



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI  
DELL'INSUBRIA**

# **Luce e quantistica nel futuro della tecnologia**

**Prof.ssa Lucia Caspani**

**Dipartimento di Scienza e Alta Tecnologia**

**Università dell'Insubria - Como**

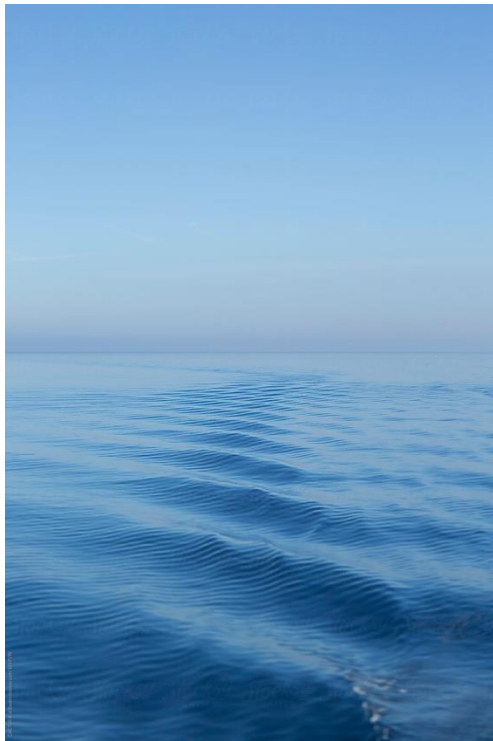
Le serate della Lake Como School of Advanced Studies

- Cos'è la luce
- Fisica quantistica: Due rivoluzioni, una scienza
- Applicazioni della seconda rivoluzione quantistica
  - Comunicazione
  - Calcolo
  - Misura
- Futuro?

# Cos'è la luce???

Tecnicamente: un'**onda** elettromagnetica... cosa vuol dire?

**Onda:** perturbazione che si muove nello spazio



Onde del mare



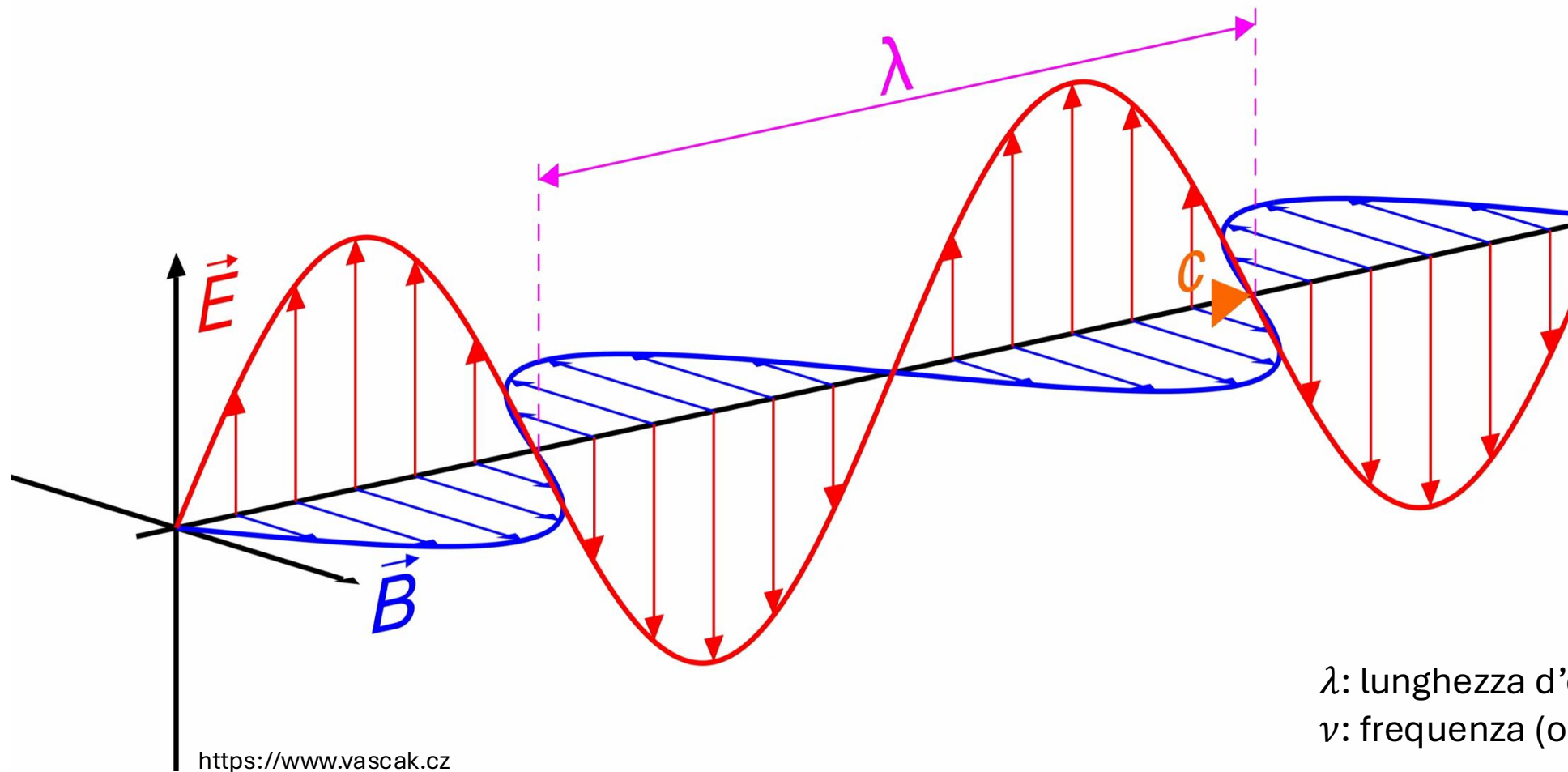
Onde sonore



Onde su una corda

Tecnicamente: un'onda **elettromagnetica**... cosa vuol dire?

**Elettromagnetica**: variazione del campo elettrico e del campo magnetico

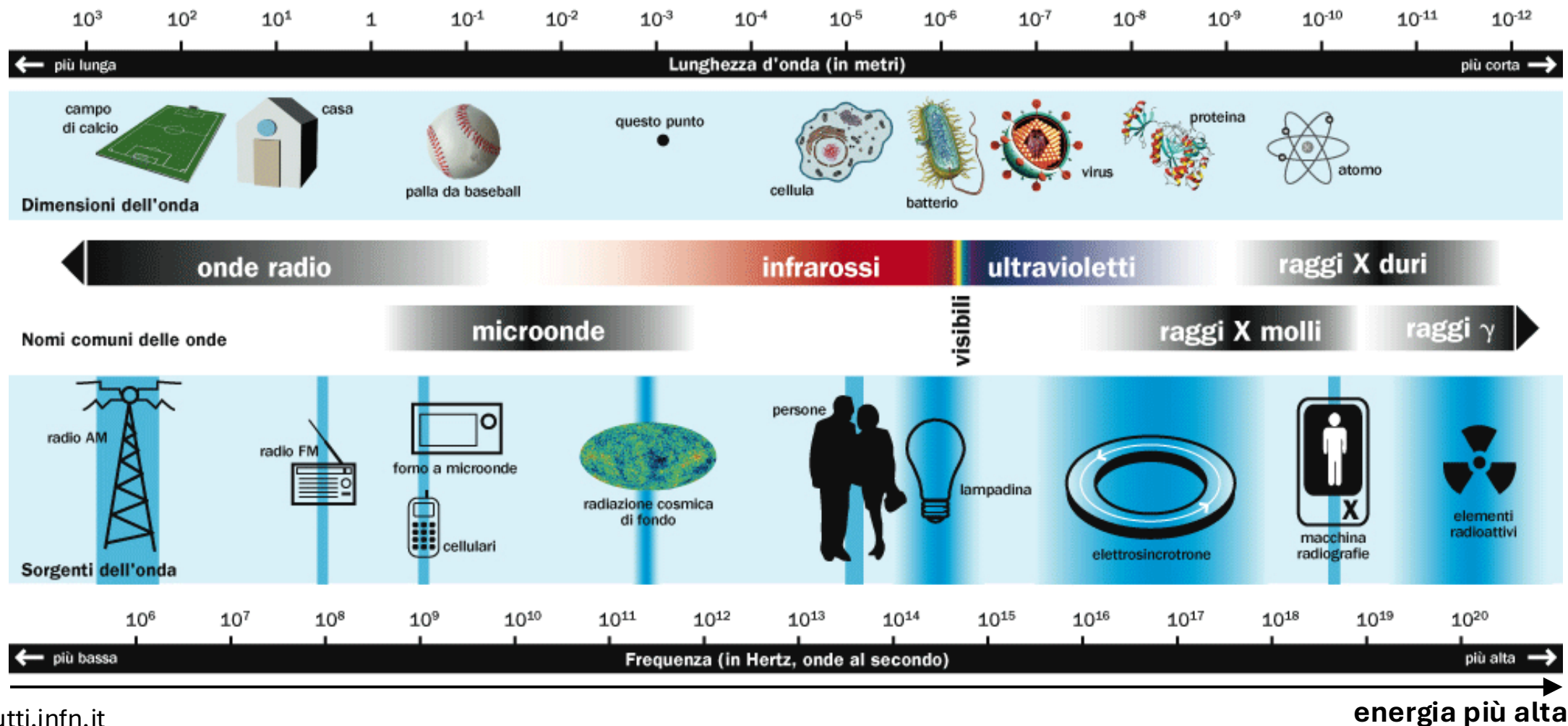


$\lambda$ : lunghezza d'onda  
 $\nu$ : frequenza (oscillazioni al secondo)

<https://www.vascak.cz>

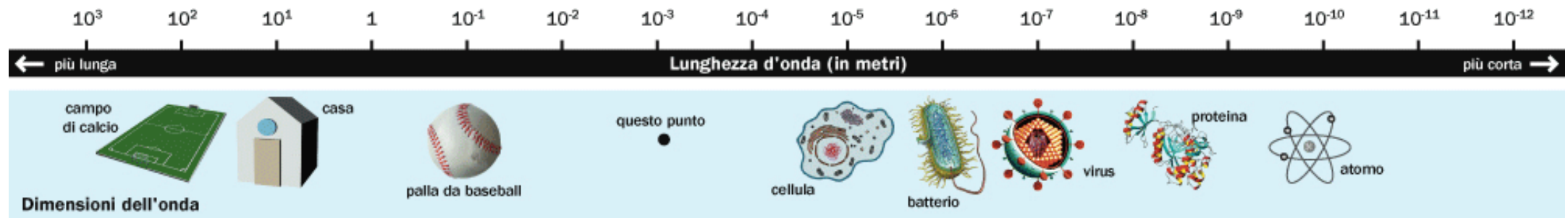
# Cos'è la luce?

Diversi tipi di onde elettromagnetiche – La luce è quella che il nostro occhio riesce a percepire: una piccolissima parte dello spettro elettromagnetico



# Cos'è la luce?

Diversi tipi di onde elettromagnetiche – La luce è quella che il nostro occhio riesce a percepire: una piccolissima parte dello spettro elettromagnetico



Colore	Lunghezza d'onda (nm)
Violetto	380 – 435
Blu	435 – 500
Ciano	500 – 520
Verde	520 – 565
Giallo	565 – 590
Arancione	590 – 625
Rosso	624 – 740



Onde elettromagnetiche previste e formalizzate dalle **equazioni di Maxwell (1864)**  
**Basil Mahon, "The Man Who Changed Everything: The Life of James Clerk Maxwell", John Wiley & Sons Inc, 2004**

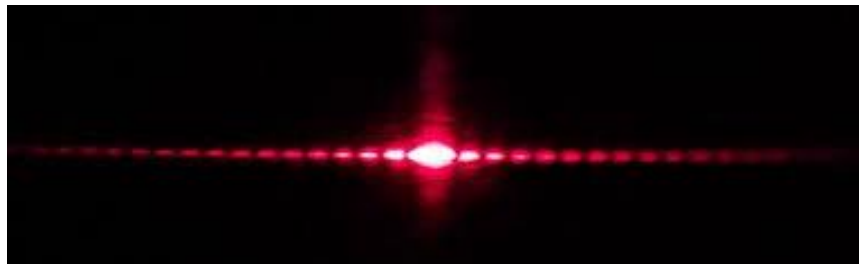
# Luce/Onde elettromagnetiche

- Teoria di Maxwell spiega i fenomeni conosciuti su luce e onde elettromagnetiche

Polarizzazione

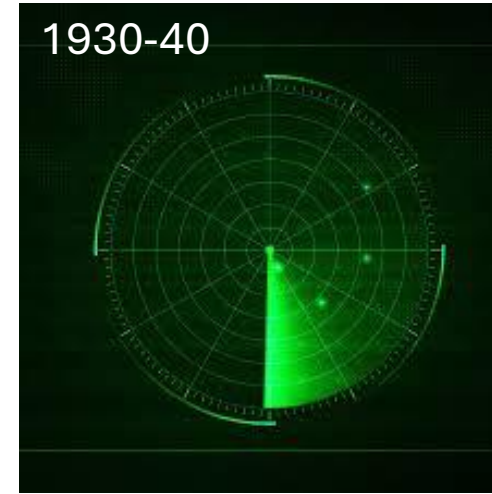
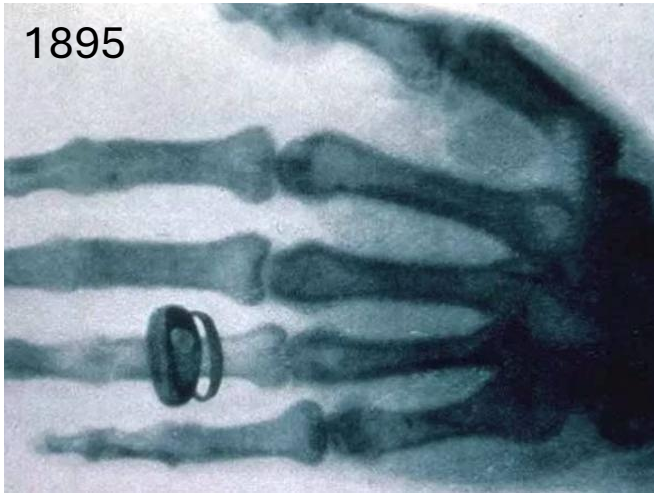


Interferenza



# Luce/Onde elettromagnetiche

- Tecnologie basate/spiegabili con teoria di Maxwell

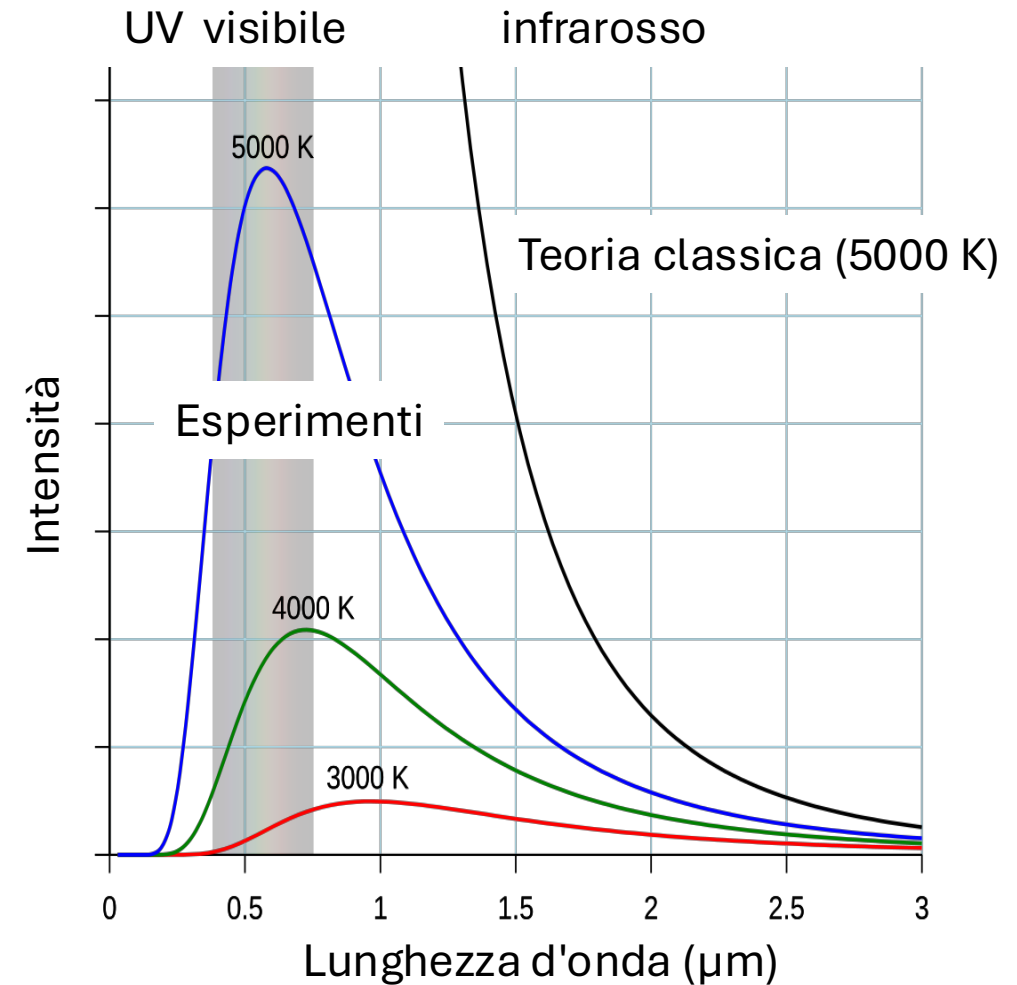


# Fine '800: crisi della fisica classica

- La teoria di Maxwell spiega moltissimo, ma...
- Alcuni fenomeni osservati sperimentalmente rimanevano misteriosi:
  - Radiazione di corpo nero (1890-1900)
  - Effetto fotoelettrico (1887-1902)
  - Spettri atomici discreti (1880-890)

# Radiazione di corpo nero

- Emissione di corpo nero (oggetti molto caldi emettono luce): il colore dell'emissione dipende dalla temperatura



# La nascita della fisica quantistica

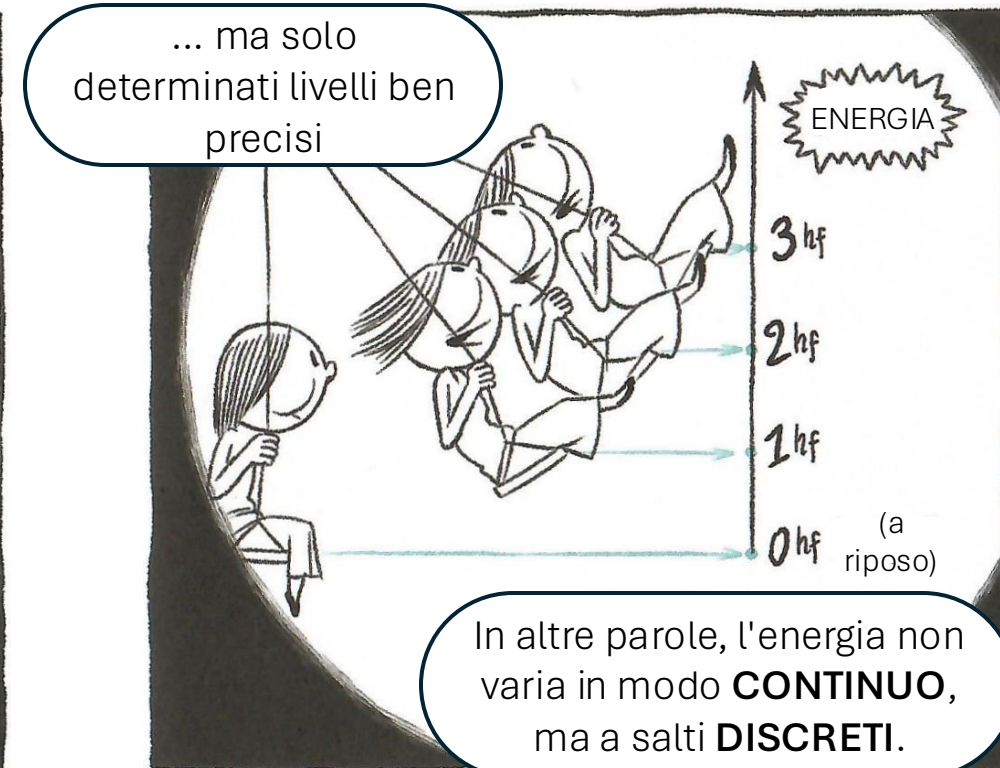
- Max Planck (1900) introduce il concetto di **quanto di energia**.

L'energia esiste solo in "pacchetti discreti" (molto molto piccoli):

$$E = hf, 2hf, 3hf, 4hf, \dots$$

$$h = \underbrace{0,000 \dots 00066}_{33 \text{ zeri}} \text{ Js: costante di Planck}$$

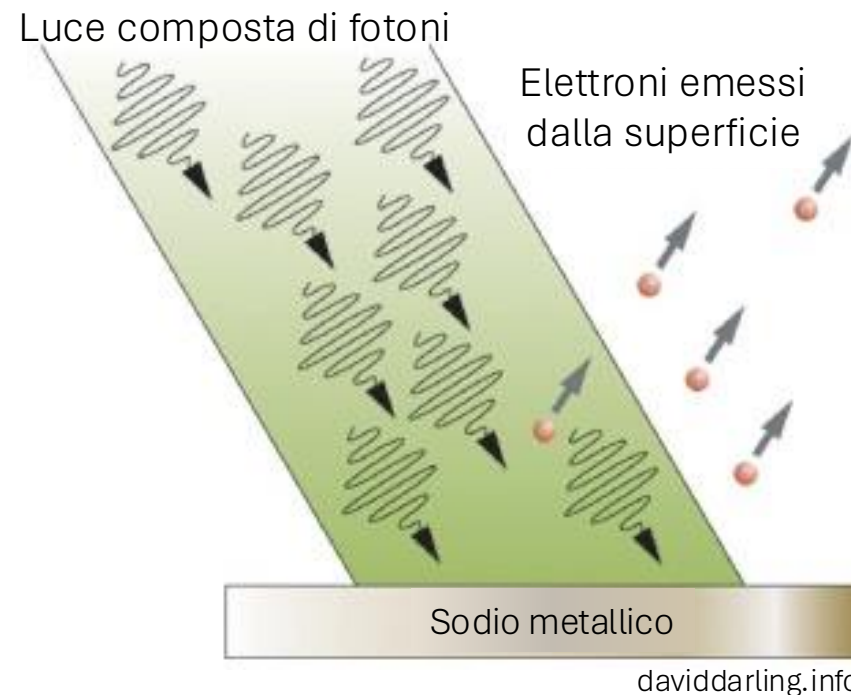
- Premio Nobel per la Fisica 1921



Adattato da: Thibault Damour, Mathieu Burniat, *Le Mystère du monde quantique*, Ed. Dargaud

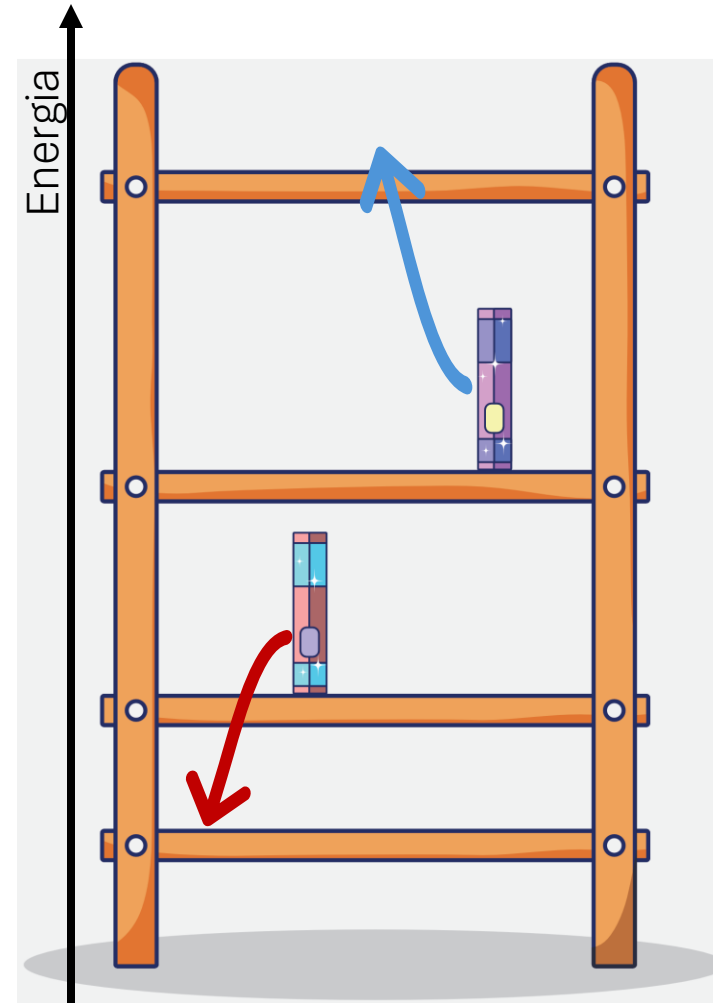
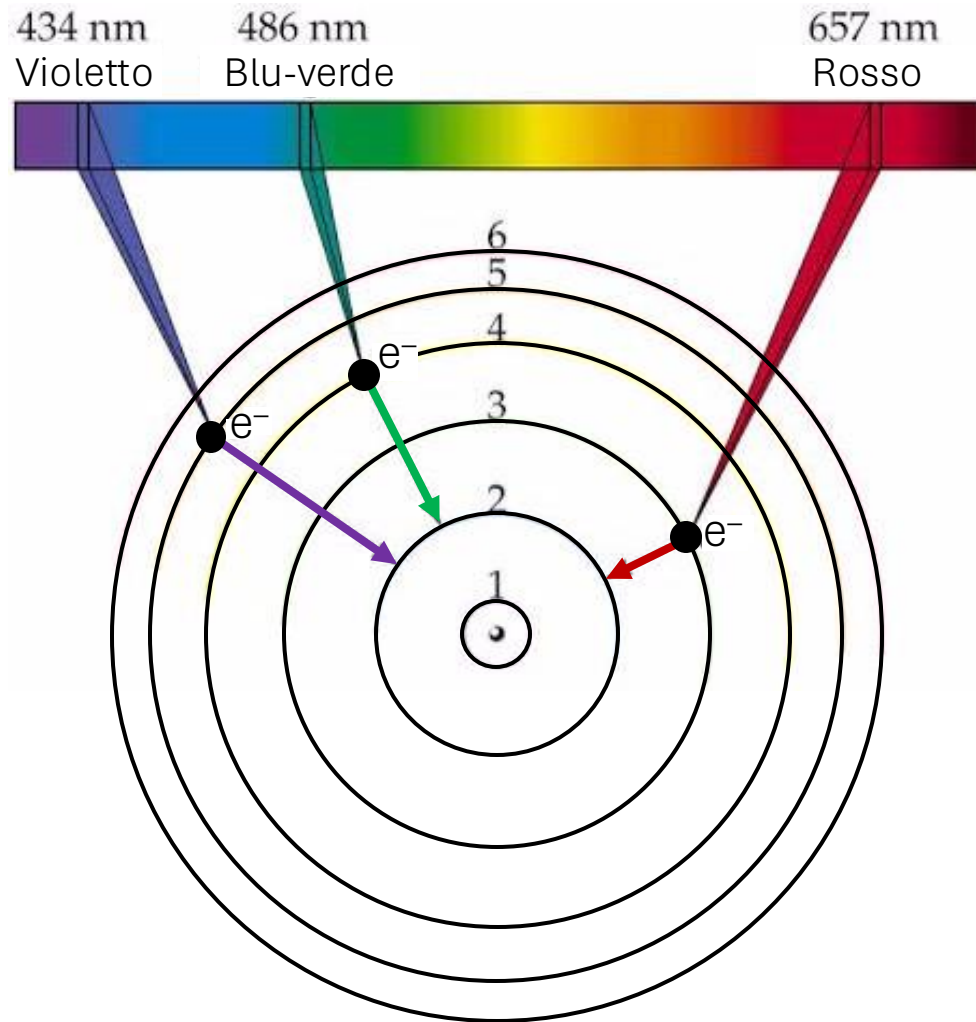
# Einstein fa un passo in più - 1905

- Non solo gli oscillatori che creano la radiazione degli oggetti hanno energia discreta (Planck)
- Einstein: la luce stessa (onde elettromagnetiche) è composta di "pacchetti" di energia  $E = hf$  – i **fotoni**
- Spiegazione effetto fotoelettrico: Premio Nobel per la Fisica 1921



# Modello atomico di Bohr - 1913

- Orbite elettroniche intorno al nucleo quantizzate



# I primi passi della fisica quantistica

<b>Quando</b>	1900	1905	1913	1923
<b>Chi</b>	Max Planck	Albert Einstein	Niels Bohr	Louis De Broglie
<b>Cosa</b>	Spettro corpo nero	Effetto fotoelettrico	Modello atomico	Dualismo onda-particella
<b>Nuovo concetto</b>	Energia quantizzata	Luce composta da fotoni	Orbite atomiche quantizzate	Materia come onde

**La prima  
rivoluzione  
quantistica**



# Il consolidamento della fisica quantistica

- **Wolfgang Pauli: principio di esclusione (1925)**  
Due elettroni non possono occupare lo stesso stato: spiega la struttura degli atomi
- **Erwin Schrödinger: equazione di Schrödinger (1926)**  
Descrive come evolve nel tempo lo stato quantistico di un sistema
- **Max Born: interpretazione probabilistica (1926)**  
La funzione d'onda non descrive certezze, ma probabilità
- **Werner Heisenberg: principio di indeterminazione (1927)**  
Non tutte le grandezze fisiche possono essere misurate contemporaneamente con precisione arbitraria
- **Paul Dirac: equazione di Dirac (1928)**  
Unifica quantistica e relatività (ristretta), e predice l'antimateria

Simone Baroni, "La meccanica quantistica: Volume I: la prima rivoluzione quantistica", 2024

Giuseppe Mussardo, "Dio gioca a dadi con il mondo. La storia della meccanica quantistica", Castelvecchi, 2025

# Tecnologie "figlie" della prima rivoluzione quantistica



**Risonanza Magnetica Nucleare, 1946**  
(Spin 1925)

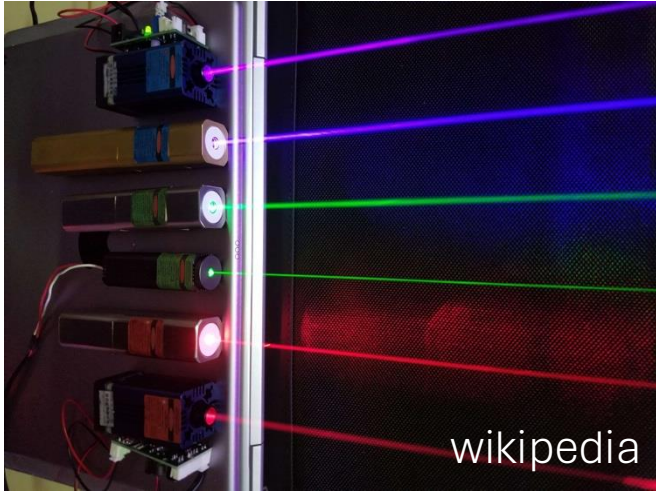


**Transistor 1947**  
Comportamento quantistico degli elettroni nei solidi (1928)  
*Electronica moderna (computer...)*



**Orologio atomico 1955**  
(Quantizzazione livelli energetici 1913)  
**GPS**

# Tecnologie "figlie" della prima rivoluzione quantistica



## **Laser 1960**

(Emissione stimolata 1917)

*Comunicazioni*

*Chirurgia*

*LiDAR*

*Microlavorazione*



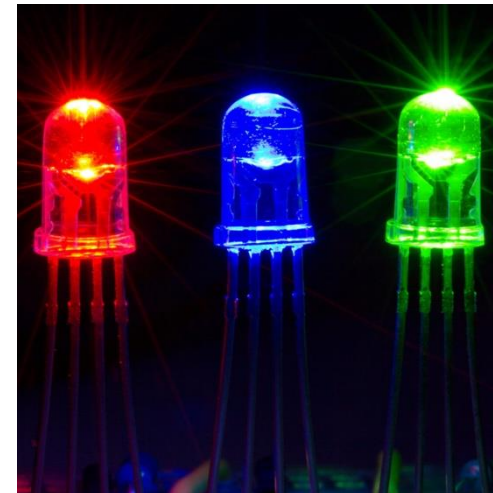
## **CCD 1969**

(Effetto fotoelettrico 1905)



## **Celle fotovoltaiche 1954**

(Effetto fotoelettrico 1905)



## **LED 1962**

Comportamento  
quantistico degli  
elettroni nei solidi  
(1928)

*Illuminazione*

*Display*

*Fototerapia*

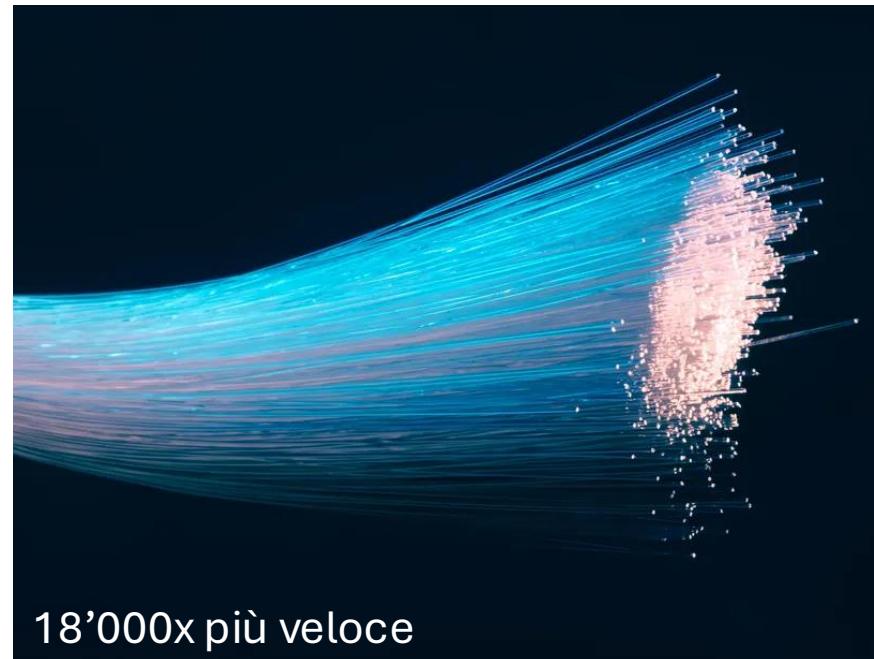
# Luce e tecnologia: la base della comunicazione moderna



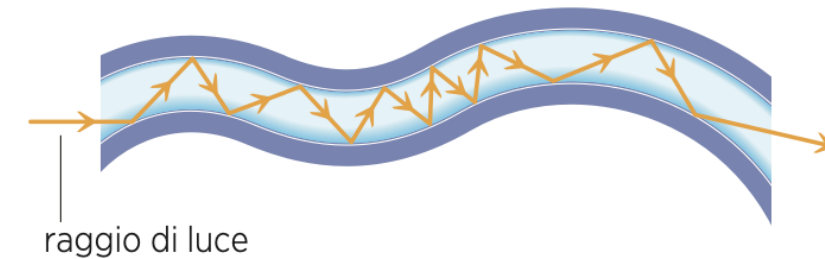
Trasmissione di impulsi elettrici  
Internet: **56 kbps**  
(kilobyte al secondo)

Fibra ottica: utilizza segnali **laser** per trasmettere dati ad alta velocità (la modulazione del segnale ottico è molto più veloce di quello elettronico).

Internet: **1 Gbps**  
(gigabyte al secondo = 1'000'000 kbps)



18'000x più veloce



Kao 1957 (Premio Nobel Fisica 2009)  
Produzione industriale Corning anni '70

NETFLIX

YouTube

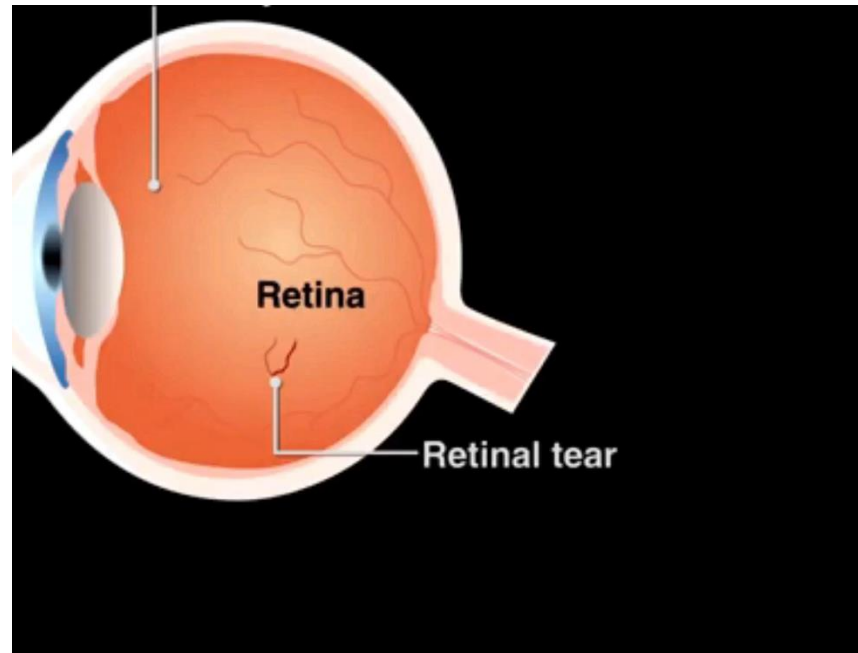
prime  
video

TikTok

...

# Luce e tecnologia: medicina e salute

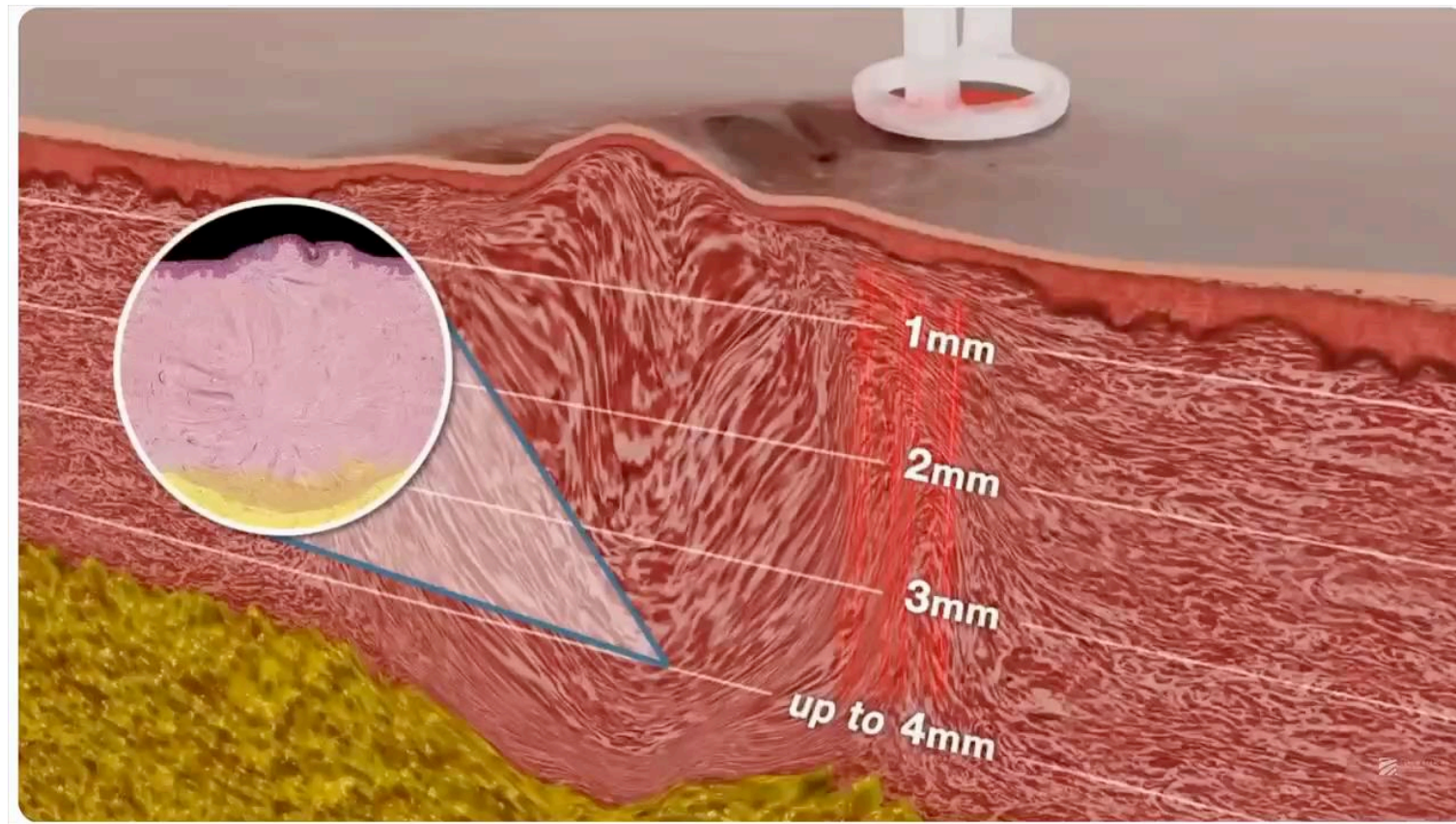
- Chirurgia laser per operazioni precise e minimamente invasive
- Localizzazione dell'energia in un'area molto piccola (1-10 micron, a seconda della lunghezza d'onda – spessore di un bisturi ~400 micron)
- Deposito energia → taglio tramite combustione e cauterizzazione automatica
- Esempio: chirurgia laser per rottura/degenerazione della retina



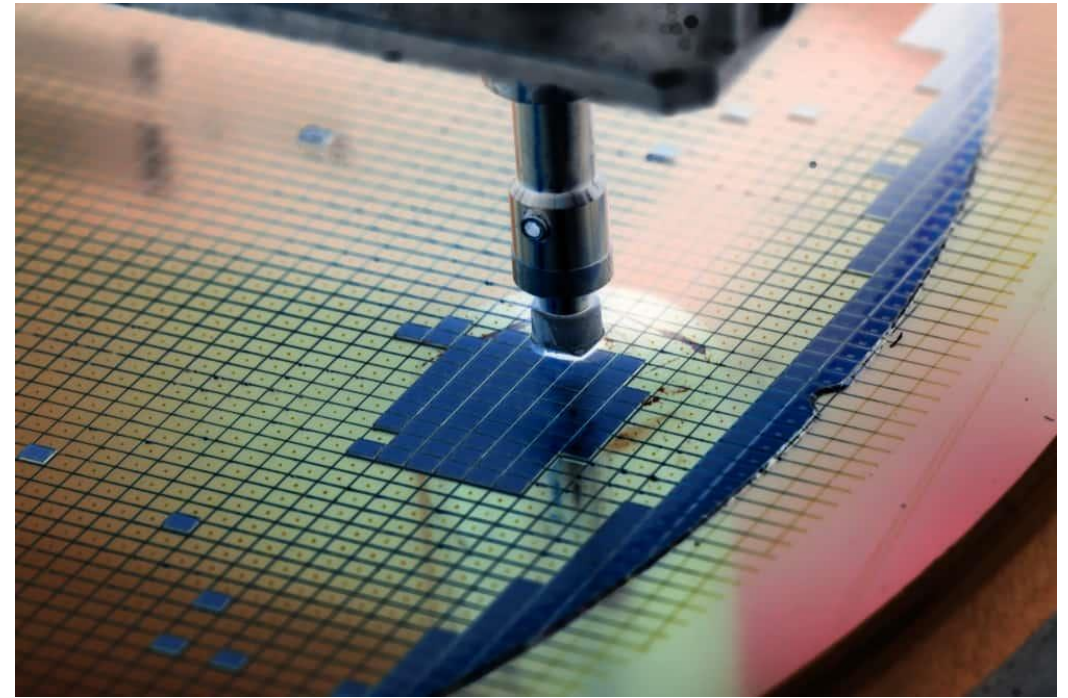
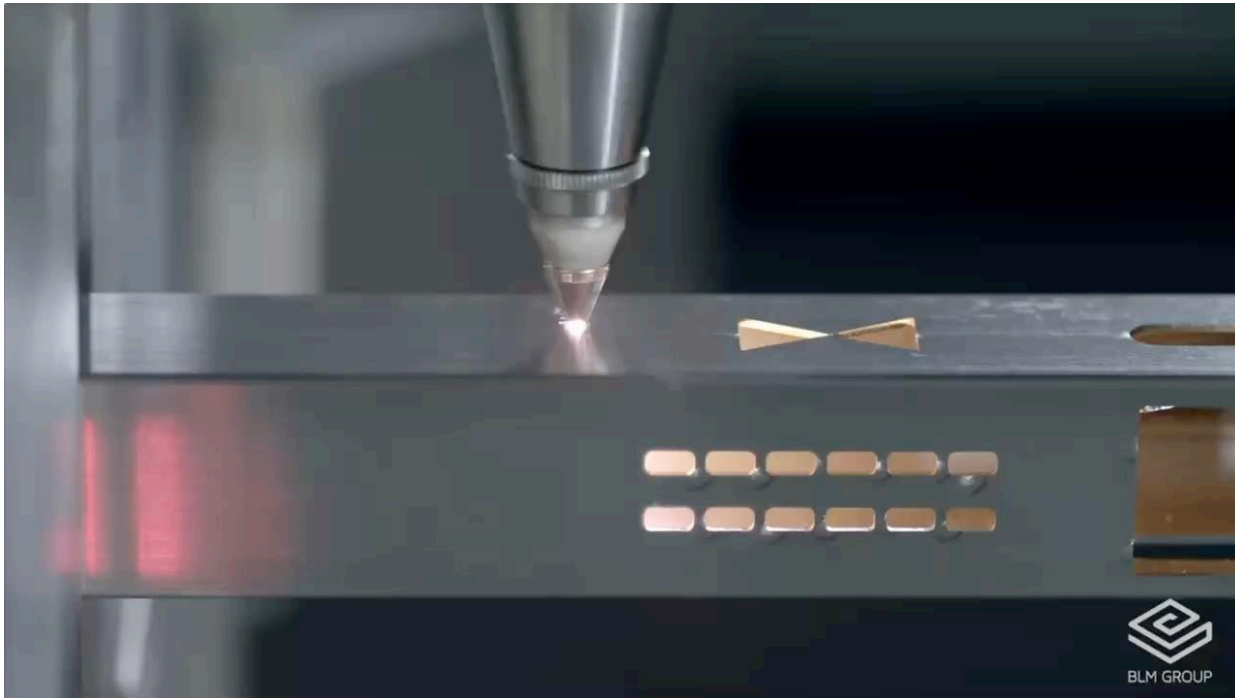
\*1 micron=1 millesimo di millimetro

# Luce e tecnologia: medicina e salute

- Correzione della vista con la chirurgia LASIK (ablazione della cornea modificandone la curvatura per correggere il difetto visivo)
- Trattamenti dermatologici (rimozione tatuaggi, cicatrici, peli)



- Taglio e saldatura laser di precisione nei metalli e plastica
- Marcatura e incisione su vari materiali
- Fotolitografia per circuiti elettronici (transistor da 3 nm): produzione di maschere litografiche per incisione di circuiti su wafer di silicio (Apple, Samsung, Intel) \*1 nm=1 milionesimo di millimetro (3'000 volte più piccolo del filo di una ragnatela)



# La seconda rivoluzione quantistica

*“The first quantum revolution taught us how nature works; **the second is teaching us how to make nature do what we want.**”*

*“La prima rivoluzione quantistica ci ha insegnato come funziona la natura; **la seconda ci sta insegnando come far fare alla natura ciò che vogliamo.**”*

John Preskill, Caltech

*“The first quantum revolution gave us technologies based on quantum principles; **the second gives us technologies based on quantum control.**”*

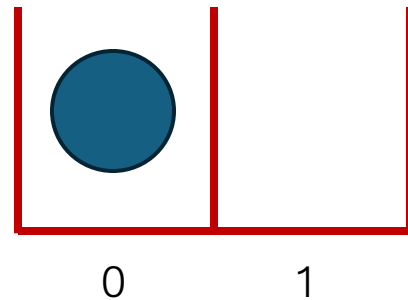
*“La prima rivoluzione quantistica ci ha dato tecnologie basate sui principi quantistici; **la seconda ci offre tecnologie basate sul controllo quantistico.**”*

Adattamento da Quantum Manifesto (EU, 2016) National Quantum Initiative Act (USA, 2018)

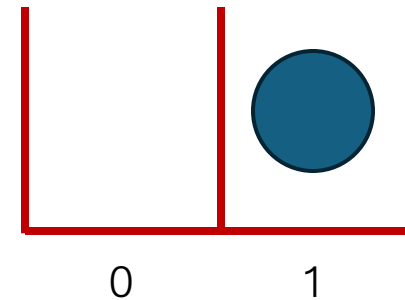
# Oltre l'energia quantizzata: il cuore della quantistica

## *Principio di sovrapposizione*

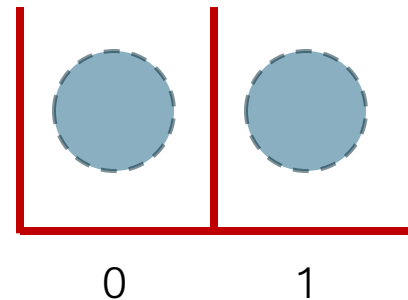
**Classicamente:**



oppure

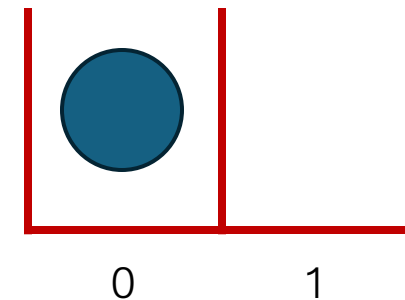


**Quantisticamente:**

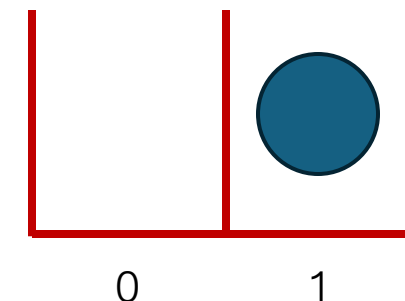


**Entrambi i valori  
contemporaneamente!**

**MISURA**



oppure



# Oltre l'energia quantizzata: il cuore della quantistica

## ***Principio di sovrapposizione***

**Bit classico:**  $|0\rangle$  oppure  $|1\rangle$  – Esempio: transistor (interruttore) spento/acceso

**Bit quantistico, qubit:** sia  $|0\rangle$  che  $|1\rangle$ :  $|0\rangle + |1\rangle$  – Esempio: spin di un elettrone positivo/negativo

- Come si realizza un qubit nella realtà? Bisogna manipolare un singolo elemento (elettrone, fotone, ione, etc.)
  - Corrente in un circuito superconduttivo
  - Livelli energetici in un singolo ione (intrappolato)
  - Polarizzazione di un fotone
  - ...

# Oltre l'energia quantizzata: il cuore della quantistica

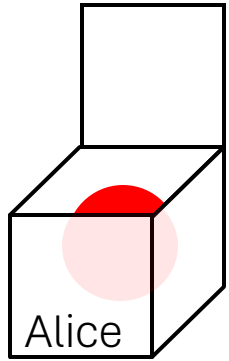
**Entanglement o correlazione quantistica:** lo stato di due qubits (A e B) può essere descritto solo globalmente

$$\textit{stato separabile} = |0\rangle_A \otimes (|0\rangle_B + |1\rangle_B) = |0\rangle_A|0\rangle_B + |0\rangle_A|1\rangle_B$$

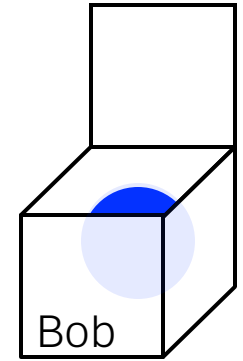
$$\textit{stato entangled} = |1\rangle_A|0\rangle_B + |0\rangle_A|1\rangle_B$$

# Correlazione classica o quantistica?

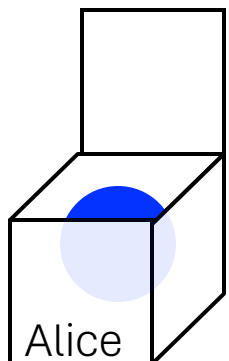
- Correlazioni a distanza: 2 palline, una rossa e una blu chiuse ognuna in una scatola ai due estremi dell'universo (Alice e Bob). Ci sono due possibilità. Caso 1: Alice ha la pallina rossa  $\rightarrow$  Bob avrà quella blu



**Misura: apro la scatola,  
rivelo se caso 1 o caso 2**

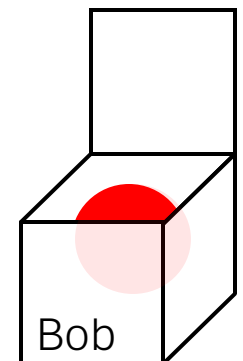


Oppure, caso 2: Alice ha la pallina blu  $\rightarrow$  Bob avrà quella rossa



**Correlazione classica:**

- Colore palline già assegnato
- Ignoranza mia
- La misura rivela il risultato già fissato



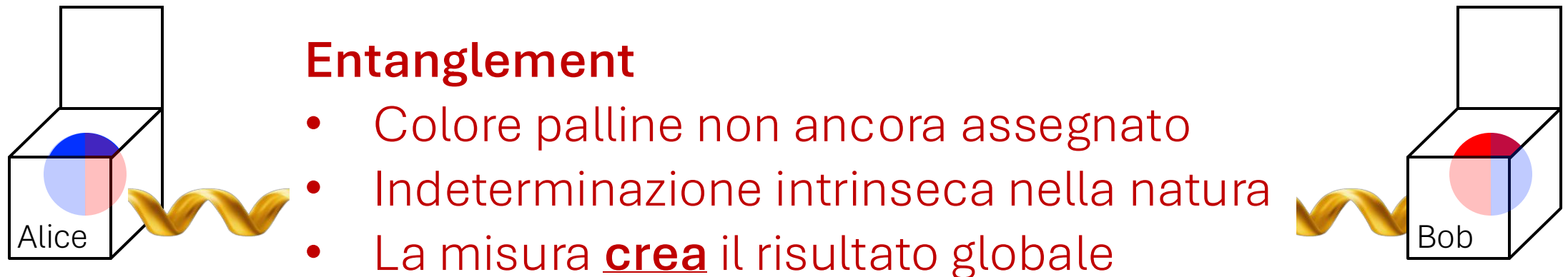
# Correlazione classica o quantistica?

- Entanglement: La pallina può essere sia rossa che blu, il colore non è determinato prima della misura (apertura scatola).

Caso 1: Alice misura rosso → Bob misurerà blu



- Caso 2:



## Entanglement

- Colore palline non ancora assegnato
- Indeterminazione intrinseca nella natura
- La misura **crea** il risultato globale

# Correlazione classica o quantistica?

- Quale interpretazione? Bell (1964): ideò un esperimento che può discriminare tra le due
- Anni '70-'80: Verificato che l'interpretazione dell'entanglement è quella corretta



NOBELPRISET I FYSIK 2022  
THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2022

KUNGL. VETENSKAPS-  
AKADEMIEN  
THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

  
Alain Aspect

  
John F. Clauser

  
Anton Zeilinger

*"per esperimenti con fotoni entangled, stabilendo la violazione delle disuguaglianze di Bell e aprendo la strada alla scienza dell'informazione quantistica"*

*"for experiments with entangled photons, establishing the violation of Bell inequalities and pioneering quantum information science"*

#nobelprize

THE NOBEL PRIZE

*“Nature isn't classical, dammit, and if you want to make a simulation of nature, you'd better make it quantum mechanical, and by golly it's a wonderful problem, because it doesn't look so easy!”*

*“La natura non è classica, accidenti, e se vuoi fare una simulazione della natura, allora è meglio che tu la faccia quantistica, e perbacco è davvero un problema meraviglioso, perché non sembra affatto facile!”*

Richard Feynman, International Journal of Theoretical Physics vol 21, 467 (1982)

- Per simulare un sistema quantistico serve un computer quantistico
- Ma un computer quantistico può anche essere usato per risolvere problemi normali, ma molto più velocemente

# Il computer quantistico

- **Sovrapposizione** ed **Entanglement**: i due ingredienti del calcolo quantistico
- I qubits entangled permettono di esplorare tante possibilità in parallelo, velocizzando il calcolo

***La sovrapposizione esplora. L'entanglement calcola.***

Giuliano Benenti, Giulio Casati, Simone Montangero, "*Il computer impossibile - Come il calcolatore quantistico cambierà il mondo*", Cortina Editore, 2025.

# Esiste il computer quantistico? Sì (e no)

- Sì, ma ancora non "utile"
- Esempi di "vantaggio quantistico":

Confronto con iPhone 15 8GB RAM  
~10 miliardi di bit classici ( $10^{10}$  bit)

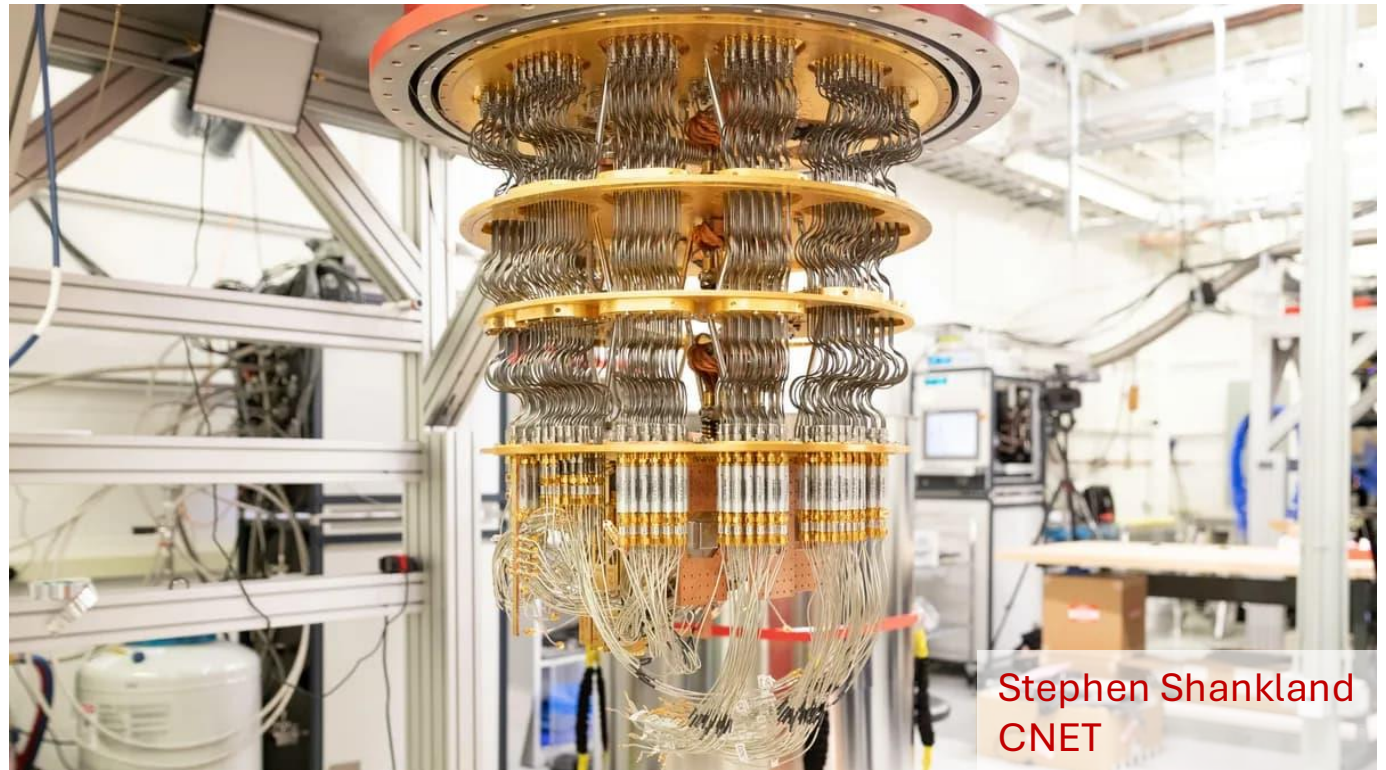
## **Sycamore ("il lampadario"), 2019, Google, 53 qubit superconduttivi**

Campionamento casuale – Completato in 200s contro 10'000 anni\* su super-computer classico

Controllo tramite impulsi di microonde

Temperatura: 15mK ( $0.015^{\circ}\text{C}$  sopra lo zero assoluto, 180 volte più freddo dello spazio profondo)

\*poi ridotti a 2-2.5 giorni da IBM e a 17 secondi da ricercatori cinesi



Stephen Shankland  
CNET

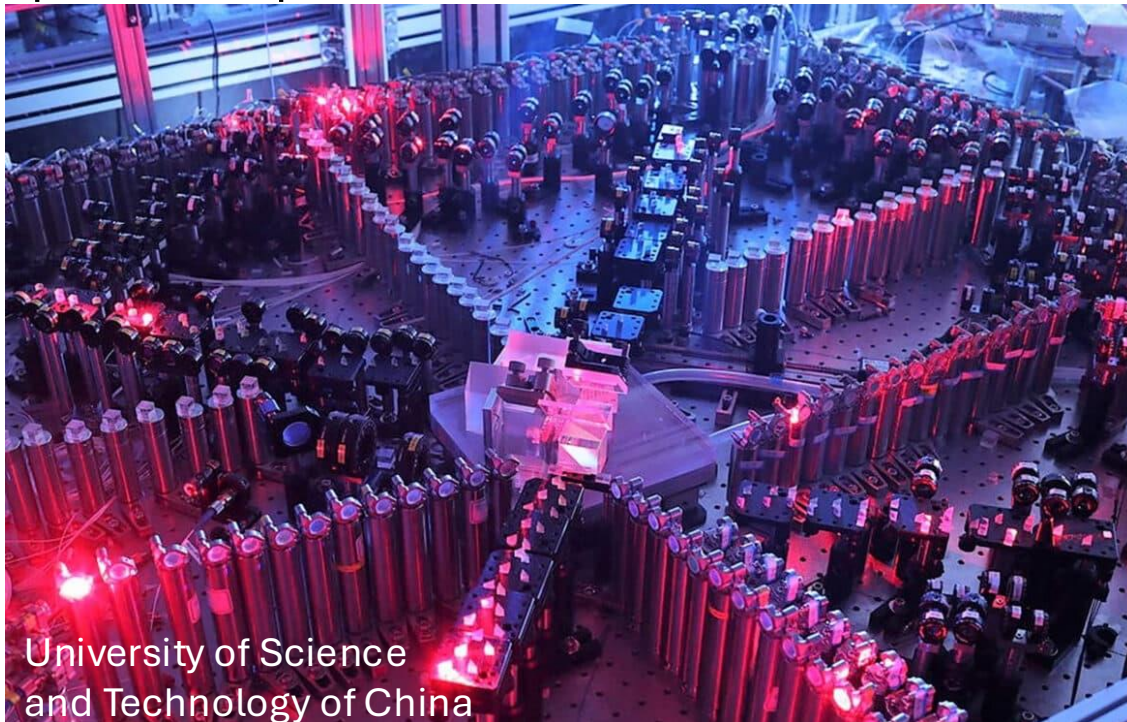
# Esiste il computer quantistico? Sì (e no)

- Sì, ma ancora non "utile"
- Esempi di "vantaggio quantistico":

Confronto con iPhone 15 8GB RAM  
~10 miliardi di bit classici ( $10^{10}$  bit)

## **Jiuzhang 1.0, 2020, China, 76 qubit fotonici**

Gaussian boson sampling – Completato in 200s contro 2.5 miliardi di anni su supercomputer classico



# Cosa farà un computer quantistico?



- Simulazione di molecole e materiali complessi
  - Prevedere reazioni chimiche senza esperimenti costosi
  - Progettare nuovi farmaci simulando interazioni molecolari
  - Scoprire catalizzatori per reazioni industriali (es: per ridurre CO<sub>2</sub>)
  - Progettare nuovi materiali, batterie o superconduttori



- Ottimizzazione combinatoria
  - Logistica avanzata: reti di trasporto, gestione magazzini
  - Trading finanziario: ottimizzazione di portafogli
  - Progettazione industriale: layout di chip, reti elettriche, traffico

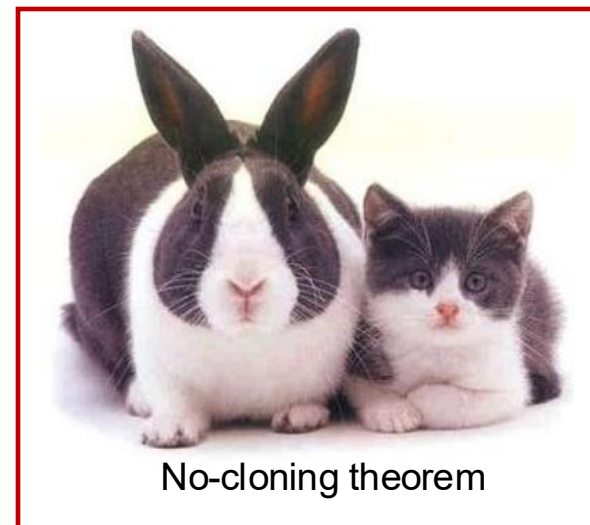
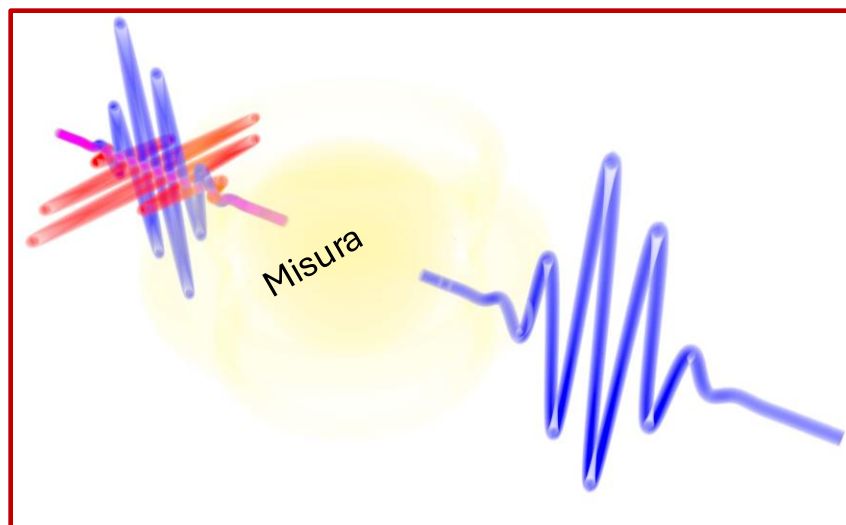


- Decifrare schemi crittografici classici

# Comunicazione quantistica: chiavi crittografiche sicure

- Codificare l'informazione nello stato quantistico di un fotone
- Se la comunicazione è intercettata (misura) me ne accorgo
- Non posso dividere un fotone (prelevare una parte del segnale)
- Non posso copiare lo stato di un sistema quantistico ("no cloning theorem")

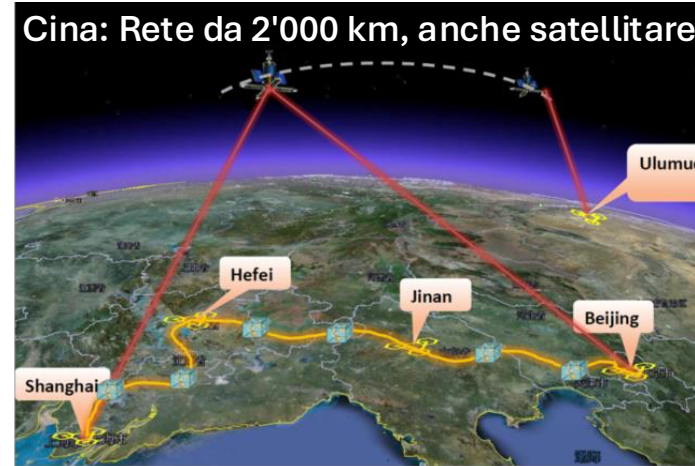
**SICUREZZA =**



# Esiste la comunicazione quantistica? Sì!



Sistema di crittografia quantistica commerciale



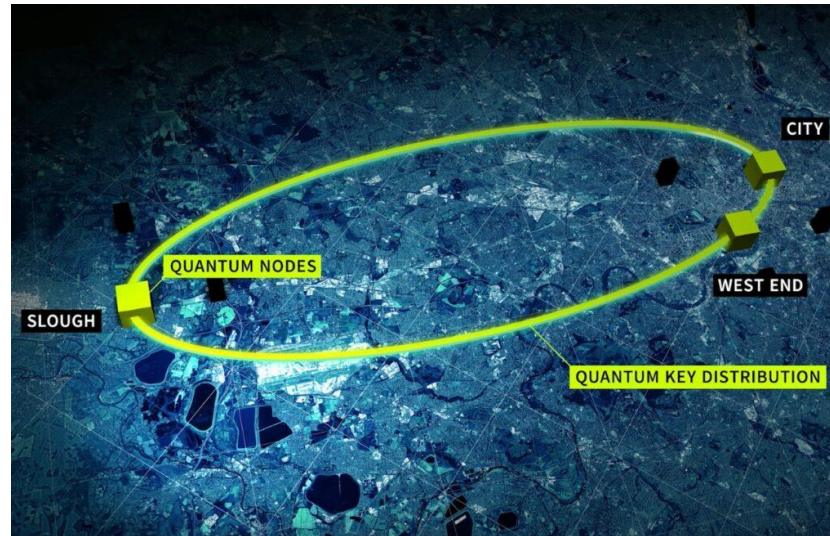
Usata da banche, enti governativi, società di telecomunicazioni...

Reti di crittografia quantistica nel mondo:

- Cina
- Giappone
- Corea del Sud
- Austria
- Svizzera
- Italia
- Spagna
- Regno Unito
- Russia
- Polonia
- USA
- Canada
- Sud Africa



Italia: 1'860 km



UK: HSBC+Toshiba

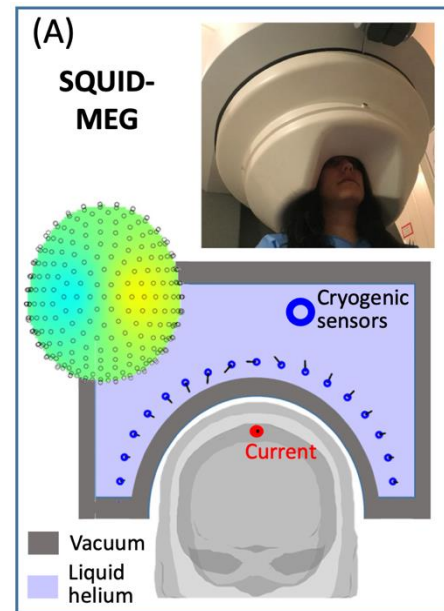
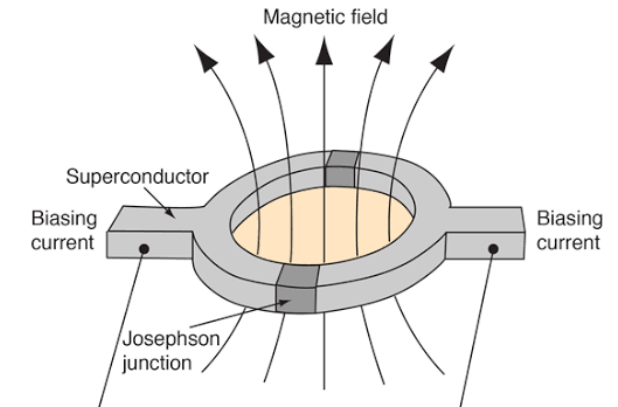
- Crittografia quantistica tra quartier generale HSBC e data center
- Simulazione trading da €30M con crittografia quantistica

- I sistemi quantistici sono molto delicati
- Problema per computer quantistici, risorsa per i sensori
- Un sistema quantistico sente anche fluttuazioni piccolissime di:
  - **Campi magnetici:** es. attività cerebrale (MEG)
  - **Accelerazione e rotazione:** es. giroscopi quantistici per navigazione autonoma
  - **Gravità e densità del suolo:** es. gravimetri quantistici per mappare tunnel o falde acquifere
  - **Tempo e frequenza:** es. orologi atomici ultraprecisi (GPS, sincronizzazione globale)

# Esistono i sensori quantistici? Sì!

Magnetometri con circuiti superconduttivi (SQUID)

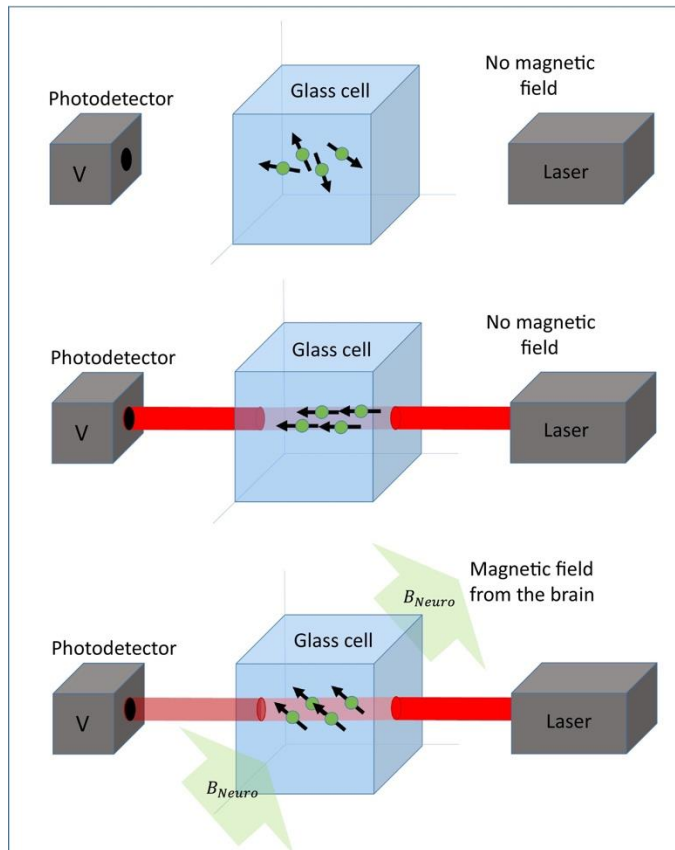
- Misure ad alta precisione del campo magnetico terrestre (es. risorse minerarie, strutture sotterranee)
- Magnetoencefalografia: misura campi magnetici generati dai neuroni quando comunicano tra loro



- Ingombranti, raffreddamento criogenico ( $-269^{\circ}\text{C}$ ) con elio liquido

# Esistono i sensori quantistici? Sì!

- Magnetometrici ottici a pompaggio laser  
Gli spin atomici si comportano come bussole quantistiche e reagiscono anche a variazioni impercettibili di campo magnetico

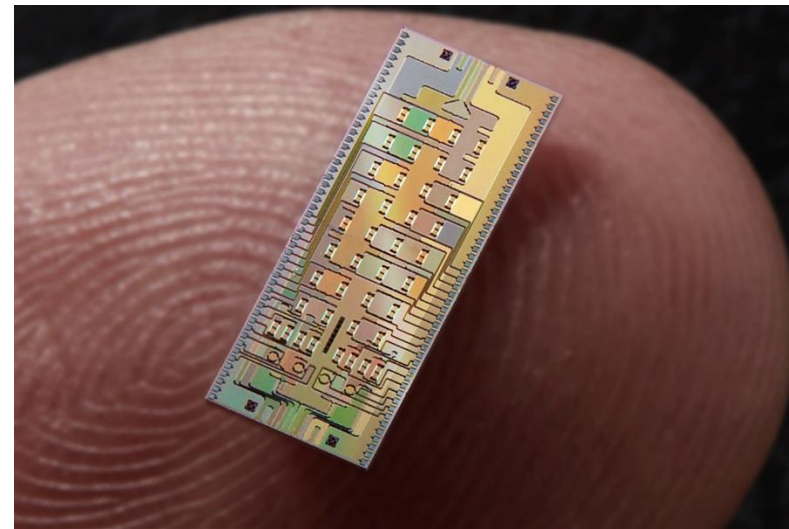


Spinoff dell'università di Nottingham: casco Cerca OPM-MEG  
Hospital for Sick Children di Toronto: studiando il suo utilizzo per mappare l'attività cerebrale nei bambini (epilessia, autismo, etc.)

- La natura non è continua, ma formata da piccoli "pacchetti", i quanti
- Tante tecnologie che diamo per scontate (laser, elettronica, led) si basano sui principi della fisica quantistica scoperti a inizio '900
- Non solo tecnica ma anche ma interrogativi sulla natura stessa della realtà
- Siamo nel pieno di una seconda rivoluzione quantistica che sfrutta fenomeni come sovrapposizione ed entanglement che sta sviluppando:
  - Computer più veloci
  - Comunicazioni più sicure
  - Strumenti di misura più sensibili
- La luce (es. laser) gioca un ruolo fondamentale come sistema quantistico in quanto tale e come strumento per il controllo di altri sistemi quantistici

Il futuro della fisica quantistica?

- Relatività generale+quantistica: ancora manca!
- Biologia quantistica
- Sistemi quantistici su chip





**Grazie per  
l'attenzione!**