

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, 29 gennaio 2021

Diamante artificiale: Applicazioni nell'ottica quantistica

Jacopo Forneris

Il carbonio

A detailed periodic table of elements in Italian. The table is color-coded: yellow for metals, cyan for characteristic elements, and pink for non-metals. A red box highlights the carbon atom (C-12). A legend at the bottom left explains the symbols and colors used in the table.

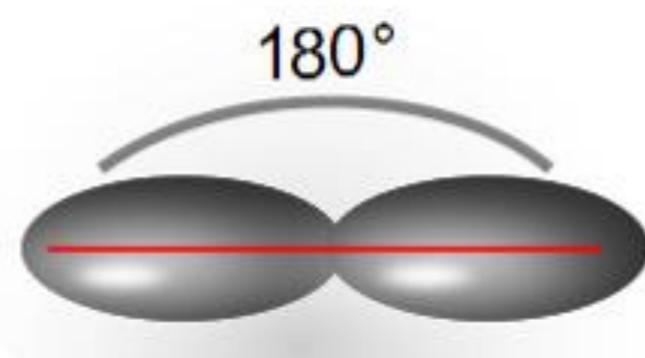
Legend (from left to right):

- 47 Ag: numero atomico (atomic number), simbolo (symbol), numero dell'elemento (element number), massa atomica (atomic mass)
- metalli (metals)
- caratteristiche (characteristics)
- non metalli (non-metals)

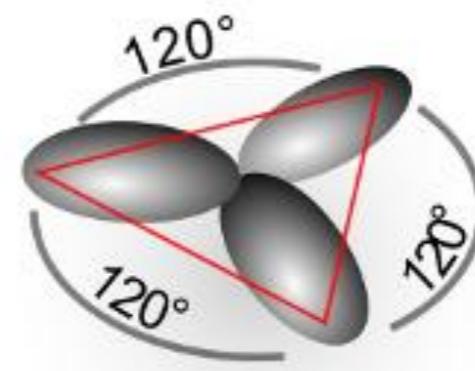
Notes: I valori tra parentesi indicano il numero di massa dell'isotopo più abbondante.

6
C

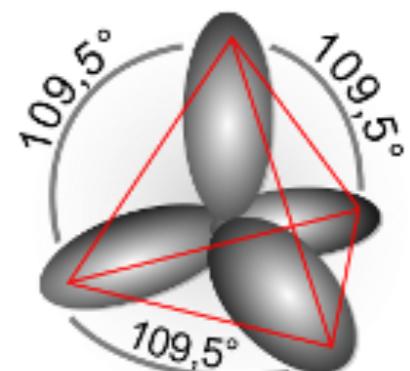
Carbon
12.0107



sp^1

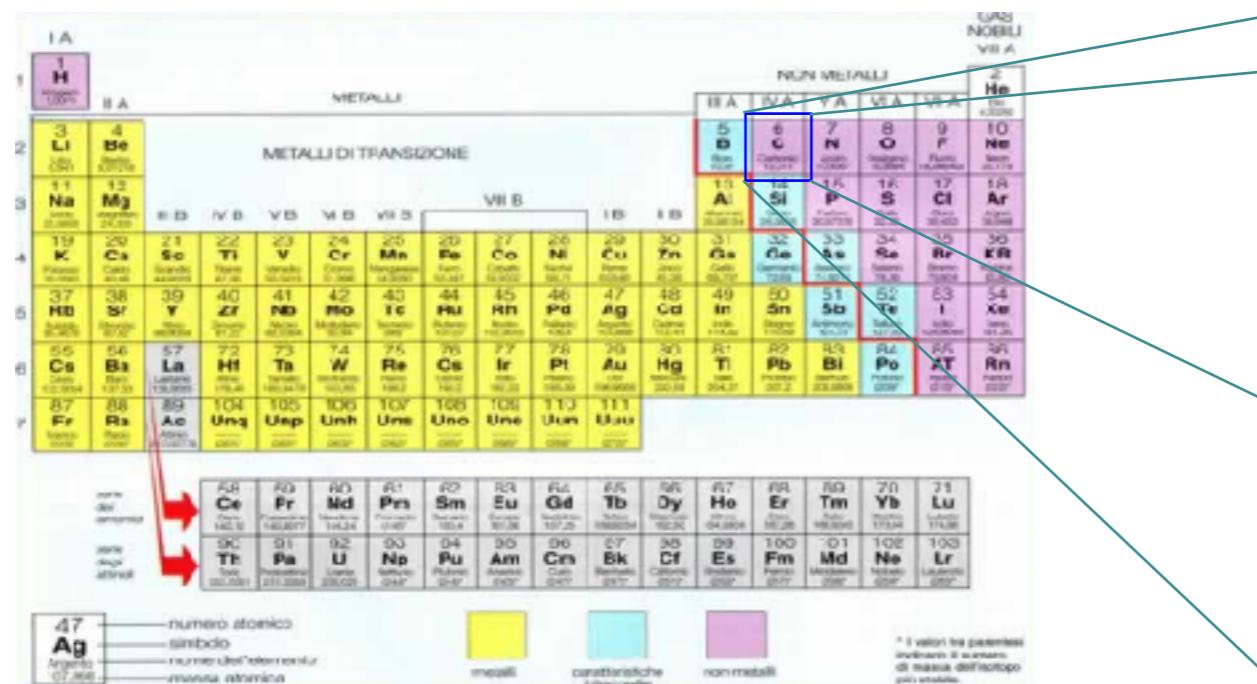


sp^2



sp^3

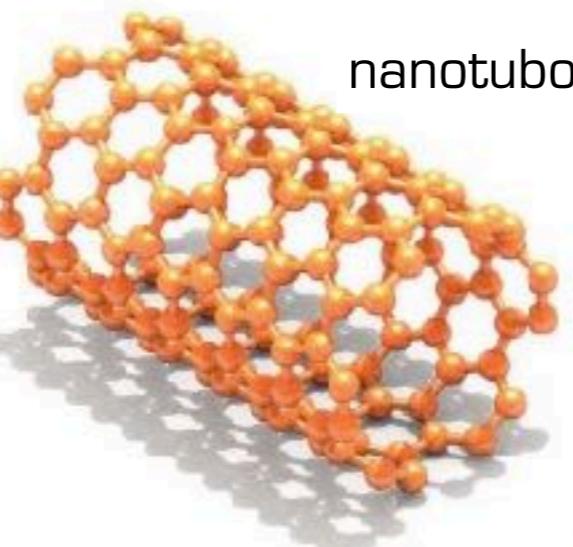
Il carbonio



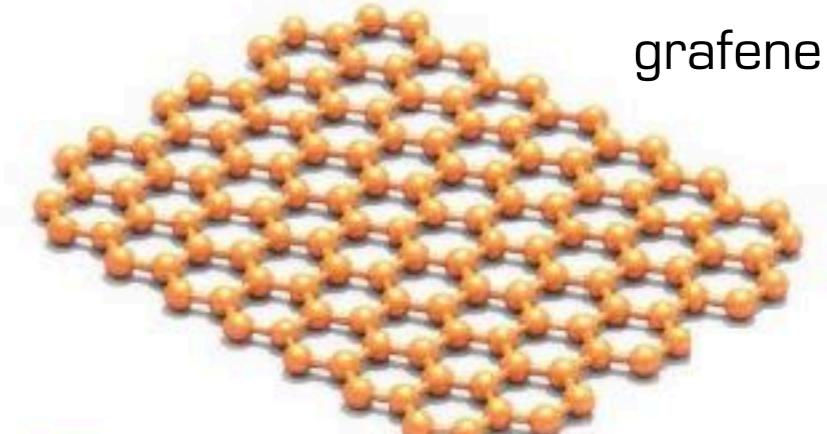
6
C

Carbon
12.0107

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



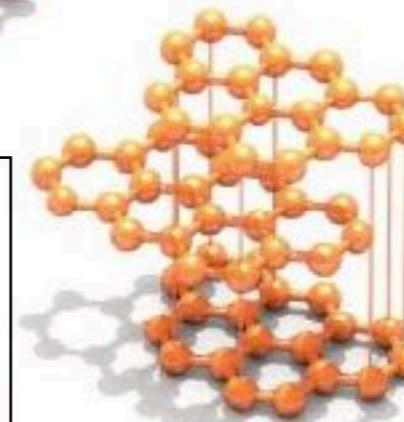
nanotubo



grafene



diamante

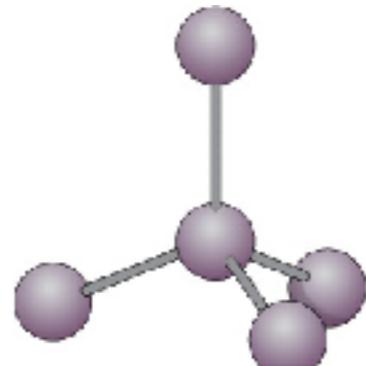


fullerene

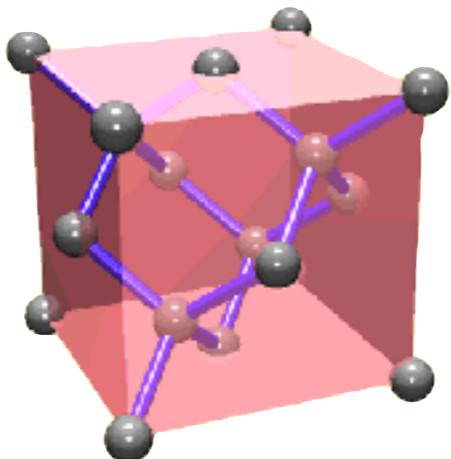
grafite

Diamante

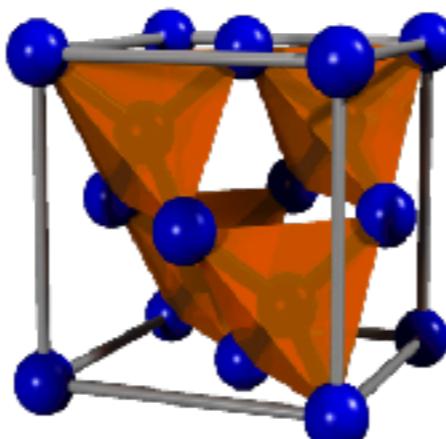
αδάμας (indistruttibile)



legami covalenti con
disposizione tetraedrica

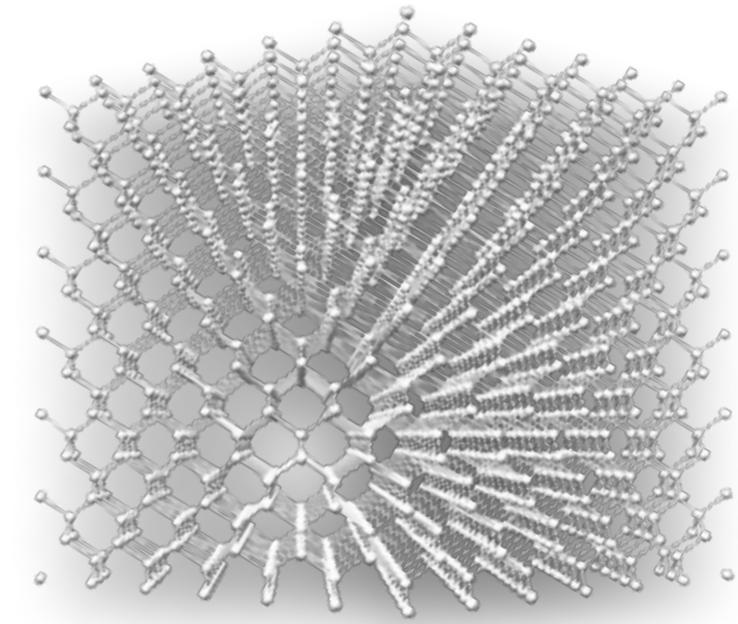


unità fondamentale di cristallo

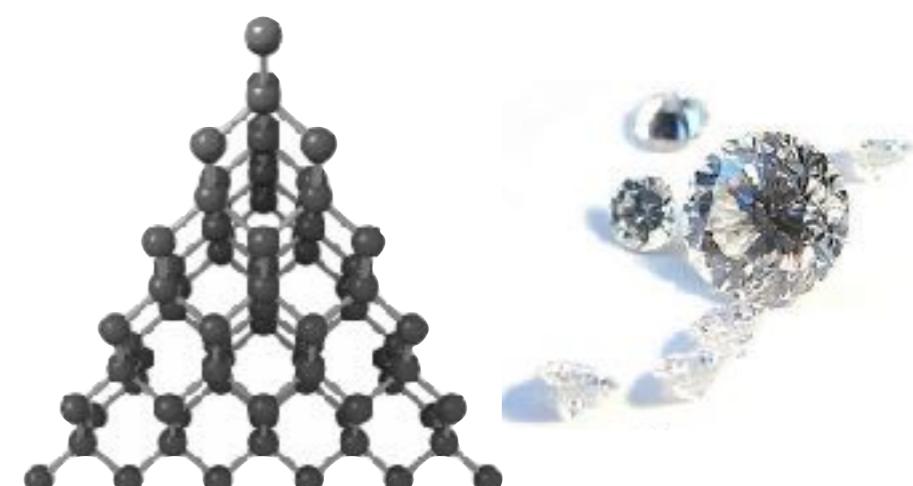


Struttura cristallina

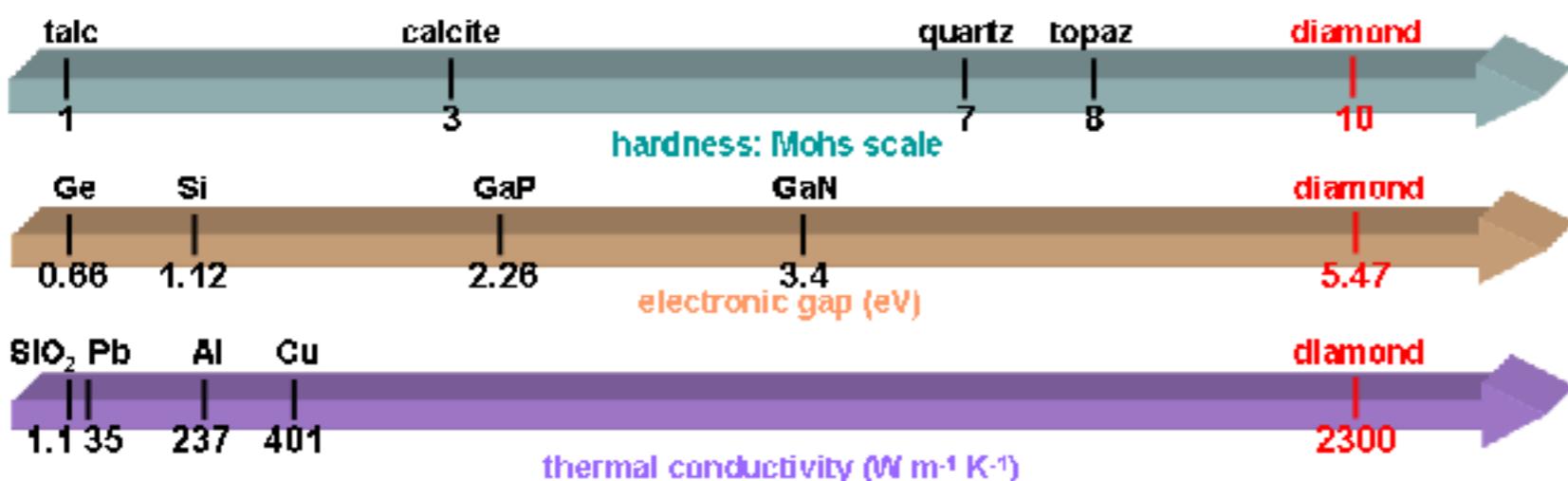
Tetraedro: struttura rigida, forti legami chimici



struttura periodica



Proprietà chimico-fisiche



durezza

inerzia chimica

resistenza elettrica

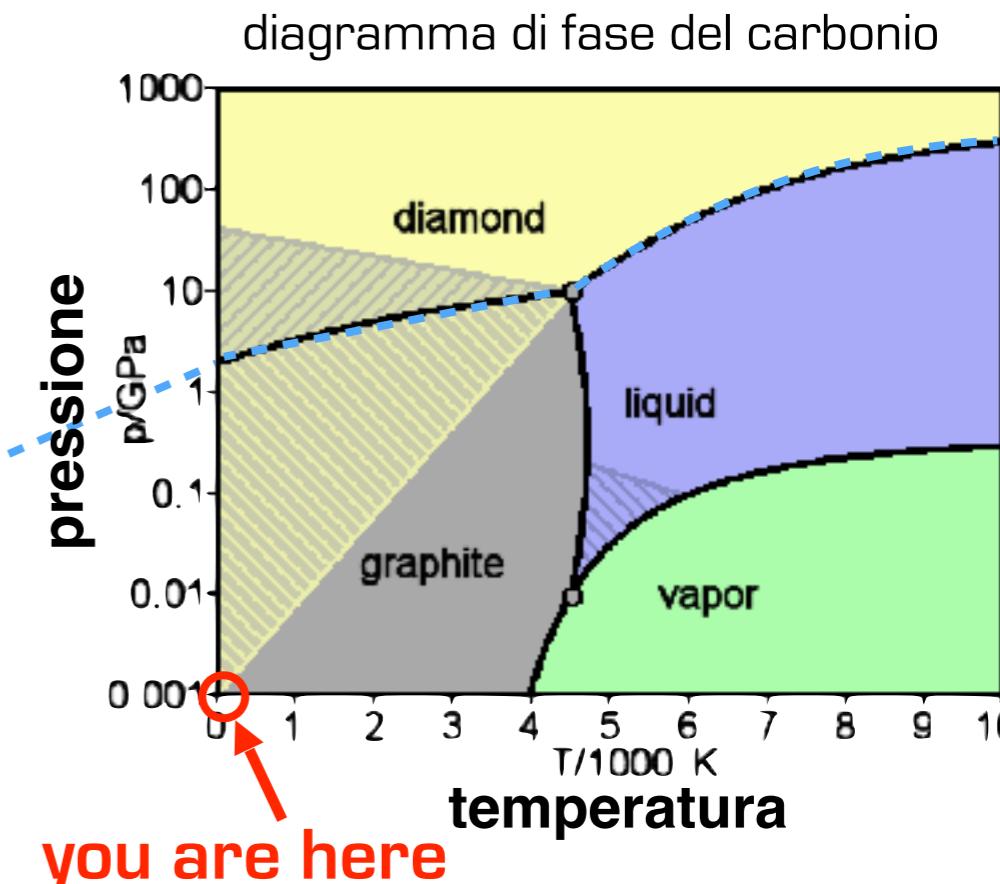
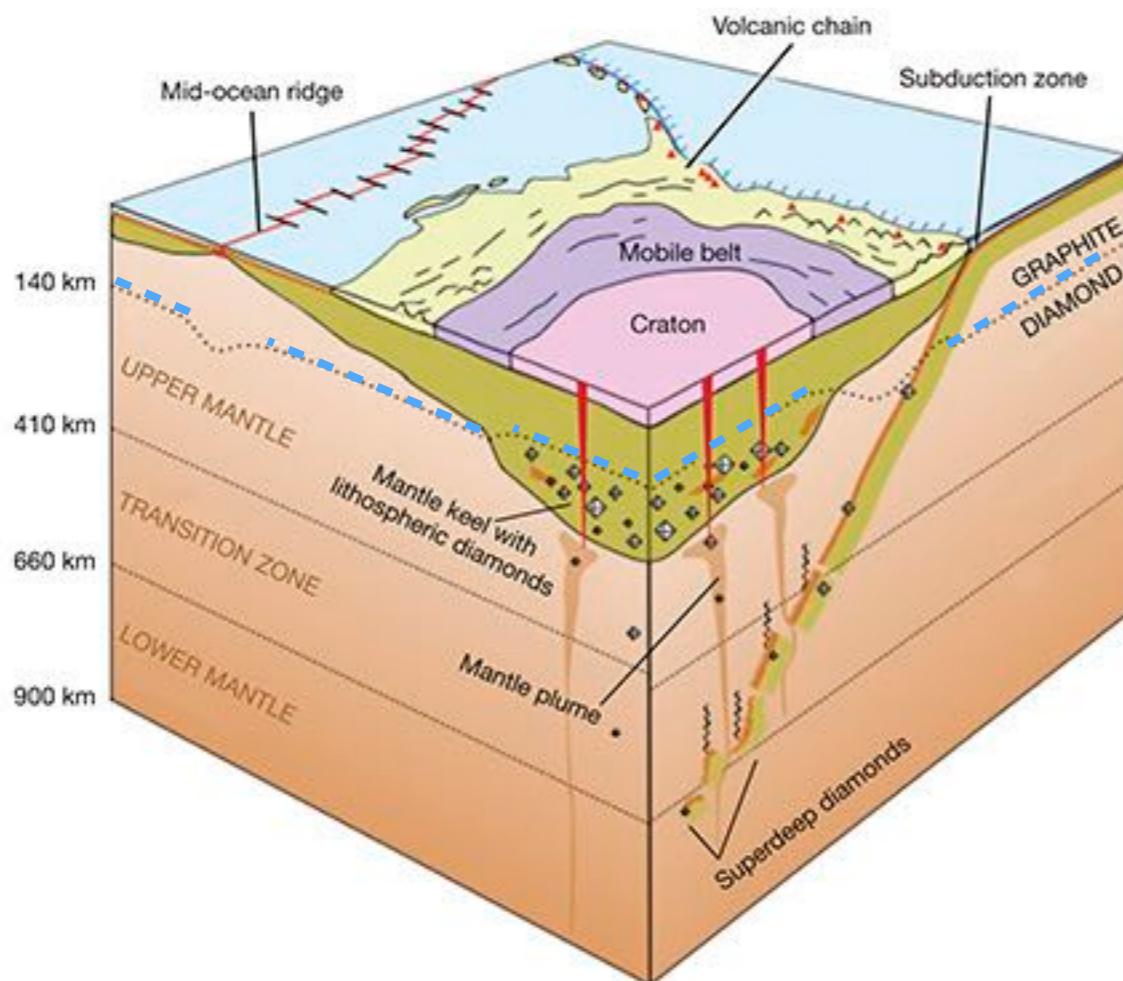
trasparenza

conducibilità termica

Il diamante naturale

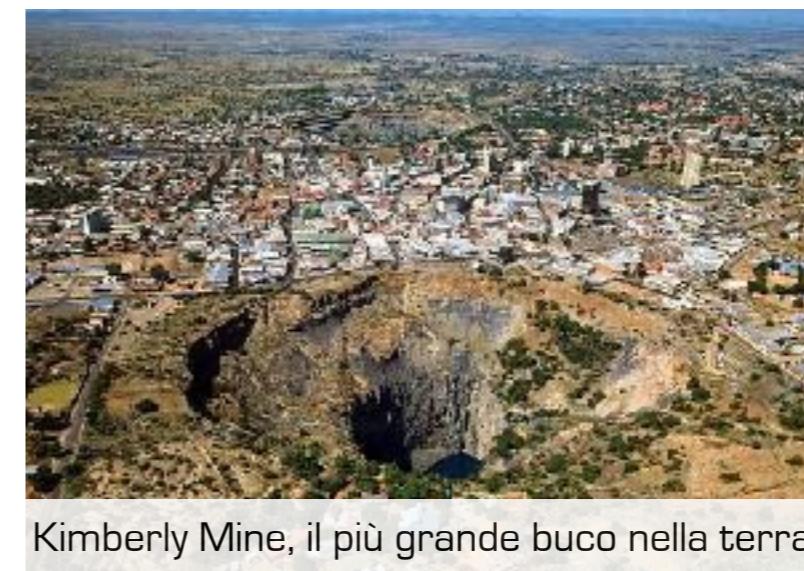
Il diamante è una forma **meta-stabile** del carbonio in condizioni ambientali standard

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



Nella **litosfera** (a 140-190 km di profondità)
(pressione: 4.5–6 Gpa temperatura: 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 (kimberlite, lampronite)

Il diamante sintetico

L'uomo imita la natura ...

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

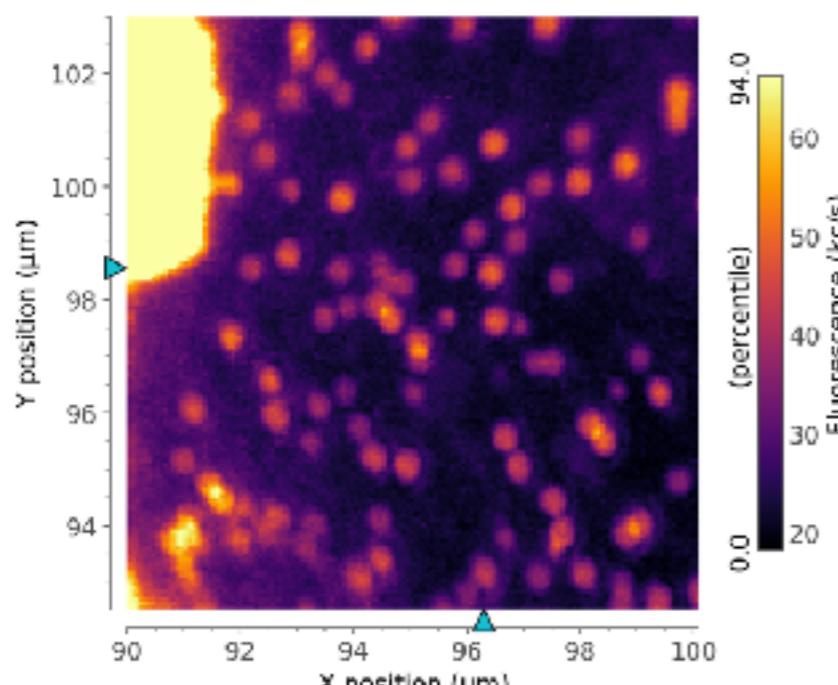
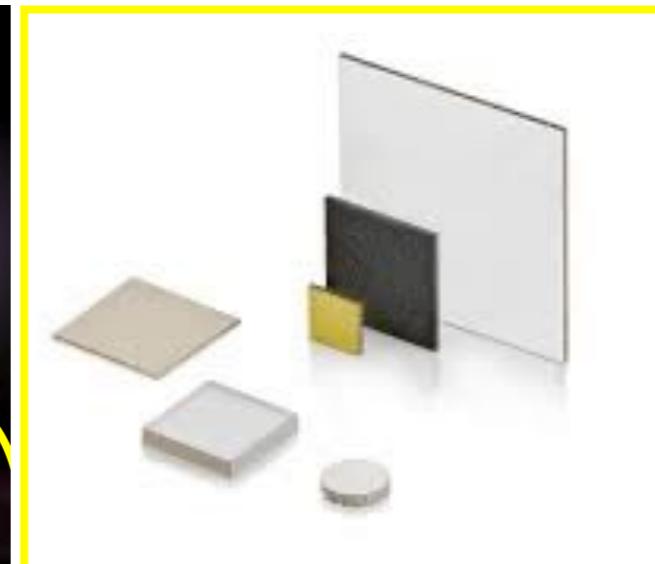
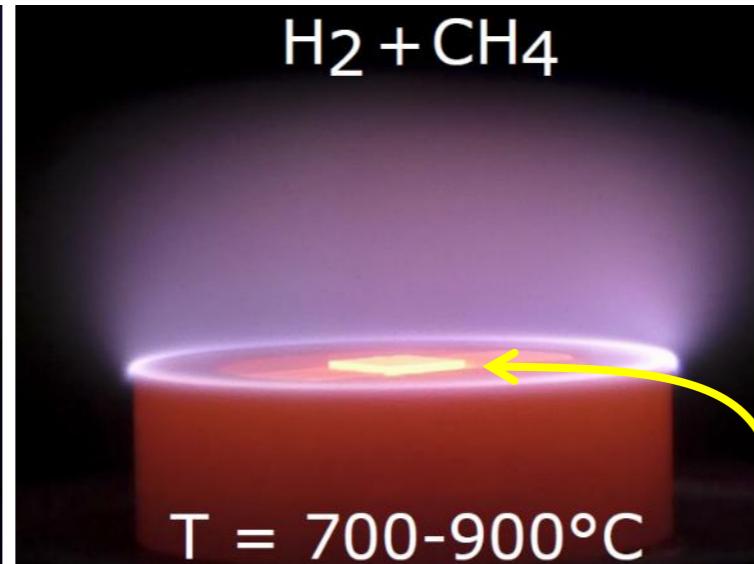
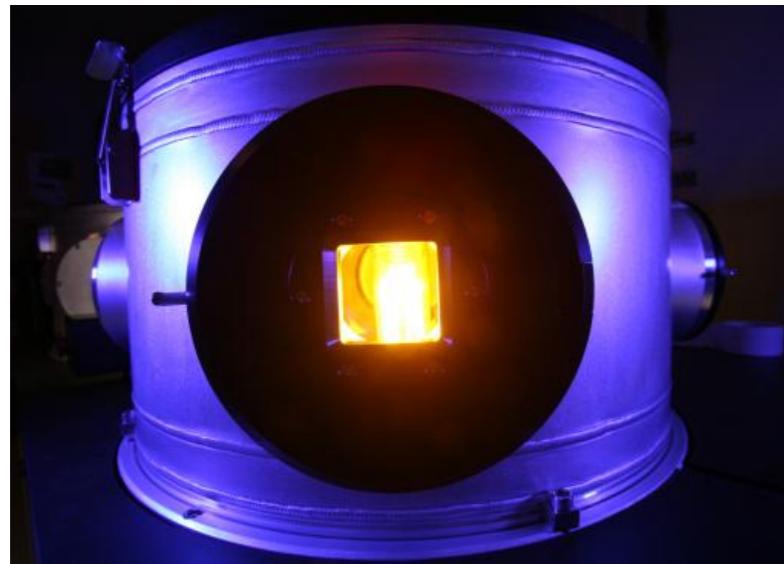


Il diamante sintetico

L'uomo imita la natura ...

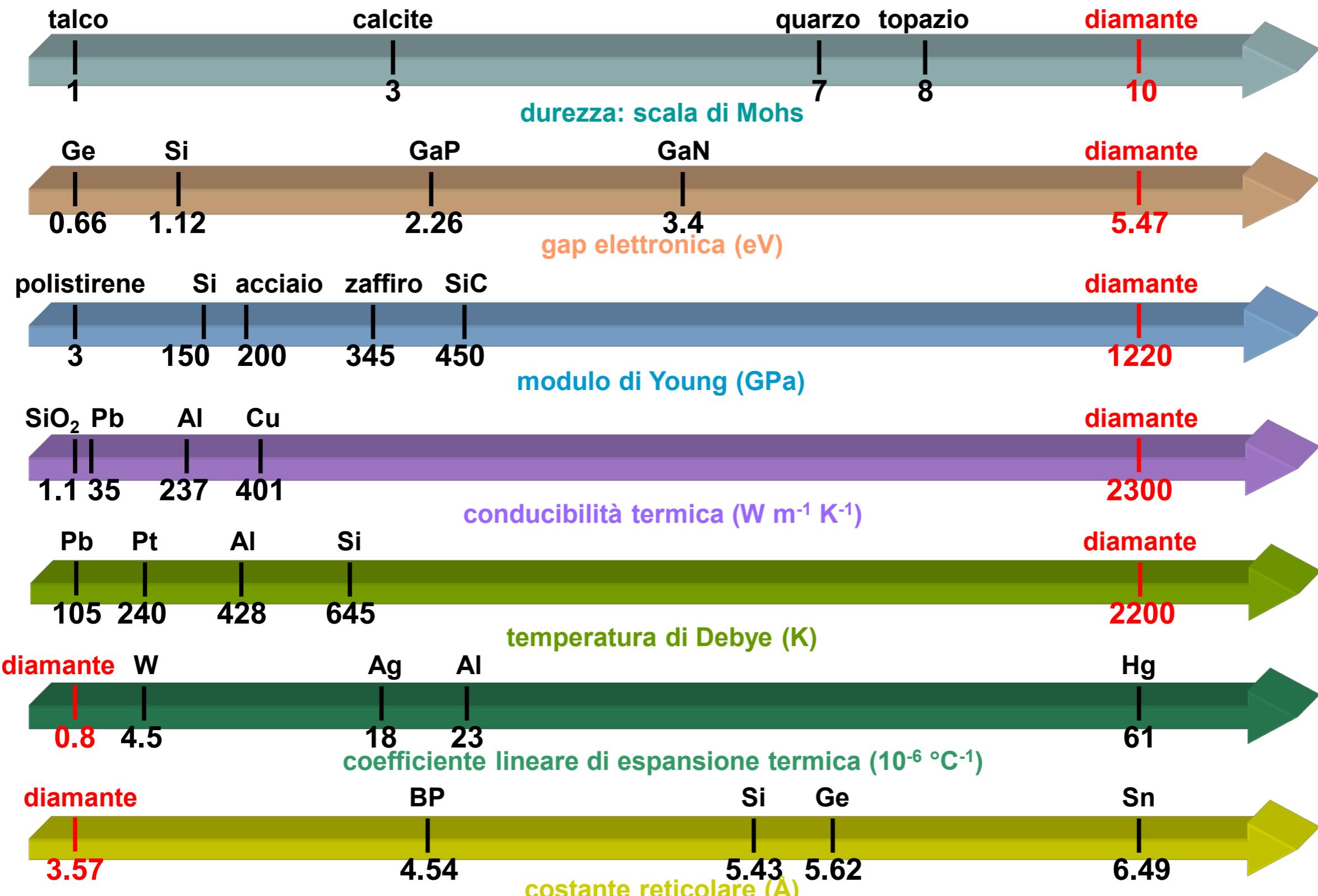
- con un sistema di sintesi ad **alte pressioni e temperature**
Nel 1954 General Electric consegne il primo processo di sintesi del diamante sistematico e commercialmente sostenibile
- con un sistema di **deposizione da fase vapore**: atomi di carbonio condensano da un plasma "caldo" ad un substrato "freddo"

...e la supera!



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

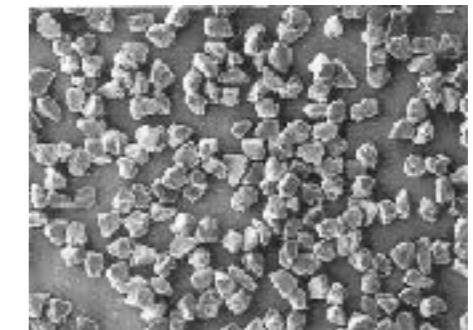
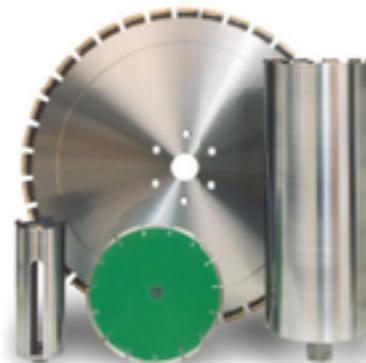
Funzionalizzabilità chimica della superficie

Trasparenza ottica dal vicino UV al lontano IR

Difetti otticamente attivi nella band-gap

Applicazioni del diamante artificiale

Basso coefficiente di attrito



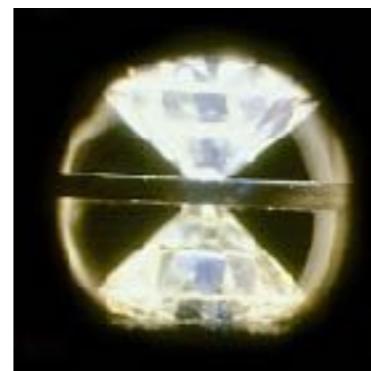
Elevata durezza meccanica

Resistenza alla radiazione

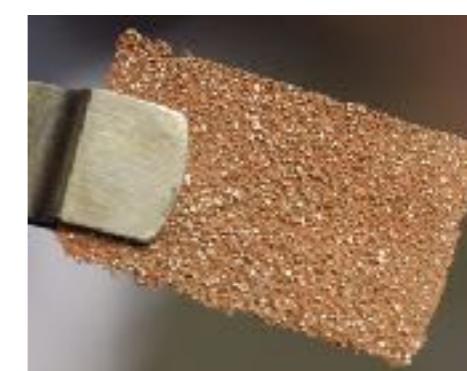
strumenti da taglio

polveri abrasive

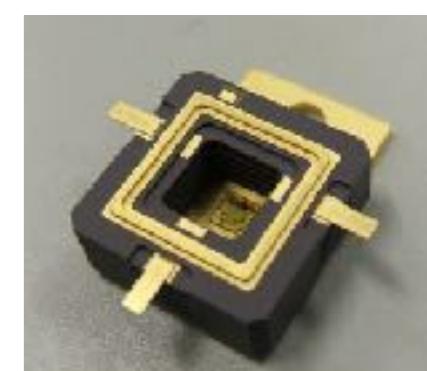
Alta mobilità dei portatori di carica



Alto campo di breakdown



Inerzia chimica



prese meccaniche

dissipatori termici

diodi di potenza

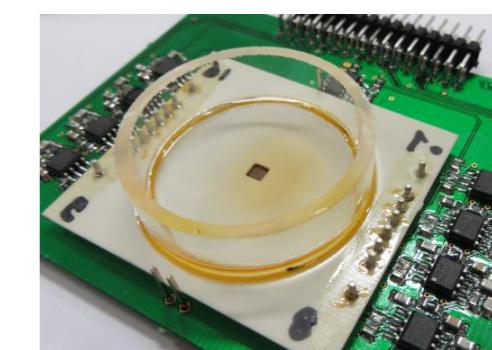
Bio-compatibilità

Funzionalizzabilità chimica della superficie

Trasparenza ottica dal vicino UV al lontano IR



Difetti otticamente attivi nella band-gap



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:

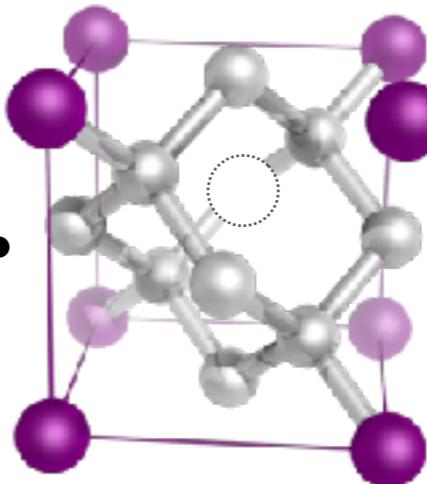
- **trasparenza**: elevata band gap ($E_g=5.5$ eV)
- **brillantezza**: elevato indice di rifrazione ($n=2.4$)
- variabilità di **colorazione**: presenza di **impurezze** nel reticolo cristallino (B, N, ...)



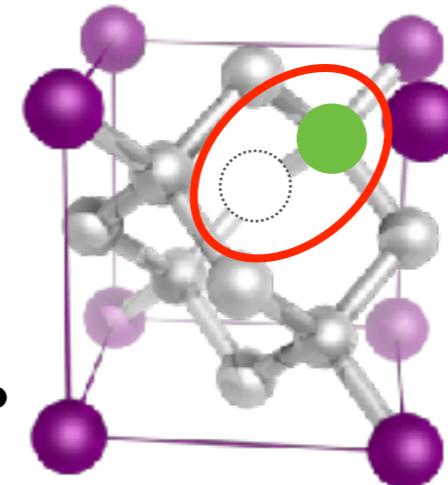
Difetti reticolari in diamante

Difetti reticolari nel cristallo:

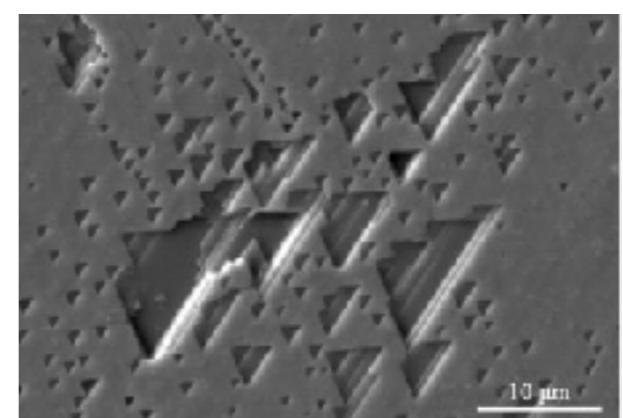
- **vacanze**: assenza di atomi nel sito



- **impurità sostituzionali**



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



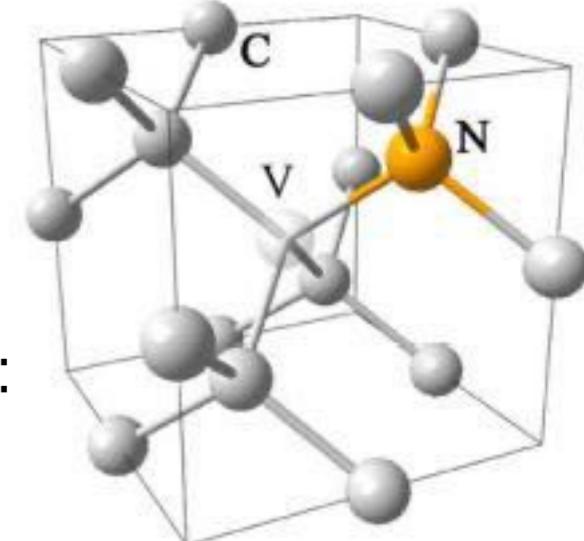
- in aggiunta: interstiziali, dislocazioni, difetti estesi...

Centri di colore in diamante

$E_g = 5.5 \text{ eV}$

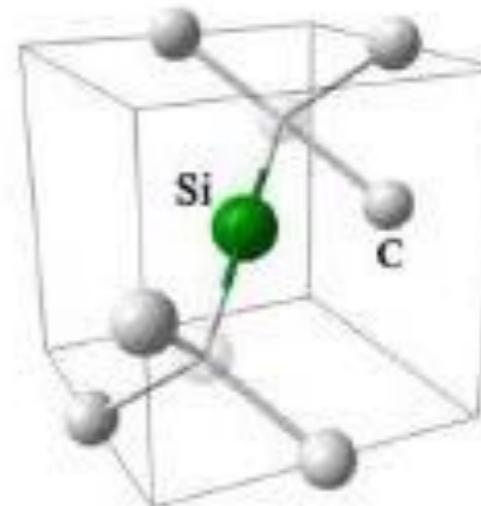
Alcuni complessi impurezza-vacanza sono dei **difetti luminescenti**:
Sistemi a due livelli con transizioni otticamente attive

complesso azoto-vacanza

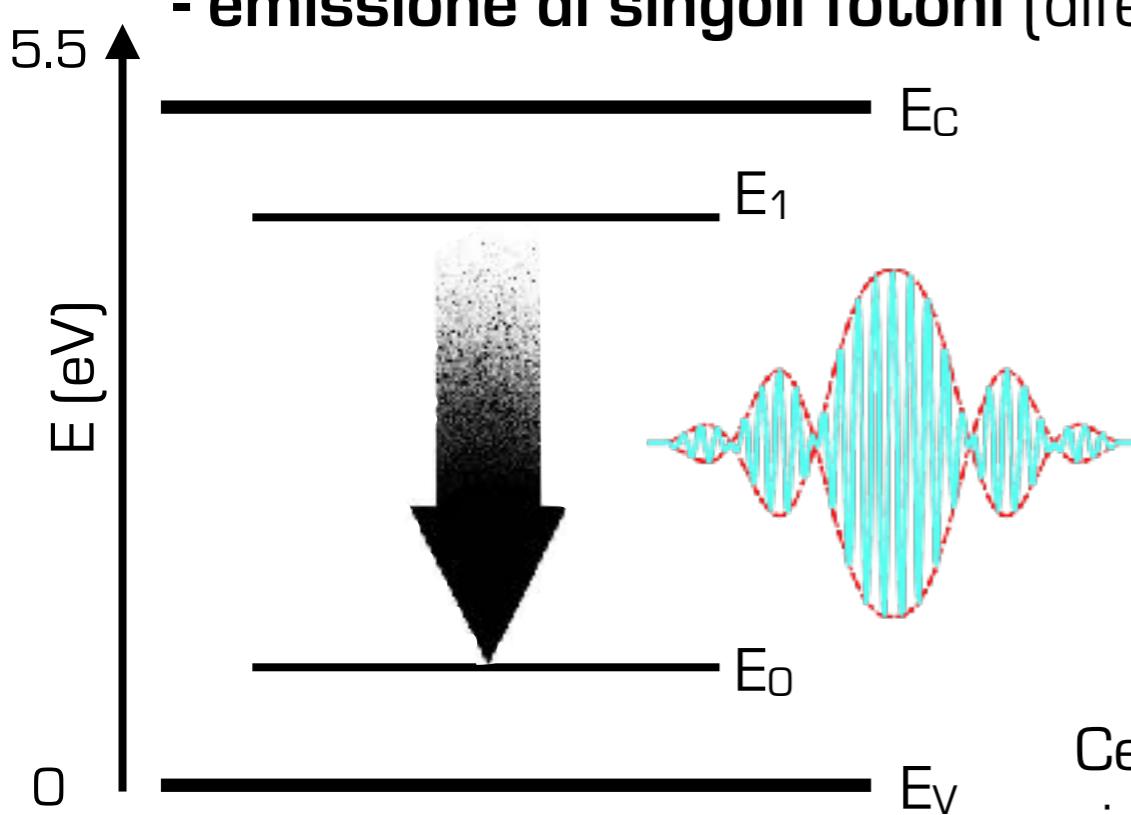


Molti centri sono caratterizzati da:

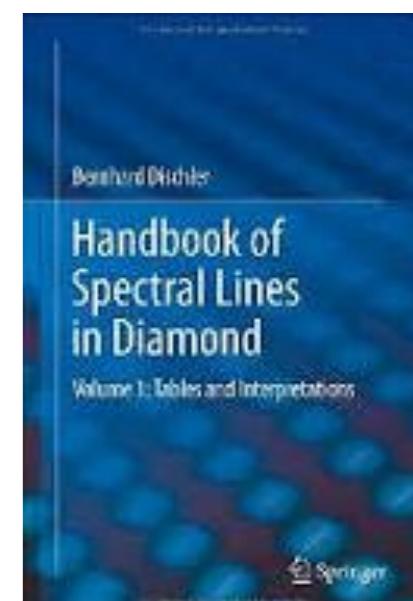
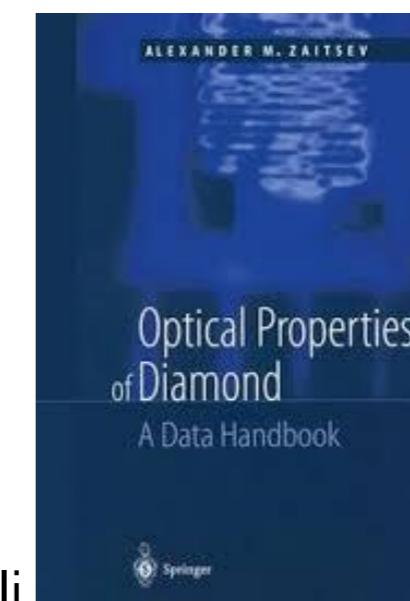
- elevata efficienza quantica
- emissione nello spettro della luce visibile
- fotostabilità a **temperatura ambiente**
- **emissione di singoli fotoni** (difetti isolati)



complesso 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

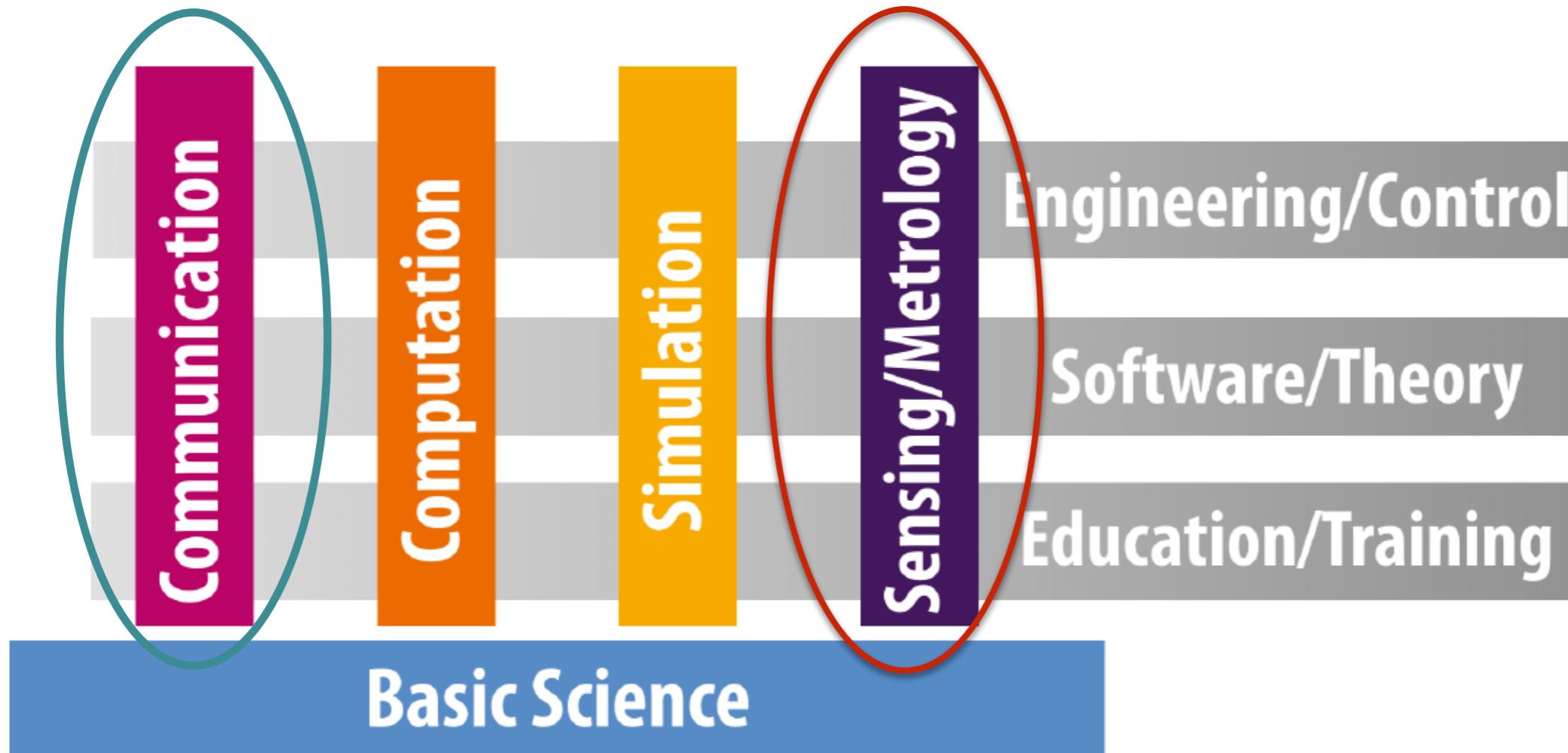
Centri di colore individuali: sorgenti di singolo fotone



Tecnologie quantistiche

Dal Quantum Technologies Flagship Final report (2017)

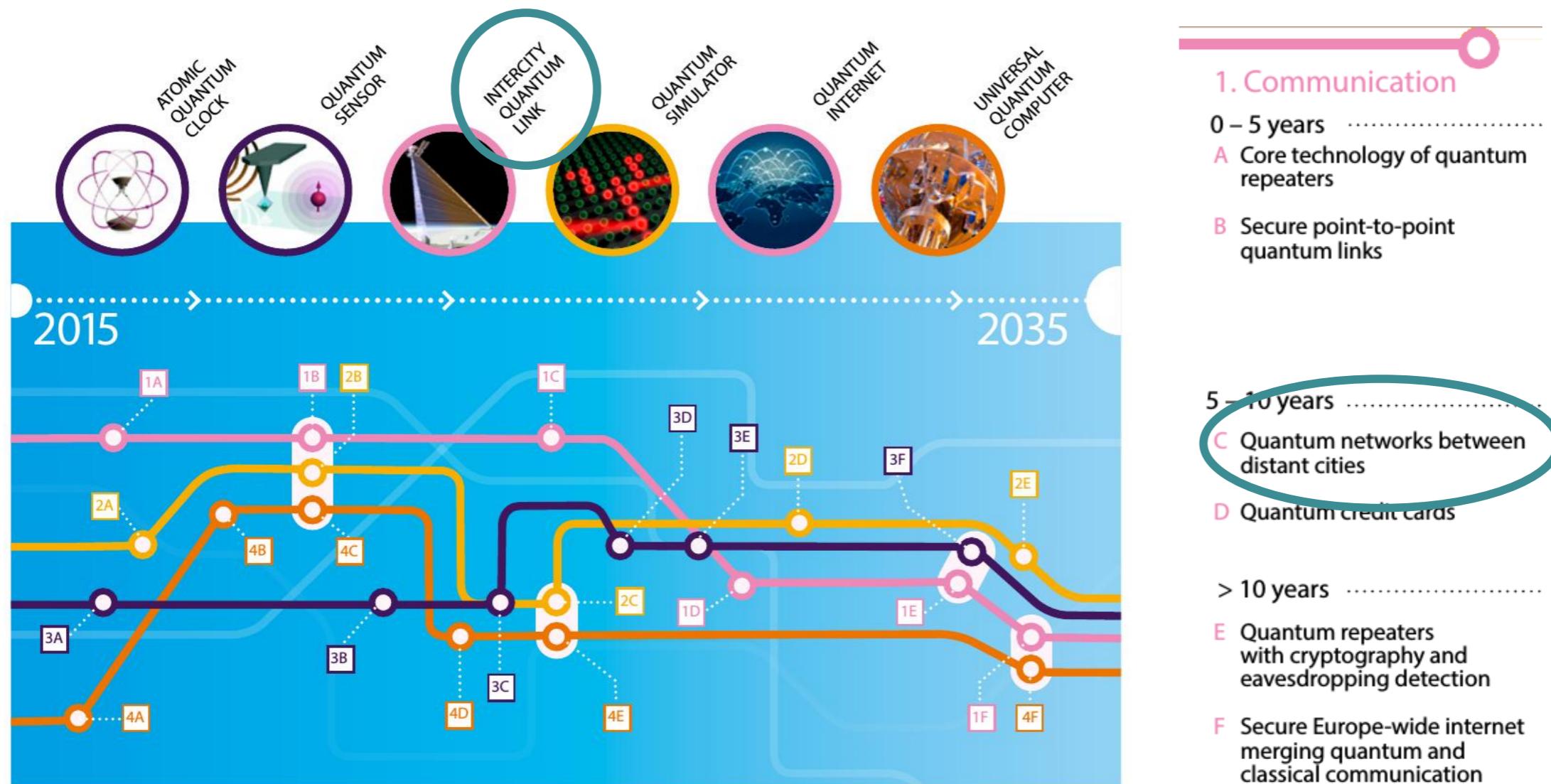
"The developments in the **leading domains of Quantum Technologies** - **Communication**, Computation, Simulation, **Sensing** and Metrology - can be expected to produce transformative applications with real practical impact on ordinary people"



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"



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

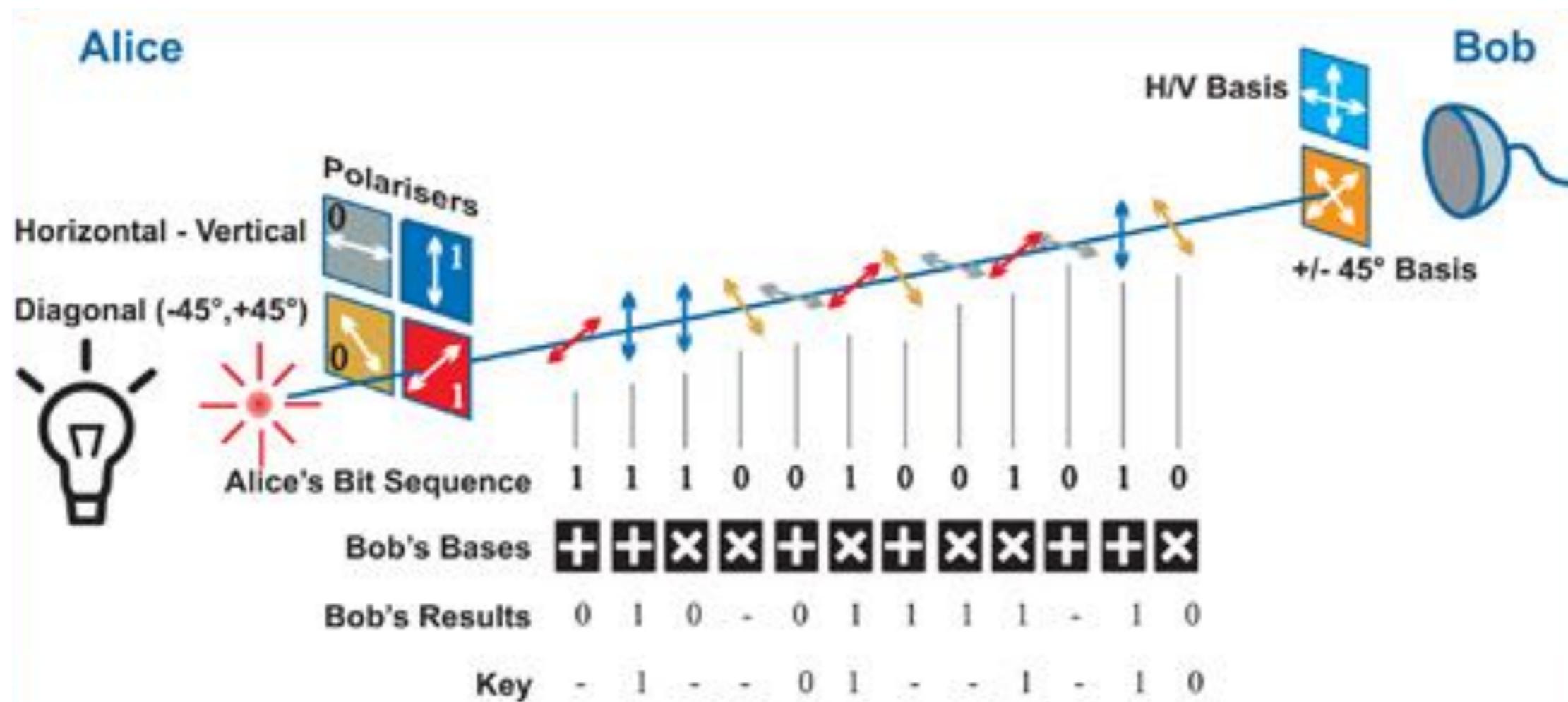
When elementary quantum systems, such as polarized photons, are used to transmit digital information, the uncertainty principle gives rise to novel cryptographic phenomena unachievable with traditional transmission media, e.g. a communications channel on which it is impossible in principle to eavesdrop 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
Random sending bases.....	D	R	D	R	R	R	R	R	D	D	R	D
Photons Alice sends.....	↗	↓	↖	↔	↓	↑	↔	↔	↖	↗	↓	↖
Random receiving bases.....	R	D	D	R	R	D	D	R	D	R	D	D
Bits as received by Bob.....	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0
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						
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



$$\begin{array}{c} \nearrow \\ \downarrow \end{array} = \begin{array}{c} \uparrow \\ \downarrow \end{array} + \begin{array}{c} \leftrightarrow \\ \leftrightarrow \end{array} \quad \begin{array}{c} |1\rangle \\ |0\rangle \end{array} \quad \frac{1}{\sqrt{2}}$$

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

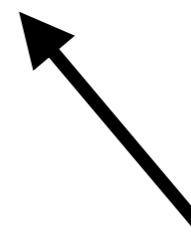
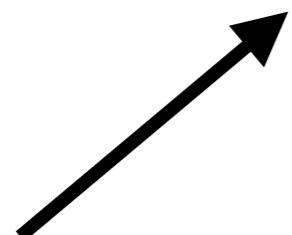
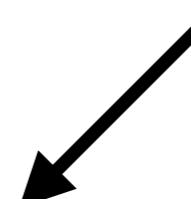
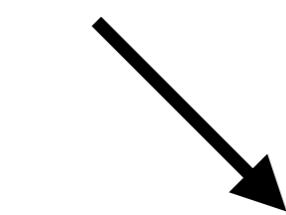
Caratterizzazione di classi di emettitori

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

Interazione con l'ambiente esterno

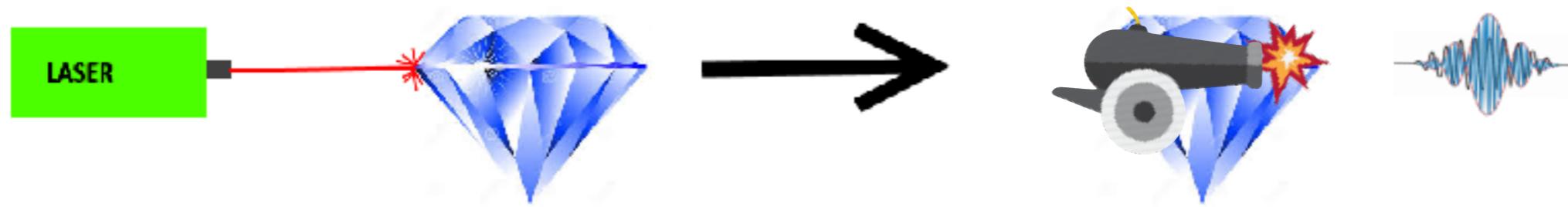
Fabbricazione di sorgenti

Integrabilità con la tecnologia elettronica esistente

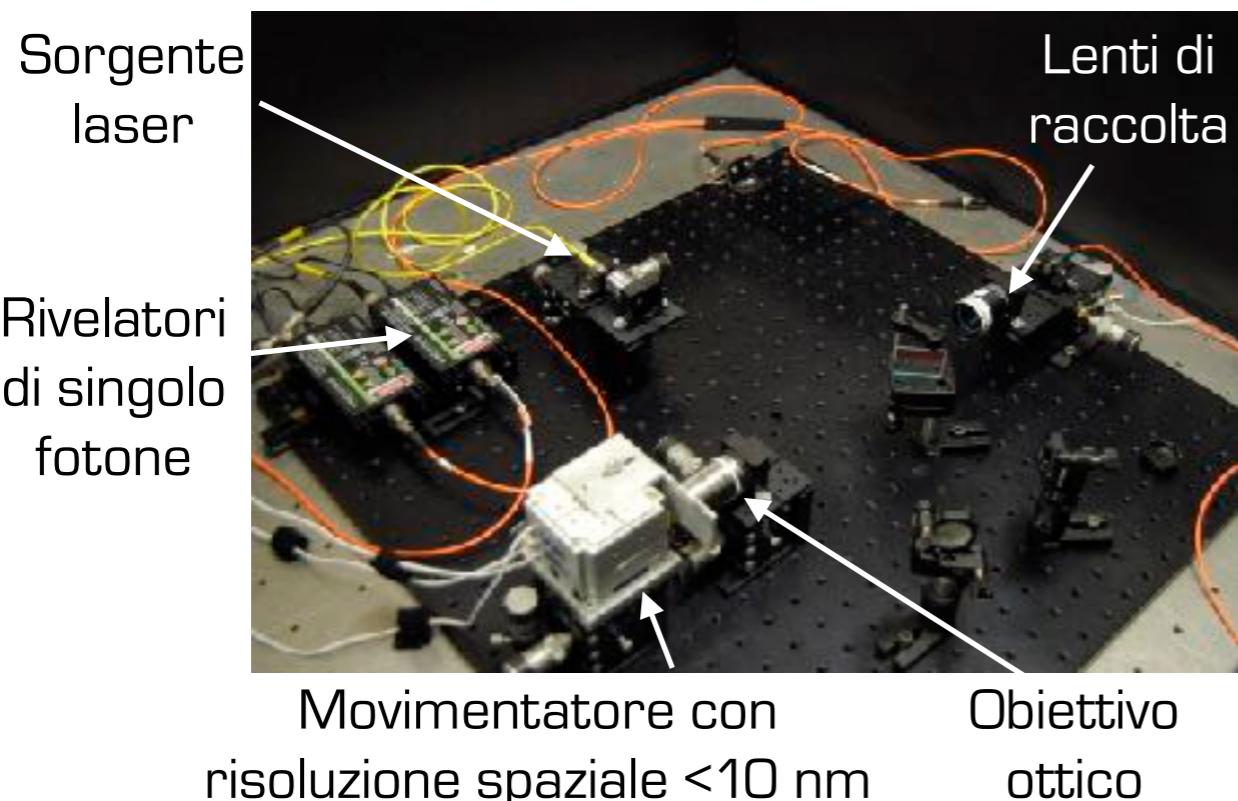


Caratterizzazione di centri di colore in diamante

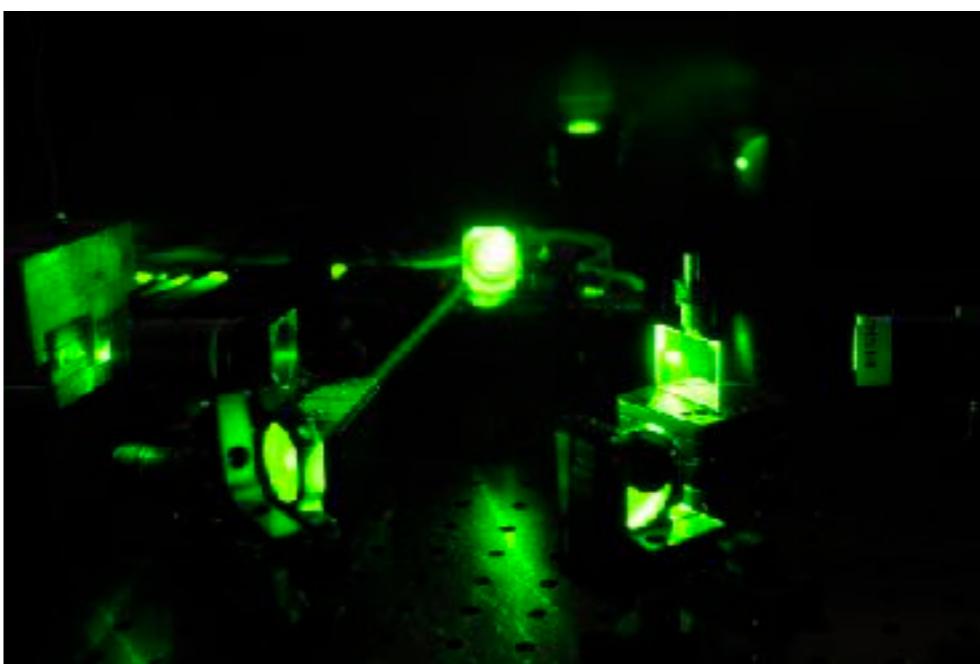
Microscopia confocale



Laser off...

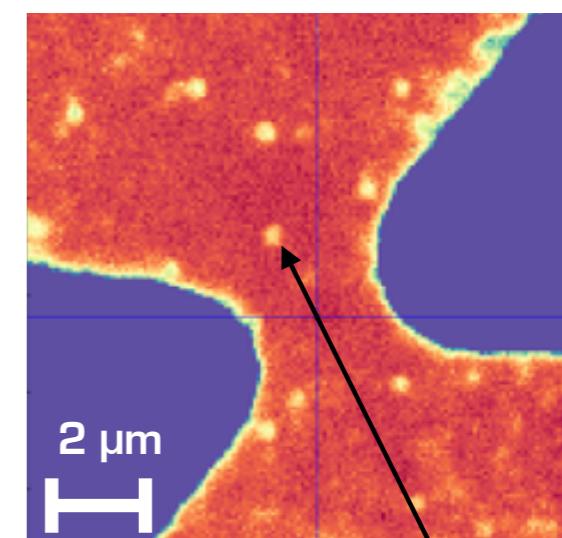


Laser on!



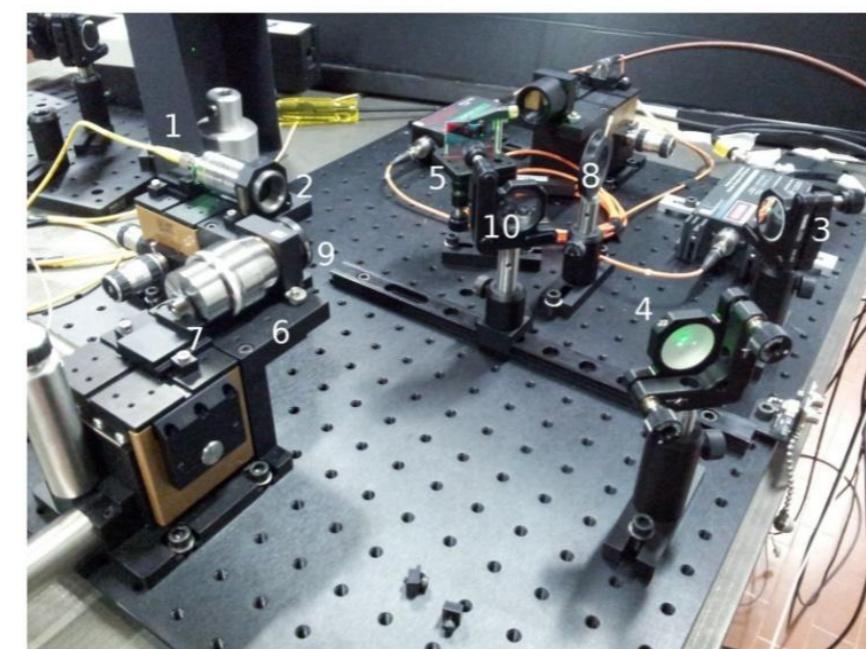
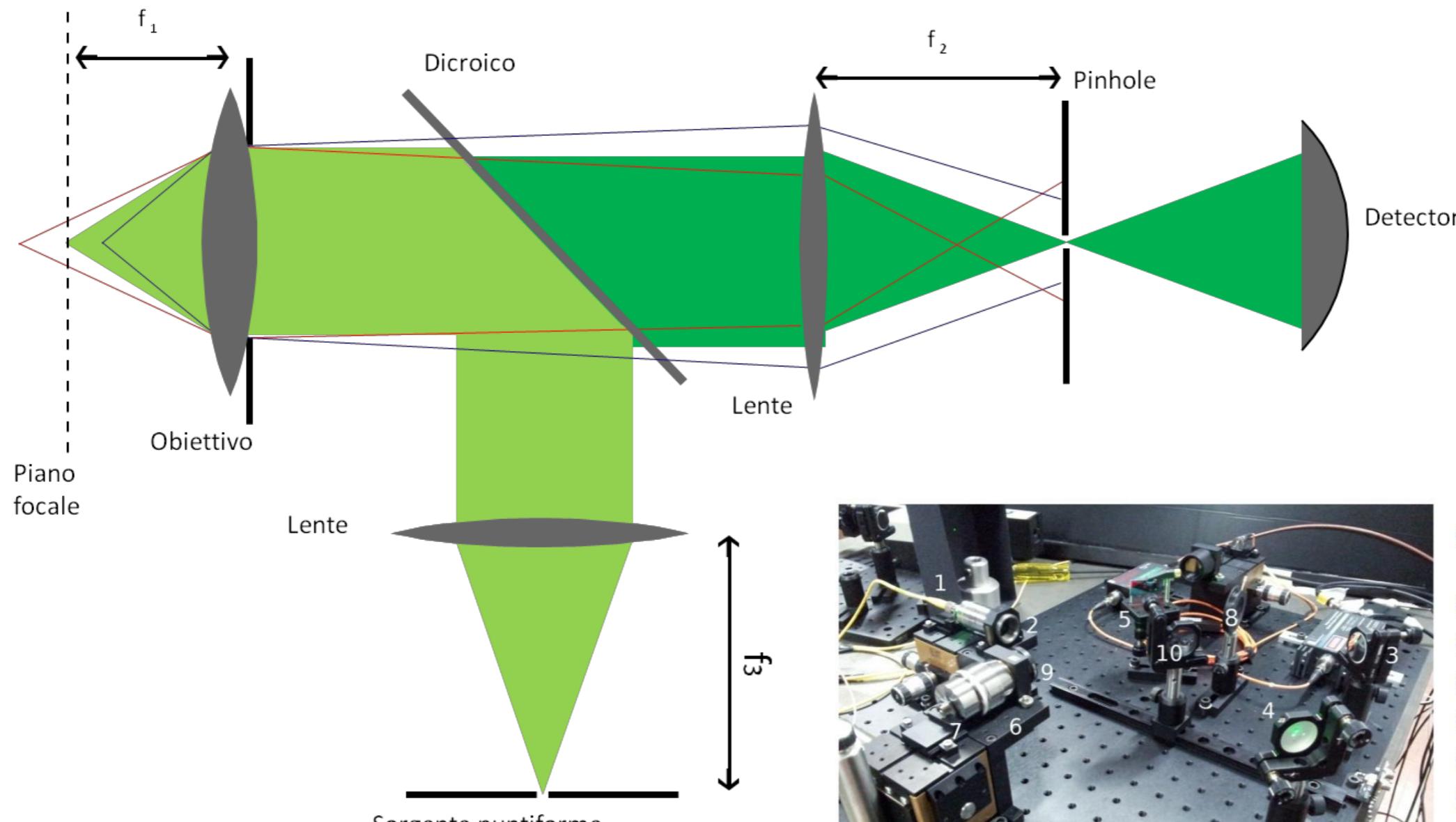
Obiettivo 100x: Eccitazione (laser) e raccolta puntuale

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



Caratterizzazione di centri di colore in diamante

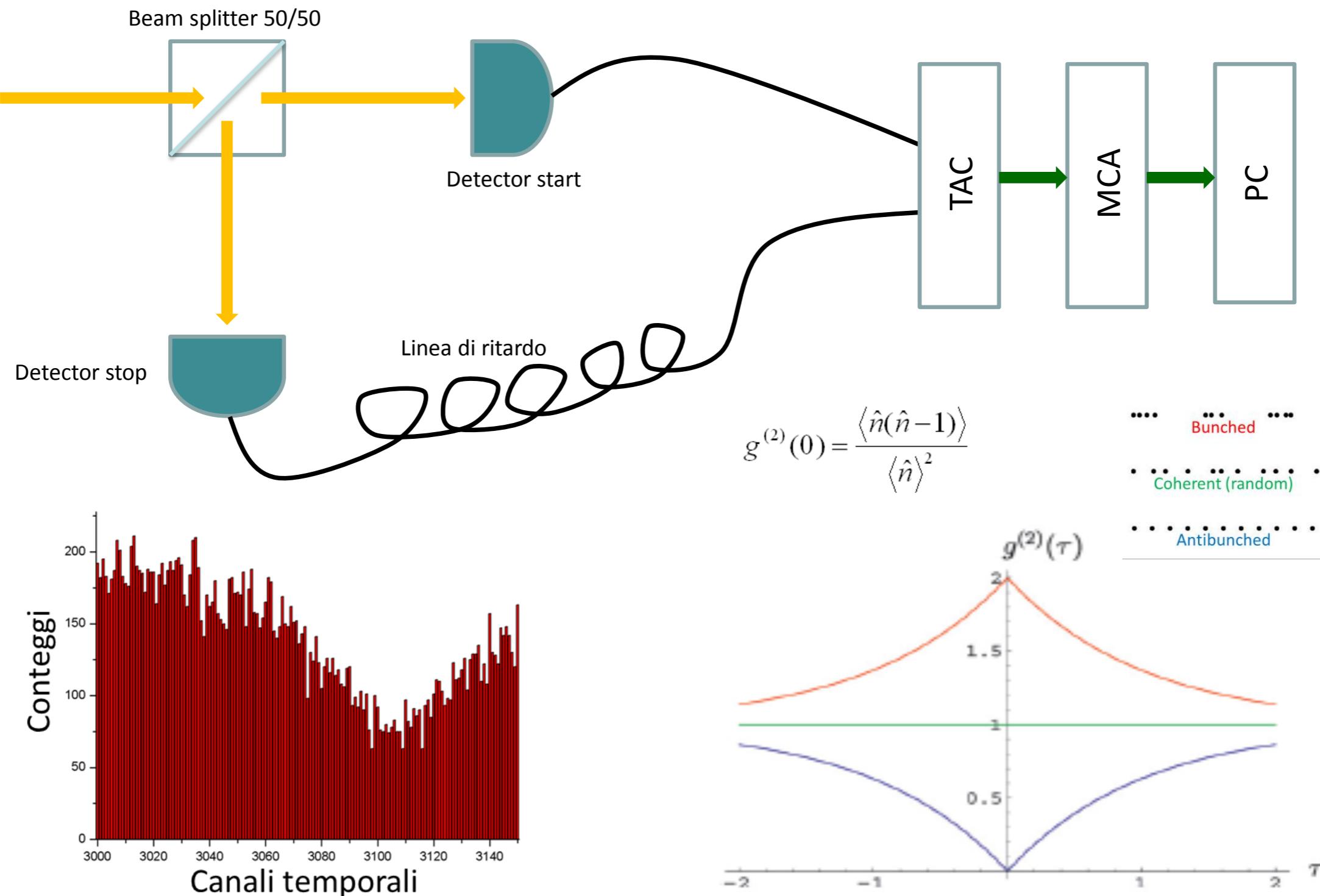
Microscopia confocale



- 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



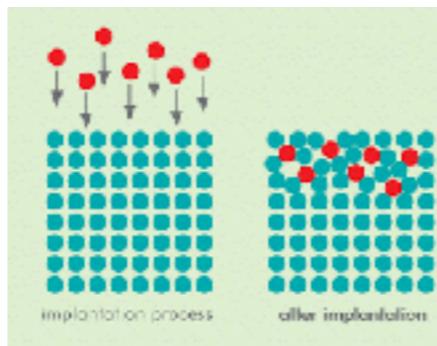
Fabbricazione di sorgenti di singolo fotone

Complessi di tipo impurezza-vacanza:

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

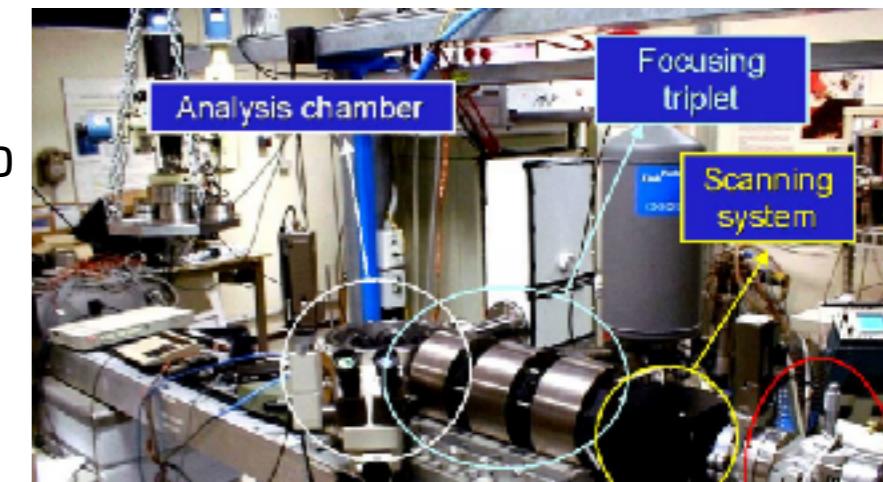
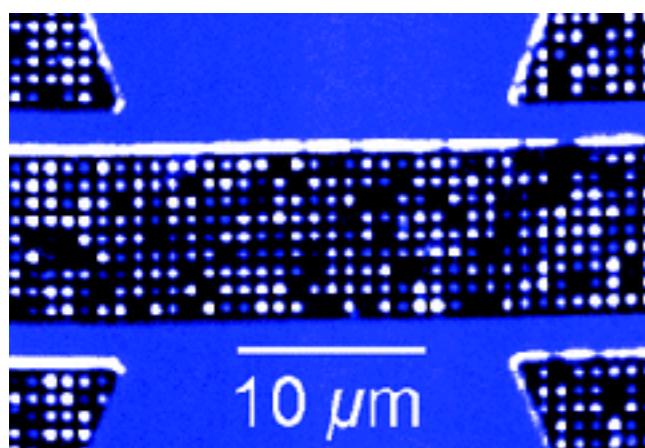
L'introduzione delle impurezze avviene per **impiantazione ionica**:

Un **fascio di ioni** della specie chimica desiderata viene focalizzato sul campione (energie: 30-2000 keV)

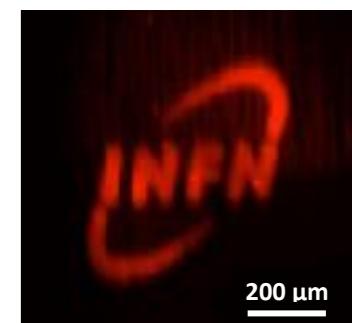


Lavoro della comunità scientifica:

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



Microfascio dell'acceleratore AN2000
Laboratori Nazionali INFN di Legnaro



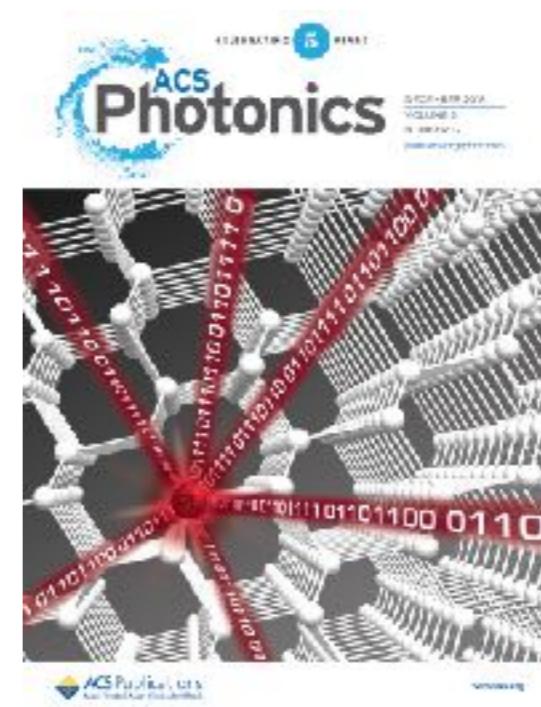
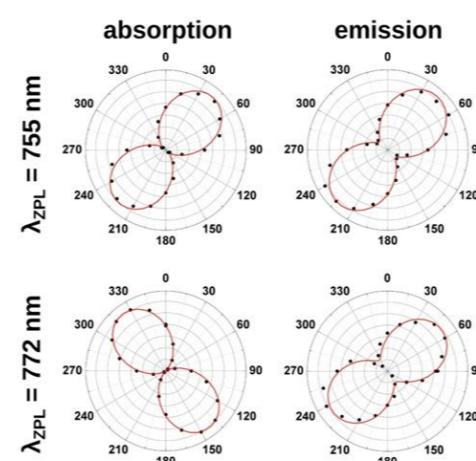
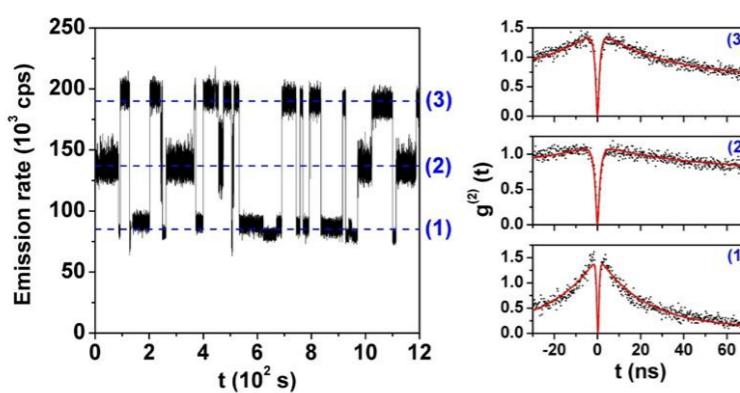
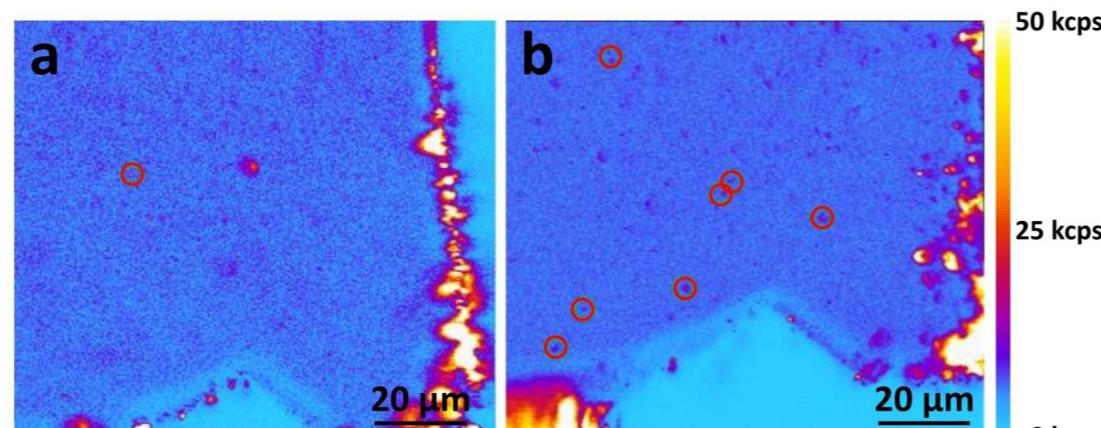
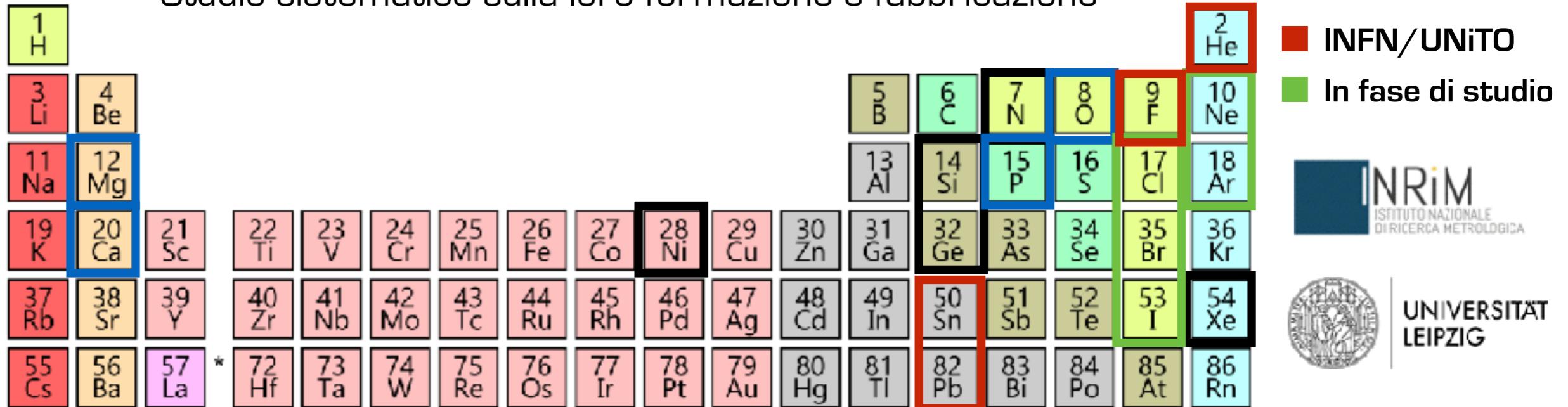
Sfide tecnologiche:

- Qual'è l'impurezza ottimale come sorgente?

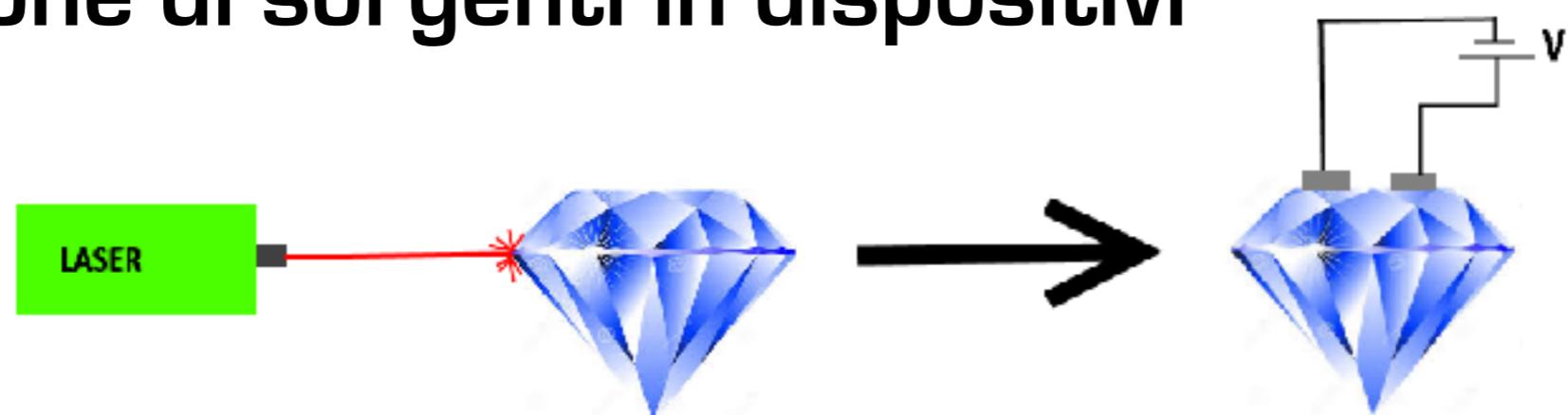
Difetti luminescenti in diamante - 2019

Qual'è l'impurezza ottimale come sorgente?

Studio sistematico sulla loro formazione e fabbricazione

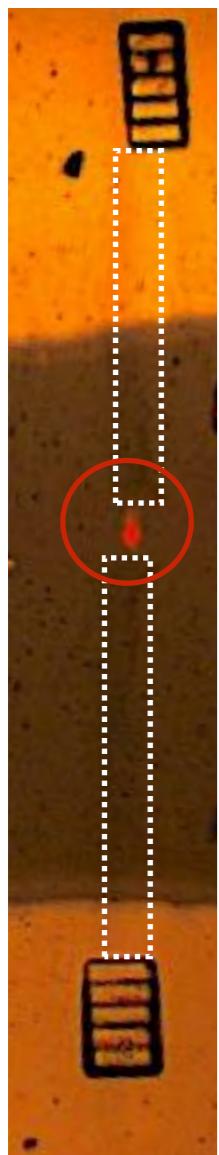


Integrazione di sorgenti in dispositivi

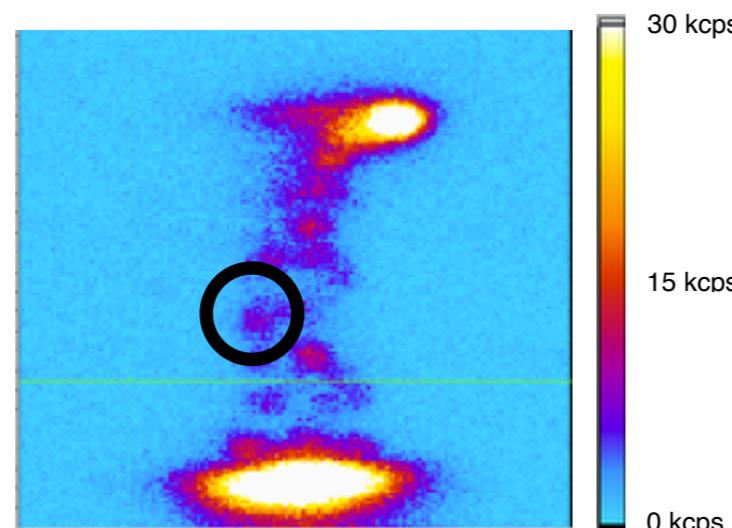


Eccitazione laser (fotoluminescenza): meccanismo ingombrante e complesso

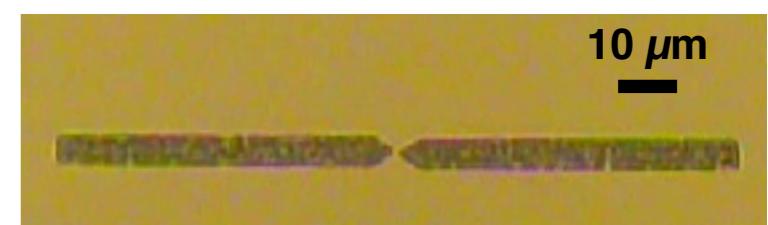
Eccitazione **elettrica** (elettroluminescenza): consente il controllo elettrico di sorgenti



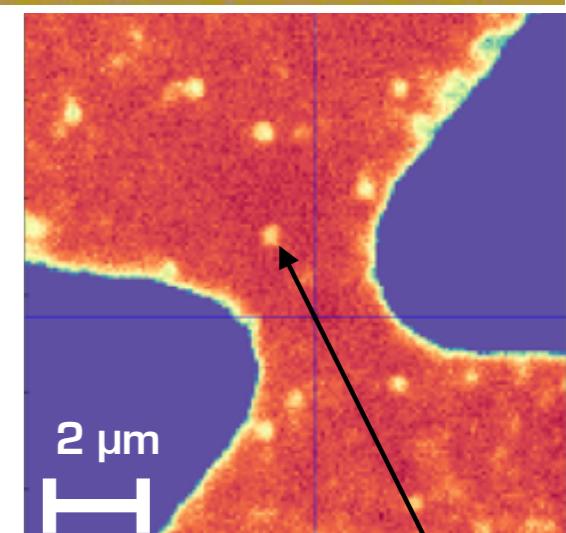
Elettroluminescenza da
un insieme di difetti luminescenti
(2014)



Elettroluminescenza da
sorgenti di singolo fotone (2015)



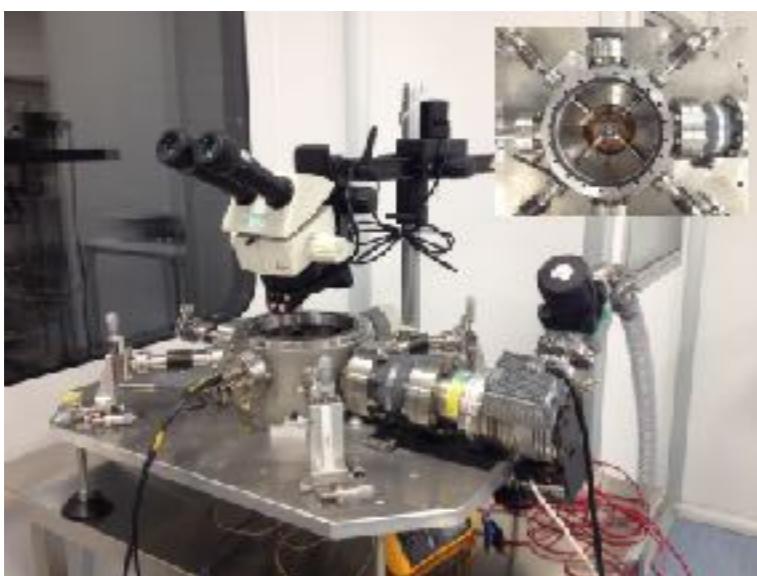
Nuova generazione
di dispositivi integrati



Processamento e fabbricazione di dispositivi



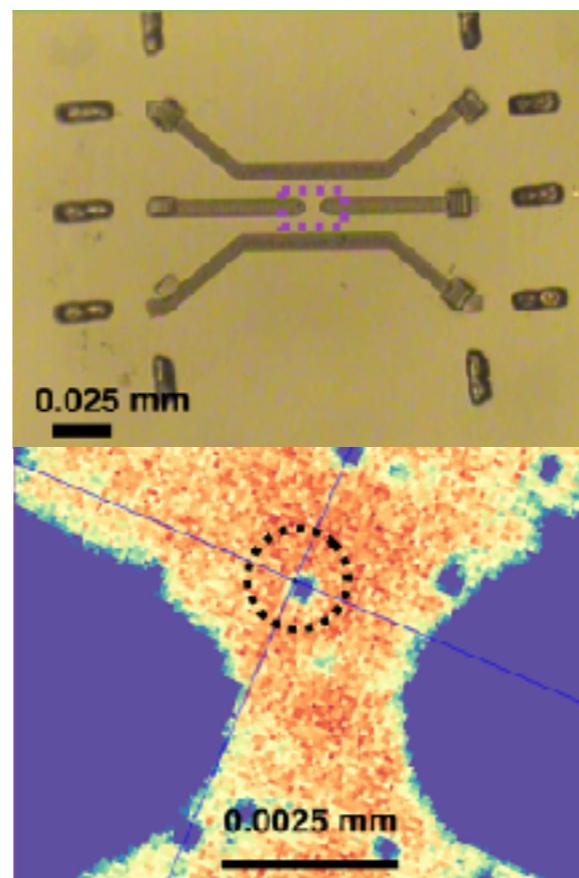
Sistema di litografia con laser ad alta potenza
Fabbricazione di campioni ed elettrodi metalici



Probe Station ad alto vuoto
Caratterizzazione elettrica di campioni e dispositivi



Camera pulita: 24 m² condizioni ambientali controllate
Classe 10000: meno di 3000 particelle di polvere per m³



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

Interazione delle sorgenti con l'ambiente esterno

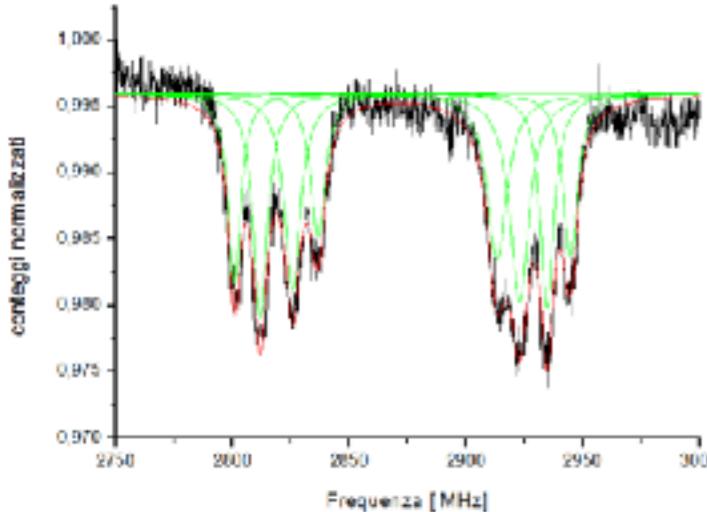
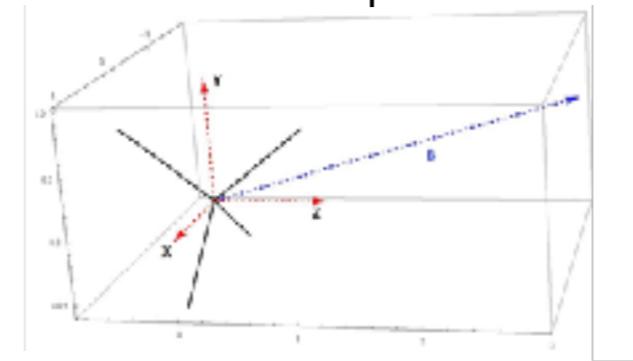
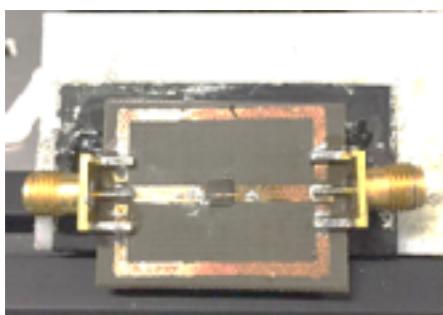
L'interazione dei difetti luminescenti con l'**ambiente esterno** (campi di interazione) modifica le loro proprietà di emissione (rateo di emissione, lunghezza d'onda, ...)

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

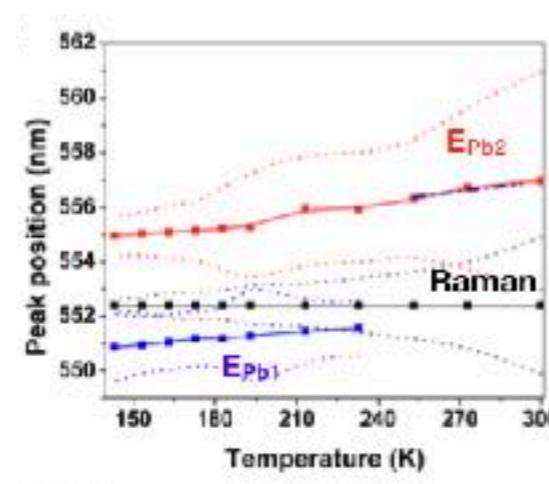


Campi Magnetici

Modulazione nell'emissione del complesso azoto-vacanza

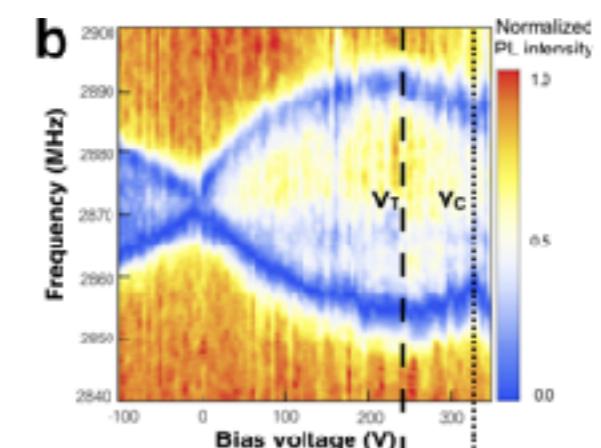
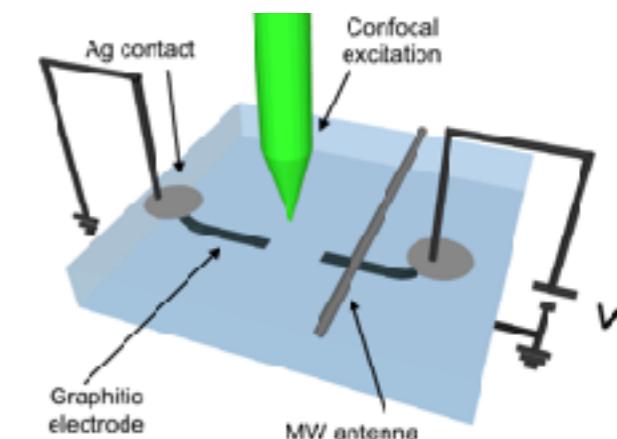


Temperatura

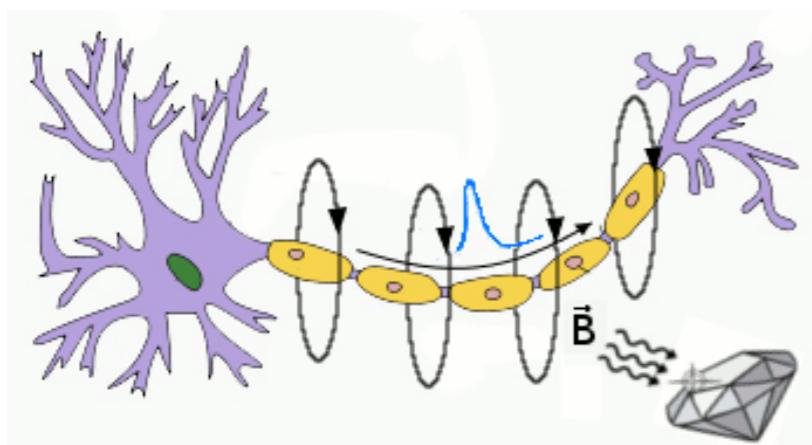


Shift nella lunghezza d'onda di emissione di centri a base Pb

Campi elettrici



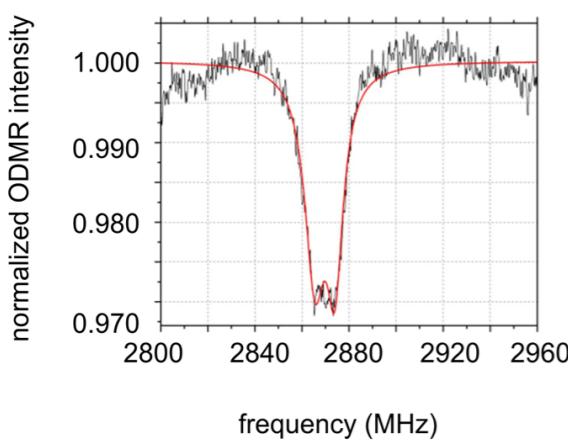
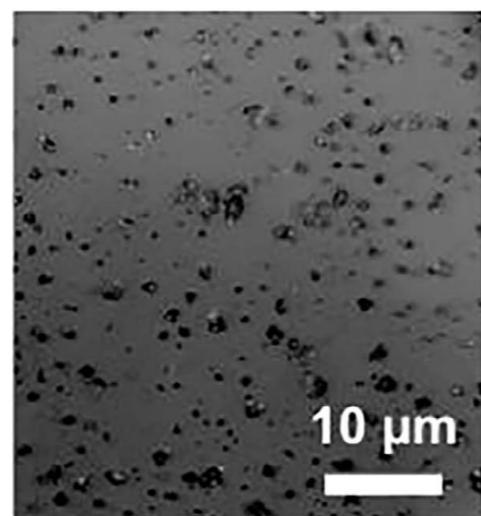
Sensori cellulari quantistici



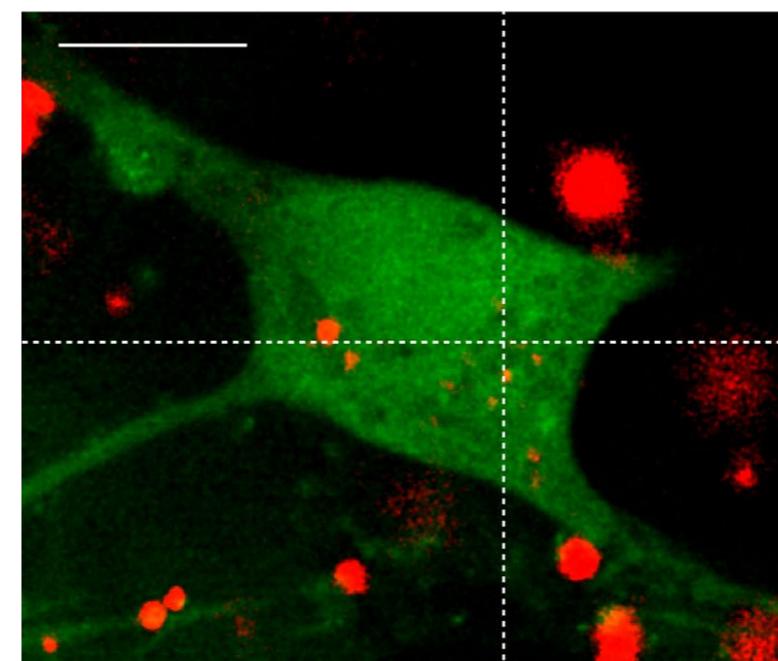
Gli impulsi neuronali generano deboli campi magneti. Una classe di difetti in diamante ha il potenziale per rivelarli



Dispersione su vetrino
Analisi e selezione dei
nano-cristalli



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



Internalizzazione
cellule neuronali di una
coltura (ippocampo di
topo)

cfr. **Dr. Federico Picollo**

Grazie per la vostra attenzione



Contatti jacopo.forneris@unito.it

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