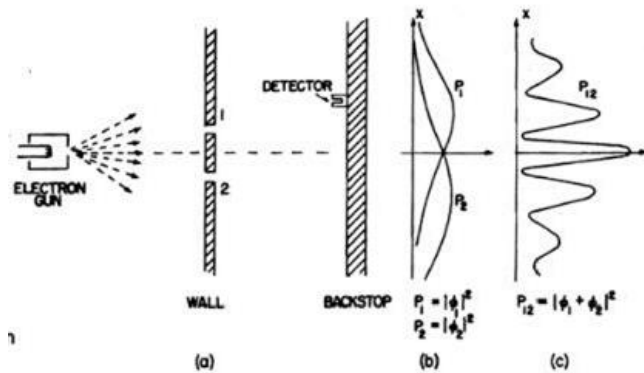
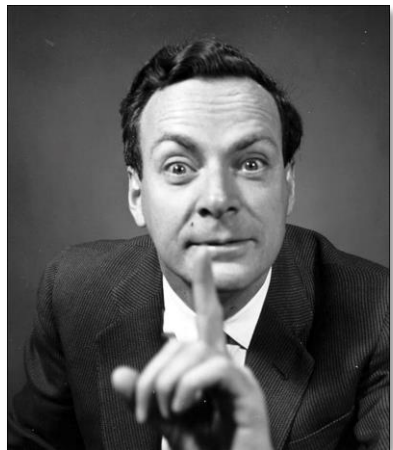
Complementarità e indeterminazione

Prima rivoluzione quantistica (1927): primi decenni del XX secolo

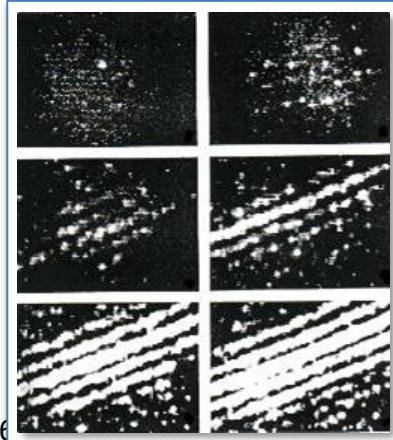


Entanglement

Seconda rivoluzione quantistica (1935): Ultimi decenni del XX secolo



P. G. Merli, G. F. Missiroli, G. Pozzi, "On the statistical aspect of electron interference phenomena", *American Journal of Physics*, 44, 3, 306-307 (1976)



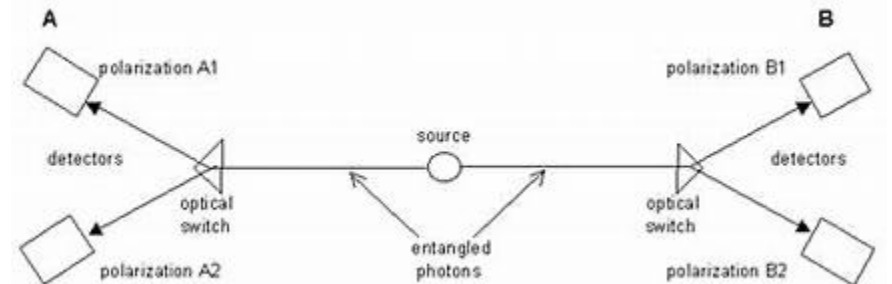
Bell's Theorem



John Stewart Bell 1928 - 1990

No physical theory of local hidden variables can ever reproduce all of the predictions of quantum mechanics.

Aspect's Experiments



## Prima rivoluzione quantistica (1927): primi decenni del XX secolo

*Nodi concettuali, sfide sperimentali e sfide «immaginative e linguistiche»:*

Complementarità, incertezza, determinismo e probabilità (intrinseche sia nella definizione dello stato di sovrapposizione che nel processo di misurazione)

*Progresso tecnologico:* da esperimenti tipicamente riguardanti grandi insiemi di oggetti quantistici, alla costruzione di dispositivi come i transistor, il laser e i circuiti integrati

## Seconda rivoluzione quantistica (1935): ultimi decenni del XX secolo

*Nodi concettuali, sfide sperimentali e sfide «immaginative e linguistiche»:*

- Non-località, entanglement, casualità quantistica
- la possibilità di isolare e manipolare singoli oggetti quantistici (atomi, fotoni...)

*Progresso tecnologico :* computer e simulatori quantistici, quantum sensing, comunicazione...

We never experiment with just one electron or atom or (small) molecule. In thought-experiments we sometimes assume that we do; this invariably entails ridiculous consequences... we are not experimenting with single particles, any more than we can raise Ichthyosauria in the zoo"

Erwin Schrödinger [Brit. J. Phil. Sci. 3, 233 (1952)].



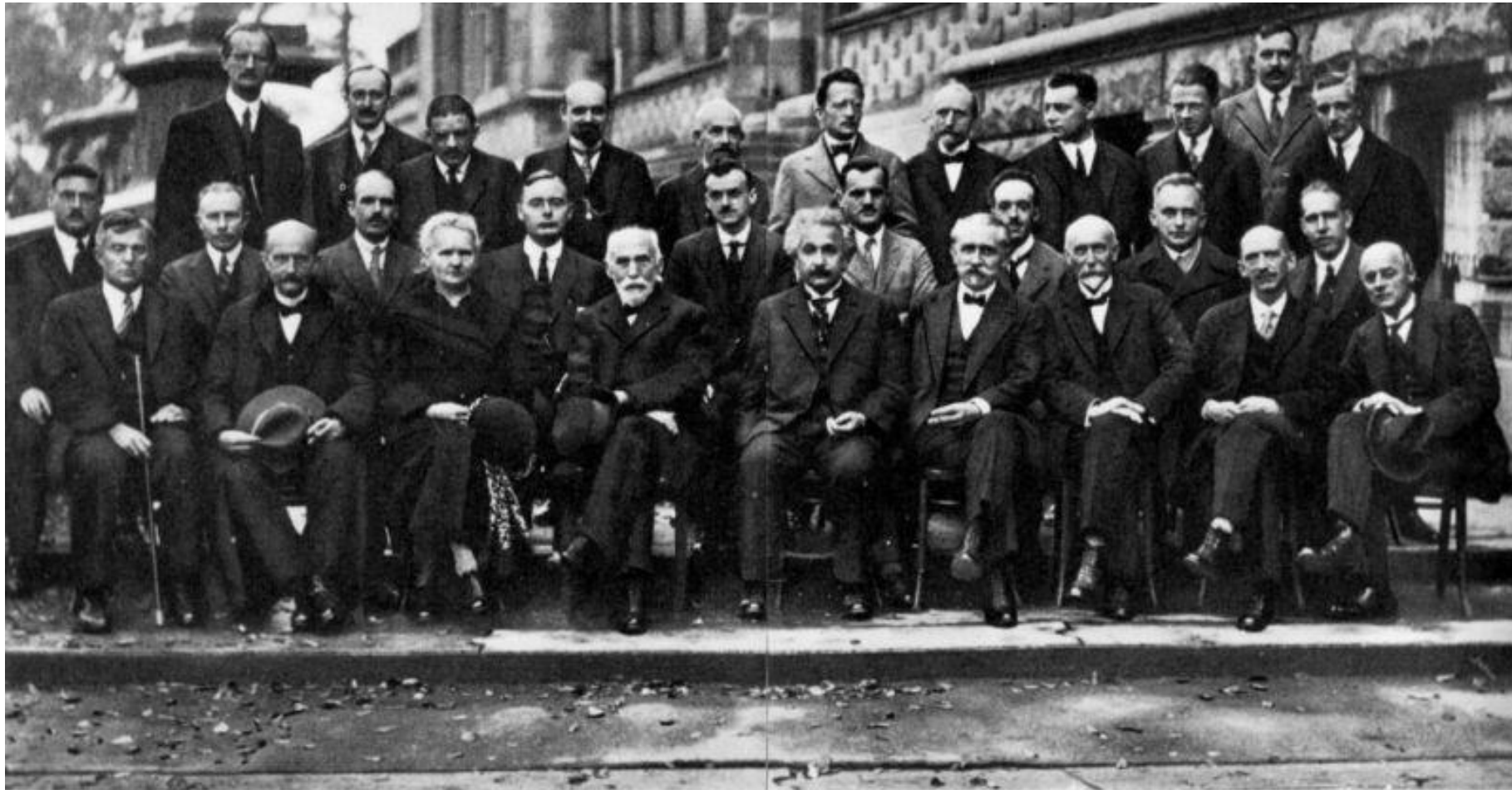




ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

# Dilemmi e sfide della prima rivoluzione quantistica

# V Congresso Solvay (Bruxelles, 24-29 ottobre 1927): Elettroni e fotoni



Photographie Benjamin Couprie

26, Avenue Louise, Bruxelles

A. PICCARD	E. HENRIOT	ED. HERZEN	TH. DE DONDER	E. SCHROEDINGER	W. PAULI	R. H. FOWLER	W. HEISENBERG	L. BRILLOUIN
		P. EHRENFEST		E. VERSCHAFFELT				
P. DEBYE	M. KNUDSEN	W. L. BRAGG	H. A. KRAMERS	P. A. M. DIRAC	A. H. COMPTON	L. V. DE BROGLIE	M. BORN	N. BOHR
I. LANGMEIR	M. PLANCK	MADAME CURIE	H. A. LORENTZ	A. EINSTEIN	P. LANGEVIN	CH. E. GUYE	C. T. R. WILSON	O. W. RICHARDSON

“Tutti gli invitati sapevano che il congresso era destinato ad affrontare il problema più urgente del momento, di carattere più filosofico che fisico: il significato della meccanica quantistica. *Che cosa rivelava la nuova fisica in merito alla natura della realtà?*”

(Kumar, Quantum, 2008)





## il Congresso di Solvay 1927 è, soprattutto, Il celeberrimo dialogo Bohr-Einstein

“I lavori ripresero il 28 pomeriggio: prima sessione della discussione generale, introdotta da Lorentz con l'intento di far concentrare l'attenzione sulle questioni della causalità, del determinismo e della probabilità: **“Non si potrebbe mantenere il determinismo facendone un articolo di fede? E' indispensabile elevare l'indeterminismo a principio?”**. Poi Lorentz invitò Bohr a intervenire. Bohr illustrò la sua convinzione che il dualismo onda-particella fosse una caratteristica intrinseca della natura, spiegabile soltanto nel quadro della complementarità, e che la complementarità stesse alla base del principio di indeterminazione che portava alla luce i limiti di applicabilità dei concetti classici.”

(Kumar, Quantum, 2008)



Dopo l'intervento di Bohr e altri tre che seguirono, Einstein chiese la parola:

“Pur essendo consapevole di non aver sufficientemente approfondito l'essenza della meccanica quantistica, voglio nondimeno presentare qui qualche osservazione”.

Einstein sapeva che spettava a lui l'onere di mostrare l'incoerenza, l'inconsistenza della interpretazione di Copenaghen e (semplificando)...

**...propose un esperimento mentale**

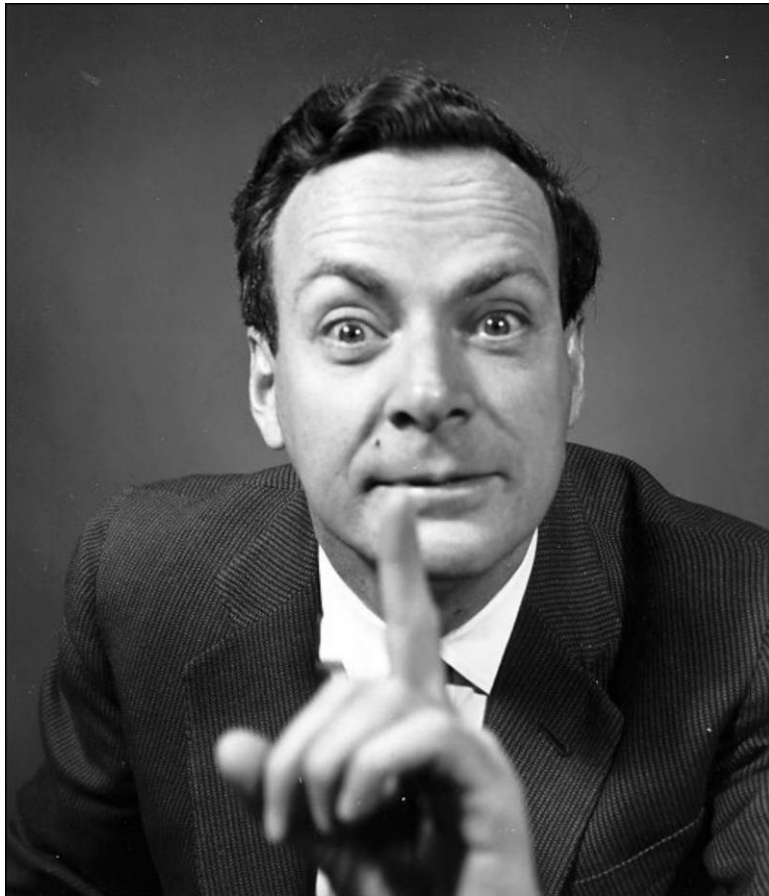


# L'ESPERIMENTO MENTALE DI INTERFERENZA DI SINGOLA PARTICELLA





## La fortuna dell'esperimento mentale di interferenza di singoli oggetti quantistici



Richard Feynman (1918-1988)

*“Decidemmo di esaminare un fenomeno che è impossibile, assolutamente impossibile spiegare in modo classico, e che sta al cuore della meccanica quantistica. In realtà contiene l'unico mistero. [...] Nel raccontarvelo dovremo raccontarvi delle peculiarità fondamentali di tutta la meccanica quantistica.” (1963, The Feynman Lectures on Physics Vol. III Ch. 1)*

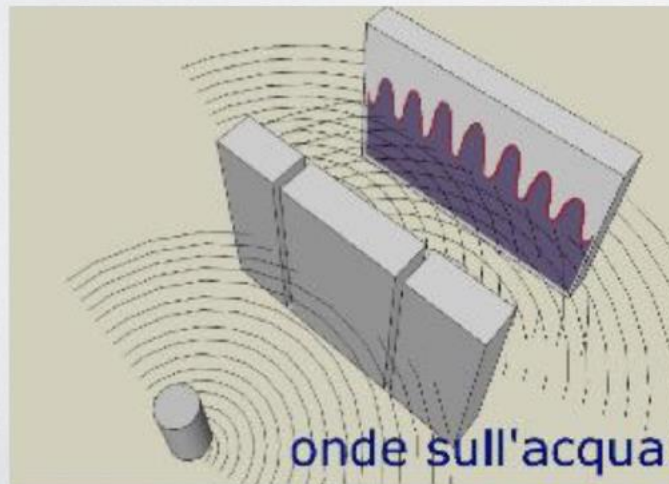
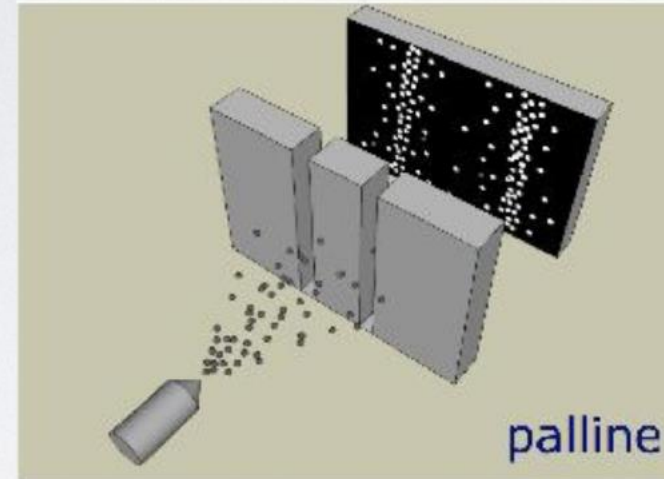


# L'«invenzione della narrazione» più celebre sul primo grande mistero della fisica quantistica

## Interferenza di Young della doppia fenditura

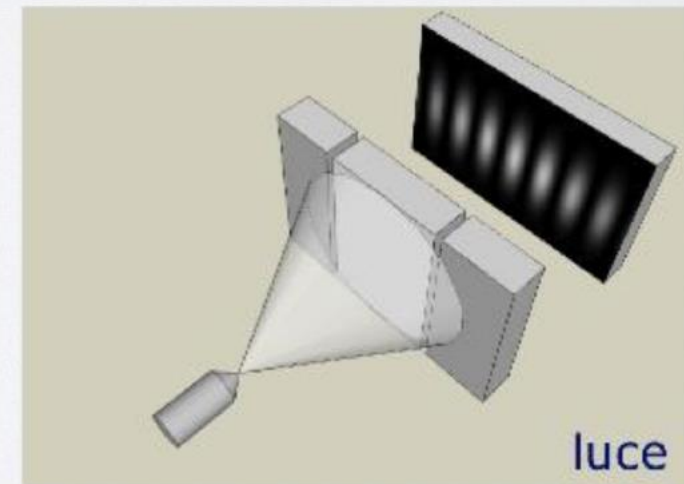
- PARTICELLE

localizzate  
numerabili  
indivisibili

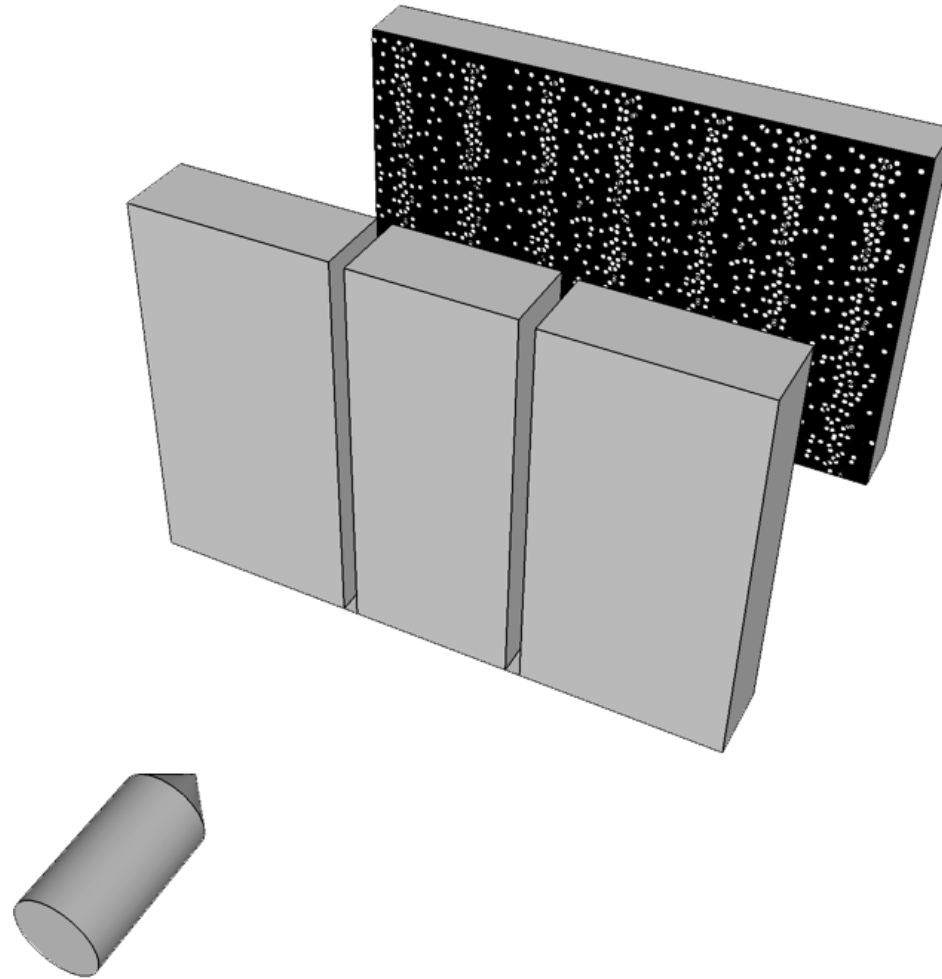


- ONDE

estese  
continue  
divisibili



Elettroni o «singoli oggetti  
quantistici»

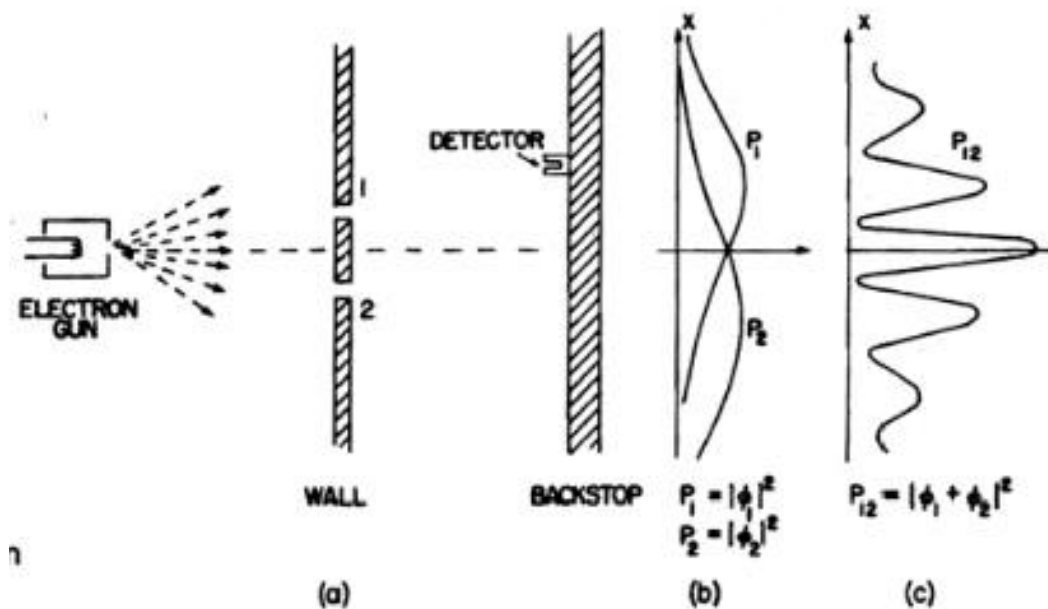




## LA SFIDA: bello / impossibile ...



Richard Feynman  
(1918-1988)



Vi avvertiamo subito di non cercare di montare questo esperimento (come invece avreste potuto fare con i due che abbiamo già descritti). Questo esperimento non è mai stato fatto in questo modo. Il guaio sta nel fatto che, per rivelare gli effetti che ci interessano, l'apparato dovrebbe essere costruito su una scala talmente piccola da rendere impossibile la cosa. Noi stiamo quindi compiendo un "esperimento concettuale" e lo abbiamo scelto così perchè è facile ragionarci su. Noi sappiamo quali sono i risultati che *si otterrebbero*, perchè *sono stati fatti* molti esperimenti, in cui la scala e le proporzioni erano state scelte in modo da mettere in luce gli effetti che ora descriveremo.

P. G. Merli, G. F. Missiroli, G. Pozzi, "On the statistical aspect of electron interference phenomena", *American Journal of Physics*, 44, 3, 306-307, 1976

On the statistical aspect of electron interference phenomena

P. G. Merli  
CNR-LAMEL, Bologna, Italy

G. F. Missiroli and G. Pozzi  
CNR-GNSM, Istituto di Fisica, Laboratorio Microscopia Elettronica, Bologna, Italy  
(Received 29 May 1974; revised 17 October 1974)

In a recent paper,<sup>1</sup> hereafter called I, two of the present authors have described how to perform—for instructional purposes—an experiment on electron interference by using a standard electron microscope.

In this short note we wish to show in a very impressive way that the complete interference pattern we registered on the photographic plate is really the sum of many independent events, each due to the interaction between a single electron and the interference apparatus. This was deduced in I with a simple and realistic calculation based on the main assumption that electrons were emitted at a constant rate from the gun filament. In the present case this result is shown not from a calculation but from direct observation. In fact, the experiment performed in I has been repeated on a Siemens Elmiskop 101 equipped with a TV image intensifier.<sup>2,3</sup>

With regard to the formerly described setup, the Möllenstedt and Düker electron biprism<sup>4</sup> has been now inserted at the level of the selector aperture plane. The objective lens acts in this case as third condenser lens, thus increasing the coherence and versatility of the illuminating system, whereas the fringes are magnified on the final screen by means of the two projector lenses (cf. Fig. 4 in I). If the coherence condition is satisfied, it is possible to register on a photographic plate an interference fringe pattern with spacing above 300  $\mu\text{m}$  as shown in Fig. 1(f). The exposure time of the photographic plate lies in a range between 10 and 100 sec. By the same electron optical conditions, however, the TV image intensifier allows the observation of the interference pattern directly on the monitor by means of the electrons stored in the SEC target of the TV tube<sup>2,3</sup> in a time of about 0.1 sec.

Figure 1(f), together with Figs. 1(a)–1(e), was filmed directly from the TV monitor. We note that the image on the screen was clearly visible, as in normal TV

transmission, and that by varying the biprism potential we could follow, without difficulty, all the diffraction and interference phenomena described in I.

However, the most interesting performance that such a device offers is connected to the direct observation of the statistical process of fringe formation. It can easily be seen that, at low current density, the image is built up from the statistically distributed light flashes of individual electrons, as is shown in the sequence of Figs. 1(a)–(f) registered at different current densities on the final screen.

The same result can be reached in another way that didactically is more illuminating in concept. In fact, we

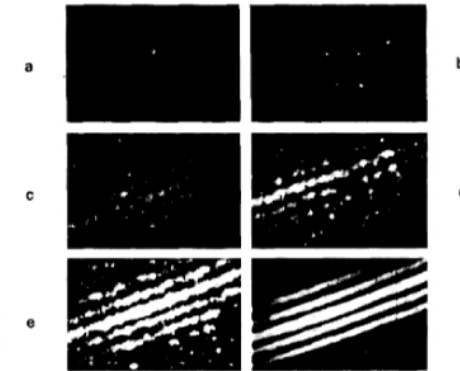


Fig. 1. (a–f) Electron interference fringe patterns filmed from a TV monitor at increasing current densities.

can operate with a very low electron current density which corresponds, on the average, to one or a few electrons arriving on the final screen in 0.04 sec [see Fig. 1(a)]. This is the lowest storage time available with the TV tube. While the electron optical conditions are kept constant, the storage time, which plays the same role as the exposure time of the photographic plate, can be increased step-by-step up to values of minutes. It can be verified that the image is gradually "filled" by the electrons until the shot noise vanishes completely.

We believe these results will be of great help to students by demonstrating to them, in an experimental form, the wave behavior of electrons and their statistical interpretation. Moreover, the whole apparatus is particularly valuable for student demonstrations in that the image can be directly seen by a large number of viewers and can possibly be recorded on video tape.

**Acknowledgments.** The authors are grateful to Professor Angelo and Professor Aurelio Bairati of the Istituto di Anatomia Umana of Milan for their kind permission to work with an electron microscope equipped with an image intensifier, to Dr. G. Boninsegna of the Siemens Italia S.p.A. for his technical assistance, and to Dr. L. Morettini for his cinematographic assistance.

<sup>1</sup>O. Donati, G. F. Missiroli, and G. Pozzi, *Am. J. Phys.* **41**, 639 (1973).

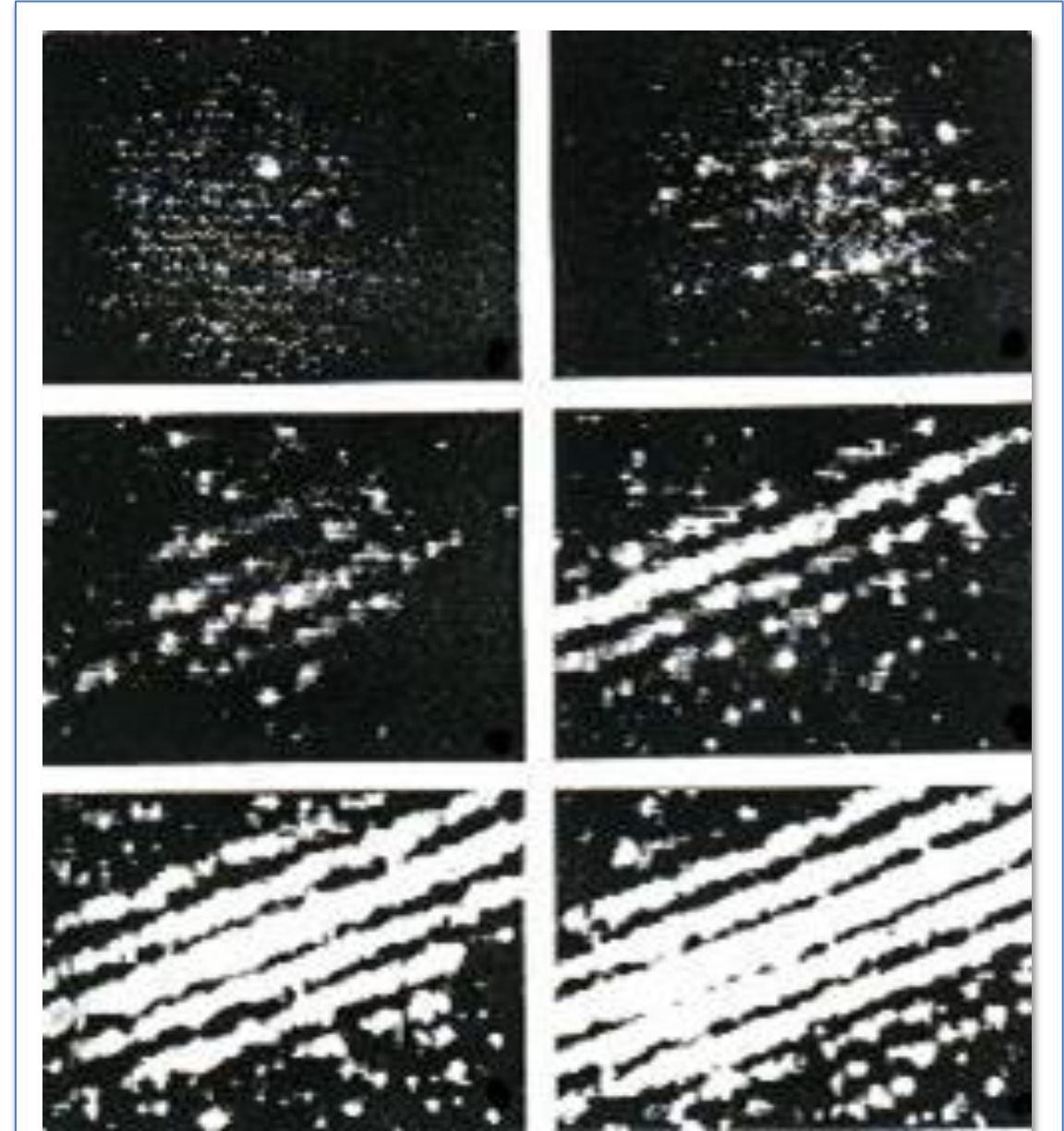
<sup>2</sup>K. H. Herrmann, D. Krahl, A. Kübler, and V. Rindfleisch, *Siemens Rev.* **36**, 6 (1969).

<sup>3</sup>K. H. Herrmann, D. Krahl, A. Kübler, R. H. Müller, and V. Rindfleisch, in *Electron Microscopy in Material Science*, edited by U. Valdrè (Academic, New York, 1971), pp. 237–272.

<sup>4</sup>G. Möllenstedt and H. Düker, *Naturwissenschaften* **42**, 41 (1954).



## L'esperimento di Merli-Missiroli-Pozzi (1974-76)



P. G. Merli, G. F. Missiroli, G. Pozzi, "On the statistical aspect of electron interference phenomena", *American Journal of Physics*, 44, 3, 306-307 (1976)



# «The most beautiful experiment»

R. Crease



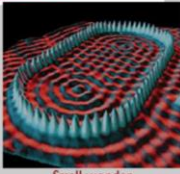
**CRITICAL POINT** physicsworld

May 2, 2002

**The most beautiful experiment...**

**What is the most beautiful experiment in physics? Robert P Crease invites your suggestions.**

In his new book *Meseison, Stahl, and the Replication of DNA*, science historian Frederic Holmes recounts the story of what one researcher called "the most beautiful experiment in biology". The so-called Meselson-Stahl experiment, which was carried out in 1957, confirmed that DNA replicates in the way predicted by the then recently discovered double-helix structure. When Holmes asked five researchers why this particular experiment was so beautiful, their answers included simplicity, precision, cleanliness and strategic importance.



Small wonder

COMMENT: CRITICAL POINT

## The most beautiful experiment

The most beautiful experiment in physics, according to a poll of *Physics World* readers, is the interference of single electrons in a Young's double-slit. Robert P Crease reports

- 1 Young's double-slit experiment applied to the interference of single electrons
- 2 Galileo's experiment on falling bodies (1600s)
- 3 Millikan's oil-drop experiment (1910s)
- 4 Newton's decomposition of sunlight with a prism (1665 - 1666)

COMMENT: LETTERS

## The double-slit experiment with single electrons

The article "A brief history of the double-slit experiment" (September 2002 p15; correction October p17) describes how Clara Jonsson of the University of Tübingen performed the first double-slit interference experiment with electrons in 1961. It then goes on to say: "The next milestone - an experiment in which there was just one electron in the apparatus at any one time - was reached by Akira Tonomura and co-workers at Hitachi in 1989 when they observed the build-up of the fringe pattern with a very weak electron source and an electron biprism" (*Am. J. Phys.* 57 117-120).

In fact, I believe that the first double-slit experiment with single electrons was performed by Pier Giorgio Merli, Gianfranco Missiroli and Giulio Pozzi in Bologna in 1974 - some 15 years before the Hitachi experiment. Moreover, the Bologna experiment was performed under very difficult experimental conditions: the intrinsic coherence of the thermionic electron source used by the Bologna group was much lower than that of the field-emission source in the Hitachi experiment. The Bologna experiment is reported in a paper by Merli, Missiroli and Pozzi (1976) and also in a book by Merli and Missiroli (1989).

experiments have not been performed and perhaps cannot be performed to coincide" (*Sci. Mag.* 1989 Jan. *J. Phys.* 57 686). Three of the seven papers that Gilson refers to were from our group in Bologna.

The main subject of our 1974 paper and the 1989 paper from the Hitachi group are the same: the single-electron build-up of the interference pattern and the statistical aspect of the phenomenon. Obviously the electron detection system used by the Hitachi group in 1989 was more sophisticated than the one we used in 1974. However, the sentence on page 118 of the paper by Tonomura et al., which states that in our film we "showed the electron arrival in each frame without recording the cumulative arrivals", is not correct. This can be seen by watching the film and looking at figure 1 of our 1976 paper (a version of which is shown here).

Finally, it is also worth noting that the first double-slit experiment with single electrons was actually a by-product of research into the practical applications of electron interferometry.

**Pier Giorgio Merli**  
LAMRL, CNR Bologna, Italy  
merli@lami.cnr.it

**Giulio Pozzi**  
Department of Physics, University of Bologna  
giulio.pozzi@unibo.it

**Gianfranco Missiroli**  
Department of Physics, University of Bologna  
missiroli@unibo.it

Asses of images filmed directly from a TV monitor as the electron current density is increased (cf. the exposure time remains constant at 0.04 s). As there is only one electron in the apparatus at a given time, the images show how an interference pattern can be built up from single-electron events. This can be seen more clearly in the film "Electron interference" ([www.fisica.unibo.it/educational/](http://www.fisica.unibo.it/educational/)).

Siemens Elmiskop 1A and then used for didactic (*Am. J. Phys.* 41 637-644) and research experiments (*J. Microscop.* 18 103-108). We used the Elmiskop 101 for many experiments, such as the observation of the electric field associated with p-n junctions (*J. Microscop.* 21 11-20). During this period we learned that Professors Angelo and Aurelio Di Rienzi at the International Atomic Energy Agency (IAEA) in Vienna were also using the Elmiskop 1A.

Physics World – May-September 2002



# l'esperimento più bello della fisica

<http://l-esperimento-piu-bello-della-fisica.bo.imm.cnr.it/>

BOOKMARK

March 10, 2011



di che si tratta

spiegazione

storia

bellezza

backstage

pensare

il film



Benvenuti nel sito "L'esperimento più bello della fisica".

Esso vi guiderà alla scoperta di un esperimento di fisica che, nel 2002 è stato definito il più bello di tutti i tempi da un sondaggio della rivista "Scientific American". Nel secolo scorso come esperimento "mentale" per illustrare un effetto sorprendente della fisica quantistica (l'apparente "doppio" comportamento onda-particella dell'elettrone) venne per molto tempo ritenuto impossibile a farsi a causa di difficoltà tecniche. Nel 1976 un gruppo di ricercatori italiani (Pier Giorgio Merli, Gian Franco Missiroli e Giulio Pozzi) superando

(2009)

<http://l-esperimento-piu-bello-della-fisica.bo.imm.cnr.it/>



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA



**NOTA GENNAIO 2016.** Dopo altri due anni dall'ultima ristampa abbiamo esaurito nuovamente le copie del DVD. Purtroppo al momento non siamo in grado di sostenere una ulteriore ristampa. Per sopperire a questo abbiamo messo in download tutto il materiale in risoluzione originale. Qui sotto i link diretti:

- documentario versione ITA (1280x720 mp4) - [Download](#)
- documentario versione ITA sottotitolata in inglese (1280x720 mp4) - [Download](#)
- film "Interferenza di elettroni" 1976 versione ITA (1280x720 mp4) - [Download](#)
- film "Interferenza di elettroni" 1976 versione EN (1280x720 mp4) - [Download](#)

Se qualcuno avesse assolutamente bisogno del materiale in formato DVD, può contattarci, mandandoci un indirizzo postale, e gliene faremo avere una copia masterizzata dall'originale. Grazie a tutti per l'interesse e l'attenzione mostrate in questi anni!





APGEO |  UNIVERSITÀ  
DI BOLOGNA  
L'avventura della ricerca

GIORGIO LULLI  
**L'ESPERIMENTO PIÙ BELLO**

L'interferenza di elettroni singoli e il mistero della  
meccanica quantistica

Interferenza di elettroni singoli, è stato giudicato "l'esperimento  
più bello" nella storia della fisica.

Albert Einstein l'aveva immaginato per primo; Richard Feynman  
l'aveva ritenuto "impossibile".

Poi un giorno tre ricercatori di Bologna lo hanno realizzato,  
permettendoci di vedere con i nostri occhi il mistero  
fondamentale che sta al cuore della meccanica quantistica.  
Questo libro è il racconto della loro straordinaria avventura  
scientifica.

*Verdere l'esperimento delle due fenditure realizzato è come guardare  
uno eclissi totale di sole per la prima volta.*

- Allison Campbell (St. Andrew University)

[www.apgeoonline.com/education](http://www.apgeoonline.com/education)

euro 15,00



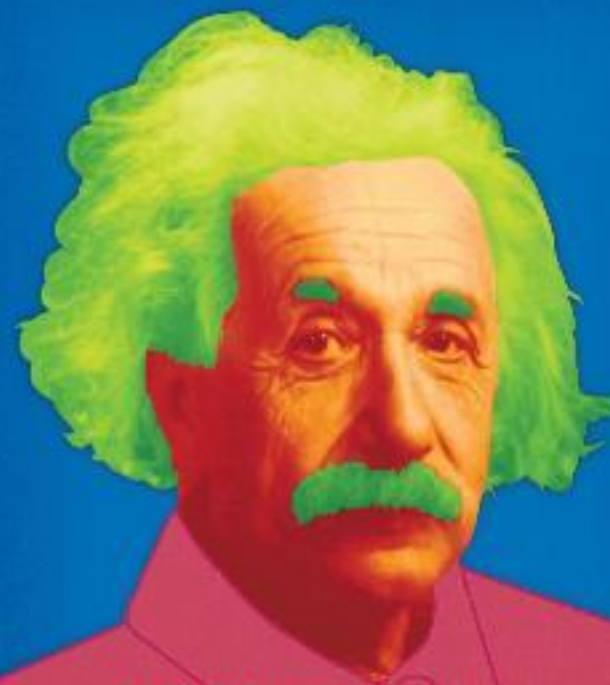
9 788950 1102505



APGEO |  UNIVERSITÀ  
DI BOLOGNA

GIORGIO LULLI L'ESPERIMENTO PIÙ BELLO

APGEO



GIORGIO LULLI  
**L'ESPERIMENTO  
PIÙ BELLO**

L'interferenza di elettroni singoli  
e il mistero della  
meccanica quantistica



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

(2013)

# La bellezza dell'esperimento

L'esperimento (nel modo più semplice possibile):

- fa cogliere l'esistenza di un problema nella nostra rappresentazione/comprendimento del mondo e restituisce frammenti di realtà che delineano un mondo enigmatico (*il fascino del mistero*);
- impone la ricerca di nuovi strumenti culturali per "spiegarsi" cosa sta succedendo (*il piacere della sfida*).



# Le sfide dell'esperimento

- concettuale-linguistica (quali “*new words for a new world*”? (Lévy-Leblond))
- sperimentale (come rendere visibili le figure di interferenza ottenute da singoli oggetti?)
- epistemologica (quali implicazioni sul rapporto natura-conoscenza-realtà?)





# Il dualismo onda-particella (\*)

Esplorato in tutte le sue possibili accezioni:

- una forma è manifestazione dell'altra (Schrödinger e Born);
- sia onda sia particella (De Broglie, Bohm);
- la fisica deve occuparsi di *perché* conosce e di *come* conosce (epistemologia e metodologia) e abbandonare ogni pretesa di dire come è fatto il mondo (ontologia) (Heisenberg e Jordan);
- a volte l'una, a volte l'altra (un po', un po') (Bohr, Pauli)....

(\*) Introzzi G. (2010). Il dualismo onda/particella: analisi storica e recenti interpretazioni. Atti Acc. Rov. Agiati, a. 260, 2010, ser. VIII, vol. X, B: 5-18.





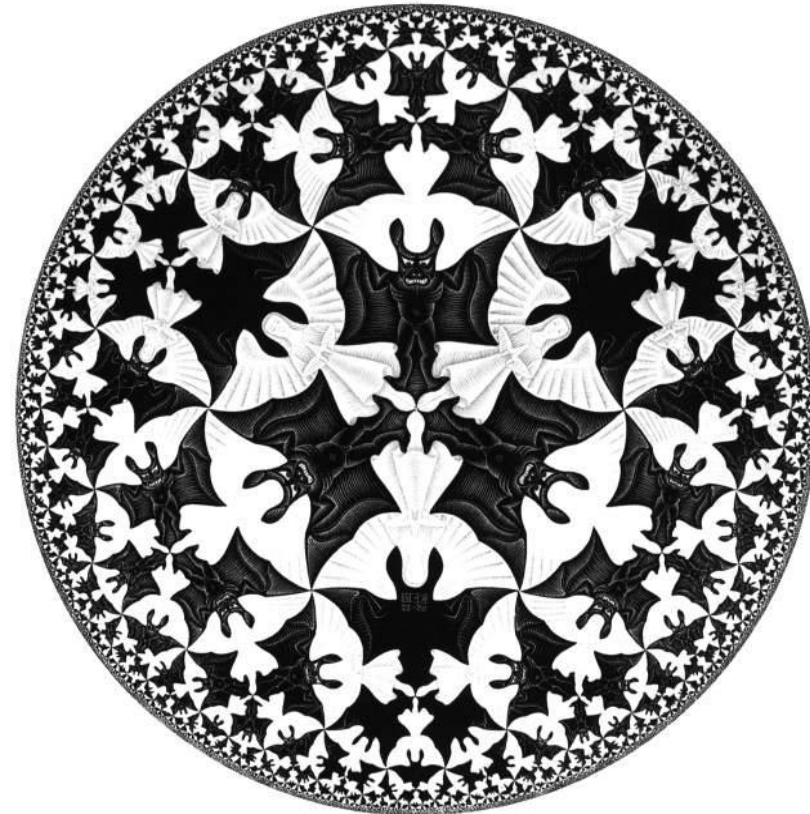
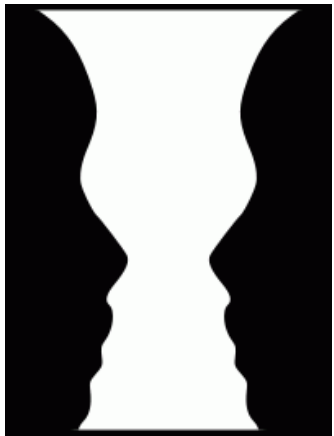
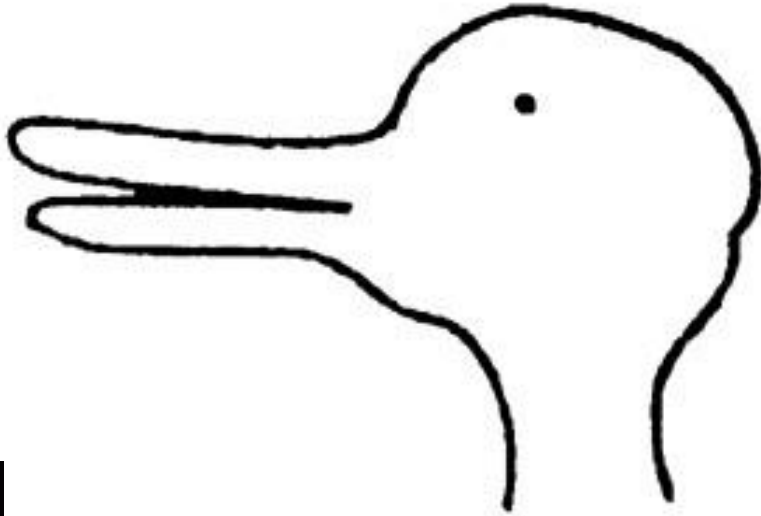
Niels Bohr

I dati ottenuti in **condizioni sperimentali diverse [ponendo l'attenzione a diverse fenomenologie]** non si possono racchiudere in una singola immagine, ma debbono essere considerati complementari. Stando così le cose, l'attribuzione di qualità fisiche tradizionali agli oggetti atomici implica un elemento essenziale di ambiguità, come si vede immediatamente nella contraddizione relativa alle proprietà corpuscolari e ondulatorie degli elettroni e dei fotoni, in cui ci troviamo di fronte a immagini contrastanti, ognuna delle quali si riferisce a un aspetto essenziale dei dati sperimentali.

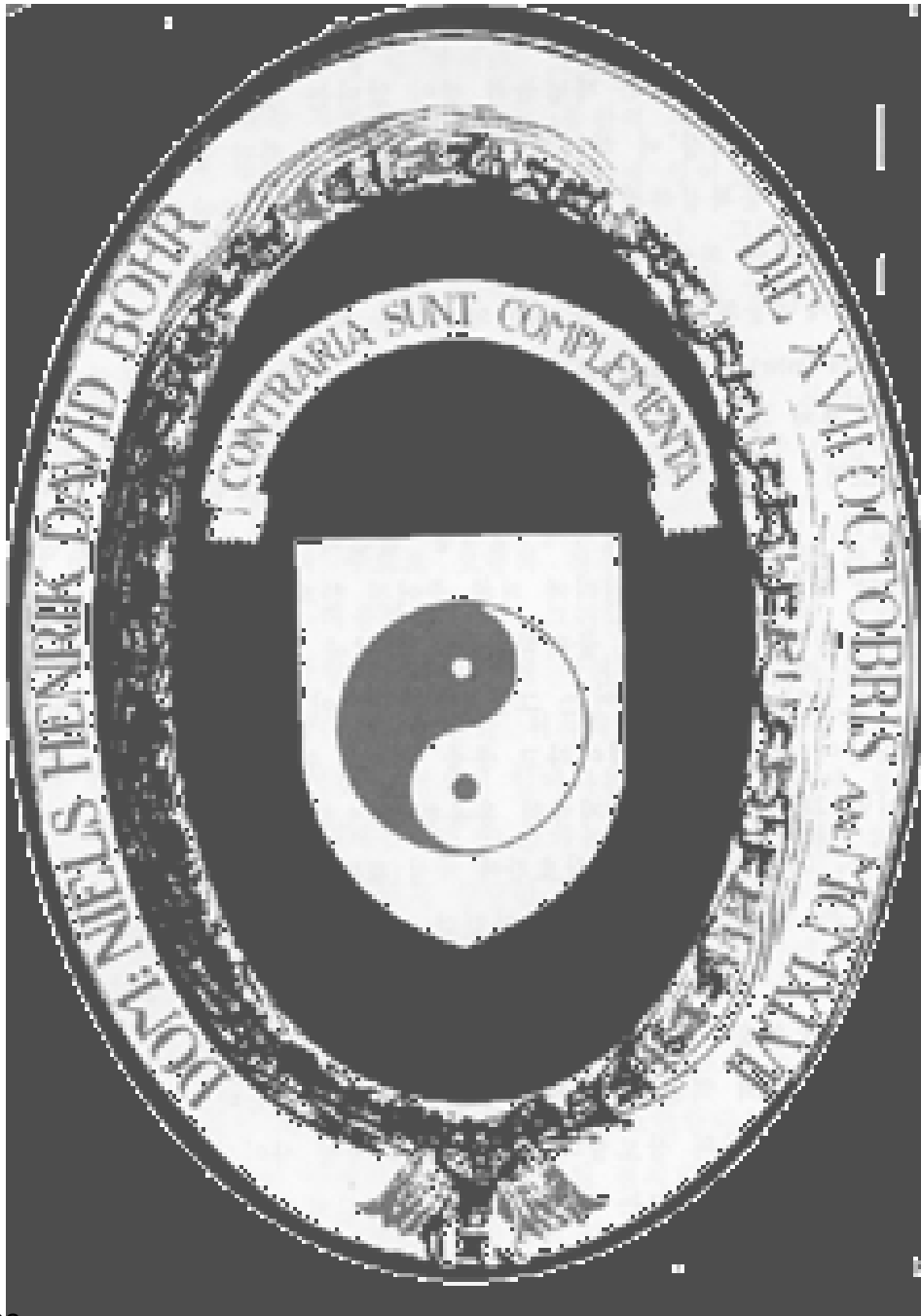
(Discussione con Einstein sui problemi epistemologici della fisica atomica, 1949, in Autobiografia scientifica, pp. 113- 114)



# ambiguità





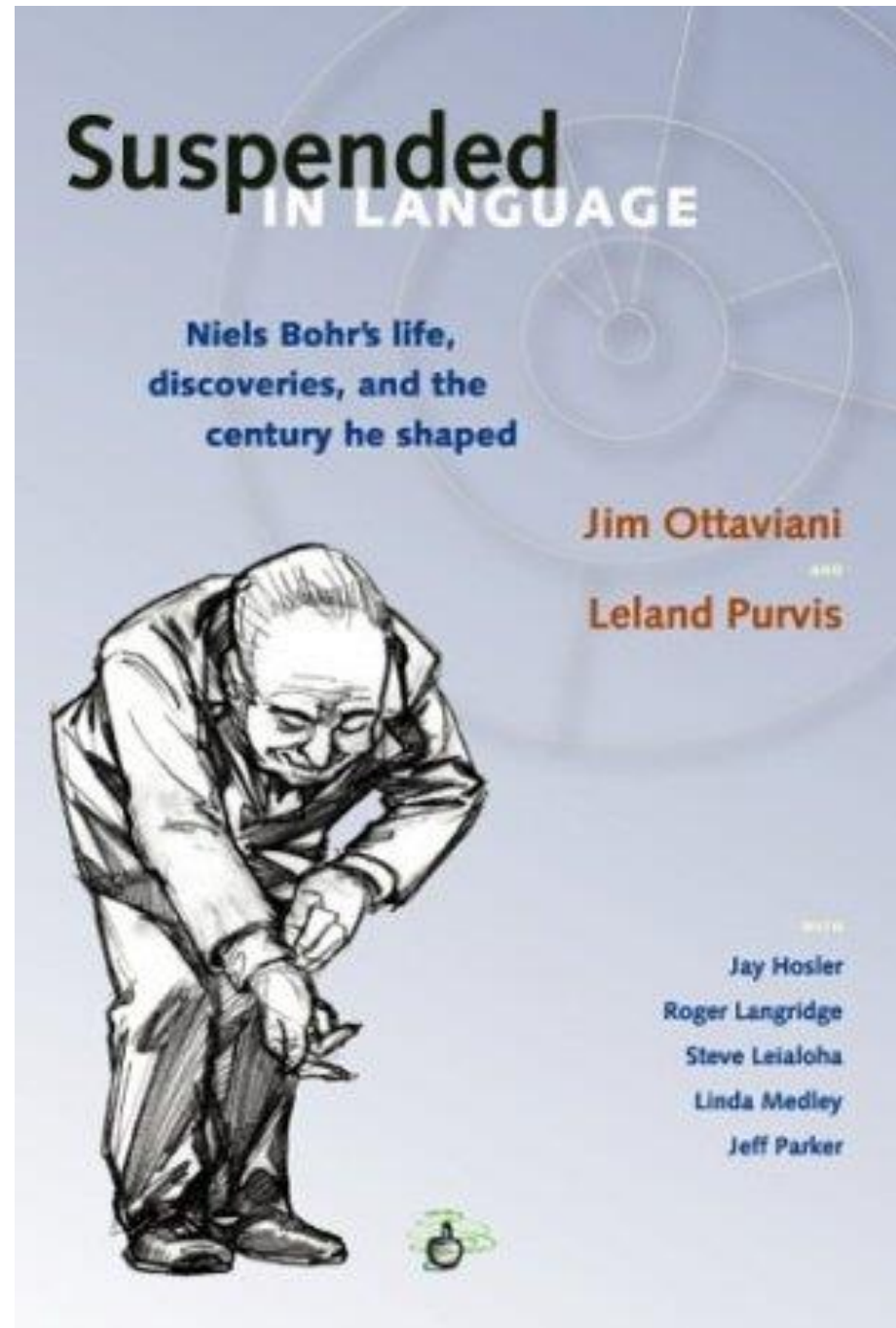


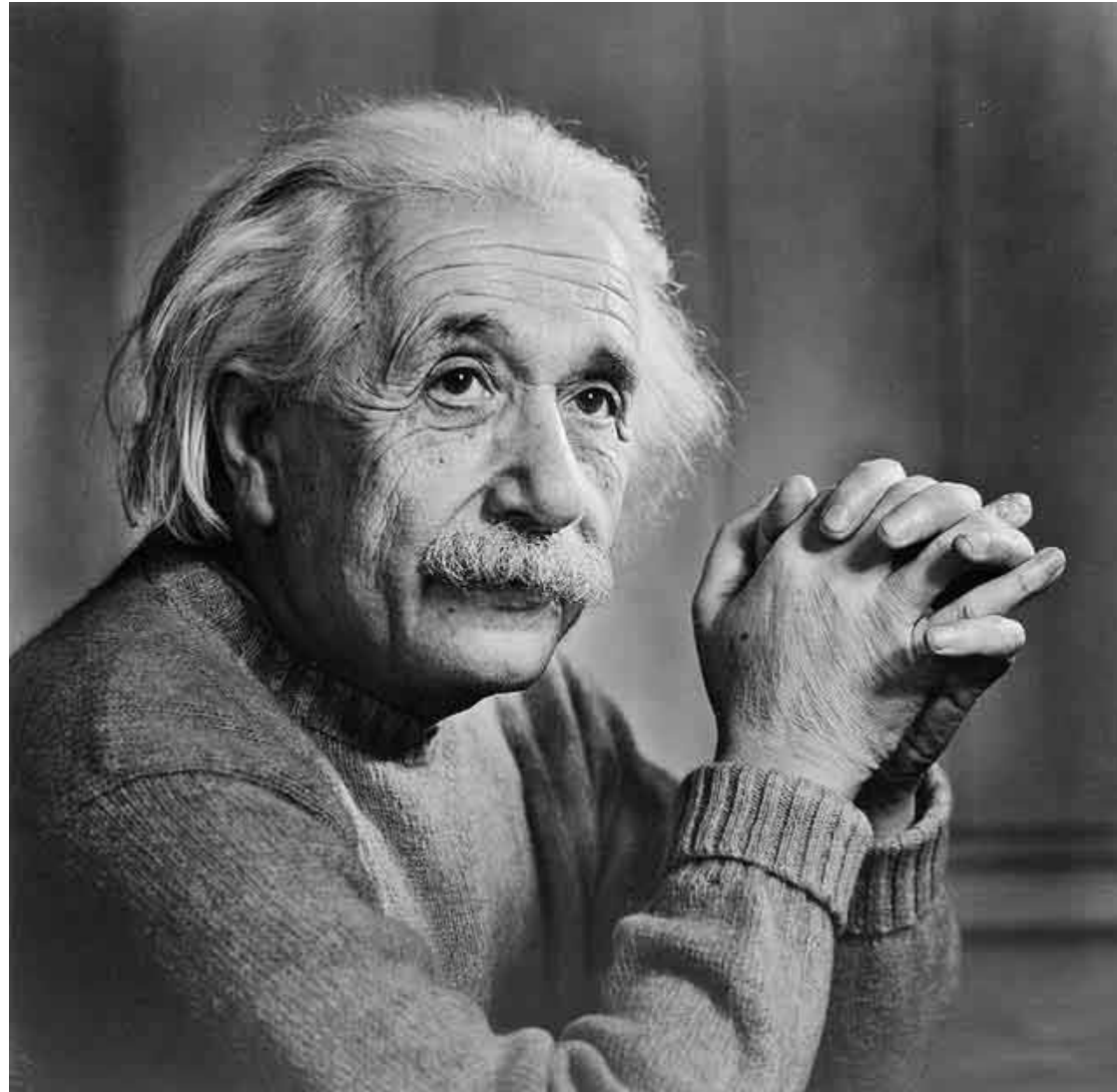
***Contraria sunt complementa***



“Non vi è un mondo quantistico. Vi è solo una descrizione astratta in termini di fisica quantistica. E’ sbagliato pensare che il compito della fisica sia scoprire come è la natura. La fisica si occupa di ciò che possiamo dire della natura... Da cosa dipendiamo noi umani? Dipendiamo dalla nostre parole. Il nostro compito è comunicare esperienze e idee ad altri. Siamo sospesi nel linguaggio”.

(da Pais, Ritratti di scienziati geniali, 2012)





**Albert Einstein  
(1879-1955)**



“La fisica è un tentativo di afferrare concettualmente la realtà fisica, quale la si concepisce indipendentemente dal fatto di essere osservata. In questo senso si parla di “realtà fisica”. Nella fisica prequantistica, non c’era alcun dubbio sul modo di intendere queste cose: nella teoria di Newton, la realtà era rappresentata da punti materiali nello spazio e nel tempo; nella teoria di Maxwell, dal campo nello spazio e nel tempo. Nella meccanica quantistica, la rappresentazione della realtà non è così facile.”

(A. Einstein, Autobiografia scientifica, pp. 49-51)

“La meccanica quantistica è degna di ogni rispetto, ma una voce interiore mi dice che non è ancora la soluzione giusta. È una teoria che ci dice molte cose, ma non ci fa penetrare più a fondo il segreto del gran Vecchio. In ogni caso, sono convinto che questi non gioca a dadi col mondo”.

(A. Einstein, 1926. Lettera a Max Born)



**EINSTEIN**

“Credo ancora nella possibilità di un modello di realtà –  
cioè una teoria – che rappresenti le cose di per sé, e non  
solamente la probabilità che esse accadano.”



# E, oggi, la complementarità???





## Per alcuni fisici....

“I fisici [...] hanno capito che il punto essenziale non è se una teoria piaccia o non piaccia, ma se fornisca previsioni in accordo con gli esperimenti. La ricchezza filosofica, la facilità, la ragionevolezza di una teoria sono tutte cose che non interessano” (Feynman)



**..per i fisici che continuano a interrogarsi su quale  
descrizione del mondo la fisica abbia costruito...**

...il dualismo onda-corpuscolo va superato una volta per tutte, come  
un residuo interpretativo **goffo e inappropriato**

“No new idea, whatever its domain, is born fully grown. Initial formulations of novel conceptions, being still tributary to the old views they are to replace, of necessity are **awkward and inappropriate**. Any scientific theory, following its inception, then has to undergo a recasting process through which its notions are clarified and its terms improved.”

JEAN-MARC LÉVY-LEBLOND, On the Nature of Quanta, 2003, *Science  
& Education*



# Il dualismo onda-particella (\*)

Esplorato in tutte le sue possibili accezioni:

- una forma è manifestazione dell'altra (Schrödinger e Born);
- sia onda sia particella (De Broglie, Bohm);
- la fisica deve occuparsi di *perché* conosce e di *come* conosce (epistemologia e metodologia) e abbandonare ogni pretesa di dire come è fatto il mondo (ontologia) (Heisenberg e Jordan);
- a volte l'una, a volte l'altra (un po', un po') (Bohr, Pauli)....
- **NE' L'UNA, NE' L'ALTRA!!!!**

(\*) Introzzi G. (2010). Il dualismo onda/particella: analisi storica e recenti interpretazioni. Atti Acc. Rov. Agiati, a. 260, 2010, ser. VIII, vol. X, B: 5-18.



## Neither Waves, Nor Particles, but Quantons!

That the true nature of quantum objects has long been misunderstood is proved by their still all too common description in terms of an alleged “wave-particle duality”. It must be remarked first of all that this formulation is at best ambiguous. For it may be understood as meaning either that a quantum object **is at once a wave and a particle**, or that **it is sometimes a wave and sometimes a particle**. Neither one of these interpretations in fact make sense. “Wave” and “particle” are not things but concepts, and incompatible ones; as such, they definitely cannot characterise the same entity. While it is true that quantum objects may in some cases **look like** waves, and in other cases like particles, **it is truer still that in most situations, particularly the ones explored by the elaborate modern experiments, they resemble neither one nor the other**. The situation here is reminiscent of that encountered by the first **explorers of Australia**, when they discovered strange animals dwelling in brooks. Viewed from the forefront, they exhibited a duckbill and webbed feet, while, seen from behind, they showed a furry body and tail. They were then dubbed “**duckmoles**”. It was later discovered that this “**duck-mole duality**” was of limited validity, and that the zoological specificity of these beasts deserved a proper naming, which was chosen as “**platypus**”. Bunge’s proposal to call them “quantons”, building on the common terminology (electrons, photons, nucleons, etc.) and extending it to a common categorisation, is most to the point, and it is to be hoped that this terminology gradually gains ground.

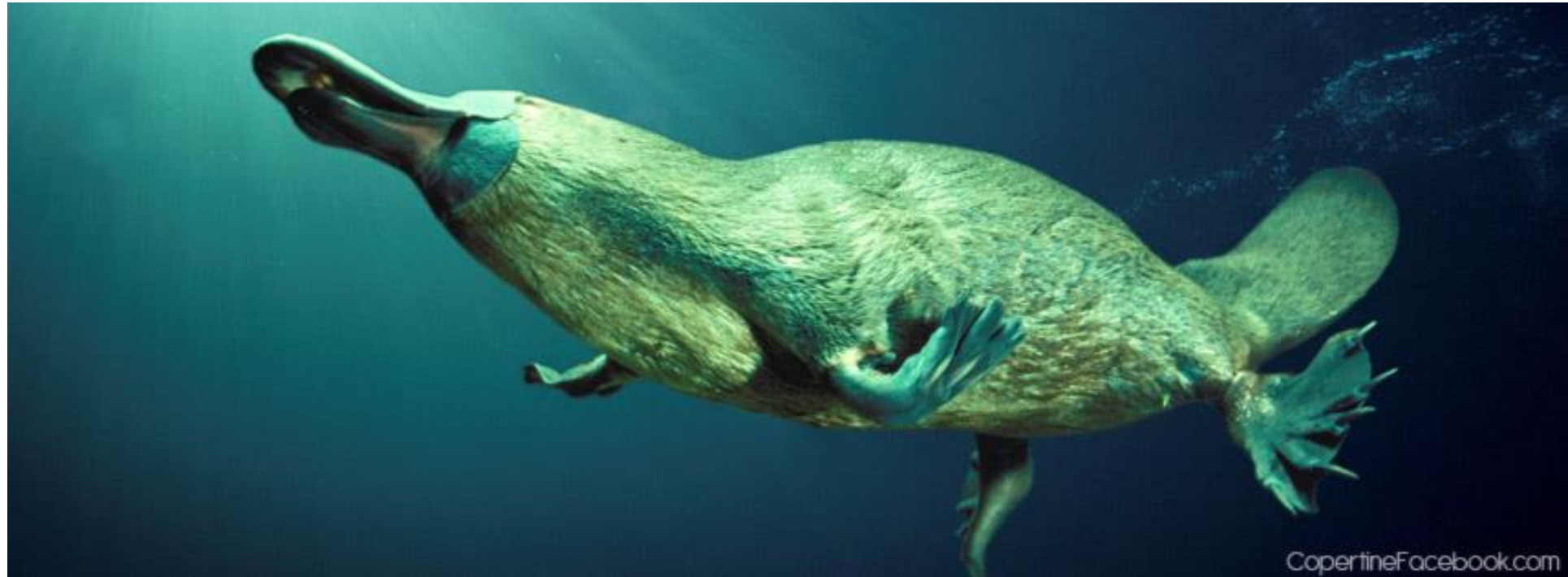
JEAN-MARC LÉVY-LEBLOND, On the Nature of Quantons, 2003,

*Science & Education*

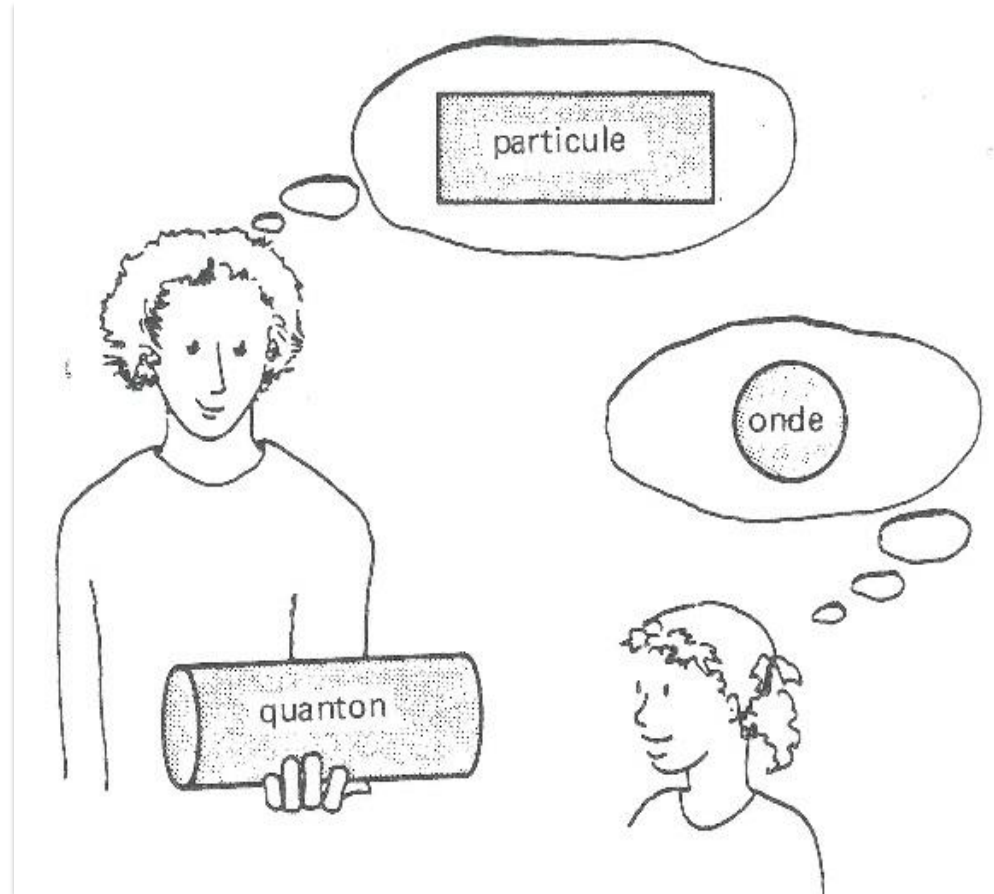


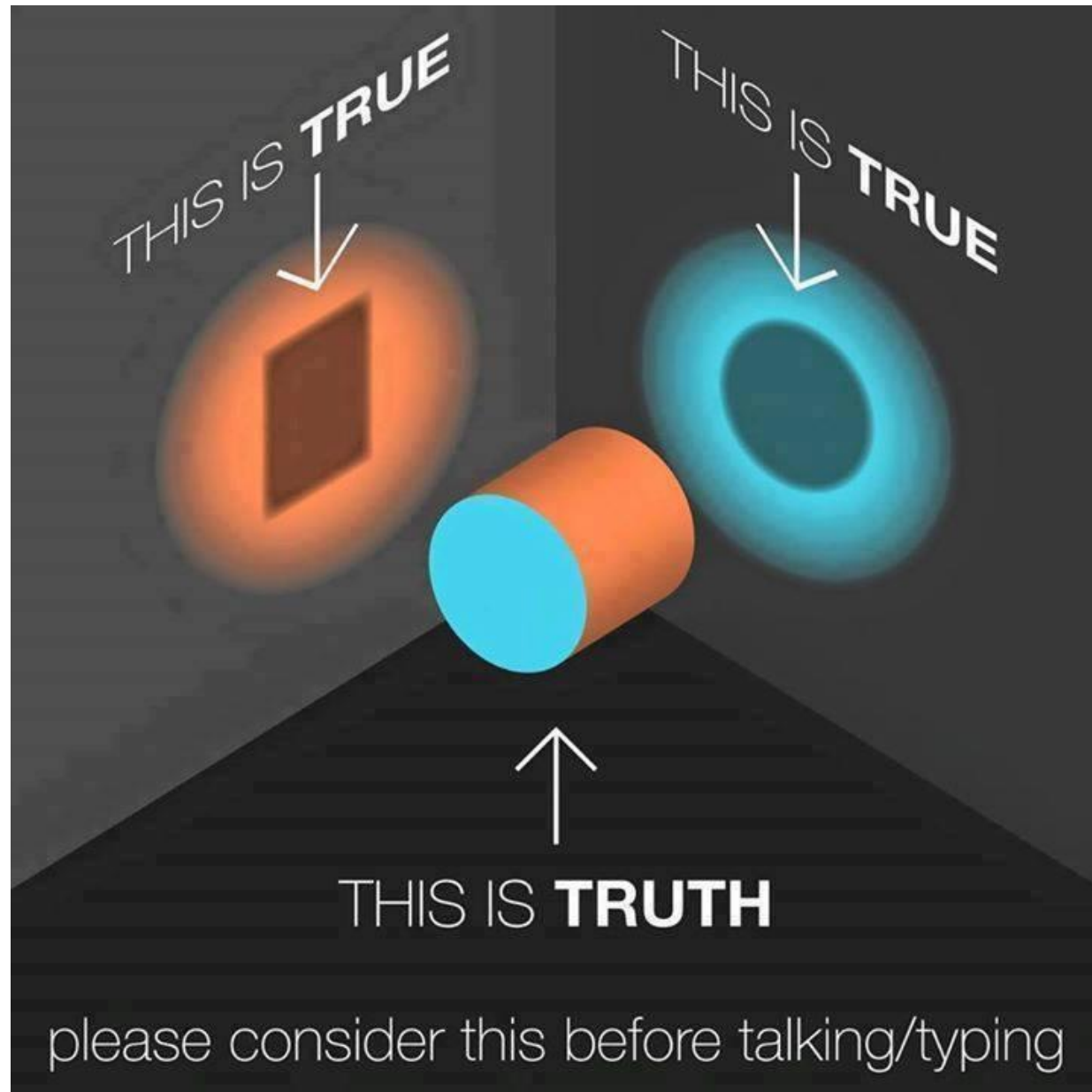






## Da “QUANTIQUE rudiments”, Lévy-Leblond, Balibar 1984







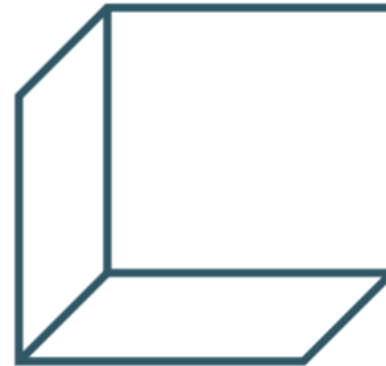
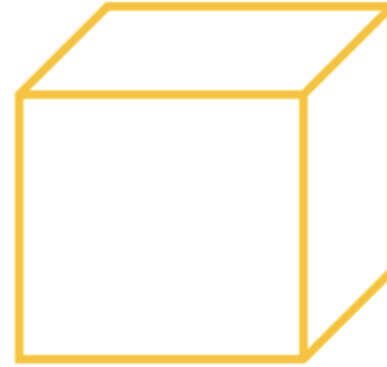
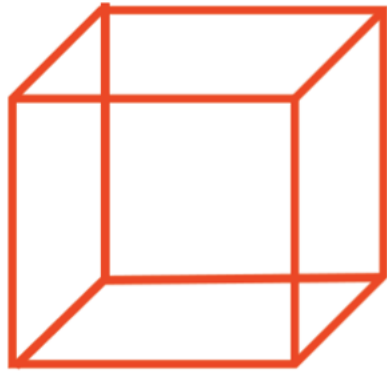
## **L'estensione della fenomenologia e l'emergere della “specificità zoologica”**

*“Quantum objects are completely crazy. But, at least, they are all crazy in the same way”*

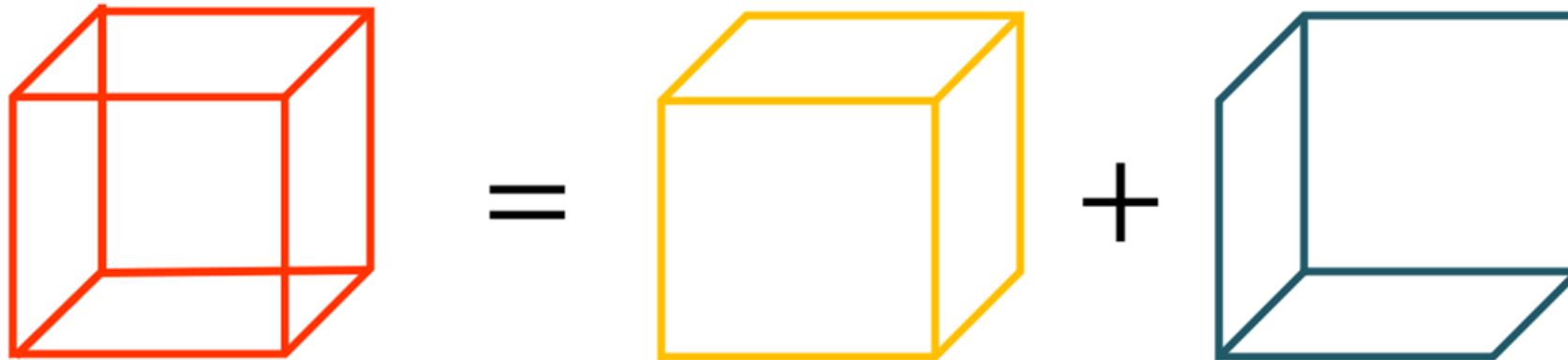
(Lévy-Leblond & Balibar,  
parafrasando Feynman)



# L'oggetto quantistico



# L'oggetto quantistico e lo stato di sovrapposizione

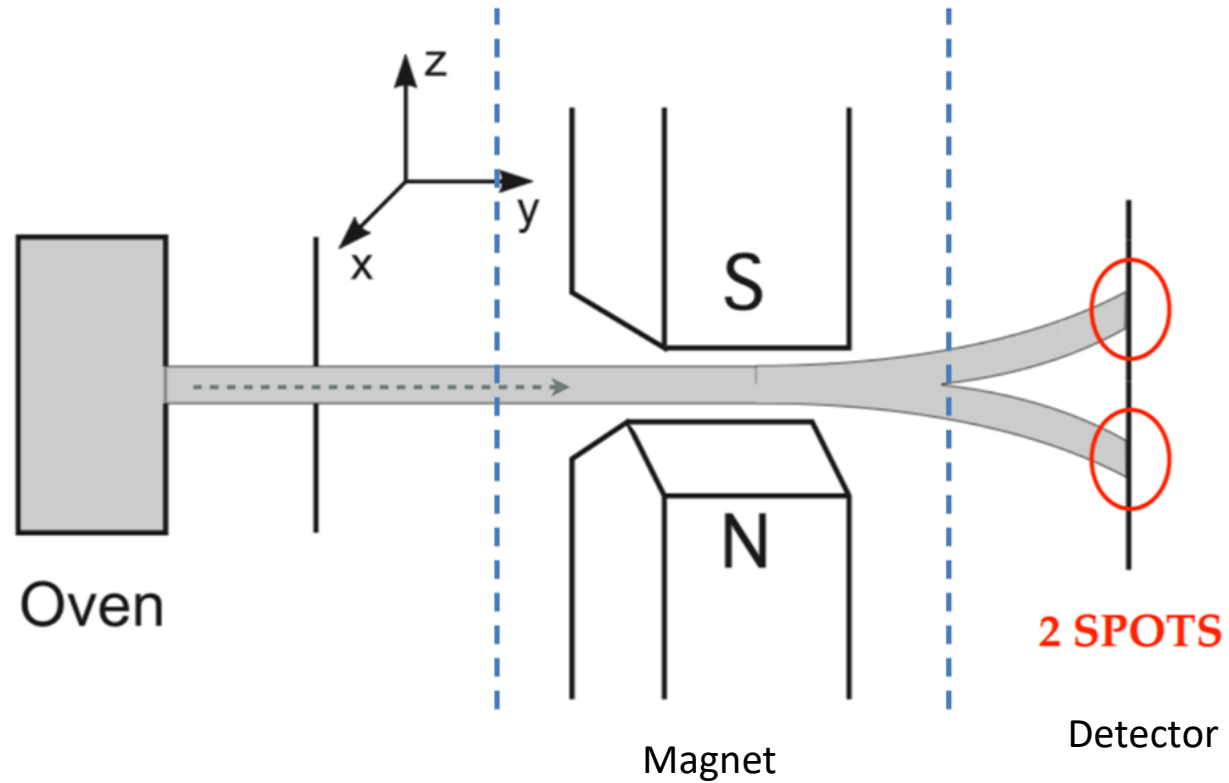


# L'oggetto quantistico dalla prima rivoluzione quantistica

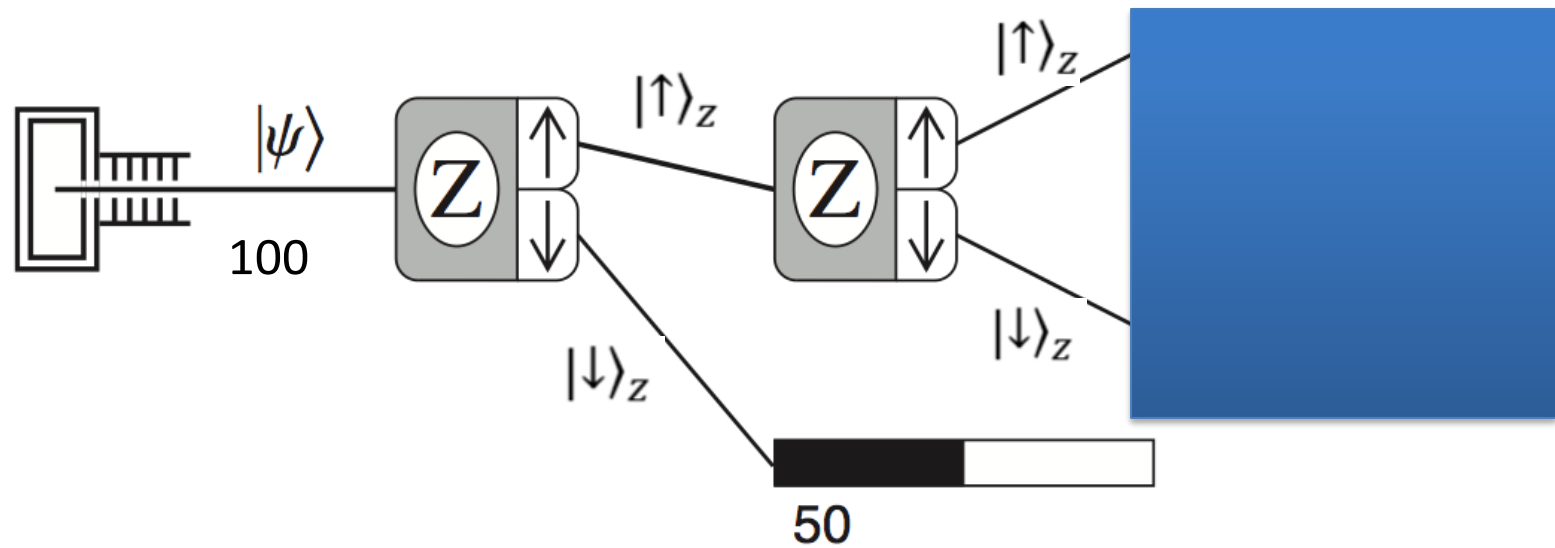


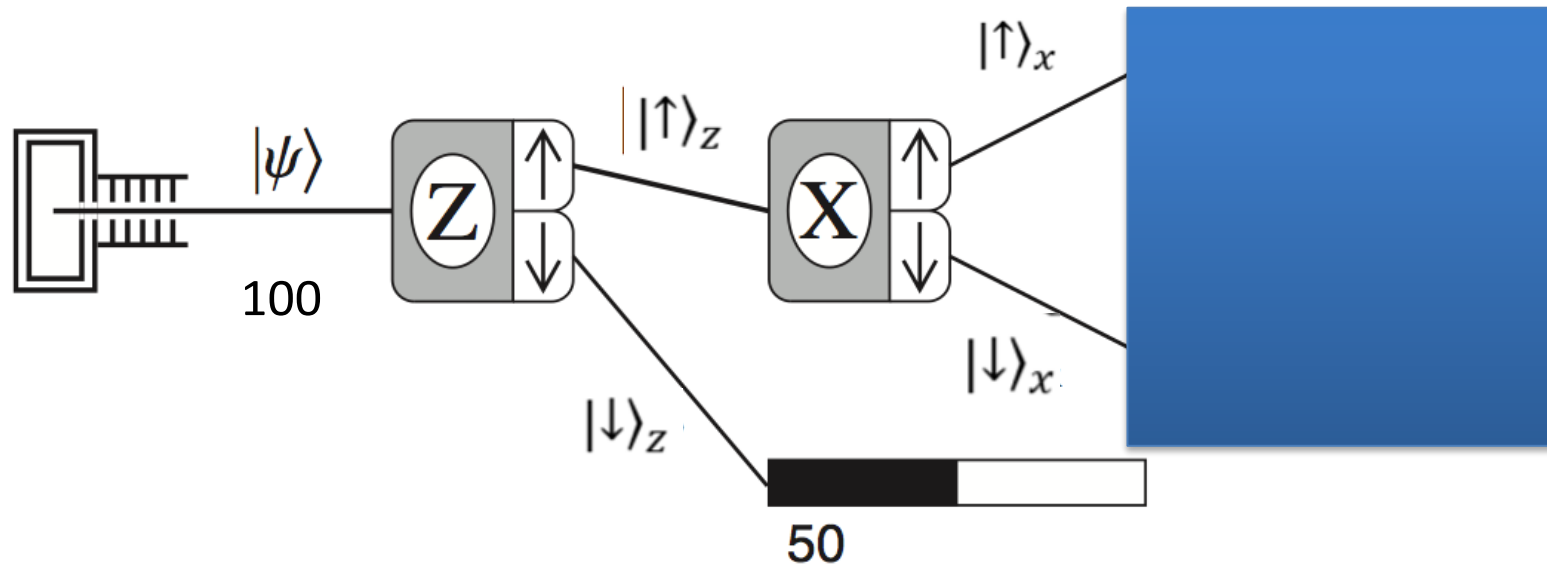


# Stern and Gerlach



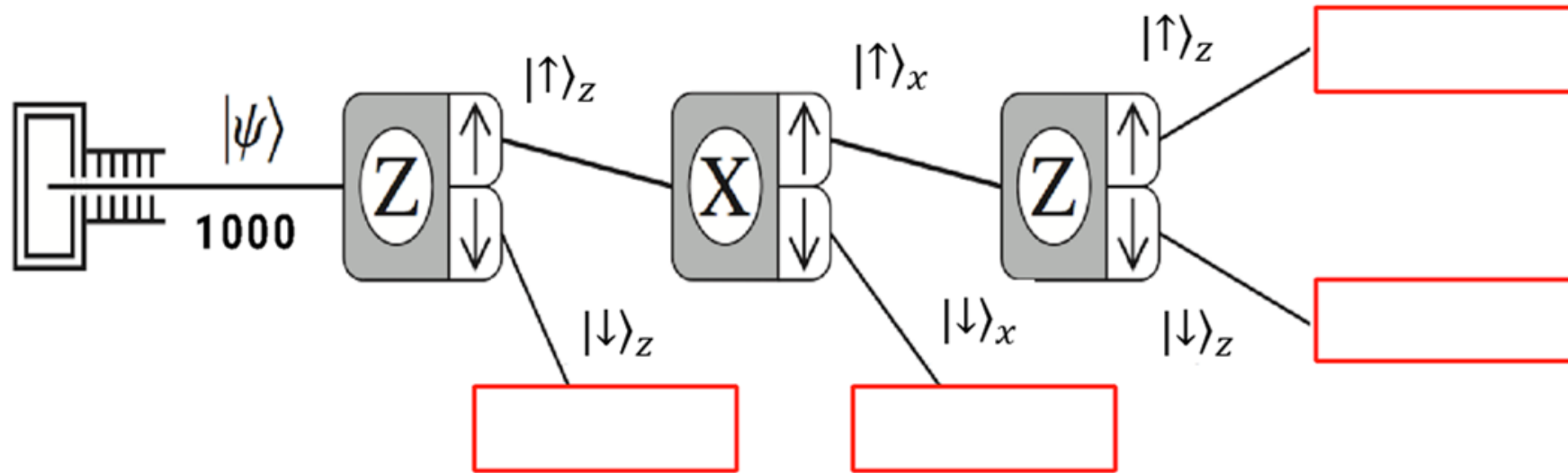
$$\alpha|\uparrow\rangle_z + \beta|\downarrow\rangle_z$$



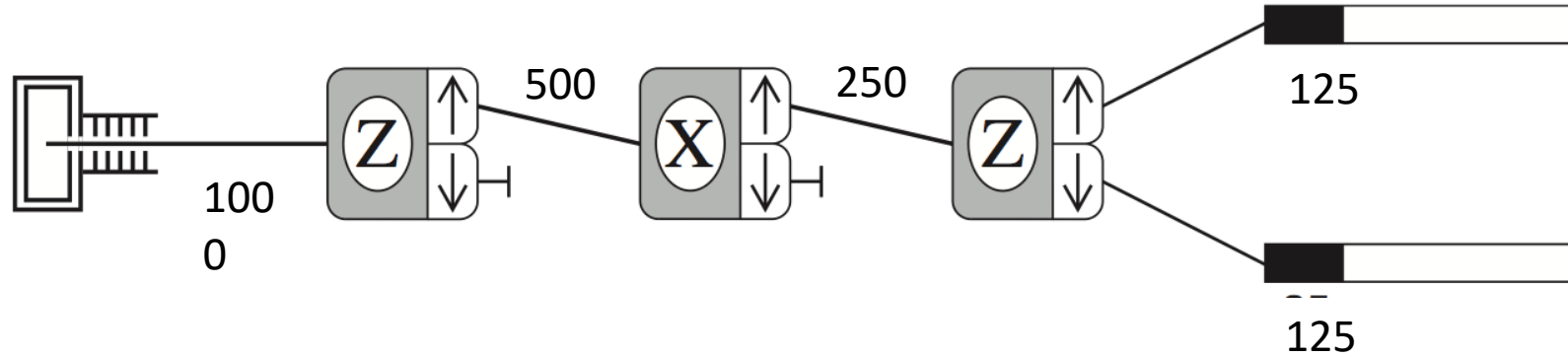


$$|\uparrow\rangle_z = \frac{1}{\sqrt{2}} |\uparrow\rangle_x + \frac{1}{\sqrt{2}} |\downarrow\rangle_x$$

Cosa ci aspettiamo succeda?



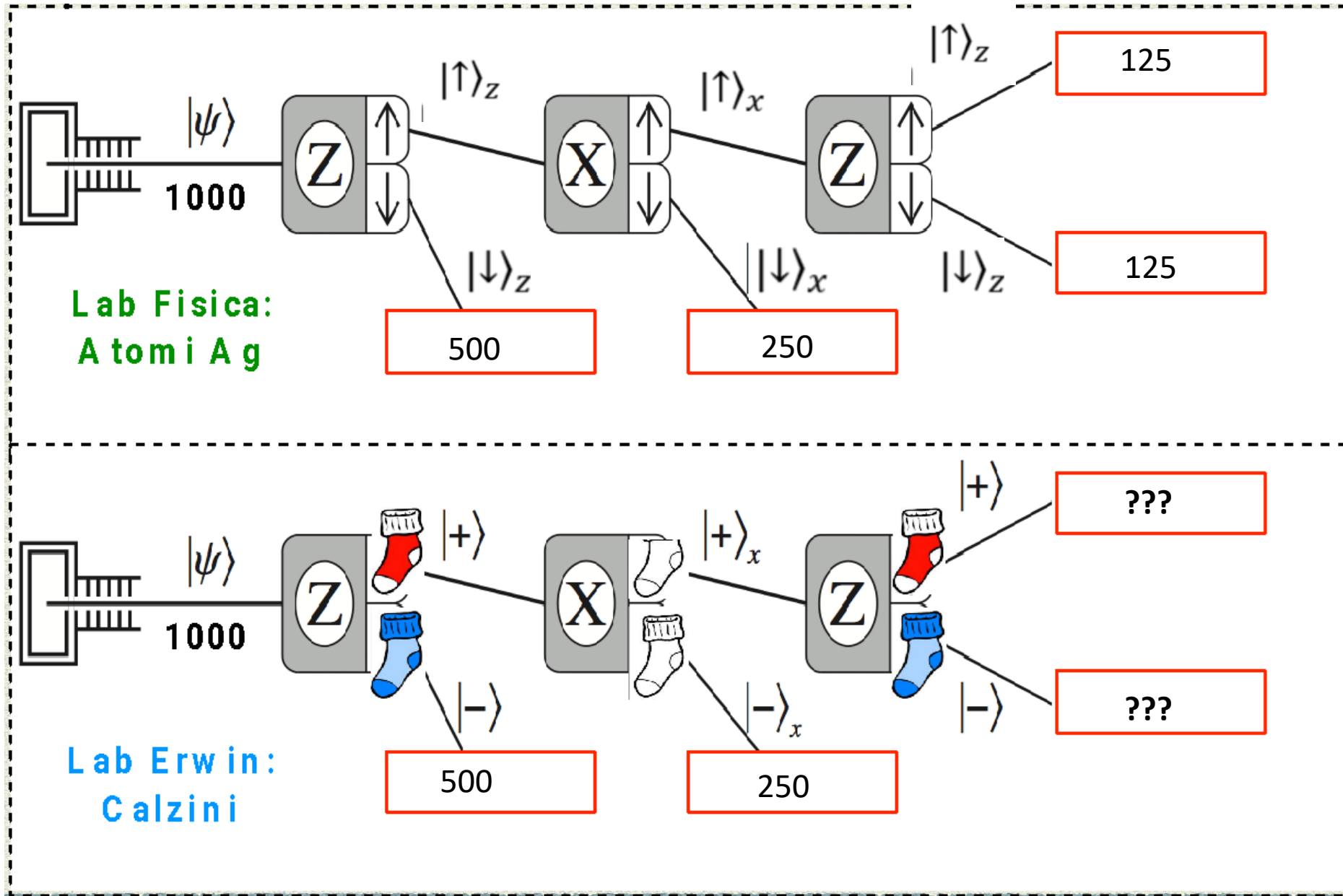




$$|\uparrow\rangle_x = \frac{1}{\sqrt{2}} |\uparrow\rangle_z + \frac{1}{\sqrt{2}} |\downarrow\rangle_z$$

- Qual è il punto qui?
- Cosa ci dice su come è fatta la natura?
- Cosa ci dice sulla nostra conoscenza (la nostra concezione della fisica)?
- Qual è la sua novità concettuale rispetto alla fisica classica?





## David H. McIntyre 2012, Quantum mechanics – A paradigms approach, p. XXI. *Erwin's socks*

Erwin had a very simple collection of socks – **red or blue**, for either school or play; **short or long**, for either trousers or lederhosen. After the first few teasing episodes from the other boys, **Erwin had sorted his socks into two separate drawers**. He placed all the red socks in one drawer and all the blue socks in another drawer. Erwin figured he could determine an individual sock's length in the dark of night simply by feeling it, but he had to have them presorted into blue and red because the apartment generally lost power before the call to the shelter.

Unfortunately, Erwin found that this presorting of the socks by color was ineffective. **Whenever he reached into the blue sock drawer and chose two long socks, or two short socks, there was a 50% probability of any one sock being red or blue**. The results from the red sock drawer were the same. The socks seemed to have "forgotten" the color that Erwin had determined previously.

Erwin also tried sorting the socks into two drawers based upon their length, without regard to color. When he chose red or blue socks from these long and short drawers, the socks had also "forgotten" whether they were long or short. After these fruitless attempts to solve his problem through experiments, Erwin decided to save himself the fashion embarrassment, and he replaced his sock collection with a set of medium length brown socks. However, he continued to ponder the mysteries of the socks throughout his childhood.

After many years of daydreaming about the mystery socks, Erwin Schrödinger proposed his theory of "Quantum Socks" and become famous. And that is the beginning of the story of the quantum socks.

The End.





ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

# Dilemmi e sfide della seconda rivoluzione quantistica



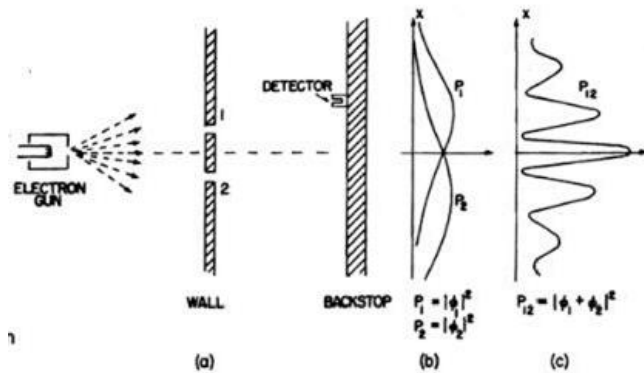
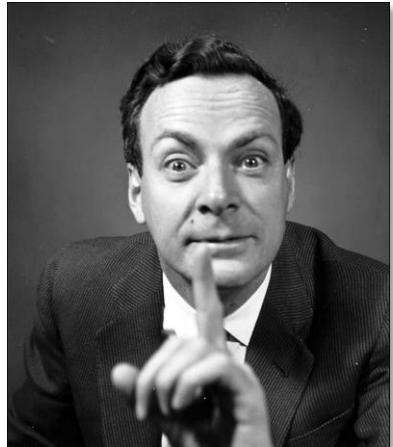
Complementarità e indeterminazione

Prima rivoluzione quantistica (1927): primi decenni del XX secolo

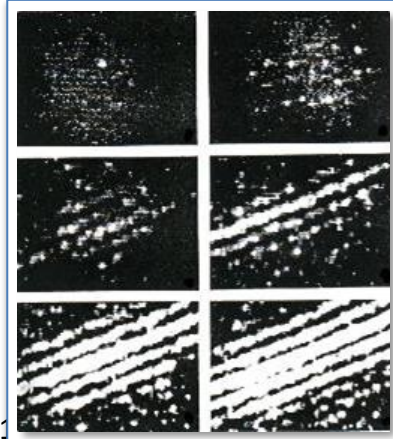


Entanglement

Seconda rivoluzione quantistica (1935): Ultimi decenni del XX secolo



P. G. Merli, G. F. Missiroli, G. Pozzi, "On the statistical aspect of electron interference phenomena", *American Journal of Physics*, 44, 3, 306-307 (1976)



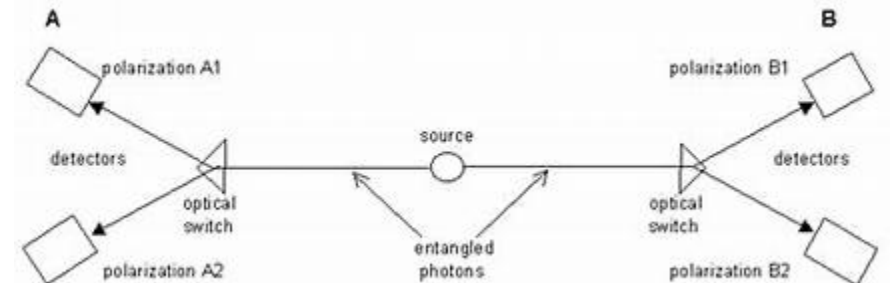
Bell's Theorem



John Stewart Bell 1928 - 1990

No physical theory of local hidden variables can ever reproduce all of the predictions of quantum mechanics.

Aspect's Experiments



“[The double-slit experiment] has in it the heart of quantum mechanics. In reality, it contains the only mystery” (Feynman, Leighton & Sand, 1965)

We never experiment with just one electron or atom or (small) molecule. In thought-experiments we sometimes assume that we do; this invariably entails ridiculous consequences... we are not experimenting with single particles, any more than we can raise Ichthyosauria in the zoo"

Erwin Schrödinger [Brit. J. Phil. Sci. 3, 233 (1952)]

## Seconda rivoluzione quantistica (1935): Ultimi decenni del XX secolo

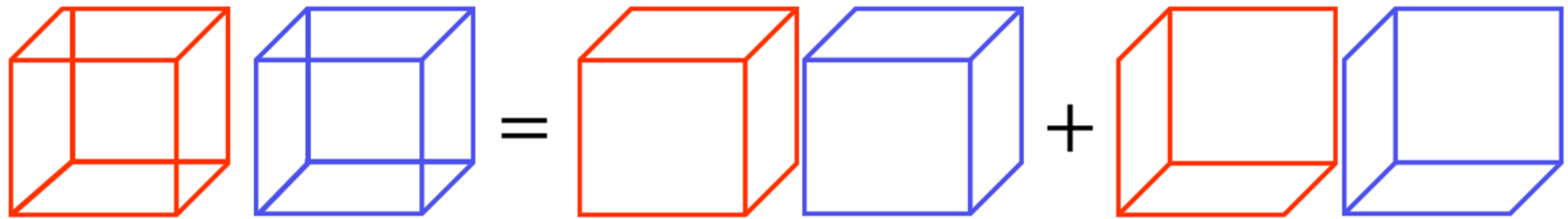
***Nodi concettuali, sfide sperimentali e sfide «immaginative e linguistiche»: :***

- Non-località, entanglement, casualità quantistica
- la possibilità di isolare e manipolare singoli oggetti quantistici (atomi, fotoni...)

***Progresso tecnologico*** : computer e simulatori quantistici, quantum sensing, comunicazione...

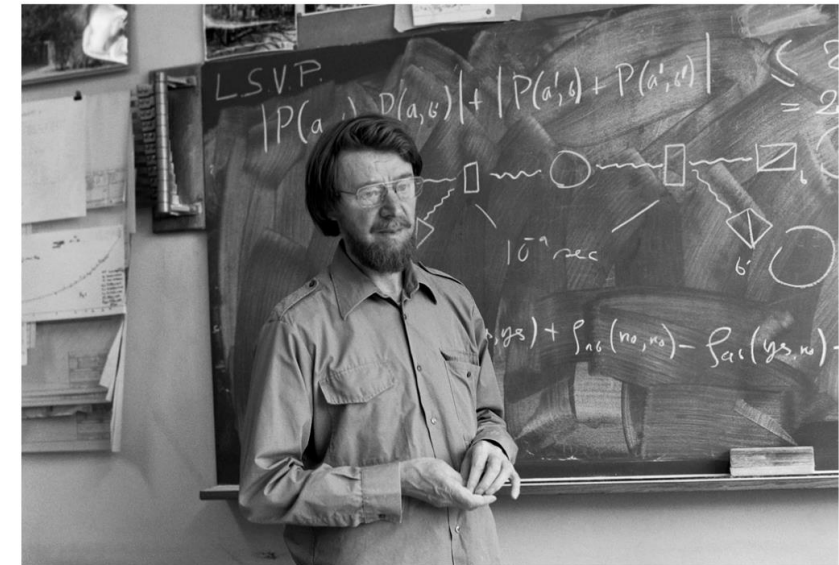
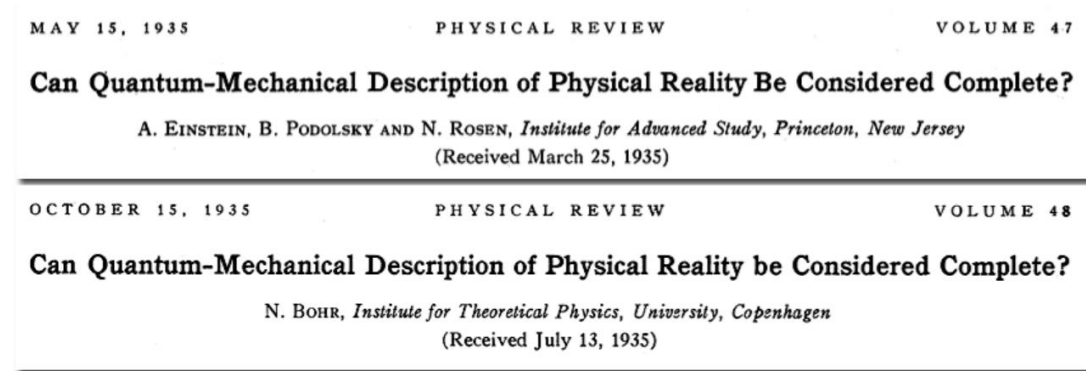


# Entanglement



# Dal dibattito EPR agli esperimenti della violazione

- Dibattito Einstein – Bohr sulla completezza non completezza della teoria (**1935**)
- Formulazione della teoria delle variabili nascoste (Bohm, **1952**)
- Teorema di Bell (disuguaglianze di Bell, **1964**): se esistono variabili nascoste locali, si potrebbero eseguire alcuni esperimenti che coinvolgono l'entanglement e il risultato soddisferebbe il teorema (disuguaglianza di Bell). Se, d'altra parte, le correlazioni statistiche derivanti dall'entanglement non potessero essere spiegate da variabili nascoste locali, la disuguaglianza di Bell sarebbe violata.
- Esperimenti fondamentali che dimostrarono la violazione delle disuguaglianze.



*"If [a hidden-variable theory] is local it will not agree with quantum mechanics, and if it agrees with quantum mechanics it will not be local."*  
Bell, John S. (1987). *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*.



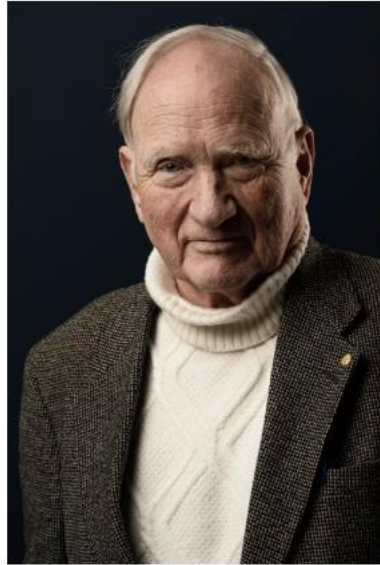
# La Seconda Rivoluzione Quantistica: Il Nobel 2022



© Nobel Prize Outreach. Photo: Stefan Bladh

**Alain Aspect**

Prize share: 1/3



© Nobel Prize Outreach. Photo: Stefan Bladh

**John F. Clauser**

Prize share: 1/3



© Nobel Prize Outreach. Photo: Stefan Bladh

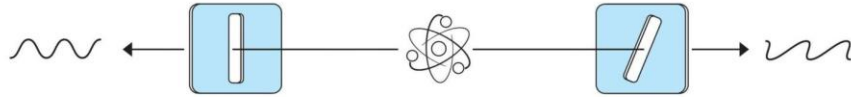
**Anton Zeilinger**

Prize share: 1/3

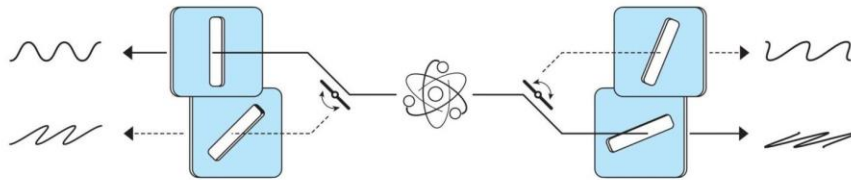
The Nobel Prize in Physics 2022 was awarded jointly to Alain Aspect, John F. Clauser and Anton Zeilinger "for experiments with entangled photons, establishing the violation of Bell inequalities and pioneering quantum information science"

# La Seconda Rivoluzione Quantistica: Il Nobel 2022

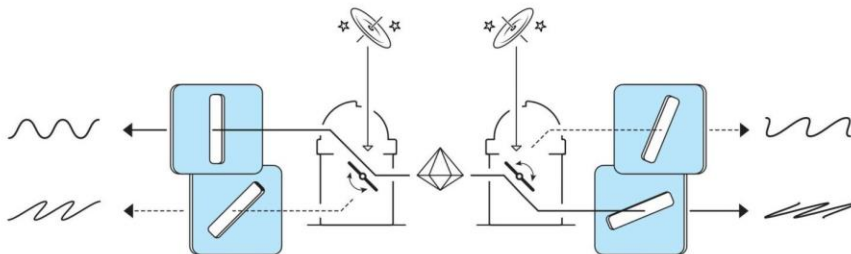
## Experimenting with Bell inequalities



**John Clauser** used calcium atoms that could emit entangled photons after he had illuminated them with a special light. He set up a filter on either side to measure the photons' polarisation. After a series of measurements, he was able to show they violated a Bell inequality.



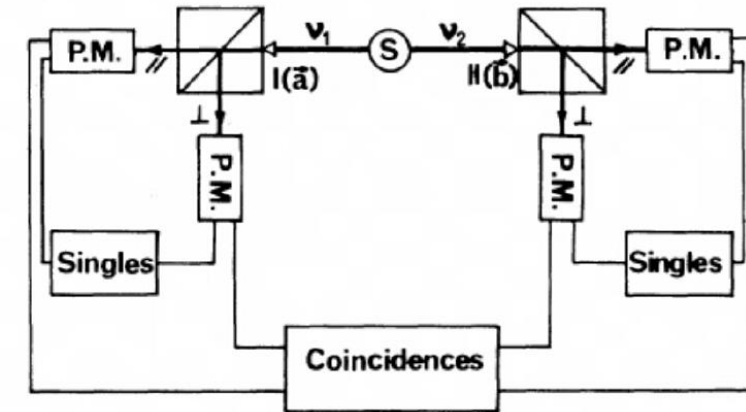
**Alain Aspect** developed this experiment, using a new way of exciting the atoms so they emitted entangled photons at a higher rate. He could also switch between different settings, so the system would not contain any advance information that could affect the results.



**Anton Zeilinger** later conducted more tests of Bell inequalities. He created entangled pairs of photons by shining a laser on a special crystal, and used random numbers to shift between measurement settings. One experiment used signals from distant galaxies to control the filters and ensure the signals could not affect each other.

© Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

The Nobel Prize in Physics 2022 was awarded jointly to Alain Aspect, John F. Clauser and Anton Zeilinger "for experiments with entangled photons, establishing the violation of Bell inequalities and pioneering quantum information science"

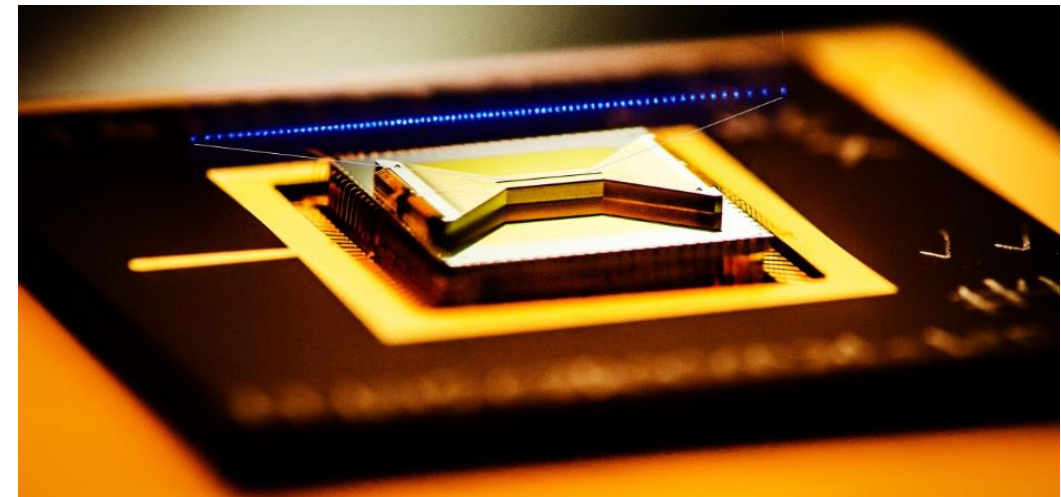
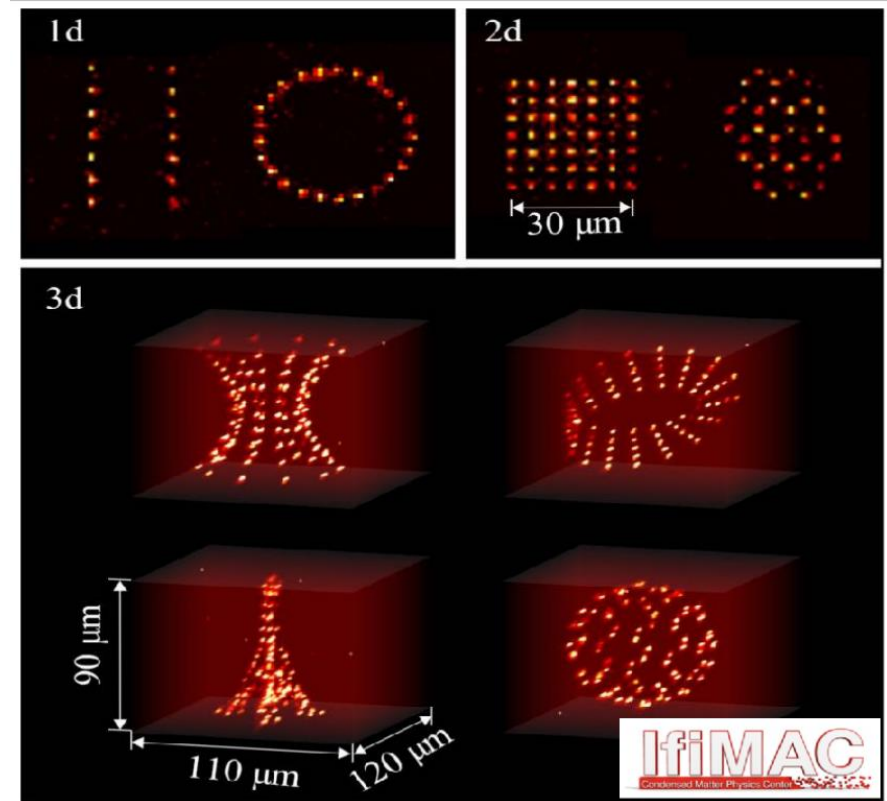
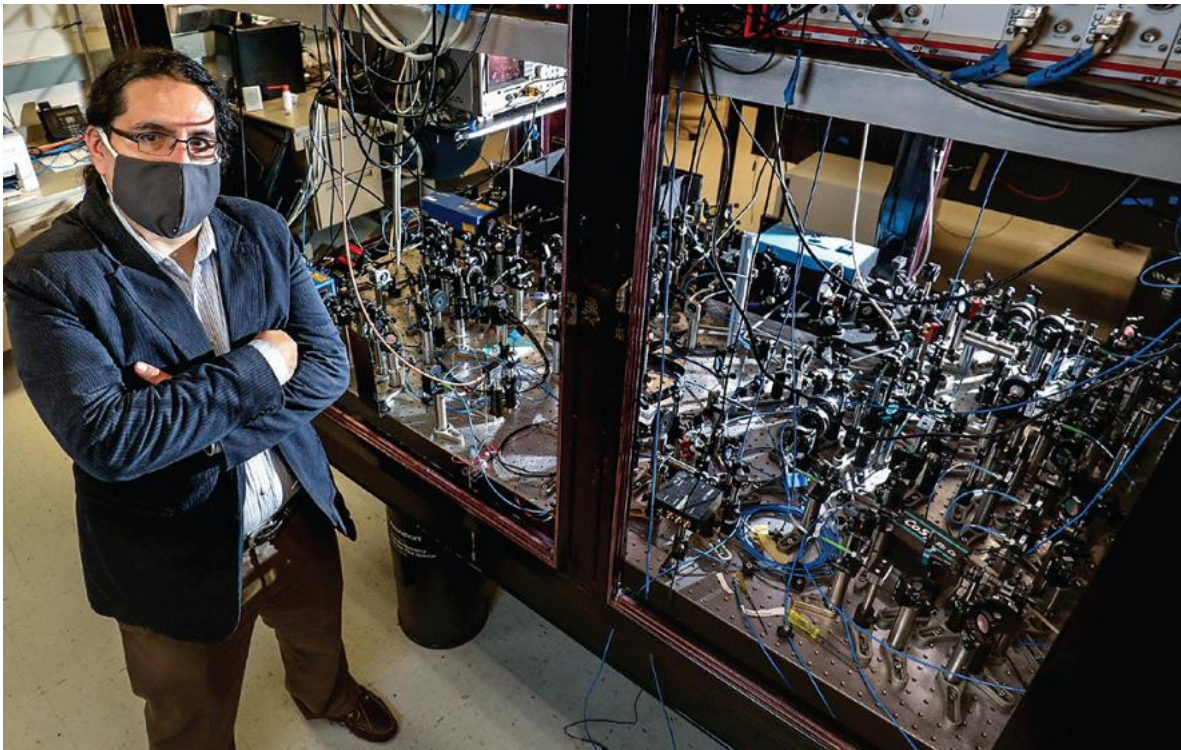


**FIG. 2.** Experimental setup. Two polarimeters I and II, in orientations  $\vec{a}$  and  $\vec{b}$ , perform true dichotomic measurements of linear polarization on photons  $\nu_1$  and  $\nu_2$ . Each polarimeter is rotatable around the axis of the incident beam. The counting electronics monitors the singles and the coincidences.



# La Seconda Rivoluzione Quantistica: Manipolazione del singolo oggetto quantistico

Sviluppo di tecniche per isolare, manipolare e controllare i singoli Qubit (atomi, ioni, fotoni,...).



# La Seconda Rivoluzione Quantistica: Manipolazione del singolo oggetto quantistico

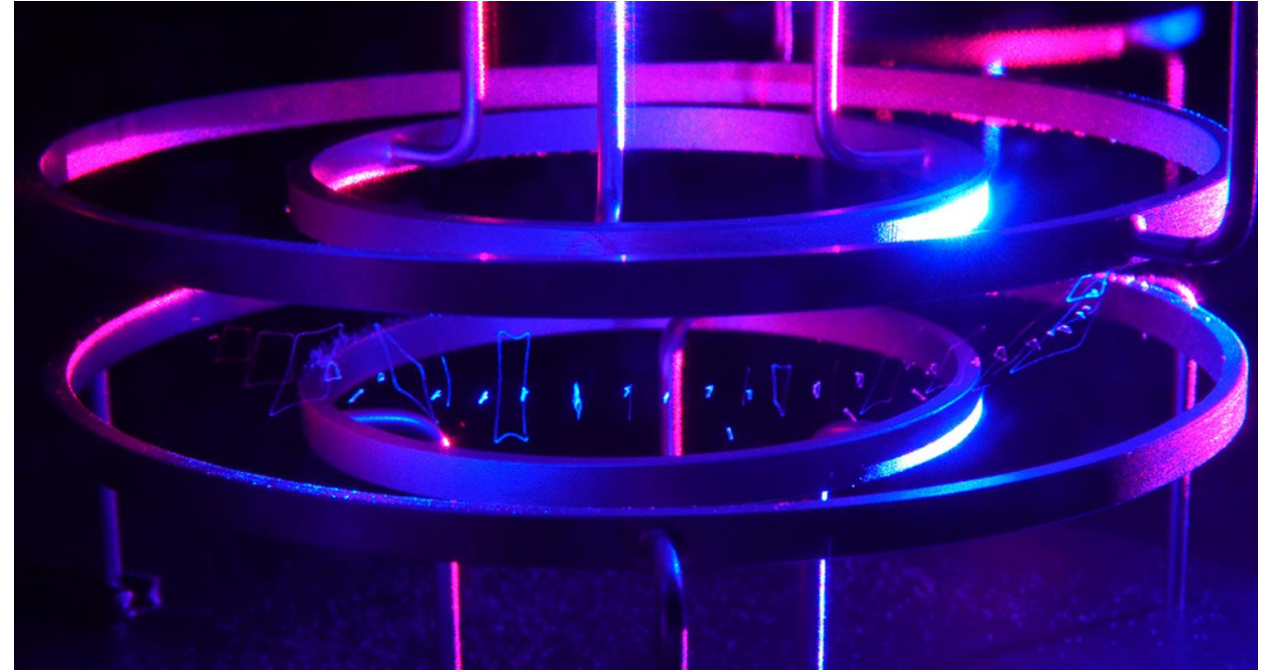
Sviluppo di tecniche per isolare, manipolare e controllare i singoli Qubit (atomi, ioni, fotoni,...).

HILBERT HOTEL | 2020 | Installation

How can a fully occupied hotel of infinite scale continuously accommodate an infinite influx of new guests? David Hilbert was among a contingent of mathematicians, stretching back to Zeno, who pondered such questions of infinitesimal spatial granularity.

“Hilbert Hotel” is a curvilinear ion trap that electrically levitates its myriad microscopic guests. These hollow glass microspheres float along startlingly square-shaped orbits, tracing the quadrupolar electric fields that keep them airborne. When charged particles are levitated by electric fields an exotic state of matter emerges, known as a Coulomb crystal. Paving the way to quantum computers and to physics beyond the Standard Model, Coulomb crystals also offer uncharted perceptual territory. Their direct observability has led to a series of ion crystal artworks that will culminate with Atom Chasm, a laser-cooled ion trap laying bare individual atoms.

[http://www.portablepalace.com/hilbert\\_hotel.html](http://www.portablepalace.com/hilbert_hotel.html)



This artwork was supported by S+T+ARTS and Creative Industries Fund.



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA



# La Seconda Rivoluzione Quantistica: Verso i computer quantistici

Now, what kind of physics are we going to imitate? First, I am going to describe the possibility of simulating physics in the classical approximation, a thing which is usually described by local differential equations. But the physical world is quantum mechanical, and therefore the proper problem is the simulation of quantum physics—which is what I really want to talk about, but I'll come to that later. So what kind of simulation do I mean?

about. I want to talk about the possibility that there is to be an *exact* simulation, that the computer will do *exactly* the same as nature. If this is to be proved and the type of computer is as I've already explained, then it's going to be necessary that *everything* that happens in a finite volume of space and time would have to be exactly analyzable with a finite number of logical operations. The present theory of physics is not that way, apparently. It allows space to go down into infinitesimal distances, wavelengths to get infinitely great, terms to be summed in infinite order, and so forth; and therefore, if this proposition is right, physical law is wrong.

That's fine. That would be good physics if you could predict something consistent with all the known facts and suggest some new fact that we didn't explain, but I have no specific examples. So I'm not objecting to the fact

## Simulating Physics with Computers

Richard P. Feynman

Department of Physics, California Institute of Technology, Pasadena, California 91107

Received May 7, 1981



# La Seconda Rivoluzione Quantistica: Verso i computer quantistici

Deutsch in 1985 proved the validity of Feynman's theory and the possibility of the realization of a universal quantum computer, taking up the concept developed by Turing, of “functions which would naturally be regarded as computable” and reconceptualizing it as “functions which may in principle be computed by a real physical system” (Deutsch, 1985, p. 99). The author continues “For it would surely be hard to regard a function ‘naturally’ as computable if it could not be computed in Nature, and conversely” (Deutsch, 1985, p.99)

For our knowledge of mathematics and logic is inextricably entangled with our knowledge of physical reality: every mathematical proof depends for its acceptance upon our agreement about the rules that govern the behavior of physical objects such as computers or our brains. Hence when we improve our knowledge about physical reality, we may also gain new means of improving our knowledge of logic, mathematics, and formal constructs. [...] it is time to abandon the classical view of computation as a purely logical notion independent of that of computation as a physical process” (Deutsch, Ekert & Lupacchini, 2000, p. 268)

## Simulating Physics with Computers

Richard P. Feynman

*Department of Physics, California Institute of Technology, Pasadena, California 91107*

*Received May 7, 1981*

*Proc. R. Soc. Lond. A* **400**, 97–117 (1985)

*Printed in Great Britain*

## Quantum theory, the Church–Turing principle and the universal quantum computer

BY D. DEUTSCH

*Department of Astrophysics, South Parks Road, Oxford OX1 3RQ, U.K.*

*(Communicated by R. Penrose, F.R.S. – Received 13 July 1984)*



# La Seconda Rivoluzione Quantistica: Verso i computer quantistici

Deutsch in 1985 proved the validity of Feynman's theory and the possibility of the realization of a universal quantum computer, taking up the concept developed by Turing, of “functions which would naturally be regarded as computable” and reconceptualizing it as “functions which may in principle be computed by a real physical system” (Deutsch, 1985, p. 235).

“Information, after all, is something that is encoded in the state of a physical system; a computation is something that can be carried out on an actual physically realizable device. So the study of information and computation should be linked to the study of the underlying physical processes” (Preskill, 1998, p. 7).

we may also gain new means of improving our knowledge of logic, mathematics, and formal constructs. [...] it is time to abandon the classical view of computation as a purely logical notion independent of that of computation as a physical process” (Deutsch, Ekert & Lupacchini, 2000, p. 268)

## Simulating Physics with Computers

Richard P. Feynman

Department of Physics, California Institute of Technology, Pasadena, California 91107

Received May 7, 1981

Proc. R. Soc. Lond. A **400**, 97–117 (1985)  
Printed in Great Britain

## Quantum theory, the Church–Turing principle and the universal quantum computer

BY D. DEUTSCH

Department of Astrophysics, South Parks Road, Oxford OX1 3RQ, U.K.

(Communicated by R. Penrose, F.R.S. – Received 13 July 1984)



***Dai fuochi di attenzione ai principi di progettazione per valorizzare la  
Seconda Rivoluzione Quantistica come una rivoluzione innanzitutto  
culturale***





# La Seconda Rivoluzione Quantistica: Verso i computer quantistici

*Percezione di una simmetria*

Quando abbiamo iniziato ad occuparci di tecnologie quantistiche abbiamo notato che raramente un seminario o una conferenza per la cittadinanza sull'informatica e i computer classici inizi spiegando le leggi fisiche secondo cui l'hardware e le porte logiche sono realizzate e funzionano. Al contrario, la maggior parte dei seminari e conferenze sulle tecnologie quantistiche di solito partono da un'introduzione alla nuova unità di base (il Qubit) e le sue caratteristiche (principio di sovrapposizione e entanglement) e una discussione su, per esempio, le tecniche migliori per creare Qubit e manipolarli (Satanassi, Ercolessi & Levrini, 2022).

# La Seconda Rivoluzione Quantistica: Verso i computer quantistici

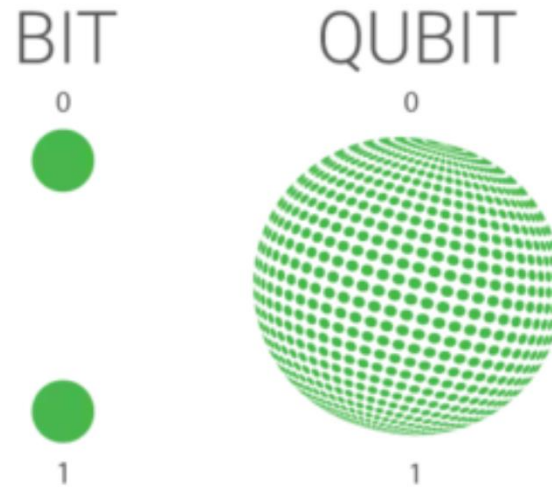
## *Percezione di una asimmetria*

Quando abbiamo iniziato ad occuparci di tecnologie quantistiche abbiamo notato che raramente un seminario o una conferenza per la cittadinanza sull'informatica e i computer classici inizi spiegando le leggi fisiche secondo cui l'hardware e le porte logiche sono realizzate e funzionano. Al contrario, la maggior parte dei seminari e conferenze sulle tecnologie quantistiche di solito partono da un'introduzione alla nuova unità di base (il Qubit) e le sue caratteristiche (principio di sovrapposizione e entanglement) e una discussione su, per esempio, le tecniche migliori per creare Qubits e manipolarli (Satanassi, Ercolessi & Levrini, 2022).

**Design principle #1:** confrontare computer classici e computer quantistici attraverso un'analisi delle differenti logiche su cui si basa il funzionamento del loro hardware.



# Dal Bit al Qubit



	BIT	QUBIT
Sistemi ad un «elemento»	0 o 1	$\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$
Sistemi a due «elementi»	00 , 01 , 10 o 11	$a 00\rangle + b 01\rangle + c 10\rangle + d 11\rangle$
Sistemi a tre «elementi»	000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111	$a 000\rangle + b 001\rangle + c 010\rangle + d 011\rangle + e 100\rangle + f 101\rangle + g 110\rangle + h 111\rangle$
Sistemi a $n$ elementi	....	...



# La Seconda Rivoluzione Quantistica: Verso i computer quantistici

## *Percezione di una asimmetria*

Quando abbiamo iniziato ad occuparci di tecnologie quantistiche abbiamo notato che raramente un seminario o una conferenza per la cittadinanza sull'informatica e i computer classici inizi spiegando le leggi fisiche secondo cui l'hardware e le porte logiche sono realizzate e funzionano. Al contrario, la maggior parte dei seminari e conferenze sulle tecnologie quantistiche di solito partono da un'introduzione alla nuova unità di base (il Qubit) e le sue caratteristiche (principio di sovrapposizione e entanglement) e una discussione su, per esempio, le tecniche migliori per creare qubits e manipolarli (Satanassi, Ercolessi & Levrini, 2022).

**Design principle #1:** confrontare computer classici e computer quantistici attraverso un'analisi delle differenti logiche su cui si basa il funzionamento del loro hardware.

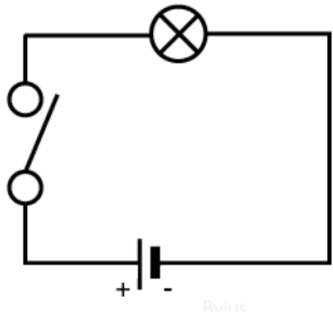
**Design principle #2:** riconcettualizzare gli esperimenti fondamentali in termini di computazione, in modo da discutere perché e come gli esperimenti possono essere considerati come "simulatori" o dispositivi per elaborare informazioni Dal punto di vista operativo, ciò significa rileggere le tre fasi principali di un esperimento -*preparazione dello stato, evoluzione/manipolazione dello stato e misurazione* - in termini di *informazione di input – elaborazione dell'informazione - informazioni di output*.



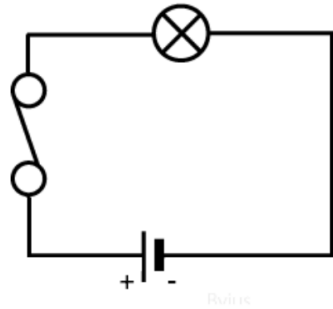


# Implementazione del primo e del secondo principio di design

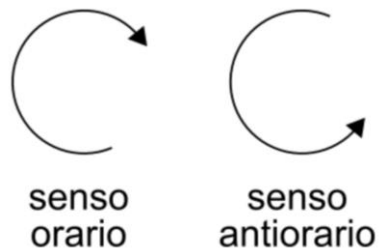
BIT = variabile che descrive ogni sistema binario



**CIRCUITO APERTO**

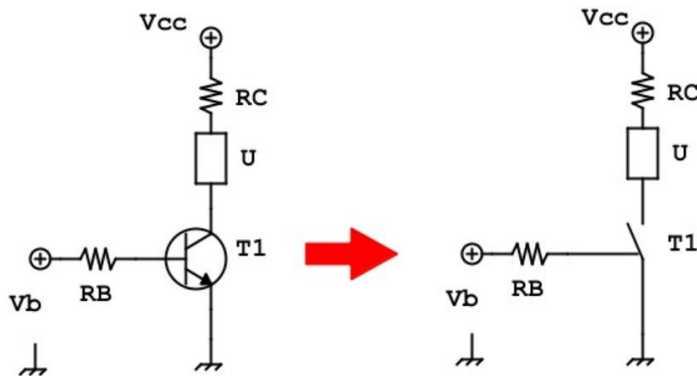


**CIRCUITO CHIUSO**

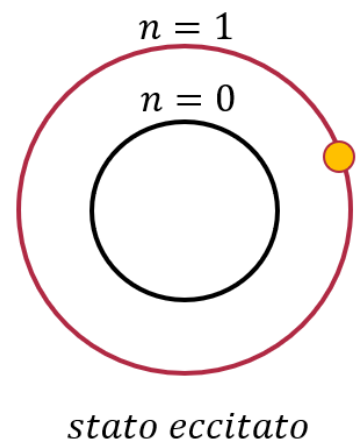
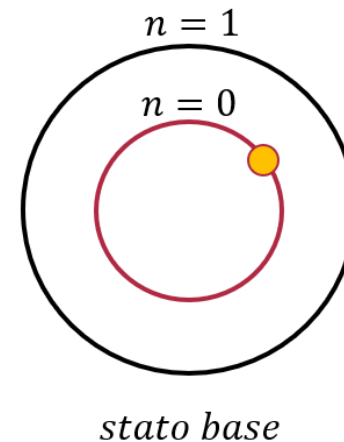
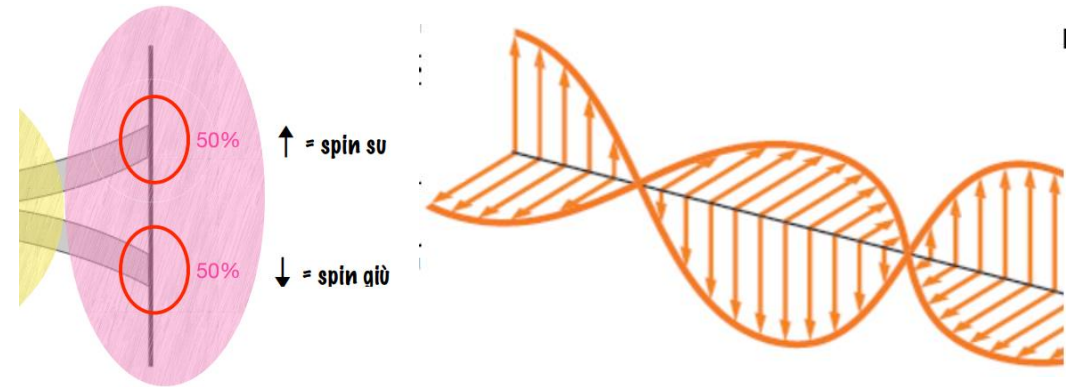


$I_B=0$     $I_C=0$

schema di principio

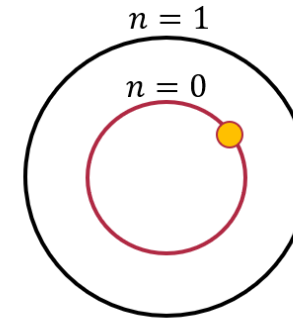
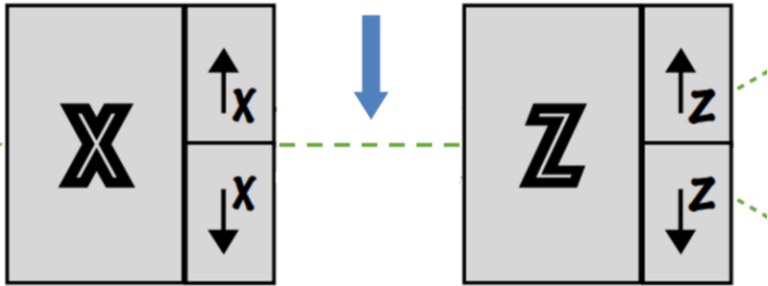


QUBIT = variabile che descrive lo stato del sistema quantistico più semplice.

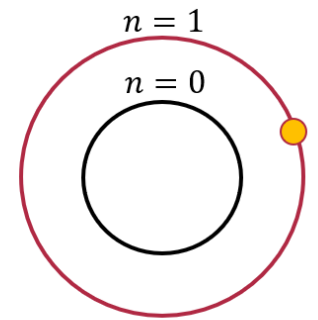


# Implementazione del primo e del secondo principio di design

$$|\varphi\rangle = \alpha|\uparrow\rangle + \beta|\downarrow\rangle$$



stato base



stato eccitato

$$|\varphi\rangle = a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$$

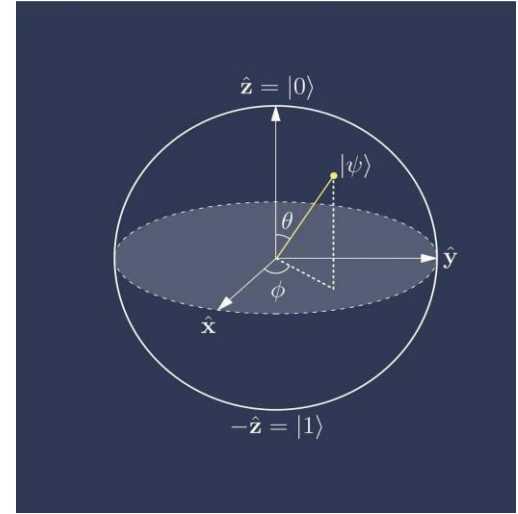
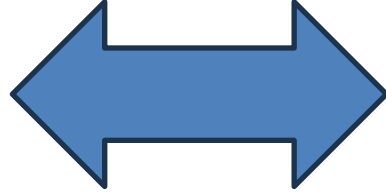
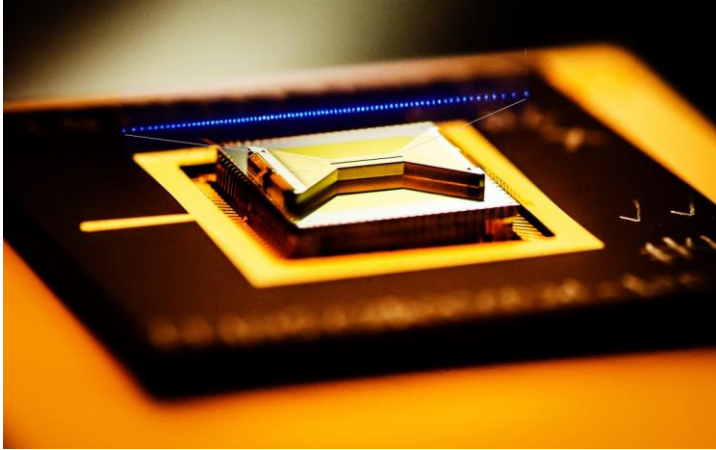
Con  $a^2$  e  $b^2$  probabilità che l'atomo abbia spin  $1/2$  e  $-1/2$

$$|\varphi\rangle = a|V\rangle + b|H\rangle$$

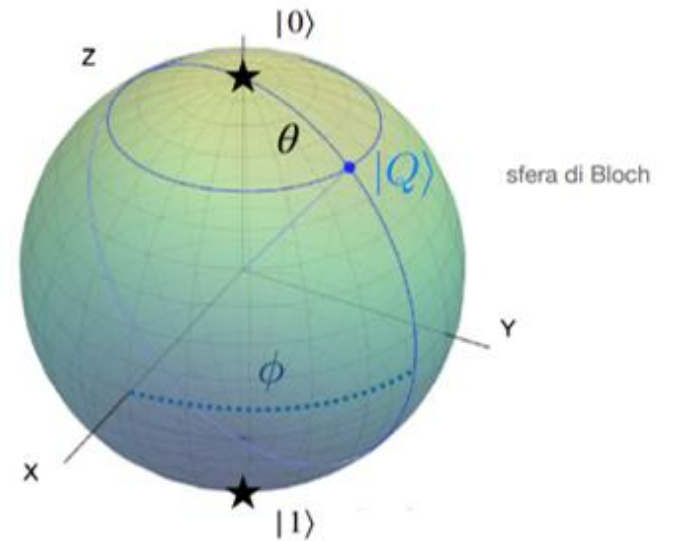
Con  $a^2$  e  $b^2$  probabilità che il fotone abbia polarizzazione verticale e orizzontale

$$|\varphi\rangle = a|n_0\rangle + b|n_1\rangle$$

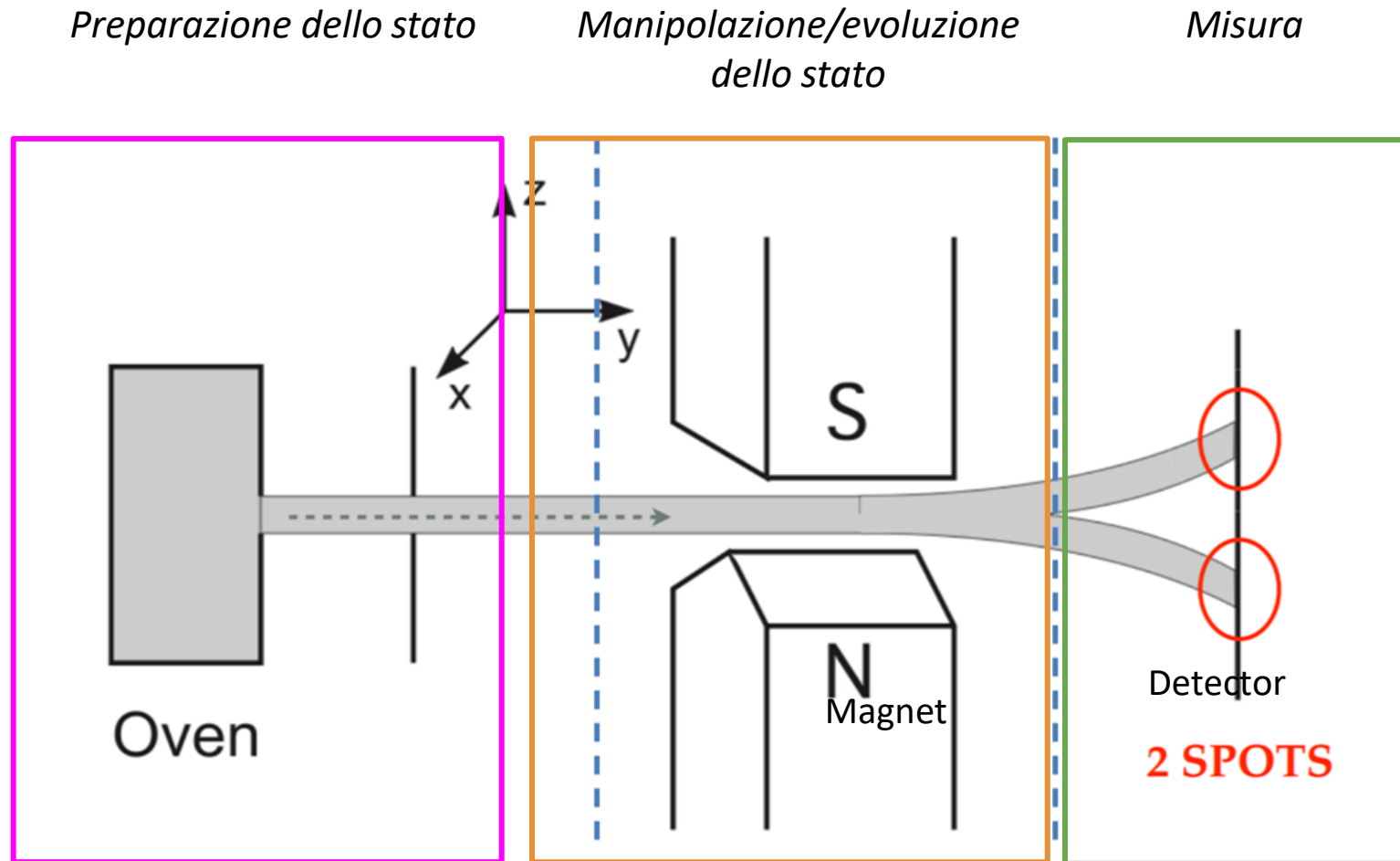
Con  $a^2$  e  $b^2$  probabilità che l'elettrone si trovi nello stato stabile o nel primo stato eccitato



$$\left. \begin{aligned}
 |\varphi\rangle &= a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle \\
 |\varphi\rangle &= a|V\rangle + b|H\rangle \\
 |\varphi\rangle &= a|n_0\rangle + b|n_1\rangle
 \end{aligned} \right\} \equiv a|0\rangle + b|1\rangle$$



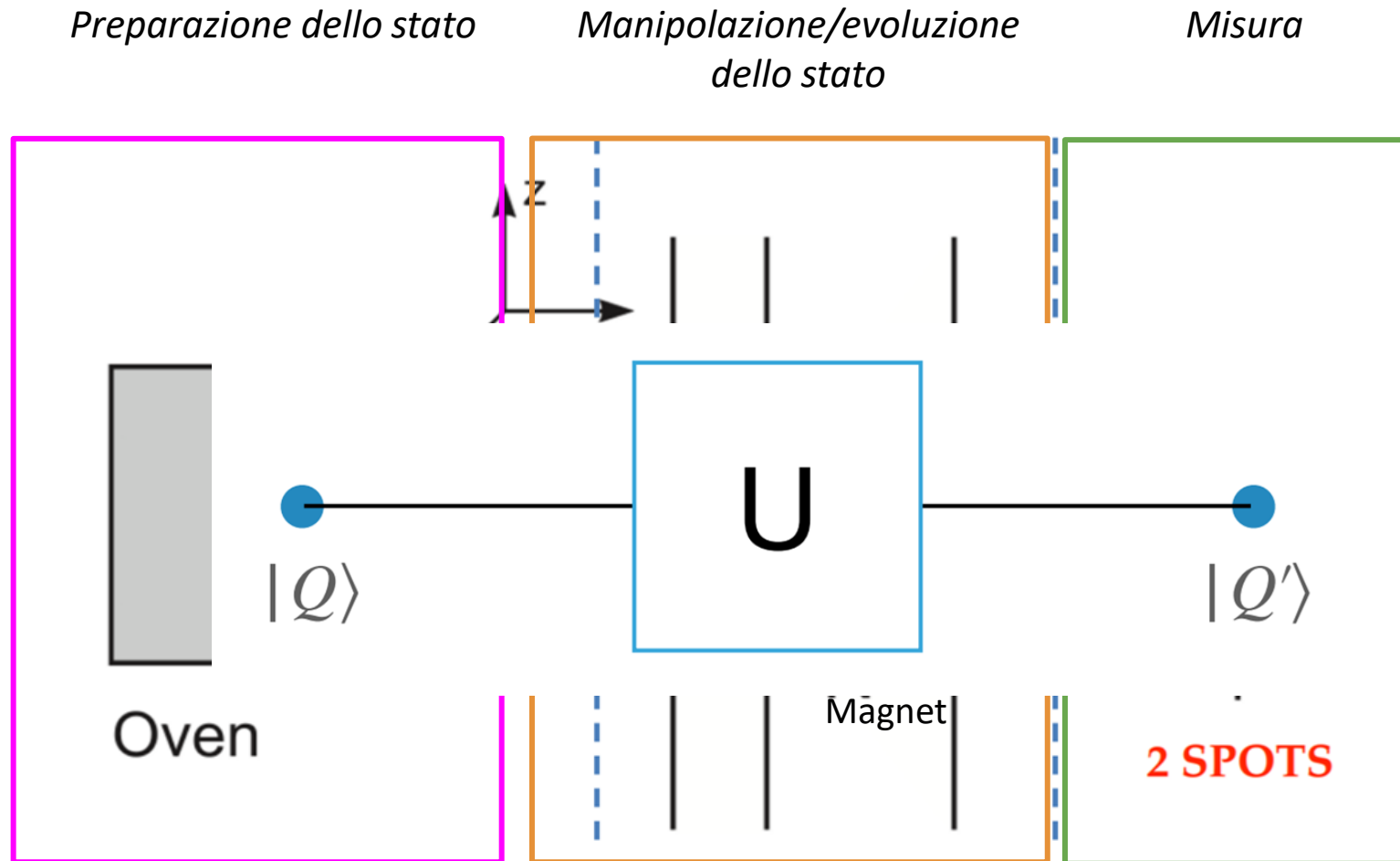
# Implementazione del primo e del secondo principio di design



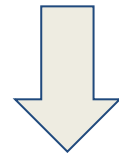
$$\alpha|\uparrow\rangle_z + \beta|\downarrow\rangle_z$$



# Implementazione del primo e del secondo principio di design



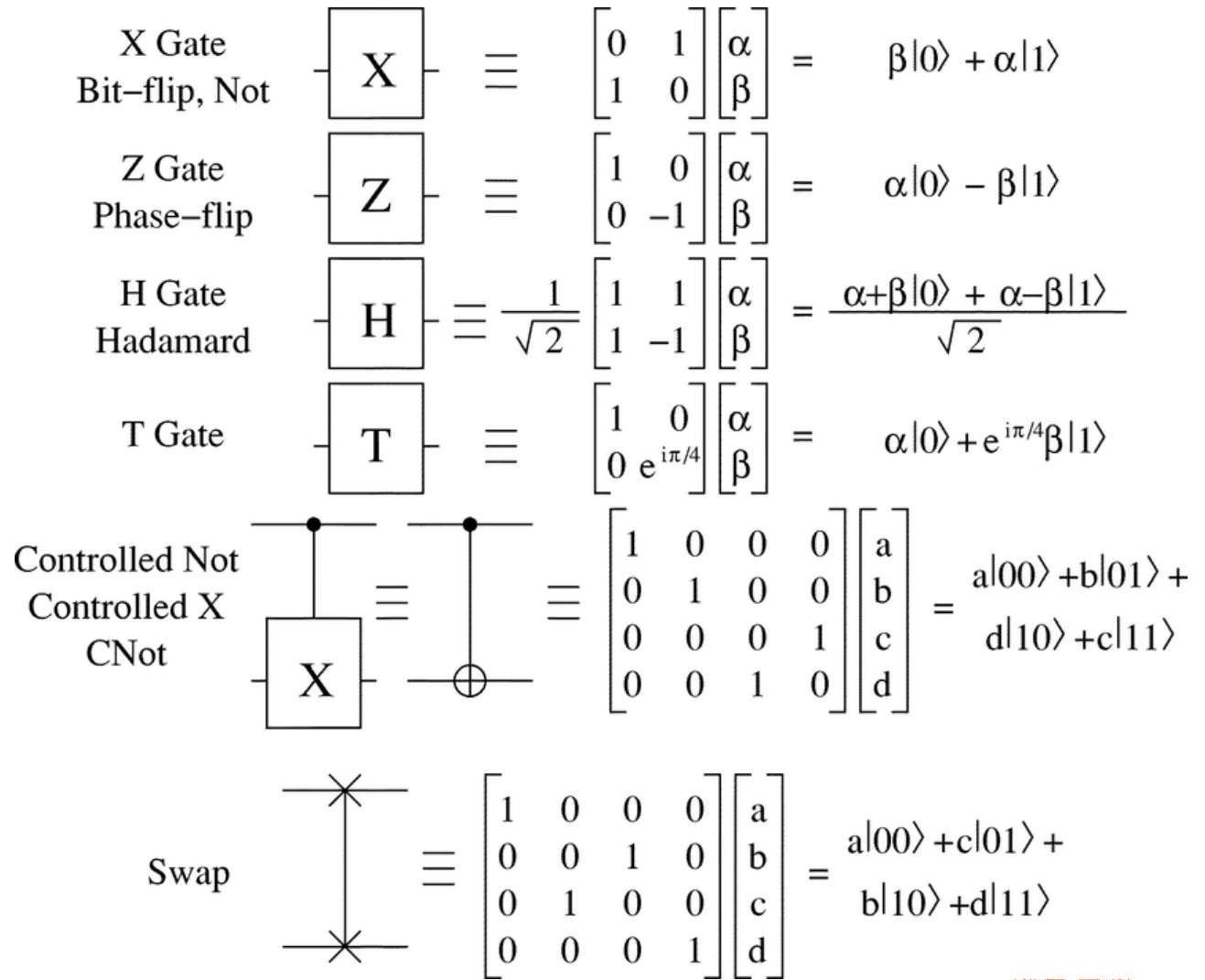
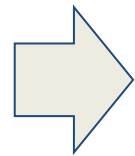
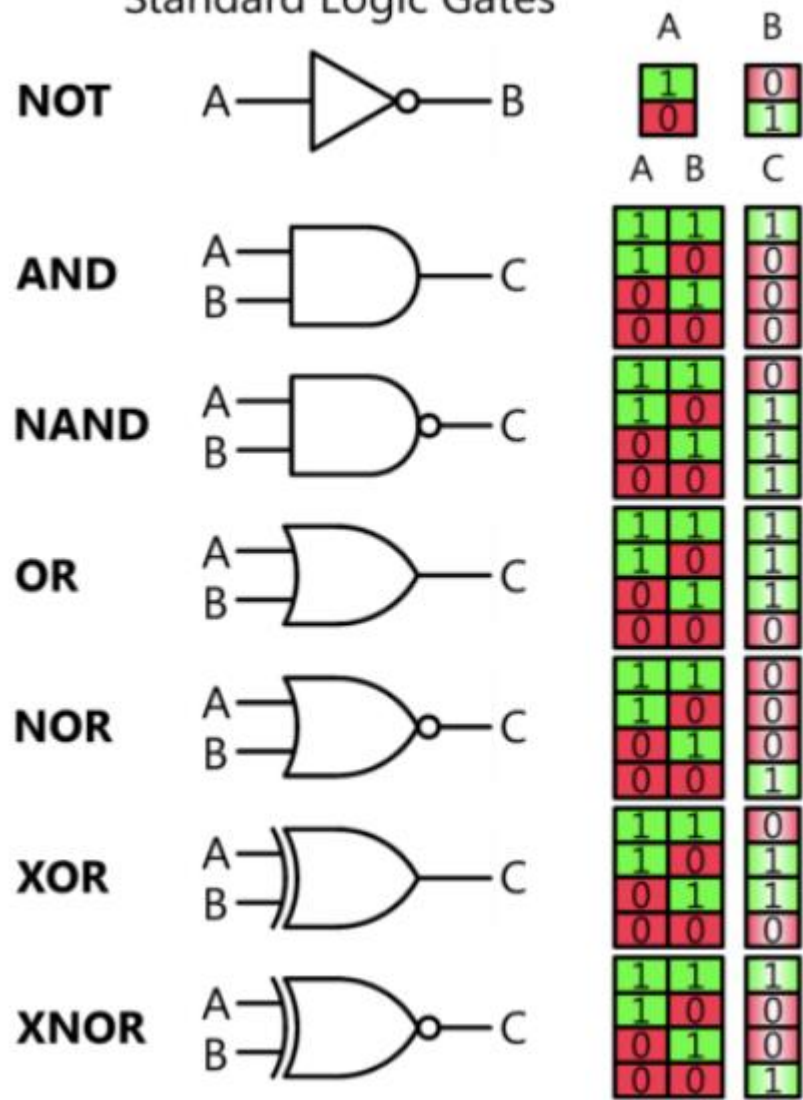
$$\alpha|\uparrow\rangle_z + \beta|\downarrow\rangle_z$$



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



### Standard Logic Gates



# Esempi di attività

## ATTIVITÀ 1:

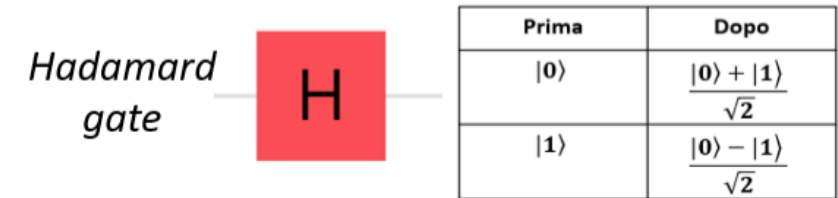
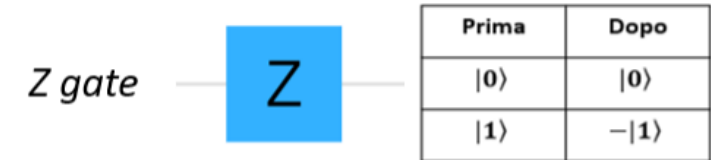
Si consideri il seguente circuito e sia  $q_0 = |0\rangle$



Quale è lo stato finale?

- a)  $a|0\rangle + b|1\rangle$
- b)  $\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$
- c)  $|1\rangle$
- d)  $|0\rangle$

Date le seguenti porte logiche e le rispettive tavole di verità:



# Esempi di attività

Date le seguenti porte logiche e le rispettive tavole di verità:

## ATTIVITÀ 1:

Si consideri il seguente circuito e sia  $q_0 = |0\rangle$

Quale è lo stato

- a)  $a|0\rangle$
- b)  $\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$
- c)  $|1\rangle$
- d)  $|0\rangle$

## ATTIVITÀ 2, parte 1:

Dato il circuito in figura



Se  $q_0 = |0\rangle$ , quale è lo stato in output?

- a)  $|0\rangle$
- b)  $a|0\rangle + b|1\rangle$
- c)  $|1\rangle$
- d)  $\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$

## ATTIVITÀ 2, parte 2:

Dato il circuito della parte prima (attività 2: parte 1), se  $q_0 = |1\rangle$  quale è lo stato finale?

- a)  $|0\rangle$
- b)  $a|0\rangle + b|1\rangle$
- c)  $|1\rangle$
- d)  $\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$

NOT gate



Prima	Dopo
$ 0\rangle$	$ 1\rangle$
$ 1\rangle$	$ 0\rangle$

Z gate



Prima	Dopo
$ 0\rangle$	$ 0\rangle$
$ 1\rangle$	$- 1\rangle$

Hadamard gate



Prima	Dopo
$ 0\rangle$	$\frac{ 0\rangle +  1\rangle}{\sqrt{2}}$
$ 1\rangle$	$\frac{ 0\rangle -  1\rangle}{\sqrt{2}}$





# Esempi di attività

Date le seguenti porte logiche e le rispettive tavole di verità:

## ATTIVITÀ 5, parte 1:

Dato lo stato iniziale e lo stato finale, ricostruisci il circuito con le porte logiche che conosci.

$$q_0 = a|0\rangle + b|1\rangle \quad \text{---} \quad \boxed{?} \quad \boxed{?} \quad \boxed{?} \quad \text{---} \quad q_{fin} = \frac{a+b}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{a-b}{\sqrt{2}}|1\rangle$$

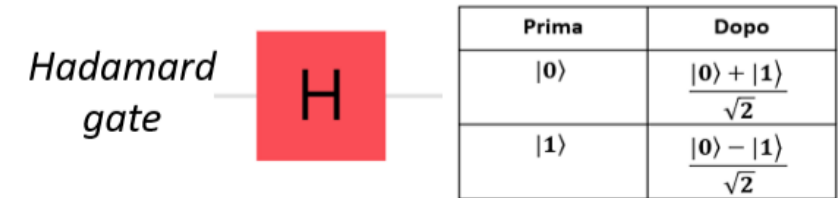
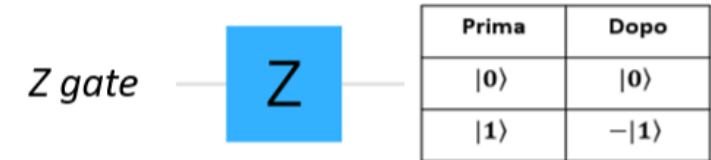
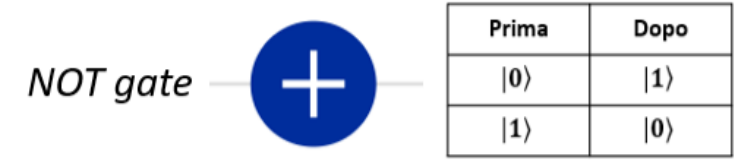
Come devono essere combinate le porte logiche per ottenere il risultato?

- a) X – Y – Z
- b) X – H – Z
- c) H – Z – X
- d) Y – Z – H

## ATTIVITÀ 5, parte 2:

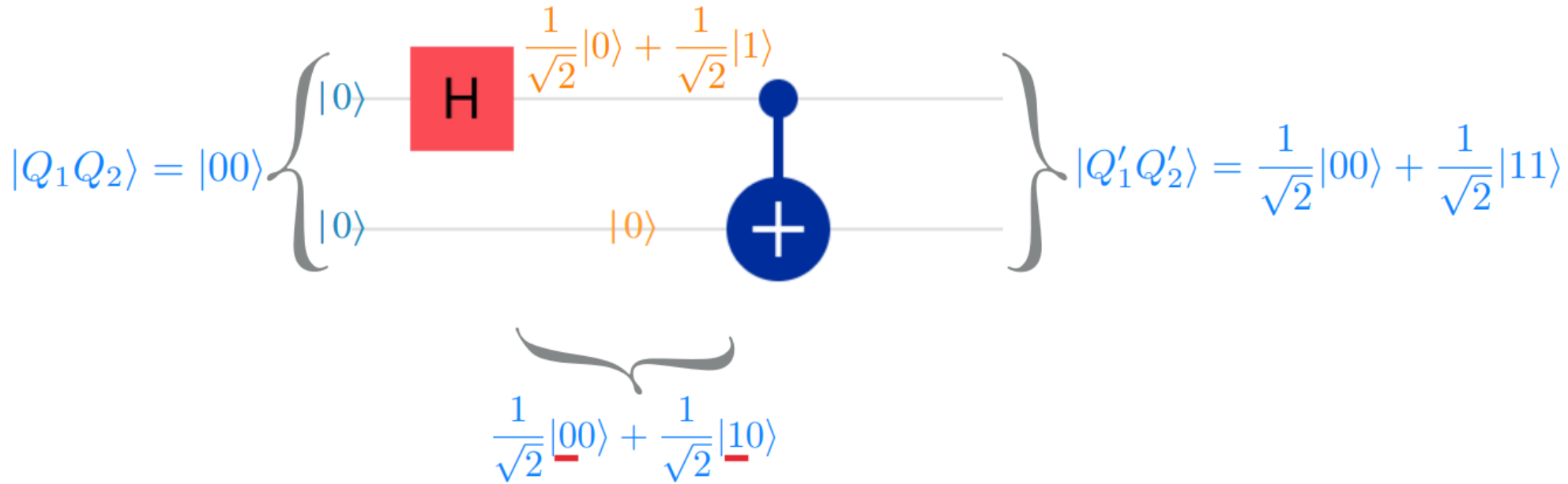
Se alla fine del circuito si esegue una misura, quale è la probabilità di trovare  $|0\rangle$  e  $|1\rangle$  se  $a = -\frac{\sqrt{2}}{2}$  e  $b = -\frac{\sqrt{2}}{2}$ ?

- a)  $p(|0\rangle) = 0$      $p(|1\rangle) = 1$
- b)  $p(|0\rangle) = \frac{1}{2}$      $p(|1\rangle) = \frac{1}{2}$
- c)  $p(|0\rangle) = \frac{1}{2}$      $p(|1\rangle) = -\frac{1}{2}$
- d)  $p(|0\rangle) = 1$      $p(|1\rangle) = 0$



# Esempi di attività

Circuito per generazione gli stati di Bell (stati massimamente entangled)



$$|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle + |11\rangle)$$

$$|\Phi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle - |11\rangle)$$

$$|\Psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|01\rangle + |10\rangle)$$

$$|\Psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|01\rangle - |10\rangle)$$

# Esempi di attività

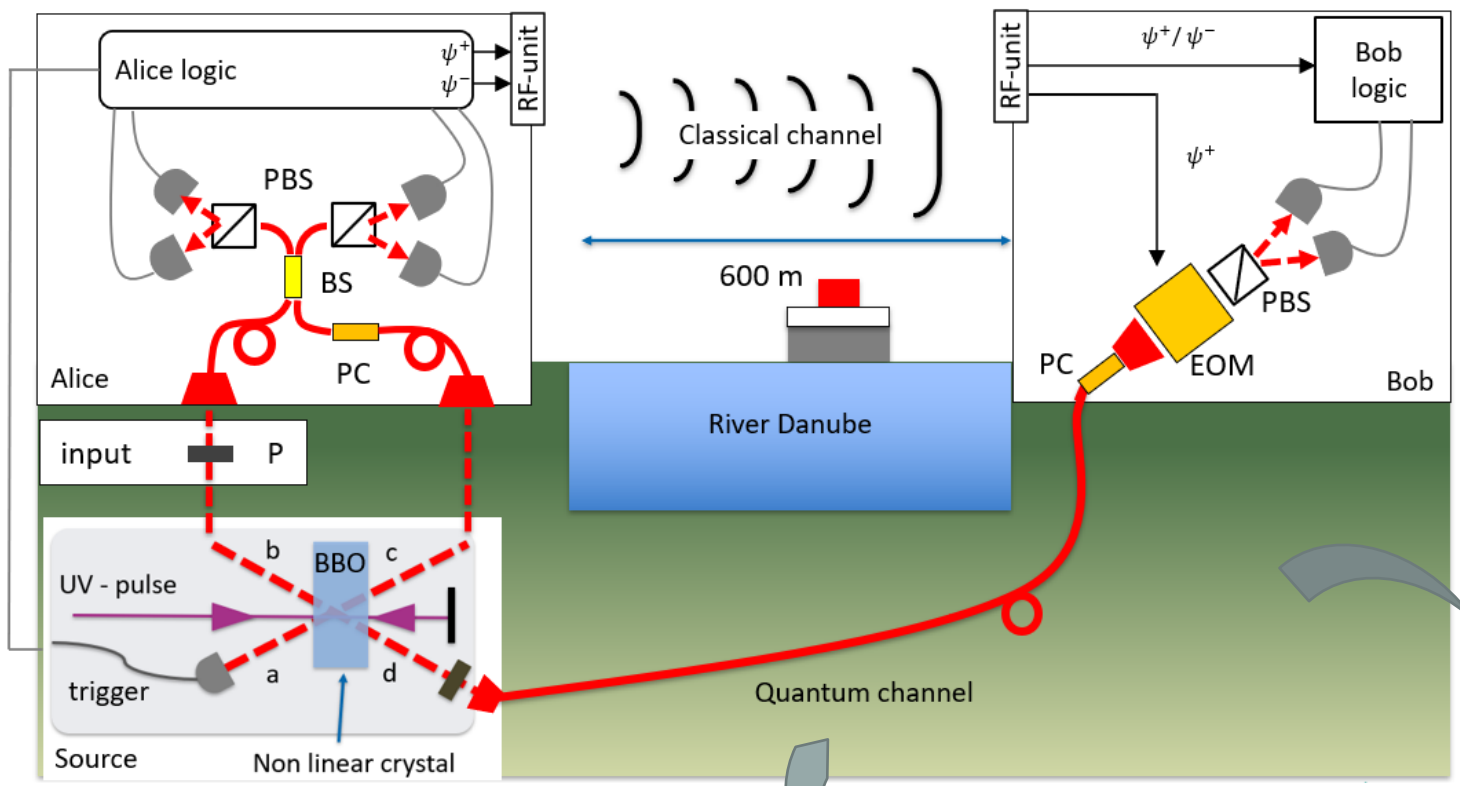
The screenshot displays the IBM Quantum Composer interface. At the top, the title bar shows "Untitled circuit" and navigation options: File, Edit, View. On the right, there are "Visualizations seed" (1632) and a "Sign in to run your circuit" button.

The main workspace is divided into several sections:

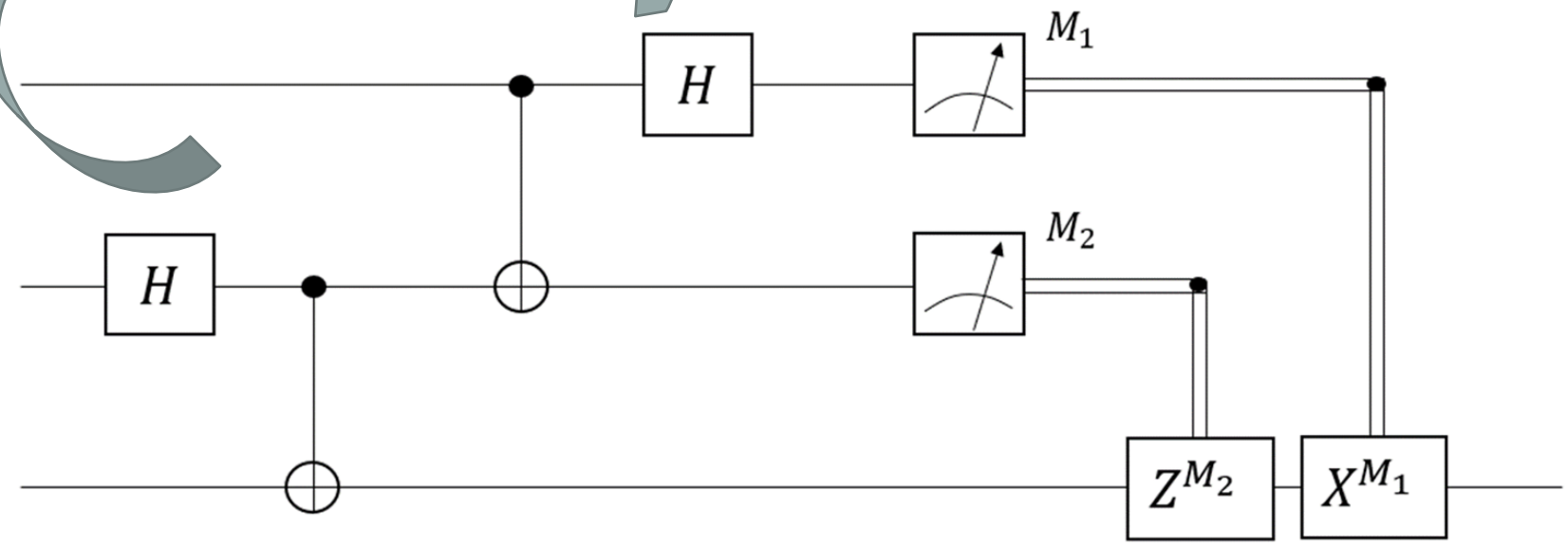
- Operations Panel:** A grid of quantum gates including H, T, RZ,  $\sqrt{X}$ , RX, RY, RXX, RZZ, U, RCCX, RC3X, and a phase slider.
- Circuit Diagram:** Shows a circuit with four qubits (q[0], q[1], q[2], q[3]) and a classical register (c4). An H gate is applied to q[0], followed by a CNOT gate with q[0] as control and q[1] as target.
- Code Editor:** Contains OpenQASM 2.0 code:

```
1 OPENQASM 2.0;  
2 include "qelib1.inc";  
3  
4 qreg q[4];  
5 creg c[4];  
6 h q[0];  
7 cx q[0], q[1];  
8
```
- Probabilities:** A histogram showing the probability distribution of computational basis states. The y-axis is "Probability (%)" from 0 to 100. The x-axis lists states from 0000 to 1111. Two bars are visible: 0000 at approximately 50% and 0011 at approximately 50%.
- Q-sphere:** A Bloch sphere visualization showing the state of the qubits. The state vector is positioned at the top pole, labeled |0000>. A phase indicator below the sphere shows a color wheel with markers for  $\pi/2$ ,  $\pi$ ,  $3\pi/2$ , and  $0$ .

<https://quantum.ibm.com/composer/files/new>

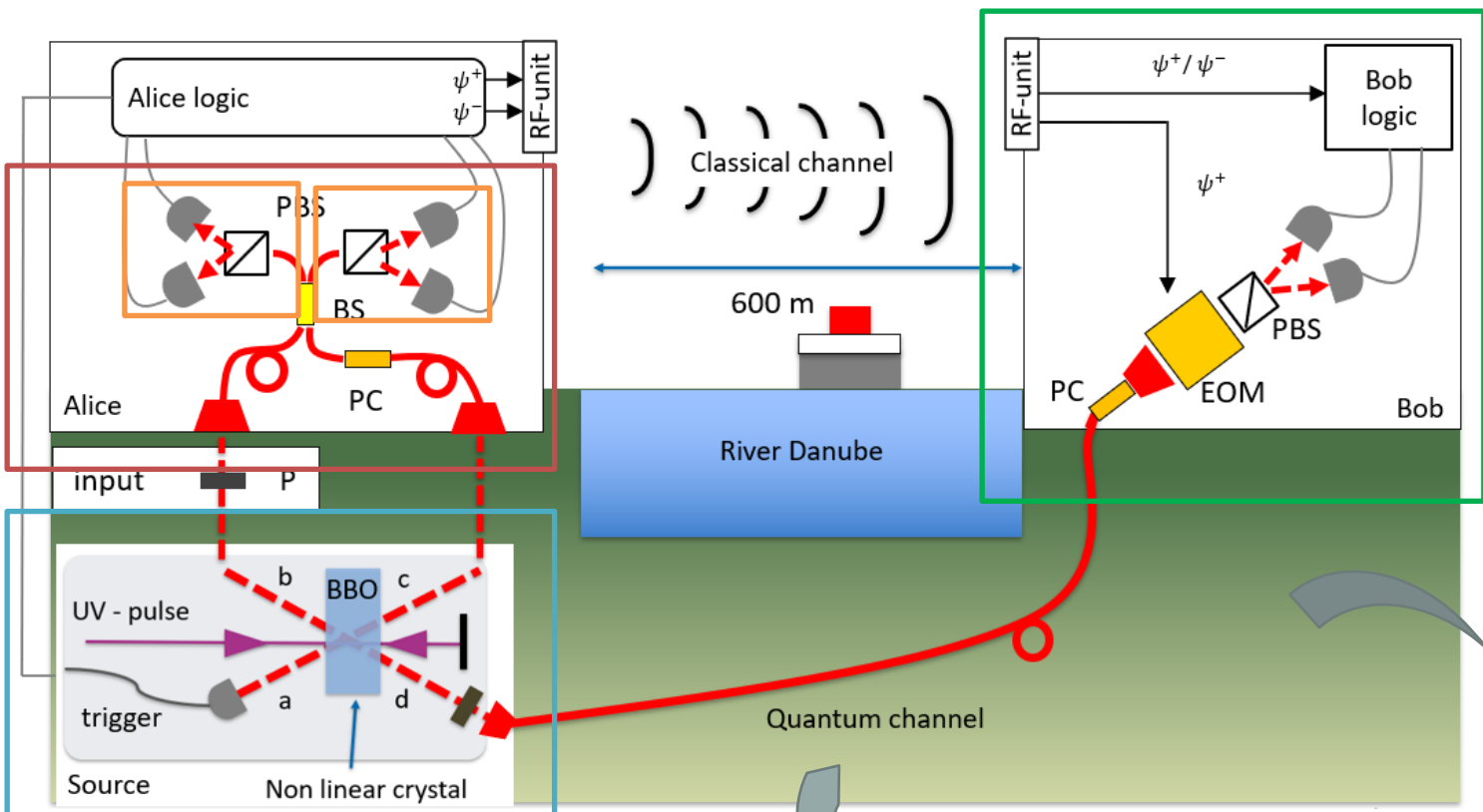


Il caso del teletrasporto

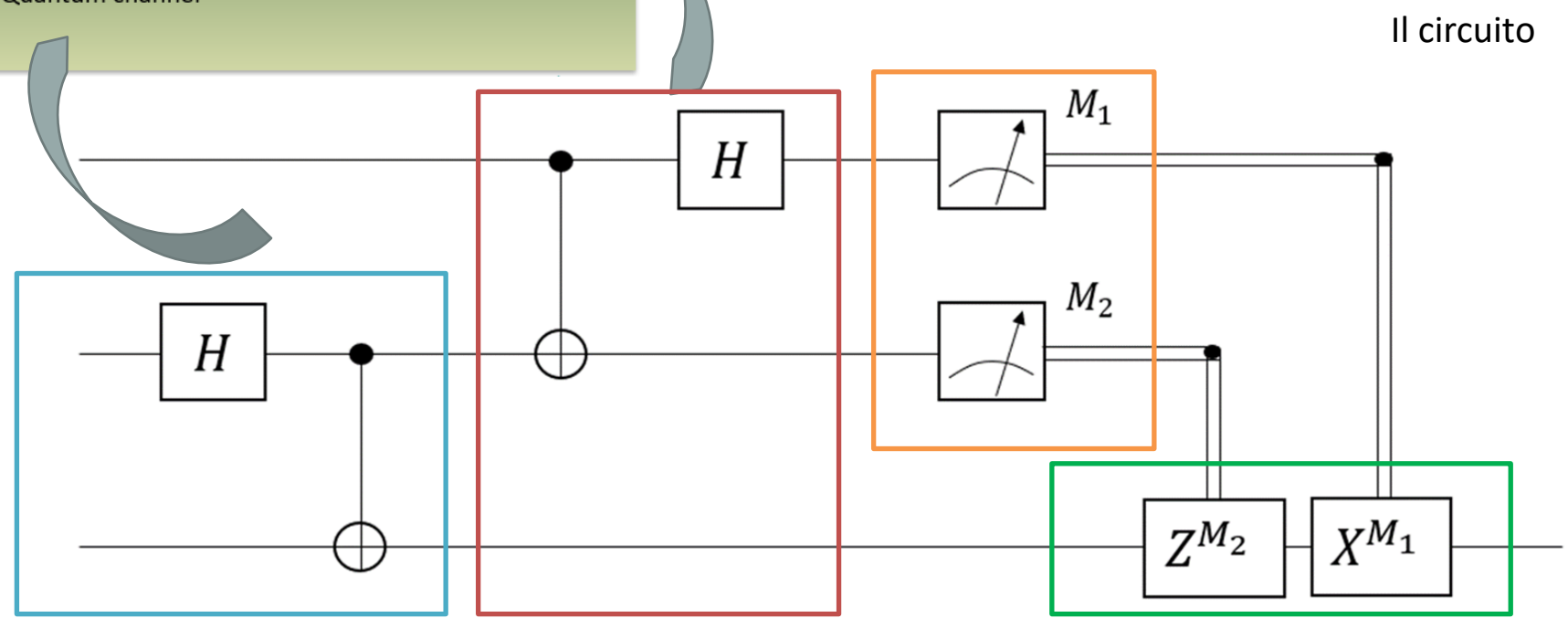




# Il caso del teletrasporto



L'esperimento



Il circuito

## Ricerca in didattica della fisica: i nostri studi

Potenzialità della seconda rivoluzione quantistica per introdurre anche i concetti di base della fisica quantistica:

- Problema dell'accettazione della fisica quantistica
- Ruolo dell'ambiente di apprendimento (in termini rappresentazioni multiple) per attivare processi di sense making e favorire la comprensione
- Inclusività e interdisciplinarietà
- Appropriazione

Potenzialità della struttura epistemica della fisica quantistica e delle rivoluzioni per

- Dare degli strumenti per pensare al presente
- Educare al futuro.



## Referenze

Satanassi, S. (2023). Investigating the learning potential of the Second Quantum Revolution: development of an approach for secondary school students.

Satanassi, S., Ercolessi, E., & Levrini, O. (2022). Designing and implementing materials on quantum computing for secondary school students: The case of teleportation. *Physical Review Physics Education Research*, 18(1), 010122.

Rosi, E. F., (2022). La figura del demone in fisica: dal determinismo classico al random walk quantistico. Esperimenti mentali per preparare al futuro, master's thesis in physics, Alma Mater Studiorum— University of Bologna, advisor: Olivia Levrini, co-advisor: Sara Satanassi.

Pierpaoli, C. (2023). Exploring the potential of the multiple representations environment to learn quantum physics: the case of the Second Quantum Revolution, master's thesis in physics, Alma Mater Studiorum— University of Bologna, advisor: Olivia Levrini, co-advisor: Sara Satanassi.



## Physics's warp and woof

“Physics has a warp and a woof, like a fabric stretched across many levels of abstraction and woven out two millenia long. Across the fabric is a pattern persistent over the entire length in which the levels tend to group themselves into three levels of increasing abstraction:

theories of **matter** and mechanics,

theories of **space and geometry**,

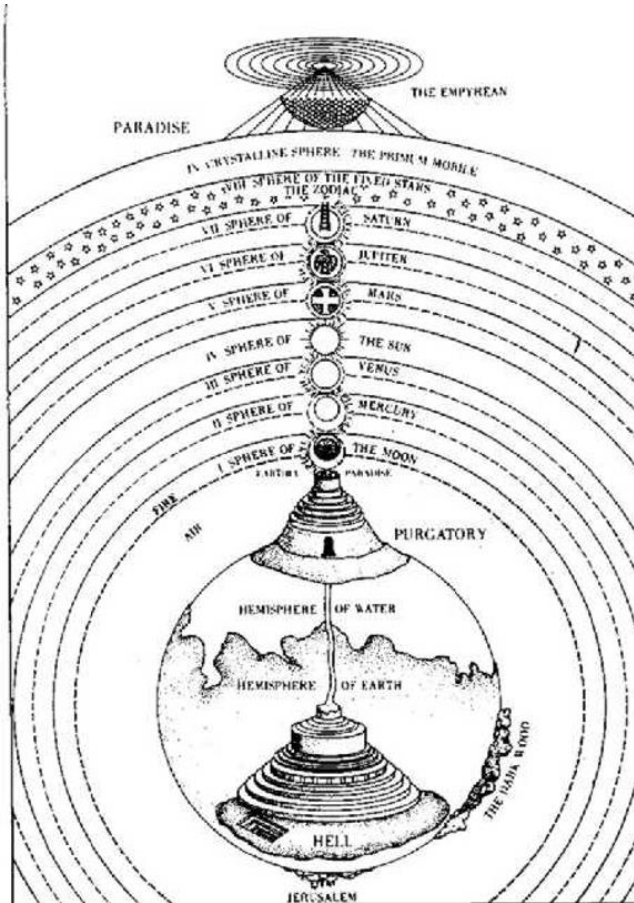
and theories of **logic.**”

(D. Finkelstein, MATTER, SPACE AND LOGIC, PROCEEDINGS OF THE BOSTON COLLOQUIUM)

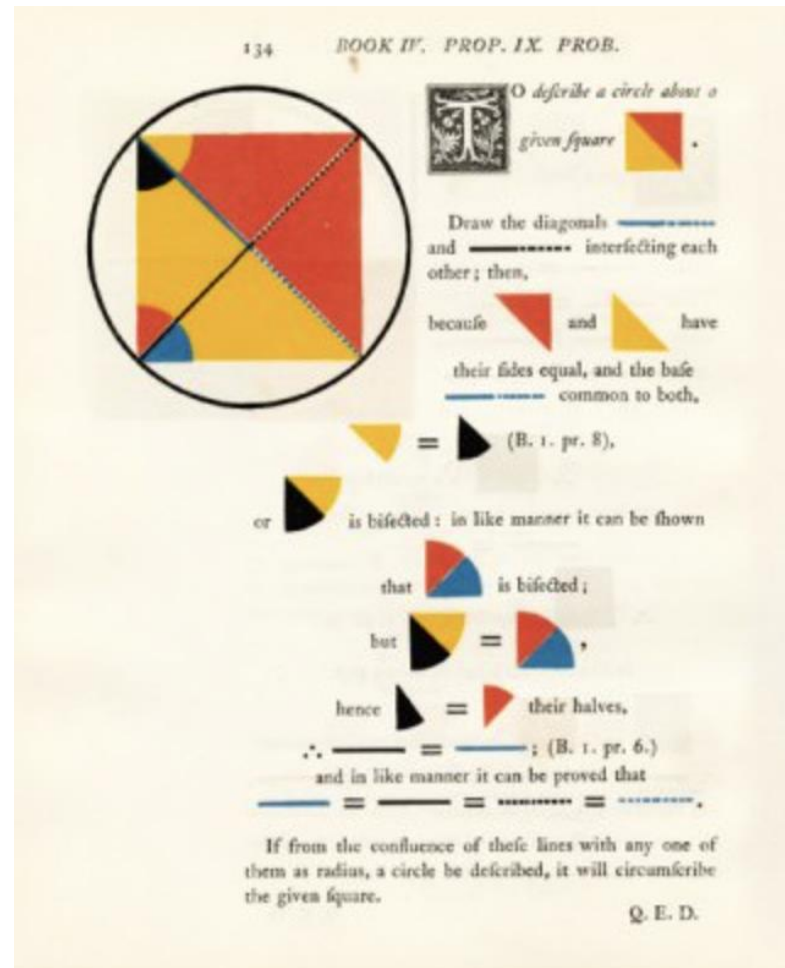




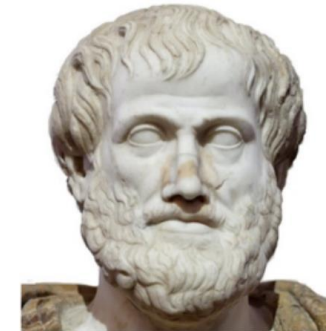
# Physics warp and woof



Ptolemaic mechanics



Euclidean geometry



Aristotle

## Classic Syllogism Example:

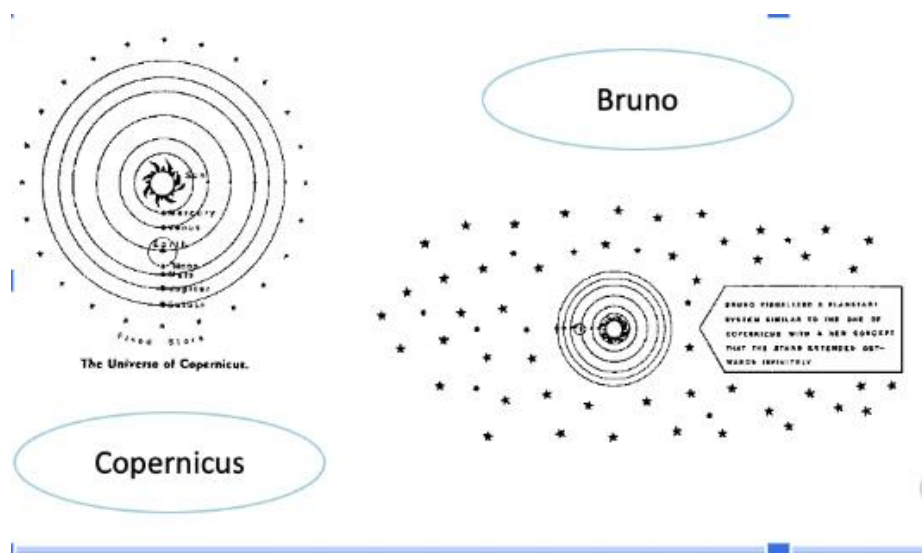
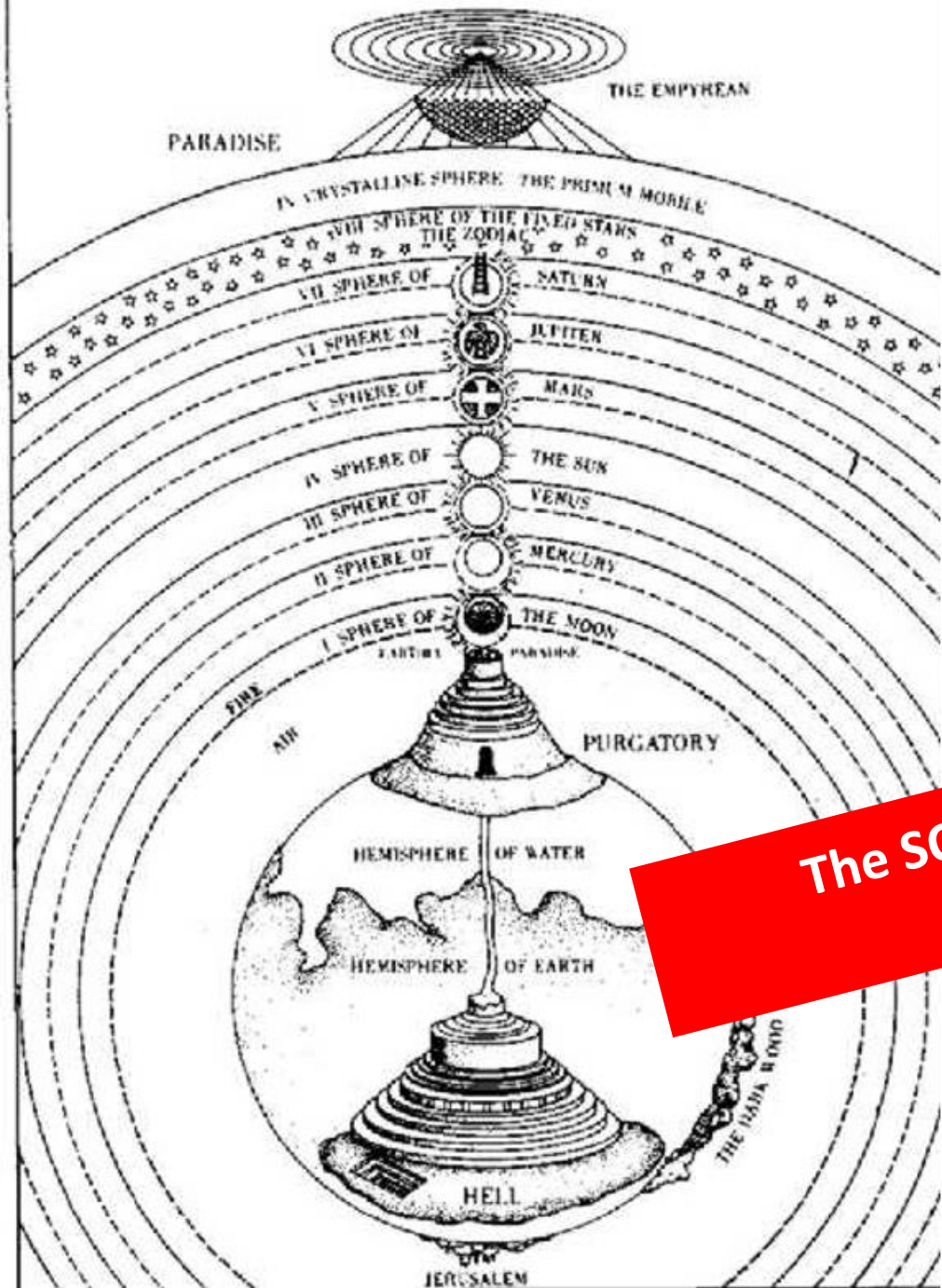
**P1:** All men (M) are mortal (P).

**P2:** Socrates (S) is a man (M).

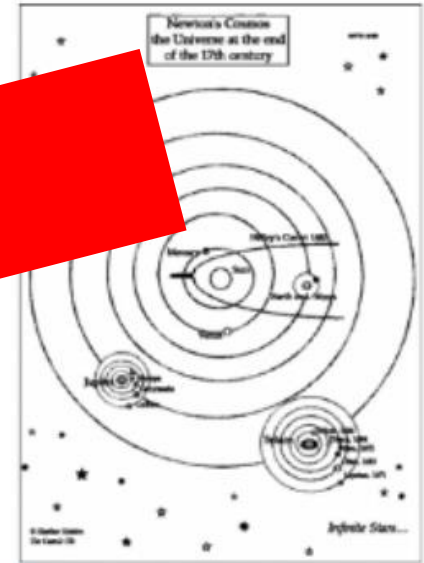
**P3:** Therefore, Socrates (S) is mortal (P).

Aristotelian logic





**The SCIENTIFIC REVOLUTION (XVI Century)!!!!**

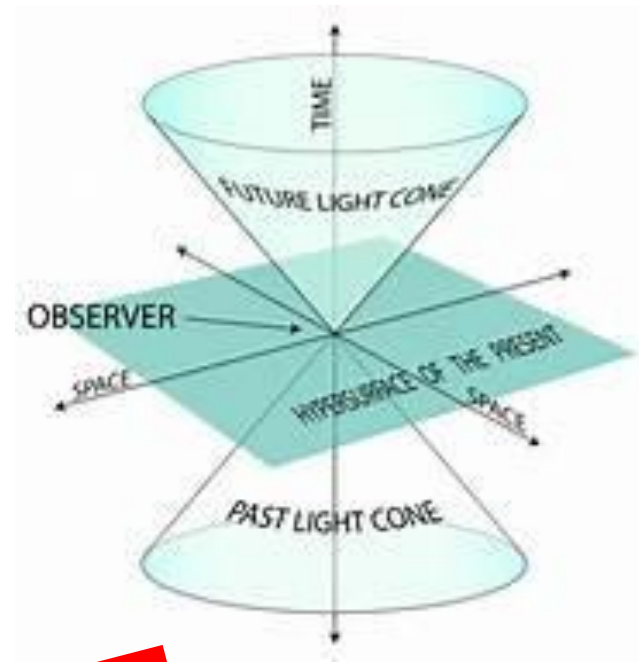
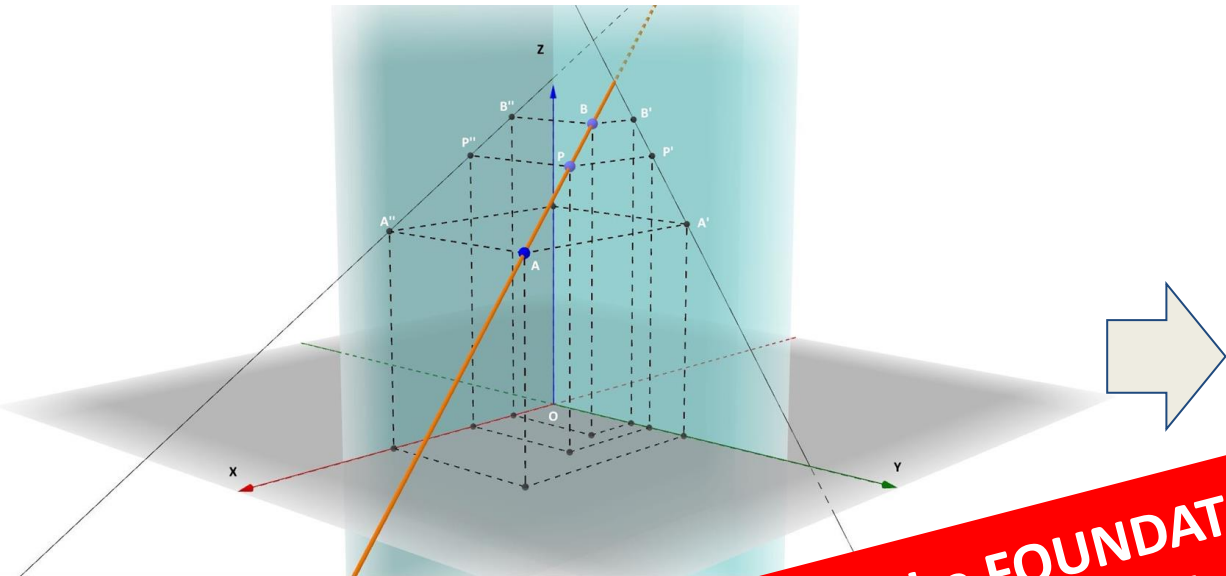


Kepler

Newton



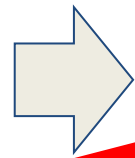
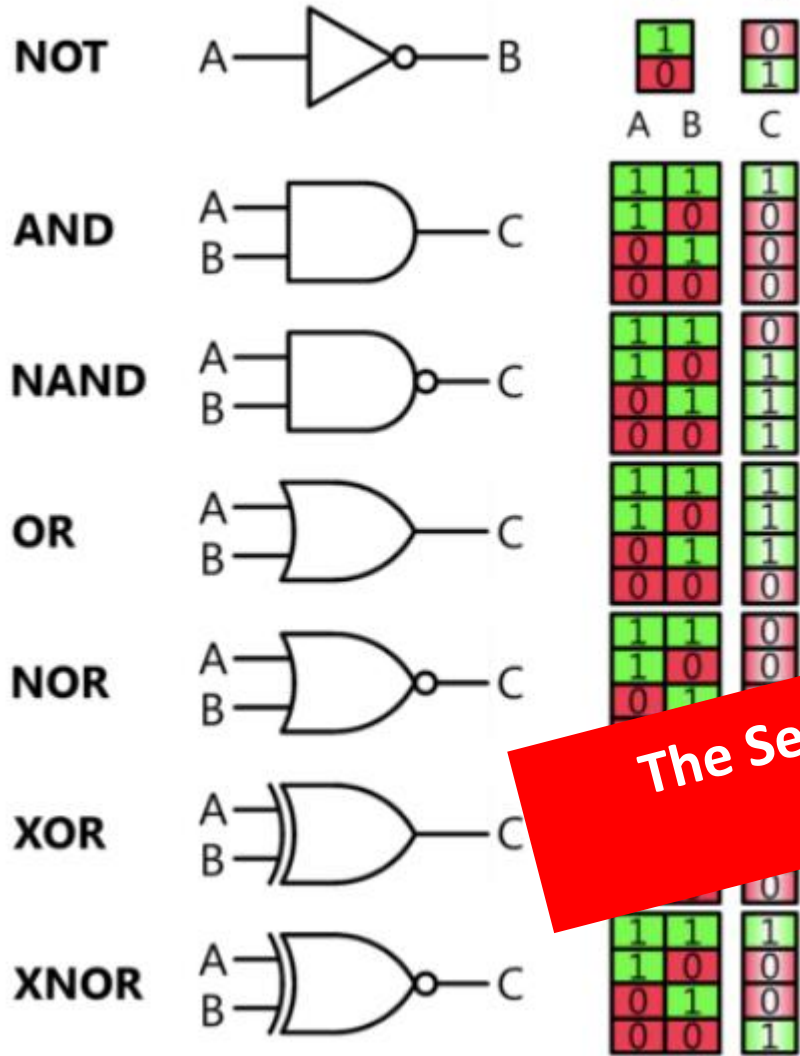




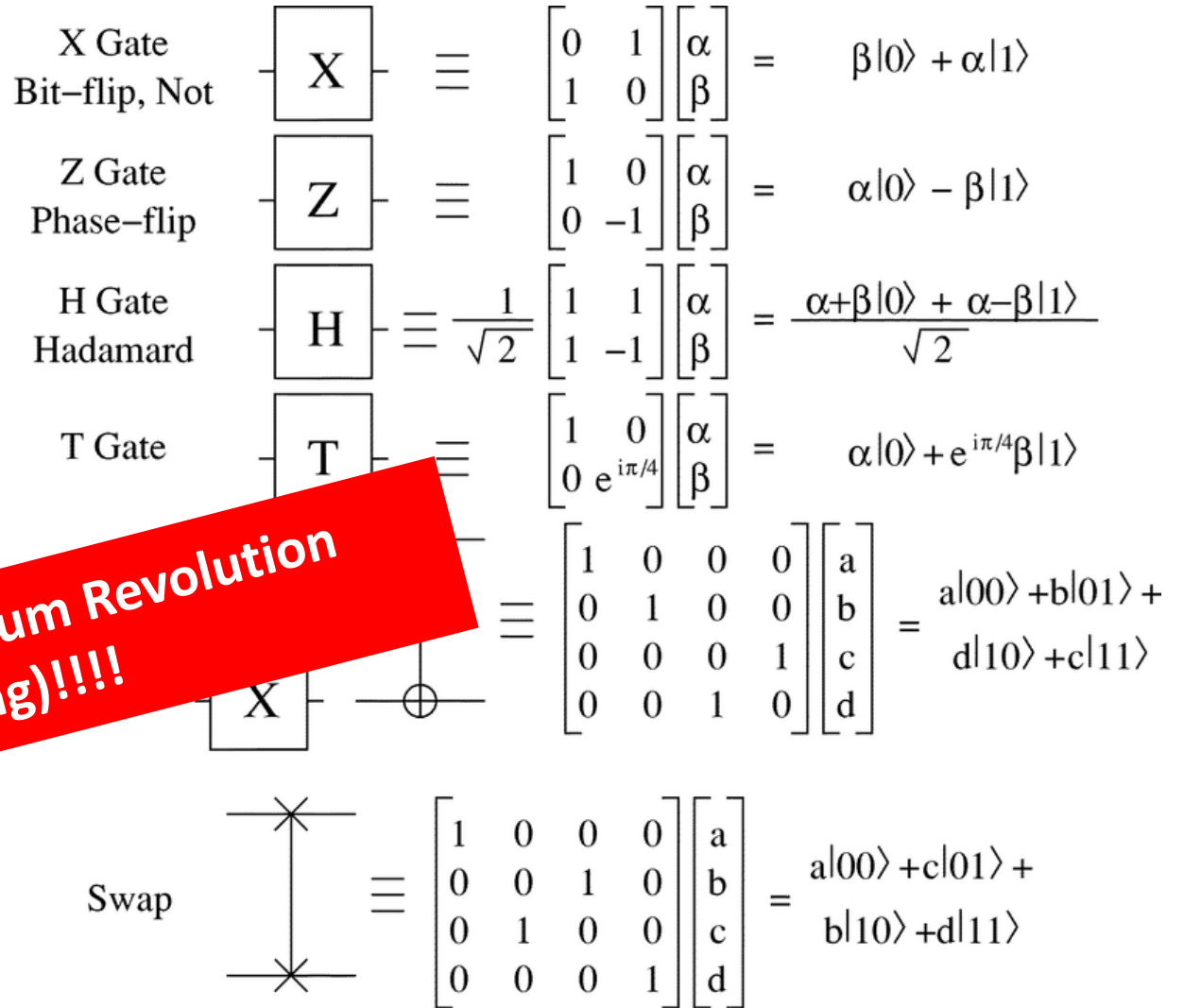
**The FOUNDATIONAL CRISIS  
(beginning of the XX Century)!!!!**



### Standard Logic Gates

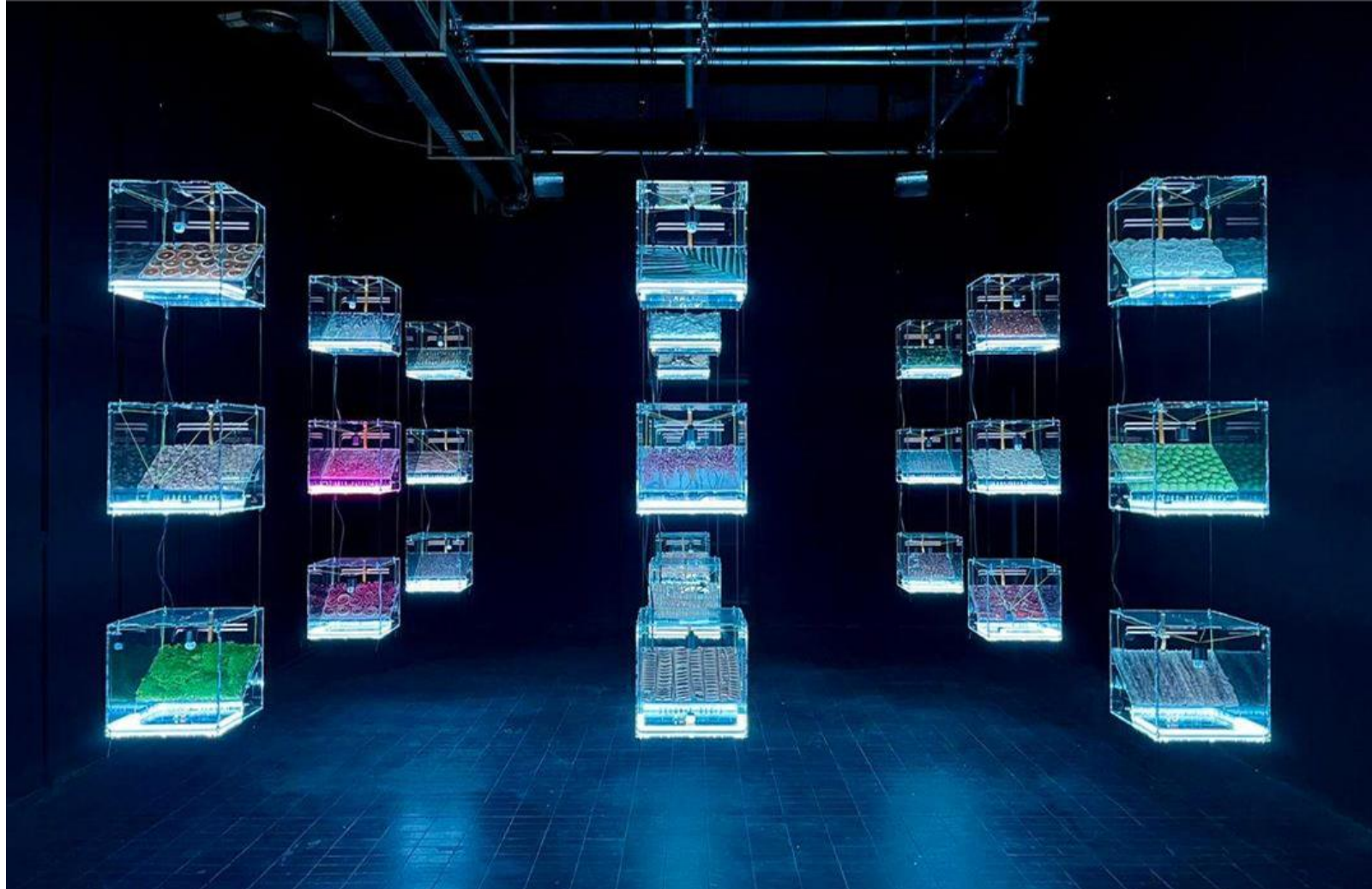


**The Second Quantum Revolution  
(on going)!!!!**





# We are still/again “suspended in language”



S+T+Arts

It is time to calculate  
but also to  
“think aloud and  
imagine, together,  
new possible futures”

<https://drive.google.com/drive/folders/1GpB5CW1F4SyZSvann2kBeDbkRlaVL5nN?usp=sharing>

**MATHIAS GARTNER, VERA TOLAZZI, The transparency of randomness -  
Galerija Kapelica, Ljubljana**



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

**Olivia Levrini**

Dipartimento di Fisica e Astronomia «A. Righi»

[olivia.levrini2@unibo.it](mailto:olivia.levrini2@unibo.it)

[www.unibo.it](http://www.unibo.it)