

A vibrant, artistic illustration of a person in a white lab coat standing on a glowing blue circular platform. The person is reaching out towards a complex, glowing network of lines and nodes that resemble a quantum circuit or a cosmic web. In the background, there are swirling galaxies, a large black hole, and various scientific symbols like atomic models and mathematical formulas. The overall scene is a blend of astronomy and quantum computing.

Luce strutturata dall'astronomia al calcolo quantistico

Fabrizio Tamburini

Chief Quantum Officer
Rotonium s.r.l.

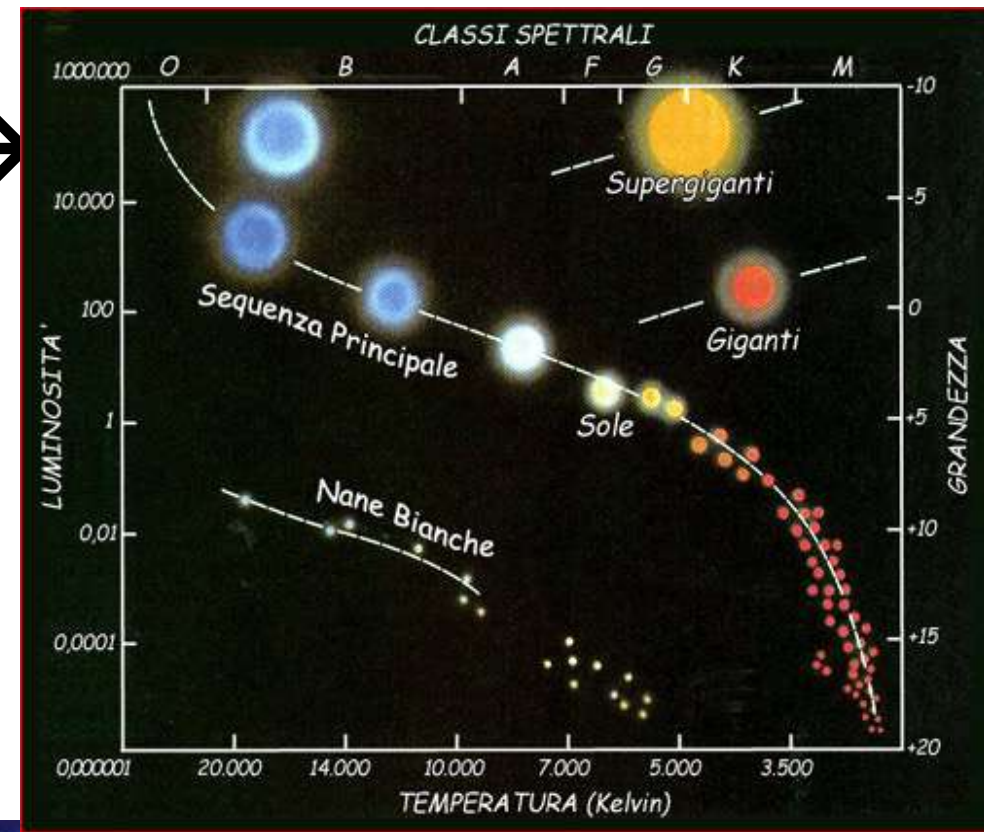
ASSEMBLEA ANNUALE ORDINE INGEGNERI
VENEZIA

19 DICEMBRE 2024

L'importanza di manipolare le proprietà della luce

- **La LUCE** è il principale vettore di informazioni per l'astronomia e telecomunicazioni. Tuttavia, la luce è più complessa di quanto solitamente si ipotizza.
- Di solito gli astronomi e altri scienziati utilizzano: **l'intensità, la lunghezza d'onda e la polarizzazione e la fase**. Esistono delle ulteriori proprietà che possono essere utilizzate per ottenere molte più informazioni sui corpi celesti.
- In particolare, fra le proprietà della luce da poco utilizzate ci concentriamo sul Momento angolare orbitale (OAM) e la vorticità ad esso associata.

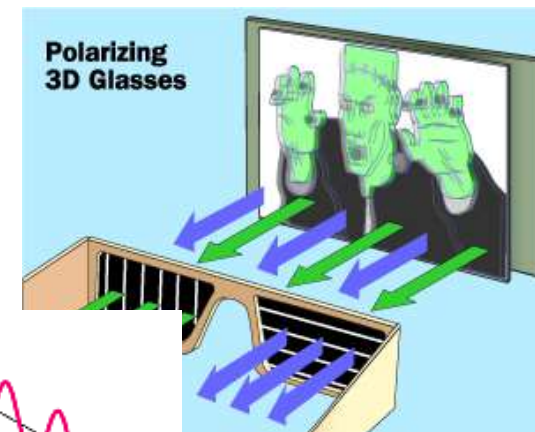
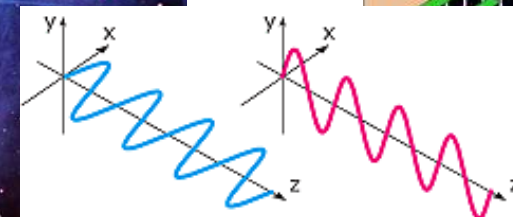
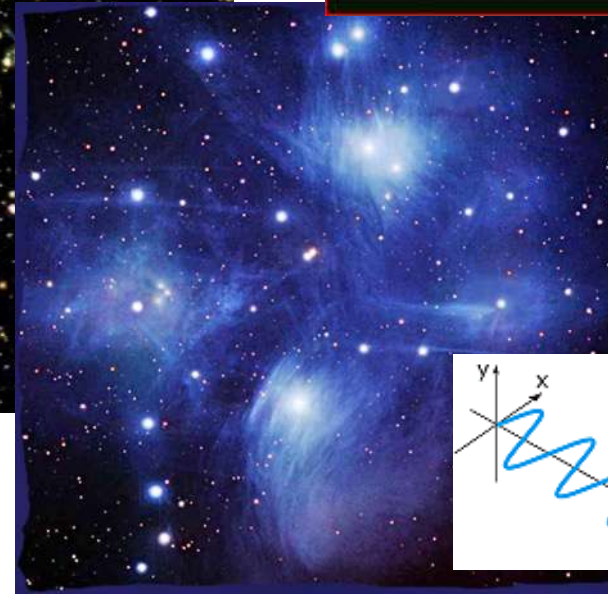
Intensità → magnitudine
 Colori e tipi di stelle = Energia →
 temperature e polarizzazione



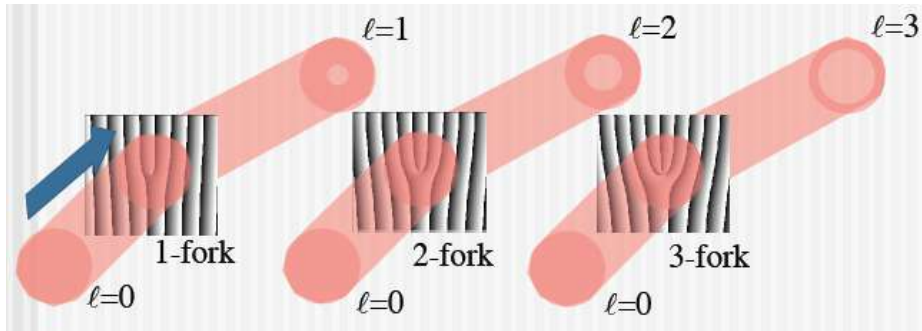
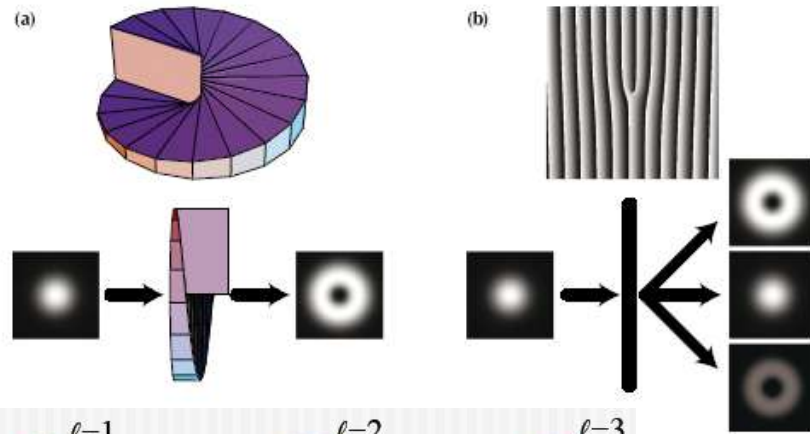
lunghezza d'onda →
 colori

18/12/24

ASSEMBLEA ANNUALE ORDINE INGEGNERI
 VENEZIA 2024



Esempio di luce strutturata: il momento angolare orbitale preservato fino a fotone singolo



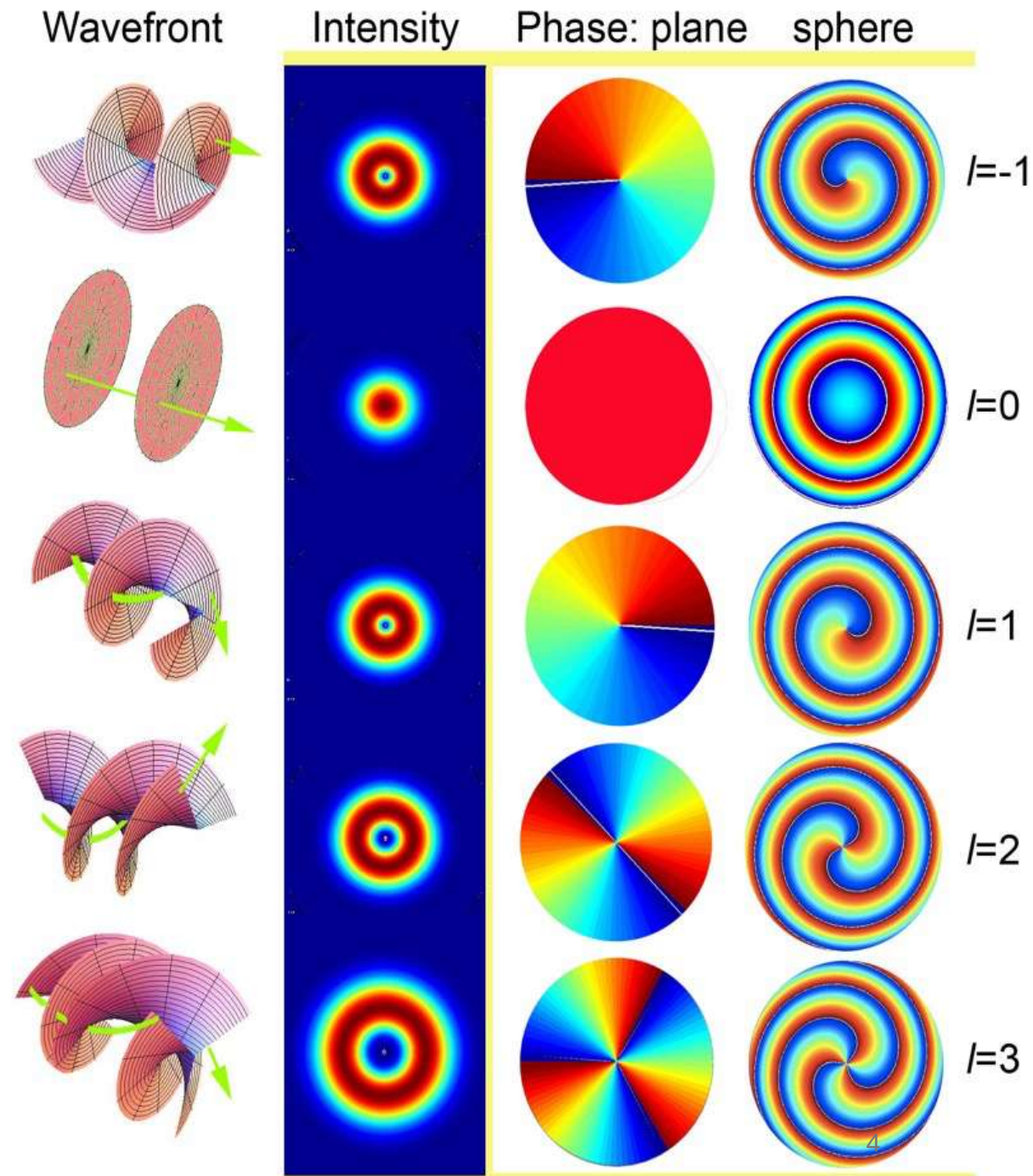
Jonathan Leach, Eric Yao and Miles J Padgett

Department of Physics and Astronomy, Kelvin Bld, University Ave,
University of Glasgow, Glasgow G12 8QQ, UK

E-mail: j.leach@physics.gla.ac.uk

18/12/24

New Journal of Physics 6 (2004) 71



Astronomia: Migliora il potere risolutivo di un telescopio a diffrazione limitata di un ordine di grandezza



163903 (2006)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
20 OCTOBER 2006

Overcoming the Rayleigh Criterion Limit with Optical Vortices

F. Tamburini, G. Anzolin, G. Umbrico, A. Bianchini, and C. Barbieri

Department of Astronomy, University of Padova, vicolo dell' Osservatorio 2, Padova, Italy
(Received 12 June 2006; published 16 October 2006)

We experimentally and numerically tested the separability of two independent equally luminous monochromatic and white light sources at the diffraction limit, using optical vortices (OV). The diffraction pattern of one of the two sources crosses a fork hologram on its center generating the Laguerre-Gaussian (LG) transform of an Airy disk. The second source, crossing the fork hologram in positions different from the optical center, generates nonsymmetric LG patterns. We formulated a criterion, based on the asymmetric intensity distribution of the superposed LG patterns so created, to resolve the two sources at angular distances much below the Rayleigh criterion. Analogous experiments in white light allow angular resolutions which are still one order of magnitude below the Rayleigh criterion. The use of OV's might offer new applications for stellar separation in future space experiments.

DOI: [10.1103/PhysRevLett.97.163903](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.163903)

PACS numbers: 42.25.-p, 42.40.Eq, 42.40.Jv, 42.87.Bg

PHYSICAL REVIEW A 79, 033845 (2009)

Method to measure off-axis displacements based on the analysis of the intensity distribution of a vortex beam

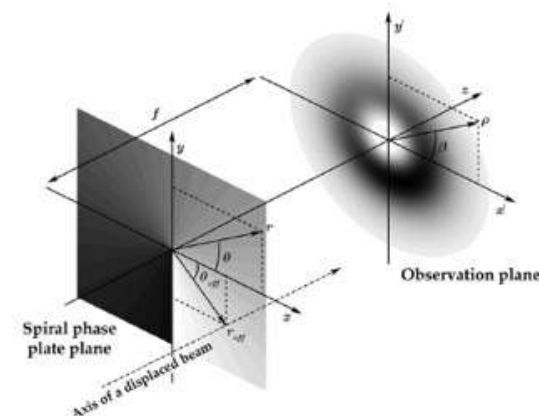
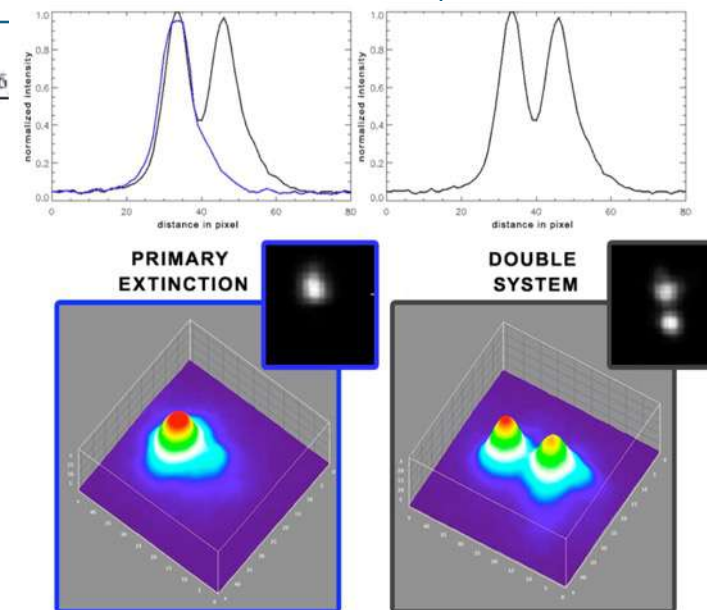
G. Anzolin, * F. Tamburini, A. Bianchini, and C. Barbieri

Dipartimento di Astronomia, Università di Padova, vicolo dell' Osservatorio 3, I-35122 Padova, Italy
(Received 2 January 2009; published 30 March 2009)

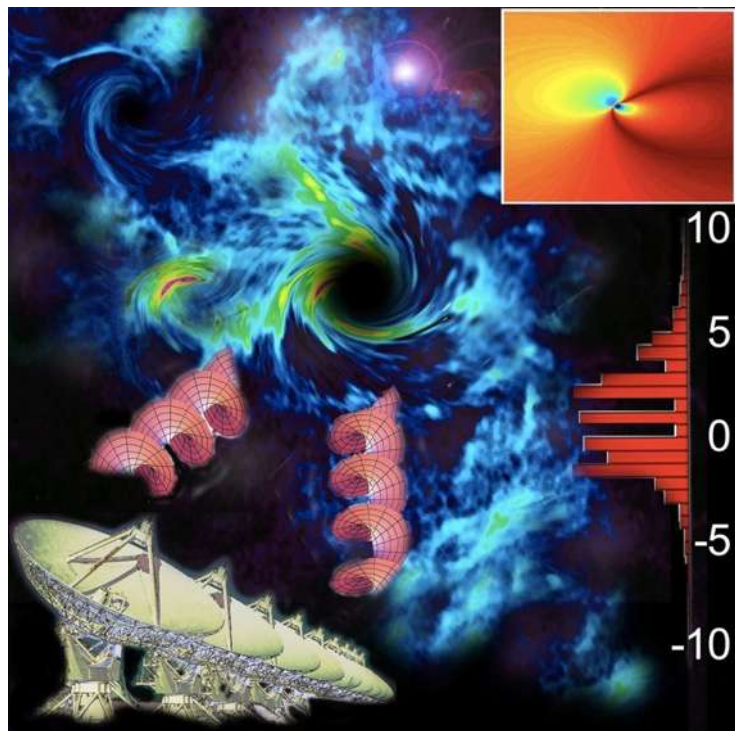
We study the properties of the Fraunhofer diffraction patterns produced by Gaussian beams crossing spiral phase plates. We show, both analytically and numerically, that off-axis displacements of the input beam produce asymmetric diffraction patterns. The intensity profile along the direction of maximum asymmetry shows two different peaks. We find that the intensity ratio between these two peaks decreases exponentially with the off-axis displacement of the incident beam, the decay being steeper for higher strengths of the optical singularity of the spiral phase plate. We analyze how this intensity ratio can be used to measure small misalignments of the input beam with a very high precision.

DOI: [10.1103/PhysRevA.79.033845](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.79.033845)

PACS number(s): 42.25.Bs, 42.25.Gy, 42.90.+m, 42.79.-e



Applicazioni astrofisiche



18/12/24

Twisting of light around rotating black holes

Fabrizio Tamburini¹, Bo Thidé^{2*}, Gabriel Molina-Terriza³ and Gabriele Anzolin⁴

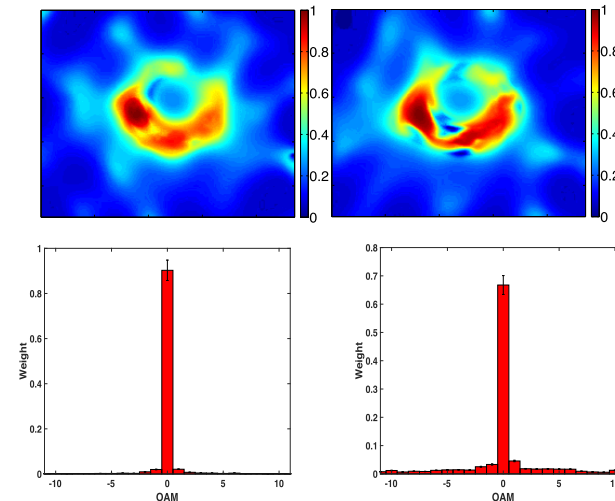
Kerr black holes are among the most intriguing predictions of Einstein's general relativity theory^{1,2}. These rotating massive astrophysical objects drag and intermix their surrounding space and time, deflecting and phase-modifying light emitted near them. We have found that this leads to a new relativistic effect that imprints orbital angular momentum on such light. Numerical experiments, based on the integration of the null geodesic equations of light from orbiting point-like sources in the Kerr black hole equatorial plane to an asymptotic observer³, indeed identify the phase change and wavefront warping and predict the associated light-beam orbital angular momentum spectra⁴. Setting up the best existing telescopes properly, it should be possible to detect and measure this twisted light, thus allowing a direct observational demonstration of the existence of rotating black holes. As non-rotating objects are more an exception than a rule in the Universe, our findings are of fundamental importance.

In curved spacetime geometries, the direction of a vector is generally not preserved when parallel-transported from one event to another, and light beams are deflected because of gravitational

instruments by up to one order of magnitude for non-coherent light¹⁶ and facilitate the detection of extrasolar planets^{17,18}.

That a photon carries an amount of SAM, quantized as $S = \sigma \hbar$, $\sigma = \pm 1$, and can also carry an amount of OAM, quantized as $L = \ell \hbar$, $\ell = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm N$, is well known from quantum electrodynamics¹⁹. The OAM of photons has been confirmed experimentally^{20,21} and discussed theoretically²². Generally, it is not always possible to split the total angular momentum J of a photon into two distinct gauge-invariant observables S and L . However, when a paraxial beam of light propagates in vacuum along the z axis, one can project S and L onto this axis and obtain two distinct and commuting operators

$$\hat{S}_z = \hbar \sum_{\sigma} \sigma \int_{-\infty}^{\infty} dk_0 \hat{a}_{\sigma, \ell, p}^\dagger(k_0) \hat{a}_{\sigma, \ell, p}(k_0)$$



Monthly Notices

of the
ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY

MNRAS **492**, L22–L27 (2020)

Advance Access publication 2019 November 28

Measurement of the spin of the M87 black hole from its observed twisted light

Fabrizio Tamburini¹, Bo Thidé^{2*} and Massimo Della Valle^{3,4*}

¹ZKM, Lorenzstraße 19, Karlsruhe D-76135, Germany

²Swedish Institute of Space Physics, Ångström Laboratory, Box 537, SE-751 21 Uppsala, Sweden

³Capodimonte Astronomical Observatory, INAF-Napoli, Salita Moiariello 16, I-80131 Naples, Italy

⁴European Southern Observatory, Karl-Schwarzschild-Straße 2, D-85748 Garching bei München, Germany

Welcome fabtamburini | Edit account | Logout | Athens/Institutional login

epl A LETTERS JOURNAL EXPLORING THE FRONTIERS OF PHYSICS

IOPscience | Home | Search | Collections | Journals | About | Contact us | My IOPscience

Photon orbital angular momentum and mass in a plasma vortex

EDITOR'S CHOICE

Author F. Tamburini¹, A. Sponselli¹, B. Thidé² and J. T. Mendonça³

Affiliations ¹ Department of Astronomy, University of Padova - vicolo dell' Osservatorio 3, I-33122 Padova, Italy, EU
² Physics in Space, Ångström Laboratory - P. O. Box 537, SE-751 21, Uppsala, Sweden
³ IFPFI and CFI, Instituto Superior Técnico - Av. Rovisco Pais 1, 1049-001 Lisboa, Portugal, EU

doi:10.1093/mnras/slz176

Welcome fabtamburini | Edit account | Logout | Athens/Institutional login

epl A LETTERS JOURNAL EXPLORING THE FRONTIERS OF PHYSICS

IOPscience | Home | Search | Collections | Journals | About | Contact us | My IOPscience

EPL (Europhysics Letters) > Volume 96 > Number 6

F. Tamburini and B. Thidé 2011 EPL **96** 64005 doi:10.1209/0295-6075/96/64005

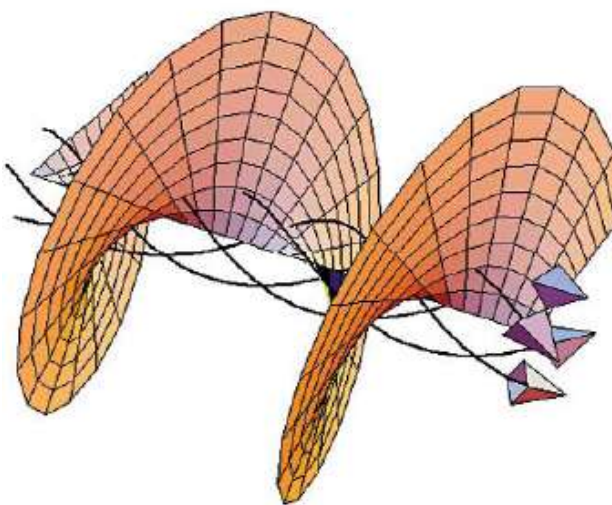
Storming Majorana's Tower with OAM states of light in a plasma

F. Tamburini^{1,2} and B. Thidé^{3,4}

OPTICS

New Twist Could Pack Photons With Data

The humble particle of light, the photon, is beginning to show that it has surprising depth. Photons have long been known to spin, but it is also possible to give them an additional form of angular momentum, a sort of twist. A team of physicists in the United Kingdom has now devised a way to measure the twisting of single photons—a “major achievement,” according to physicist Keith Burnett of the University of Oxford. A



Helical harmony. A single “line of harmony” corkscrewing along a light beam. Arrows show energy flow, which can exert a torque on objects.

pie, the arrows along a single radial line in the beam spot all point in a particular direction. More this “line adjacent. In this v around li tion of th angular i in the b Even a l can carry What lone pho ing lines lines giv

These angular momentum s rals must obey quantum rul so they bear whole-number bels that physicists can use a bar-coding system for carryi information. The orbital angu momentum can in principle “as high as you wish,” says An-ton Zeilinger of the University of Vienna. “So an individual photon can carry much more than a single bit.”

than a single bit.”
Extracting the information has been the problem, but Jo-hannes Courtial and his Univer-sity of Glasgow colleagues Jonathan Leach and Miles Padgett, aided by theorists from the University of Strathclyde in Glasgow, have dreamed up a

28 JUNE 2002 VOL

New Journal of Physics

The open-access journal for physics

Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test

Fabrizio Tamburini^{1,2,8}, Elettra Mari³, Anna Sponselli¹,
Bo Thidé^{4,5}, Antonio Bianchini¹ and Filippo Romanato^{6,7}

New Journal of Physics **14** (2012) 033001 (17pp)

Received 12 July 2011

Published 1 March 2012

Online at <http://www.njp.org/>

doi:10.1088/1367-2630/14/3/033001



Dalle stelle al Quantum computing

- Il quantum computing utilizza tecnologie specializzate, tra cui hardware e algoritmi che sfruttano la meccanica quantistica, per risolvere problemi complessi che i computer o i supercomputer classici non possono risolvere o non possono risolvere abbastanza rapidamente (IBM).
- Si utilizzano le proprietà della fisica quantistica per costruire dei circuiti logici basati su bit quantistici **Qubit**
- Ci sono vantaggi computazionali in molti tipi di calcolo, per esempio ridurre lineare un calcolo che cresce esponenzialmente di complessità

- **1. Bit (classico)** è l'unità fondamentale deterministica dell'informazione nei computer classici. Può assumere solo uno dei due stati definiti: 0 o 1. **Operazioni:** I bit sono elaborati attraverso **gates (porte logiche)** AND, OR, NOT, ecc. che eseguono operazioni booleane.
- **Qubit (bit quantistico)** è l'unità fondamentale dell'informazione basata sulle leggi della meccanica quantistica. Può esistere non solo in uno stato definito ($|0\rangle$ o $|1\rangle$) ma anche in una **sovrapposizione** di $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ dove α e β sono numeri complessi che rappresentano le ampiezze di probabilità, e $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. **Lo stato del qubit è definito solo quando viene misurato**, collassando in $|0\rangle$ o $|1\rangle$ con probabilità rispettive $|\alpha|^2$ e $|\beta|^2$. i gate quantistici operano su stati di sovrapposizione e introducono proprietà come l'**entanglement**, la **coerenza** e **interferenza**.

18/12/24

dal Bit al Qubit

 **Rotonium**

BIT

Classical Computing

0 

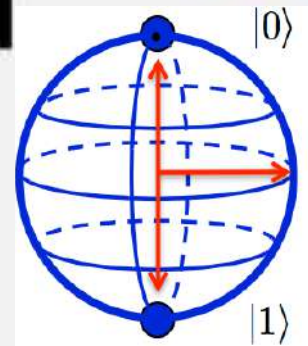
1 

QUBIT

Quantum Computing

0

$|0\rangle$



$\frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}$

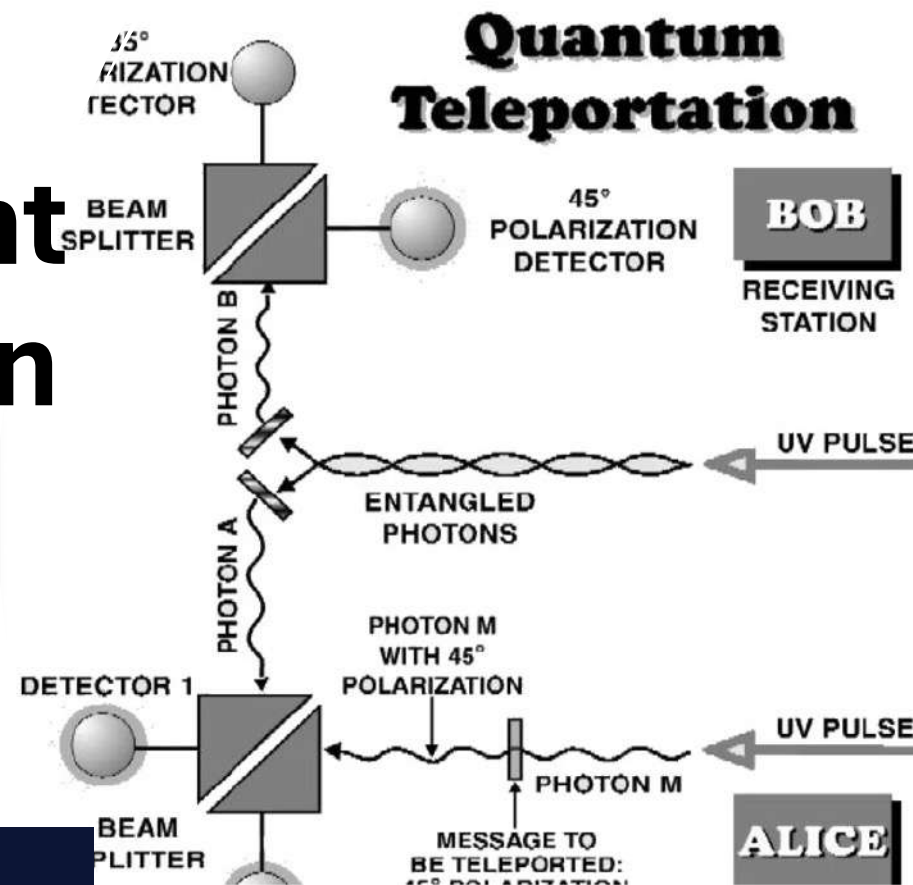
1

1

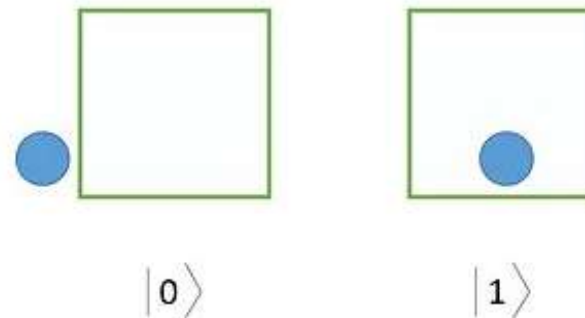
Quantum:

- entanglement
- superposition
- interferenza

Dualismo onda particella

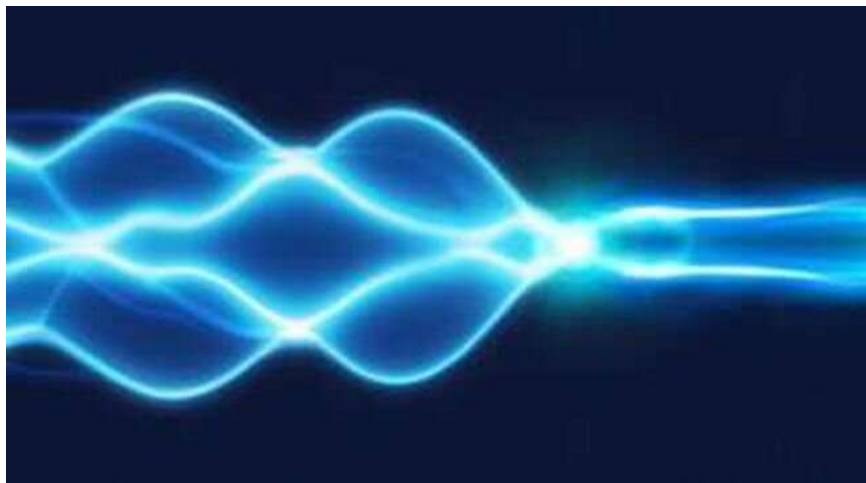
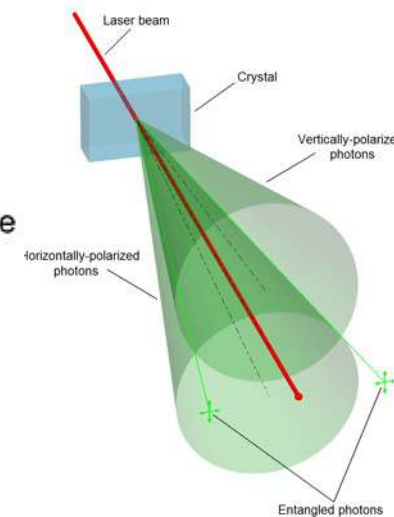
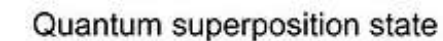


Classical states



**Le particelle fra di loro
entangled si comportano
come se fossero un'unica
realtà quantistica**

- **Serve per crittografia quantistica**
- **Teletrasporto**
- **Tomografia**
- **Quantum computing**



A cosa servono i computer quantistici?

I computer quantistici offrono una serie di vantaggi rispetto ai computer classici, grazie alle proprietà uniche della meccanica quantistica, come la **sovrapposizione**, l'**entanglement** e l'**interferenza quantistica**.

1. Velocità di calcolo esponenziale

- I computer quantistici possono risolvere problemi complessi in tempi esponenzialmente più rapidi rispetto ai computer classici. Ad esempio:
 - **Fattorizzazione di numeri interi** (importante per la crittografia) con l'algoritmo di Shor e computazione di **NUMERI PRIMI**.
 - **Ricerca nei database** con l'algoritmo di Grover, che riduce il numero di operazioni necessarie.

2. Simulazione di sistemi quantistici

- I computer quantistici sono ideali per simulare sistemi molecolari e fisici complessi che seguono le leggi della meccanica quantistica, come:
 - Reazioni chimiche.
 - Progettazione di nuovi materiali (superconduttori, catalizzatori).
 - Scoperta di farmaci tramite simulazioni molecolari avanzate.

3. Ottimizzazione avanzata

- I problemi di ottimizzazione complessi, presenti in settori come la logistica, la finanza e l'industria, possono essere risolti più efficacemente.
- Applicazioni includono:
 - Ottimizzazione delle rotte di trasporto.
 - Allocazione di risorse in tempo reale.
 - Portafogli finanziari più efficienti.

4. Gestione di dati su larga scala

- La capacità di elaborare grandi volumi di dati in parallelo consente di migliorare:
 - L'analisi dei Big Data.
 - Il machine learning e l'intelligenza artificiale (AI), accelerando il training di reti neurali complesse.

5. Sicurezza e crittografia

- I computer quantistici offrono:
 - La possibilità di compromettere algoritmi di crittografia classici (RSA).
 - Nuovi protocolli di sicurezza, come la crittografia quantistica e la distribuzione di chiavi quantistiche (QKD), intrinsecamente sicuri grazie all'entanglement.

6. Risultati impossibili per i computer classici

- I computer classici sono limitati nella capacità di risolvere alcuni problemi in tempi accettabili. I computer quantistici possono affrontare:
 - Problemi non deterministici (NP-completi).
 - Equazioni differenziali non lineari.
 - Analisi di sistemi complessi con molte variabili interdipendenti.

7. Miglioramento dell'intelligenza artificiale

- I computer quantistici possono rivoluzionare l'AI con algoritmi che migliorano la velocità e l'efficienza dei processi di apprendimento.

8. Riduzione del consumo energetico

- Per alcune operazioni, i computer quantistici potrebbero essere più efficienti dal punto di vista energetico rispetto ai supercomputer tradizionali.

COMPUTER QUANTISTICI

I PROBLEMI PRINCIPALI CON I SISTEMI STANDARD

P₁

COMPLICATO

Bassa temperatura (~0 K)

Alto vuoto (10⁻¹¹ torr)

Complessità del sistema

P₂

RIGIDO

Grandi dimensioni

Integrazione non facile

Installazione fissa

P₃

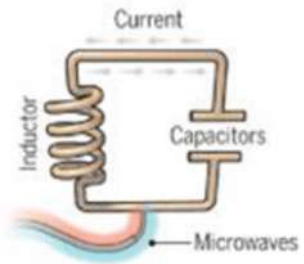
COSTOSO

Acquisizione

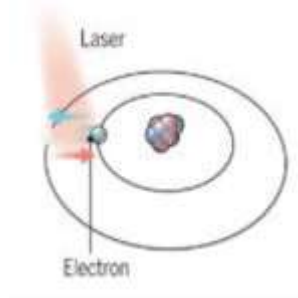
Operazione

Manutenzione

Quantum Computer tipologie



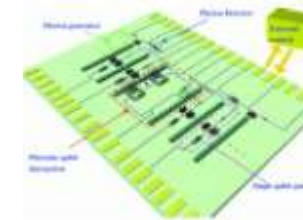
Superconducting circuits



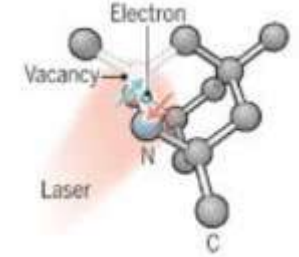
Trapped ions



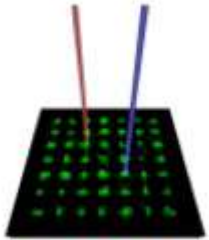
Silicon spin



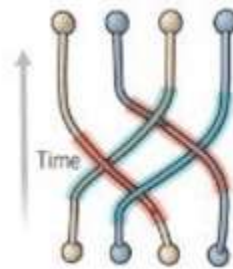
Photonic



NV diamonds



Neutral atoms



Topological qubits

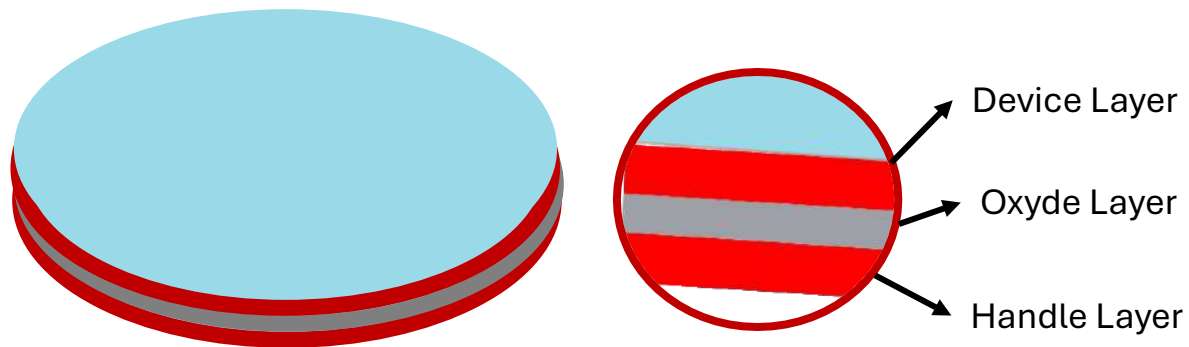
Rotonium

Una nuova realtà italiana

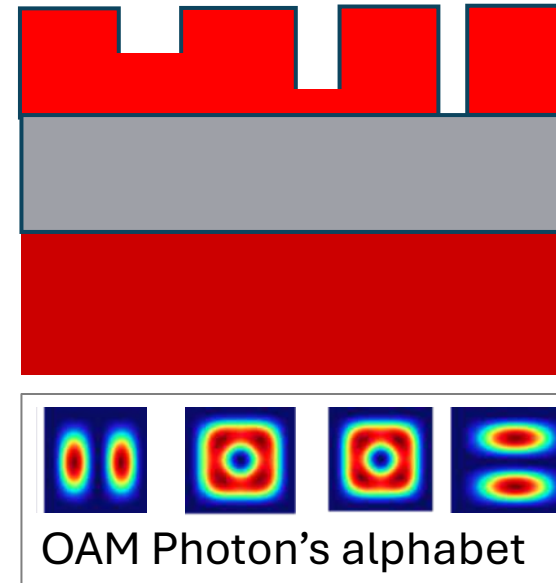
CALCOLO QUANTISTICO FOTONICO

COME LO REALIZZIAMO

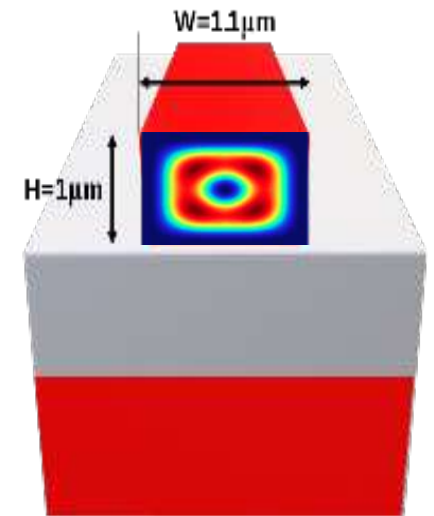
SILICON ON INSULATOR WAFER (SOI)



STRIP WAVEGUIDES



E.G. OF A WAVEGUIDE



Processo di fabbricazione di semiconduttori standard, solo un po' più preciso dal punto di vista geometrico

Rotonium ha una Soluzione UNICA di COMPUTER QUANTISTICI CHE SONO: *(patents and patents pending)*

SEMPLICI

Semplice utilizzando le proprietà OAM (Orbital Angular Momentum) dei fotoni: la crescente complessità dei circuiti è tenuta sotto controllo e con un nuovo metodo di correzione degli errori. Semplice: non più semplice!

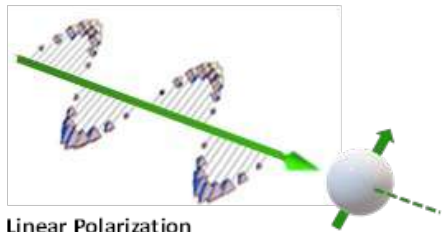
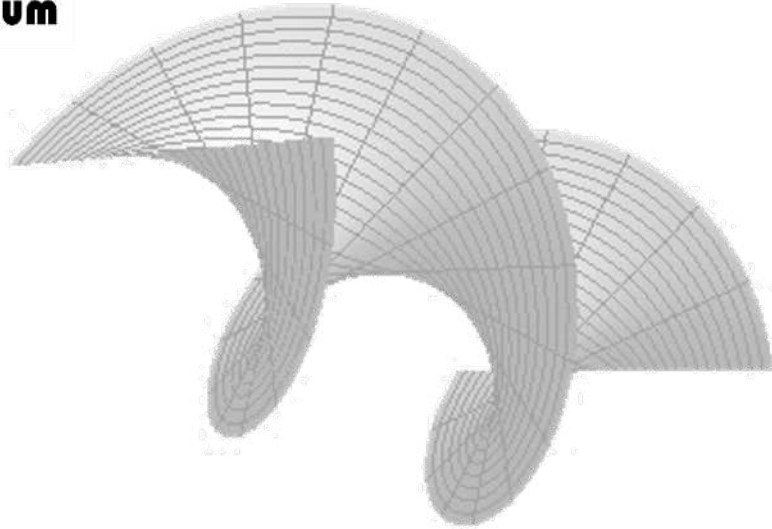
SCALABILI

Notevolmente più scalabile rispetto ad altre tecnologie fotoniche e utilizzando processi a semiconduttore standard

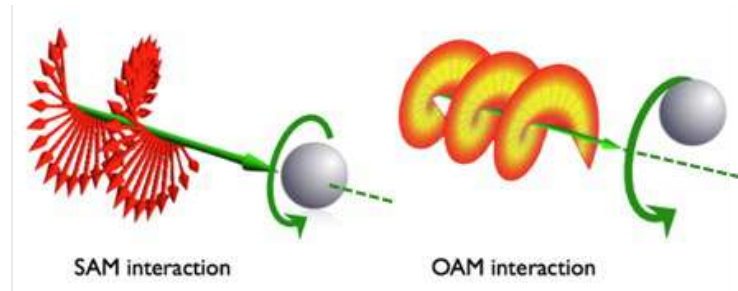
SOSTENIBILI

Conveniente da acquistare e gestire in dimensioni ridotte e con un basso fabbisogno energetico.

Utilizzabile in ambienti fissi o mobili



Linear Polarization



SAM interaction

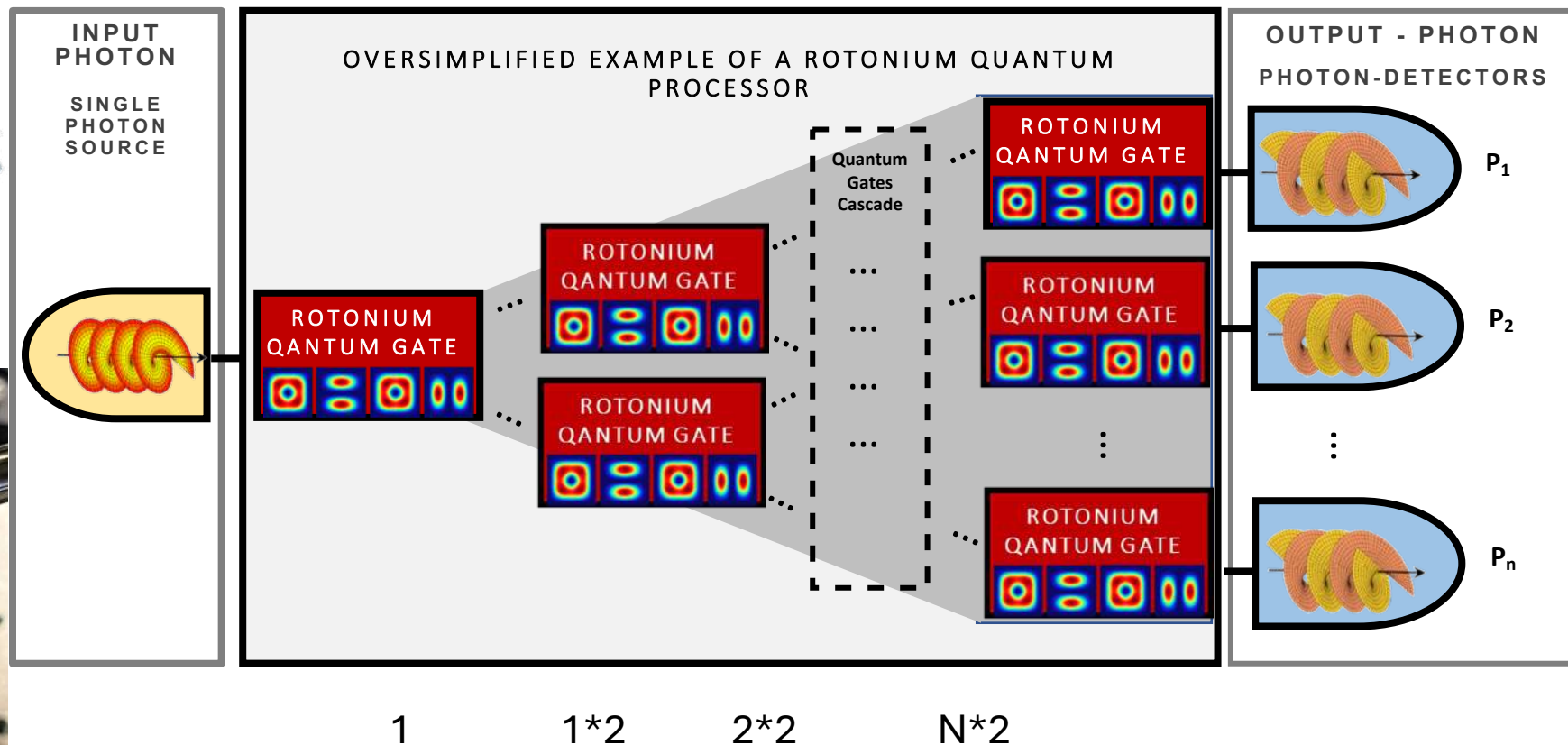
OAM interaction

COMPUTER QUANTISTICO A SINGOLO FOTONE

1
SOURCE

2
PROCESSOR

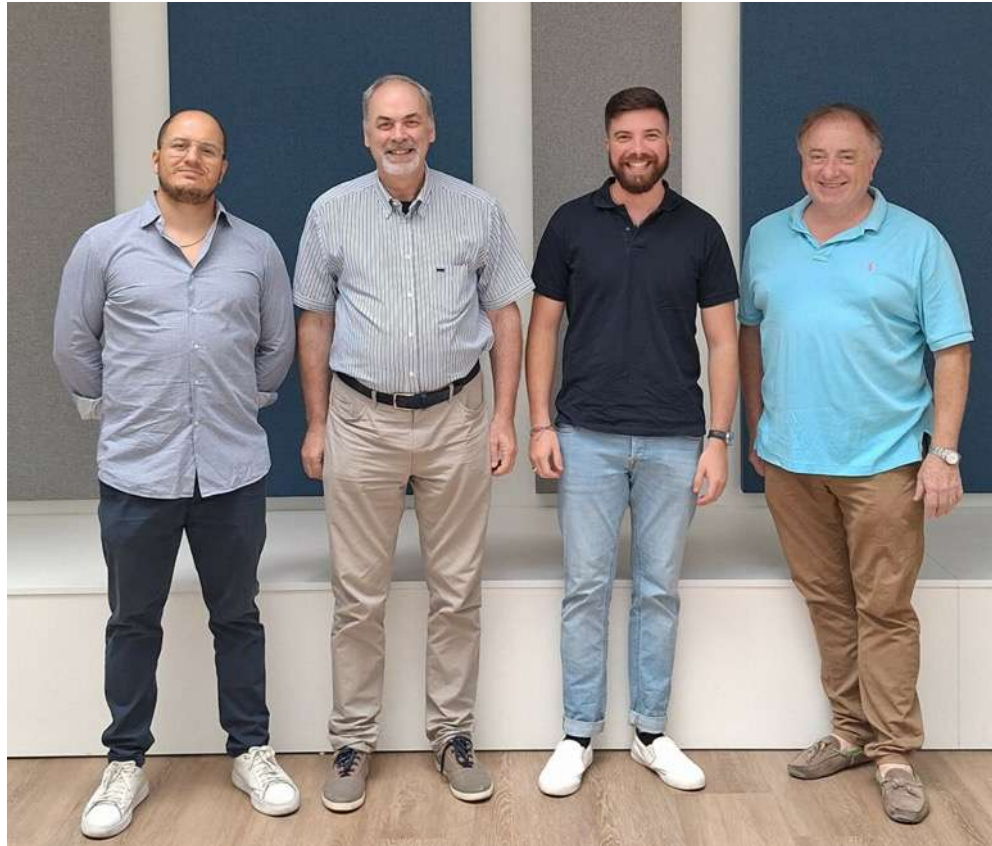
3
DETECTORS



Rotonium: Quantum computers

Made OF light

- Siamo un'azienda deep-tech che si concentra sullo sviluppo di un processore quantistico che sia:
- compatto
- bassa potenza
- scalabile
- temperatura ambiente
- Computer quantistici disegnati al fine di democratizzarne l'uso, consentendo all'età della creazione di beneficiare l'umanità.

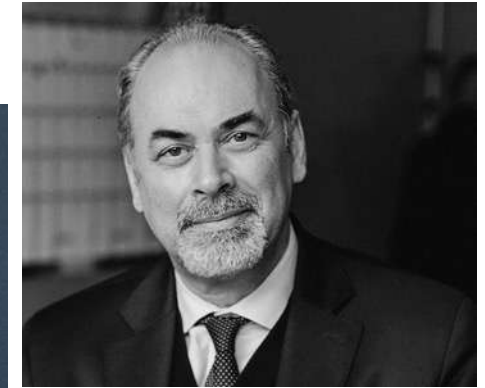


Nicolò
Leone

Roberto
Siagri

Matteo
Sanna

Fabrizio
Tamburini



• **ROBERTO SIAGRI**

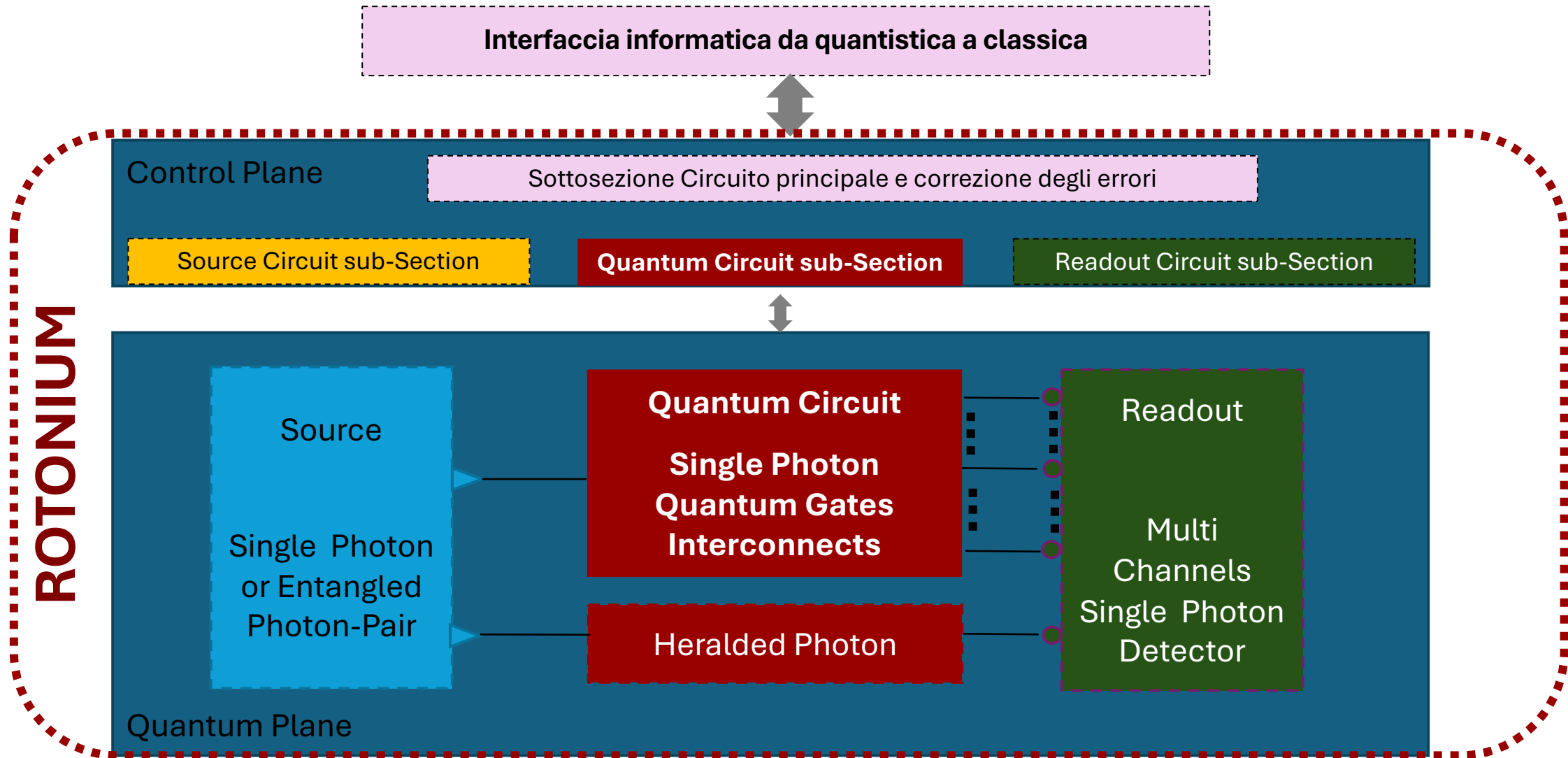
• Chief Executive Officer



• **FABRIZIO TAMBURINI**

• Chief Quantum Officer

COMPUTER QUANTISTICO FOTONICO: 2027



Conclusioni

- Nonostante i vantaggi, i computer quantistici hanno ancora delle limitazioni, come la fragilità dei qubit, la difficoltà nella correzione degli errori e la necessità di temperature estremamente basse. Tuttavia, i progressi continui stanno portando questi dispositivi sempre più vicini a un utilizzo pratico su larga scala.
- Sfruttando tutte le proprietà del campo EM fino al singolo fotone, è possibile estrarre e usare l'intera informazione codificata in ogni singolo fotone e nel fascio di luce.
- Con l'OAM possiamo implementare il calcolo quantistico fotonico qudit a temperatura ambiente e risolvere dei problemi in certi computer quantistici fotonici
- Siamo riusciti a fare qualche passo avanti con l'OAM e con una nuova correzione d'errore.