

Gruppo di Fisica dello Stato Solido  
Dipartimento di Fisica, Università di Torino

Presentazione degli Argomenti di Tesi per le Lauree Magistrali in  
Fisica, Fisica dei Sistemi Complessi, Scienza dei Materiali

Torino, 11 novembre 2019

# **Diamante artificiale: Applicazioni nell'ottica quantistica**

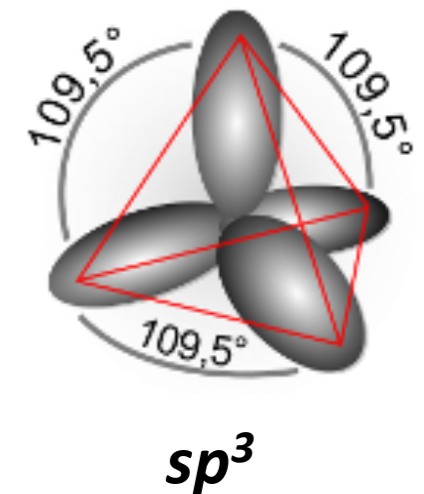
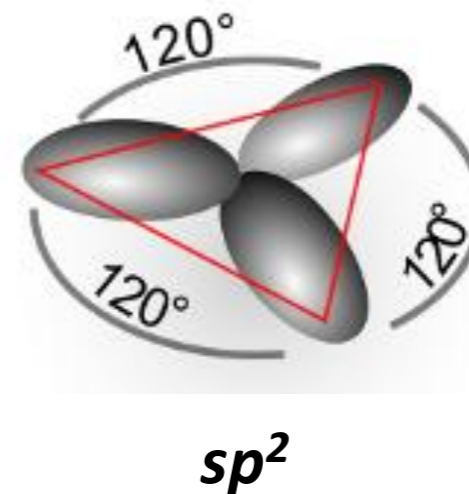
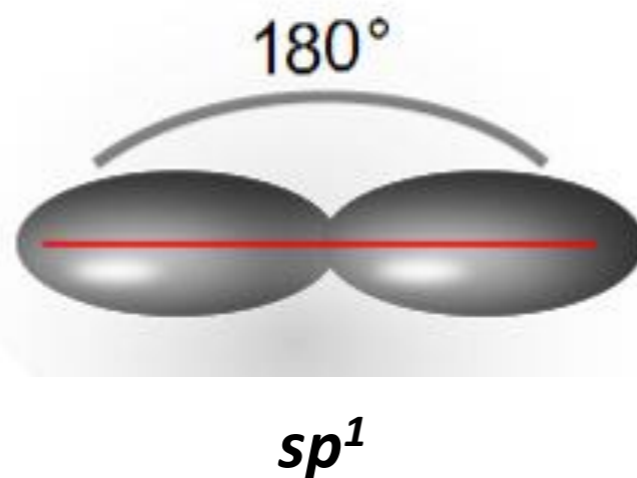
**Jacopo Forneris**

# Il carbonio

Periodic table of elements showing Carbon (C) highlighted in a blue box. The table includes group labels (IA, IIA, etc.), element symbols, atomic numbers, and names. A legend at the bottom identifies colors for metals (yellow), transition metals (light blue), and non-metals (pink).

6  
**C**  
Carbon  
12.0107

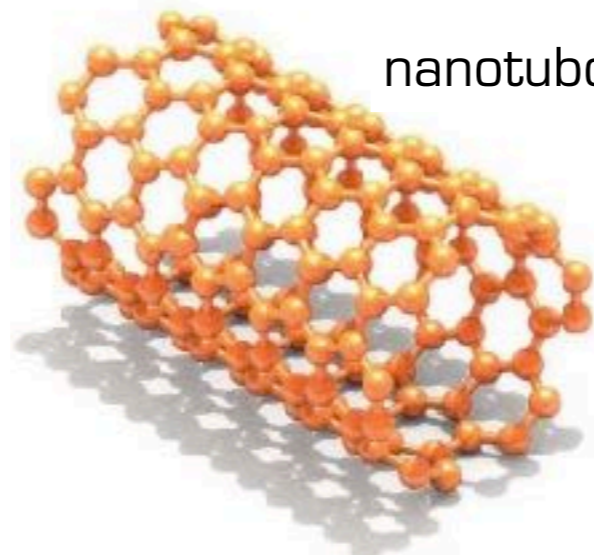
## Tre tipi di orbitali ibridi



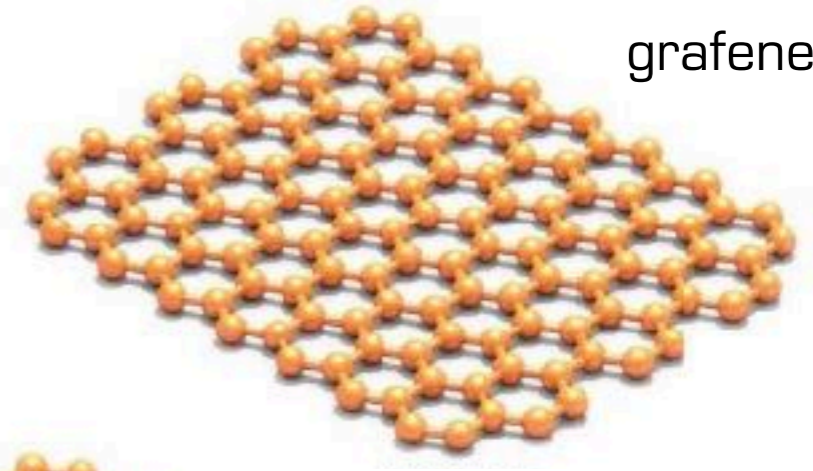
# Il carbonio

6  
**C**  
Carbon  
12.0107

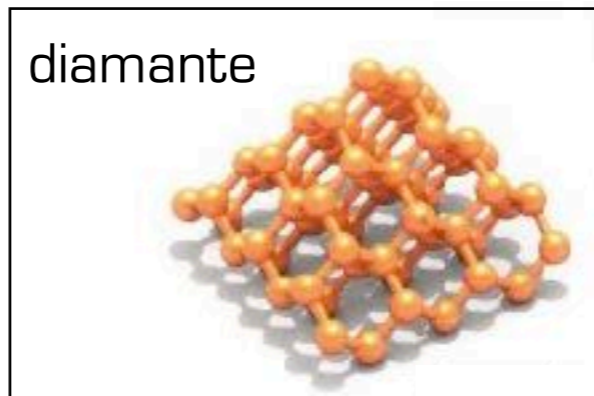
Numerose forme allotropiche:  
differenti strutture a partire dalla  
stessa specie chimica



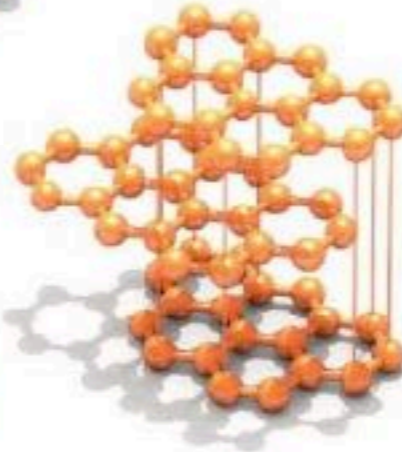
nanotubo



grafene



diamante



grafite

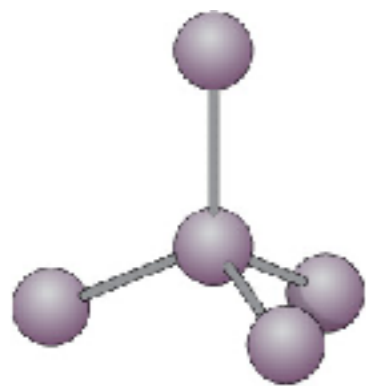


fullerene

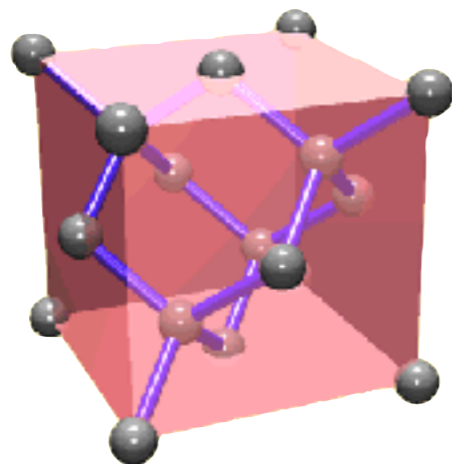


# Diamante

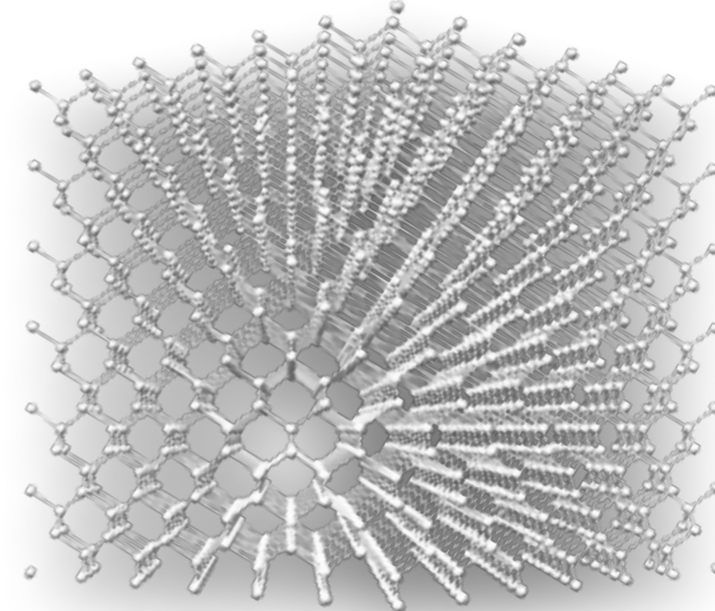
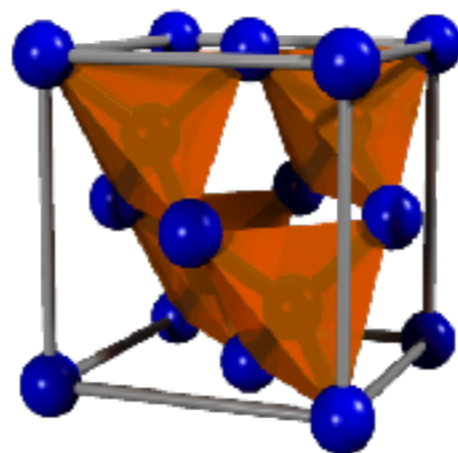
αδάμας (indistruttibile)



legami covalenti con disposizione tetraedrica



unità fondamentale di cristallo



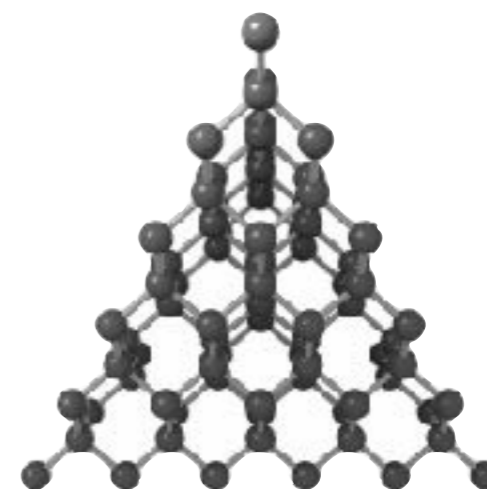
struttura periodica

## Struttura cristallina

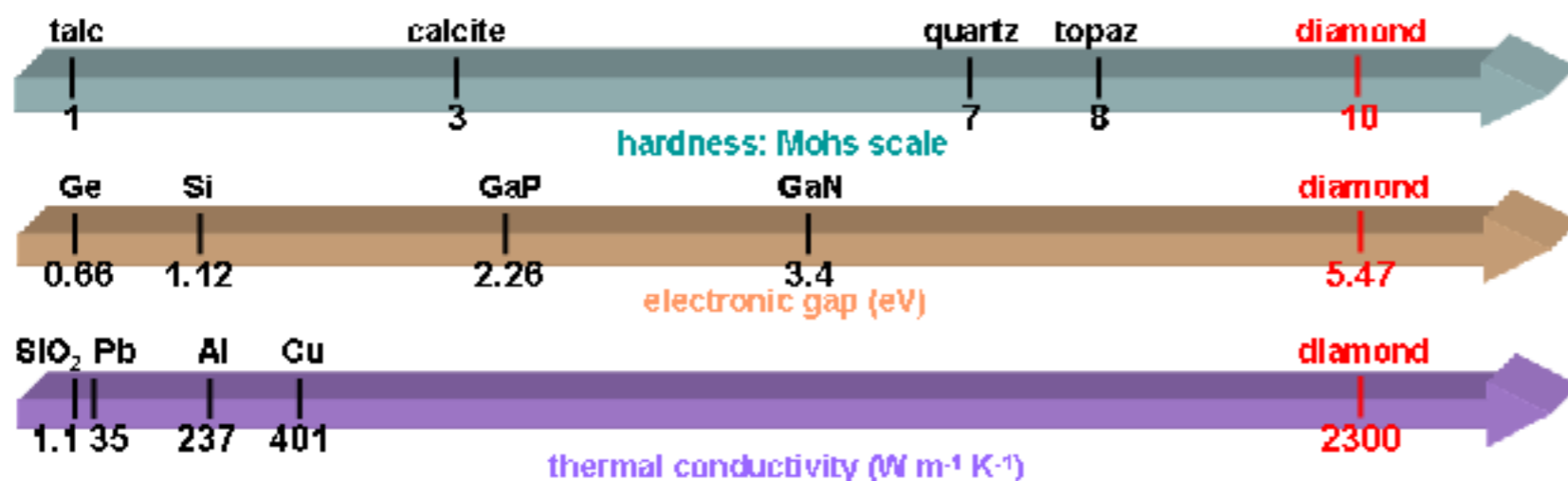
Tetraedro: struttura rigida, forti legami chimici

Unità di cella: massimo numero di atomi possibili

Dei materiali noti, il diamante ha il maggior numero di atomi per unità di volume



## Proprietà chimico-fisiche



durezza  
inerzia chimica

resistenza elettrica  
trasparenza

conducibilità termica

# Il diamante naturale

Il diamante è una forma **meta-stabile** del carbonio in condizioni ambientali standard

Viene formato in natura ad **alte pressioni e temperature**

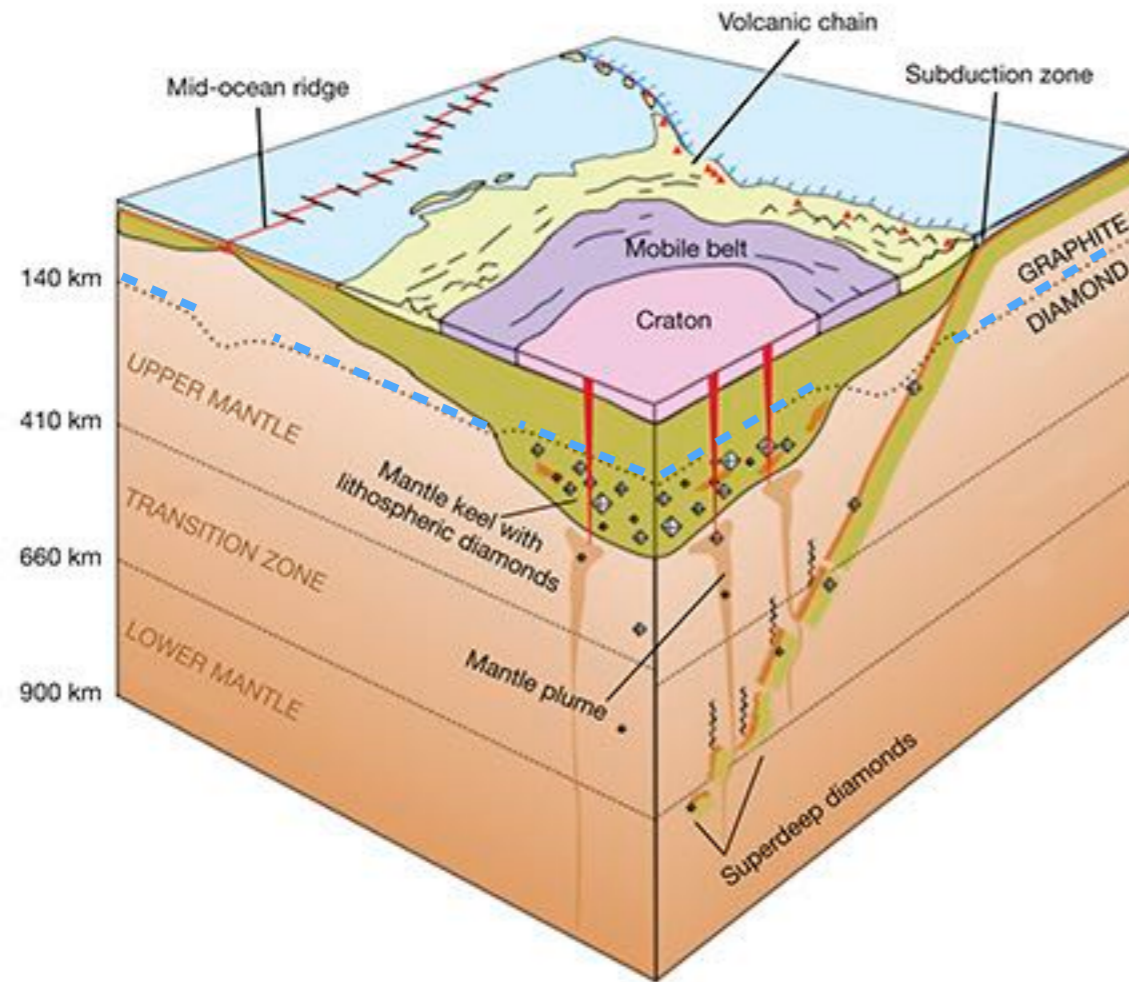
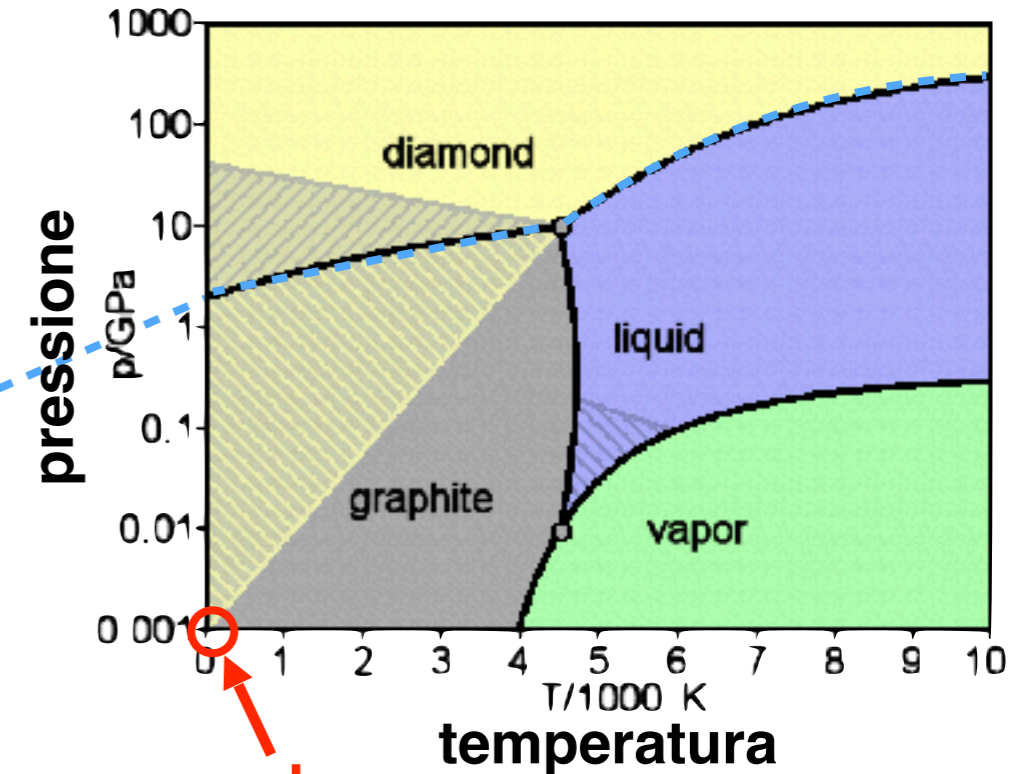


diagramma di fase del carbonio

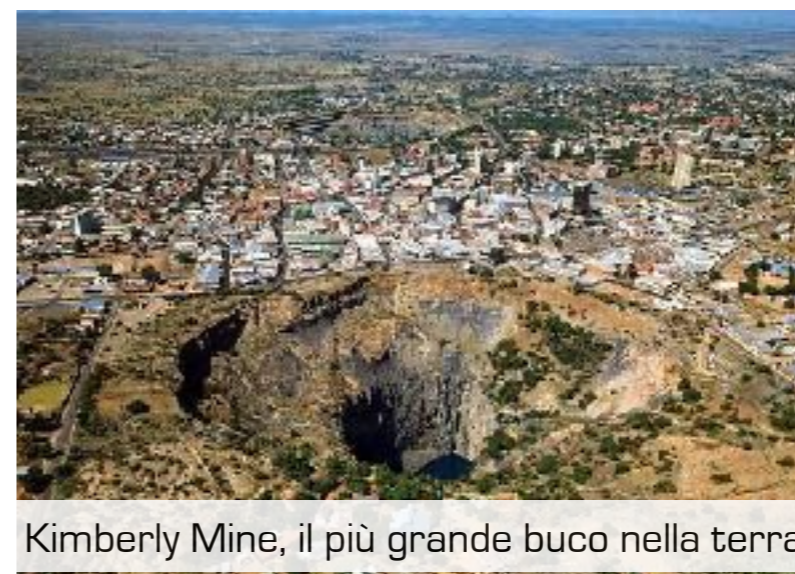


you are here

Nella **litosfera** (a 140-190 km di profondità)  
(pressione: 4.5–6 Gpa temperature: 900–1300 °C)

**Trasporto** in superficie: tramite eruzioni vulcaniche,  
il magma trasporta rocce con inclusioni (xenoliti)

- Sorgenti primarie: vulcani
- Sorgenti secondarie: siti dove i diamanti sono erosi fuori dalle rocce che li contengono (kinberlite, lampronite)



Kimberly Mine, il più grande buco nella terra



# Il diamante sintetico

L'uomo imita la natura ...

- ➔ con un sistema di sintesi ad **alte pressioni e temperature**  
Nel 1954 General Electric consegue il primo processo di sintesi del diamante sistematico e commercialmente sostenibile



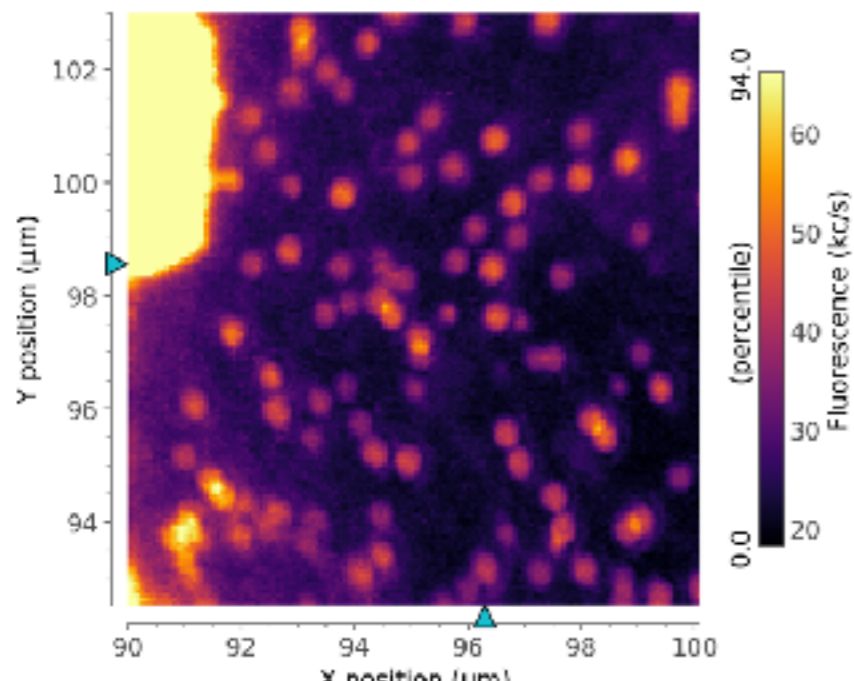
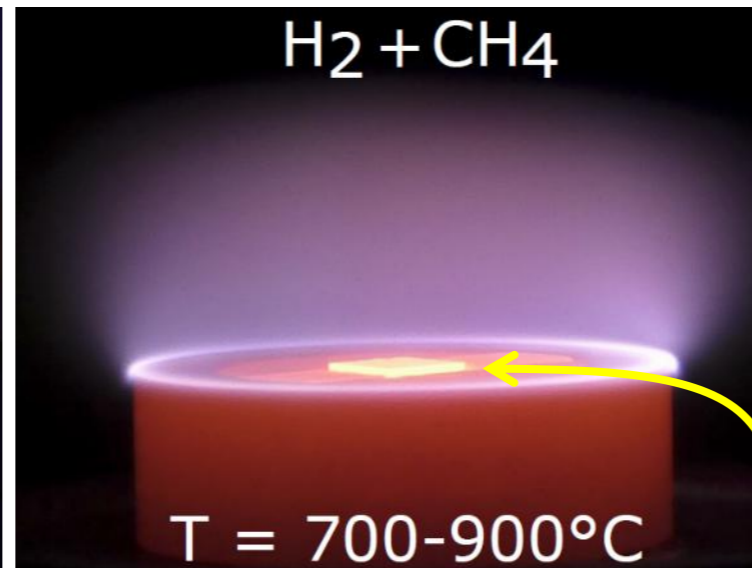
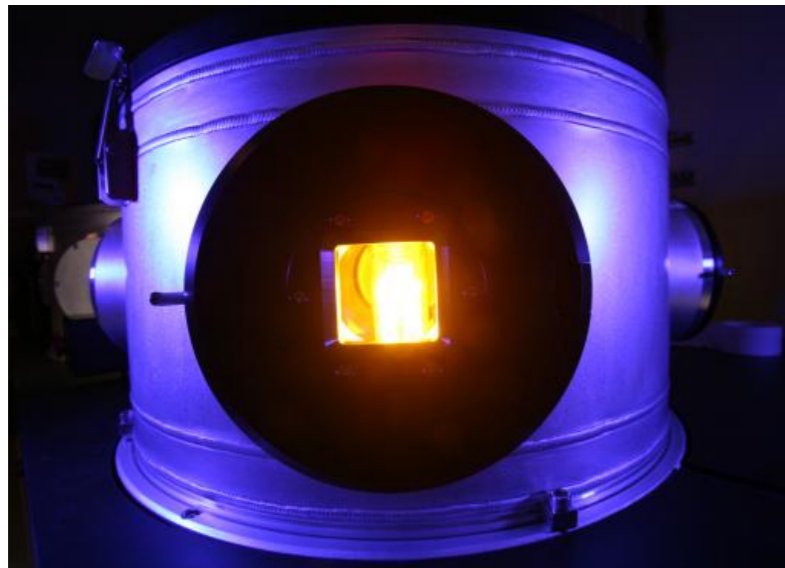
# Il diamante sintetico

L'uomo imita la natura ...

- ➔ con un sistema di sintesi ad **alte pressioni e temperature**  
Nel 1954 General Electric consegue il primo processo di sintesi del diamante sistematico e commercialmente sostenibile

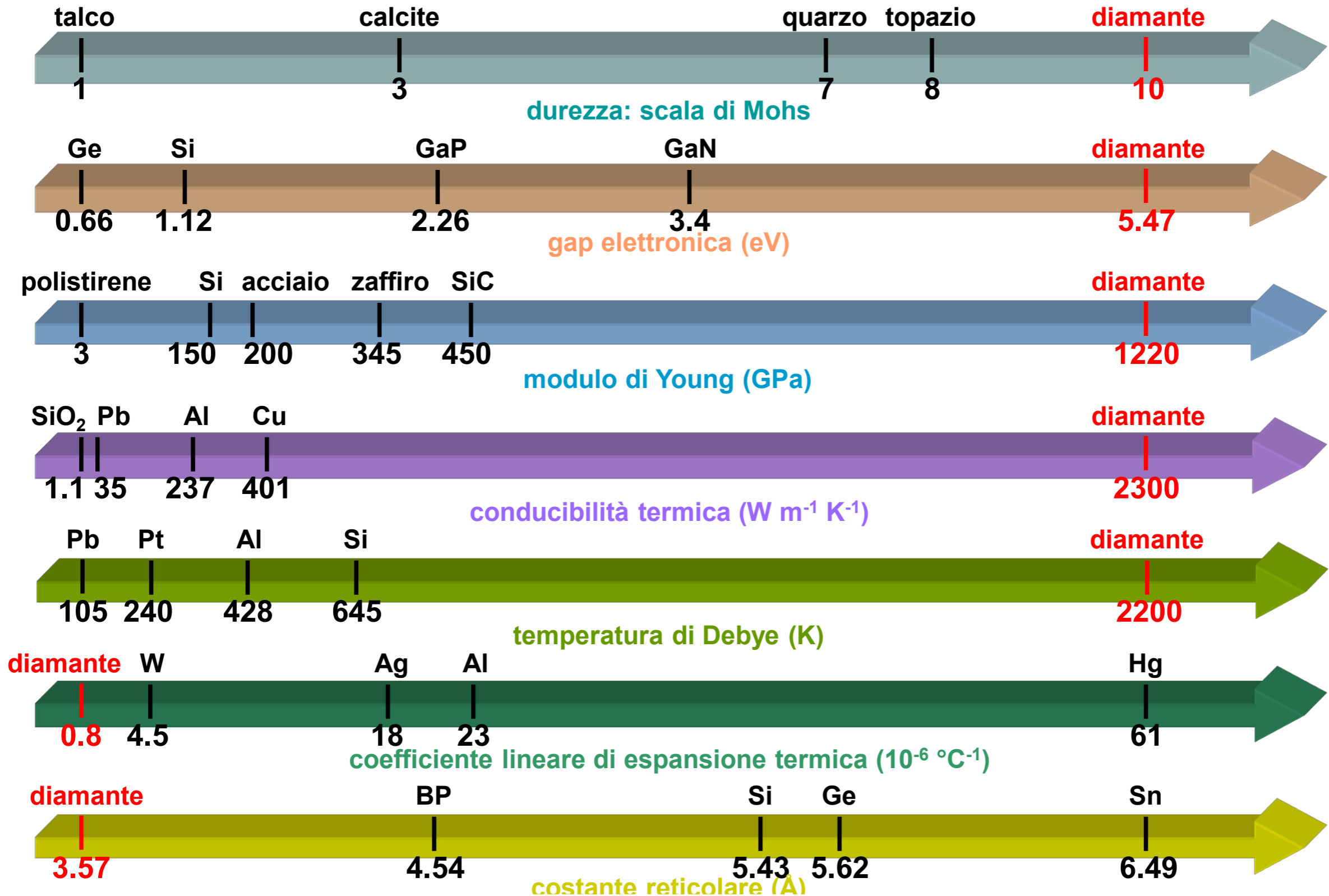
...e la supera!

- ➔ con un sistema di **deposizione da fase vapore**: atomi di carbonio condensano da un plasma "caldo" ad un substrato "freddo"



Singoli difetti otticamente attivi in diamante sintetizzato con tecnica CVD

# Un materiale estremo





# Un materiale estremo

Basso coefficiente di attrito

Elevata durezza meccanica

Resistenza alla radiazione

Alta mobilità dei portatori di carica

Elevato campo di breakdown

Inerzia chimica

Bio-compatibilità

Funzionalizzabilità chimica della superficie

Trasparenza ottica dal vicino UV al lontano IR

Difetti otticamente attivi nella band-gap

# Applicazioni del diamante artificiale

Basso coefficiente di attrito

Elevata durezza meccanica

Resistenza alla radiazione

Alta mobilità dei portatori di carica

Alto campo di breakdown

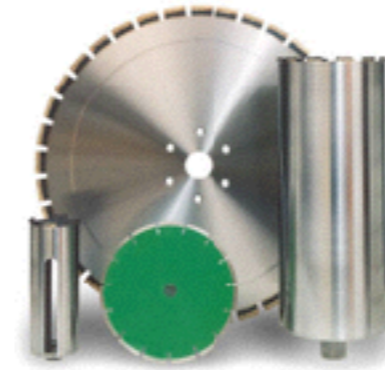
Inerzia chimica

Bio-compatibilità

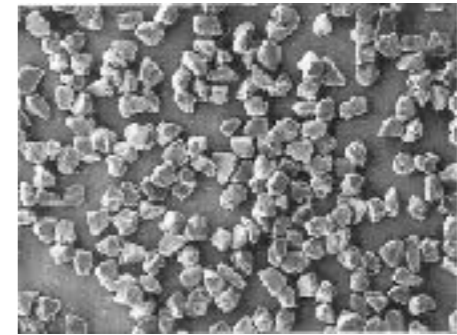
Funzionalizzabilità chimica della superficie

Trasparenza ottica dal vicino UV al lontano IR

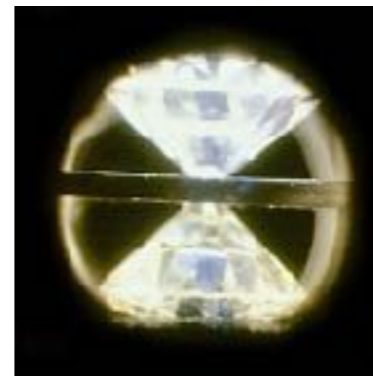
Difetti otticamente attivi nella band-gap



strumenti da taglio



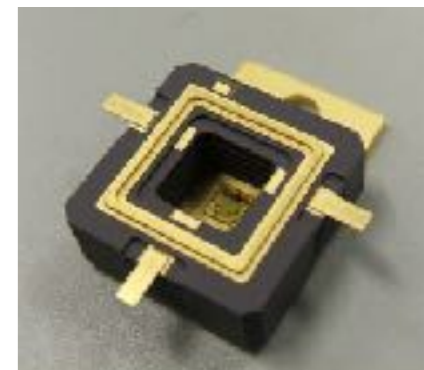
polveri abrasive



presse meccaniche



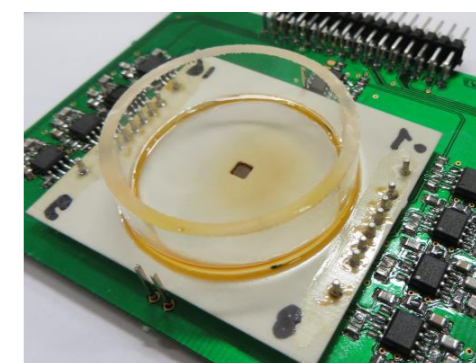
dissipatori termici



diodi di potenza



finestre ottiche



**bio-sensori cellulari**



**rivelatori di radiazione**

# Applicazioni del diamante artificiale

tecnologia di sintesi **matura**

applicazioni **industriali**

applicazioni **tecnologiche avanzate**



# Centri di colore in diamante

Trasparenza ottica dal vicino UV al lontano IR

Difetti otticamente attivi nella band-gap

Il diamante deve il suo fascino alle sue proprietà fisiche:

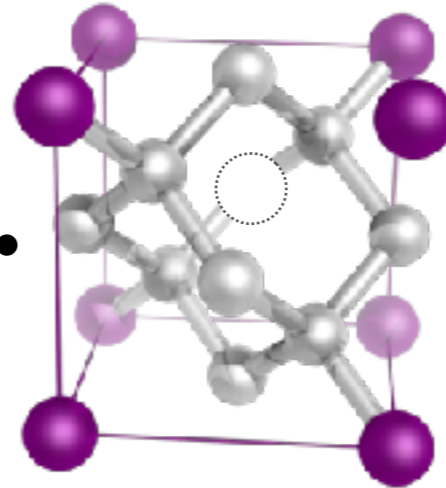
- **trasparenza**: elevata band gap ( $E_g=5.5$  eV)
- **brillantezza**: elevato indice di rifrazione ( $n=2.4$ )
- variabilità di **colorazione**: presenza di **impurezze** nel reticolo cristallino (B, N, ...)



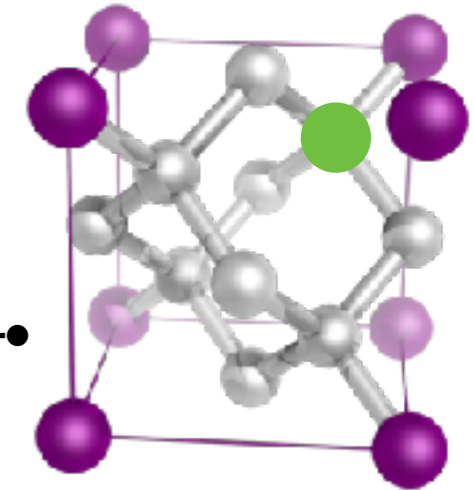
# Difetti reticolari in diamante

Difetti reticolari nel cristallo:

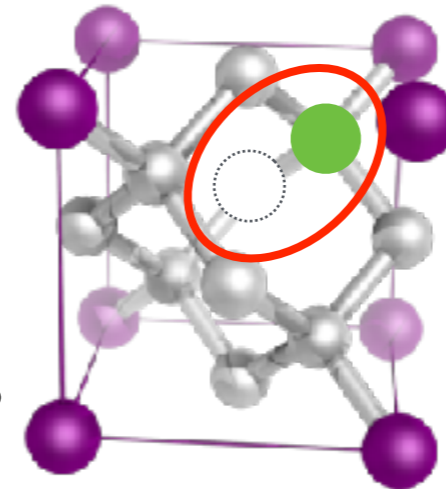
- **vacanze:** assenza di atomi nel sito



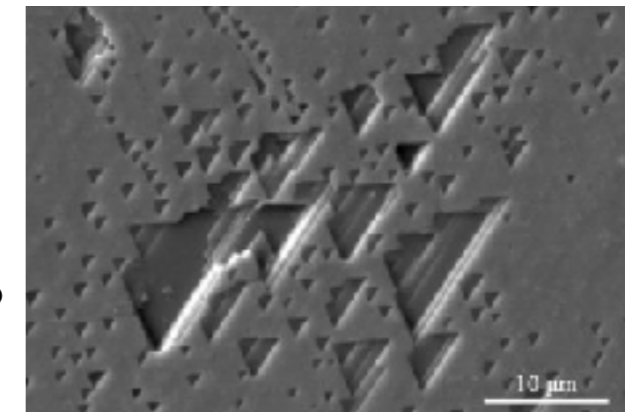
- **impurità sostituzionali**



- una combinazione dei due precedenti  
es. complesso impurezza-vacanza



- in aggiunta: interstiziali, dislocazioni, difetti estesi...



# Centri di colore in diamante

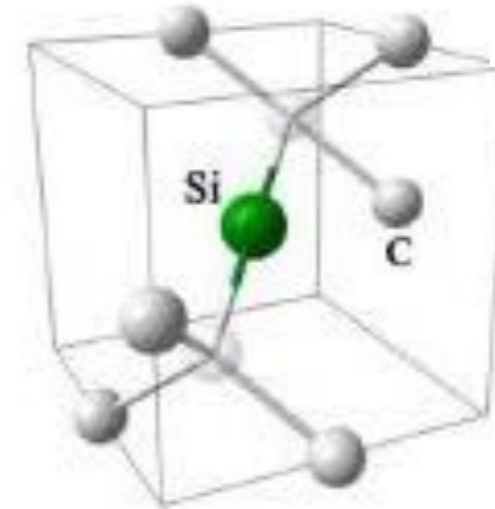
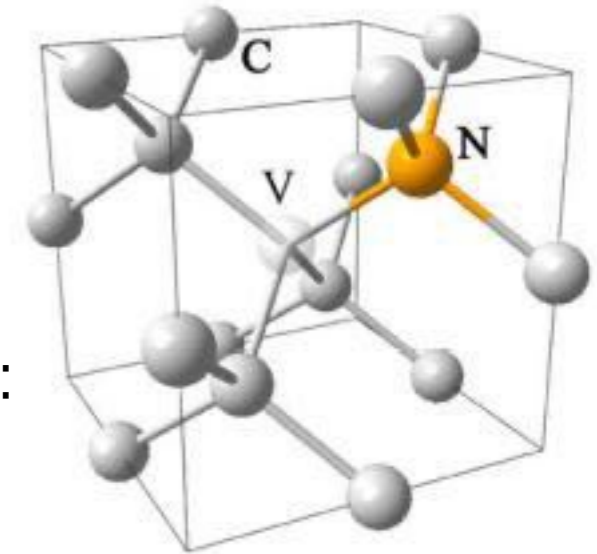
$$E_g = 5.5 \text{ eV}$$

Alcuni complessi impurezza-vacanza sono dei **difetti luminescenti**:  
Sistemi a due livelli con transizioni otticamente attive

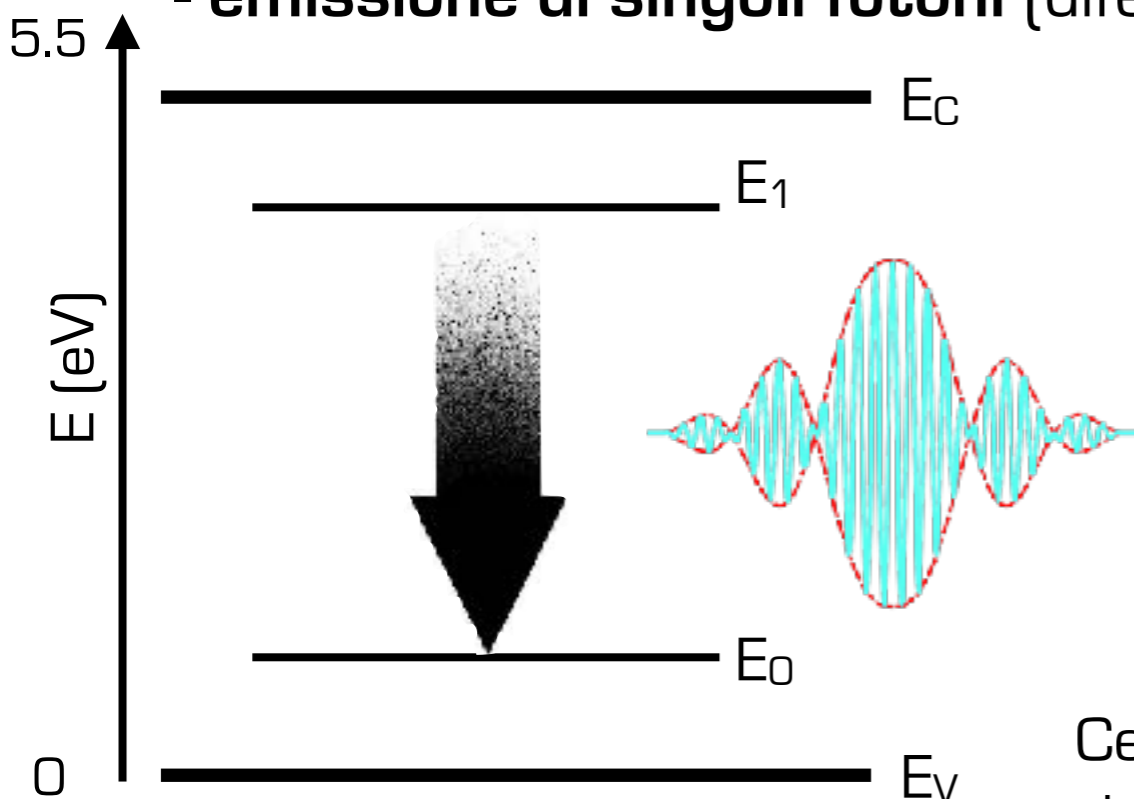
Molti centri sono caratterizzati da:

- elevata efficienza quantica
- emissione nello spettro della luce visibile
- fotostabilità a **temperatura ambiente**
- **emissione di singoli fotoni** (difetti isolati)

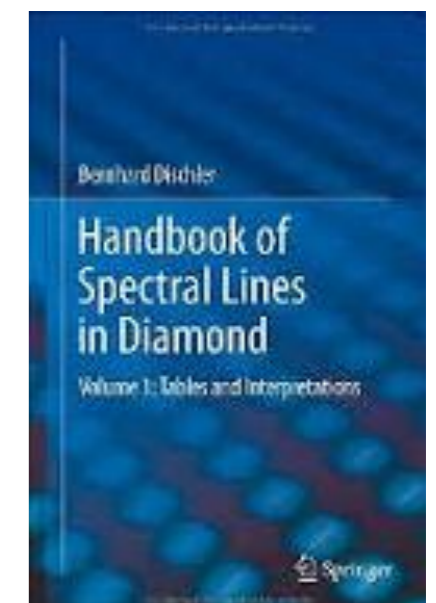
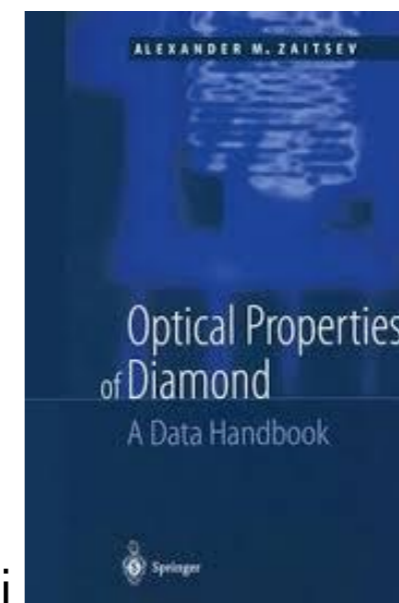
complesso azoto-vacanza



complesso silicio-divacanza



Centinaia di righe spettrali  
riportate nella letteratura scientifica



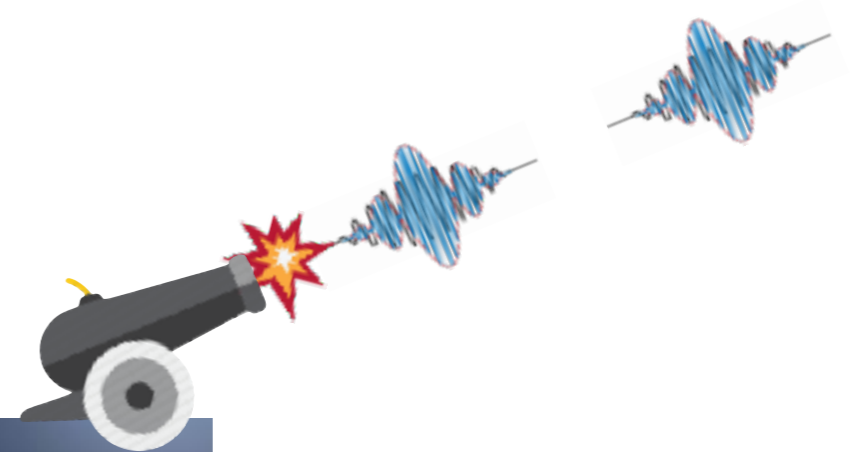
# Sorgenti di singolo fotone

Una sorgente di singolo fotone è un sistema fisico in grado di emettere:

- un fotone per volta
- quando richiesto (in risposta ad un segnale di trigger)
- con determinate proprietà:
  - polarizzazione
  - lunghezza d'onda

Idealmente, i fotoni emessi devono essere identici

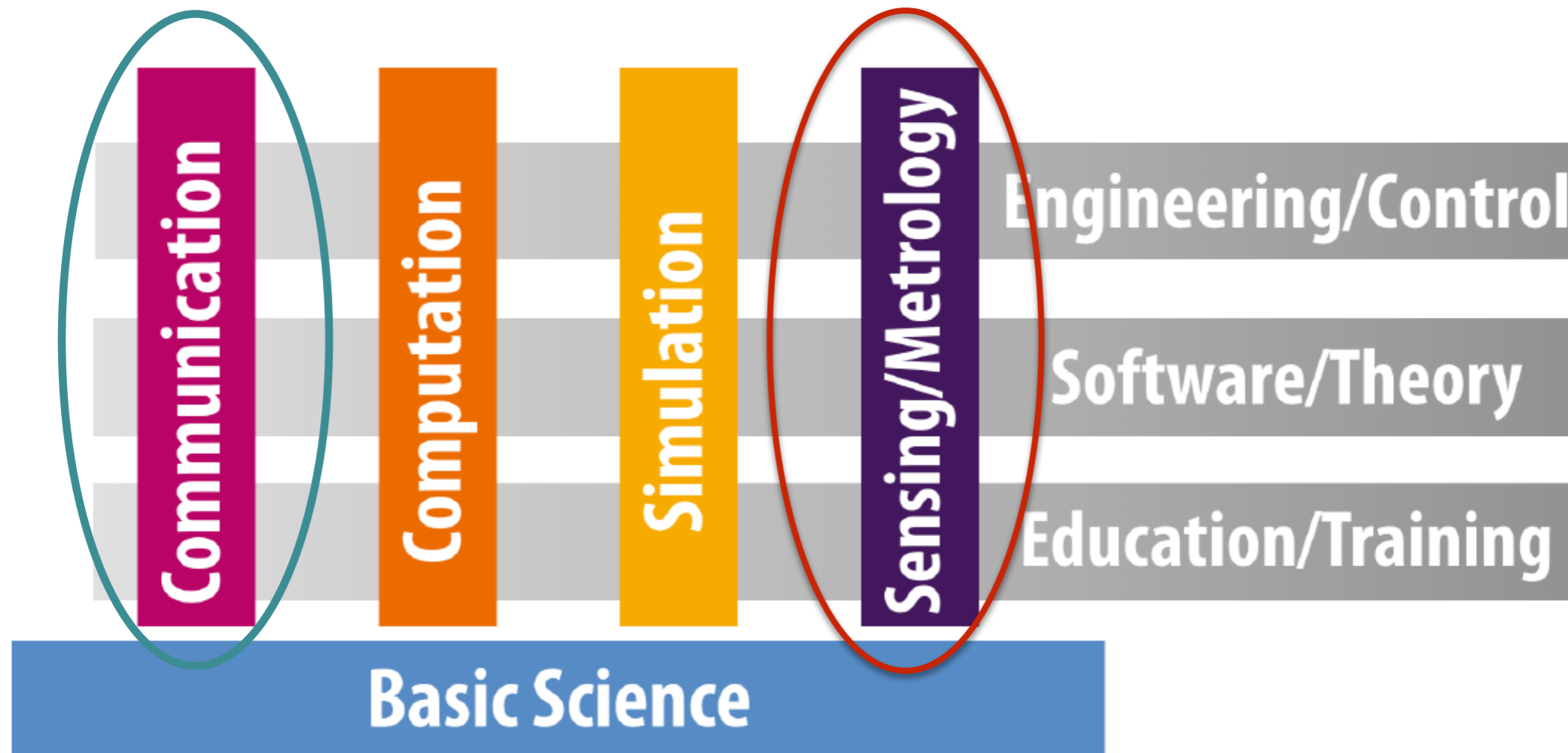
Centri di colore individuali: sorgenti di singolo fotone



# Tecnologie quantistiche

Dal Quantum Technologies Flagship Final report (2017)

"The developments in the **leading domains of Quantum Technologies - Communication, Computation, Simulation, Sensing and Metrology** - can be expected to produce transformative applications with real practical impact on ordinary people"

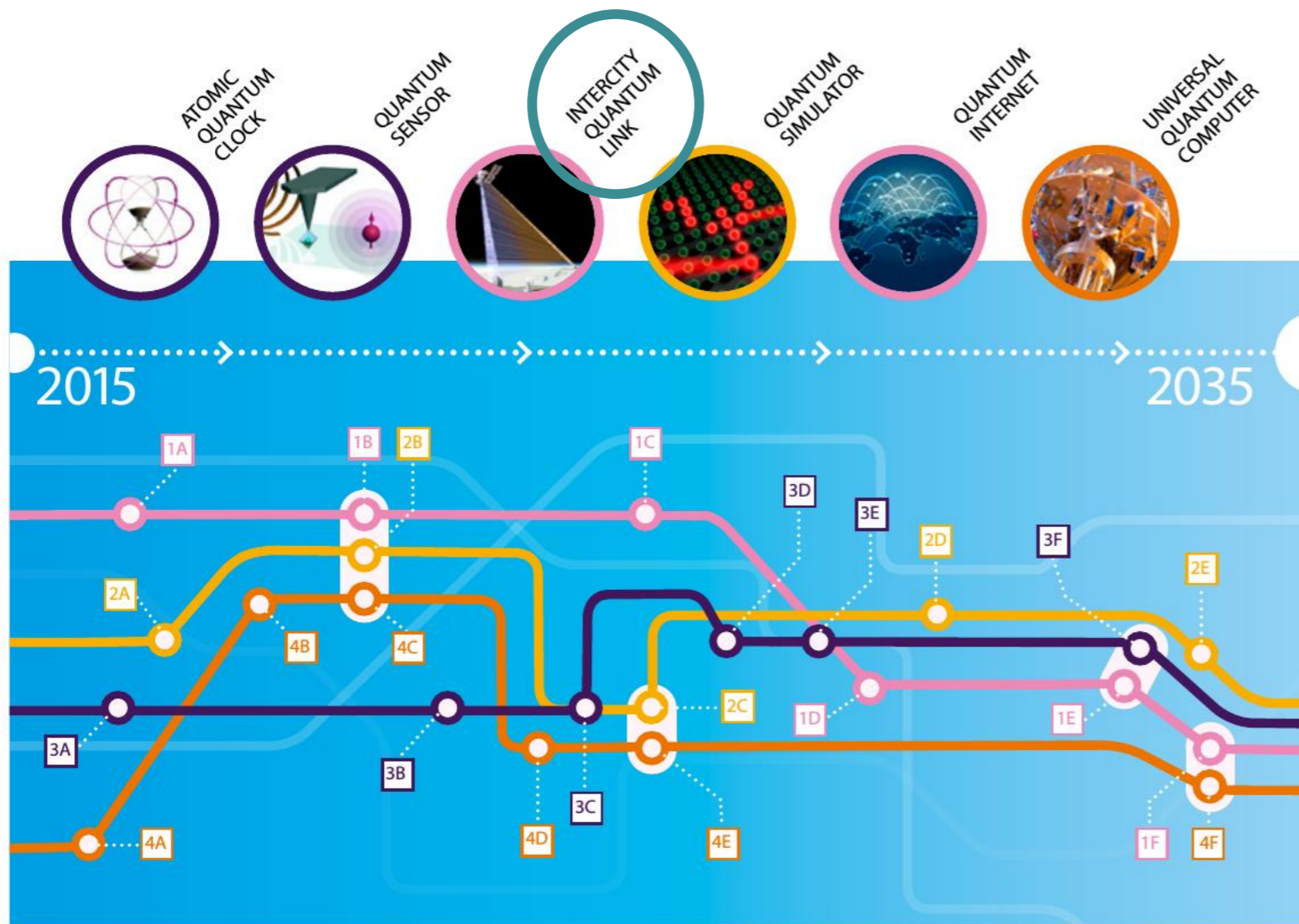




# Tecnologie quantistiche

Dal Quantum Manifesto (2016)

"Now, previously untapped aspects of quantum theory are ready to be used as a resource in technologies with far-reaching applications, including **secure communication** networks, **sensitive sensors** for biomedical imaging and fundamentally new paradigms of computations"



## 1. Communication

0 – 5 years .....

A Core technology of quantum repeaters

B Secure point-to-point quantum links

5 – 10 years .....

C Quantum networks between distant cities

D Quantum credit cards

> 10 years .....

E Quantum repeaters with cryptography and eavesdropping detection

F Secure Europe-wide internet merging quantum and classical communication

# Comunicazione quantistica: protocollo BB84

QUANTUM CRYPTOGRAPHY: PUBLIC KEY DISTRIBUTION AND COIN TOSSING

Charles H. Bennett (IBM Research, Yorktown Heights NY 10598 USA)  
 Gilles Brassard (dept. IRO, Univ. de Montreal, H3C 3J7 Canada)

International Conference on Computers, Systems & Signal Processing Bangalore, India December 10-12, 1984

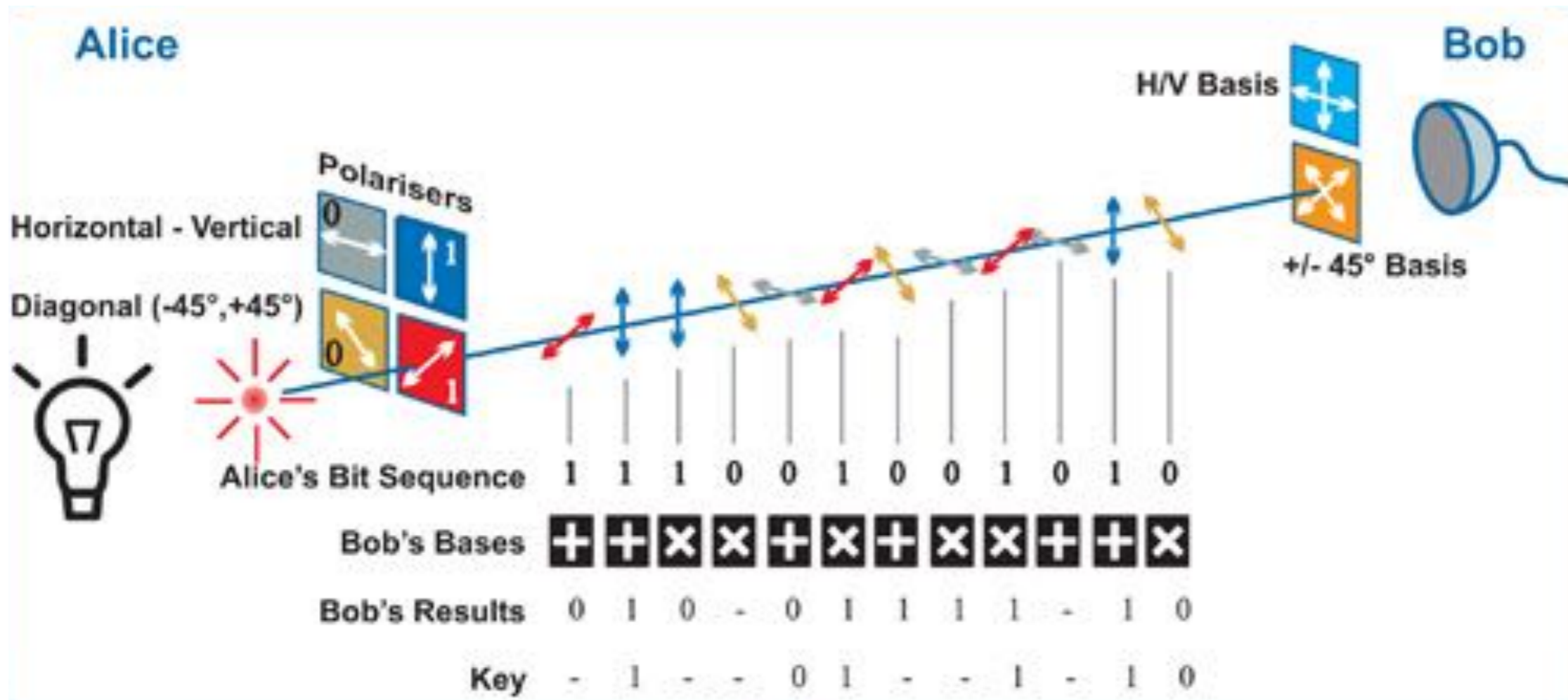
When elementary quantum systems, such as polarized photons, are used to transmit digital information, the uncertainty principle gives rise to novel cryptographic phenomena unachievable with traditional transmission media, e.g. a communications channel on which it is impossible in principle to eavesdrop without a high probability of disturbing the transmission in such a way as to be detected. Such a quantum channel can be used in conjunction with ordinary insecure classical channels to distribute random key information between two users with the assurance that it remains unknown to anyone else, even when the users share no secret information initially. We also present a protocol for coin-tossing by exchange of quantum messages, which is secure against traditional kinds of cheating, even by an opponent with unlimited computing power, but ironically can be subverted by use of a still subtler quantum phenomenon, the Einstein-Podolsky-Rosen paradox.

QUANTUM TRANSMISSION															
Alice's random bits.....	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1
Random sending bases.....	D	R	D	R	R	R	R	D	D	R	D	D	D	D	R
Photons Alice sends.....	↕	↖	↗	↕	↕	↔	↔	↖	↗	↕	↖	↗	↖	↗	↕
Random receiving bases.....	R	D	R	R	D	D	R	D	R	D	D	D	D	D	R
Bits as received by Bob.....	1	D	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	
PUBLIC DISCUSSION															
Bob reports bases of received bits.....	R	D	R	D	D	R		R	D	D		D	R		
Alice says which bases were correct.....		OK		OK		OK				OK		OK	OK	OK	
Presumably shared information (if no eavesdrop)...		1		1		0				1		0	1		
Bob reveals some key bits at random.....				1									0		
Alice confirms them.....						OK									OK
OUTCOME															
Remaining shared secret bits.....		1						0				1			1

# Comunicazione quantistica: protocollo BB84

Comunicazione: **sequenza di bit**

Sequenza di fotoni con differenti polarizzazioni, prodotti e misurati attraverso due set di basi indipendenti



$$\begin{array}{c} \nearrow \\ \swarrow \end{array} = \frac{\begin{array}{c} \updownarrow \\ |1\rangle \end{array} + \begin{array}{c} \longleftrightarrow \\ |0\rangle \end{array}}{\sqrt{2}}$$

Il fotone si trova in una sovrapposizione dei due stati  
La base scelta per la misura opera una proiezione proietta sullo stato finale

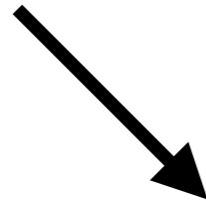
# Attività di ricerca @ UniTo

## **Sorgenti di singolo fotone**

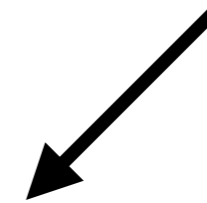
informazione codificata nelle **proprietà**  
(energia, polarizzazione) dei fotoni emessi

# Attività di ricerca @ UniTo

**Caratterizzazione di classi di emettitori**

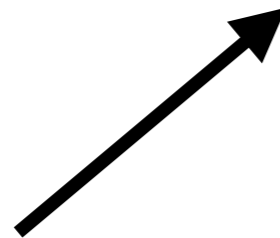


**Fabbricazione di sorgenti**

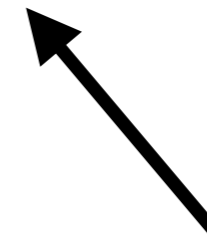


**Sorgenti di singolo fotone**  
informazione codificata nelle **proprietà**  
(energia, polarizzazione) dei fotoni emessi

**Interazione con l'ambiente esterno**

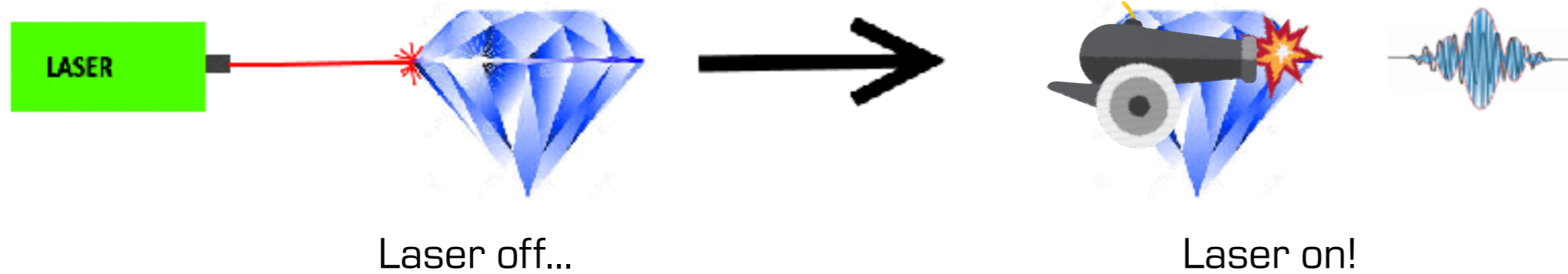


**Integrabilità con la tecnologia elettronica esistente**



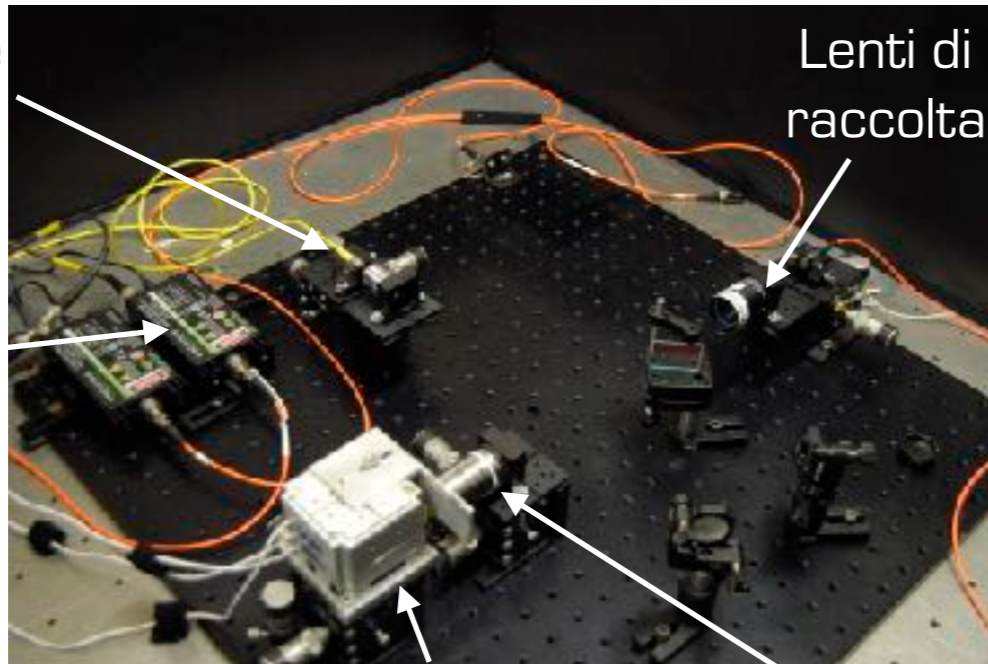
# Caratterizzazione di centri di colore in diamante

## Microscopia confocale



Sorgente laser

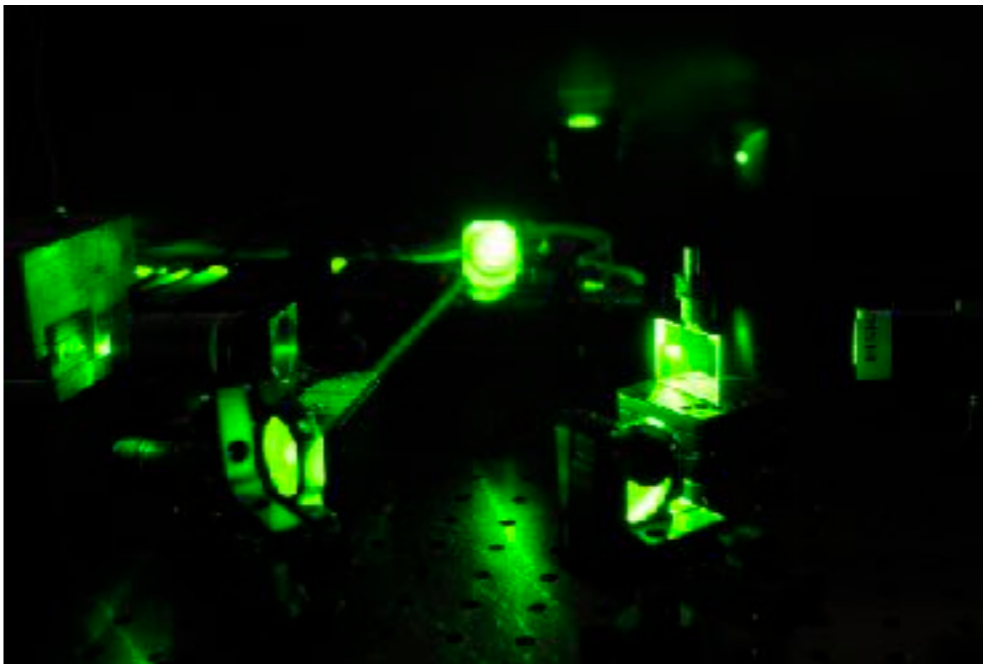
Rivelatori di singolo fotone



Movimentatore con risoluzione spaziale <math><10\text{ nm}</math>

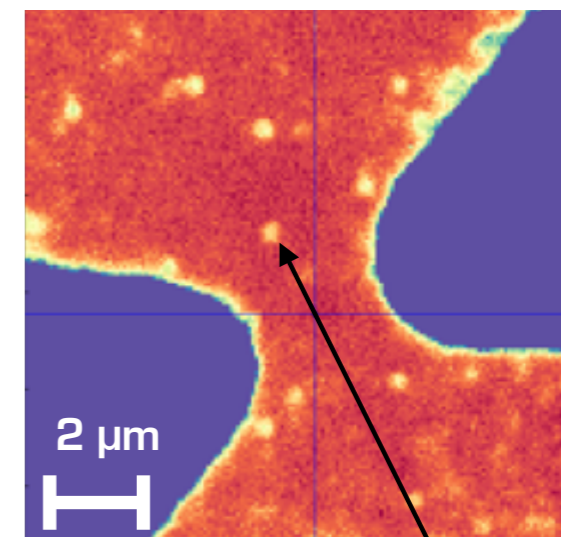
Obiettivo ottico

Lenti di raccolta



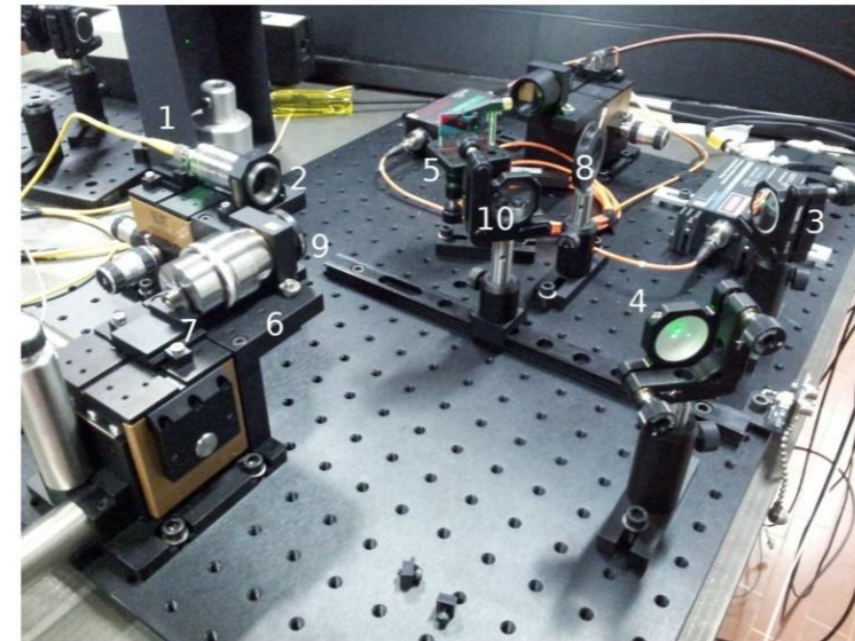
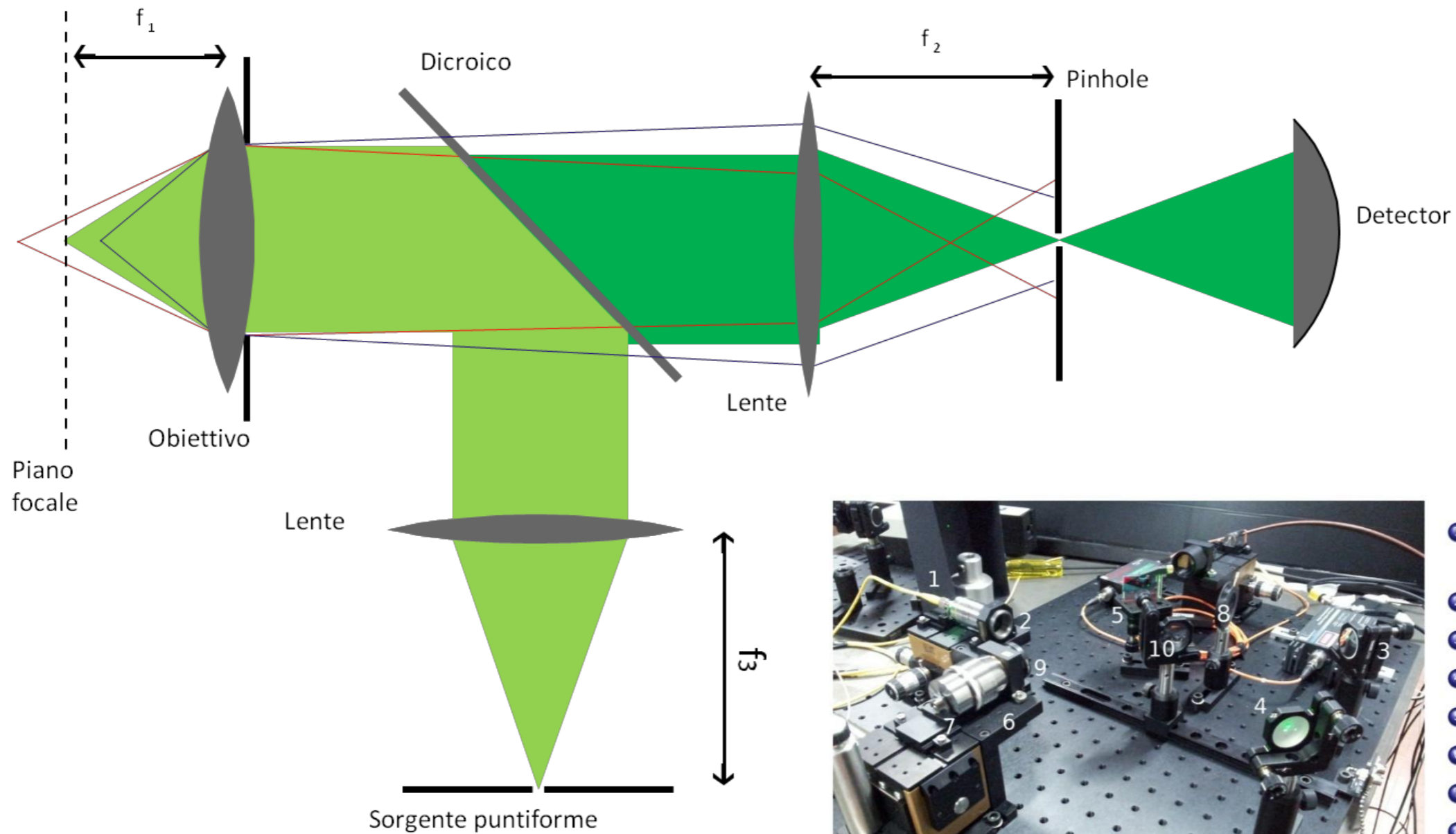
Obiettivo 100x: Eccitazione (laser) e raccolta puntuale

**Mappe** in fotoluminescenza: intensità del segnale (numero di fotoni raccolti) in funzione della posizione



# Caratterizzazione di centri di colore in diamante

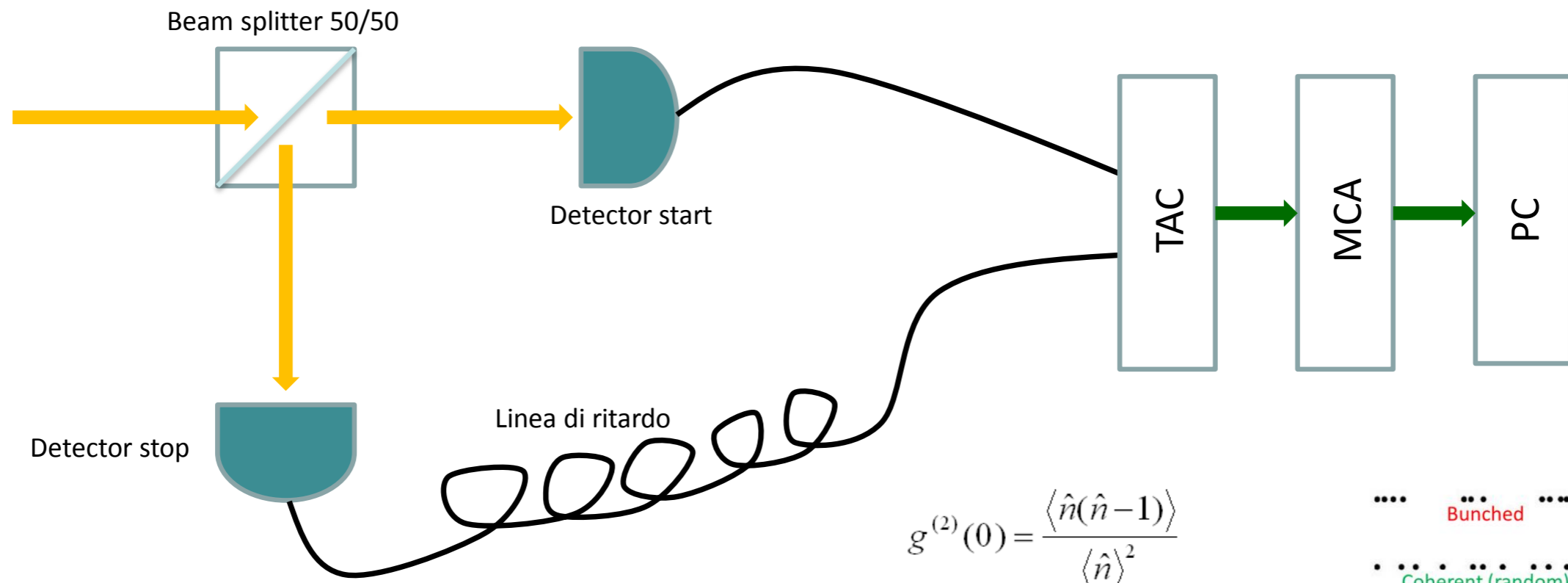
## Microscopia confocale



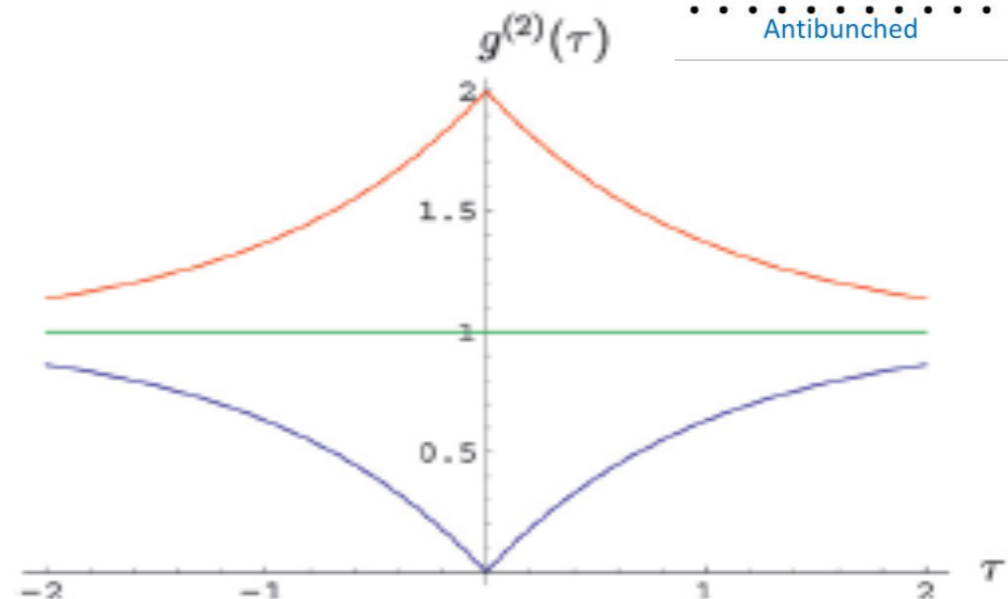
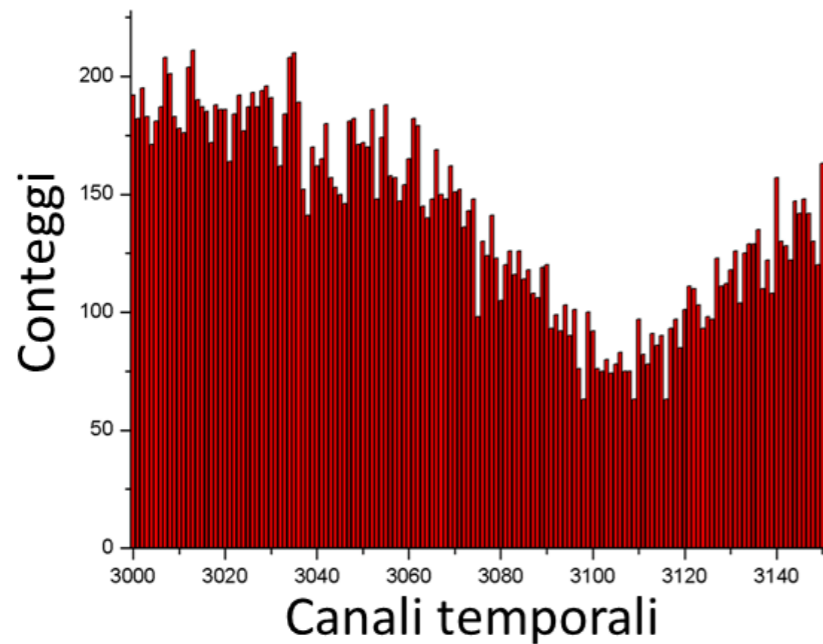
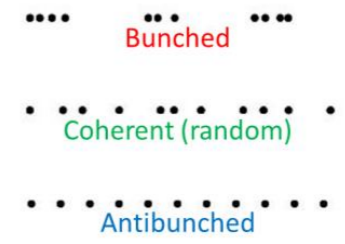
- 1 Fibra single mode
- 2 Obiettivo 4×
- 3 Specchio
- 4 Specchio
- 5 Dicroico
- 6 Piattaforma
- 7 Portacampioni
- 8 Iride
- 9 Obiettivo 100×
- 10 Beam splitter

# Caratterizzazione di centri di colore in diamante

## Microscopia confocale



$$g^{(2)}(0) = \frac{\langle \hat{n}(\hat{n}-1) \rangle}{\langle \hat{n} \rangle^2}$$





# Fabbricazione di sorgenti di singolo fotone

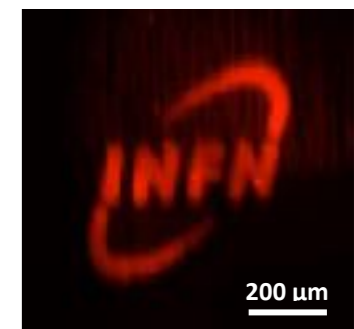
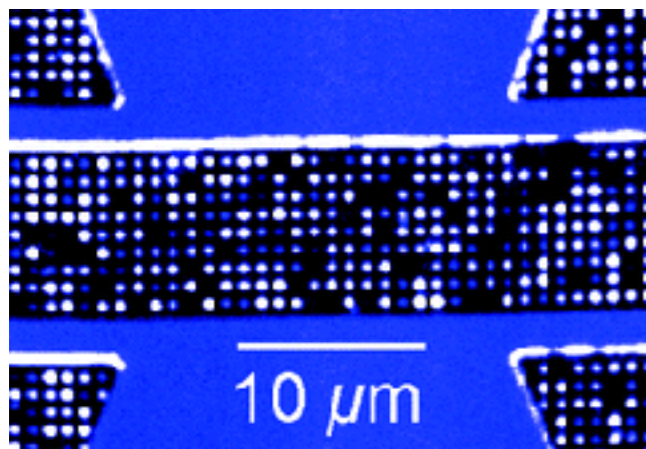
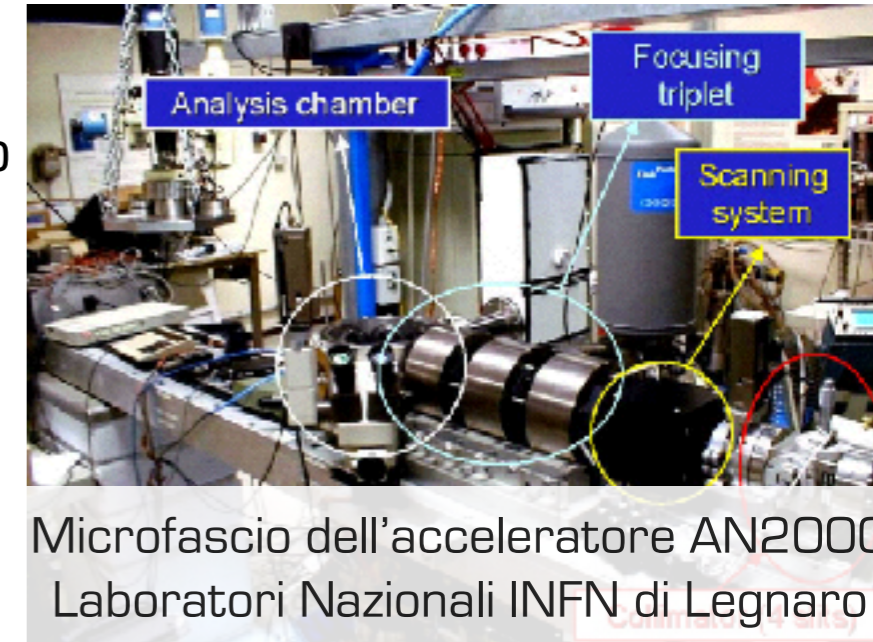
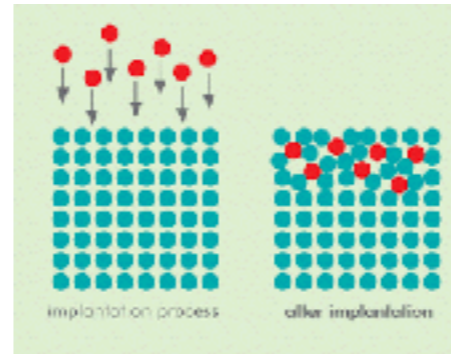
Complessi di tipo impurezza-vacanza:

- introduzione dell'impurezza nel materiale
- trattamento termico a  $T > 750$  °C per consentire la formazione di legami chimici stabili

L'introduzione delle impurezze avviene per **impiantazione ionica**:  
Un **fascio di ioni** della specie chimica desiderata viene focalizzato sul campione (energie: 30-2000 keV)

Lavoro della comunità scientifica:

- Elevate risoluzioni spaziali ( $< 100$  nm)
- impiantazione controllata di singoli ioni in posizioni specifiche



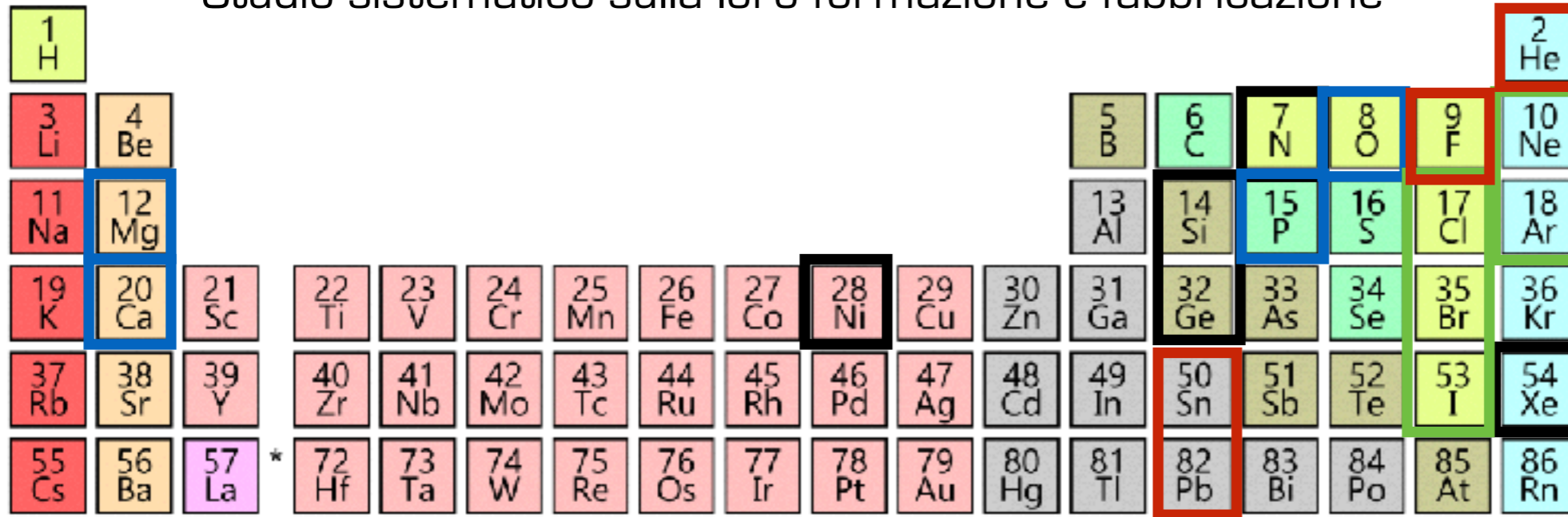
**Sfide tecnologiche:**

- Qual'è l'impurezza ottimale come sorgente?

# Difetti luminescenti in diamante - 2019

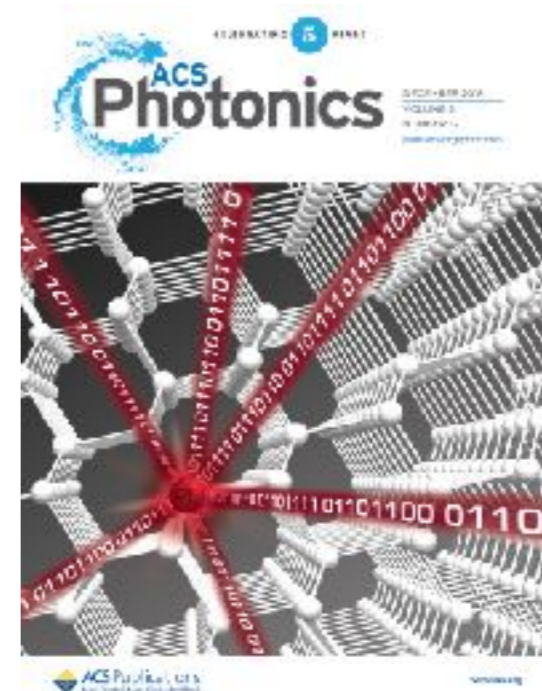
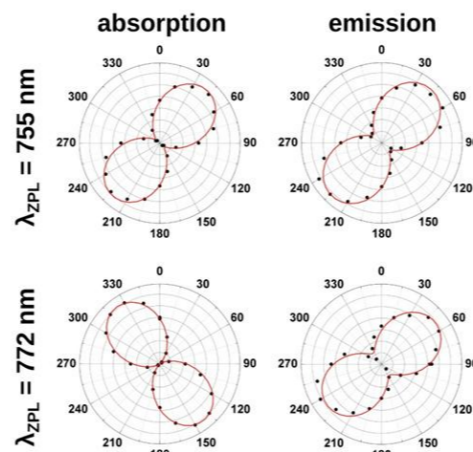
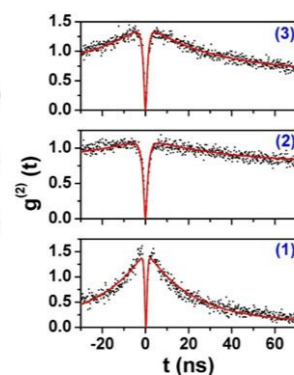
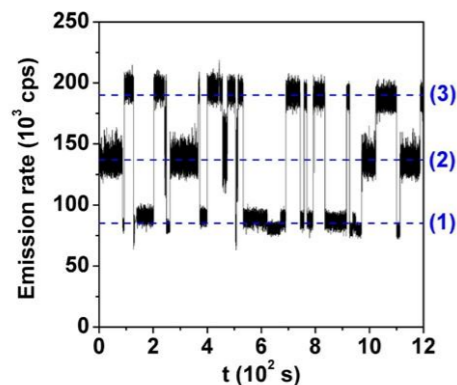
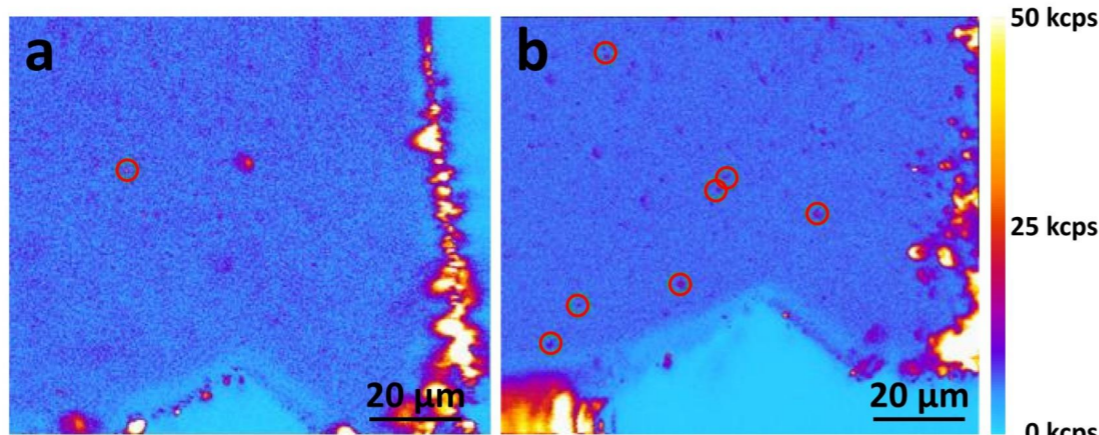
Qual'è l'impurezza ottimale come sorgente?

Studio sistematico sulla loro formazione e fabbricazione

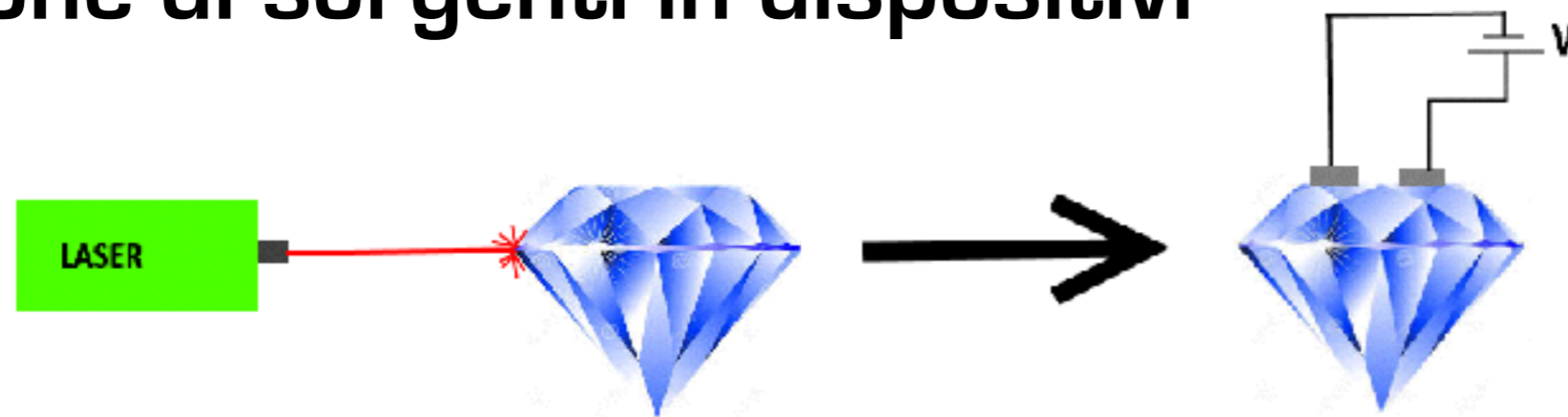


■ INFN/UNiTO

■ In fase di studio



# Integrazione di sorgenti in dispositivi



Eccitazione laser (fotoluminescenza): meccanismo ingombrante e complesso

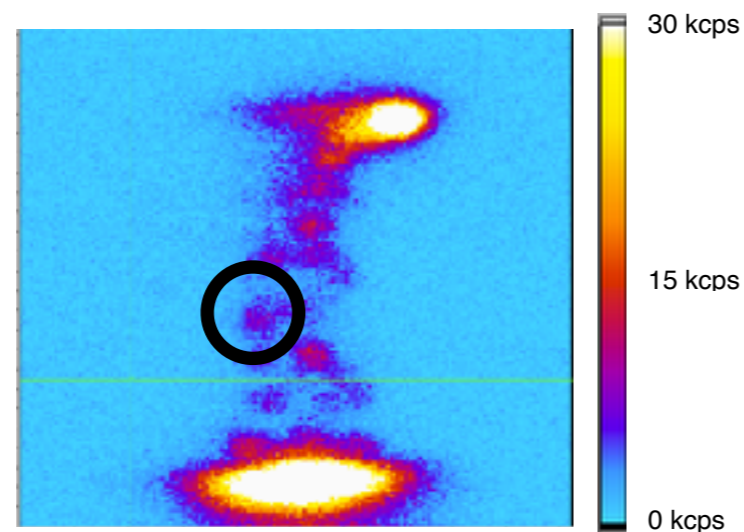
Eccitazione **elettrica** (elettroluminescenza): consente il controllo elettrico di sorgenti



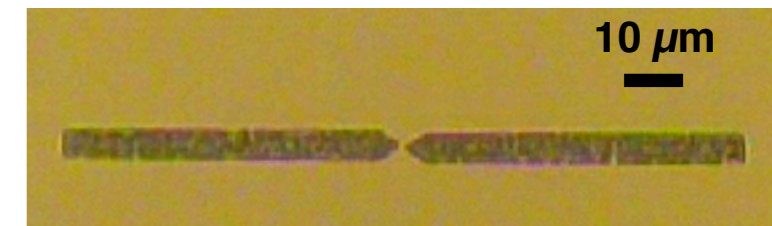
Micro-fabbricazione di elettrodi conduttivi in grafite mediante scrittura diretta con fasci di ioni MeV



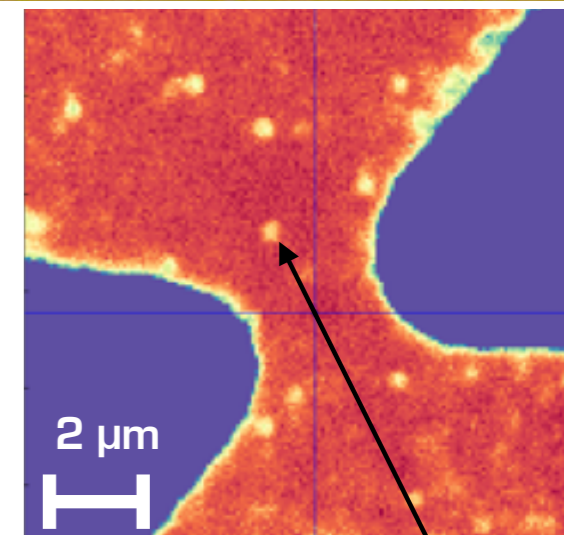
Elettroluminescenza da un insieme di difetti luminescenti (2014)



Elettroluminescenza da sorgenti di singolo fotone (2015)



Nuova generazione di dispositivi integrati



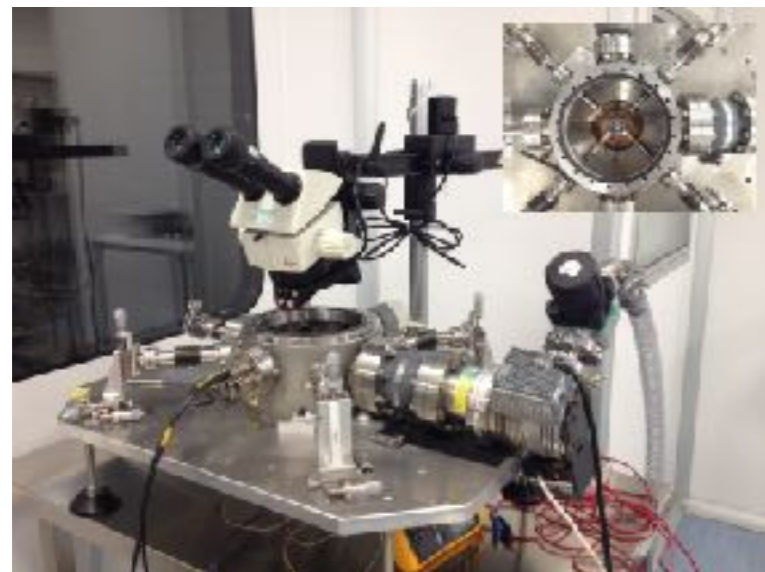
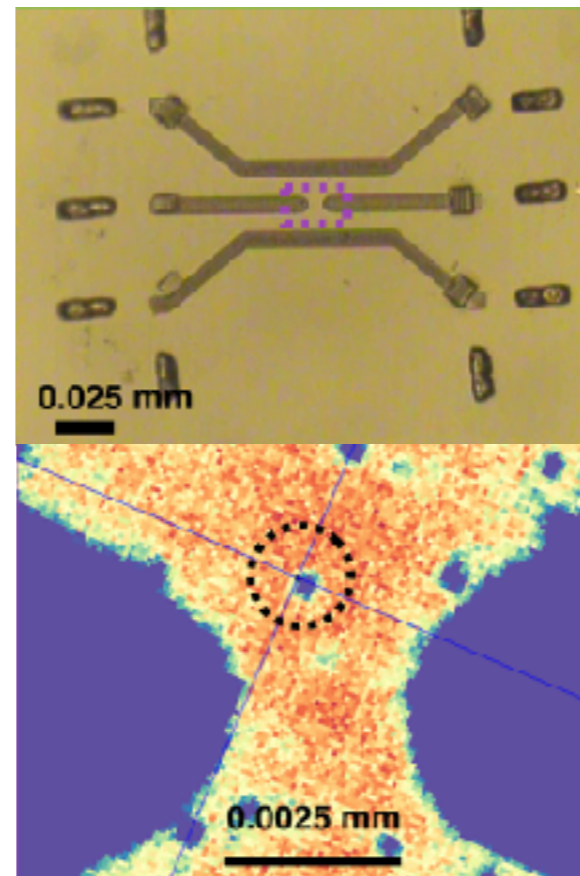
# Processamento e fabbricazione di dispositivi



Camera pulita: 24 m<sup>2</sup> condizioni ambientali controllate  
Classe 10000: meno di 3000 particelle di polvere per m<sup>3</sup>



Sistema di litografia con laser ad alta potenza  
Fabbricazione di campioni ed elettrodi metallici



Probe Station ad alto vuoto

Caratterizzazione elettrica di campioni e dispositivi



Impiantatore ionico  
Fabbricazione di dispositivi quantistici...  
e non solo!

# Interazione delle sorgenti con l'ambiente esterno

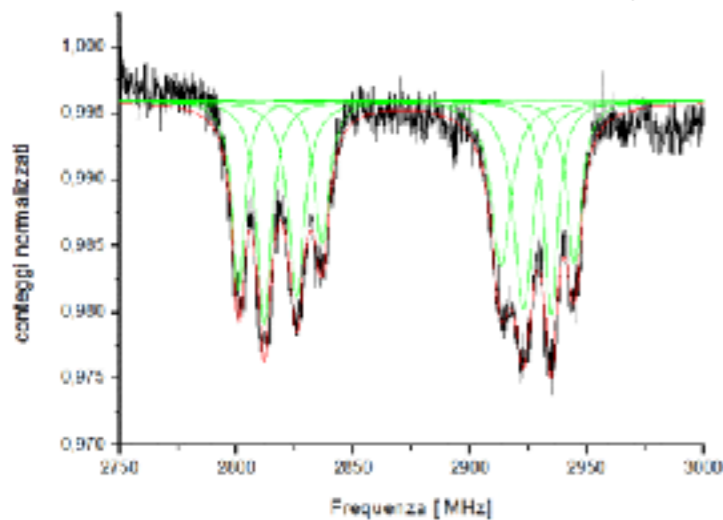
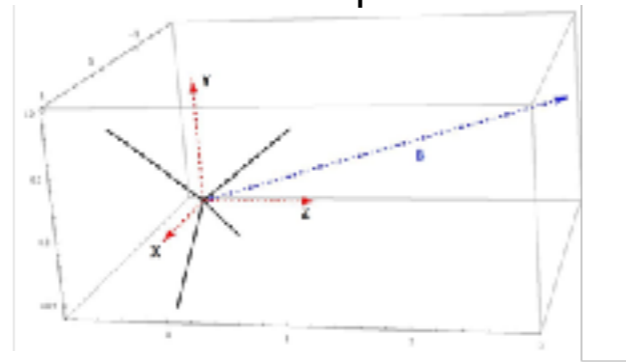
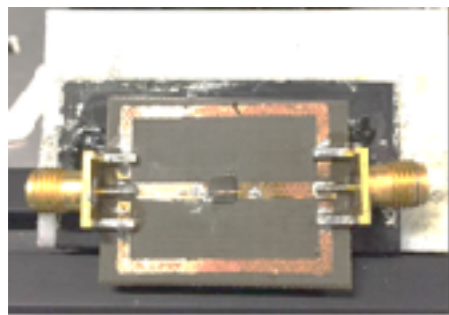
L'interazione dei difetti luminescenti con l'ambiente esterno (campi di interazione) modifica le loro proprietà di emissione (rateo di emissione, lunghezza d'onda, ...)

E' possibile quindi analizzare la **fotoluminescenza** dei difetti per **misurare**:

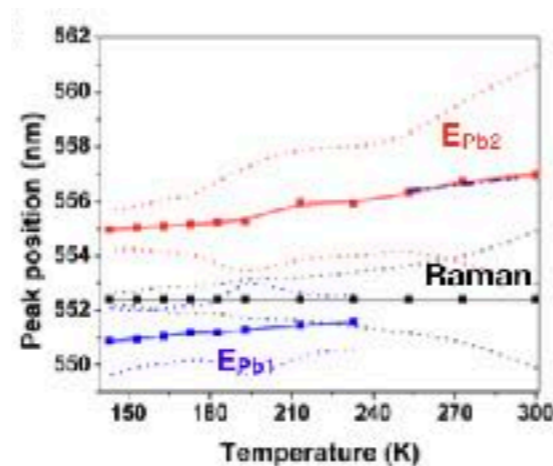


## Campi Magnetici

Modulazione nell'emissione del complesso azoto-vacanza

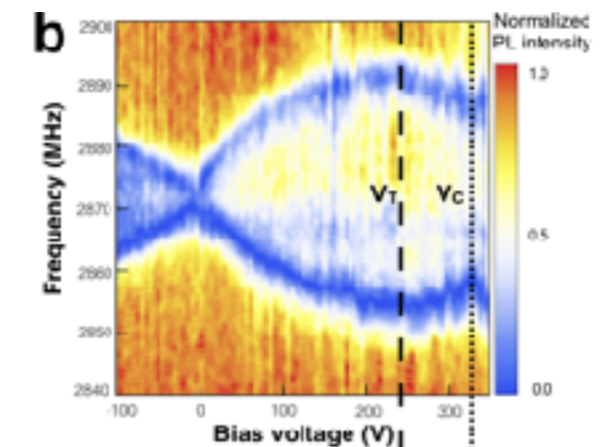
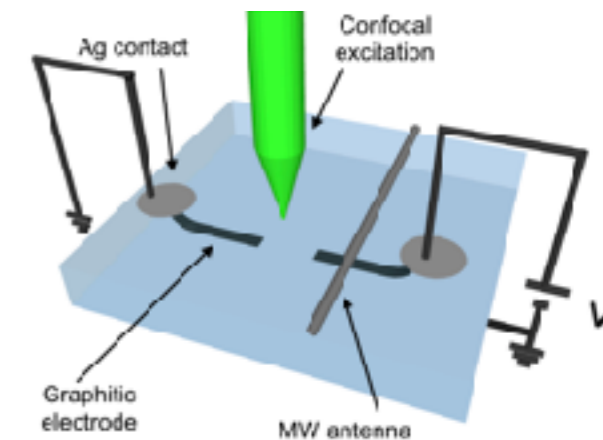


## Temperatura

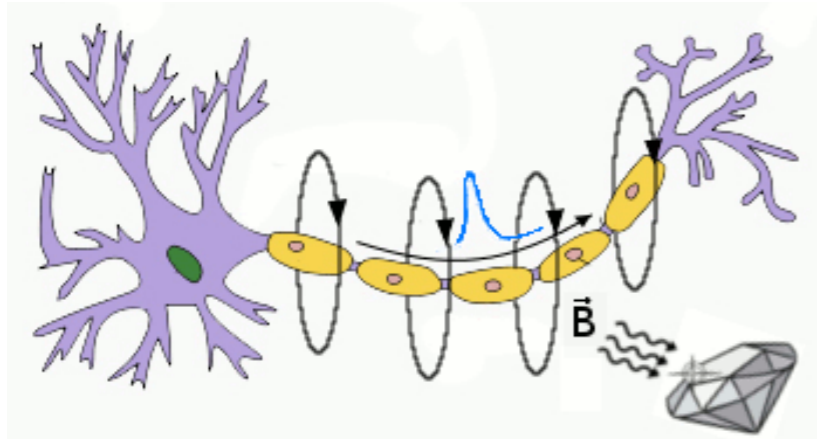


Shift nella lunghezza d'onda di emissione di centri a base Pb

## Campi elettrici



# Sensori cellulari quantistici



Gli impulsi neuronali generano deboli campi magneti. Una classe di difetti in diamante ha il potenziale per rivelarli



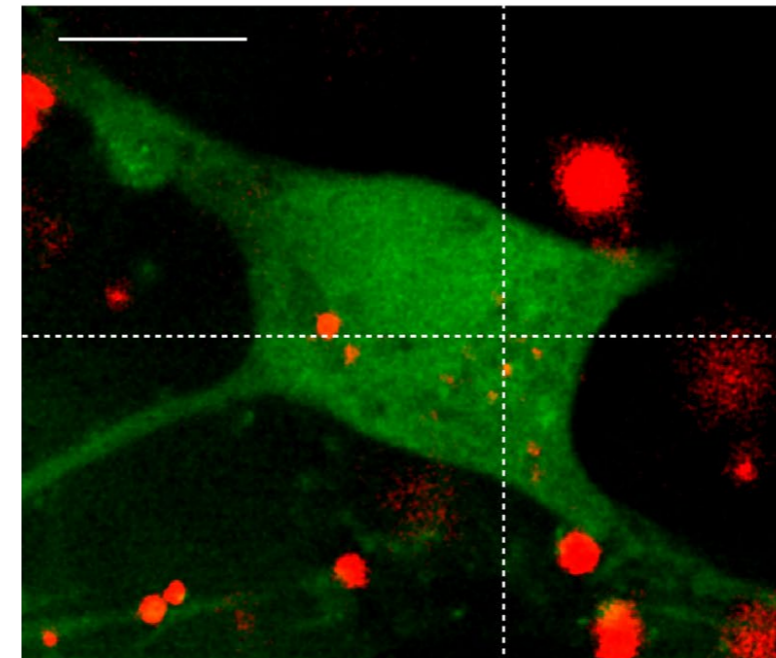
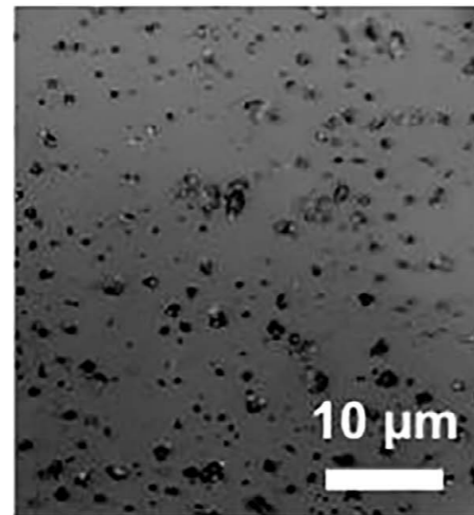
Processamento chimico e fisico di polveri di nanodiamanti



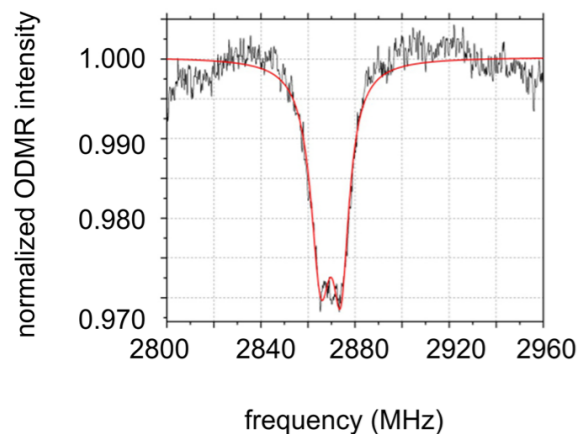
DSTF



Dispersione su vetrino  
Analisi e selezione dei nano-cristalli



Internalizzazione cellule neuronali di una coltura (ippocampo di topo)



Misure preliminari di campo magnetico: la tecnica e le nano-particelle non alterano il comportamento del network

cfr. **Dr. Federico Picollo**

# Grazie per la vostra attenzione



**Contatti**

[jacopo.forneris@unito.it](mailto:jacopo.forneris@unito.it)

<http://www.solid.unito.it>