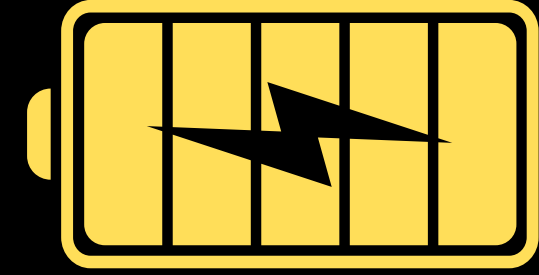


VIVERE LA SCIENZA



Un'iniziativa di



# LUCE QUANTISTICA E IL FUTURO DELLE COMUNICAZIONI

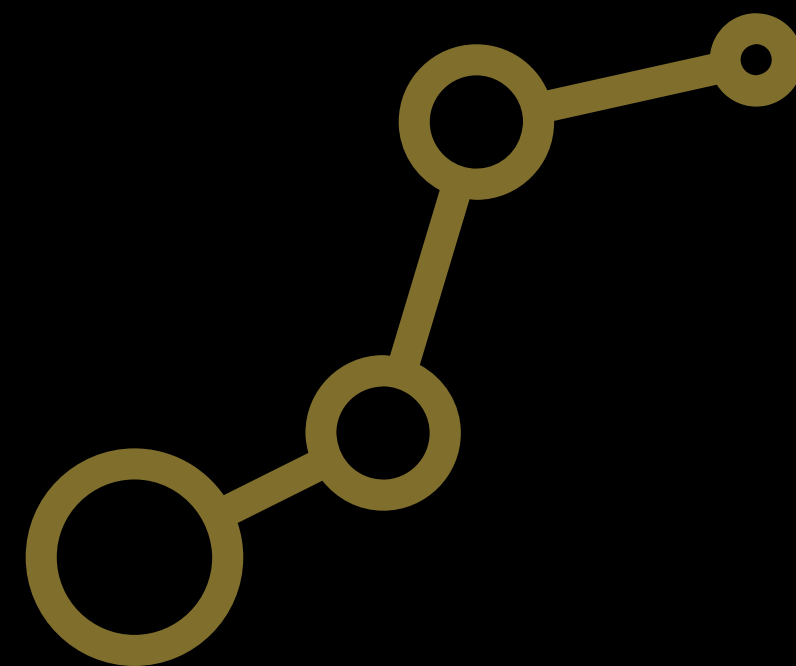
**Alessia Allevi**

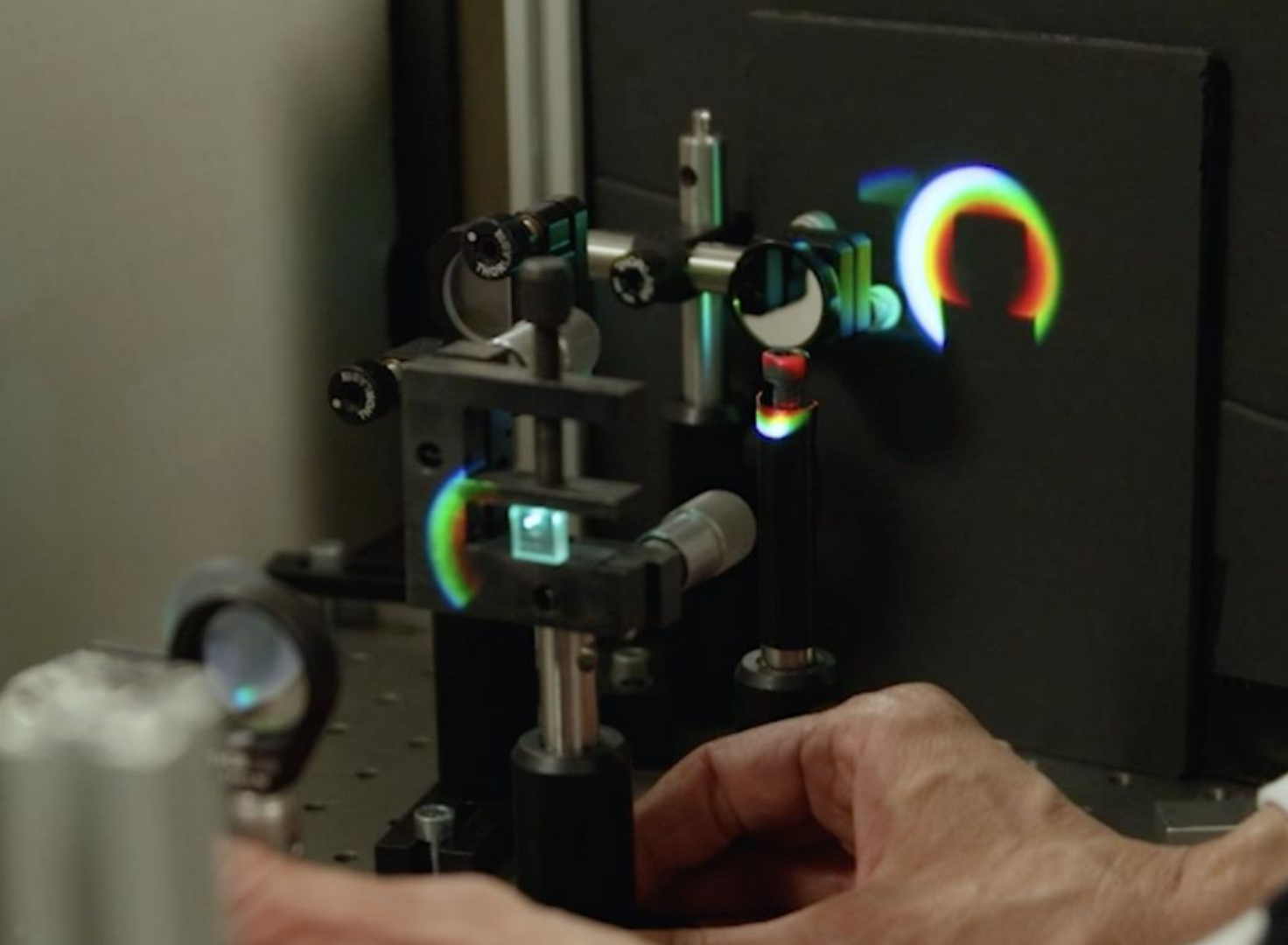
Università degli Studi dell'Insubria

In collaborazione con



**Rotary**  
Club di Como





# VIVERE LA SCIENZA

IL RUOLO DEL PROGRESSO SCIENTIFICO  
NELLE NOSTRE VITE

## Luce quantistica e il futuro delle comunicazioni

**Alessia Allevi**

Università degli Studi dell'Insubria

Un'iniziativa di  
 FONDAZIONE  
ALESSANDRO  
VOLTA

In collaborazione con  
 **Rotary**   
Club di Como

Como, 22 gennaio 2026

# VIVERE LA SCIENZA

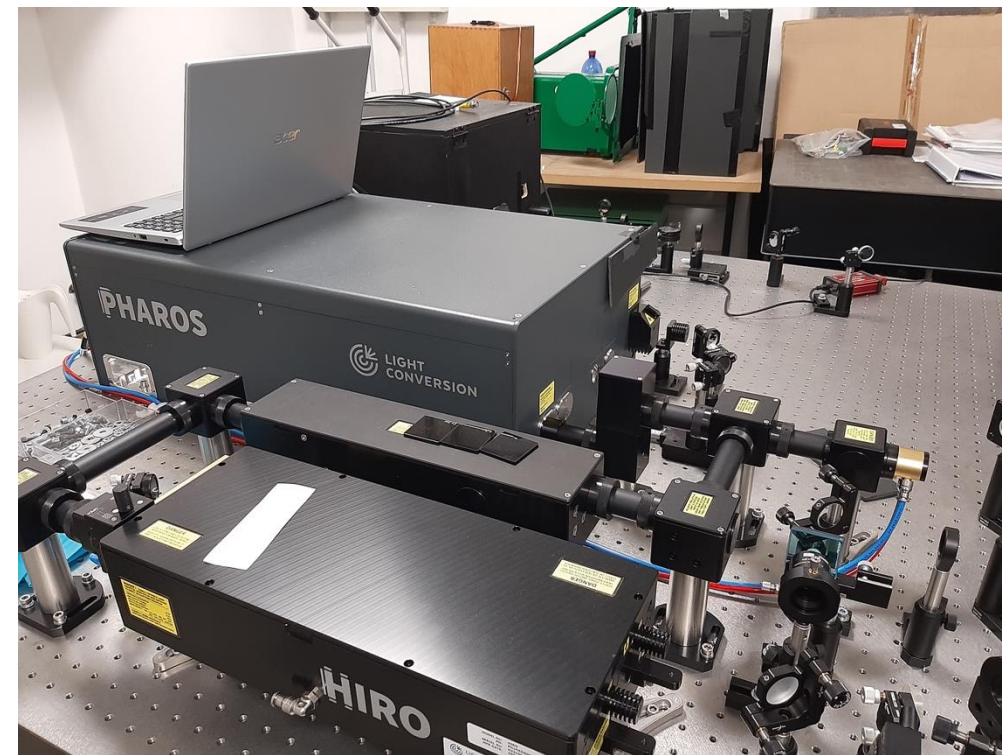
IL RUOLO DEL PROGRESSO SCIENTIFICO  
NELLE NOSTRE VITE

Fisico sperimentale



Dipartimento di Scienza e Alta Tecnologia

Laboratorio di Ottica Quantistica



# VIVERE LA SCIENZA

IL RUOLO DEL PROGRESSO SCIENTIFICO  
NELLE NOSTRE VITE

## Di cosa parliamo?

- Luce
- Meccanica Quantistica
- Comunicazioni

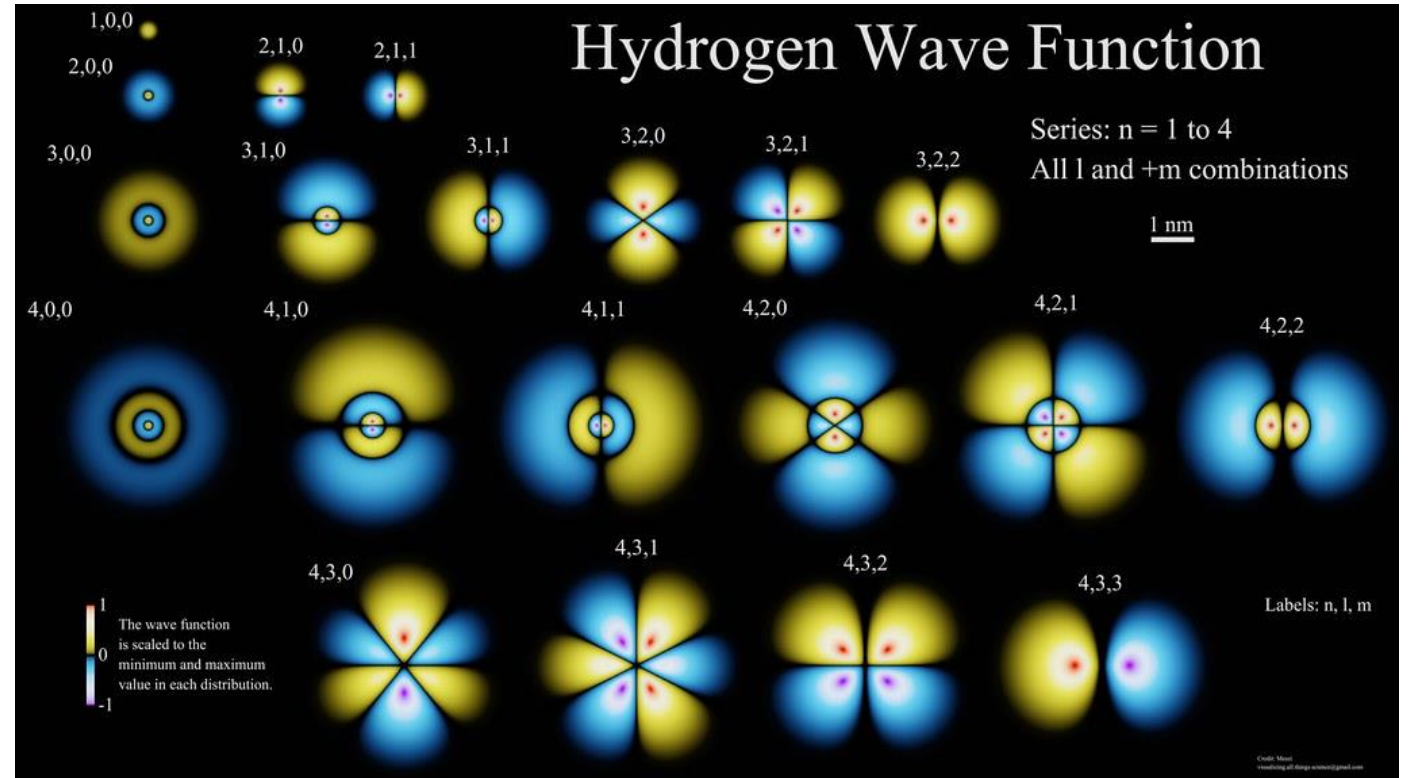


# VIVERE LA SCIENZA

IL RUOLO DEL PROGRESSO SCIENTIFICO  
NELLE NOSTRE VITE

## Di cosa parliamo?

- Luce
- Meccanica Quantistica
- Comunicazioni



# VIVERE LA SCIENZA

IL RUOLO DEL PROGRESSO SCIENTIFICO  
NELLE NOSTRE VITE

## Di cosa parliamo?

- Luce
- Meccanica Quantistica
- Comunicazioni



# VIVERE LA SCIENZA

IL RUOLO DEL PROGRESSO SCIENTIFICO  
NELLE NOSTRE VITE

**Wikipedia:** Il termine luce (dal latino lux) è riferito alla porzione dello spettro elettromagnetico visibile dall'occhio umano, compresa tra 400 e 700 nanometri di lunghezza d'onda, ossia tra 790 e 434 THz di frequenza. Questo intervallo coincide con il centro della regione spettrale della radiazione elettromagnetica emessa dal Sole che riesce ad arrivare al suolo attraverso l'atmosfera.

**Treccani:** Ente fisico al quale è dovuta l'eccitazione nell'occhio delle sensazioni visive, cioè la possibilità, da parte dell'occhio, di vedere gli oggetti.

## LUCE

**Sorgente di luce**

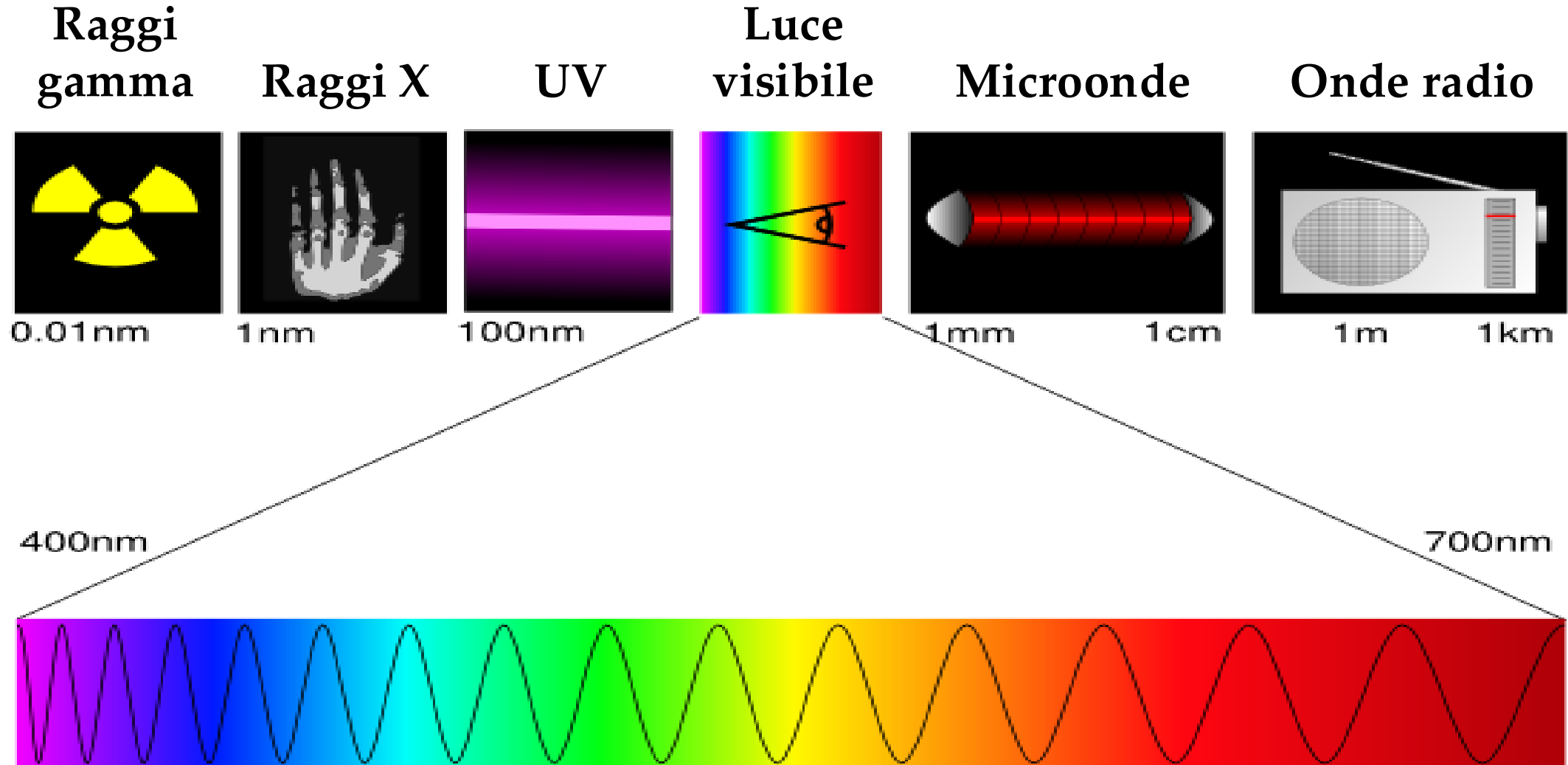
**Come ne faccio esperienza**

# VIVERE LA SCIENZA

IL RUOLO DEL PROGRESSO SCIENTIFICO  
NELLE NOSTRE VITE

# LUCE

Lo spettro elettromagnetico

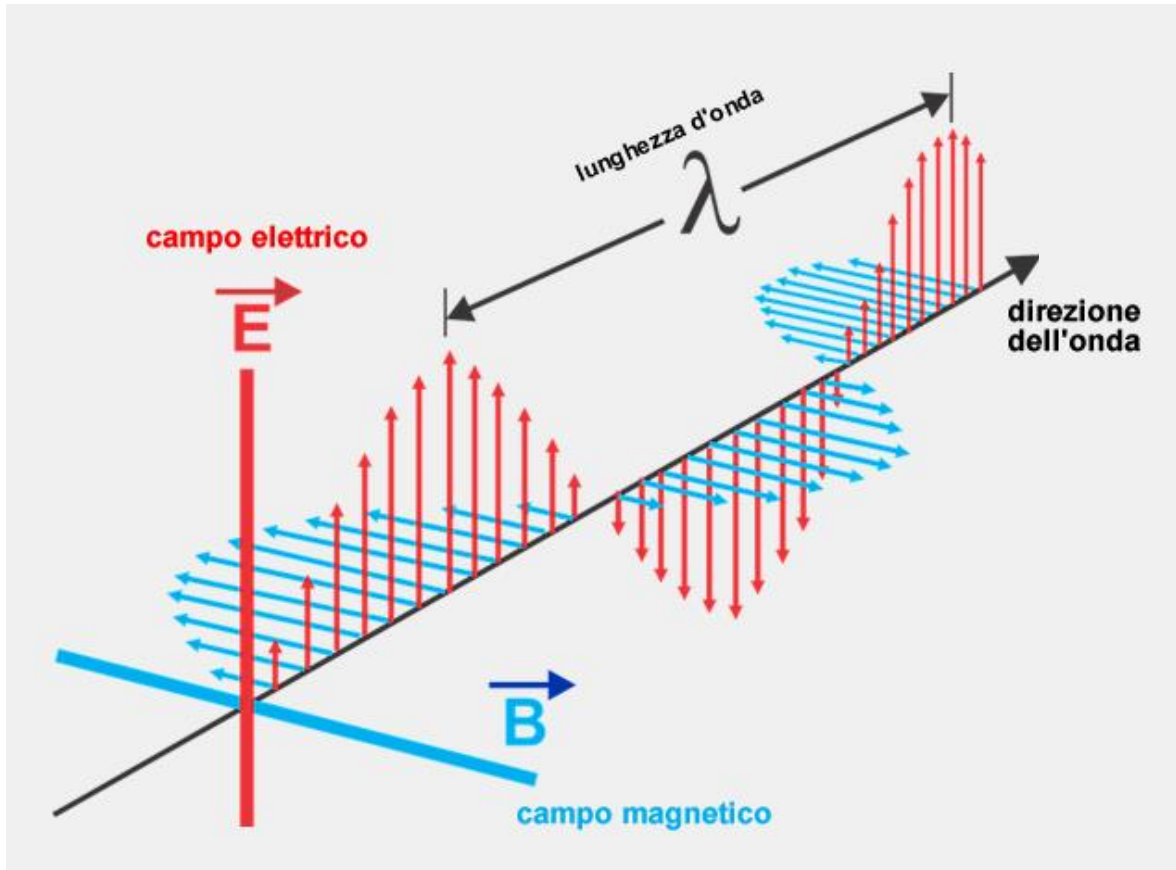


# VIVERE LA SCIENZA

IL RUOLO DEL PROGRESSO SCIENTIFICO  
NELLE NOSTRE VITE

## LUCE

Le onde elettromagnetiche



$$\lambda f = c$$

$\lambda$  = lunghezza d'onda

$f$  = frequenza

$c$  = velocità di propagazione  
nel vuoto  $c \approx 3 \cdot 10^8$  m/s

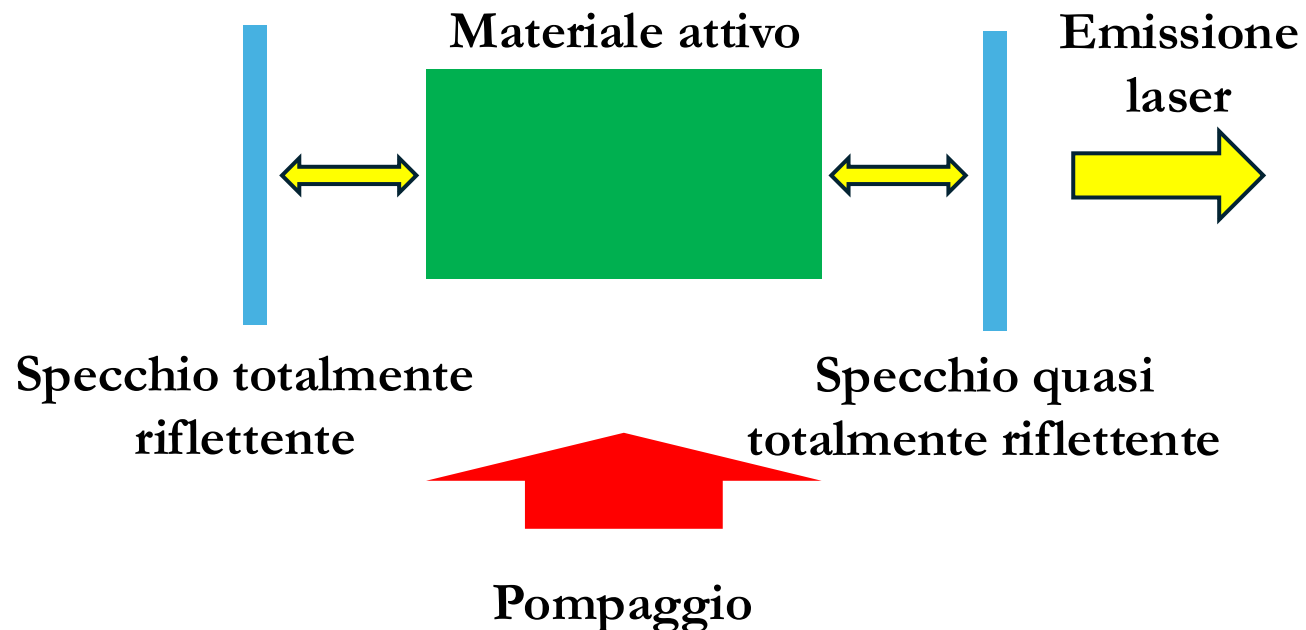
Le onde elettromagnetiche  
trasportano energia sotto  
forma di un campo  
elettromagnetico propagante

# VIVERE LA SCIENZA

IL RUOLO DEL PROGRESSO SCIENTIFICO  
NELLE NOSTRE VITE

## LUCE

In ambito scientifico la sorgente più utilizzata non è naturale, bensì artificiale: il **LASER**



I laser sono caratterizzati dalle seguenti proprietà:

- Monocromaticità
- Coerenza (spaziale e temporale)
- Direzionalità
- Brillanza

Inventato negli anni '60  prima rivoluzione quantistica

# VIVERE LA SCIENZA

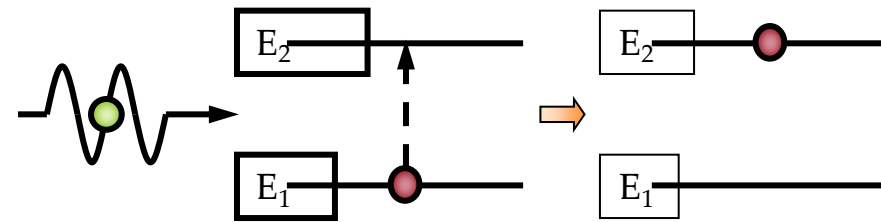
IL RUOLO DEL PROGRESSO SCIENTIFICO  
NELLE NOSTRE VITE

# MECCANICA QUANTISTICA

Il principio di funzionamento del laser si basa sulle regole della Meccanica Quantistica!

Nei laser luce e materia interagiscono tra loro attraverso processi di:

- **Assorbimento**
- Emissione spontanea
- Emissione stimolata



# VIVERE LA SCIENZA

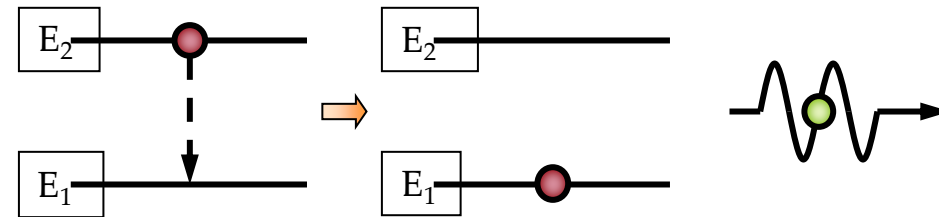
IL RUOLO DEL PROGRESSO SCIENTIFICO  
NELLE NOSTRE VITE

# MECCANICA QUANTISTICA

Il principio di funzionamento del laser si basa sulle regole della Meccanica Quantistica!

Nei laser luce e materia interagiscono tra loro attraverso processi di:

- *Assorbimento*
- **Emissione spontanea**
- *Emissione stimolata*



# VIVERE LA SCIENZA

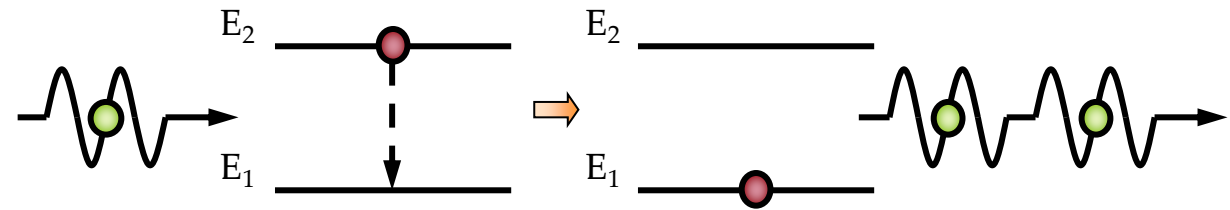
IL RUOLO DEL PROGRESSO SCIENTIFICO  
NELLE NOSTRE VITE

# MECCANICA QUANTISTICA

Il principio di funzionamento del laser si basa sulle regole della Meccanica Quantistica!

Nei laser luce e materia interagiscono tra loro attraverso processi di:

- **Assorbimento**
- **Emissione spontanea**
- **Emissione stimolata**



Secondo tali processi, lo scambio energetico è QUANTIZZATO, cioè si verifica per salti discreti.

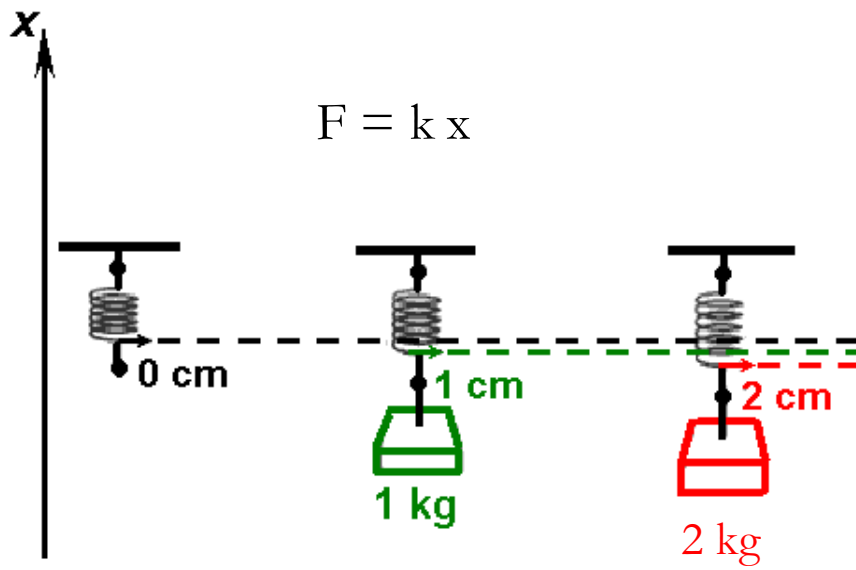
# VIVERE LA SCIENZA

IL RUOLO DEL PROGRESSO SCIENTIFICO  
NELLE NOSTRE VITE

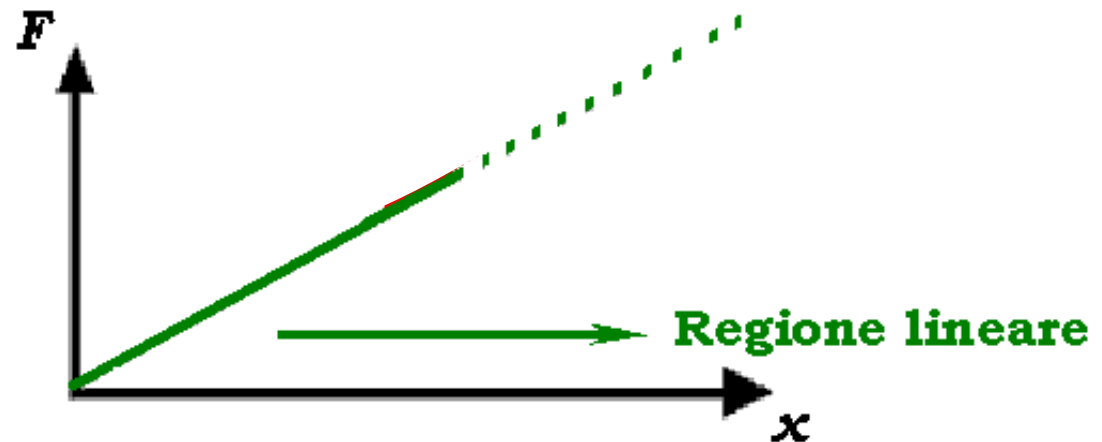
## OTTICA NON LINEARE

L'uso dei laser ha permesso di osservare alcuni interessanti **fenomeni ottici** cosiddetti **non lineari**. Alcuni di questi hanno una spiegazione puramente quantistica.

### ESEMPIO: LA MOLLA



Si dice che il sistema fisico (la molla) risponde linearmente a una perturbazione esterna



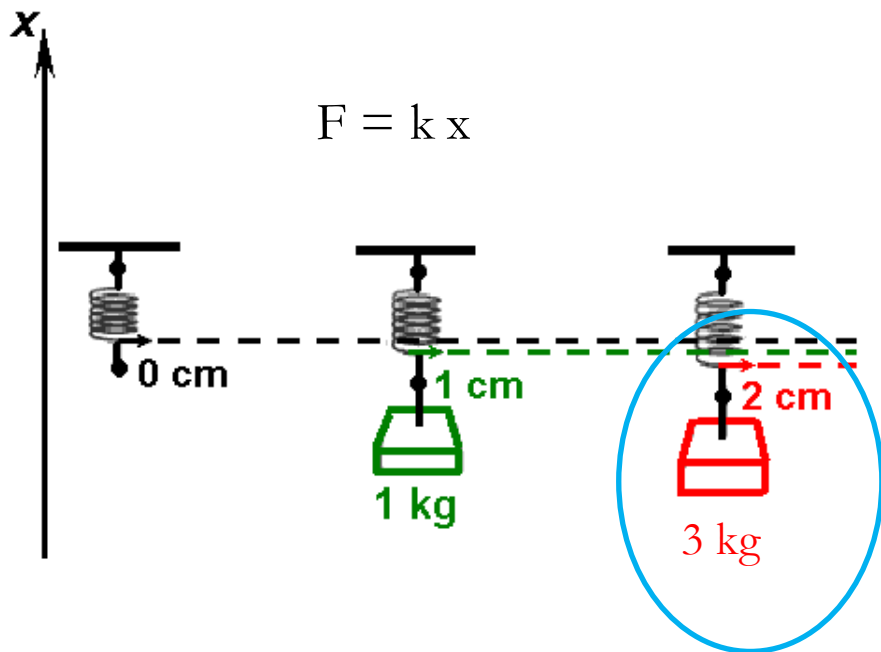
# VIVERE LA SCIENZA

IL RUOLO DEL PROGRESSO SCIENTIFICO  
NELLE NOSTRE VITE

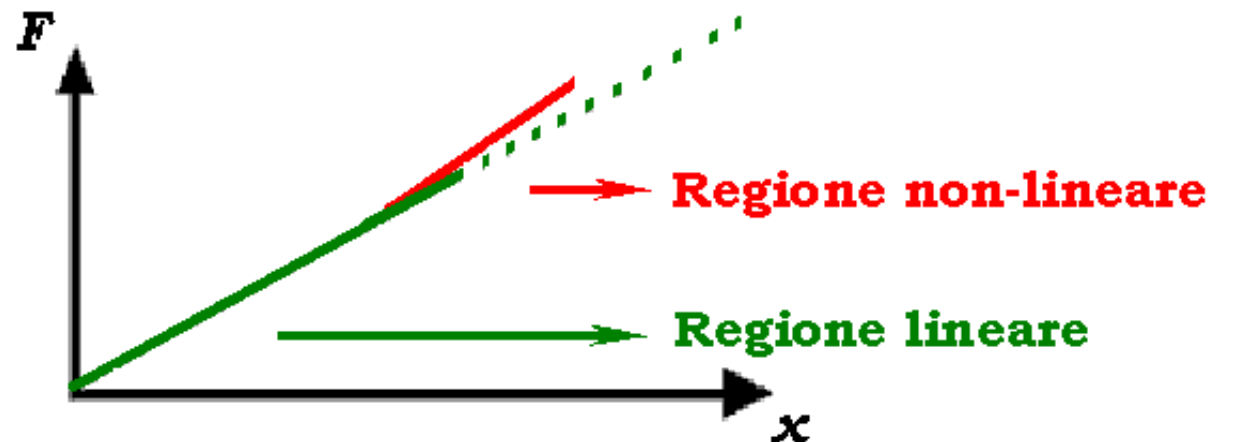
## OTTICA NON LINEARE

L'uso dei laser ha permesso di osservare alcuni interessanti **fenomeni ottici** cosiddetti **non lineari**. Alcuni di questi hanno una spiegazione puramente quantistica.

### ESEMPIO: LA MOLLA



In questo caso si osserva che si possono avere deviazioni dalla linearità, anche se si tratta di perturbazioni



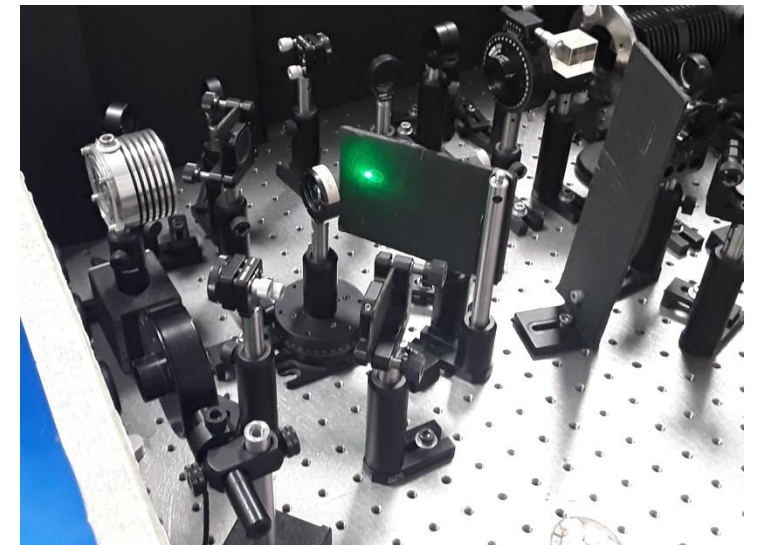
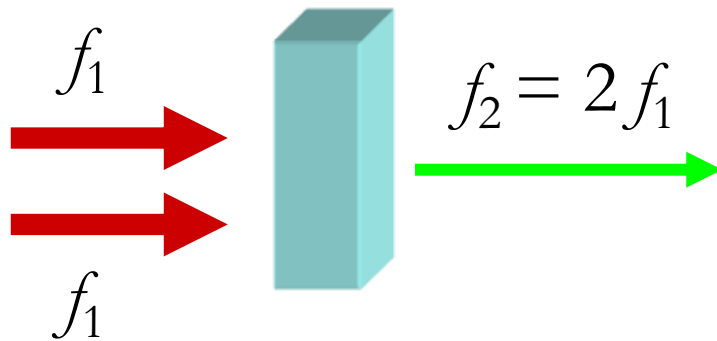
## OTTICA NON LINEARE

Per osservare un fenomeno ottico non lineare occorrono:

- Un campo di radiazione intenso  $\longrightarrow$  una sorgente laser
- Un mezzo opportuno  $\longrightarrow$  il materiale non lineare

Nel mezzo non lineare la luce può interagire con se stessa o con altre sorgenti di luce

**ESEMPIO: GENERAZIONE DI SECONDA ARMONICA**



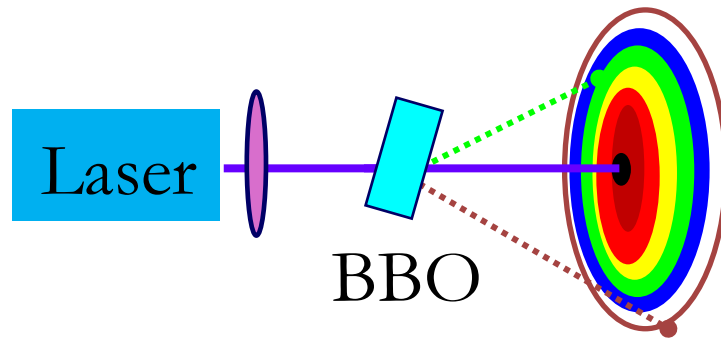
# VIVERE LA SCIENZA

IL RUOLO DEL PROGRESSO SCIENTIFICO  
NELLE NOSTRE VITE

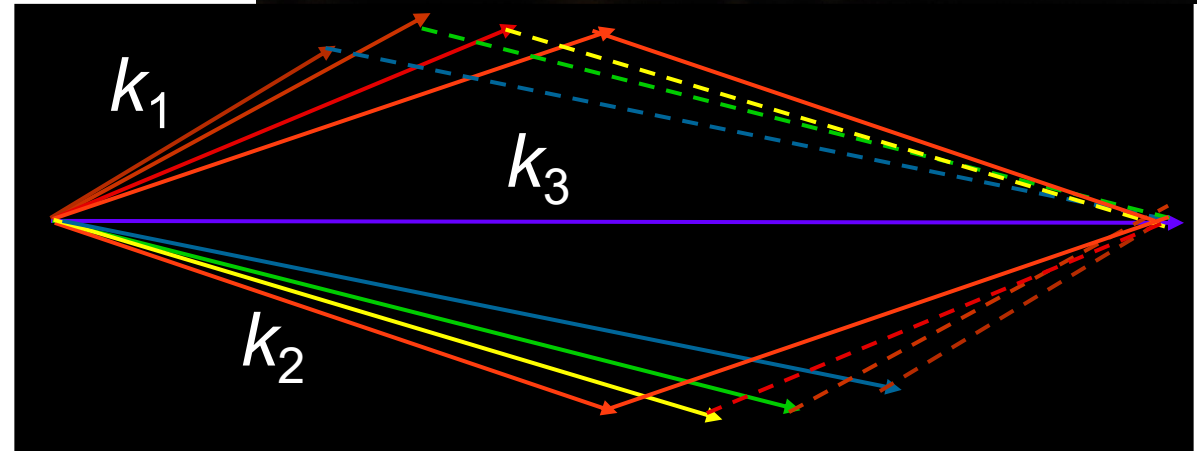
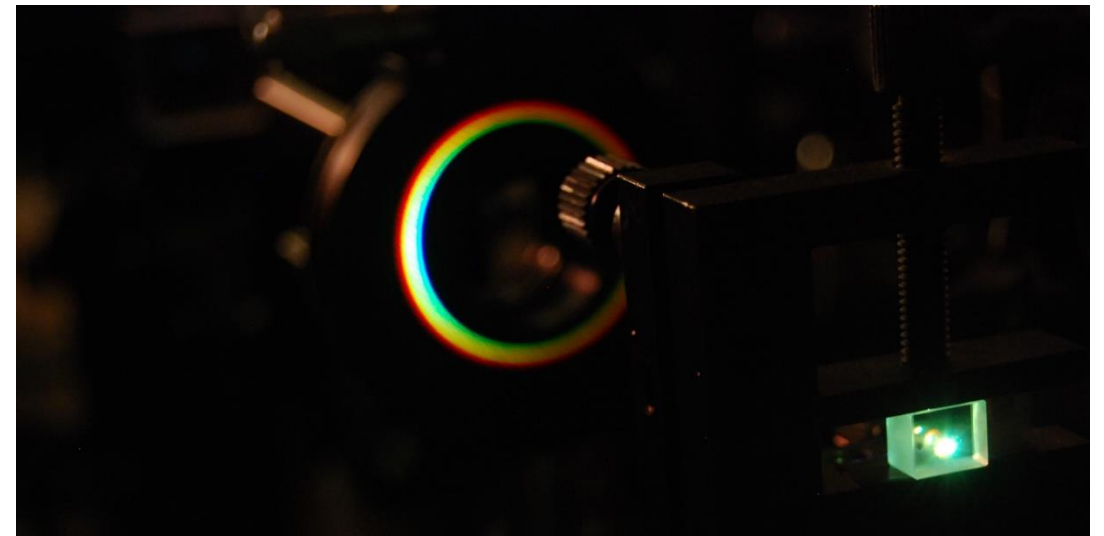
## OTTICA NON LINEARE

### LINEARE

Un fenomeno non lineare prettamente quantistico è dato dalla  
**SPONTANEOUS PARAMETRIC DOWN CONVERSION**



Mandando un campo solo nel  
cristallo, si generano molte coppie di  
campi che soddisfano le leggi di  
conservazione di energia e momento



**VIVERE LA SCIENZA**

IL RUOLO DEL PROGRESSO SCIENTIFICO  
NELLE NOSTRE VITE

# MECCANICA QUANTISTICA

La luce generata dalla spontaneous parametric down conversion è  
**QUANTISTICAMENTE CORRELATA** in diversi gradi di libertà, ad esempio  
nel numero di fotoni **→ STATI ENTANGLED DELLA LUCE**

$$|\psi_{\text{TWB}}\rangle = \sum_{n=0}^{\infty} \sqrt{p(n)} \exp(i\phi_0) |n_{\text{TWB}}, n_{\text{TWB}}\rangle$$

Matematicamente parlando questo significa che la funzione d'onda che descrive lo stato entangled non è fattorizzabile, cioè non può essere scritta come il prodotto di due stati.

La perfetta correlazione nel numero può essere una risorsa utile per lo sviluppo di nuove tecnologie **→** seconda rivoluzione quantistica

# VIVERE LA SCIENZA

IL RUOLO DEL PROGRESSO SCIENTIFICO  
NELLE NOSTRE VITE

# COMUNICAZIONI

Cosa significa comunicare?

Mettere in comune un messaggio, un'informazione...



**Alice**  
il mittente

10001111000  
011010001

**Canale di comunicazione**



**Bob**  
il ricevitore



# VIVERE LA SCIENZA

IL RUOLO DEL PROGRESSO SCIENTIFICO  
NELLE NOSTRE VITE

# COMUNICAZIONI

Ma una comunicazione può essere danneggiata durante la trasmissione...o  
**...intercettata**



**Alice**  
il mittente

10001111000  
011010001

**Eve**  
l'intercettatrice



# VIVERE LA SCIENZA

IL RUOLO DEL PROGRESSO SCIENTIFICO  
NELLE NOSTRE VITE

# COMUNICAZIONI

Ma Bob è in grado di rendersene conto?



**Alice**  
il mittente

10001111000  
011010001

**Eve**  
l'intercettatrice



C'è un'intercettatrice?

**Bob**  
il ricevitore

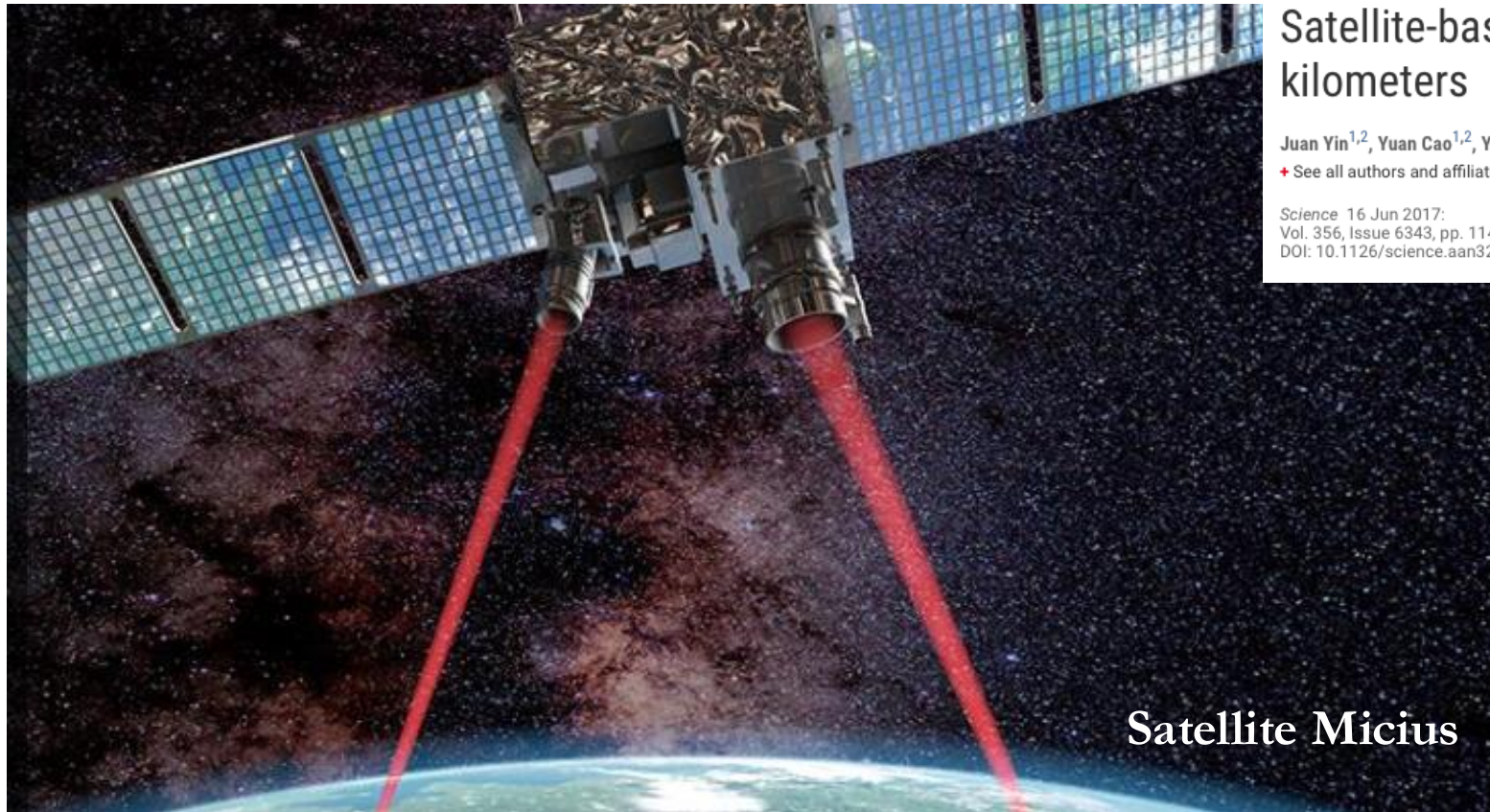


# VIVERE LA SCIENZA

IL RUOLO DEL PROGRESSO SCIENTIFICO  
NELLE NOSTRE VITE

# COMUNICAZIONI SICURE

Lo sfruttamento delle perfette correlazioni nel numero rende possibile avere una comunicazione sicura



## Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers

Juan Yin<sup>1,2</sup>, Yuan Cao<sup>1,2</sup>, Yu-Huai Li<sup>1,2</sup>, Sheng-Kai Liao<sup>1,2</sup>, Liang Zhang<sup>2,3</sup>, Ji-Gang Ren<sup>1,2</sup>, Wen-Qi Cai<sup>1,2</sup>, Wei-Yue Liu<sup>1,2</sup>, Bo Li<sup>1</sup>...

+ See all authors and affiliations

Science 16 Jun 2017:  
Vol. 356, Issue 6343, pp. 1140-1144  
DOI: 10.1126/science.aan3211

Distribuzione di fotoni  
entangled tra due città  
della Cina distanti tra  
loro 1200 km

Satellite Micius

# VIVERE LA SCIENZA

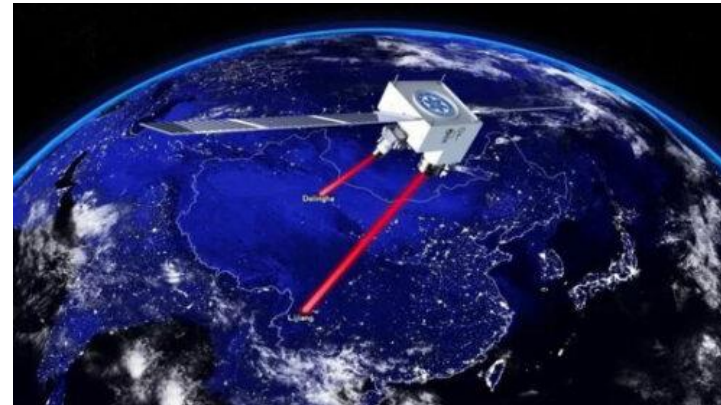
IL RUOLO DEL PROGRESSO SCIENTIFICO  
NELLE NOSTRE VITE

# COMUNICAZIONI SICURE

Esistono due regimi di intensità utili per questo obiettivo:

- **Regime di singolo fotone**  $\longrightarrow$  diodi a valanga  $\longrightarrow$  CLICK!
- **Regime mesoscopico**  $\longrightarrow$  rivelatori che contano i fotoni

- Esistono protocolli di comunicazione già collaudati (per esempio BB84 ed E91)
- Esistono prodotti commerciali (anche aziende italiane)
- Sono oggetto di nuove sfide (ad esempio progetto Eagle-1)



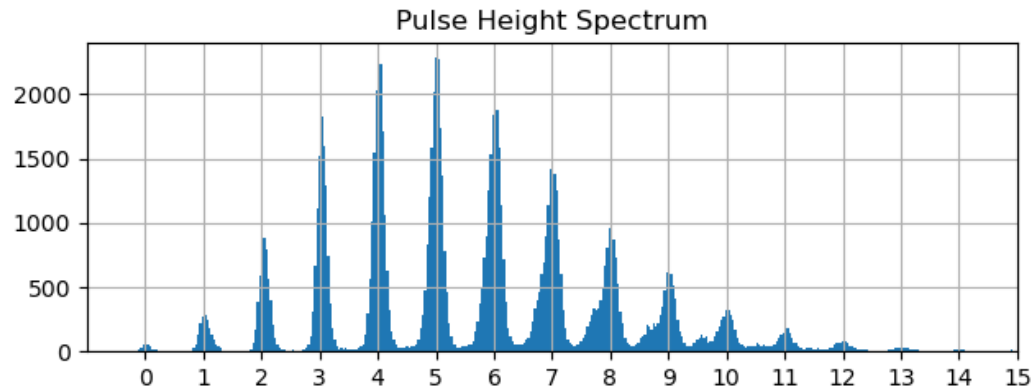
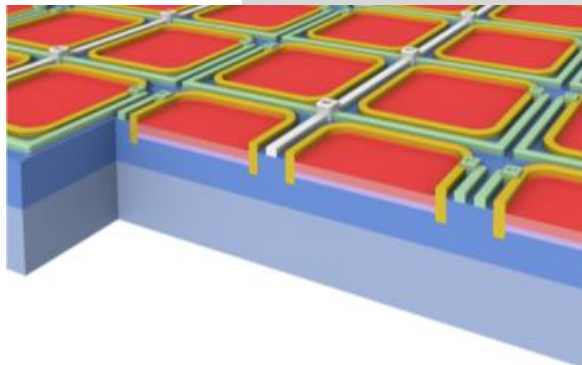
# VIVERE LA SCIENZA

IL RUOLO DEL PROGRESSO SCIENTIFICO  
NELLE NOSTRE VITE

# COMUNICAZIONI SICURE

Esistono due regimi di intensità utili per questo obiettivo:

- **Regime di singolo fotone**  $\longrightarrow$  diodi a valanga  $\longrightarrow$  CLICK!
- **Regime mesoscopico**  $\longrightarrow$  rivelatori che contano i fotoni



Fotomoltiplicatori al Silicio (SiPM)

- Nuovi protocolli di comunicazione
- Ottimizzazione degli schemi di rivelazione

# VIVERE LA SCIENZA

IL RUOLO DEL PROGRESSO SCIENTIFICO  
NELLE NOSTRE VITE

# COMUNICAZIONI SICURE

## Regime di singolo fotone

Le misure in coincidenza  
garantiscono la sicurezza

MA

nel caso di perdite o intercettazioni  
non rivelo nulla, l'informazione è  
persa

## Regime mesoscopico

La misura di correlazioni  
quantistiche può avvenire anche in  
presenza di perdite o  
intercettazioni

MA

occorre comunque stabilire dei  
limiti di accettabilità

# VIVERE LA SCIENZA

IL RUOLO DEL PROGRESSO SCIENTIFICO  
NELLE NOSTRE VITE

# COMUNICAZIONI SICURE

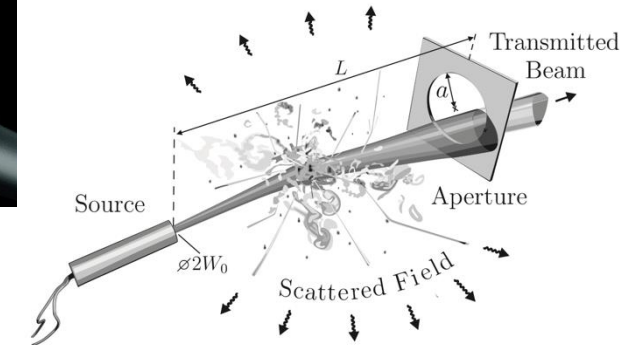
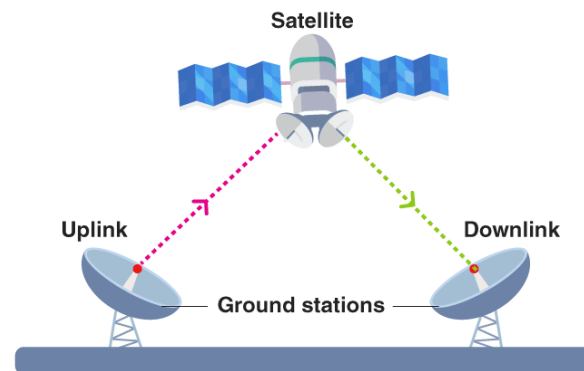
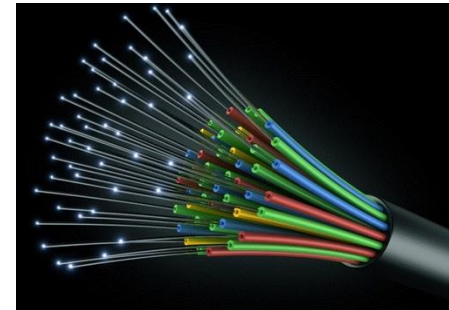
## Lunghezze d'onda coinvolte

- Finestre telecom: prima (850 nm), seconda (1300-1310 nm), terza (1550 nm) e quarta (oltre 1600 nm)

- propagazione in fibra
- propagazione in aria
- propagazione Terra-satellite

Per applicazioni sottomarine

- Visibile (regione spettrale blu-verde)
- propagazione libera



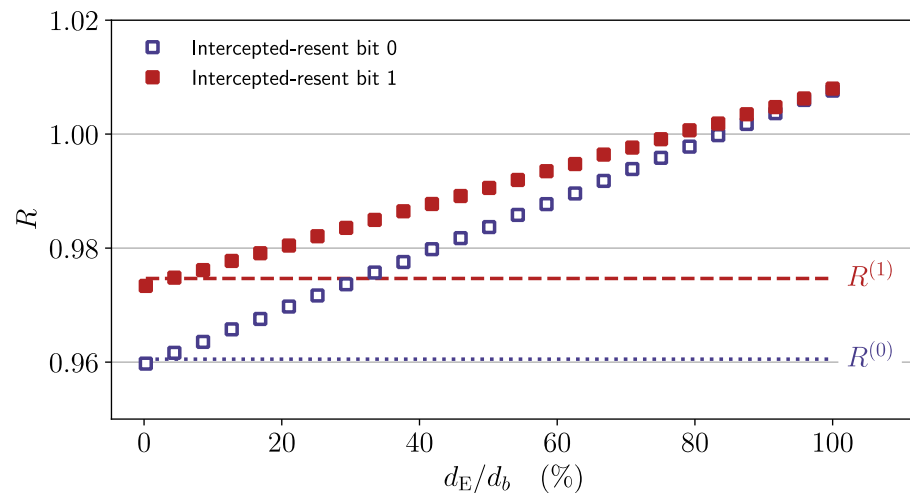
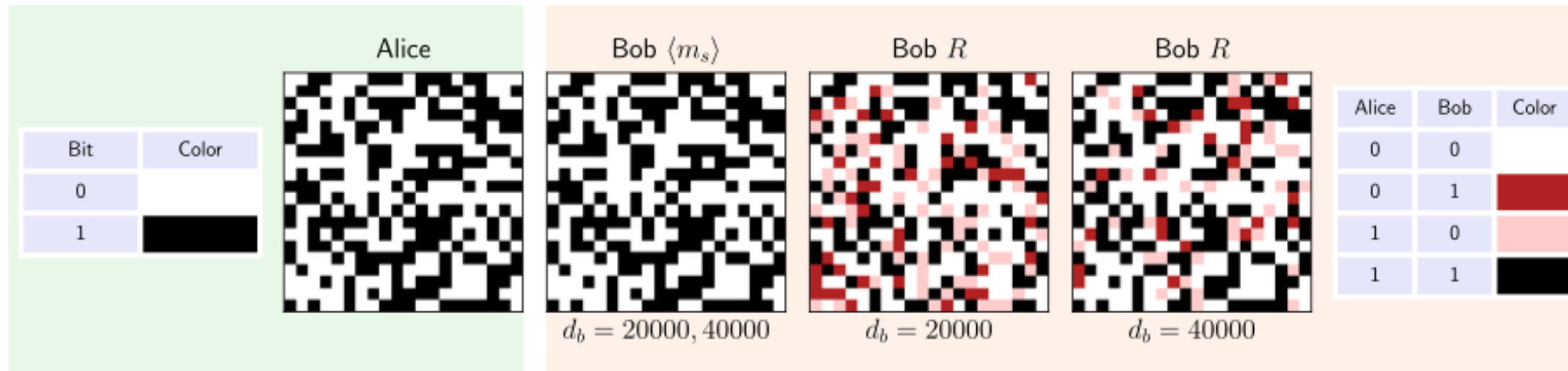
PHYSICAL REVIEW A **96**, 043856 (2017)

# VIVERE LA SCIENZA

IL RUOLO DEL PROGRESSO SCIENTIFICO  
NELLE NOSTRE VITE

# COMUNICAZIONI SICURE

## ESEMPIO: COMUNICAZIONE SICURA IN REGIME MESOSCOPICO



La misura di correlazioni quantistiche permette a Bob di capire se c'è stata intercettazione e quindi di interrompere la comunicazione laddove necessario.

# VIVERE LA SCIENZA

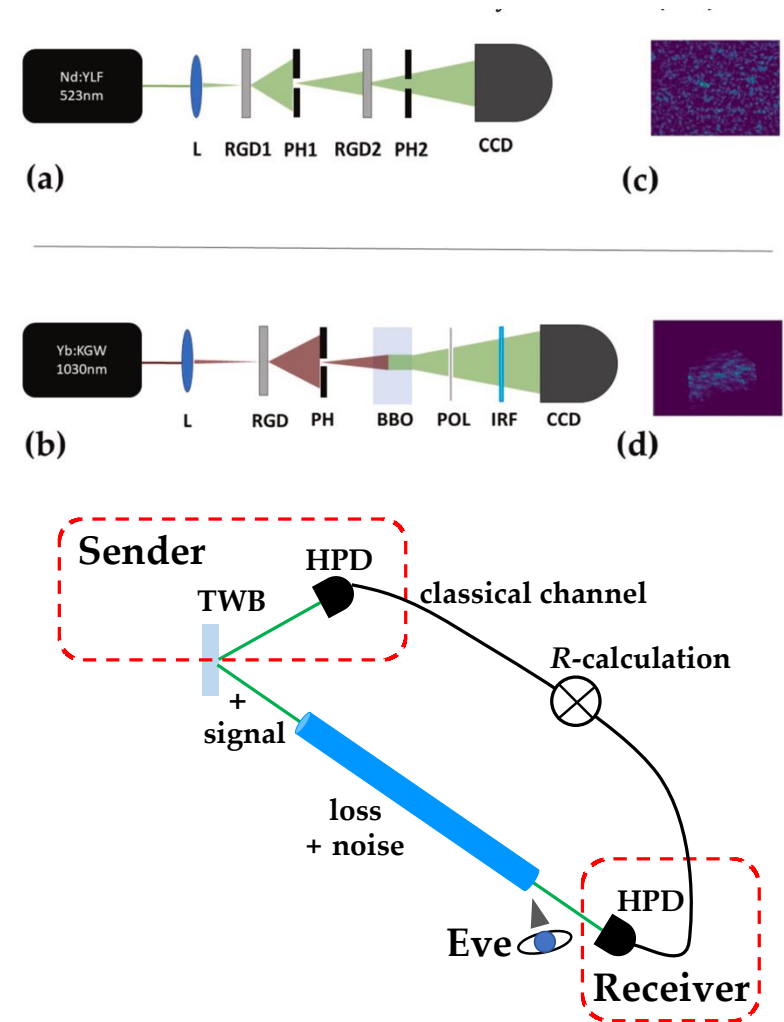
IL RUOLO DEL PROGRESSO SCIENTIFICO  
NELLE NOSTRE VITE


# COMUNICAZIONI SICURE

E in futuro? Come proseguire?

Il metodo presentato può essere esteso ad alfabeti più grandi, codificando l'informazione in diversi stati

I fotomoltiplicatori al Silicio, grazie alla loro compattezza e portabilità, possono essere impiegati nell'ambito della comunicazione sott'acqua.





Grazie per l'attenzione!