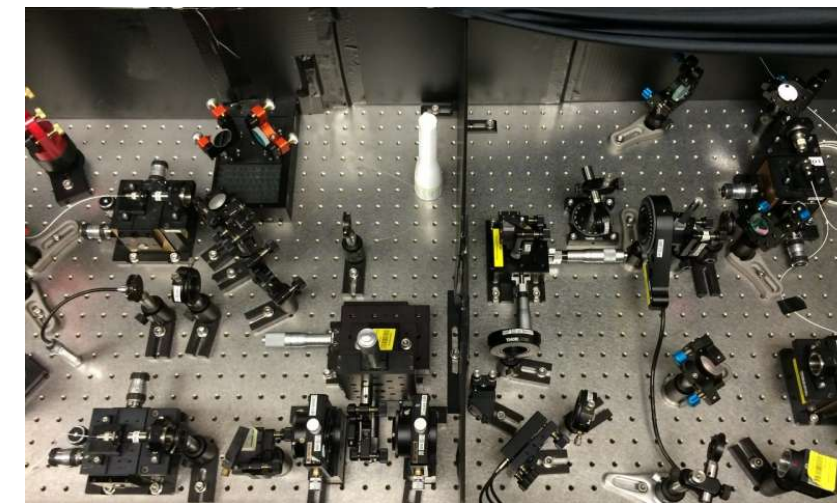


# FISICA DELLE TECNOLOGIE QUANTISTICHE

Pavia prima in Italia

**QUit**  
quantum information  
theory group

+



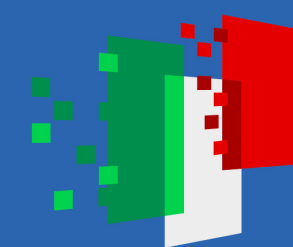
Gruppo di fotonica  
quantistica



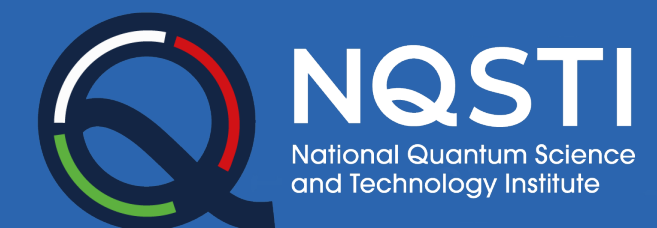
Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANO NAZIONALE  
DI RIPRESA E RESILIENZA



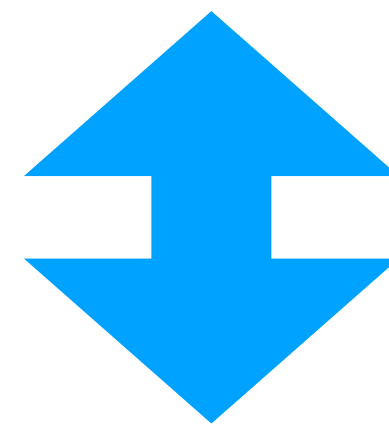


# QUANTUM INFORMATION: ORIGINS

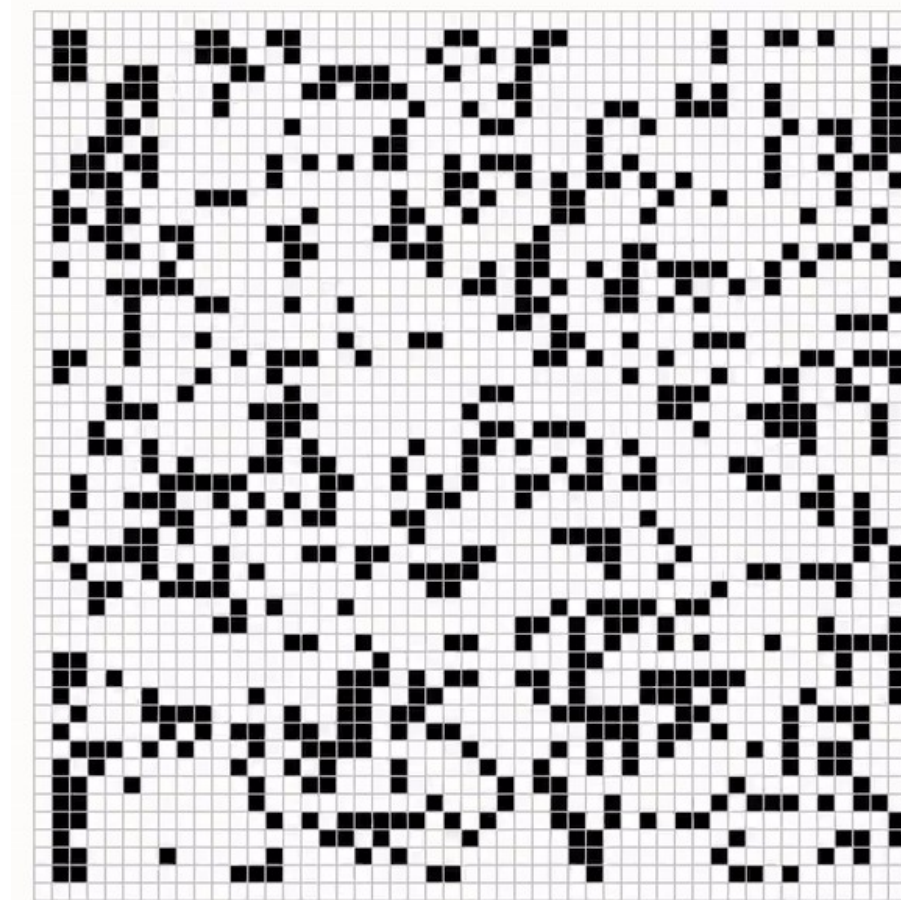


## Quantum computer

N qubits:  $d=2^N$



quantum  
parallelism



*Journal of Statistical Physics, Vol. 22, No. 5, 1980*

**The Computer as a Physical System: A Microscopic  
Quantum Mechanical Hamiltonian Model of Computers  
as Represented by Turing Machines**

Paul Benioff<sup>1,2</sup>

*Received June 11, 1979; revised August 9, 1979*

*International Journal of Theoretical Physics, Vol. 21, Nos. 6/7, 1982*

**Simulating Physics with Computers**

Richard P. Feynman

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

*Received May 7, 1981*

“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.”



# QUANTUM INFORMATION: ORIGINS

*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)*



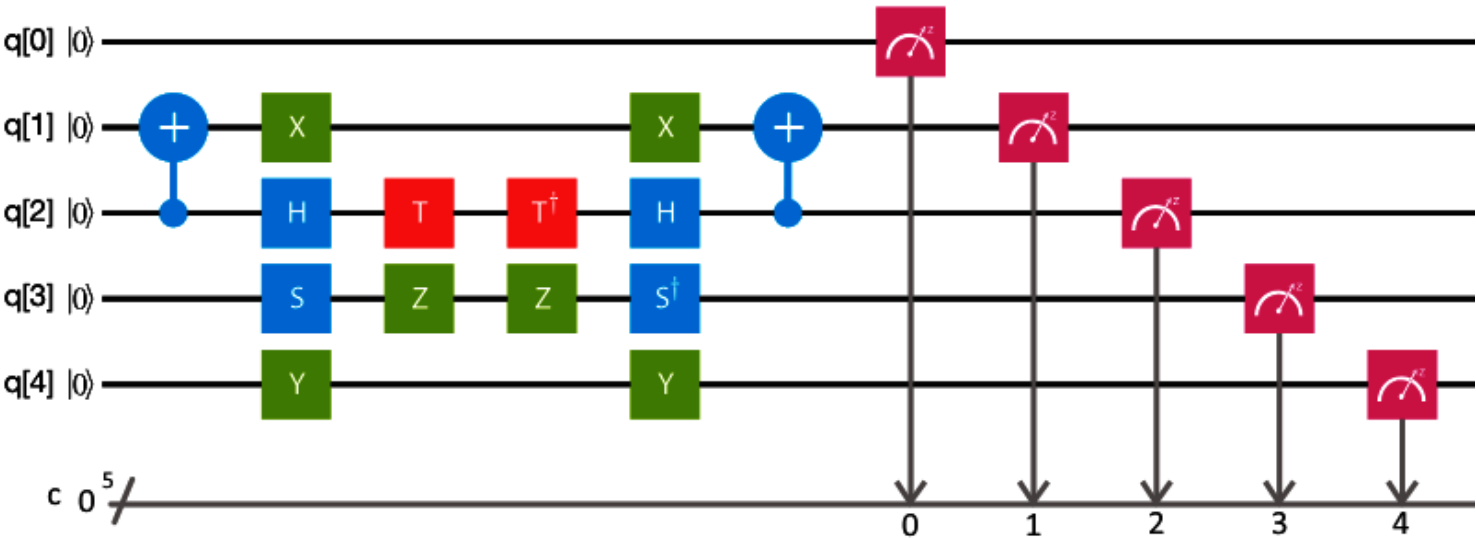
*Proc. R. Soc. Lond. A* **425**, 73–90 (1989)  
*Printed in Great Britain*

## Quantum computational networks

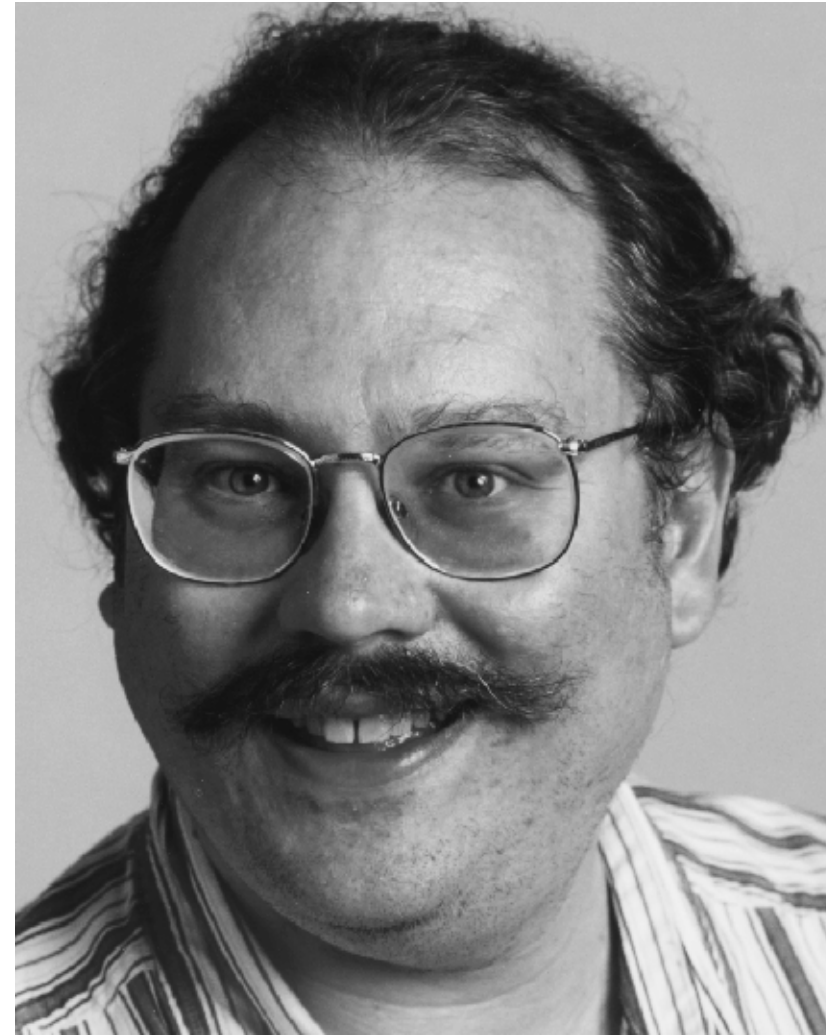
BY D. DEUTSCH

*Oxford University Mathematical Institute, 24–29 St Giles, Oxford OX1 3LB, U.K.*

*(Communicated by R. Penrose, F.R.S. – Received 8 July 1988)*



# QUANTUM INFORMATION: ORIGINS



## **Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring**

Peter W. Shor  
AT&T Bell Labs  
Room 2D-149  
600 Mountain Ave.  
Murray Hill, NJ 07974, USA

0272-5428/94 \$04.00 © 1994 IEEE

**A quantum computer can  
break RSA encryption**



**...and crack bitcoin**





# QUANTUM INFORMATION: ORIGINS

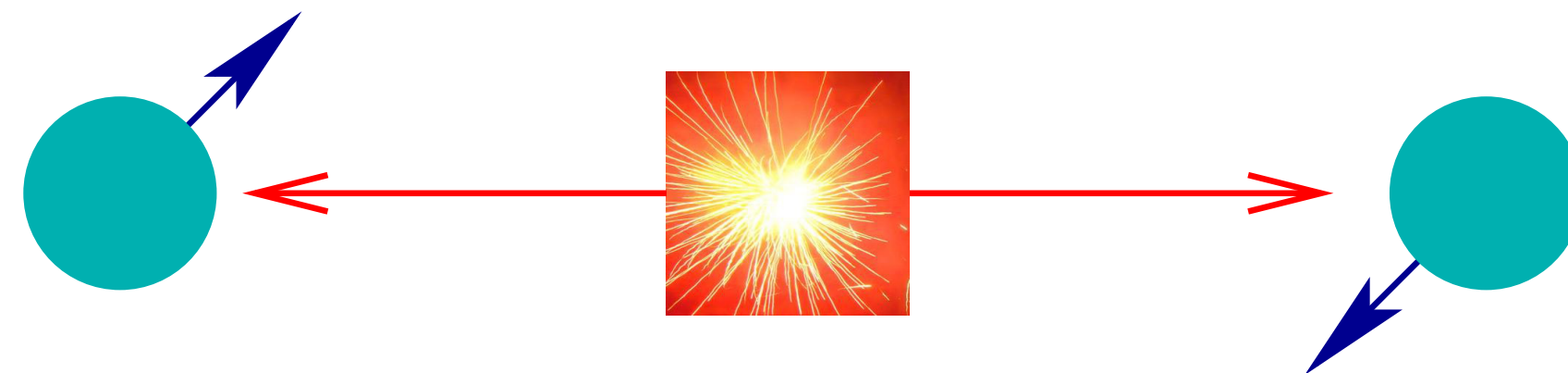


**quantum cryptography**



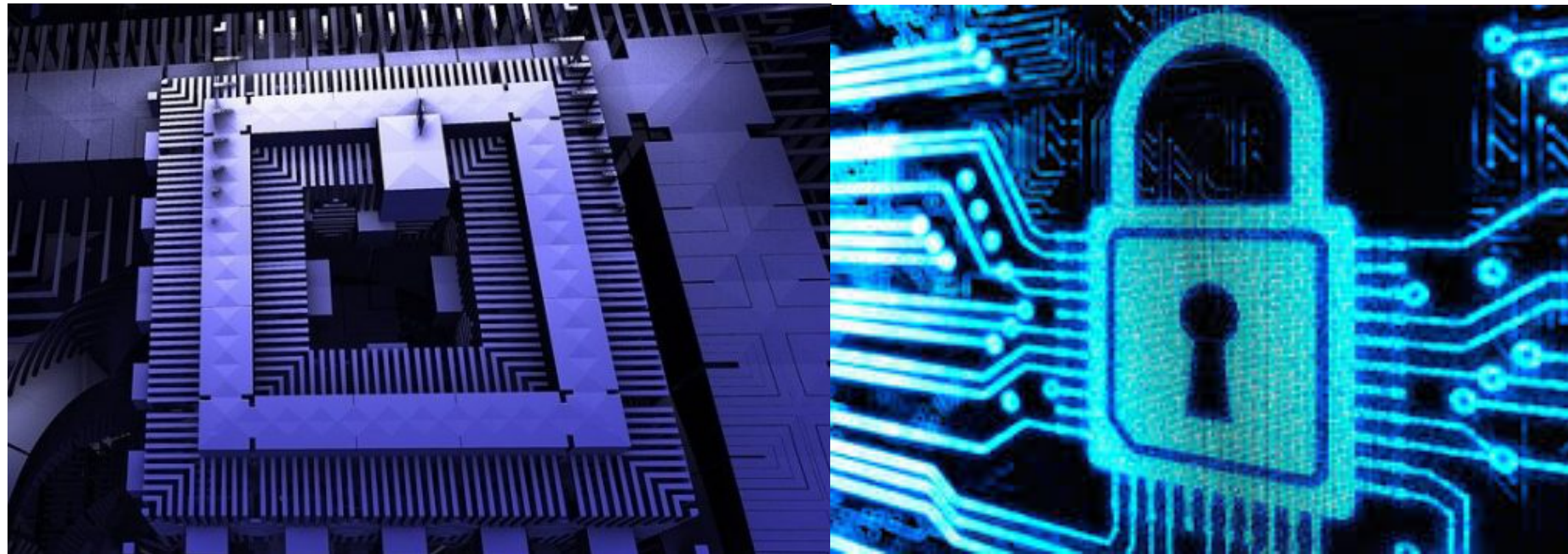
**security by physical laws**

**no info without disturbance**





# QUANTUM TECHNOLOGIES



supercomputing

cryptography

randomness generation

sensing, imaging, measurements

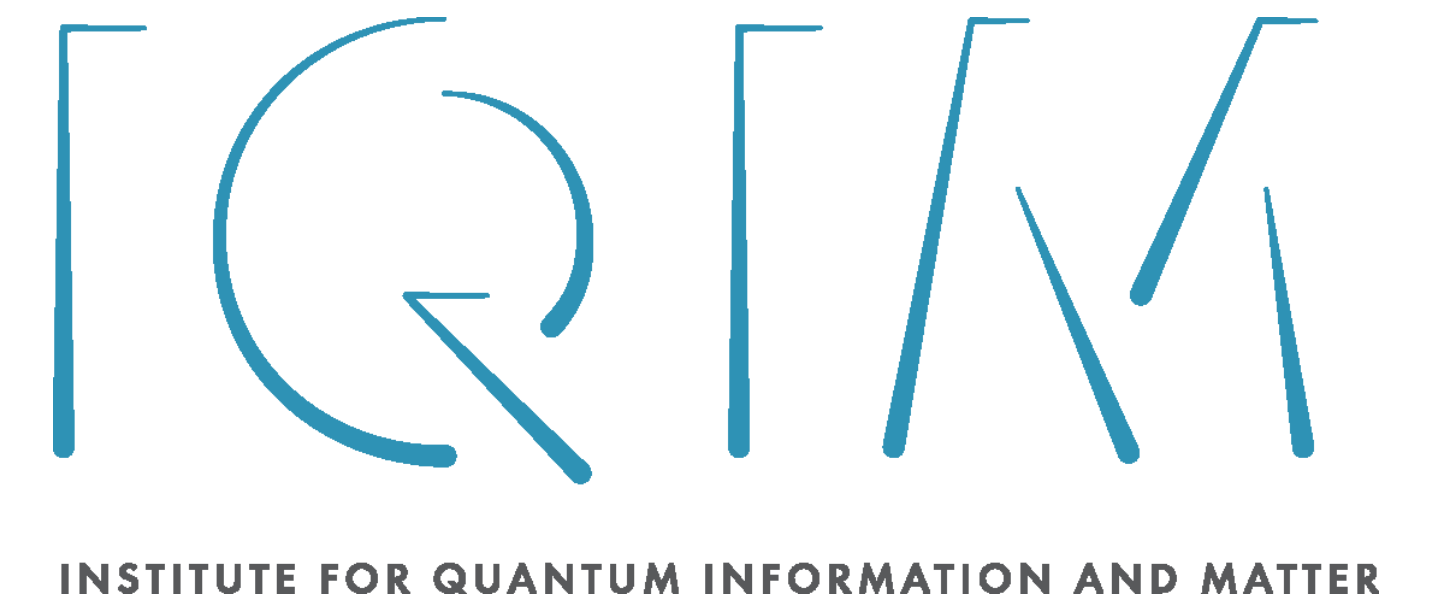
simulations for research and development

efficiency & bandwidth of communications





# QUANTUM INFORMATION AND FOUNDATIONS



UNIVERSITY OF  
WATERLOO







# 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.

[LEARN MORE](#)



# Early 2000



## Quantum Foundations in the Light of Quantum Information

Christopher A. Fuchs

*Computing Science Research Center  
Bell Labs, Lucent Technologies  
Room 2C-420, 600–700 Mountain Ave.  
Murray Hill, New Jersey 07974, USA*

### COMMENTARY

---

## Is information the key?

---

GILLES BRASSARD

is in the Département d'informatique et de recherche opérationnelle, Université de Montréal, Québec H3C 3J7, Canada.

e-mail: [brassard@iro.umontreal.ca](mailto:brassard@iro.umontreal.ca)

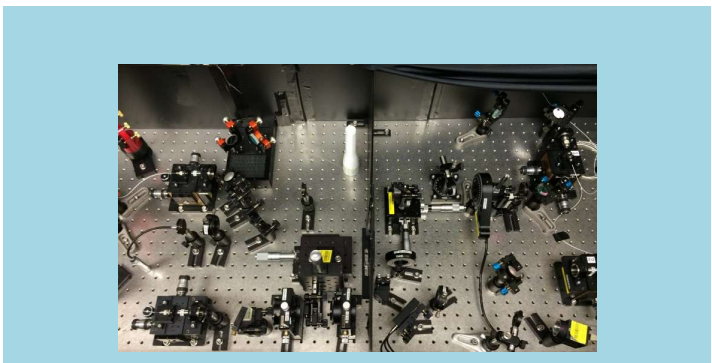
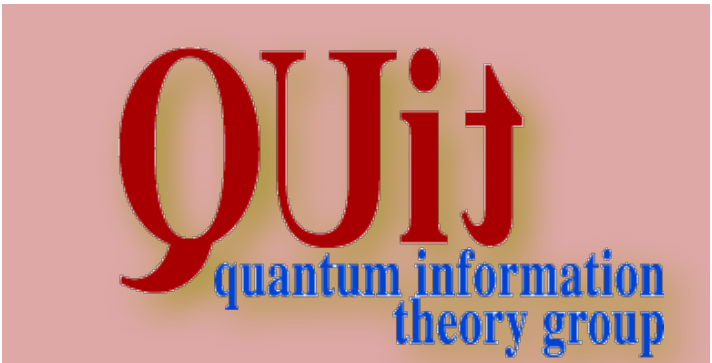
Quantum information science has brought us novel means of calculation and communication. But could its theorems hold the key to understanding the quantum world at its most profound level? Do the truly fundamental laws of nature concern — not waves and particles — but information?



# FISICA DELLE TECNOLOGIE QUANTISTICHE

## 12 INSEGNAMENTI

8 insegnamenti dal seguente elenco,  
di cui **1** in FIS/01, **3** di FIS/02 e **4** di FIS/03



Insegnamento	Settore	Semestre
Laboratorio di Fisica Quantistica	FIS/01	II
Fondamenti della Meccanica Quantistica	FIS/02	I
Fisica Quantistica della Computazione	FIS/03	II
Fotonica	FIS/03	I
Teoria Fisica dell'Informazione	FIS/02	I
Nanostrutture Quantistiche	FIS/03	II
Ottica Quantistica	FIS/03	I
Termodinamica Quantistica	FIS/02	I
Meccanica Statistica (triennale)	FIS/02	II
Gruppi e Simmetrie Fisiche	FIS/02	II
Magnetismo e Superconduttività	FIS/03	I
Fisica dello Stato Solido I	FIS/03	I

2 insegnamenti a scelta libera.

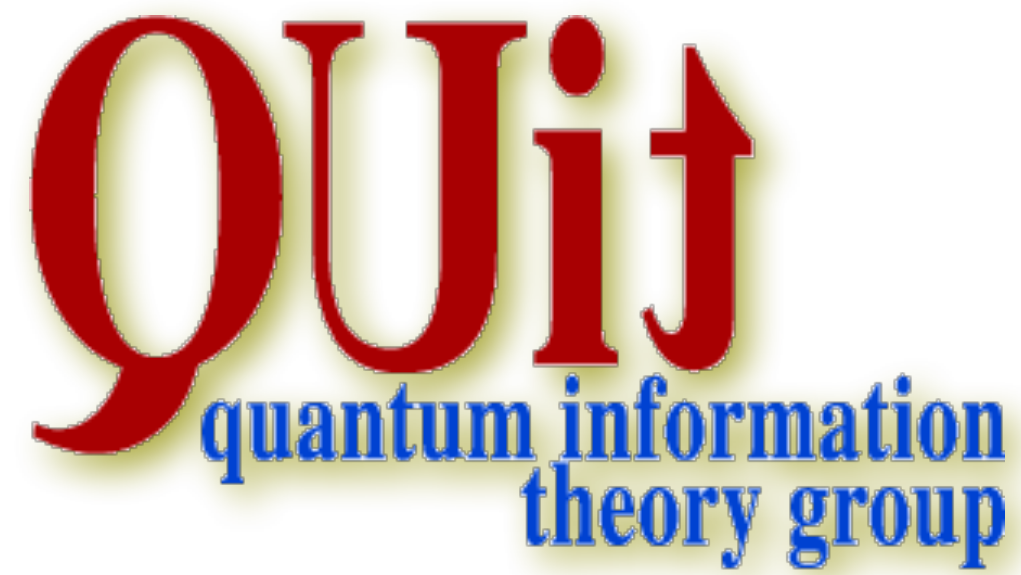
1 un insegnamento nei settori FIS/05, INF/01, MAT/05,06,07,08, ING-INF/01,02,03,04,05,07.



# FISICA DELLE TECNOLOGIE QUANTISTICHE

1 insegnamento scelto dal seguente elenco

Insegnamento	Settore	Semestre
Artificial Intelligence	ING-INF/05	I
Processi Stocastici	MAT/06	II
Teoria dei Sistemi Dinamici	MAT/07	I
Elementi di Statistica Matematica	MAT/06	I
Robotics	ING-INF/05	I
Digital Communications	ING-INF/03	II
Information Security	ING-INF/05	I
Bioinformatica	ING-INF/06	I



**Chiara Macchiavello**



**Massimiliano Sacchi**



**Lorenzo Maccone**



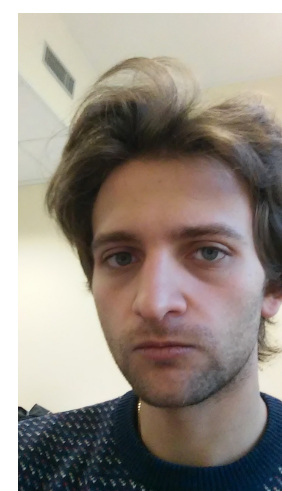
**Paolo Perinotti**



**Alessandro Bisio**



**Alessandro Tosini**



**Giovanni Chesi**

## ***Corsi***

Fondamenti della Meccanica Quantistica  
Fisica Quantistica della Computazione  
Teoria Fisica dell'Informazione  
Ottica Quantistica  
Termodinamica Quantistica  
Gruppi e simmetrie fisiche

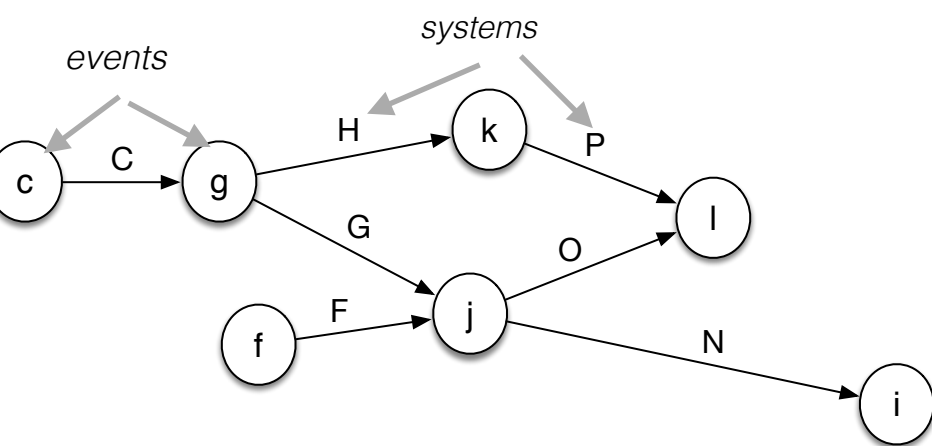
## ***Linee di ricerca***

Foundations of Quantum Theory  
Foundations of Quantum Field Theory  
Quantum Information and Computation  
Quantum Metrology



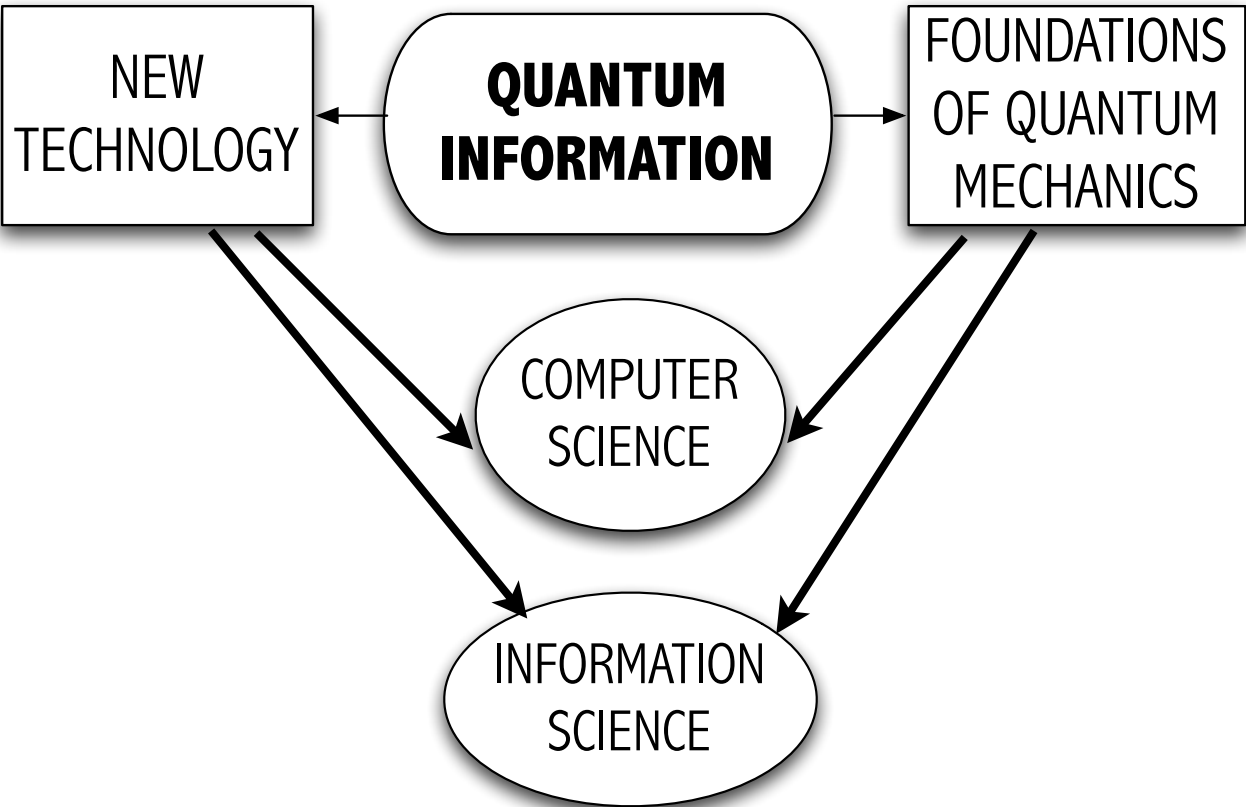
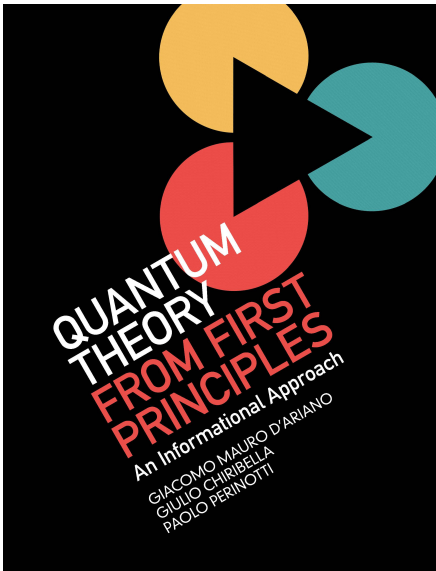
# FONDAMENTI DELLA MECCANICA QUANTISTICA

## Struttura matematica della teoria (OPT)



causalità  
discriminabilità locale  
purificazione

Stati,effetti,entanglement, quantum operations, Choi-Jamiolkowski, purificazione di quantum operations e strumenti, no-cloning, no-programming, no-signaling, no information without disturbance, stati steering e fedeli, tomografia di processi e stati, teletrasporto, automi cellulari quantistici



# TEORIA FISICA DELL'INFORMAZIONE

## Teoria dell'informazione classica e quantistica

Definizione e quantificazione dell'informazione  
Bit/qubit e entropie di Shannon/von Neumann  
Compressione  
Codifica per canali rumorosi  
Informazione classica su canali quantistici  
Informazione quantistica e entanglement  
Catene di Markov e data processing  
Rumore e flussi di entropia



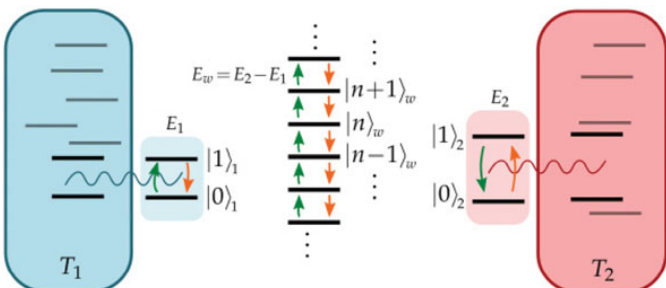
# TERMODINAMICA QUANTISTICA

## Meccanica statistica quantistica di non-equilibrio

Il lavoro e il calore non sono delle “osservabili”  
Definizioni consistenti richiedono un approccio operativo (correlazioni, coerenza, controllo)  
Ruolo dell'informazione: Demone di Maxwell, macchina ciclica di Szilard



sistemi aperti  
teoria della risposta,  
informazione quantistica  
apparenti violazioni del 2° principio  
teoremi di fluttuazione



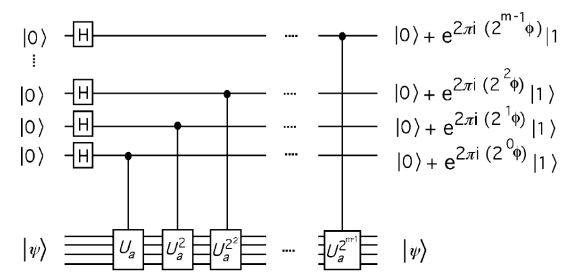
Macchine termiche quantistiche e nanotecnologie

# Cultura generale per la Fisica Contemporanea

# FISICA QUANTISTICA DELLA COMPUTAZIONE

## Principi di computazione e crittografia quantistici

Principi di funzionamento dei computer quantistici  
Porte logiche quantistiche  
Insiemi di gates universali  
Parallelismo quantistico  
Tecniche quantistiche di correzione degli errori  
Algoritmi quantistici  
Crittografia quantistica  
Introduzione alla teoria dell'entanglement  
Entanglement negli algoritmi quantistici



# OTTICA QUANTISTICA

## Tecniche avanzate di meccanica quantistica



Teoria dell'ottica quantistica, dei sistemi quantistici aperti, della stima  
Applicazioni

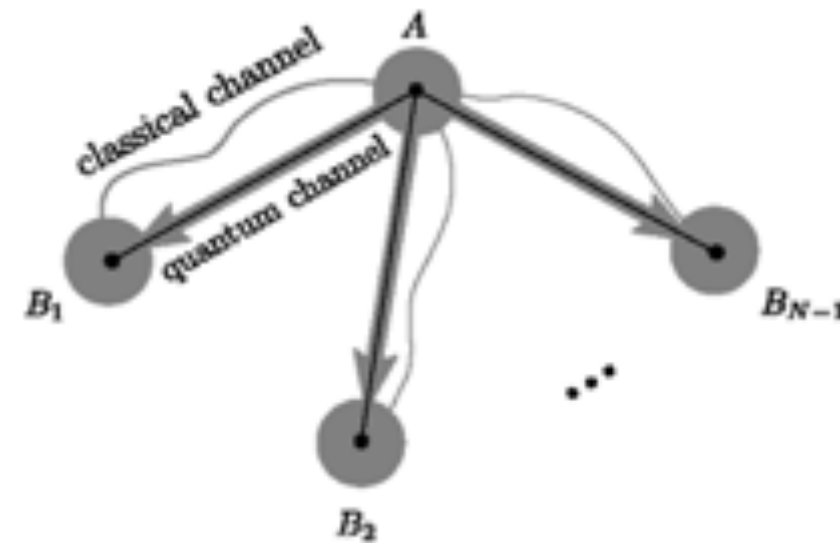


Acquisizione di “intuizione fisica” della teoria quantistica attraverso l'ottica.  
Preparazione alla ricerca (working knowledge):  
Tecniche di calcolo e di simulazione,  
Analisi e descrizione matematica di devices sperimentali  
Teoria dei sistemi quantistici aperti

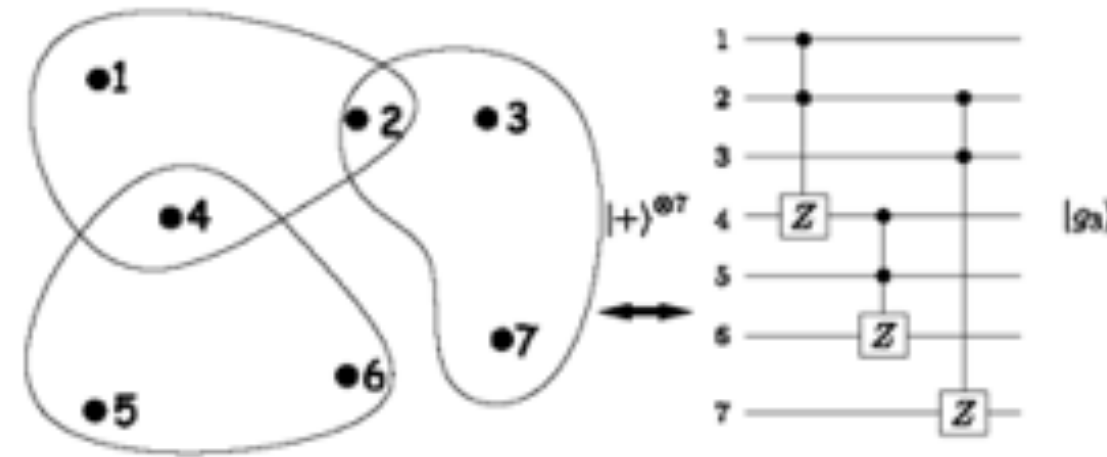


# Quantum Information

Crittografia quantistica a molti utenti



Metodi di rivelazione di entanglement

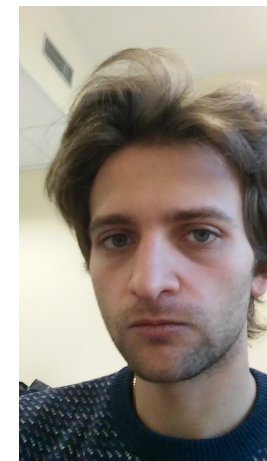
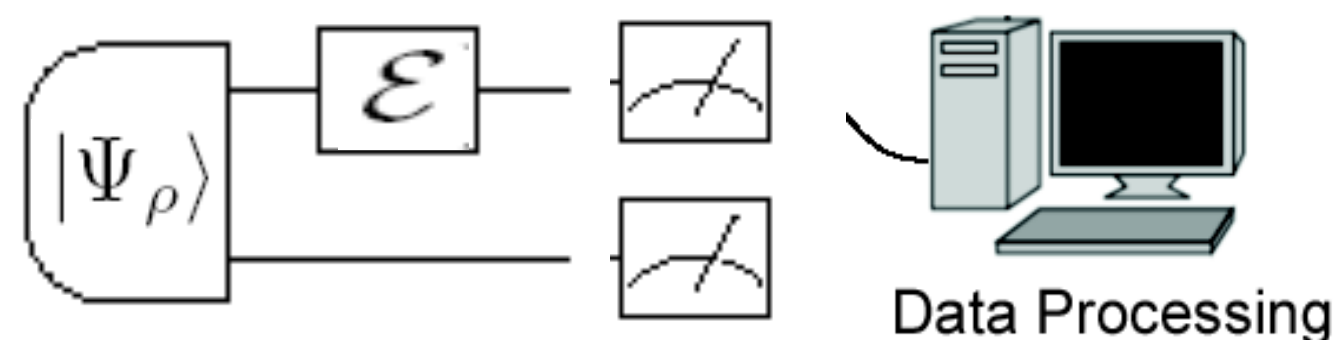


Stati ipergrafi negli algoritmi quantistici e nelle reti neurali

Metodi di certificazione di capacità per canali di comunicazione quantistici rumorosi



Termodinamica quantistica di modi bosonici



## **Quantum Information theory**

Capacità di canale, quantum computation, entanglement

## **Quantum Metrology**

Usare effetti quantistici per migliorare la precisione delle misure

## **Fondamenti**

Il tempo in meccanica quantistica

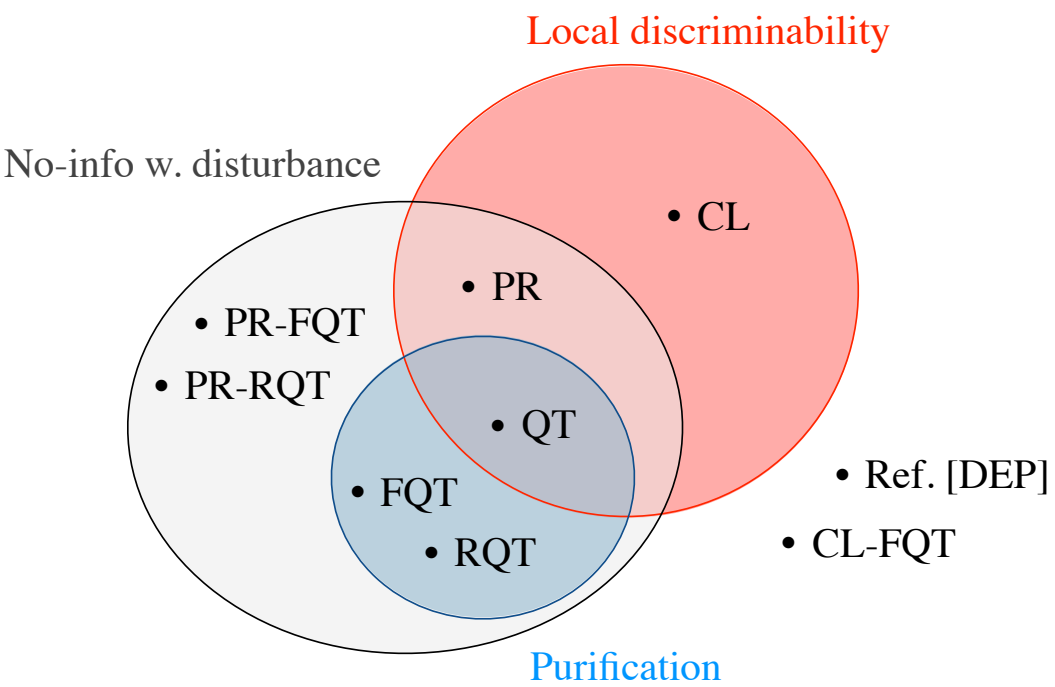
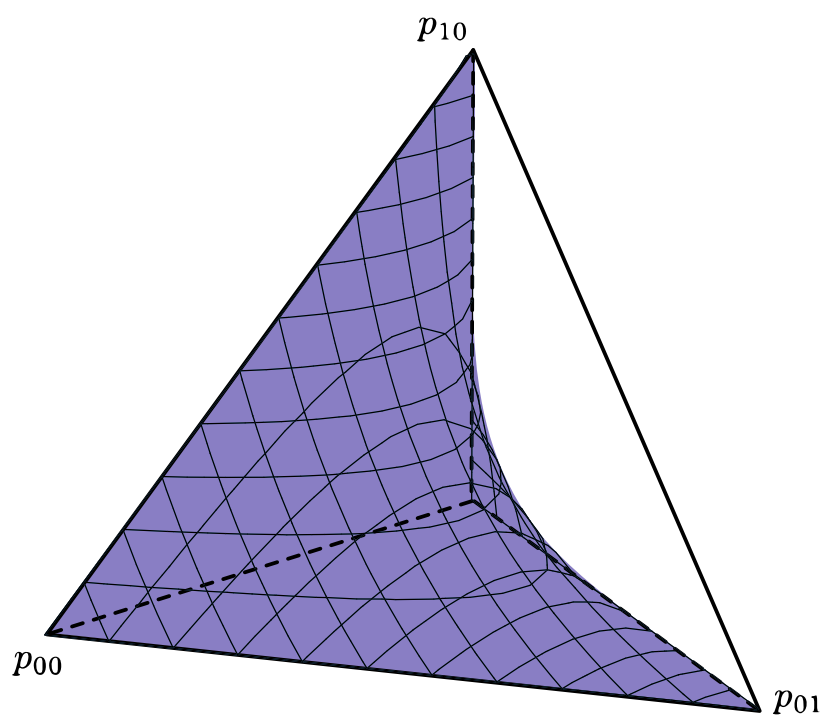




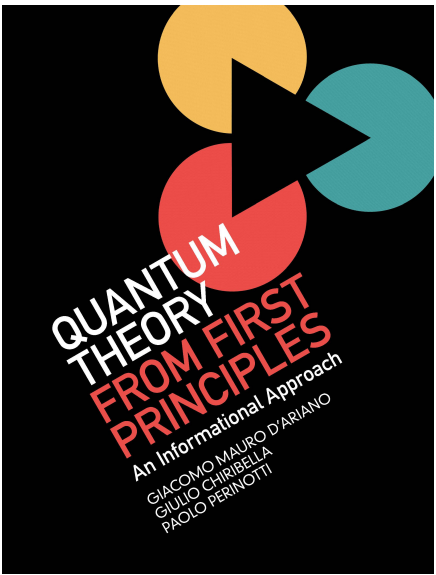
# Quantum Foundations

## OPT

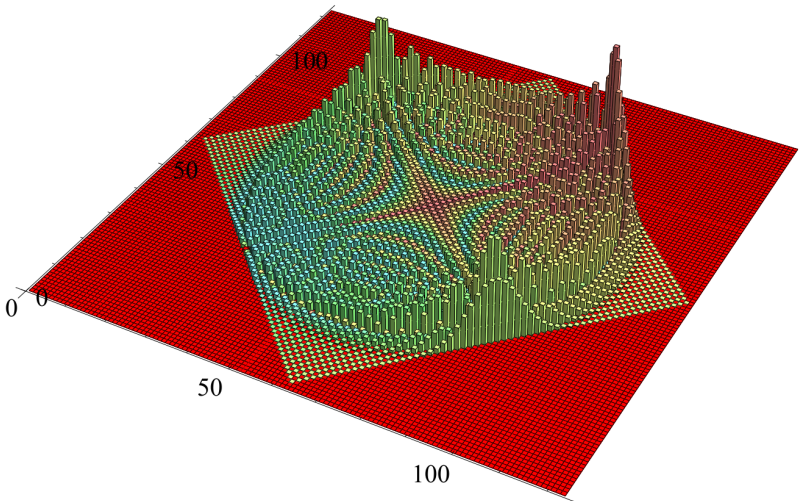
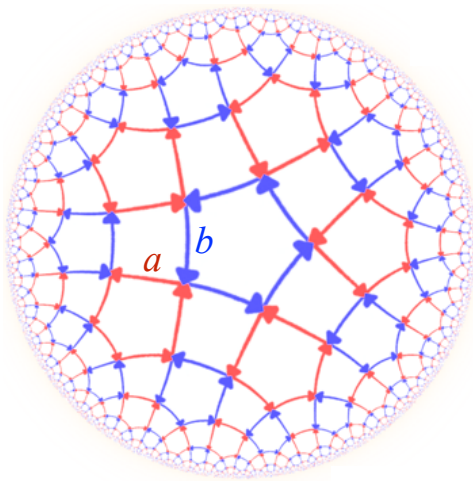
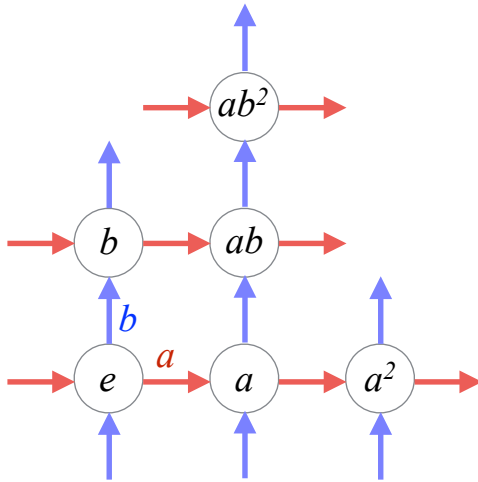
	Caus.	Perf. disc.	Loc. discr.	n-loc. discr.	At. par. comp.	At. seq. comp.	Compr.	$\exists$ Purification	$\exists!$ Purification	NIWD
QT	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CT	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗
FQT	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓
RQT	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
NSQT	?	?	✗	✗	?	?	?	?	?	?
PR	✓	?	✓	✓	✓	?	✗	✗	✗	✓
DPR	✓	?	✓	✓	✓	?	✗	✗	✗	✓
HPR	✓	?	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
FOCT	✗	?	✓	✓	✓	?	?	✗	✗	?
FOQT	✗	?	?	✓	?	?	?	?	?	?
NLCT	✓	✓	✗	✓	✗	?	✓	✗	✗	✗
NLQT	?	?	?	✓	?	?	?	?	?	?



Teorie alternative (fermionica, reale, classica bi-locale, ... per testare indipendenza logica dei principi, mondi possibili, e regole generali di teoria dell'informazione (no-information without disturbance...) e proprietà dell'informazione e del suo processing.



## Automi cellulari e teorie di campo

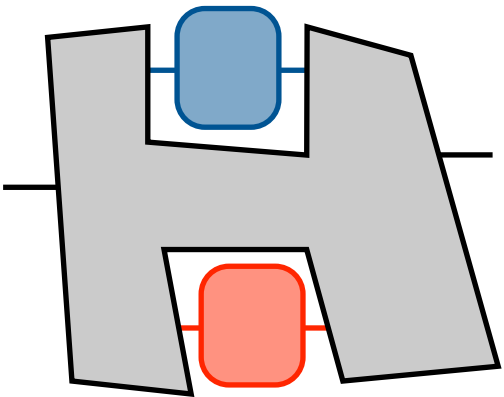
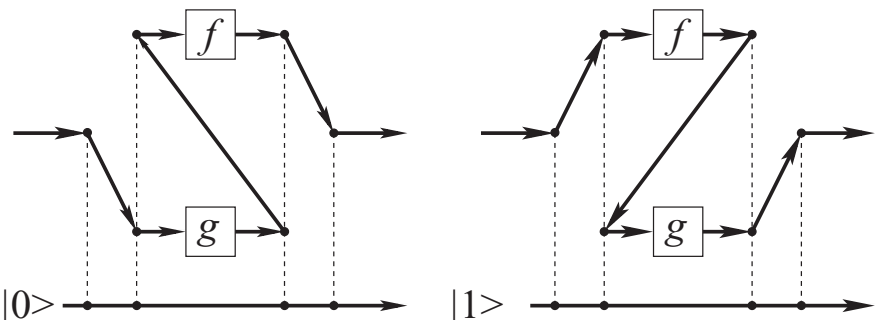
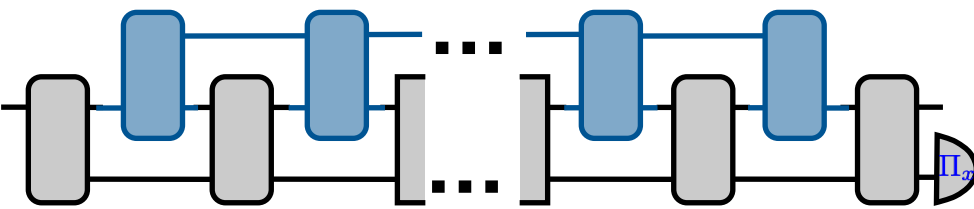


Legge fisica come algoritmo  
Località, omogeneità, isotropia  
Analisi strutturale degli automi cellulari  
Rinormalizzazione



FQFT

## Teorie di ordine superiore





# Collaborations

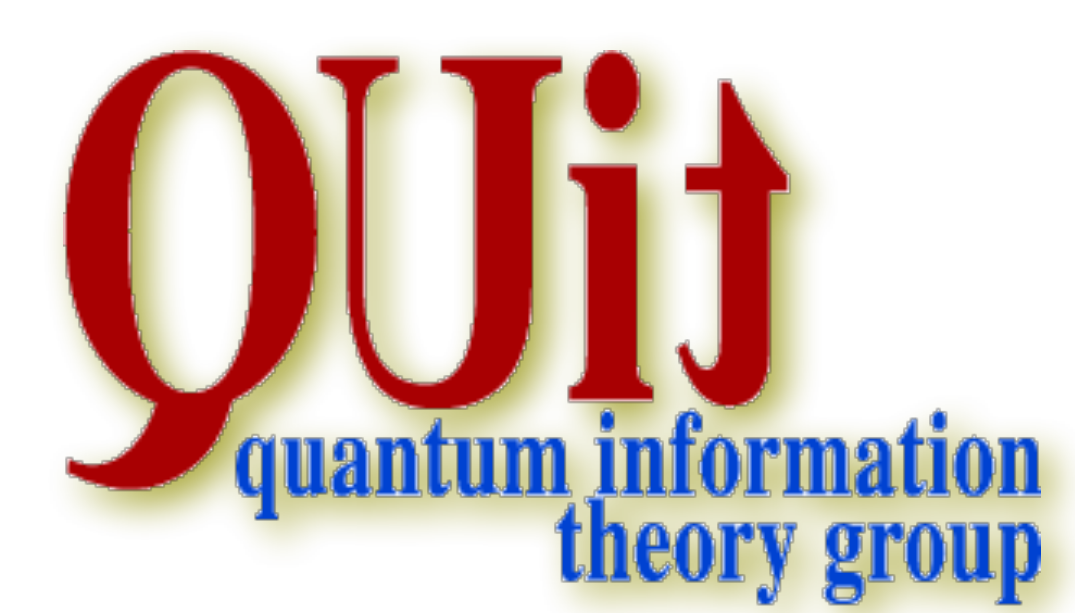


- Vienna (AB,PP)
- MIT Boston (LM)
- Hong Kong (AB,PP)
- Nagoya (AT,PP)
- Singapore (CM,PP)
- Oxford, Cambridge (CM,PP)

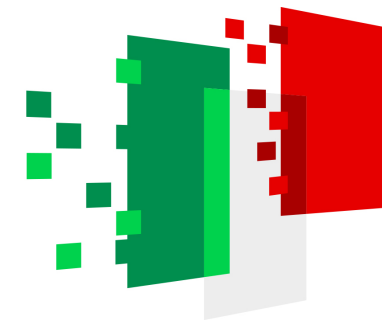
- Sapienza, Roma (CM,LM,PP)
- Napoli Federico II (AB,PP)
- Dusseldorf, Edimburgo (CM)
- Normale Pisa (LM,PP)
- Los Alamos (LM)
- ETH Zurigo (PP)

- Bratislava (AB,PP)
- Barcelona, ICFO (PP)
- Paris Saclay (AB,PP)
- Kyoto (AB,PP)
- Hannover (AB,PP)
- ICTQT Gdansk (AB,AT,PP)





# Funding



**Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca**



**Finanziato  
dall'Unione europea**  
NextGenerationEU

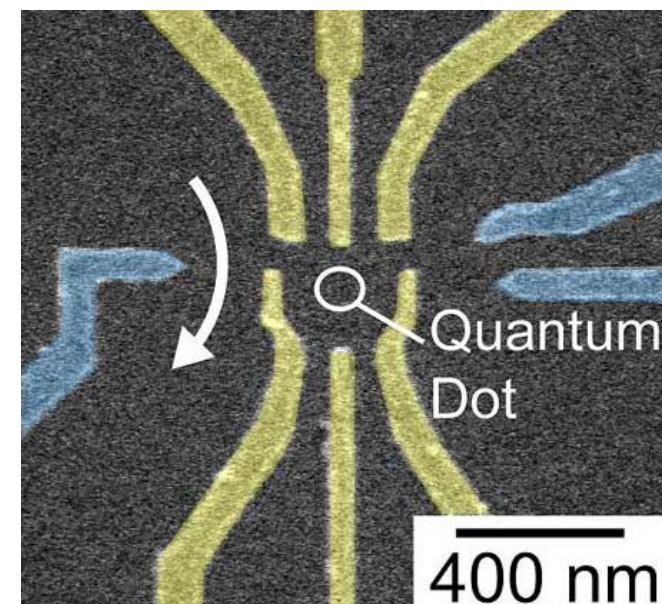




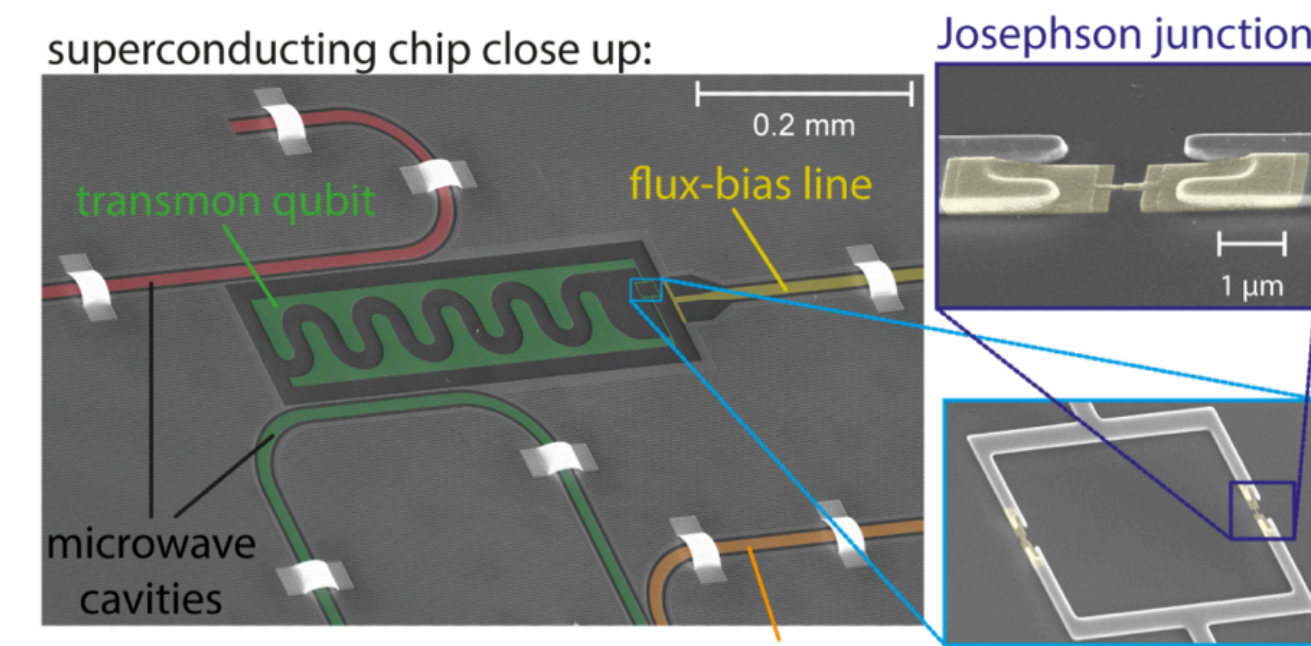
# NANOSTRUTTURE QUANTISTICHE

**Dario Gerace**

- Confinamento quantico di elettroni e lacune in nanostrutture di semiconduttori, sistemi 2D, 1D, 0D
- Proprietà ottiche e di trasporto in sistemi a bassa dimensionalità
- Sistemi nanostrutturati di superconduttore e circuiti quantistici alle microonde
- Applicazioni alle moderne tecnologie quantistiche: Sorgenti a singolo fotone, laser a singolo atomo, qubits di semiconduttore e superconduttore



**Es. Qubit a semiconduttore**



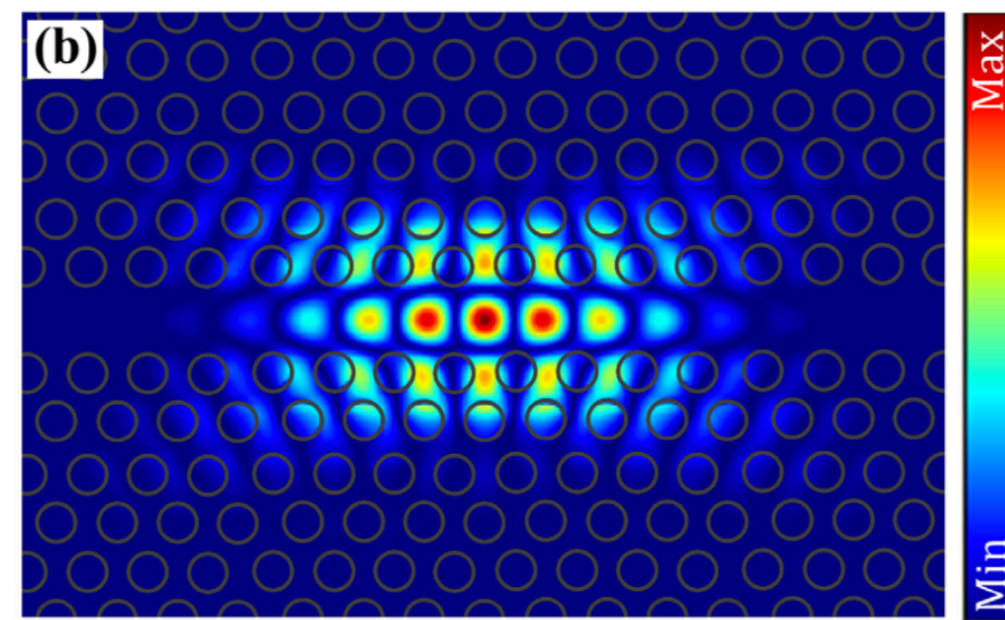
**Es. Qubit a superconduttore**



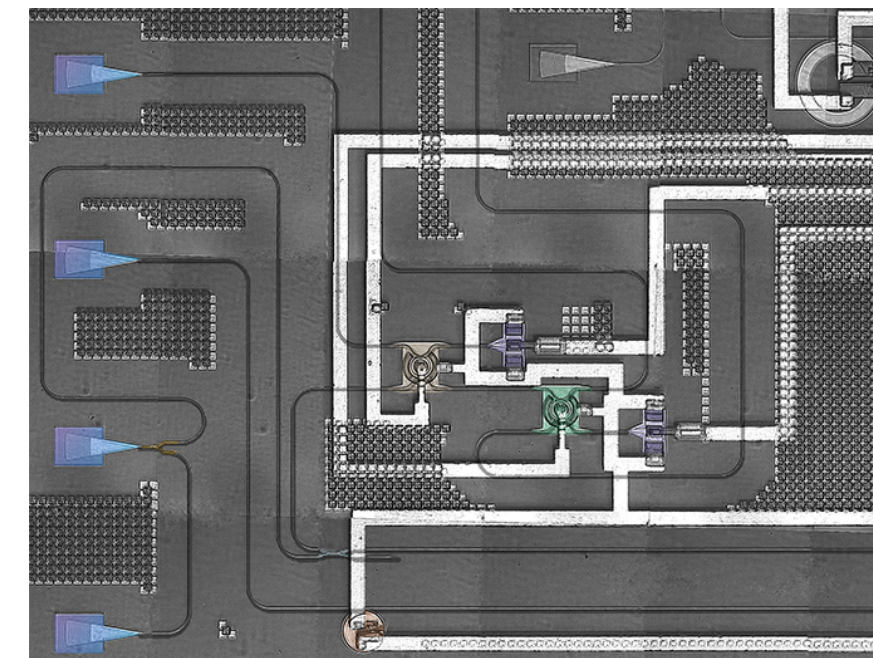
# FOTONICA

**Marco Liscidini**

- Propagazione e confinamento di luce “classica” e “non-classica” in micro e nano strutture
- Interazione radiazione-materia in sistemi micro e nanostrutturati (emissione spontanea, LASER, etc..)
- Ottica nonlineare classica e quantistica
- Applicazioni alle moderne tecnologie quantistiche: qbit e qdit a basati su fotoni, sorgenti a singolo fotone, generazione di fotoni entangled, etc...



**Es. Microcavità fotonica**



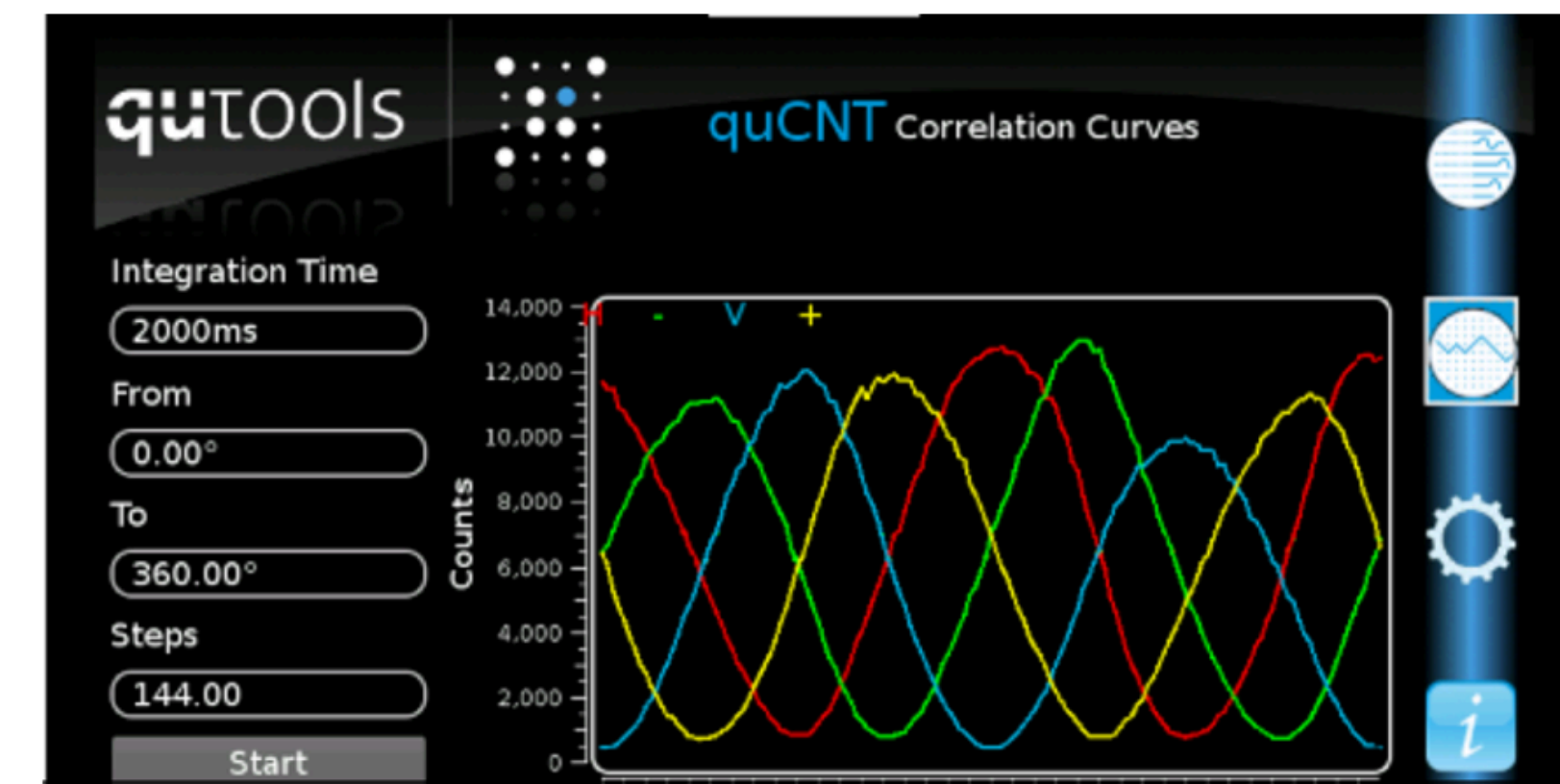
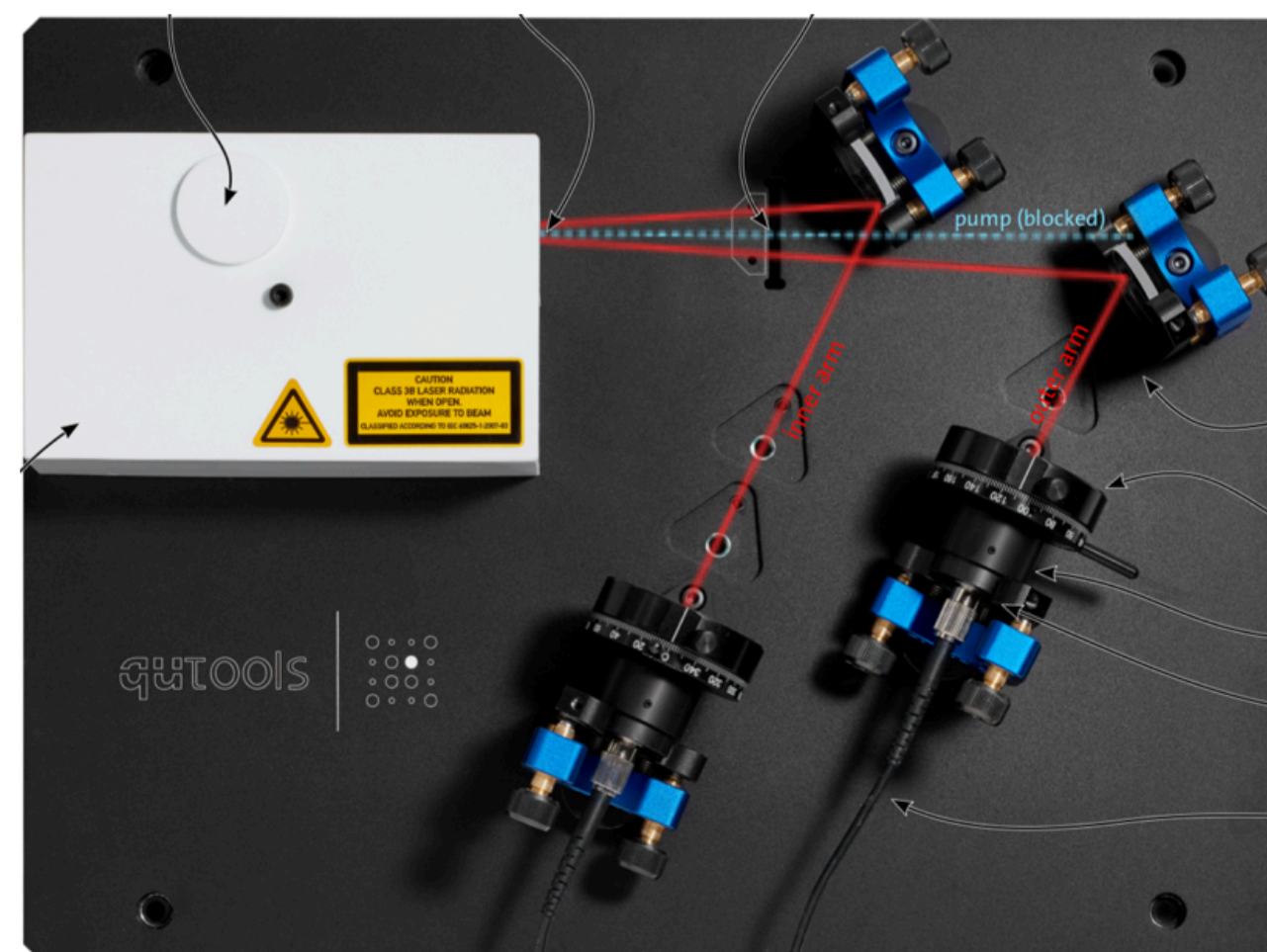
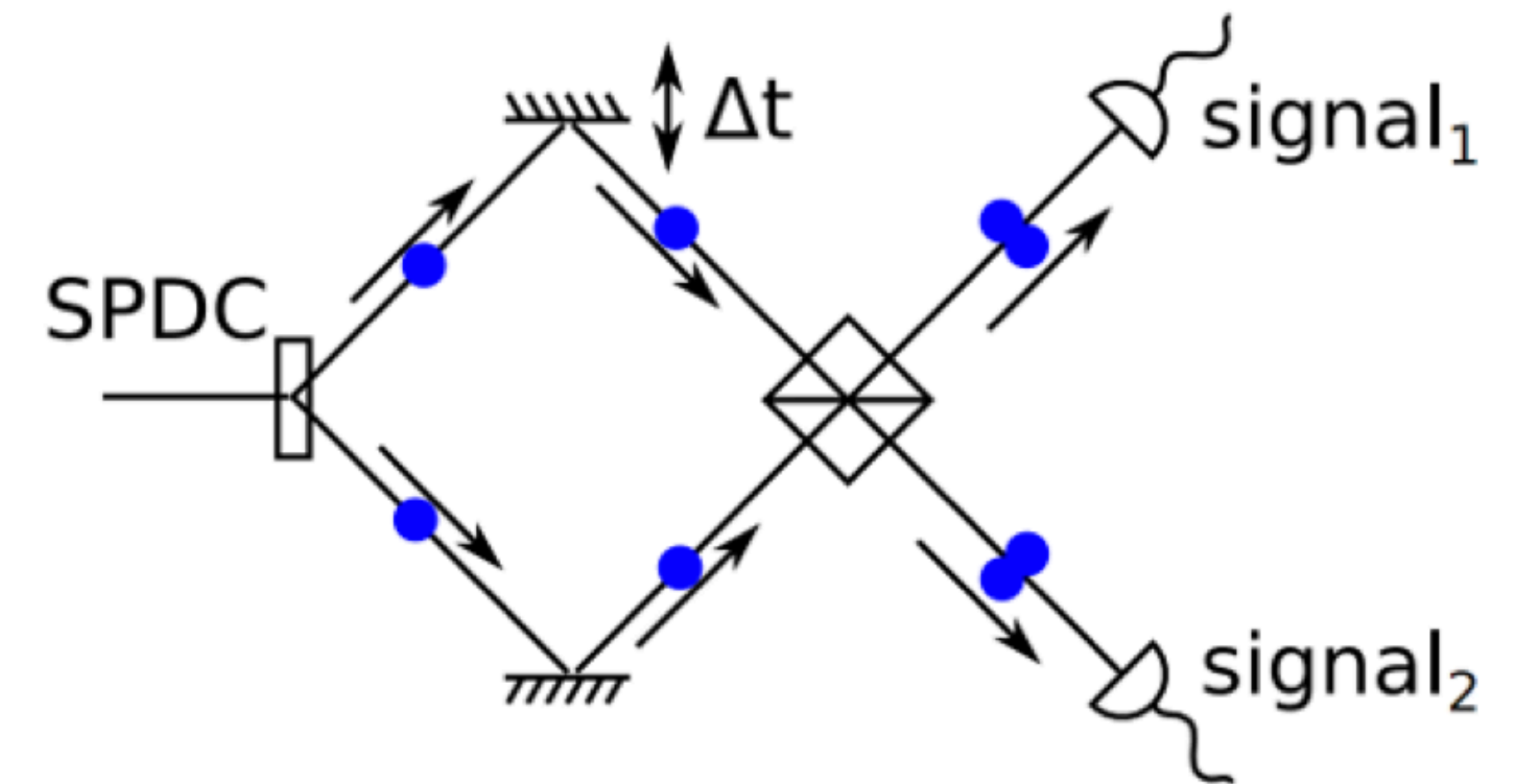
**Es. Fotonica quantistica integrata**



# LABORATORIO DI FISICA QUANTISTICA

Matteo Galli

- Particle Nature of Photons (Coincidences)
- Wave Nature of Photons (Single-Photon Interference)
- Polarization Entanglement
- Heralding of single photons
- Hong-Hou-Mandel Interference
- Franson Interference





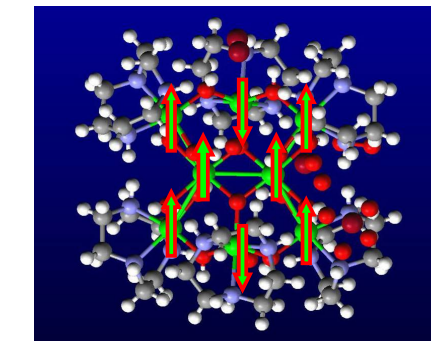
# RICERCHE CONNESSE

## Teoria

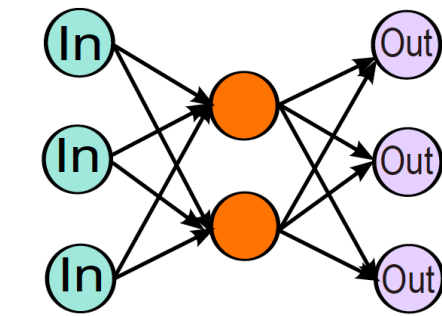


**Dario Gerace**

- Simulazioni quantistiche di sistemi complessi: algoritmi quantistici e cloud quantum computing

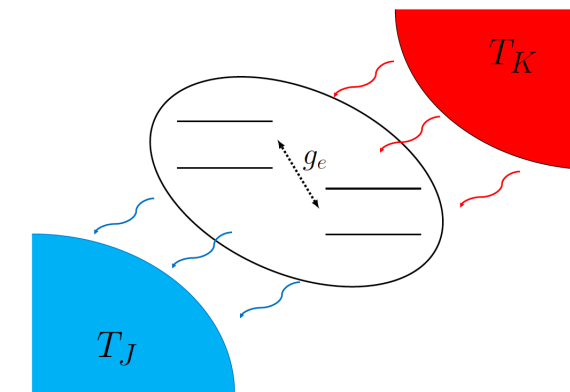


**Molecole magnetiche**



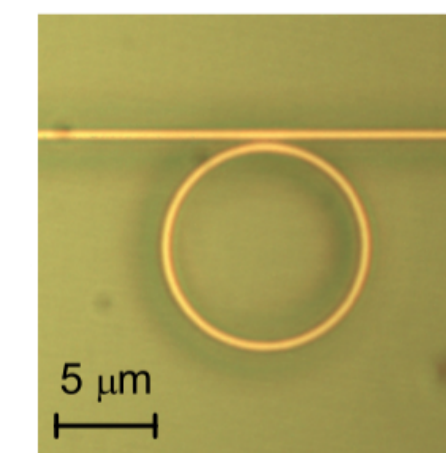
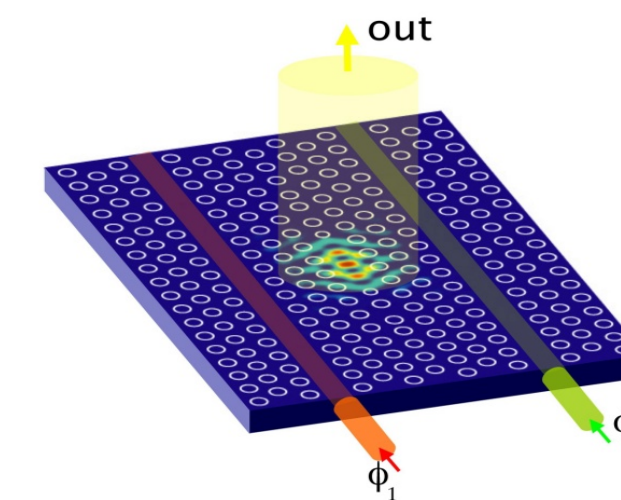
**Reti neurali artificiali**

- Termodinamica quantistica: entanglement ed entropia in nanostrutture quantistiche



**Marco Liscidini**

- Fotonica quantistica in nanostrutture fotoniche: modellizzazione dispositivi e teoria dell'interazione radiazione-materia
- Generazione di luce non classica via fluorescenza parametrica







**Matteo Galli**

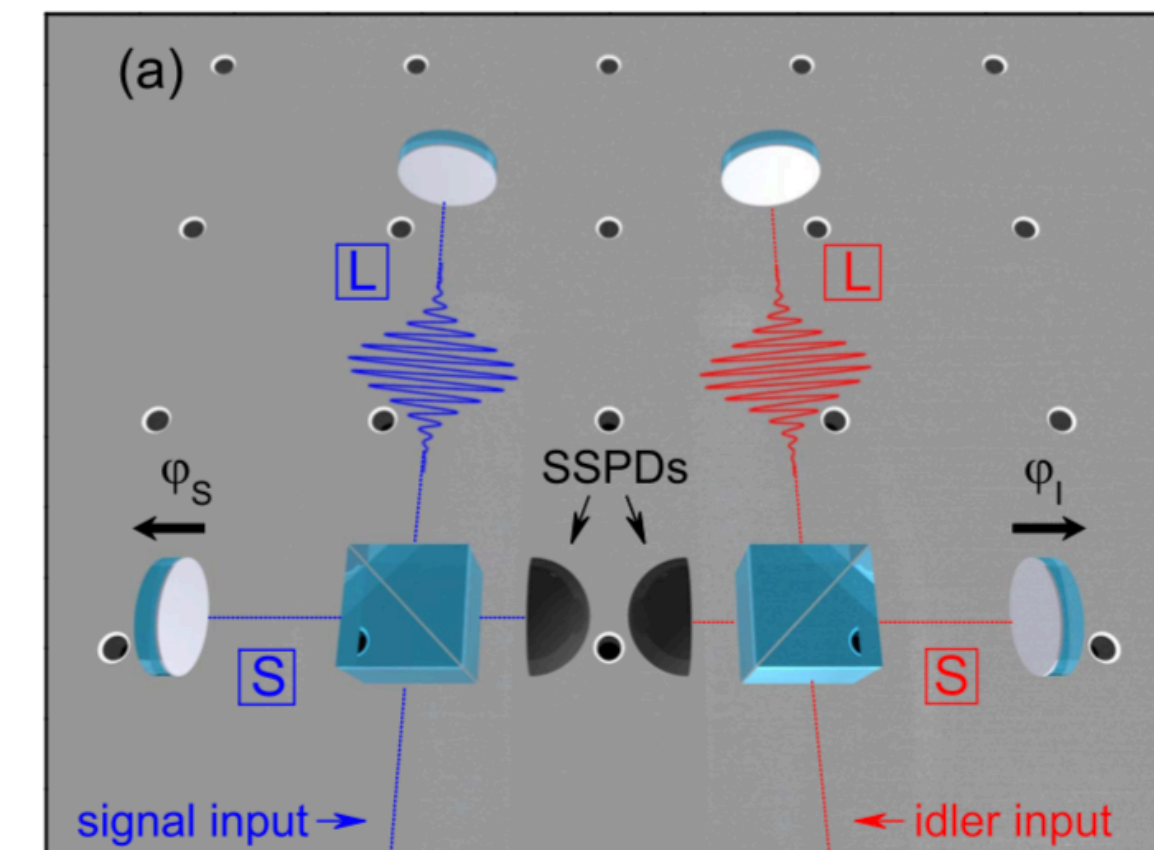
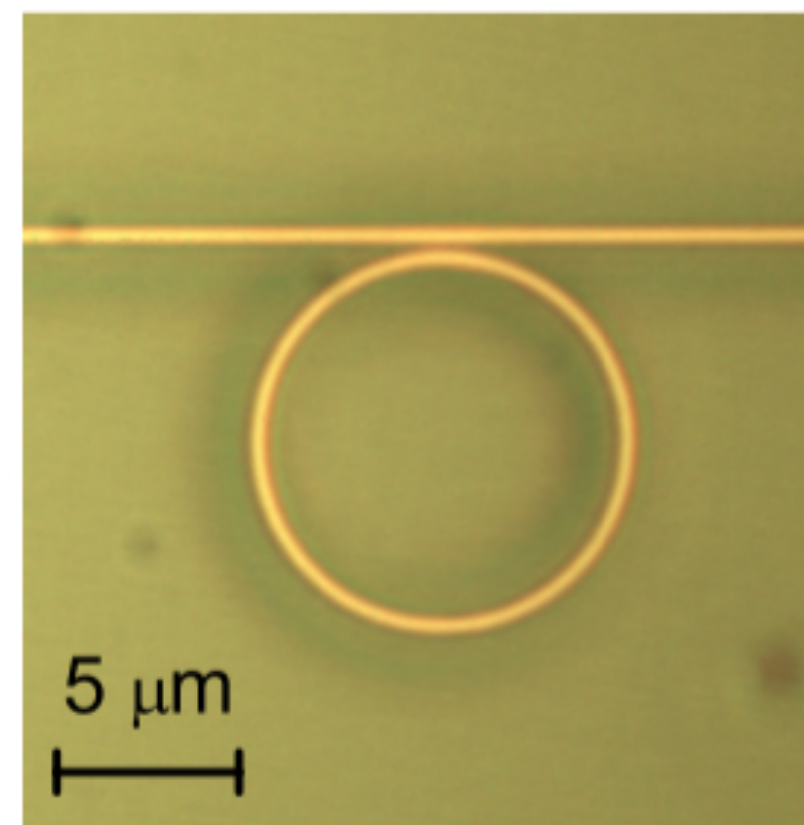
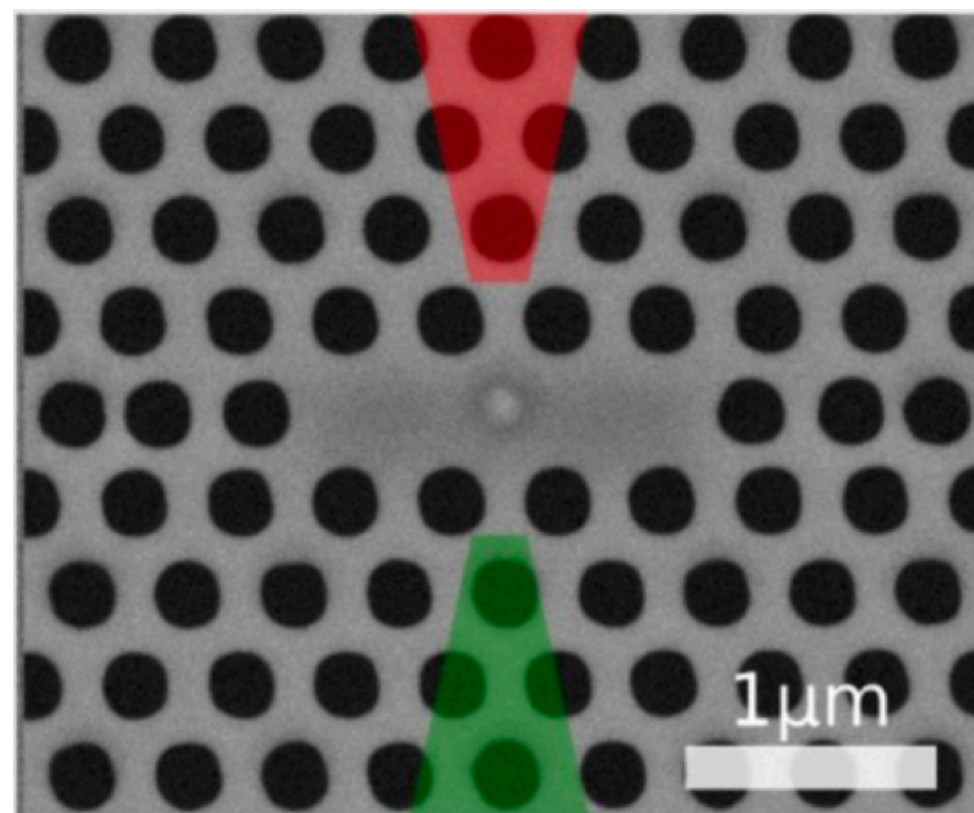
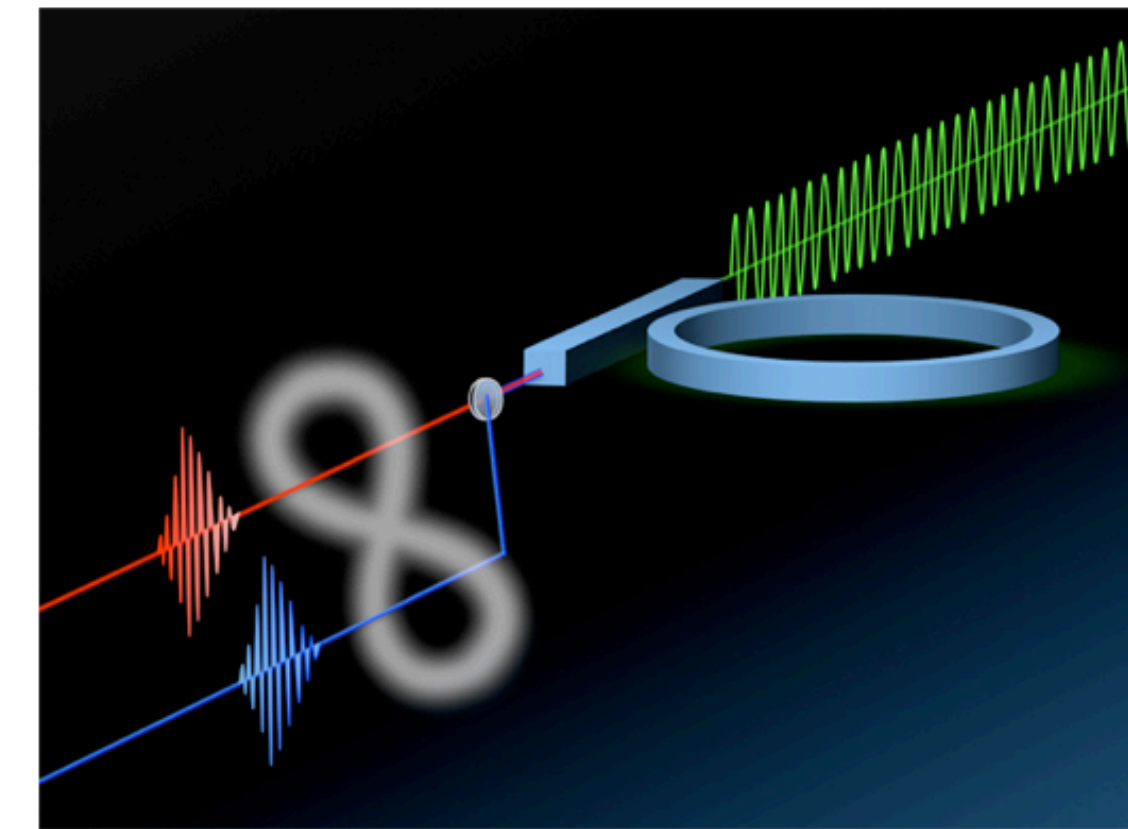
# RICERCHE CONNESSE

## *Esperimenti*



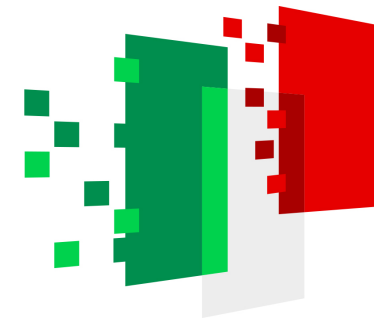
**Daniele Bajoni**

- Generazione di stati non classici della radiazione: sorgenti di coppie di fotoni entangled e singoli fotoni “heralded” integrate in silicio.
- Quantum information
- Quantum key distribution
- Sviluppo di nuove sorgenti a singolo fotone a 1.5  $\mu\text{m}$  basate su materiali compatibili con le tecnologie della microelettronica (quantum dots di Ge in Si)





# FINANZIAMENTI E COLLABORAZIONI



**Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca**



**Finanziato  
dall'Unione europea**  
NextGenerationEU



**QUANTERA**



**XANADU**



**Italia, Europa, UK,  
Stati Uniti, Canada, etc ..**