

Fotonica quantistica integrata

Massimo Borghi, Marco Clementi
Quantum Photonics Laboratory

Chi siamo



Professori

- Prof. Matteo Galli
- Prof. Daniele Bajoni (dip. Ingegneria)

Ricercatori

- Dr. Massimo Borghi
- Dr. Marco Clementi

Dottorandi

- Noemi Tagliavacche
- Sara Congia
- Marcello Bacchi
- Emanuele Brusaschi
- Andrea Bernardi (dip. Ingegneria)

Tesisti

- Enrico Melani

Alumni

- Dr Andrea Barone
- Dr Linda Gianini (dip. Ingegneria)
- Paula Pagano
- ...

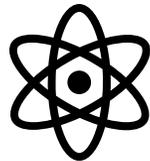
Collaboratori

- Marco Liscidini, Dario Gerace, Lucio Andreani, ...



Fotonica **quantistica** integrata

Parte I
Tecnologie quantistiche



La «seconda rivoluzione **quantistica**»



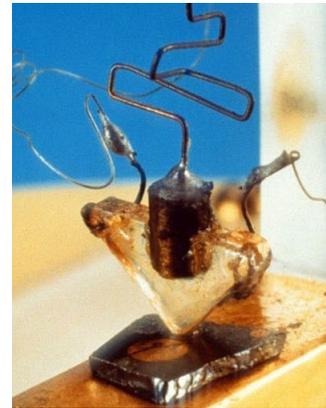
1900-1933: una nuova teoria

Nascita e sviluppo della **meccanica quantistica**.
Descrizione quantitativamente accurata del
mondo microscopico

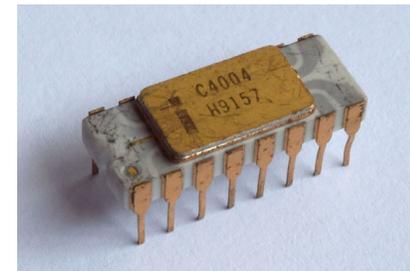
$$i\hbar\partial_t|\psi\rangle = H|\psi\rangle$$

1933-1980: la «prima rivoluzione»

Tecnologie che utilizzano proprietà
«macroscopiche» della teoria quantistica:
transistor, laser, diodi tunnel ecc.



Primo transistor
(Bell Labs, 1947)



Primo microprocessore
(intel, 1971)

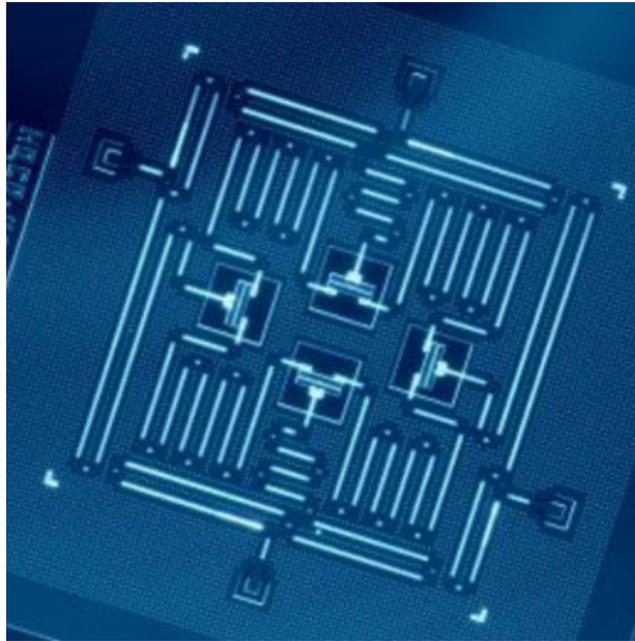


Laser a rubino
(Maiman 1960)

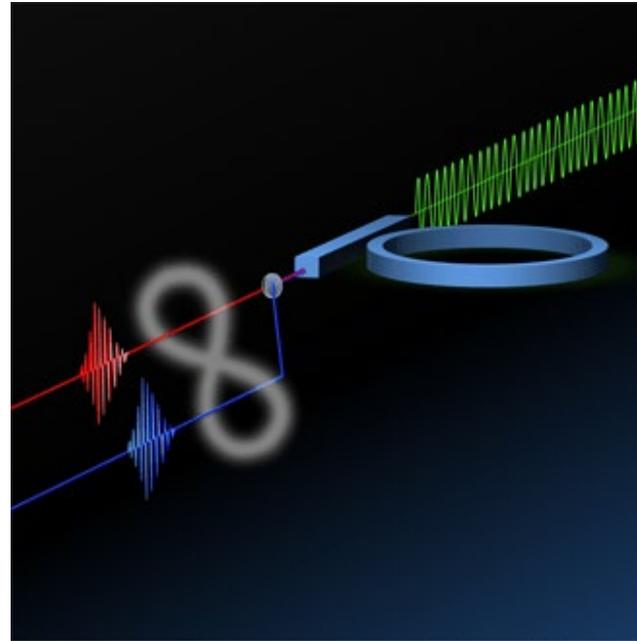
La «seconda rivoluzione **quantistica**»

1980-oggi: la «seconda rivoluzione»

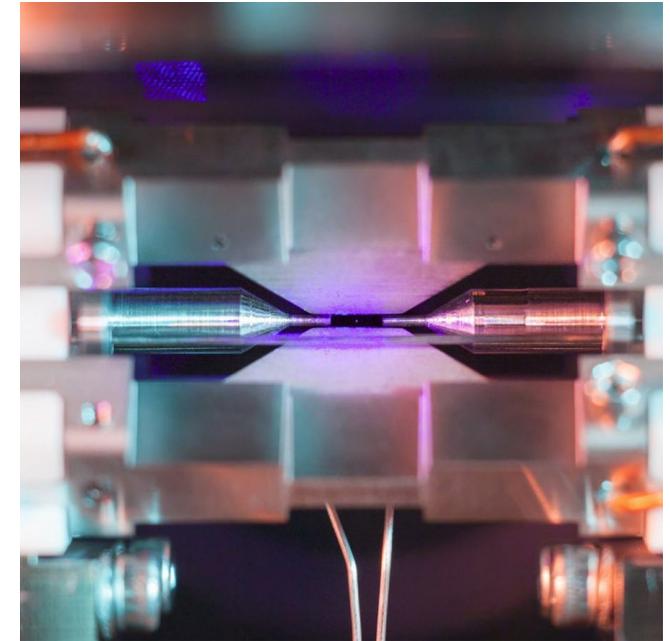
Controllo coerente di singoli oggetti quantistici:
computer quantistici, singoli fotoni, quantum dots, quantum sensors, ecc.



Qubit superconduttori in un quantum computer (IBM)

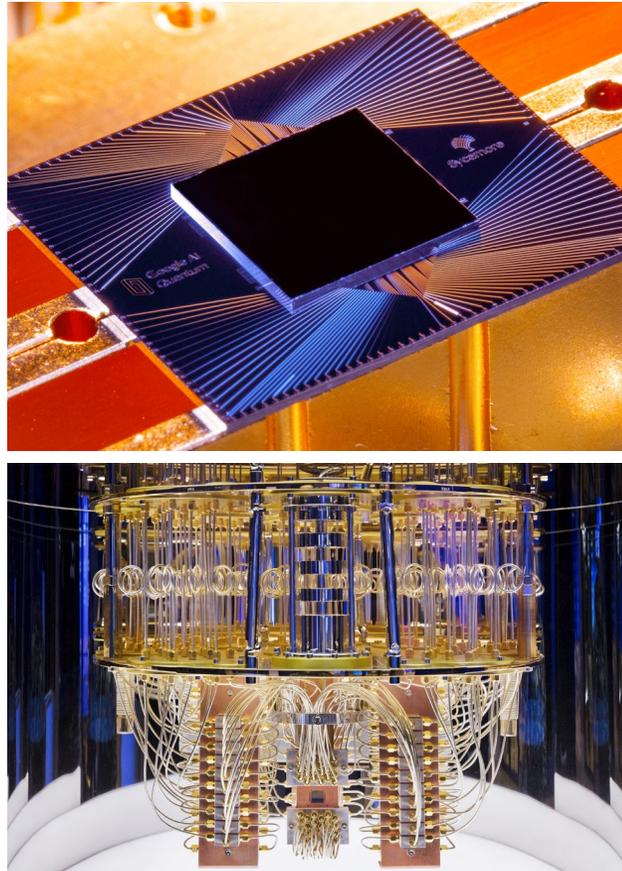


Generazione di coppie di fotoni da un micro-anello (UniPV)



Singolo atomo di Sr in trappola ionica (University of Oxford)

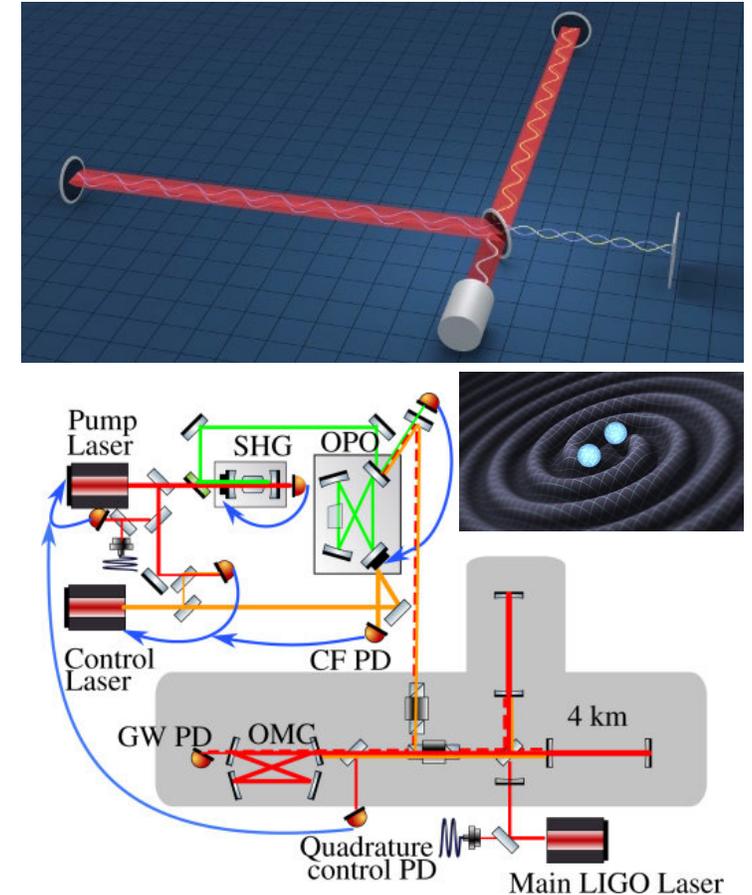
Tecnologie quantistiche



Quantum computing



Quantum communication



Quantum sensing and metrology

Computer quantistici

Simulating Physics with Computers

Richard P. Feynman

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

Received May 7, 1981

1. INTRODUCTION

am it says this is a keynote speech—and I don't know
tech is. I do not intend in any way to suggest what should
as a keynote of the subjects or anything like that. I have
say and to talk about and there's no implication that
talk about the same thing or anything like it. So what I



Idea di base (Feynman 1981):

- È difficile simulare sistemi quantistici utilizzando calcolatori «classici»

$$\text{Complessità} \propto e^N$$

- E se utilizzassimo un sistema quantistico come computer?

$$\text{Complessità} \propto N$$

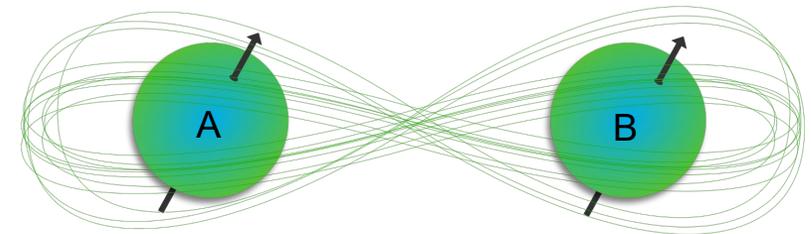
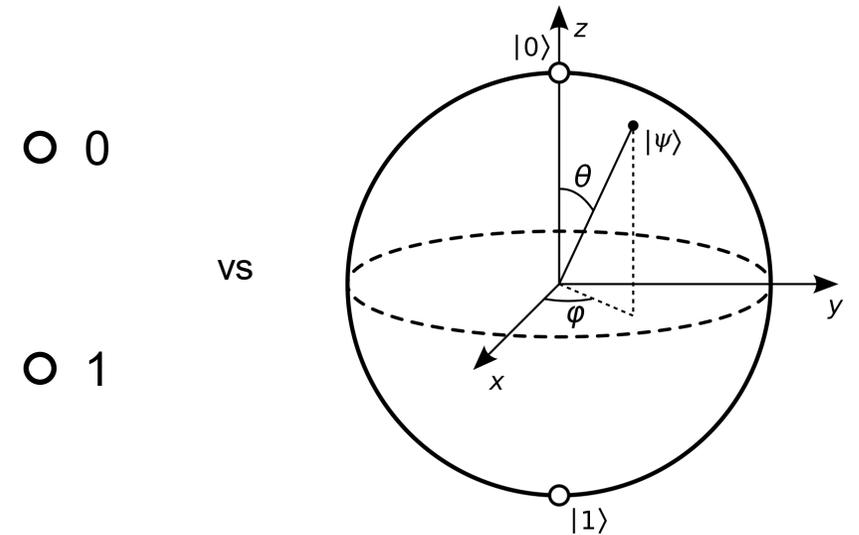
Computer quantistici

Utilizzano **qubit** anziché bit classici

$$0, 1 \rightarrow |0\rangle, |1\rangle$$

Sfruttano **proprietà esclusivamente quantistiche**:

- Sovrapposizione: $|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$
- Entanglement: $|\Phi\rangle = \frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}}$

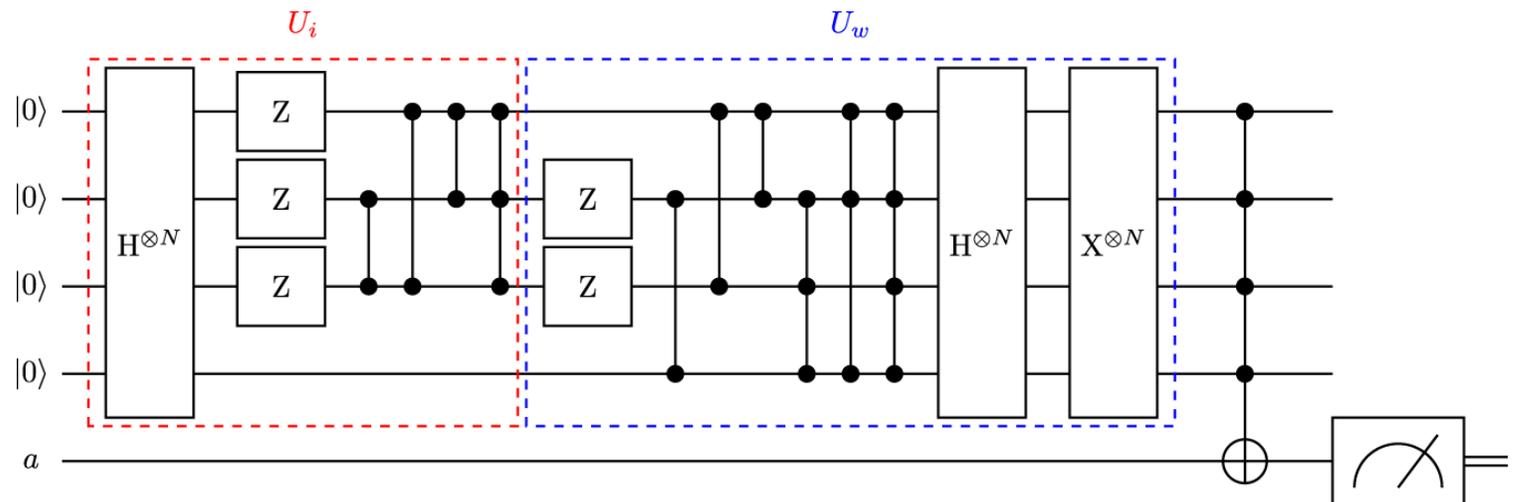
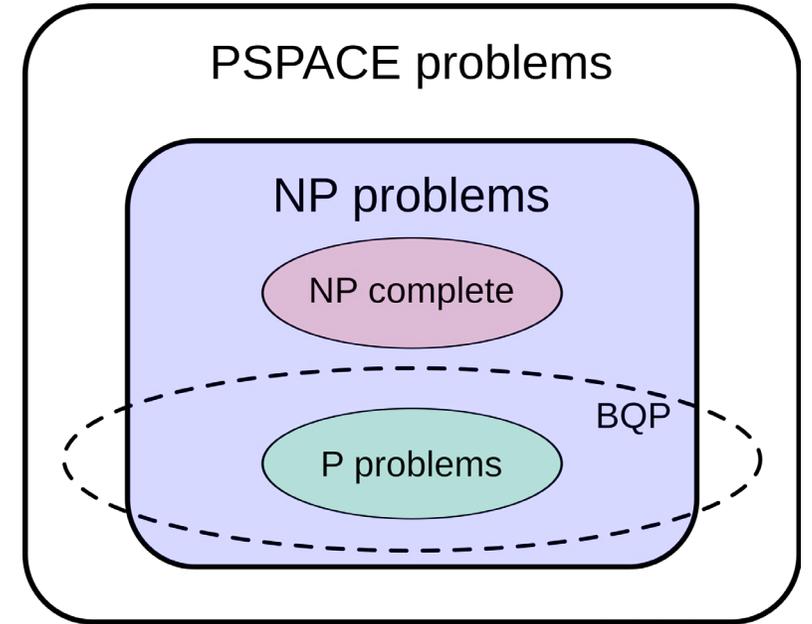


Computer quantistici

Risolvono specifiche classi di problemi **più velocemente** di qualsiasi algoritmo classico

Esempi:

- algoritmo di Shor (fattorizzazione)
- algoritmo di Grover (ricerca)
- folding di proteine
- ...



Quantum advantage

Article

Quantum supremacy using a programmable superconducting processor

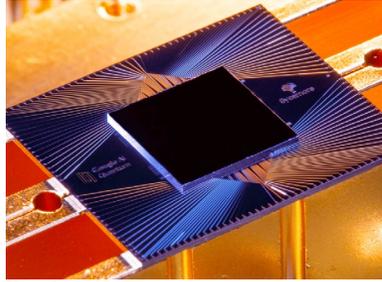
<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>

Received: 22 July 2019

Accepted: 20 September 2019

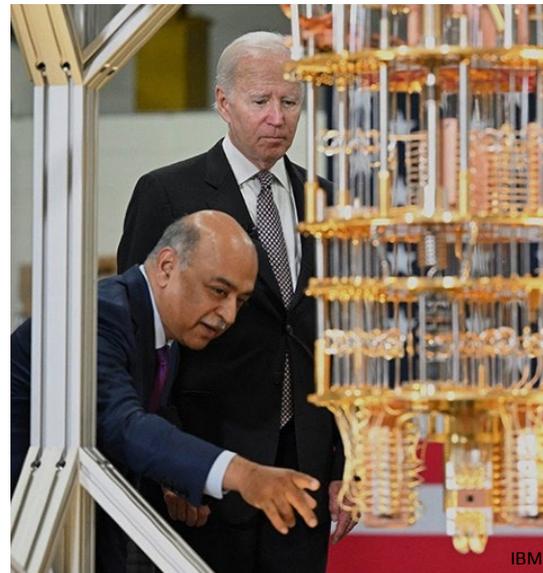
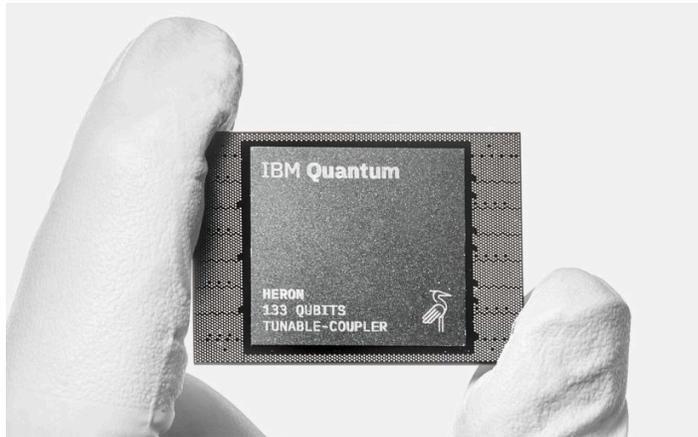
Published online: 23 October 2019

Frank Arute¹, Kunal Arya¹, Ryan Babbush¹, Dave Bacon¹, Joseph C. Bardin^{1,2}, Rami Barends¹, Rupak Biswas³, Sergio Boixo⁴, Fernando G. S. L. Brandao^{1,4}, David A. Buell¹, Brian Burkett¹, Yu Chen¹, Zijun Chen¹, Ben Chiaro⁵, Roberto Collins¹, William Courtney¹, Andrew Dunsworth¹, Edward Farhi¹, Brooks Foxen^{1,5}, Austin Fowler¹, Craig Gidney¹, Marissa Giustina¹, Rob Graff¹, Keith Guerin¹, Steve Habegger¹, Matthew P. Harrigan¹, Michael J. Hartmann^{1,6}, Alan Ho¹, Markus Hoffmann¹, Trent Huang¹, Travis S. Humble¹, Sergei V. Isakov¹, Evan Jeffrey¹, Zhendong Jiang¹, Dvir Kafri¹, Kostyantyn Kechedzhii¹, Julian Kelly¹, Paul V. Klimov¹, Sergey Knysh¹

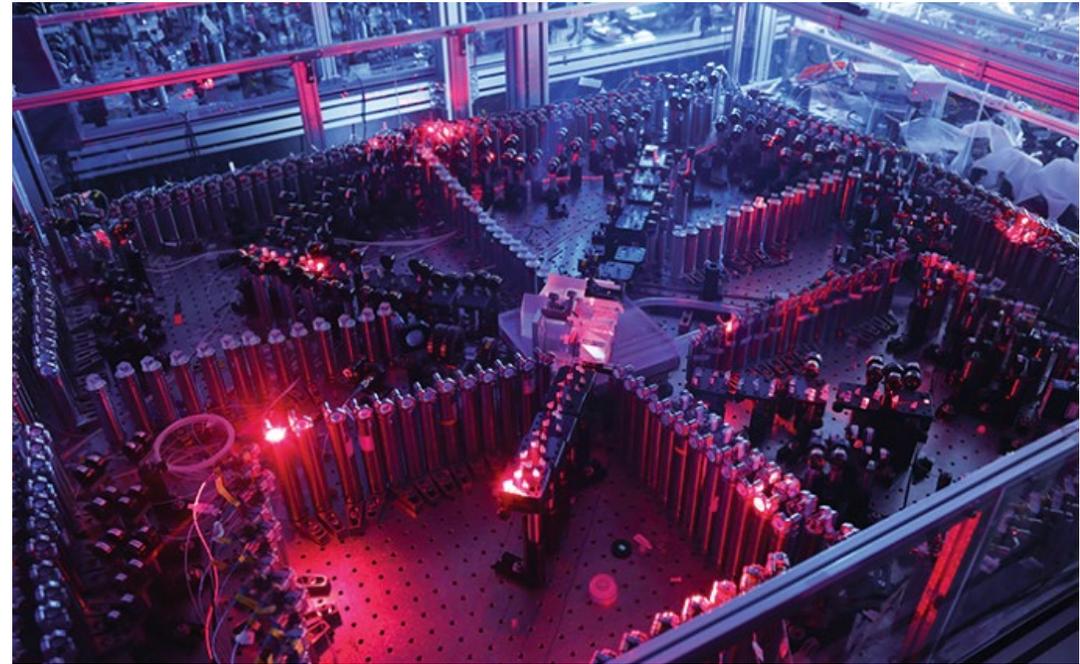


Google

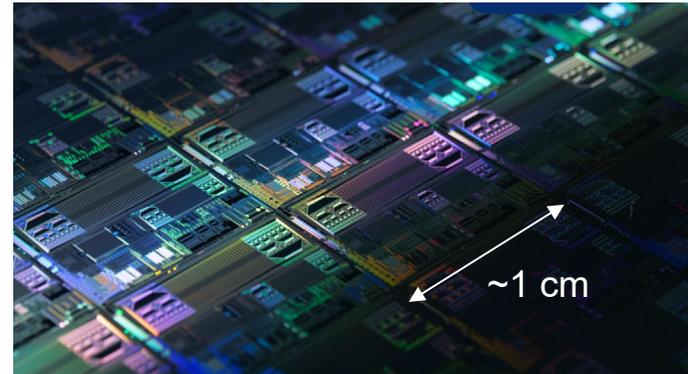
Springer Nature



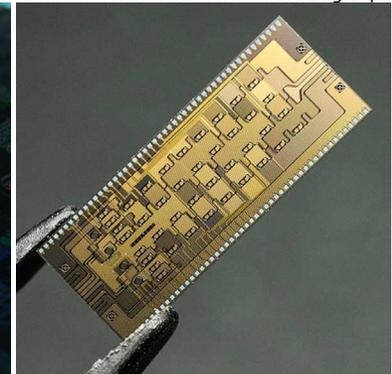
IBM



J. Pan group



PsiQuantum



Xanadu



IBM Quantum

Superconductor-based
Quantum advantage in 2019



Photon-based
Quantum advantage in 2021

Comunicazioni quantistiche: crittografia

I **fotoni** (quanti di luce) sono il mezzo ideale per trasportare l'informazione quantistica (basso rumore, velocità di trasmissione)

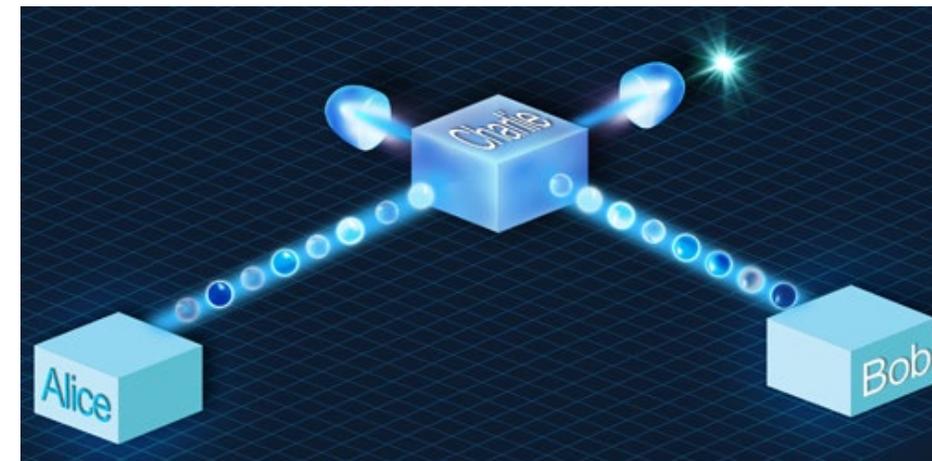
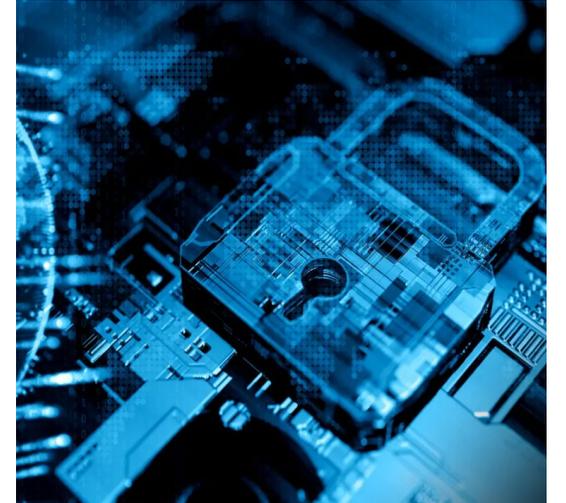
→ Applicazioni: link di sistemi quantistici, **crittografia**

Crittografia classica

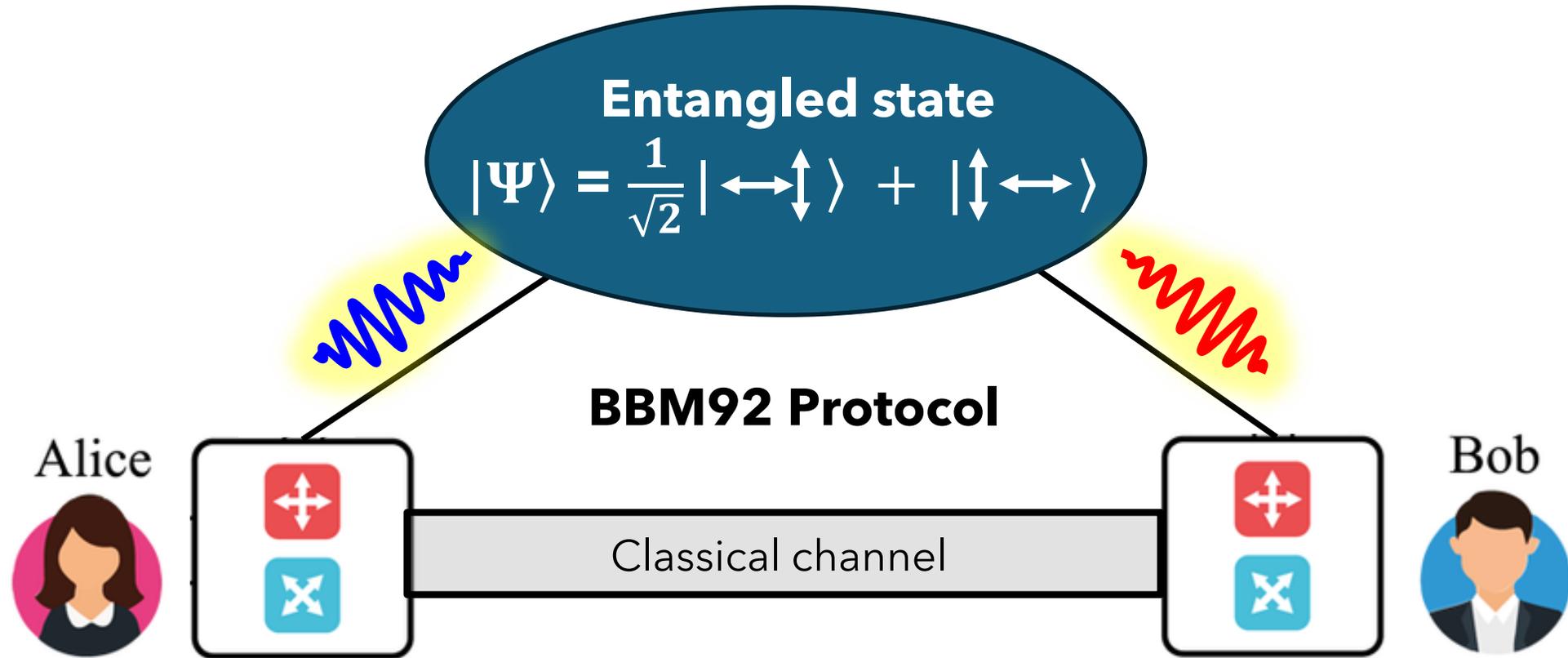
È basata sulla **teoria dei numeri**: decifrare un messaggio è difficile, ma teoricamente possibile (utilizzata oggi)

Crittografia quantistica

Sfrutta **proprietà nonclassiche** (entanglement, no-cloning) per codificare i messaggi, è **matematicamente sicura**



Esempio di quantum key distribution (QKD)



Le **correlazioni** di uno stato **entangled** vengono utilizzate per generare una chiave crittografica

La chiave viene utilizzata per cifrare un messaggio in maniera sicura (**one-time pad**)

Un attacco hacker può essere rivelato a partire da **una misura sullo stato** da Alice e Bob

Uso sul campo della quantum cryptography



Progetto QUID: rete quantistica italiana in **fibra ottica** (INRIM, 2023)



Entanglement-based QKD via **satellite** (J. Pan group 2017)



ID quantique



ThinkQuantum

Moduli QKD **commerciali**

Fotonica quantistica integrata

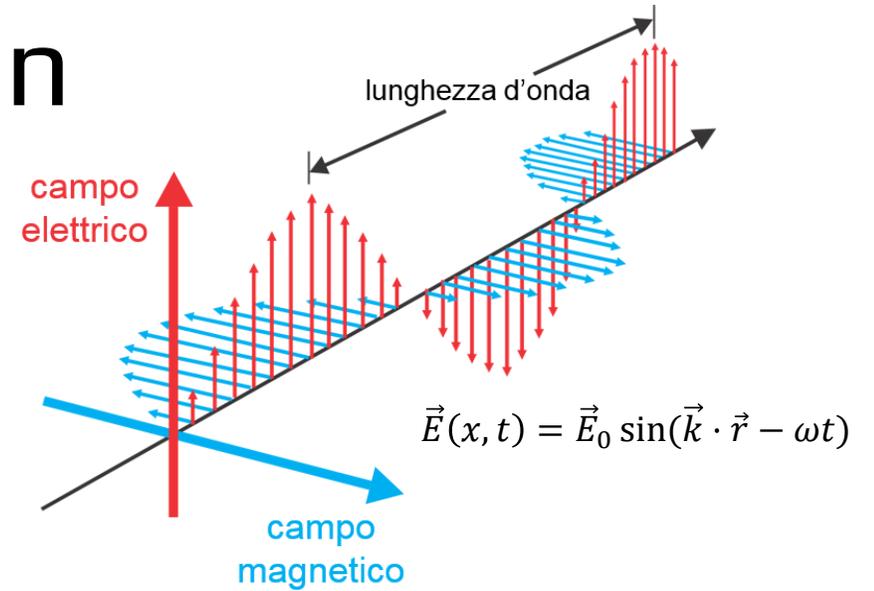
Parte II

Fotonica: la tecnologia della luce



Ottica: da Maxwell a Einstein

In fisica, la luce è descritta come un'onda elettromagnetica (lunghezza d'onda $\sim 1 \mu\text{m}$)



God said,

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

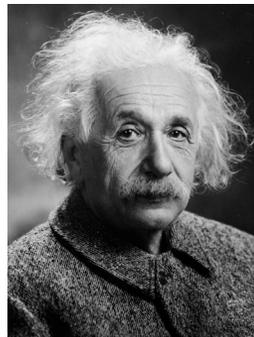
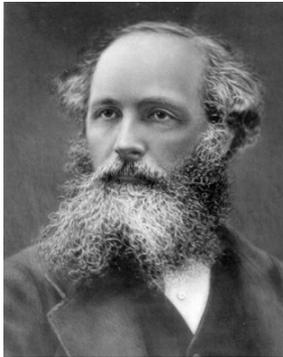
$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

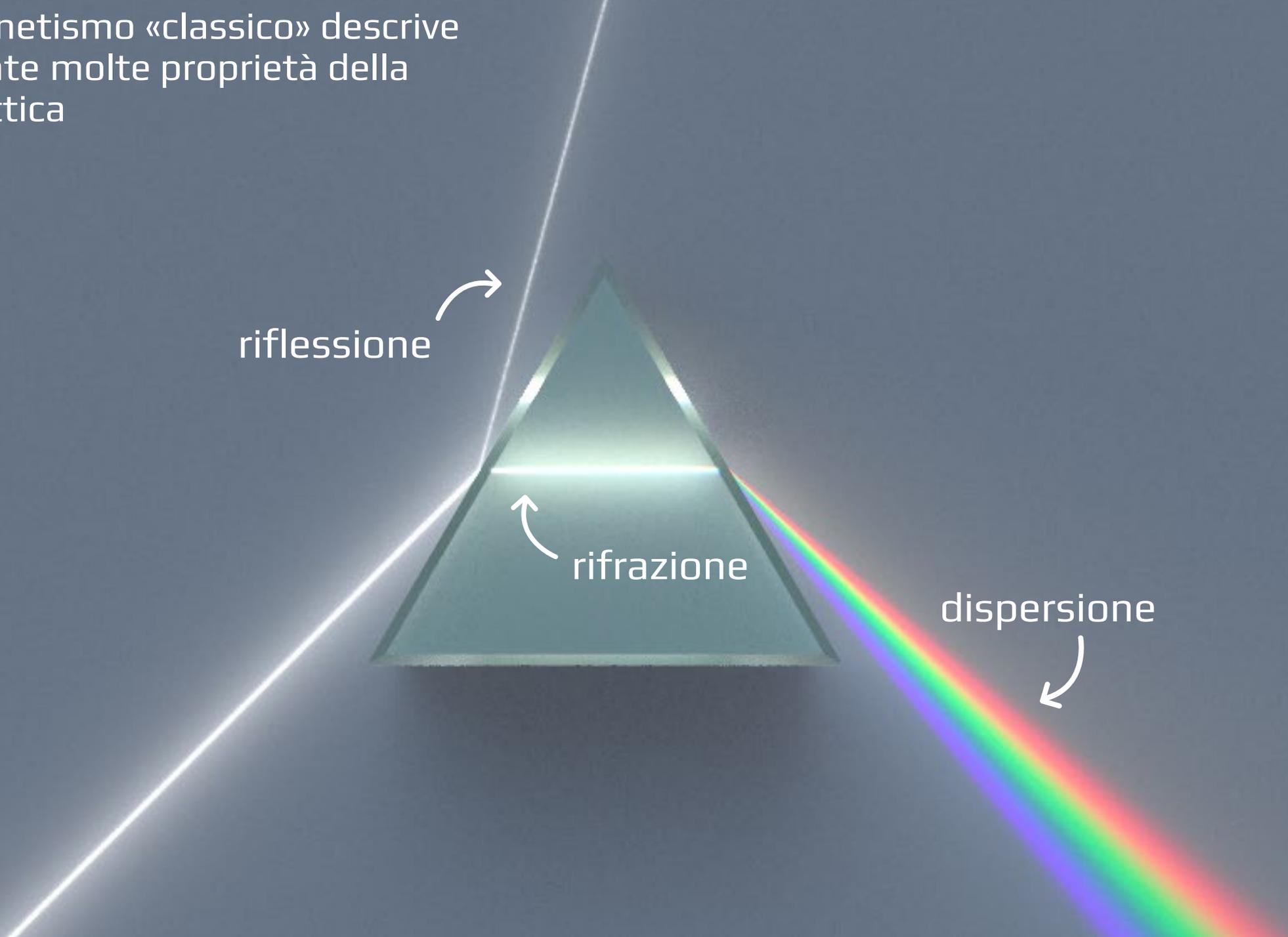
And there was light.

L'elettromagnetismo classico, riassunto dalle **equazioni di Maxwell (1861)**, descrive accuratamente la natura ondulatoria della luce



Per descriverne la natura **corpuscolare**, bisognerà aspettare Planck (1900), Einstein (1905) e la teoria quantistica

L'elettromagnetismo «classico» descrive accuratamente molte proprietà della radiazione ottica



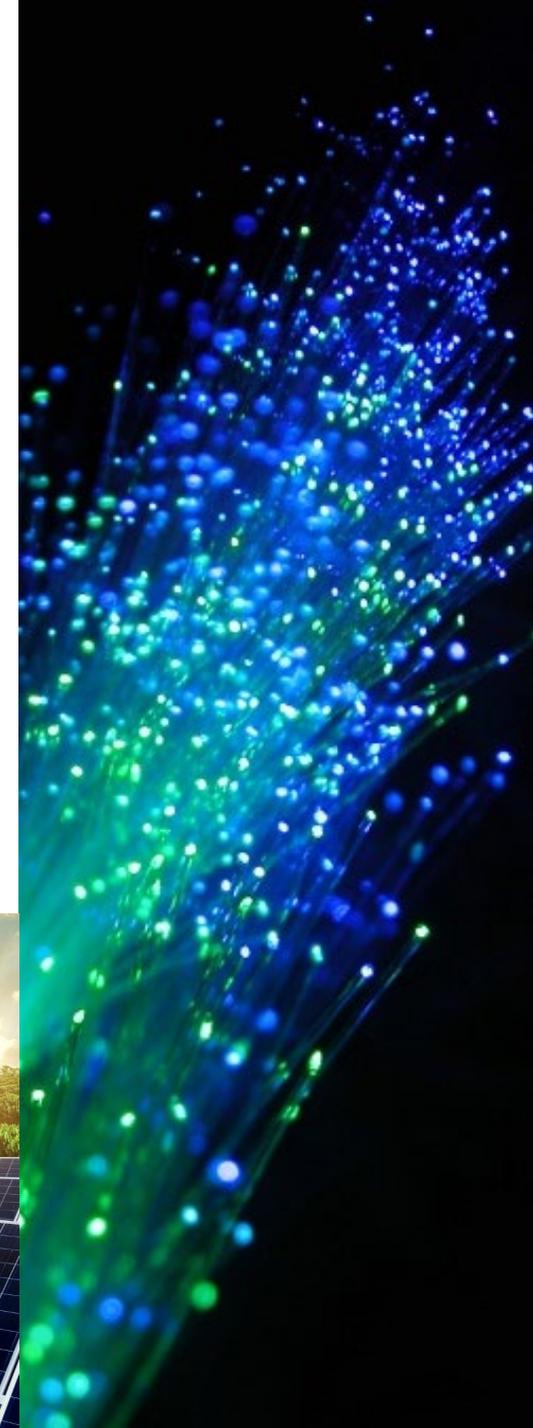
riflessione

rifrazione

dispersione

Luce e tecnologia

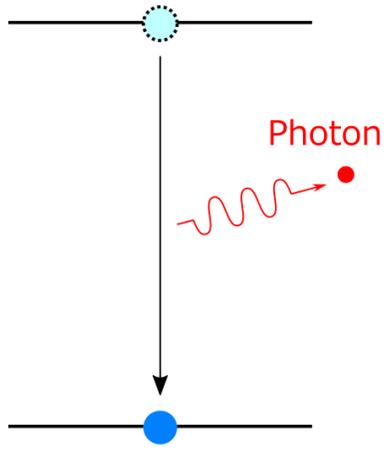
- Oggi la luce è alla base di molte **applicazioni tecnologiche**, dalle telecomunicazioni al fotovoltaico
- La **fotonica**, in analogia con l'elettronica, si occupa di studiare la generazione, manipolazione e rilevamento della luce
- L'invenzione alla base della fotonica è il **LASER**



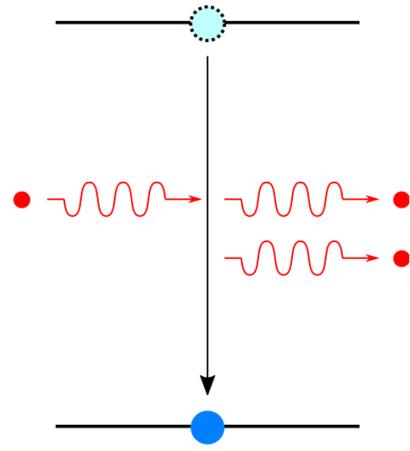
LASER

Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation

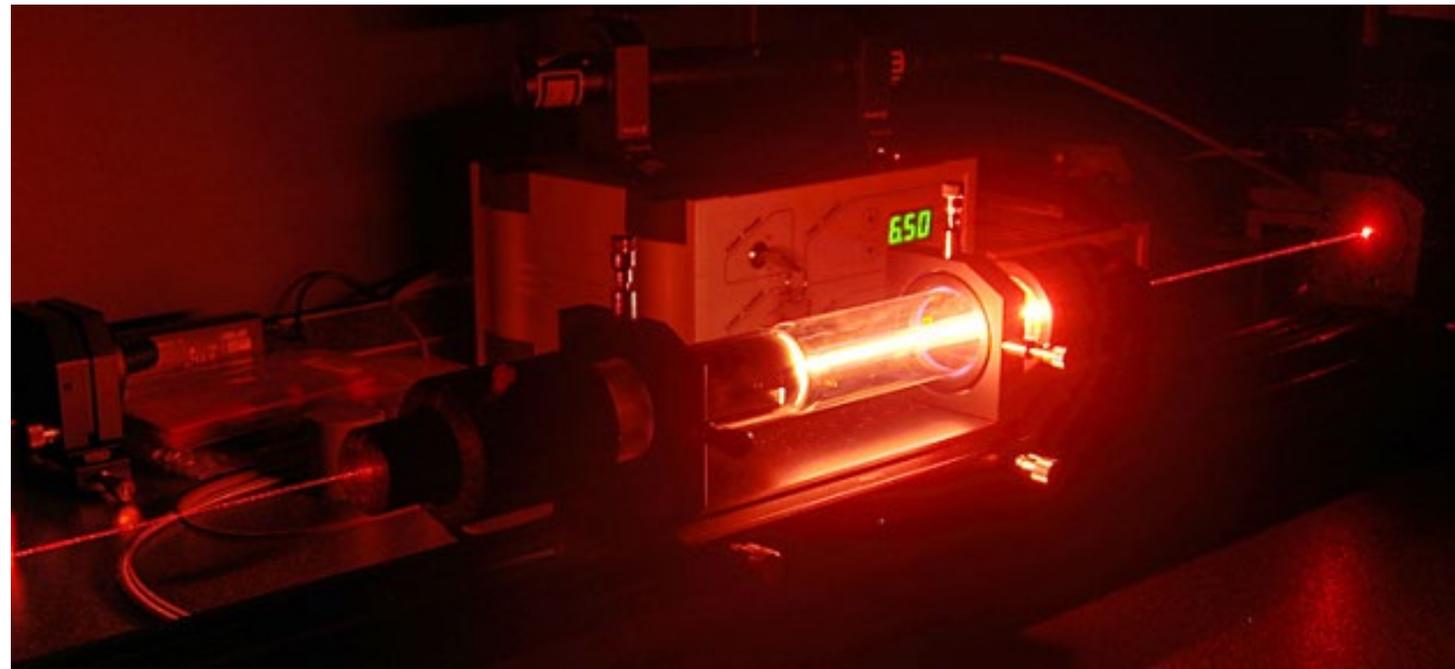
- Inventato da **Theodore Maiman** nel 1960 (laser a rubino, Bell labs)
- Sfrutta il fenomeno dell'**emissione stimolata** per generare luce coerente



Spontaneous emission



Stimulated emission



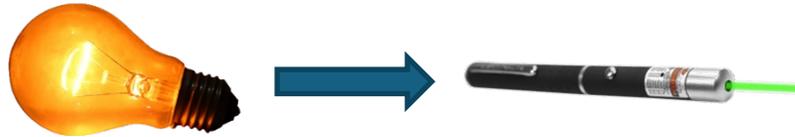
La luce laser è:

Monocromatica



Ha un solo e ben preciso **colore**. In altri termini, la lunghezza d'onda è ben definita

Direzionale

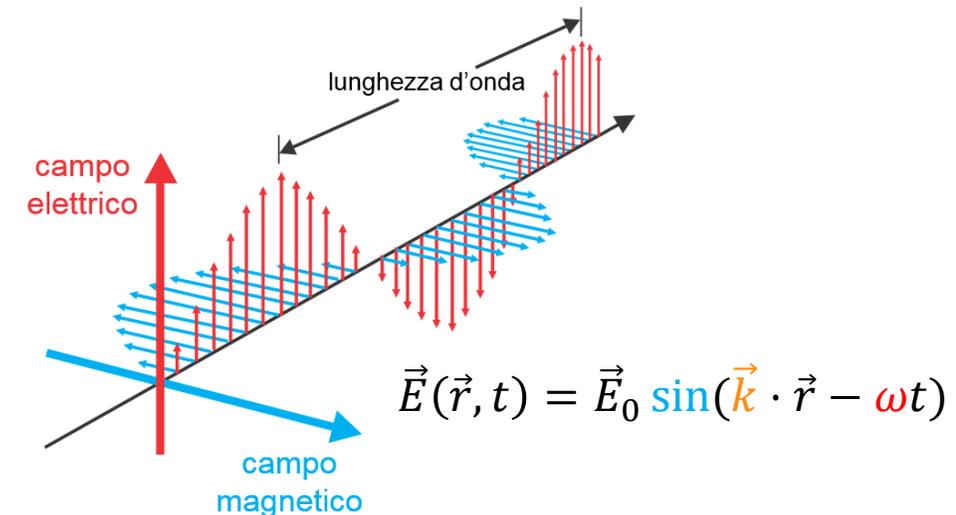


Ossia ha una **direzione** di emissione privilegiata (es. puntatore laser)

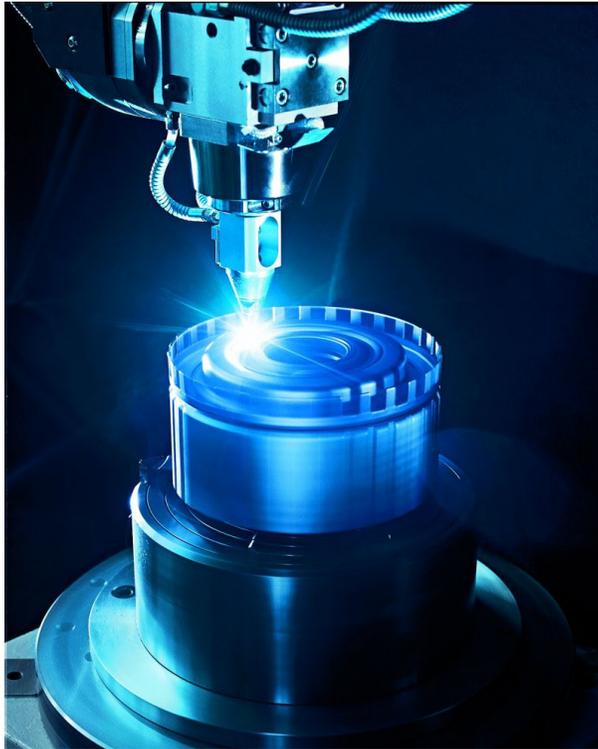
Coerente



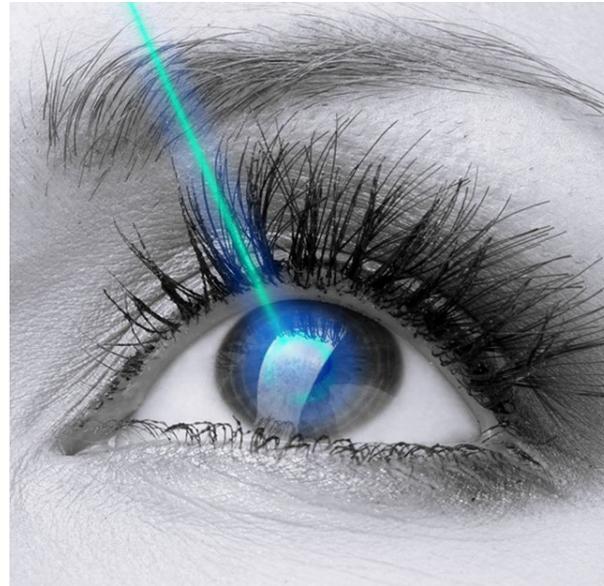
Ossia viaggia con la stessa relazione di **fase**



Laser: applicazioni



Lavorazione industriale

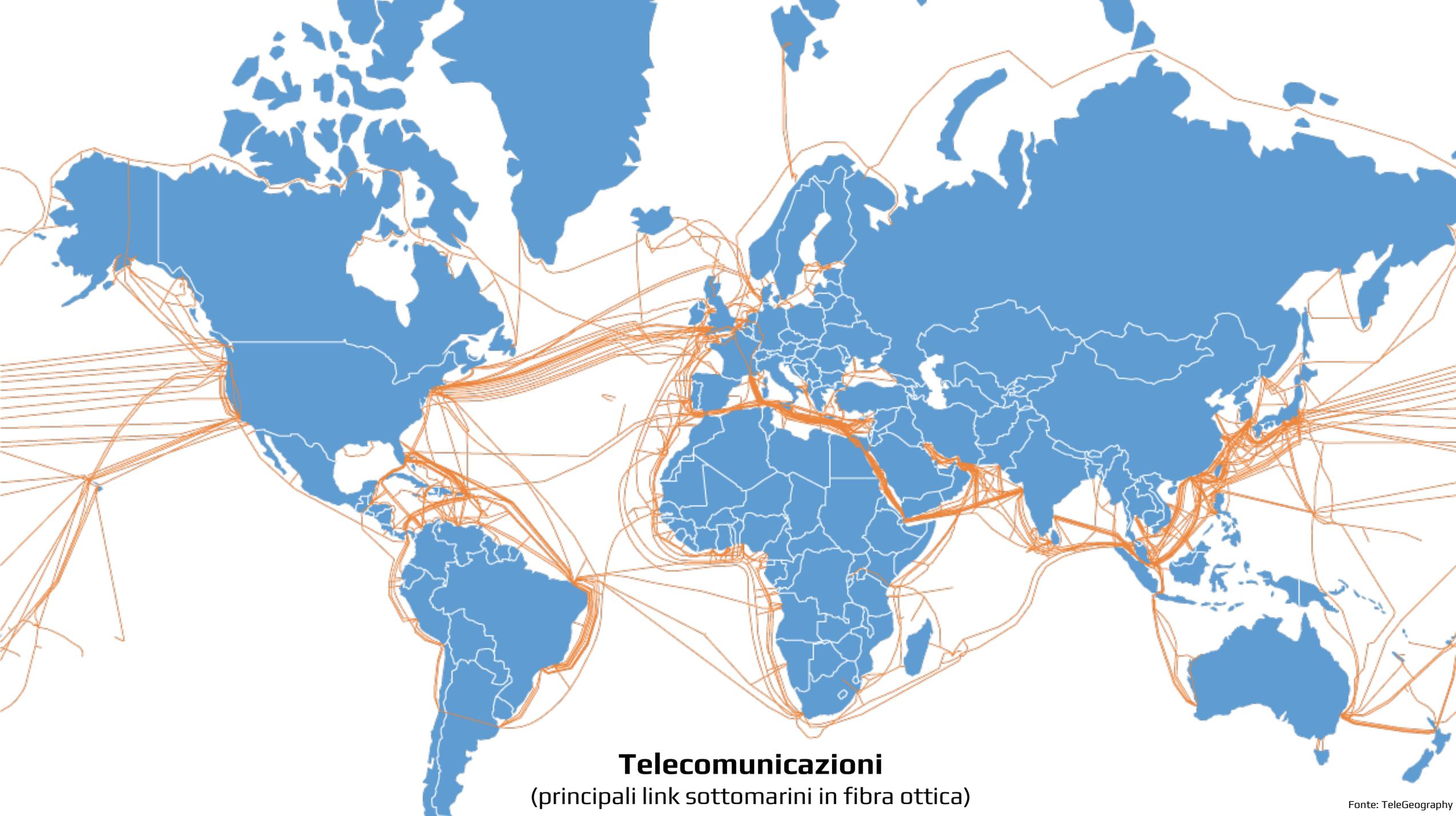


Medicina



Misure

PRECISIONE



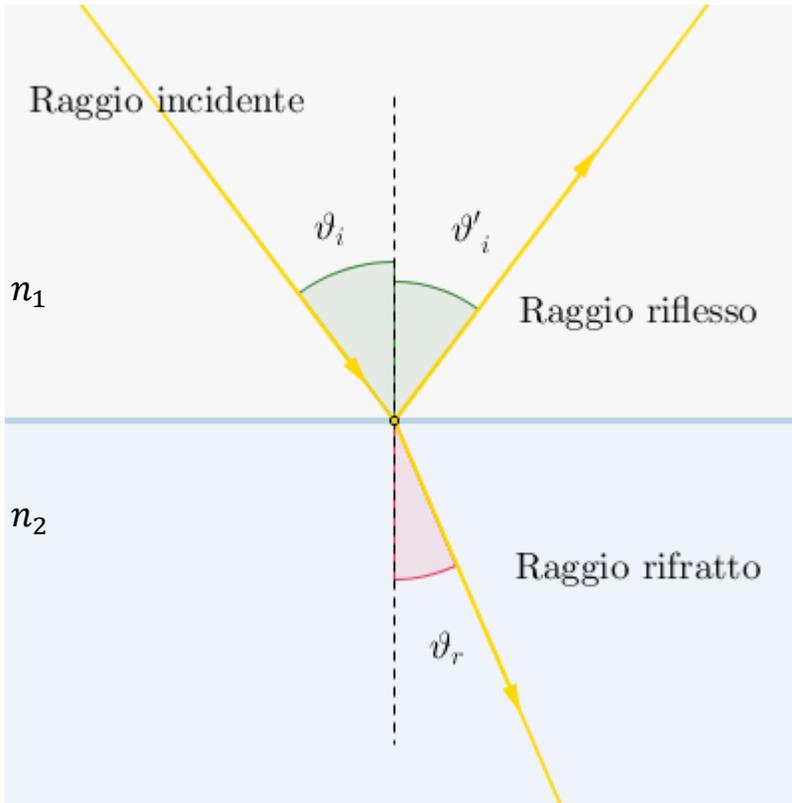
Telecomunicazioni
(principali link sottomarini in fibra ottica)

Come guidare la luce?



Guidare la luce in una **fibra ottica**

Per guidare la luce si utilizza il fenomeno della **riflessione totale interna**

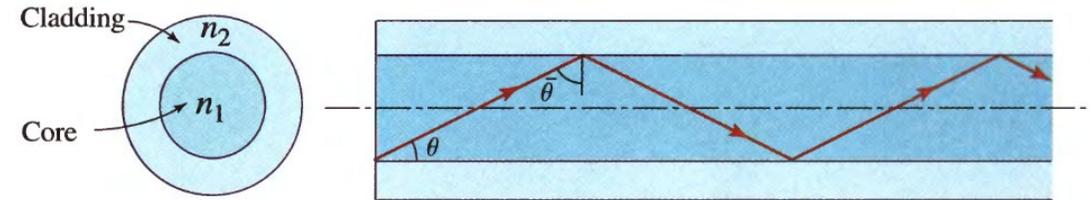


Legge di Snell

$$n_1 \sin(\theta_i) = n_2 \sin(\theta_r)$$

Angolo limite:

$$\sin(\theta_i) > \frac{n_2}{n_1}$$



<https://www.chimica-online.it/fisica/riflessione-totale.htm>

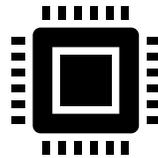
La luce (laser) modulata diventa il mezzo per **trasmettere dati**:

velocità \approx 400 Gbit/s (per canale)

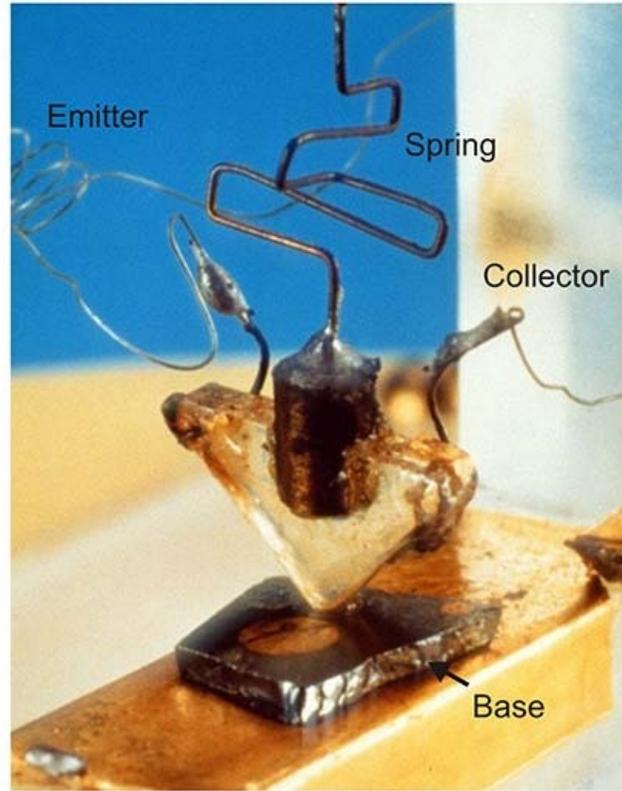
Fotonica quantistica **integrata**

Parte III

Integrazione: dal macro al microscopico



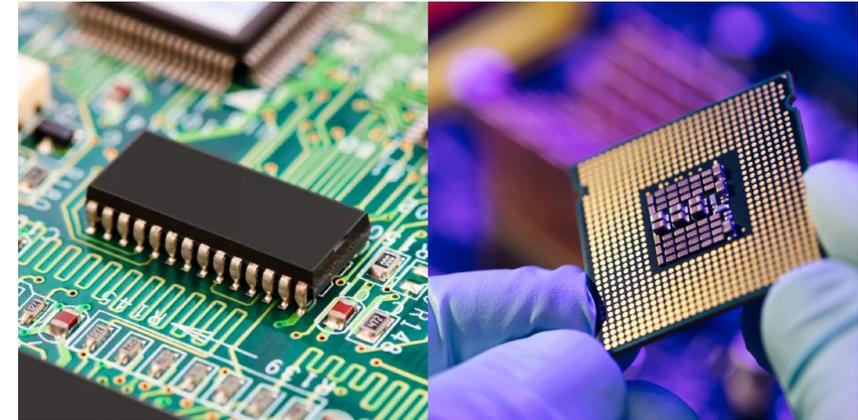
Integrazione nella micro-elettronica



<https://www.nutsvolts.com/magazine/article/the-story-of-the-transistor>



<https://www.chipsetc.com/the-transistor.html>



<https://www.wevolver.com/article/microprocessor-vs-integrated-circuit-unveiling-the-core-of-modern-technology>

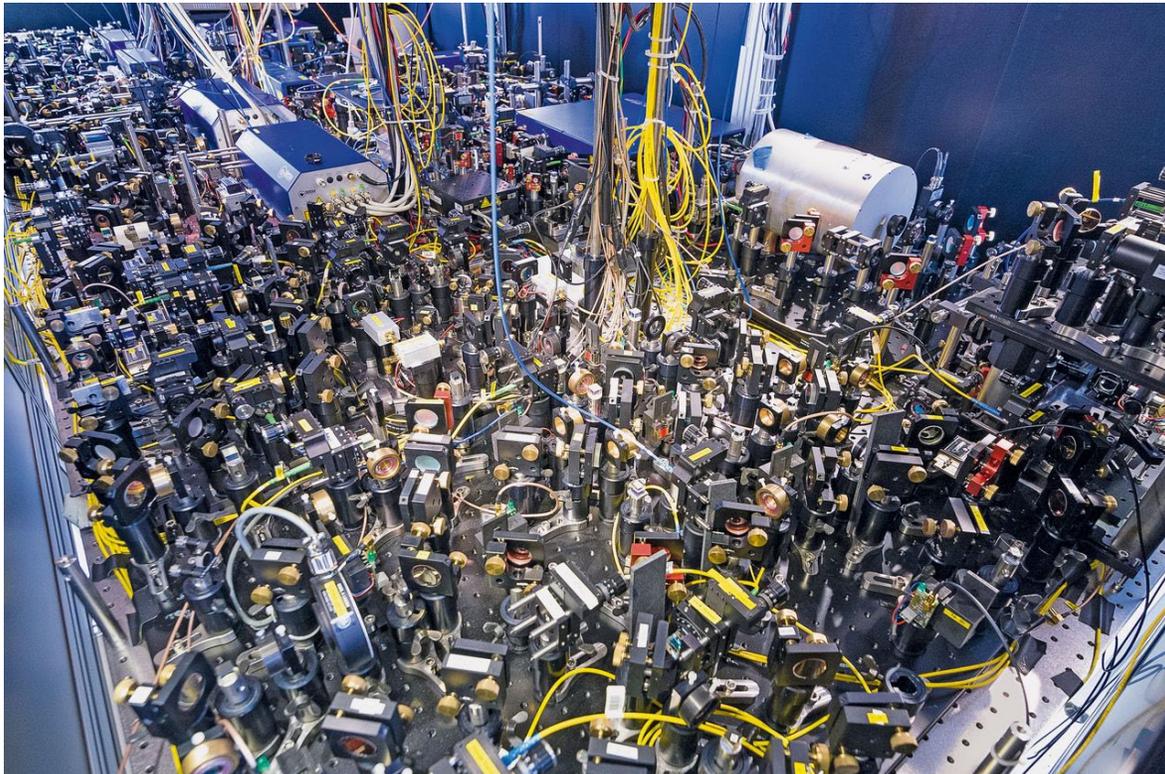
1947

1958

Oggi

Integrazione nella fotonica

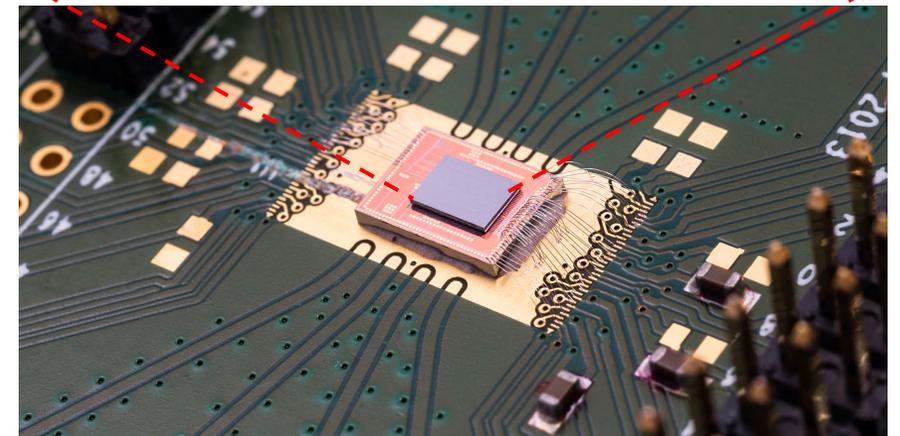
m^2



<https://x.com/BreakingTaps/status/1486787468292669443>



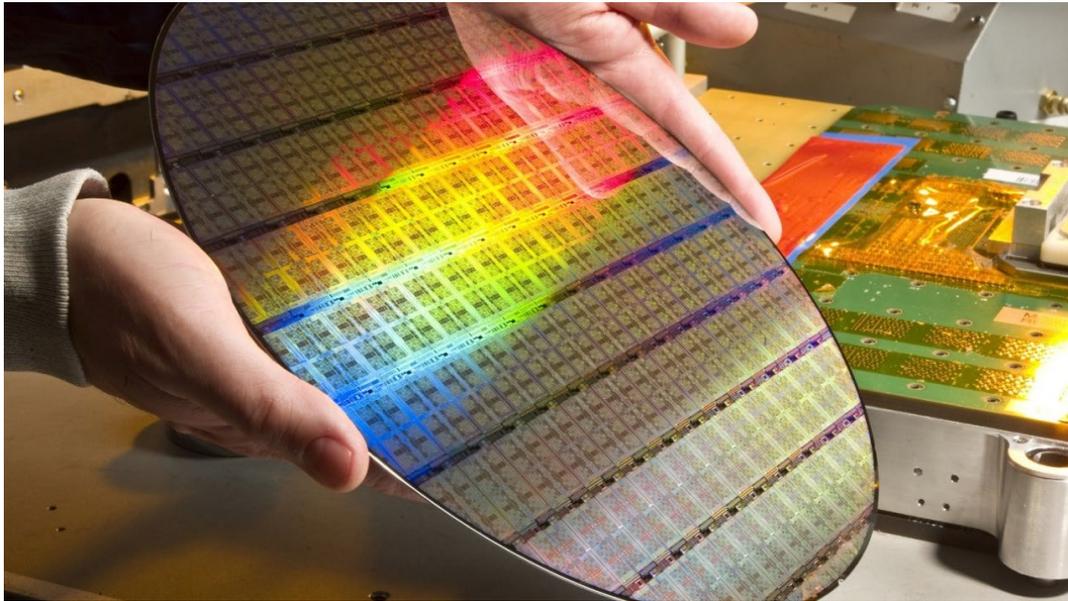
cm^2



<https://www.imec-int.com/en/integrated-photonics>
<https://sites.usc.edu/mjlab/about/integrated-optoelectronic-platform/>

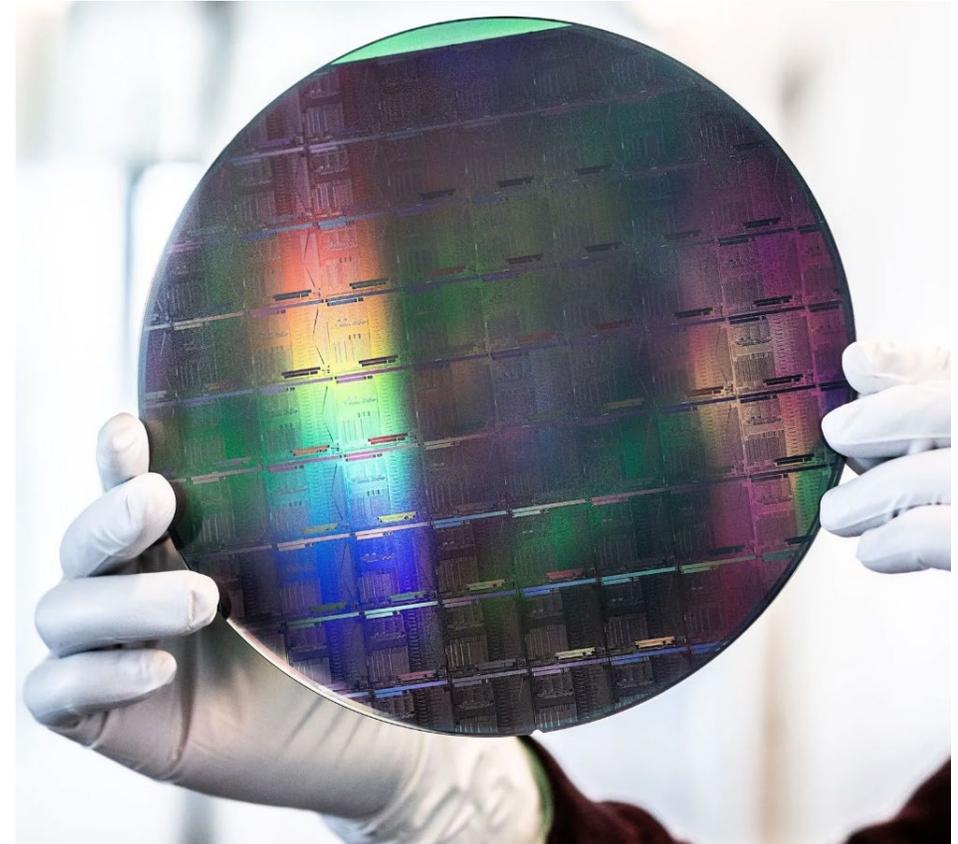
Produzione di chip per ottica integrata

Un wafer per la micro-elettronica



<https://www.aet.group/en/sector-of-activity/microelectronics-electronics>

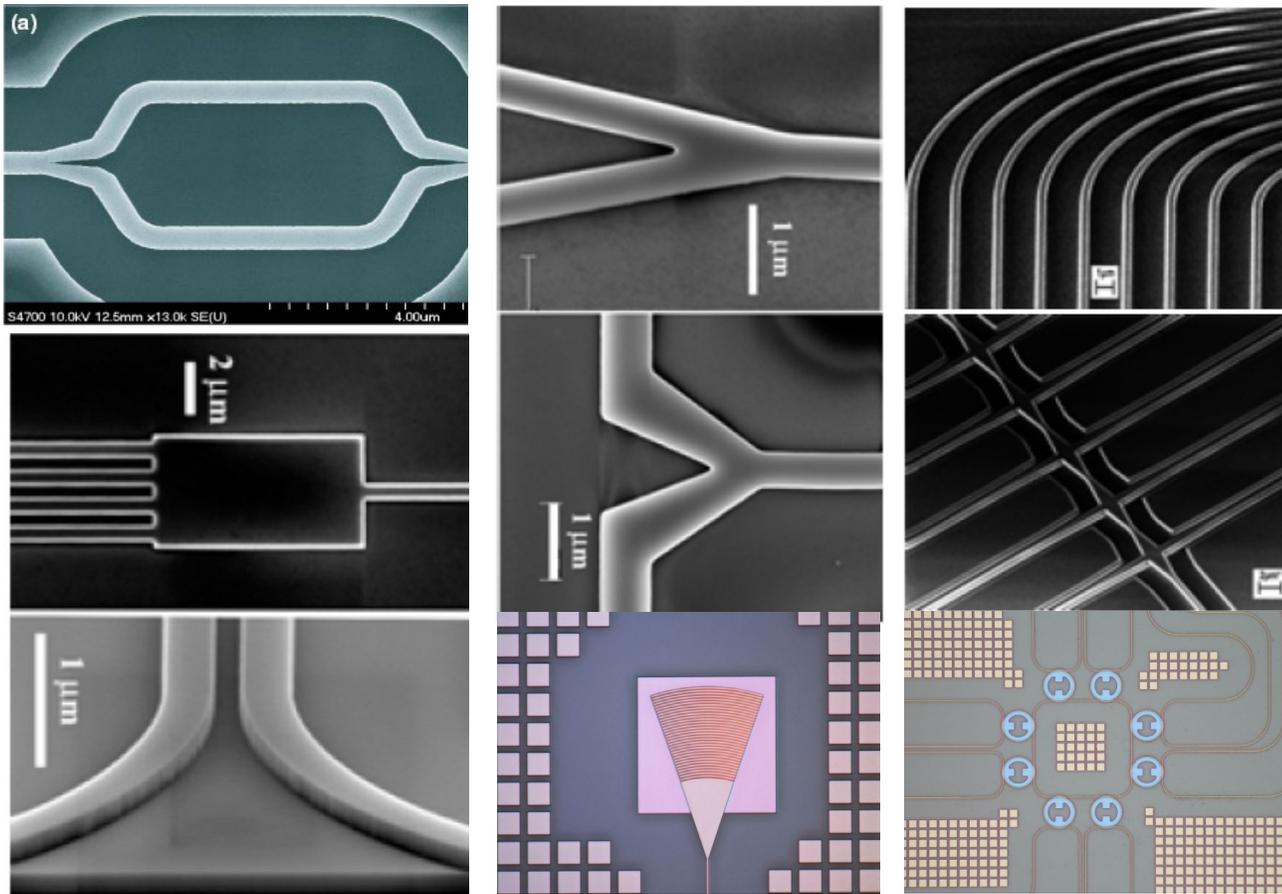
Un wafer per la fotonica integrata



<https://www.eetimes.com/xanadu-imec-collaborate-to-develop-photonic-qubits/>

Un tavolo ottico su chip

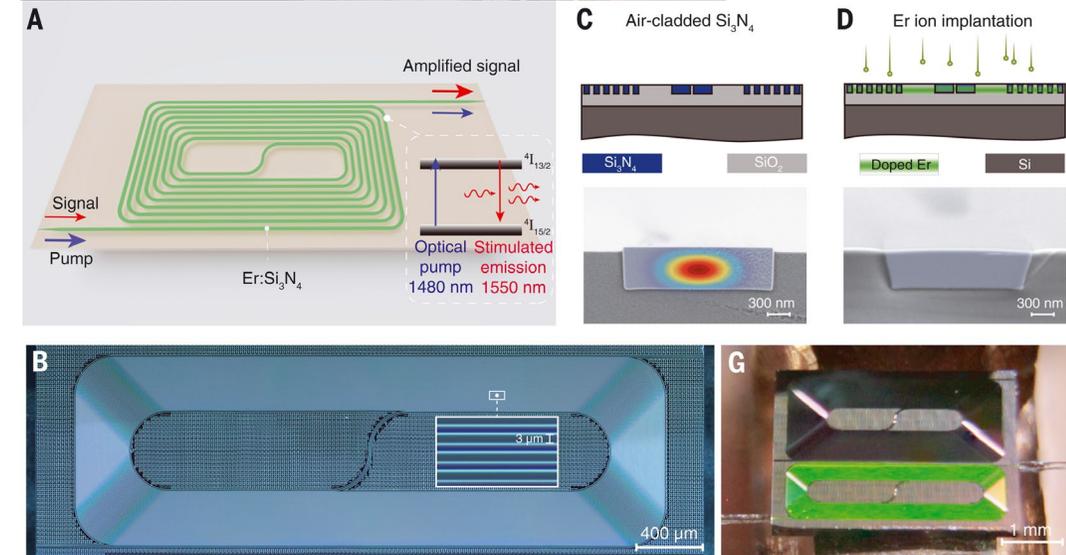
Componenti integrati **passivi**
accoppiatori, guide, curve, risuonatori,
splitter/combiner, multiplexer etc..

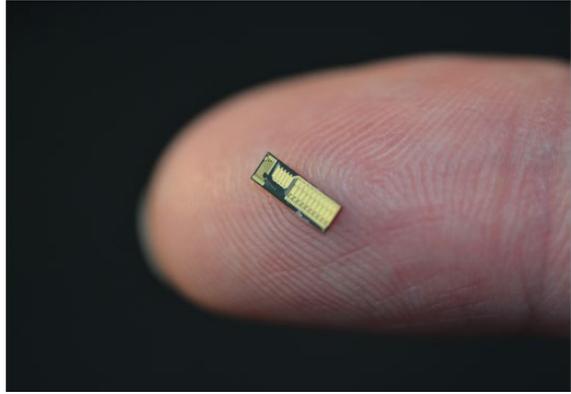
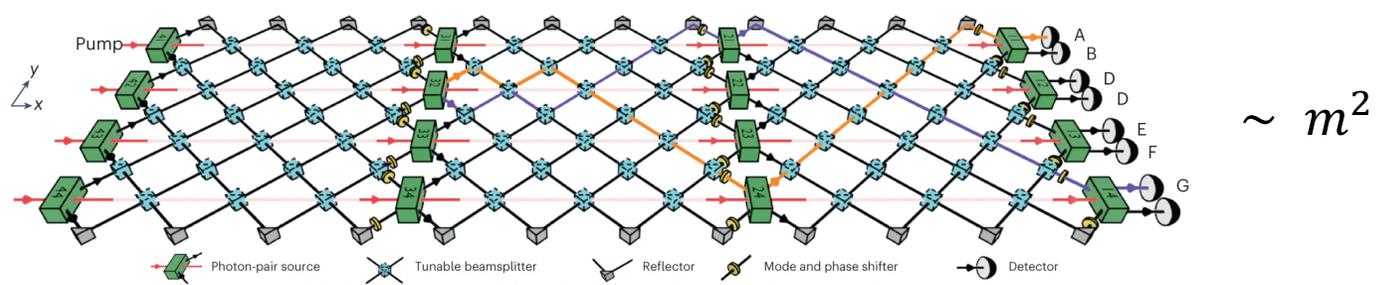


Componenti integrati **attivi**
Laser e amplificatori

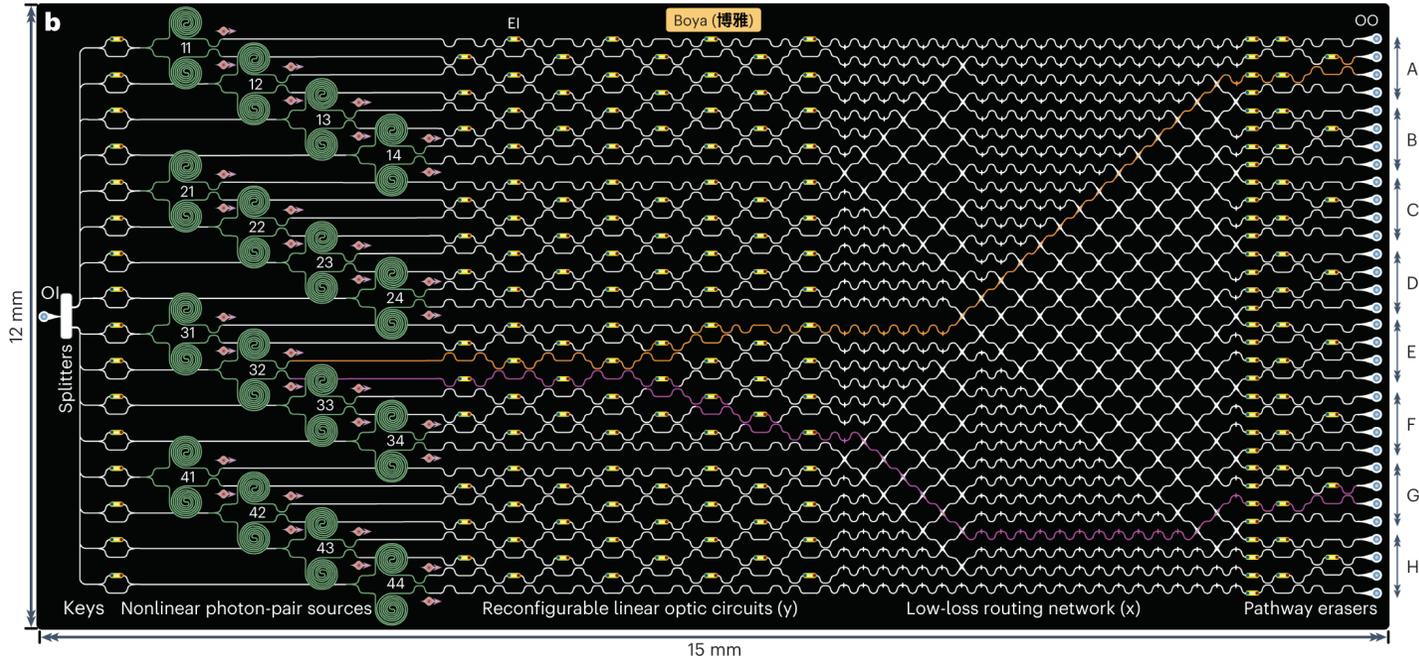


Liu, Yang, et al. "A photonic integrated circuit-based erbium-doped amplifier." *Science* 376.6599 (2022): 1309-1313.





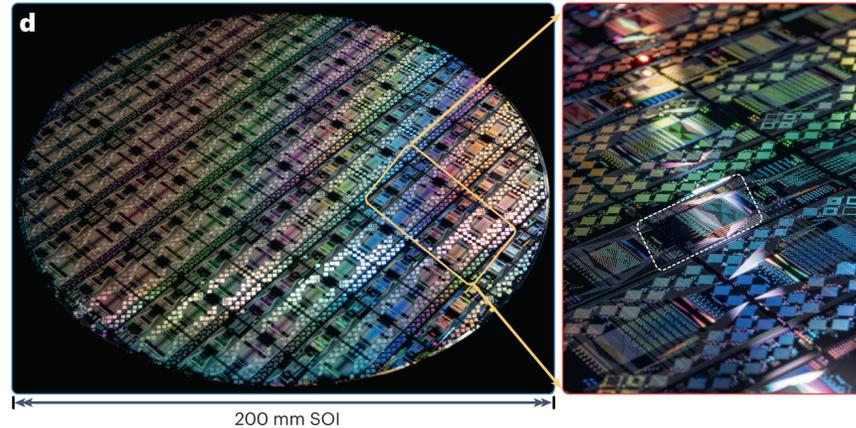
<https://www.laserfocusworld.com/newsletter/641b45715ca5f9001d7adec8>



$12 \times 15 \text{ mm}^2$

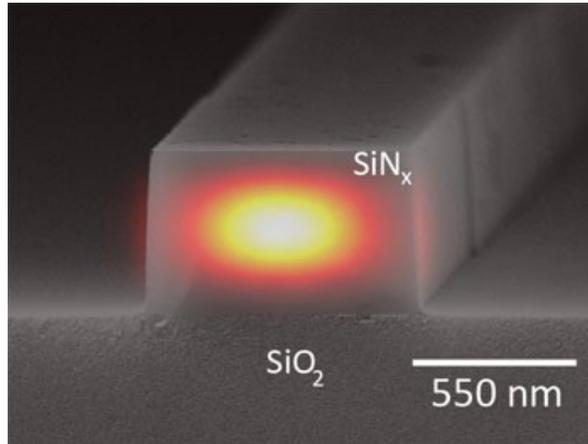
Bao, Jueming, et al. "Very-large-scale integrated quantum graph photonics." *Nature Photonics* 17.7 (2023): 573-581.

> 150 chips



200 mm SOI

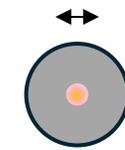
Oltre la miniaturizzazione



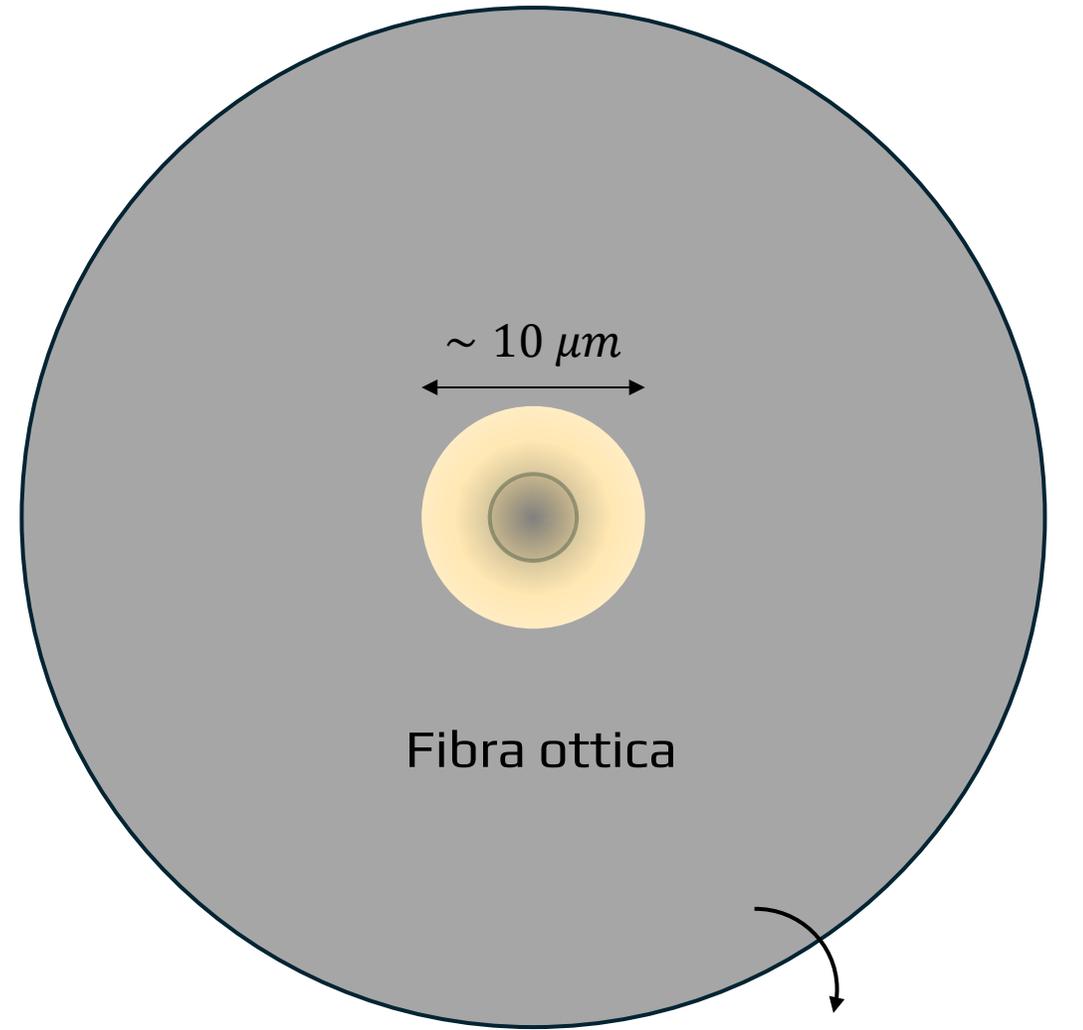
<https://www.nist.gov/news-events/news/2012/09/cnst-researchers-demonstrate-low-noise-chip-based-optical-wavelength>

- Intensità x 100 rispetto a una fibra
- Aumento efficienza energetica
- Stabilità dei percorsi ottici
- No allineamento tra i componenti
- Ridotti costi di produzione

$\sim 1 \mu\text{m}$



Guida
d'onda
integrata



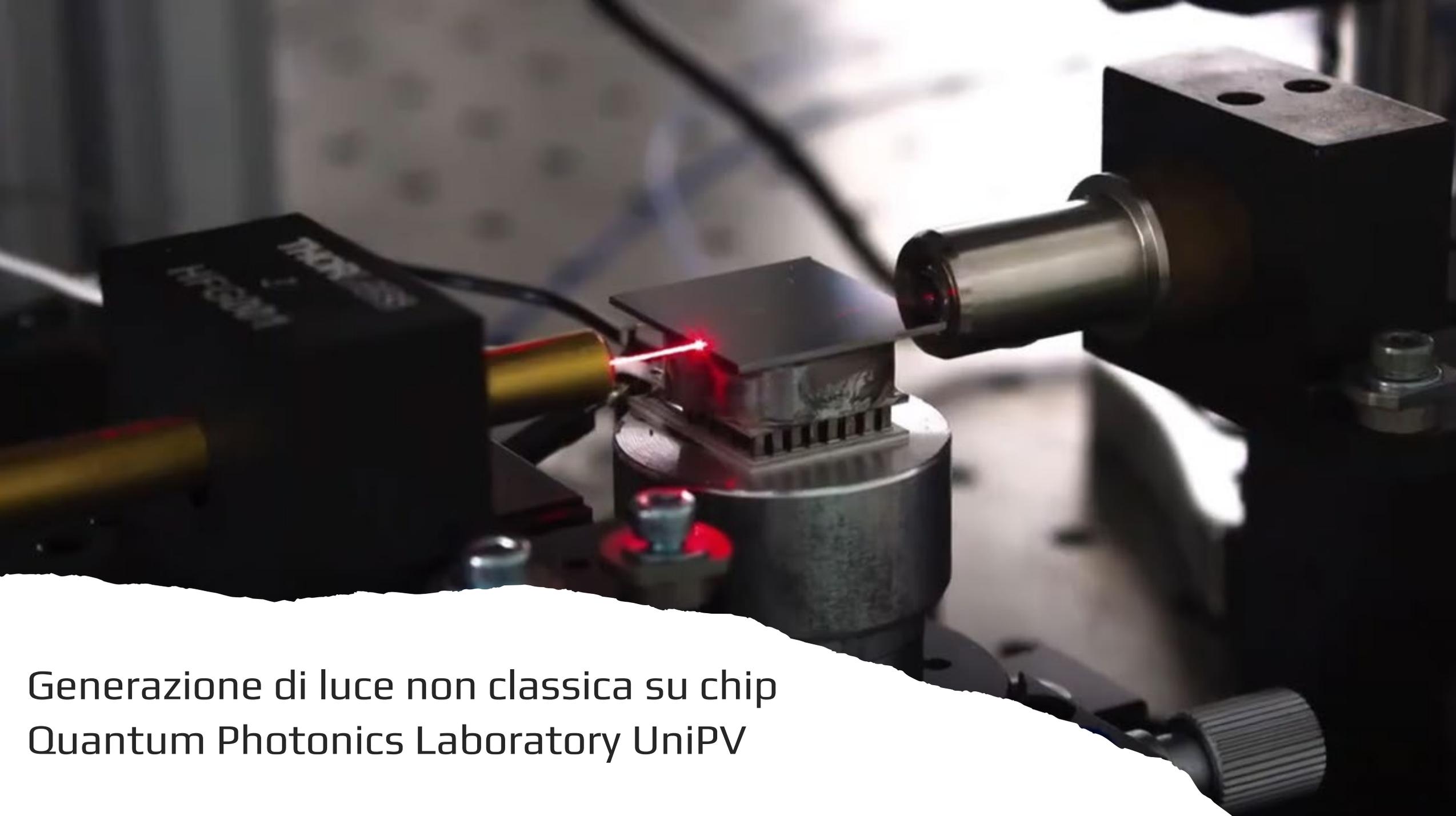
Esterno non in scala
(dimensioni di un capello)

Fotonica quantistica integrata

Parte IV

Ricerca al Quantum Photonics Lab





Generazione di luce non classica su chip
Quantum Photonics Laboratory UniPV

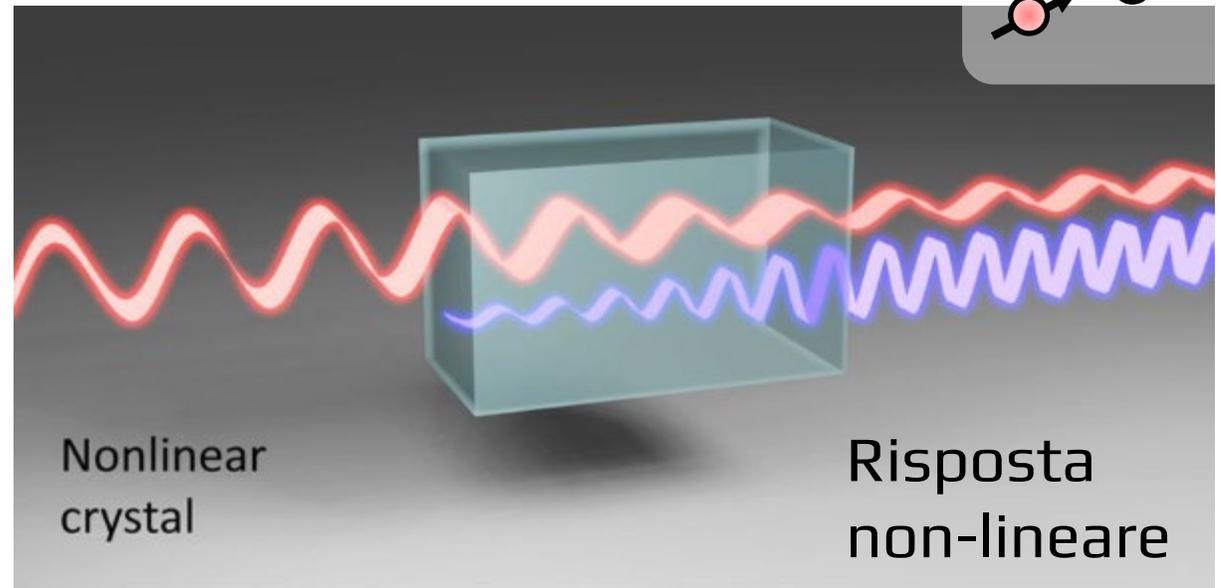
Processi non-lineari nella materia

Ottica **lineare**: riflessione, rifrazione, diffrazione, dispersione, nessuna interazione tra fotoni



<https://laserpointerforums.com/threads/water-surface-reflection.109424/>

Ottica **non-lineare**: interazione tra fotoni e generazione di nuove armoniche (scattering inelastico tra fotoni)



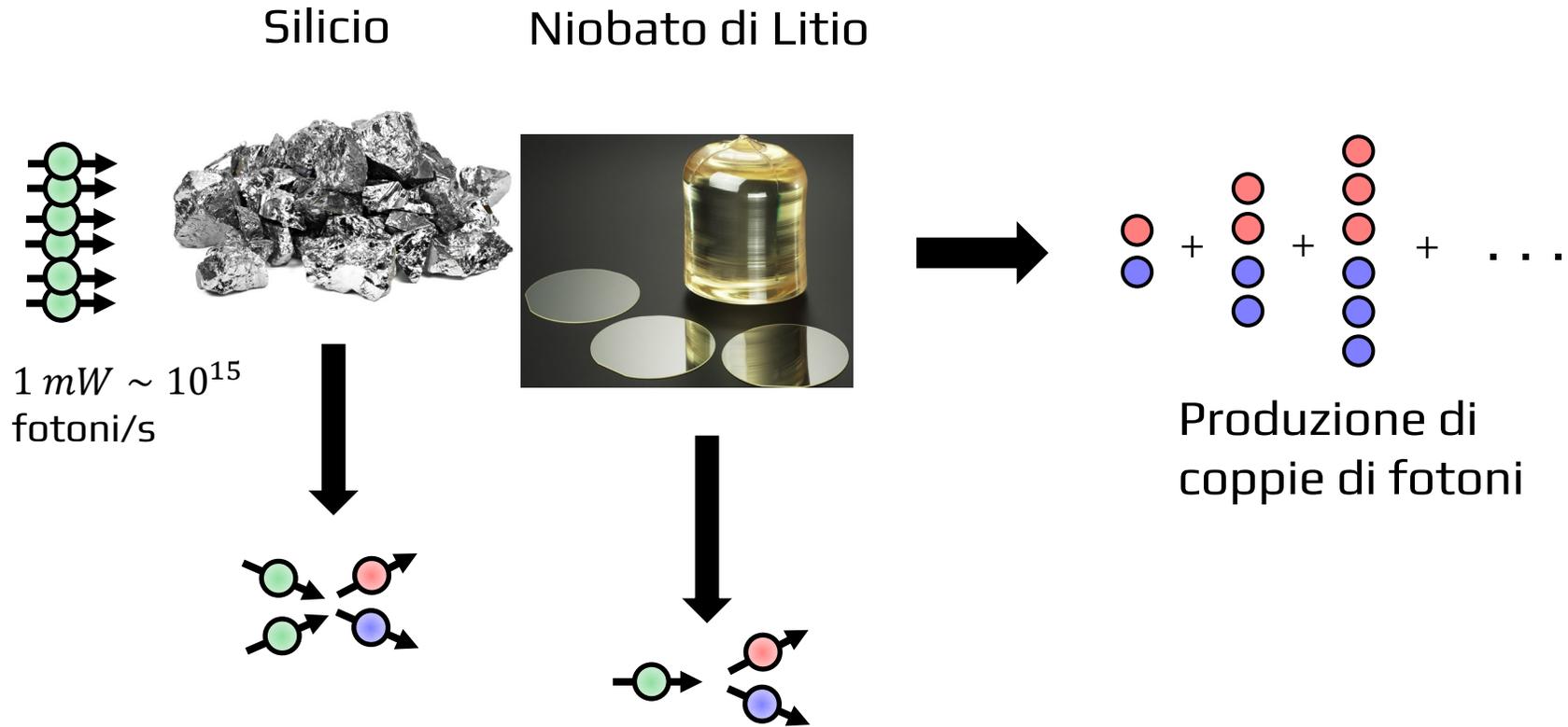
https://www.researchgate.net/figure/illustration-of-the-second-harmonic-generation-in-a-nonlinear-crystal-top-and-a_fig3_370086679

Generazione di luce non-classica

I processi nonlineari nella materia possono essere usati per la generazione di luce non-classica
un esempio è la generazione di coppie di fotoni

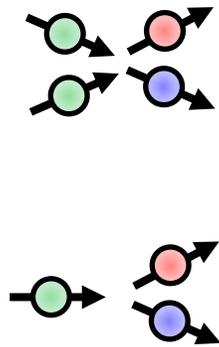


Laser di pompa



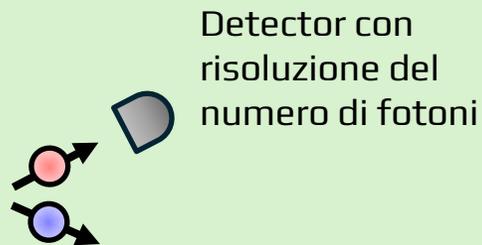
Proprietà delle coppie di fotoni

Le coppie sono «time-energy entangled»



- I fotoni della coppia sono generati allo stesso istante di tempo
- Il tempo di arrivo di un fotone determina quello dell'altro, e viceversa
- L'energia di un fotone della coppia determina l'energia dell'altro e viceversa
- Entangled in numero: il numero di fotoni di un colore sono uguali al numero dell'altro colore

Segnalazione di un singolo fotone!



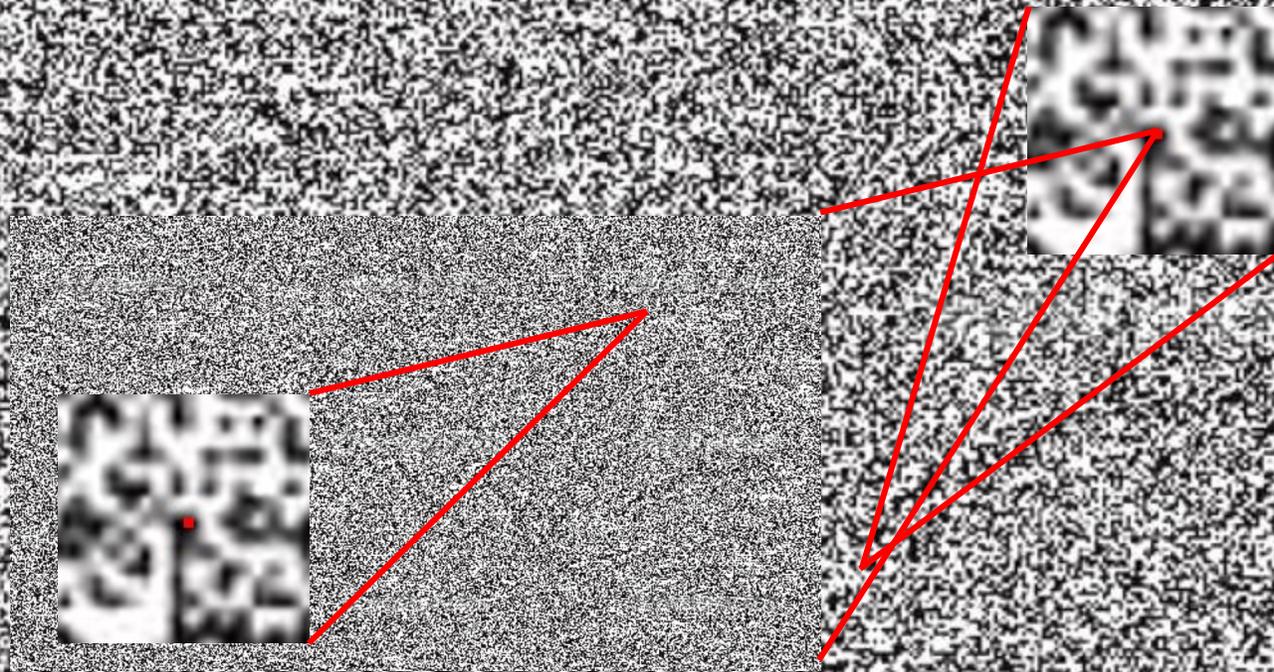
Un click, un fotone!

Impossibile da realizzare con luce «classica»

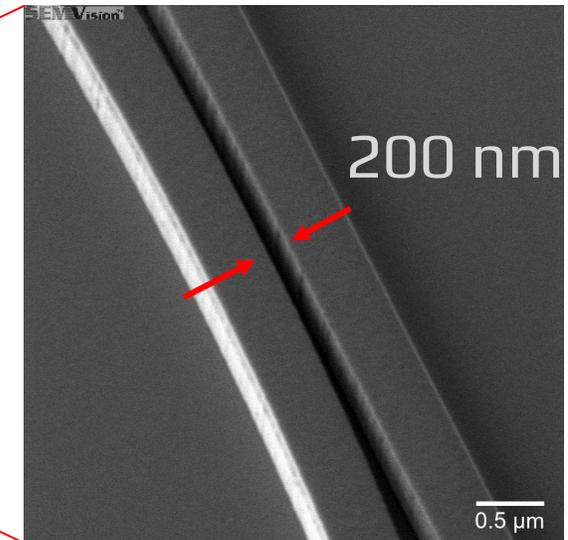
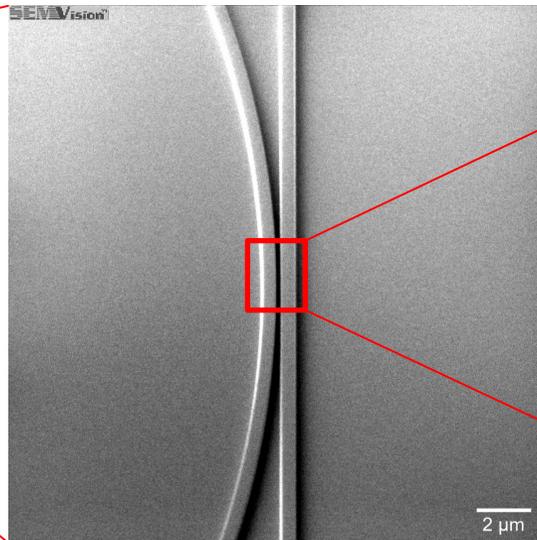
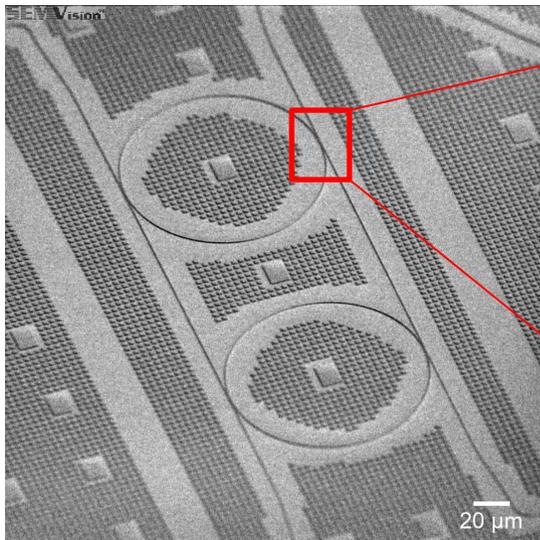
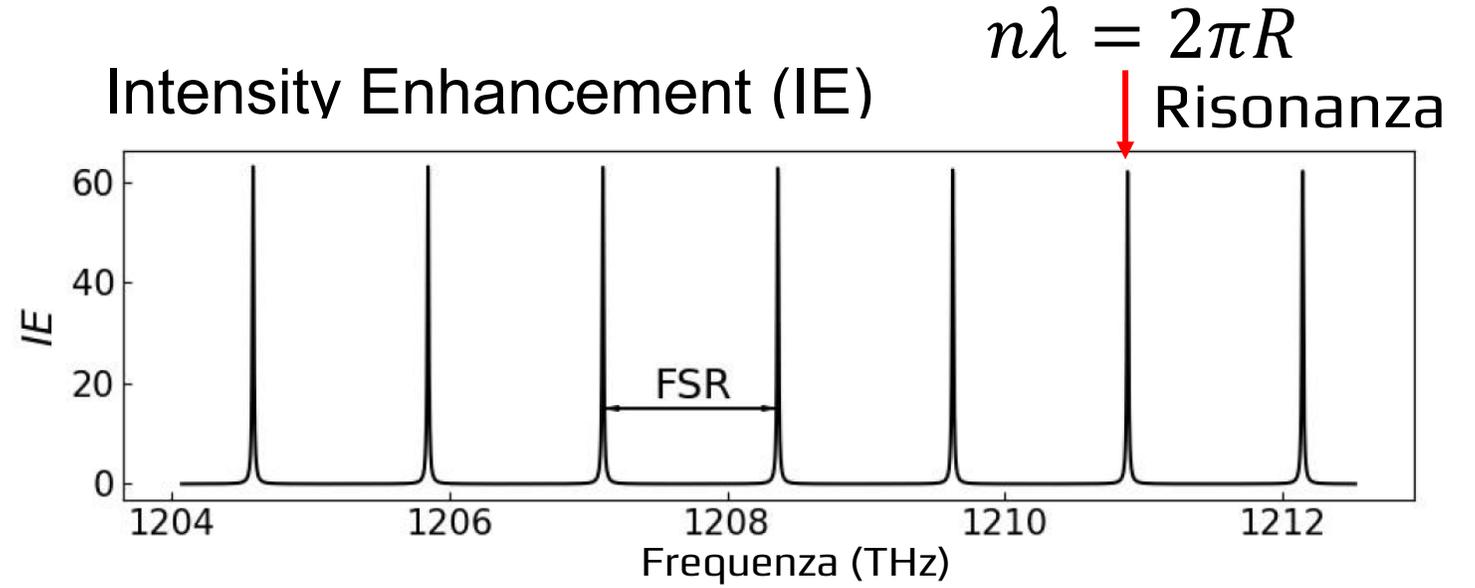
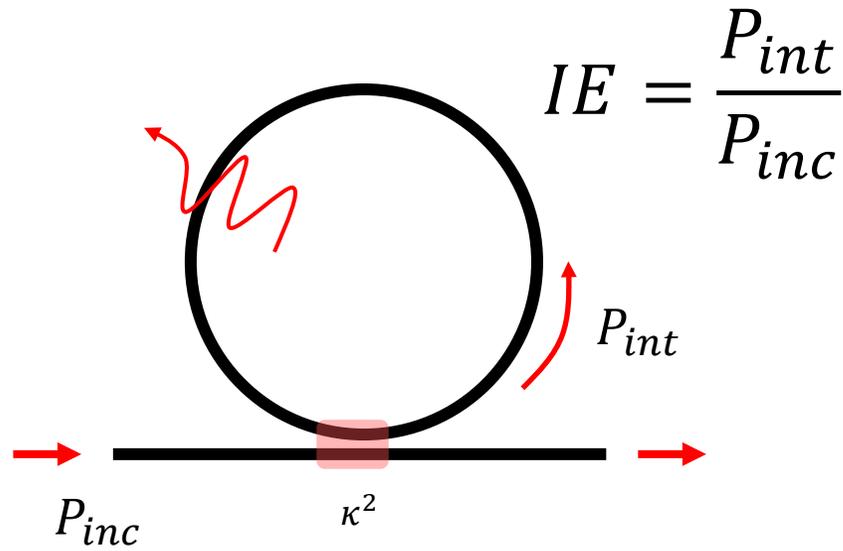


10^{-14}

10^{-7}

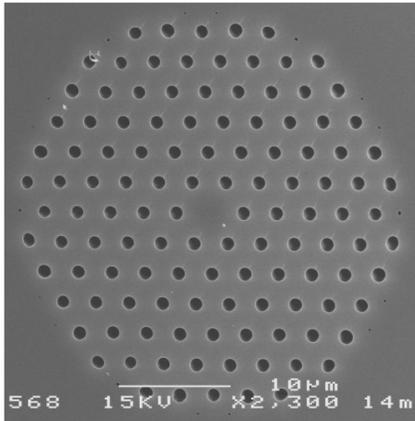


Microrisuonatori ad anello



Sorgenti ultra-efficienti e a ultra-alto rate

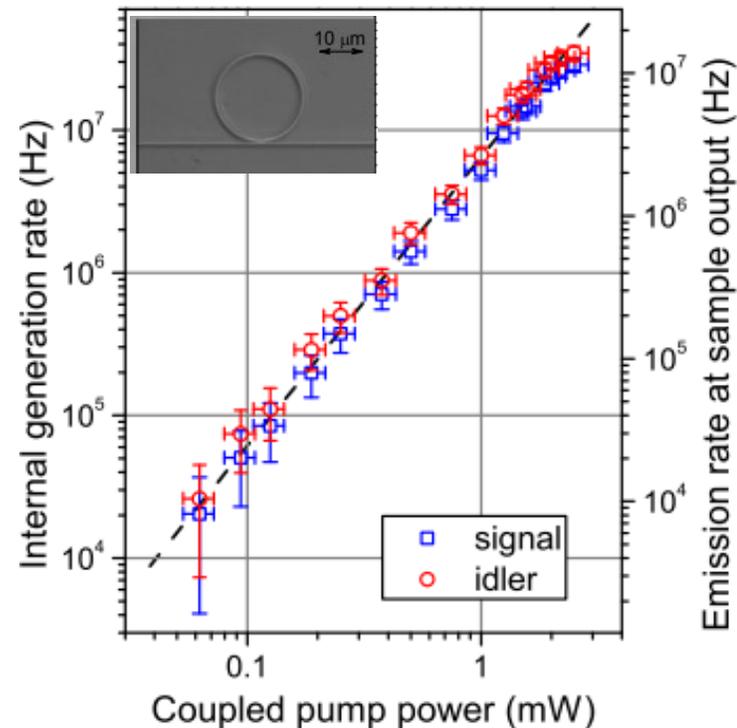
In una fibra
500K coppie/s
100 mW pompa
6 metri



Rarity, J. G., et al., *Opt. Express* 13.2 (2005)



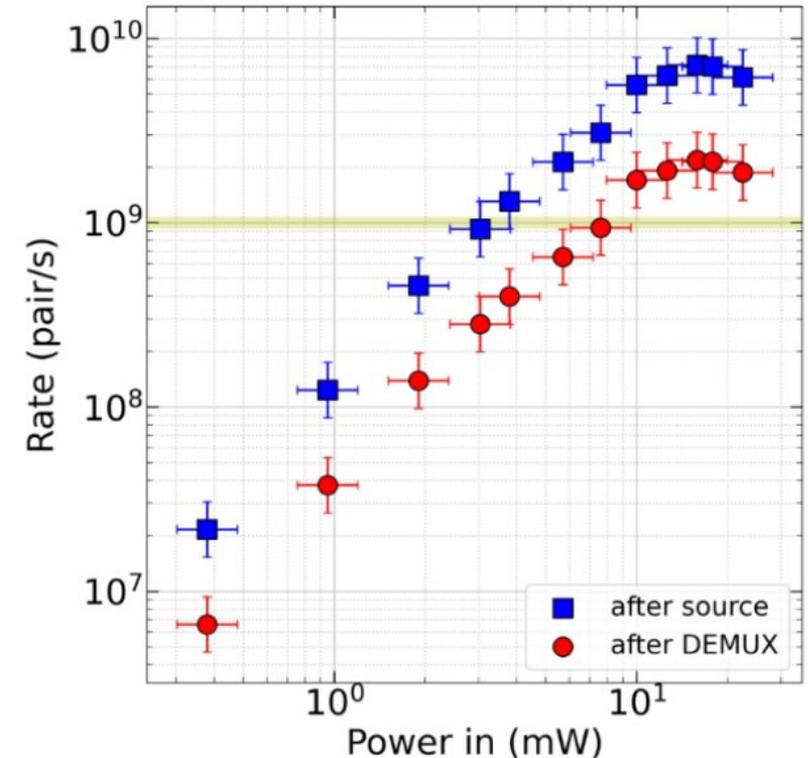
1 milione coppie/s
1 mW pompa



Grassani, Davide, et al. "Micrometer-scale integrated silicon source of time-energy entangled photons." *Optica* 2.2 (2015): 88-94.



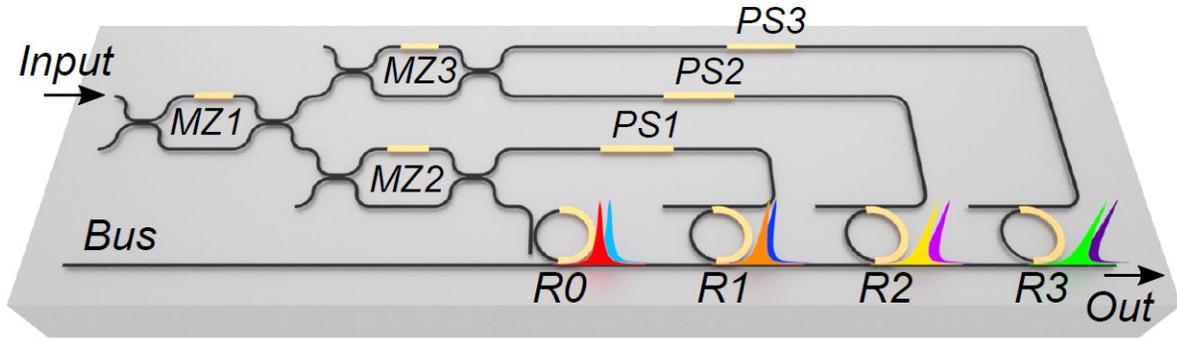
1 miliardo coppie/s
10 mW pompa



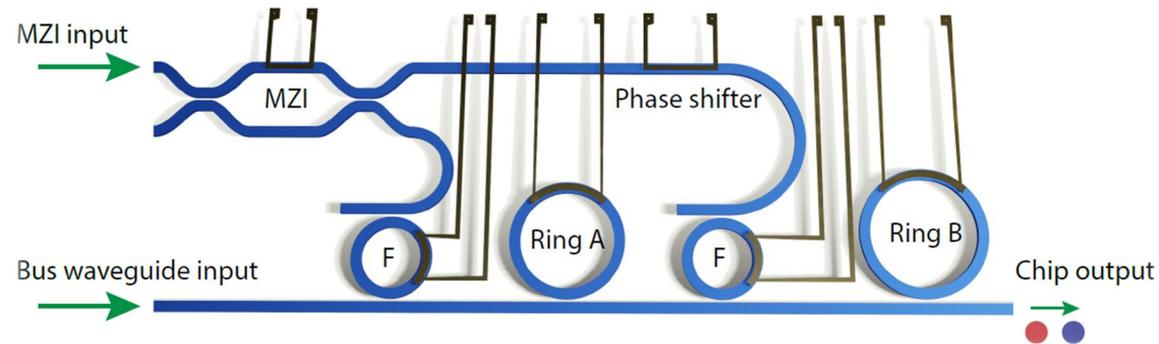
Gianini, Linda, et al. "Hyperentangled photon pairs emitted from an integrated source delivering more than 1 Gpair/s." *CLEO: Fundamental Science*. Optica Publishing Group, 2024.

Ingegnerizzazione dello stato quantistico

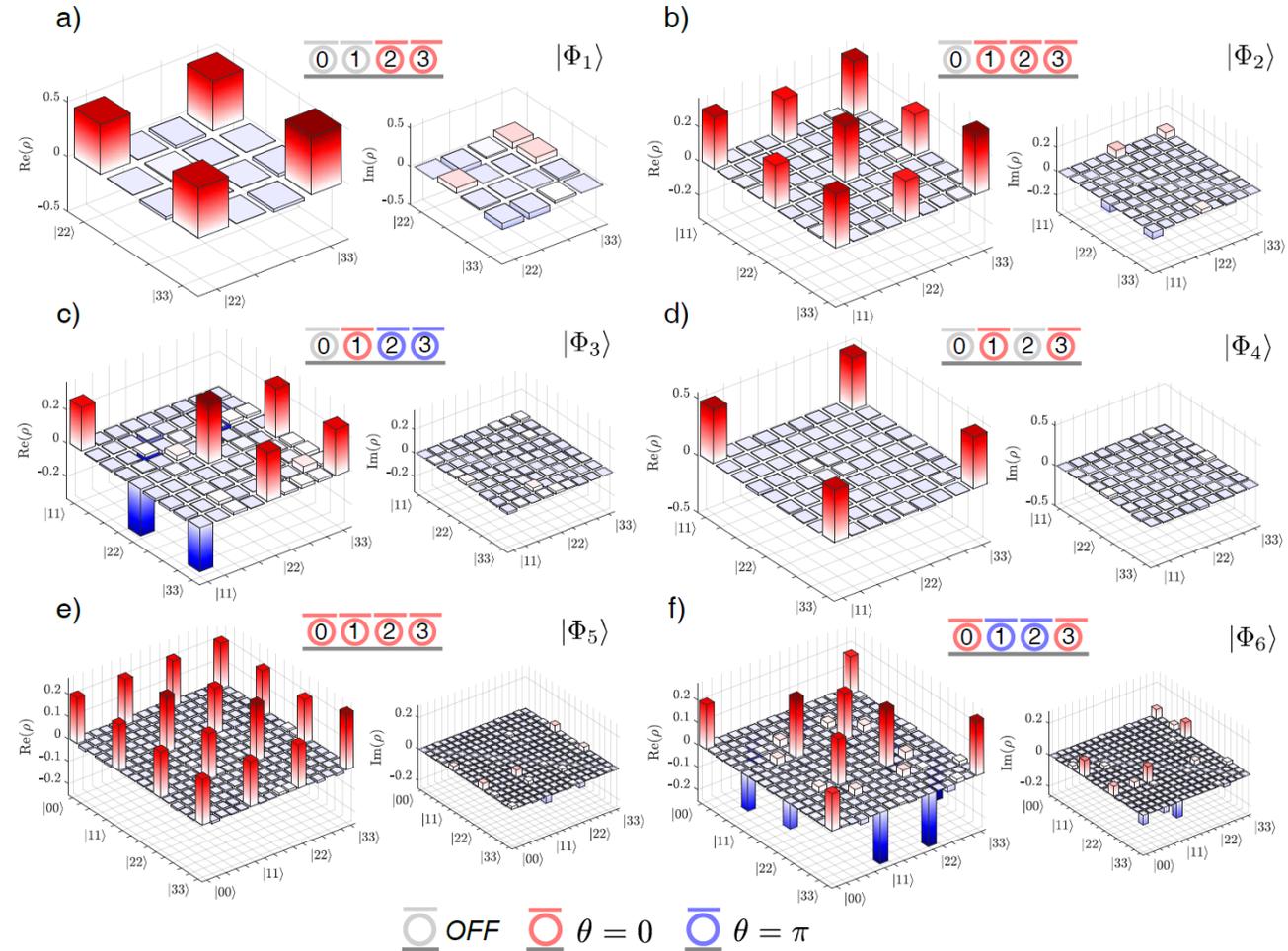
Borghi, Massimo, et al. "Reconfigurable silicon photonic chip for the generation of frequency-bin-entangled qudits." *Physical Review Applied* 19.6 (2023): 064026.



Clementi, Marco, et al. "Programmable frequency-bin quantum states in a nano-engineered silicon device." *Nature Communications* 14.1 (2023): 176.

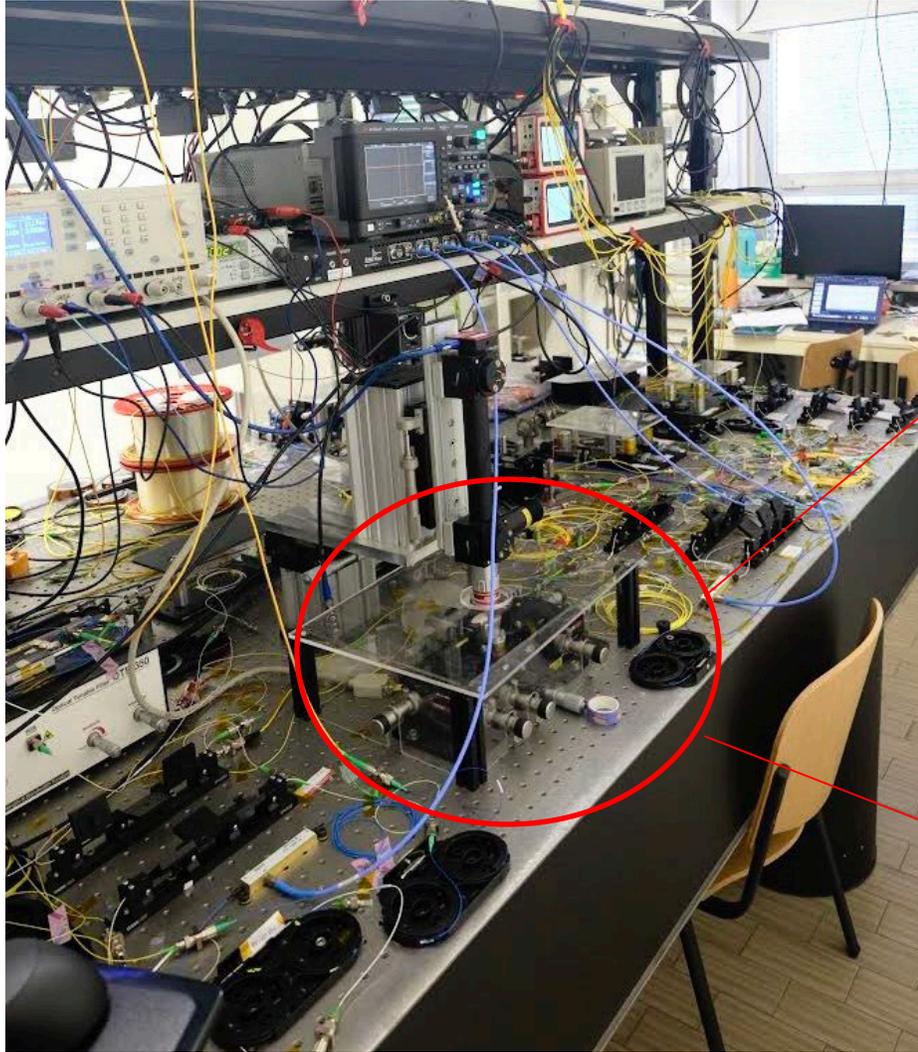


Tomografia quantistica dello stato

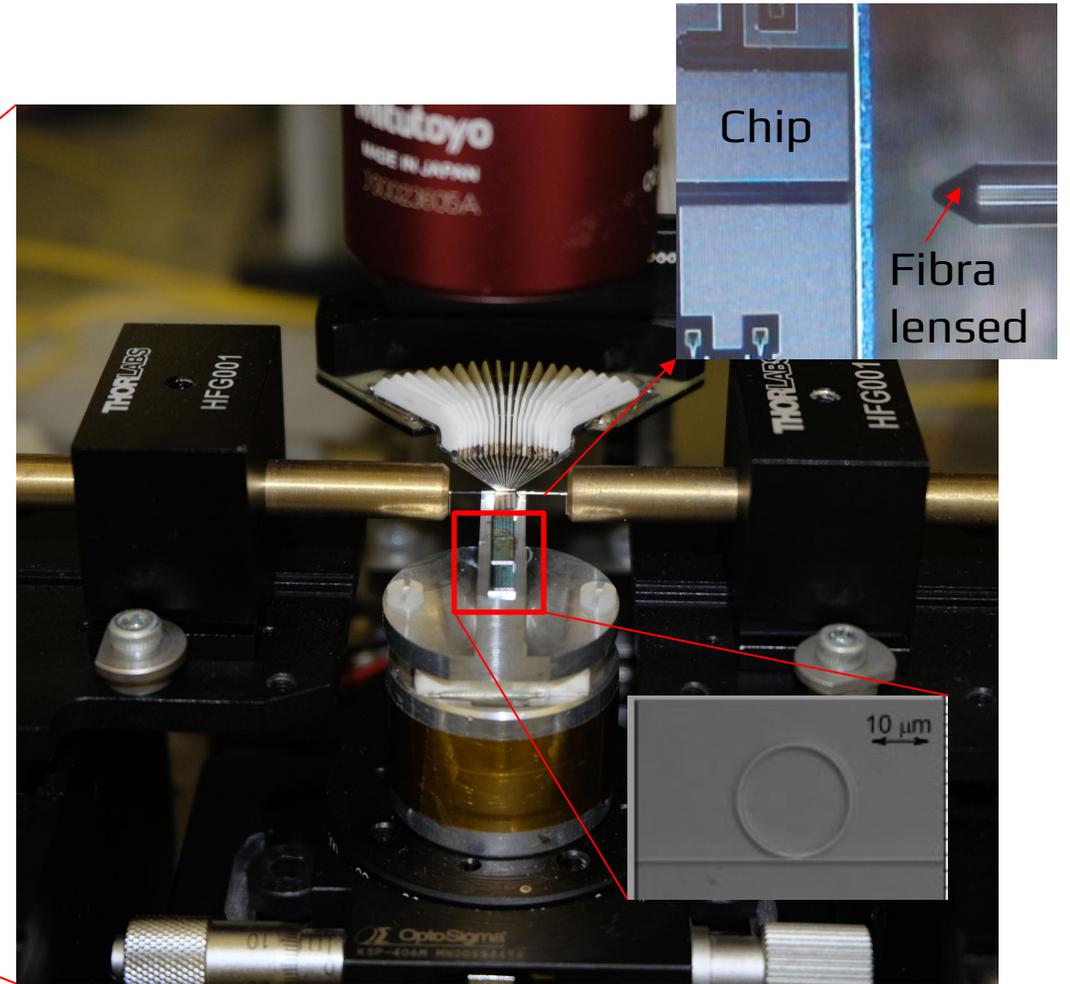


Tutto molto bello. Ma nella pratica?

Ma in pratica cosa facciamo?



Uno dei tavoli ottici

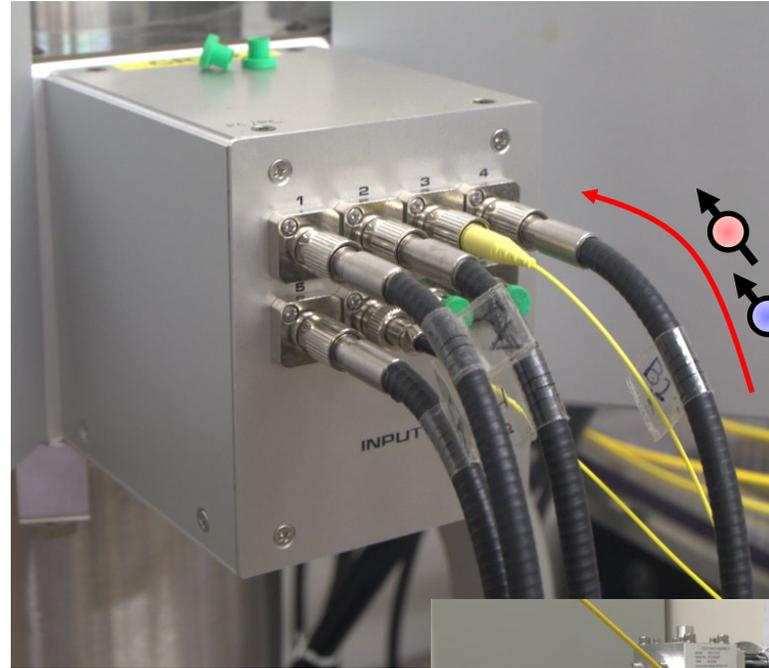


Setup di accoppiamento luce-chip

Ma in pratica cosa facciamo?

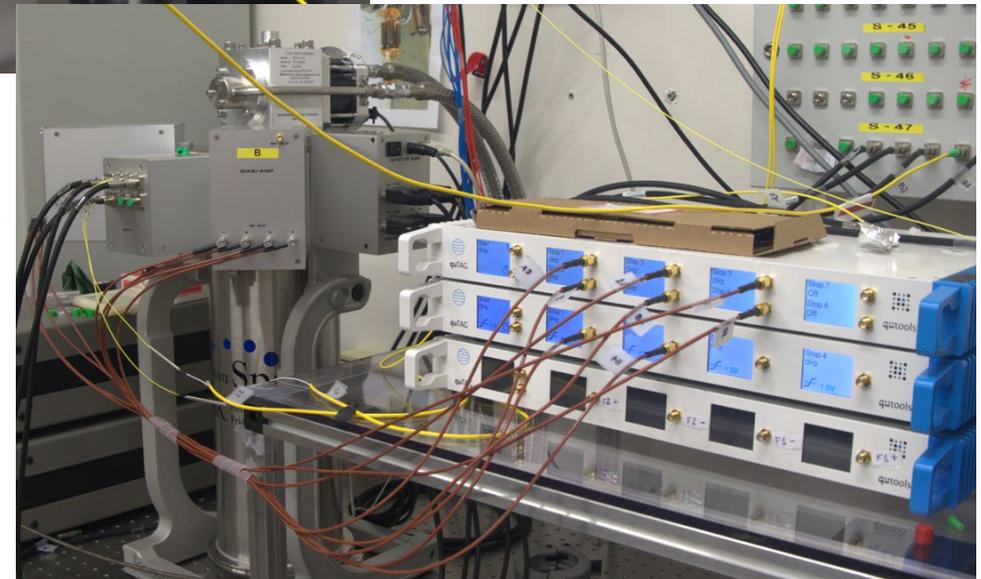


8 detector singolo fotone
superconduttori a 0.8 K



Collegamenti in
fibra ottica tra
tutti i laboratori
ai detector

Registrazione
tempi di
arrivo singoli
fotoni

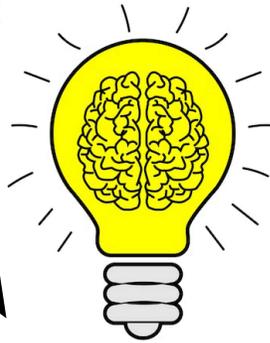


Nascita e sviluppo di un esperimento al Qlab

Quantum Photonics laboratory

Brainstorming

Progetti italiani e internazionali

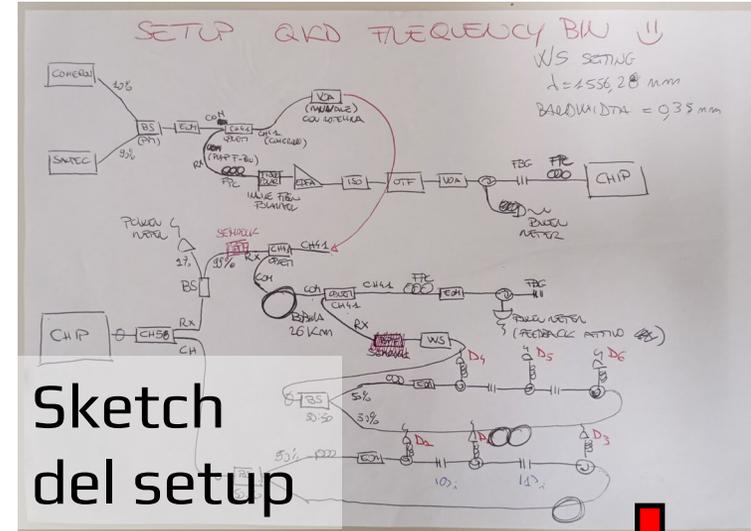


Collaborazioni
<https://www.liscidini.com/>

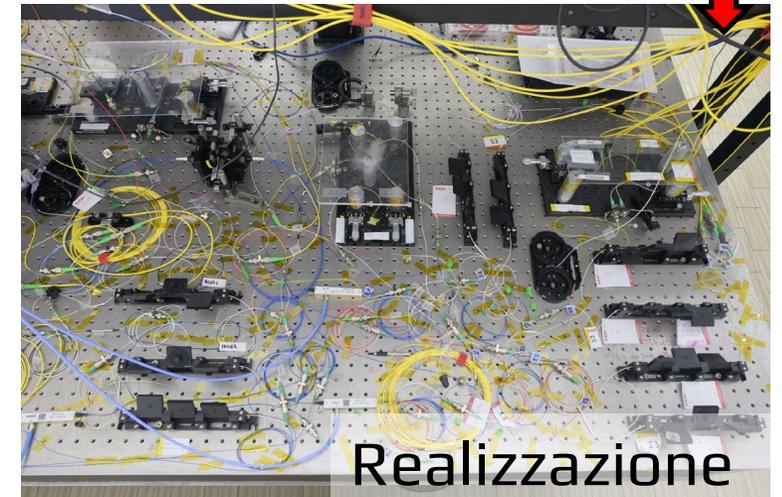
Studio di fattibilità



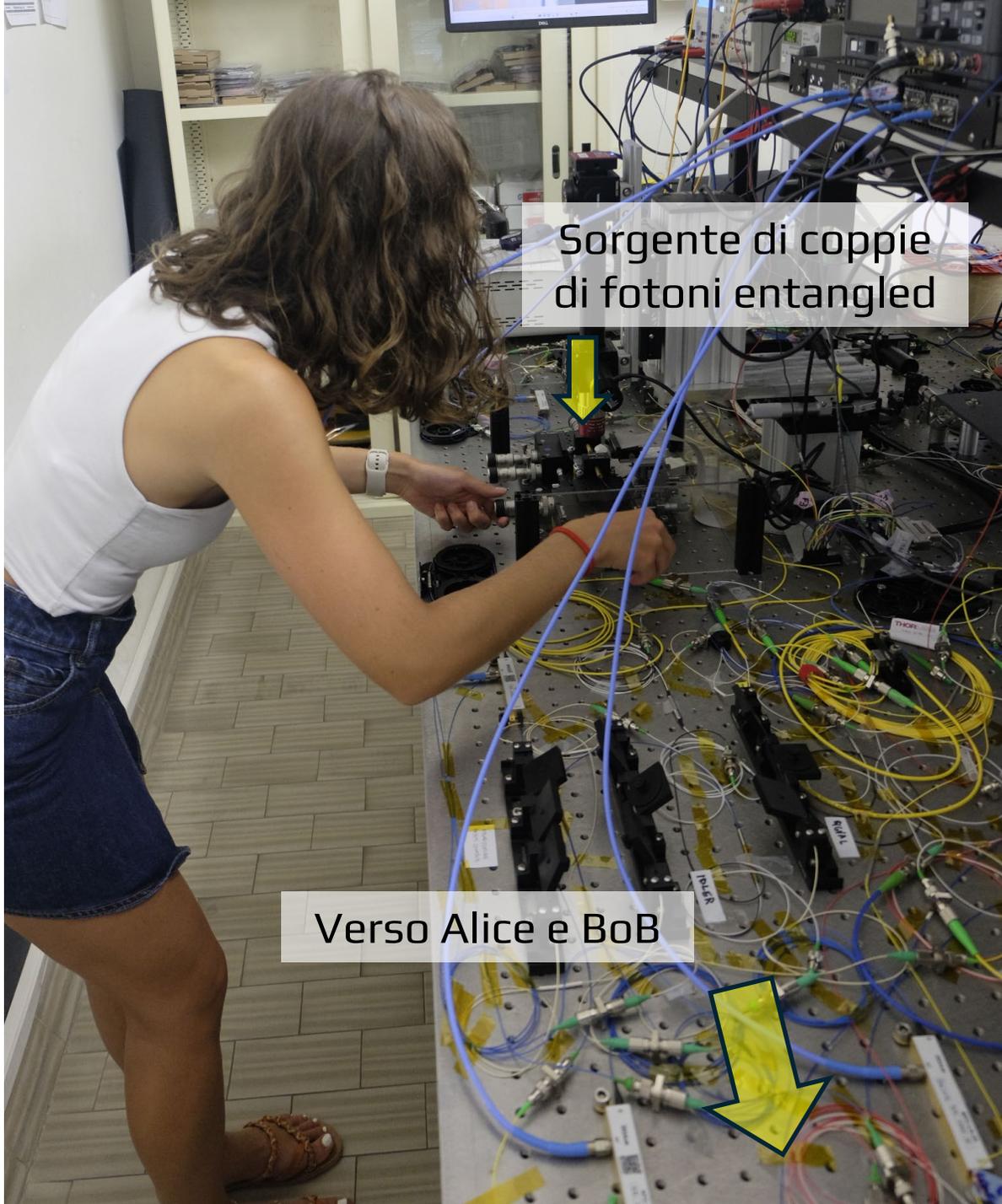
Design e simulazione dei dispositivi
Fabbricazione esterna



Sketch del setup



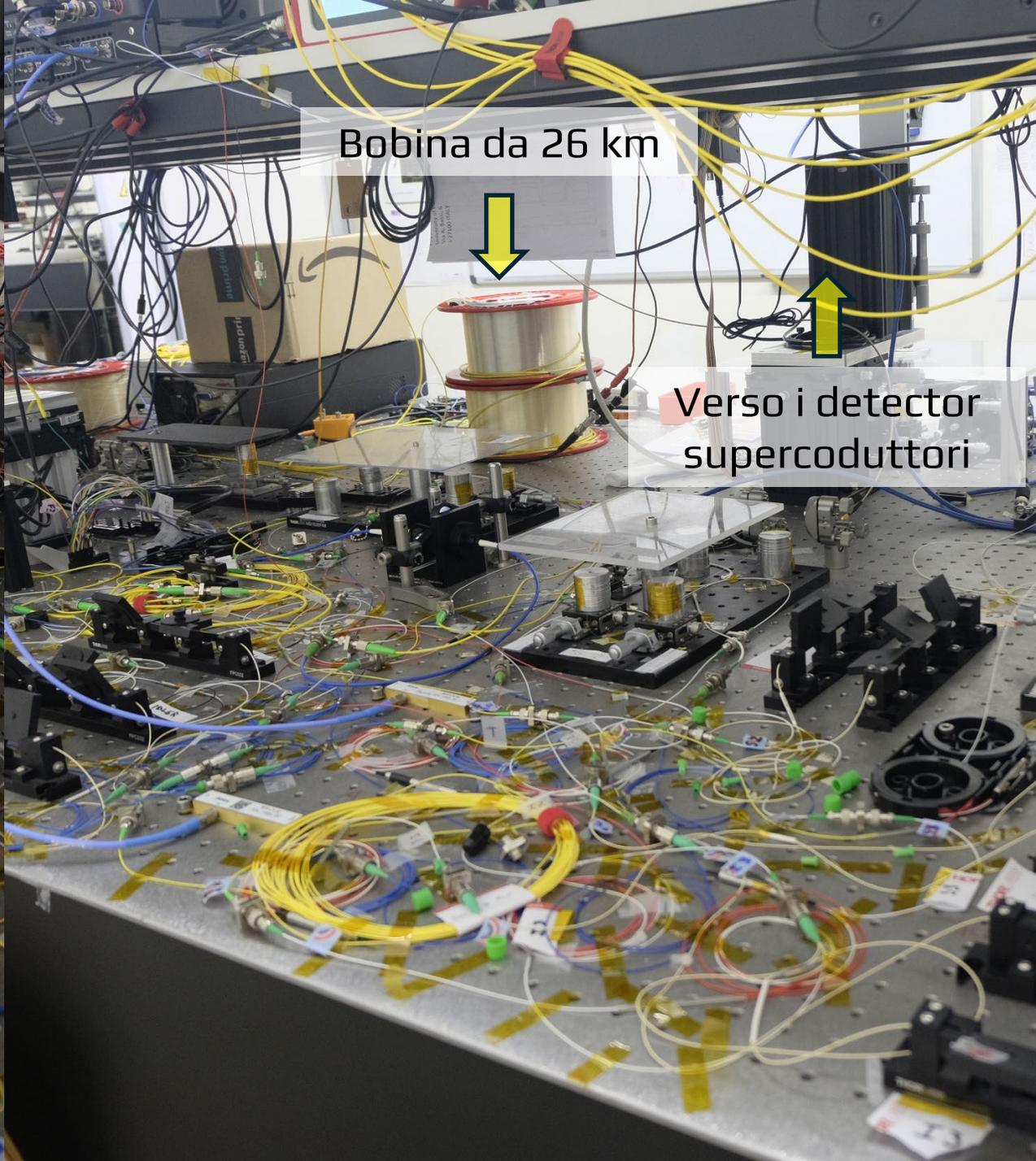
Realizzazione



Sorgente di coppie di fotoni entangled



Verso Alice e BoB

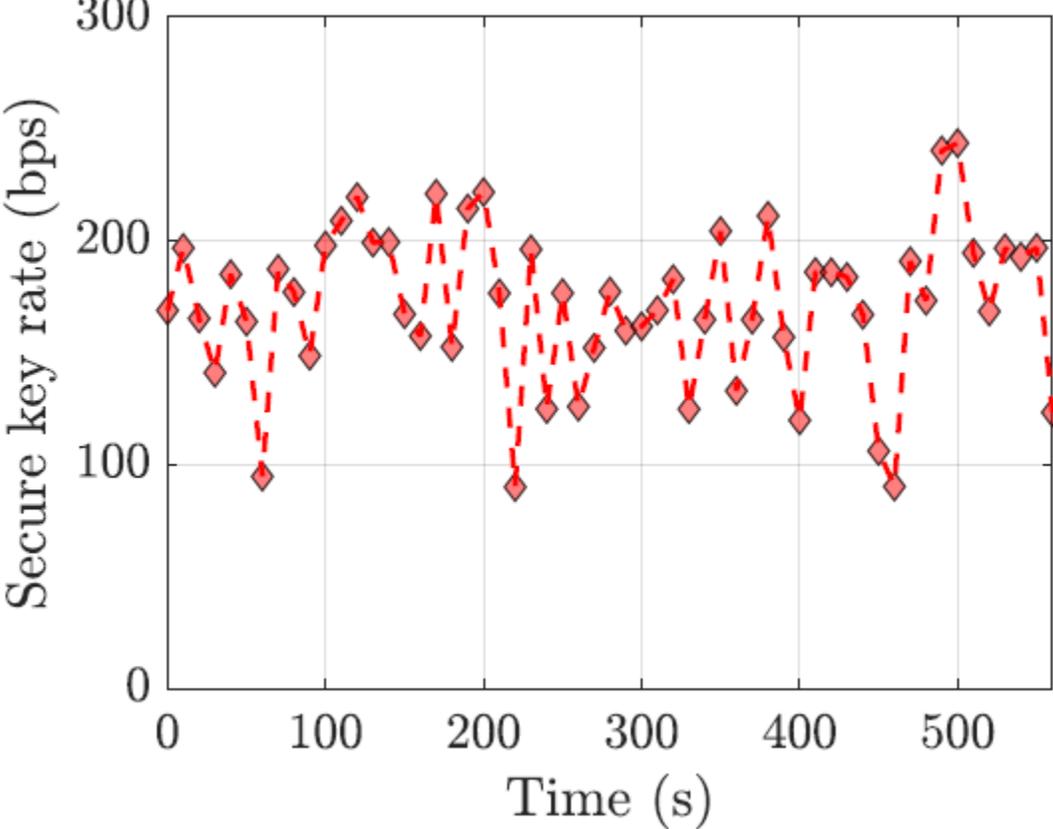
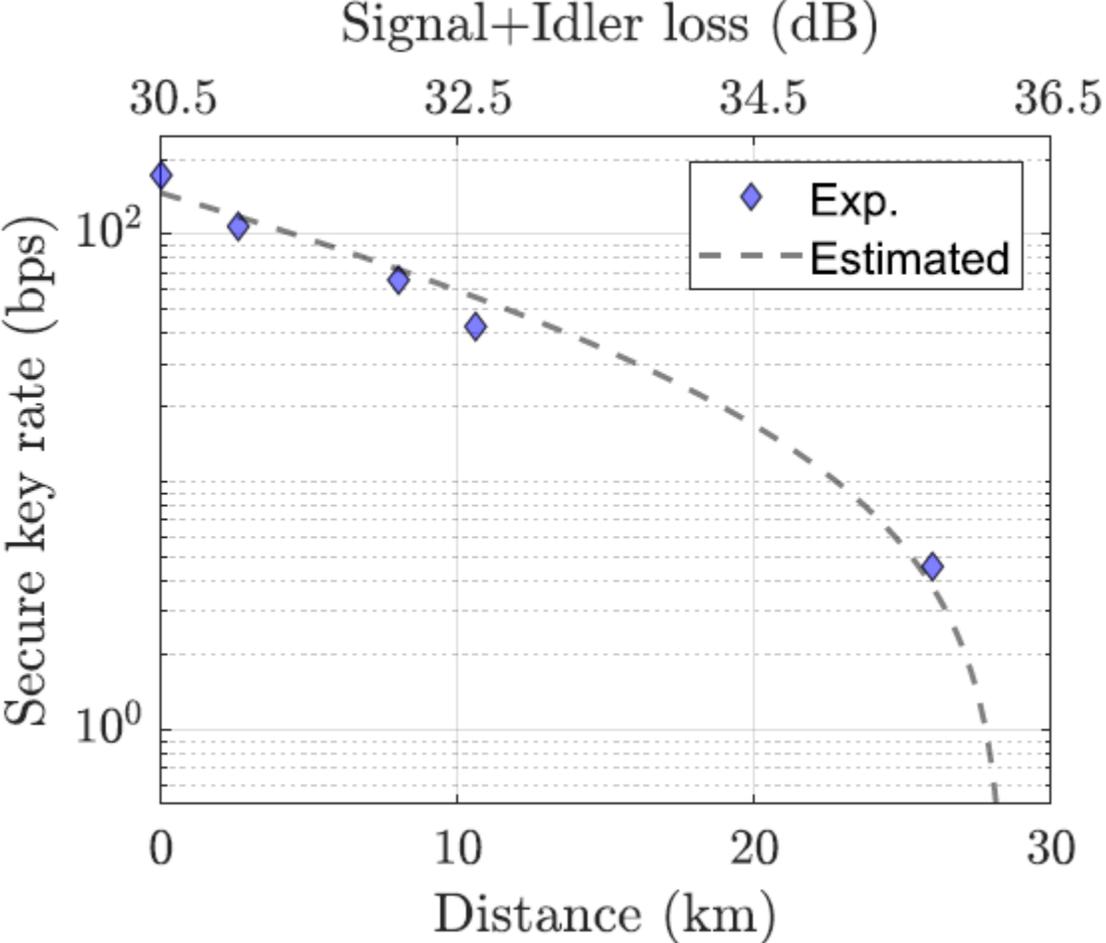


Bobina da 26 km



Verso i detector superconduttori

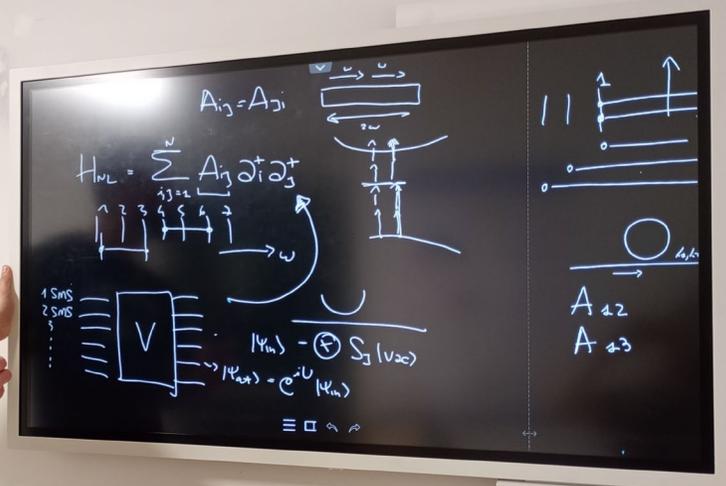
Distribuzione di chiave quantistica con coppie di fotoni entangled



Tagliavacche, Noemi, et al. "Frequency-bin entanglement-based quantum key distribution." *arXiv preprint arXiv:2411.07884* (2024).

Chiusura di loop-hole nella distribuzione di chiave quantistica in circuiti ultraveloci in Niobato di Litio

Esperimenti a 4 fotoni per la computazione quantistica in circuiti in Nitruro di Silicio



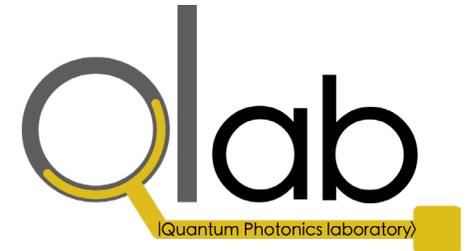
Generazione di coppie hyper-entangled in circuiti in Silicio

Per saperne di più...



Maggiori informazioni

matteo.galli@unipv.it
daniele.bajoni@unipv.it
massimo.borghi@unipv.it
marco.clementi01@unipv.it



Laboratorio di Fotonica Quantistica
Dipartimento di Fisica
Piano -1

Tesi magistrali/triennali disponibili!

**WE'RE
HIRING!**