

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

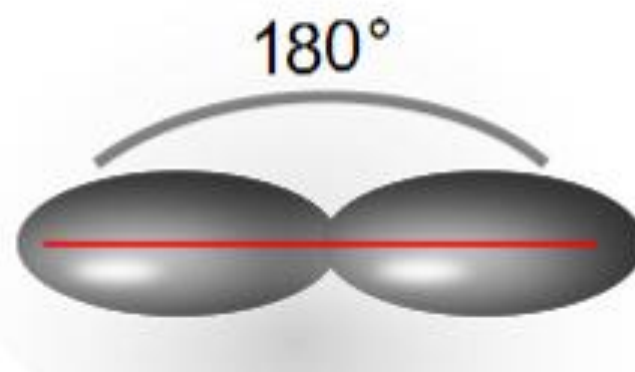
Jacopo Forneris

Il carbonio

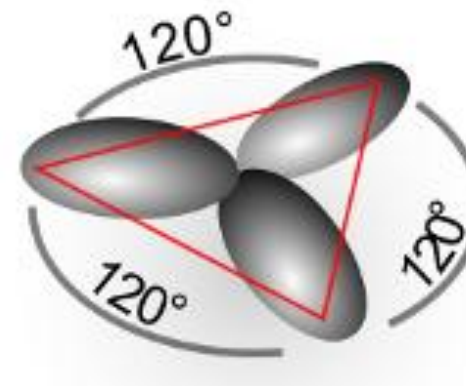
Periodic table showing the position of Carbon (C) in the periodic table. Carbon is located in Group 14, Period 2. The table is color-coded: yellow for metals, light blue for metalloids, and pink for non-metals. A legend at the bottom left identifies the symbols for atomic number, symbol, name, and atomic weight. A legend at the bottom right identifies the colors for metals, metalloids, and non-metals.

6
C
Carbon
12.0107

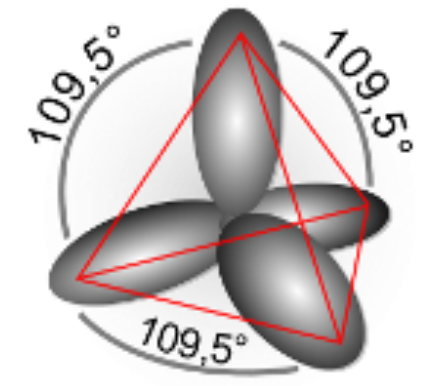
Tre tipi di orbitali ibridi



sp^1



sp^2



sp^3

Il carbonio

The image shows a standard periodic table of elements. Carbon (C) is highlighted with a blue box in the second period, group 14. The table includes element symbols, atomic numbers, and names. A legend at the bottom indicates that yellow boxes represent metals, light blue boxes represent metalloids, and pink boxes represent non-metals. Carbon is located at the intersection of the second row and the fourteenth column.

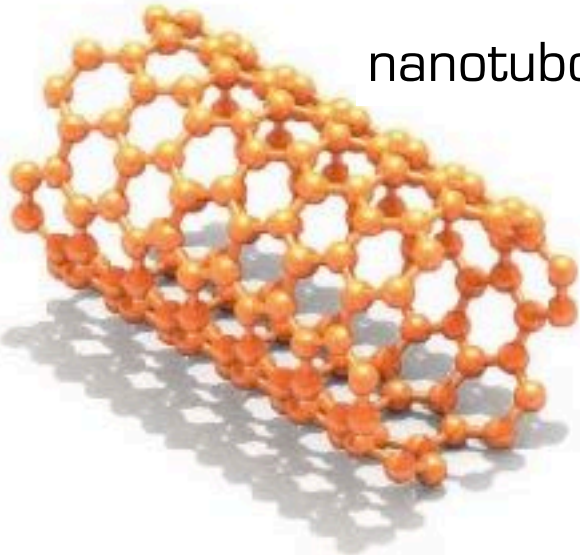
6

C

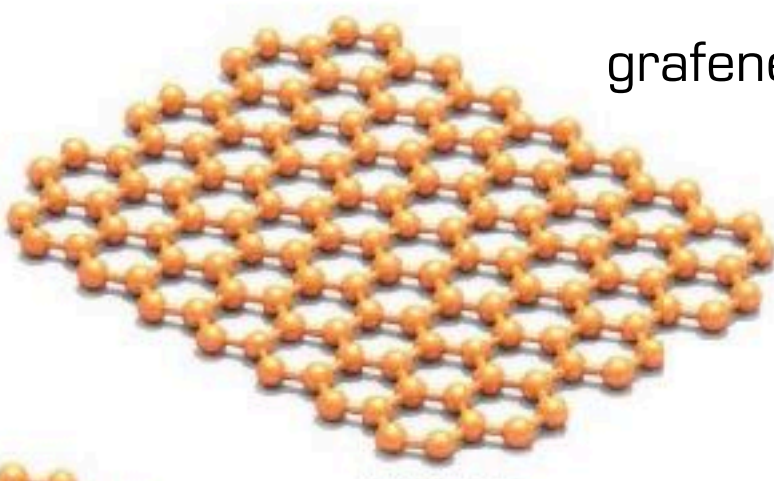
Carbon

12.0107

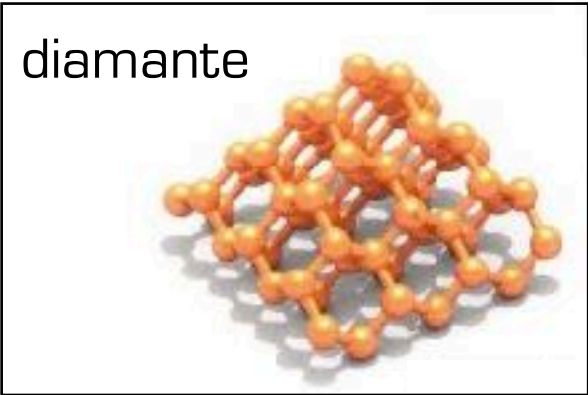
Numerose forme allotropiche:
differenti strutture a partire dalla
stessa specie chimica



nanotubo



grafene



diamante



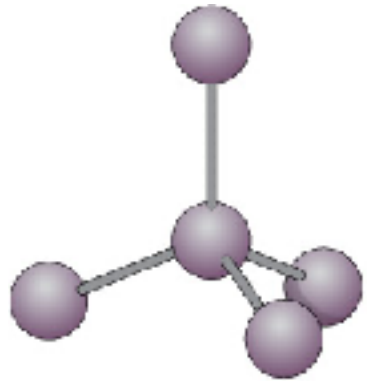
grafite



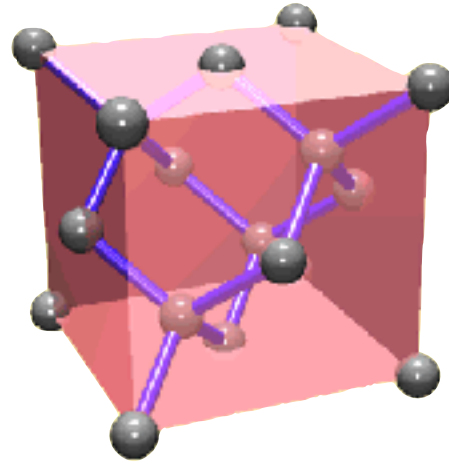
fullerene

Diamante

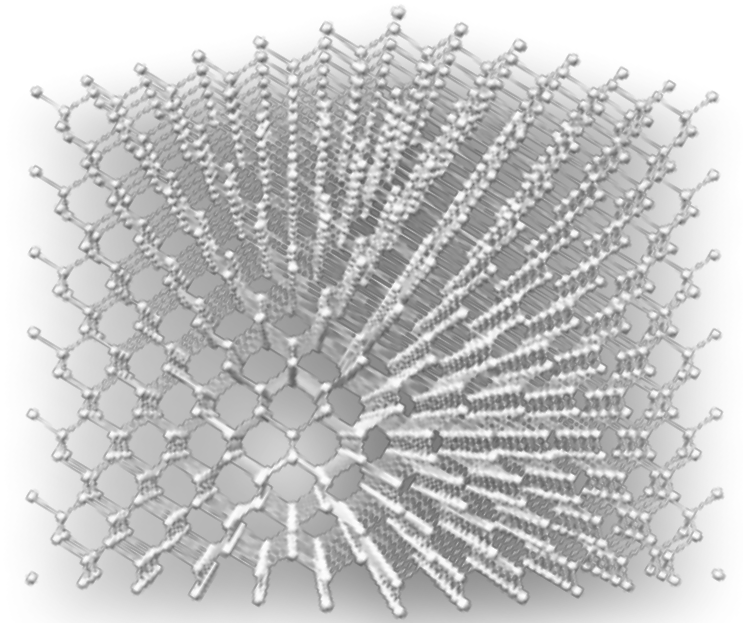
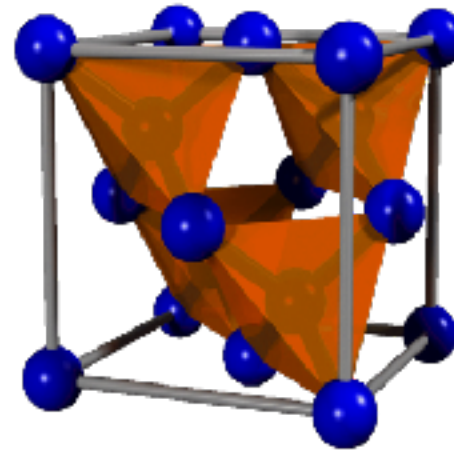
αδάμας (indistruttibile)



legami covalenti con
disposizione tetraedrica



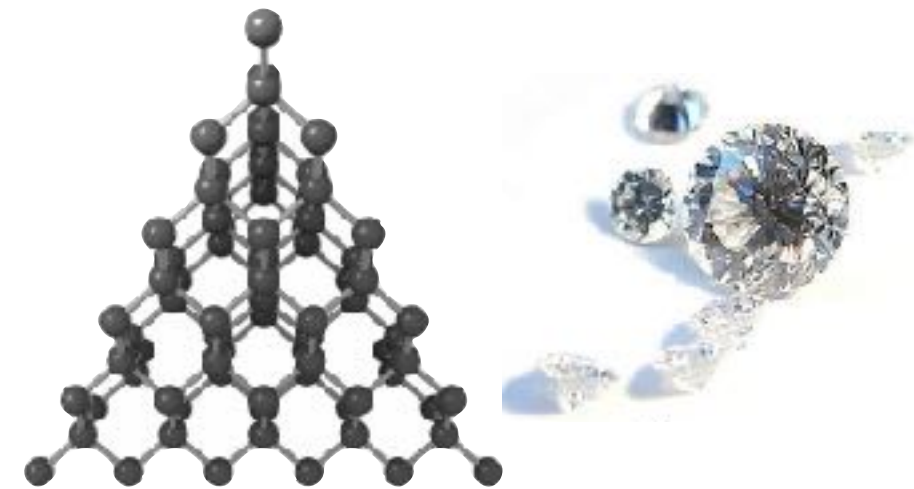
unità fondamentale di cristallo



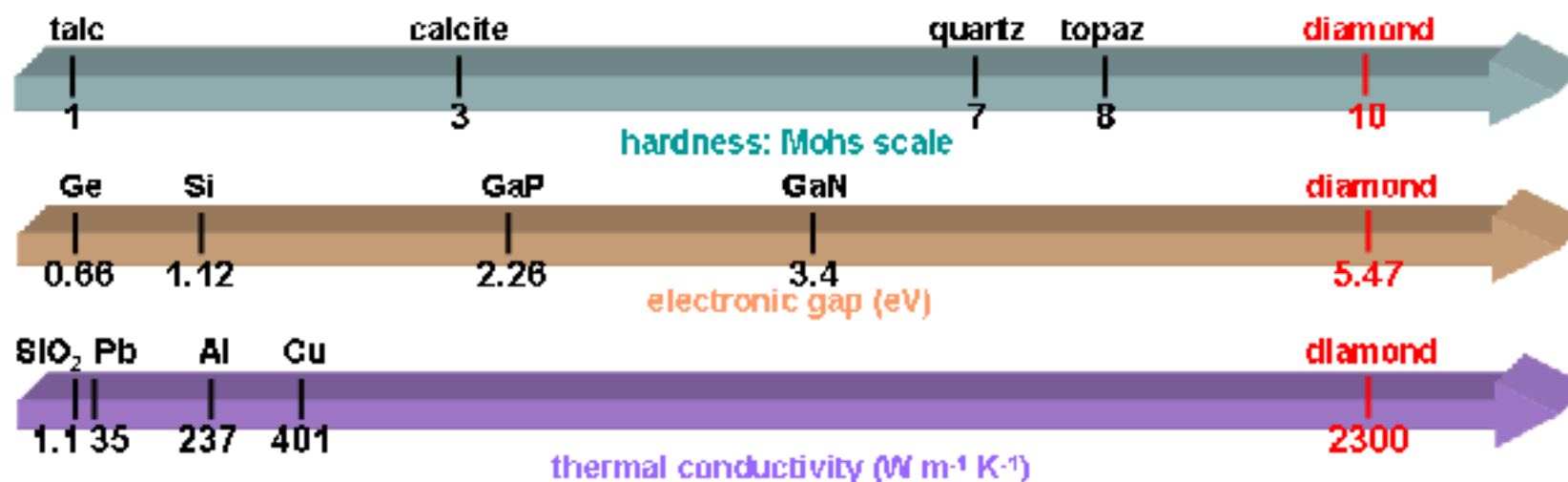
struttura periodica

Struttura cristallina

Tetraedro: struttura rigida, forti legami chimici



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**

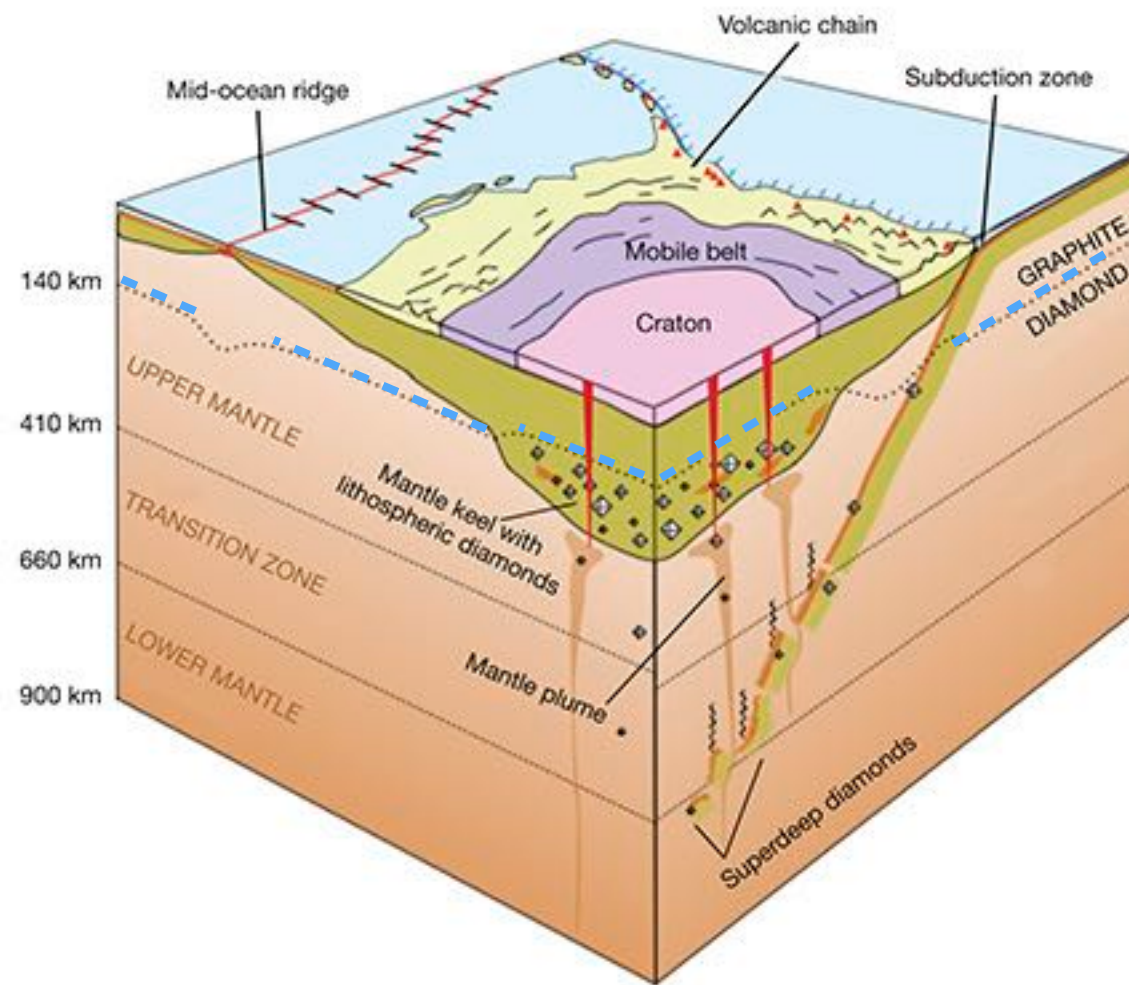
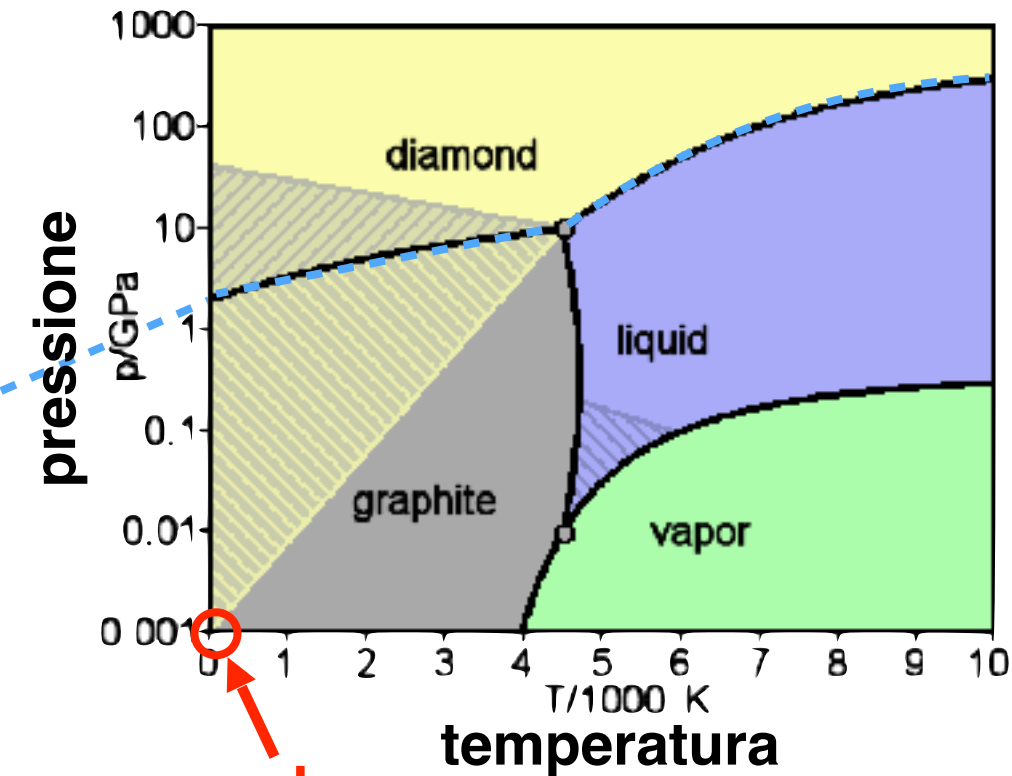


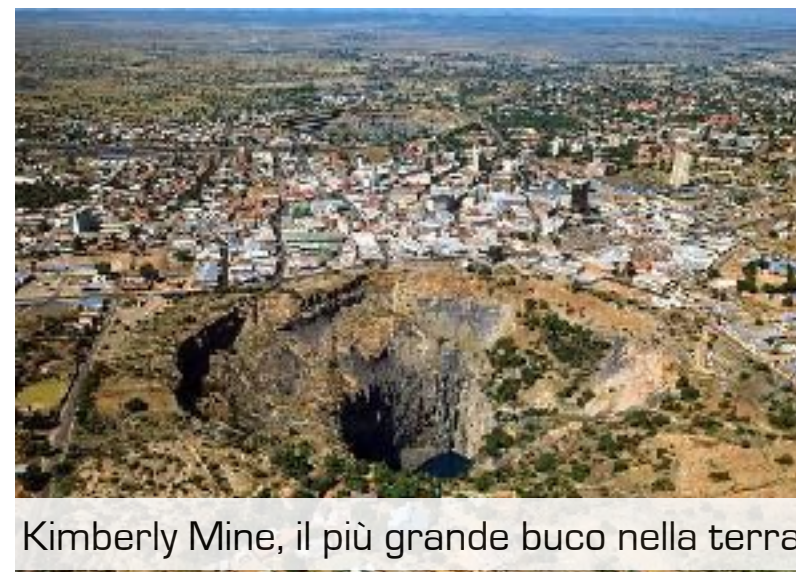
diagramma di fase del carbonio



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)



Kimberly Mine, il più grande buco nella terra



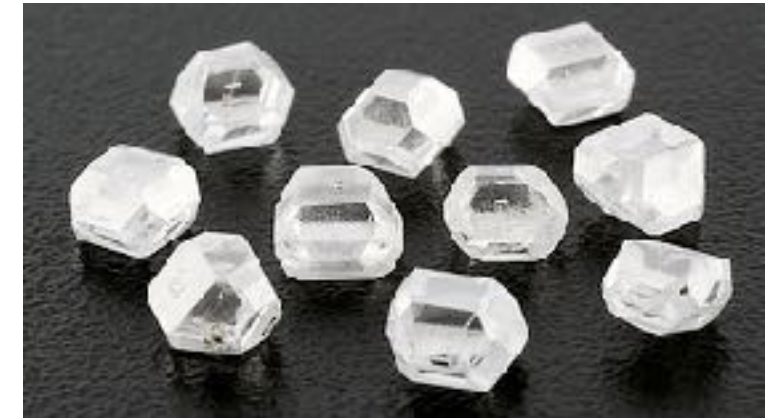
Il diamante sintetico

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



Pressa per la sintesi @ Kobelco, anni '80
Temperatura: 3000 °C, Pressione. 3.5 GPa



Il diamante sintetico

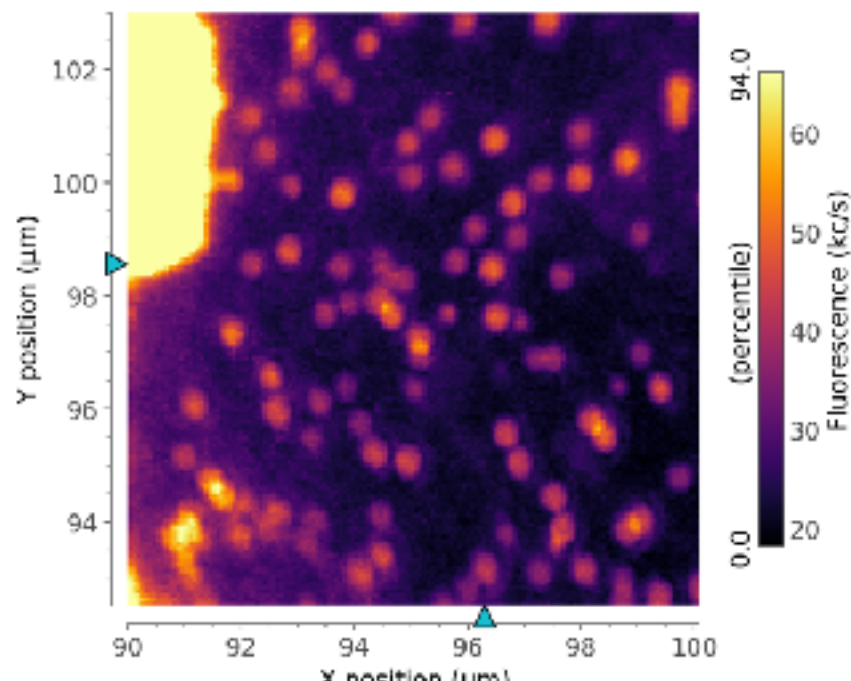
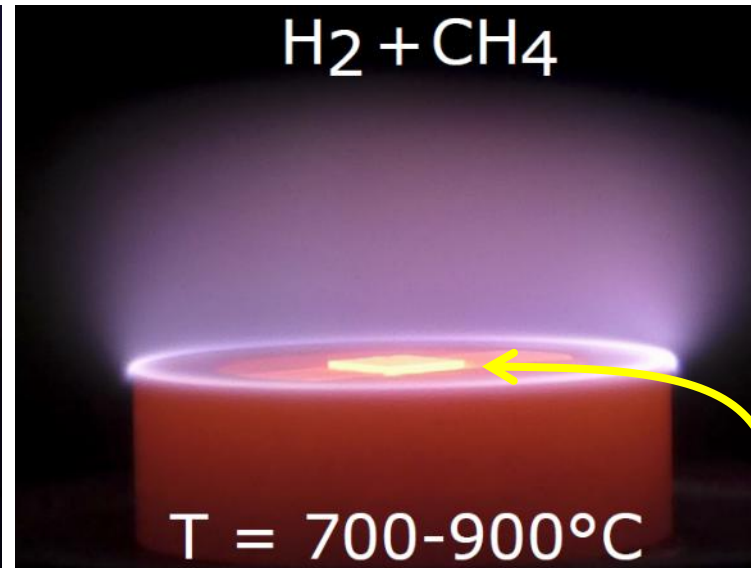
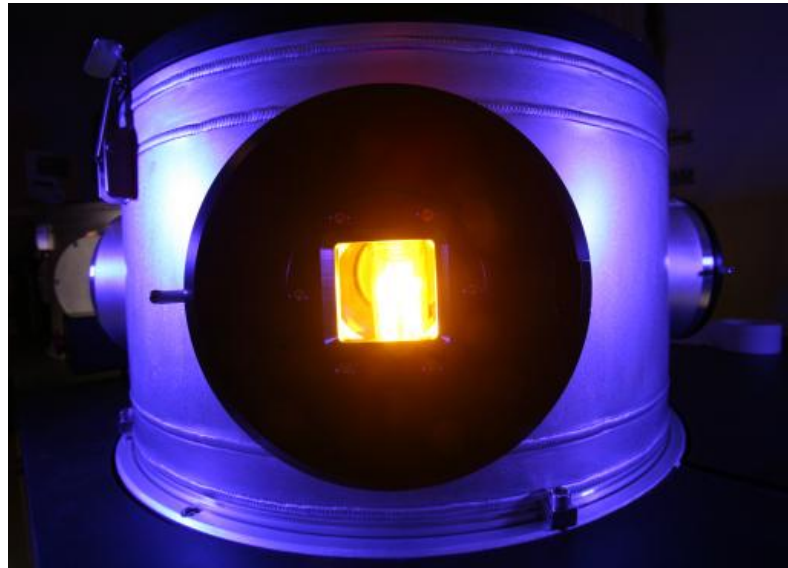
L'uomo imita la natura ...

➔ 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

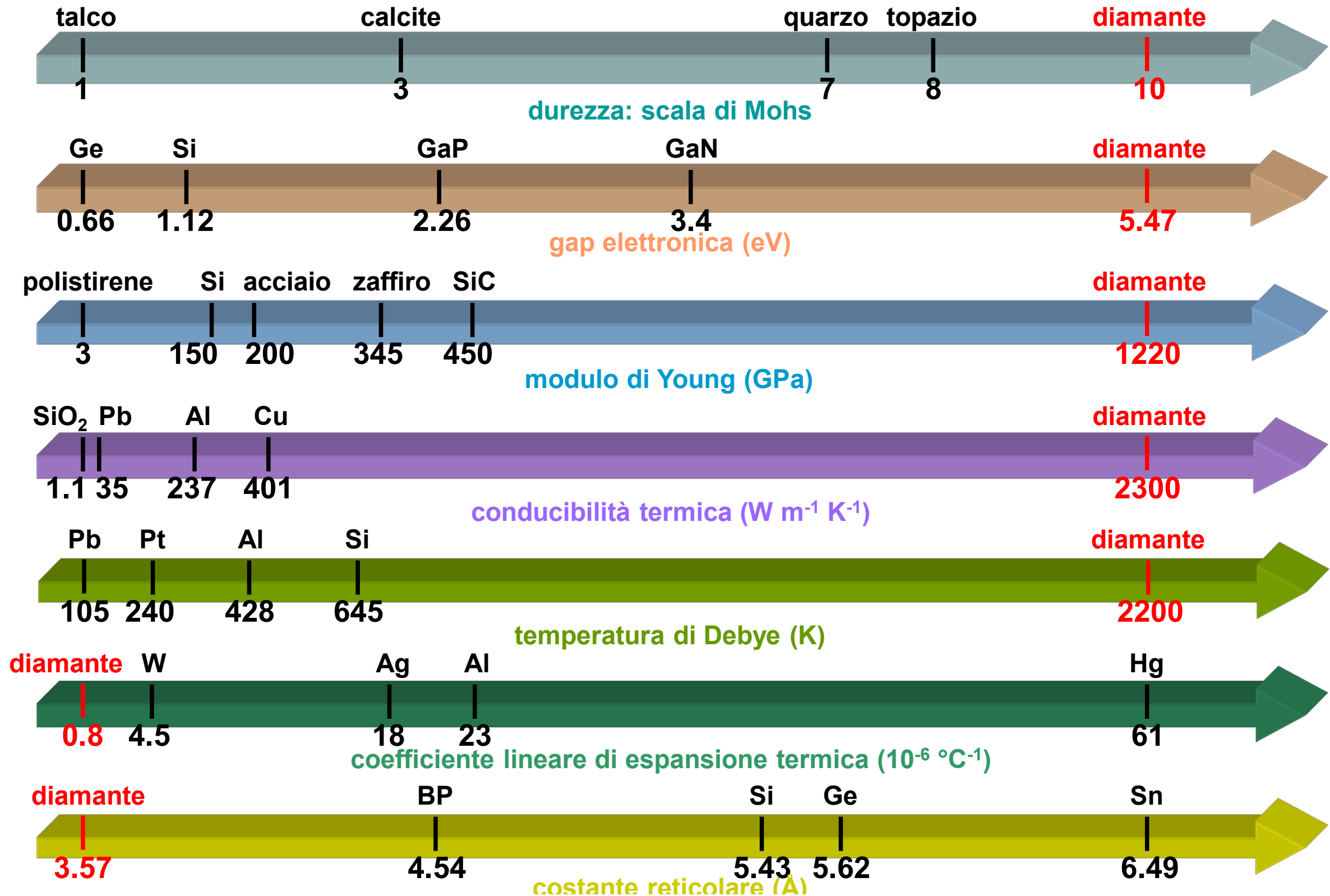
...e la supera!

➔ 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

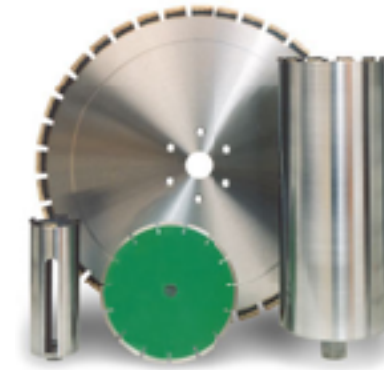
Inerzia chimica

Bio-compatibilità

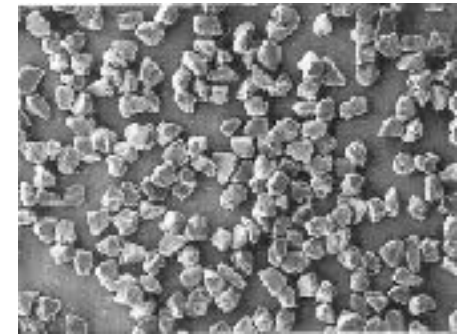
Funzionalizzabilità chimica della superficie

Trasparenza ottica dal vicino UV al lontano IR

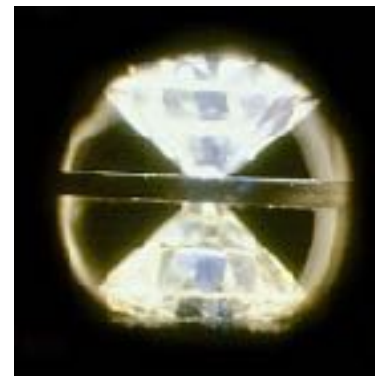
Difetti otticamente attivi nella band-gap



strumenti da taglio



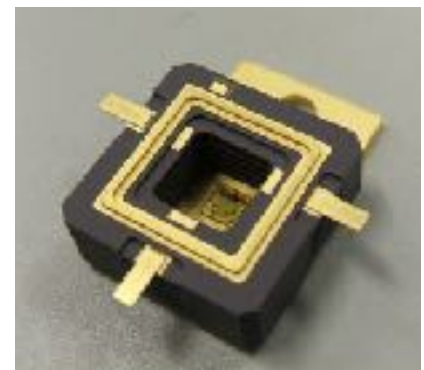
polveri abrasive



presse meccaniche



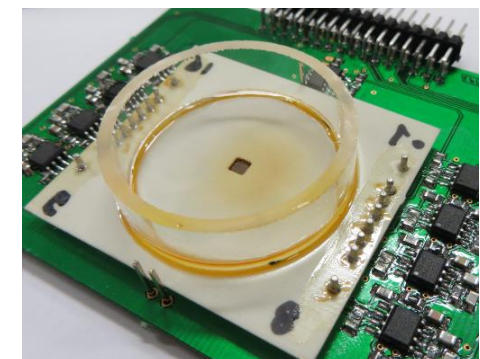
dissipatori termici



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:

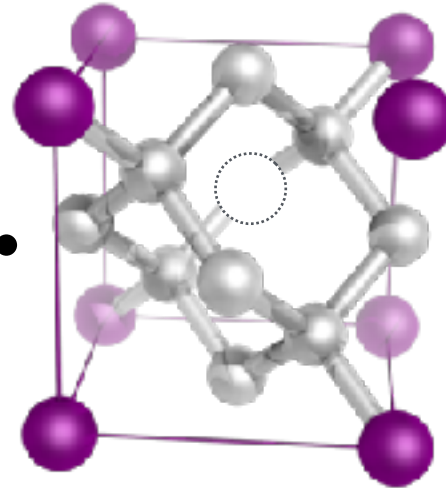
- **trasparenza**: elevata band gap ($E_g=5.5$ eV)
- **brillantezza**: elevato indice di rifrazione ($n=2.4$)
- variabilità di **colorazione**: presenza di **impurezze** nel reticolo cristallino (B, N, ...)



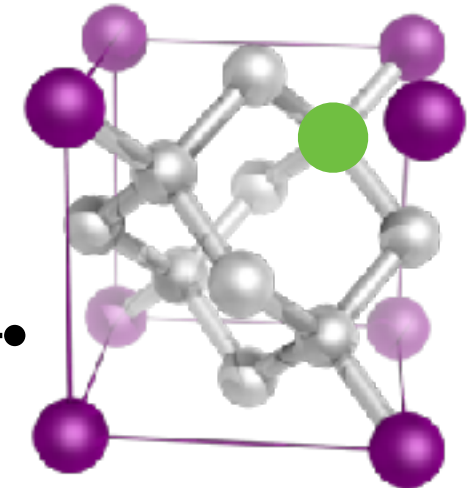
Difetti reticolari in diamante

Difetti reticolari nel cristallo:

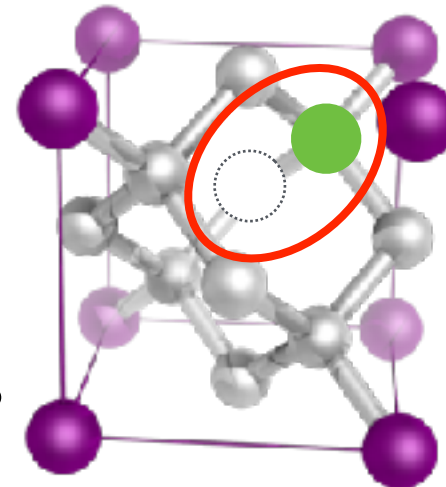
- **vacanze:** assenza di atomi nel sito.....●



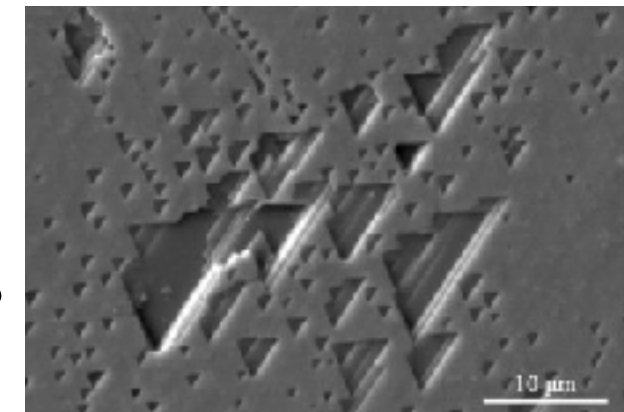
- **impurità sostituzionali**.....●



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



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



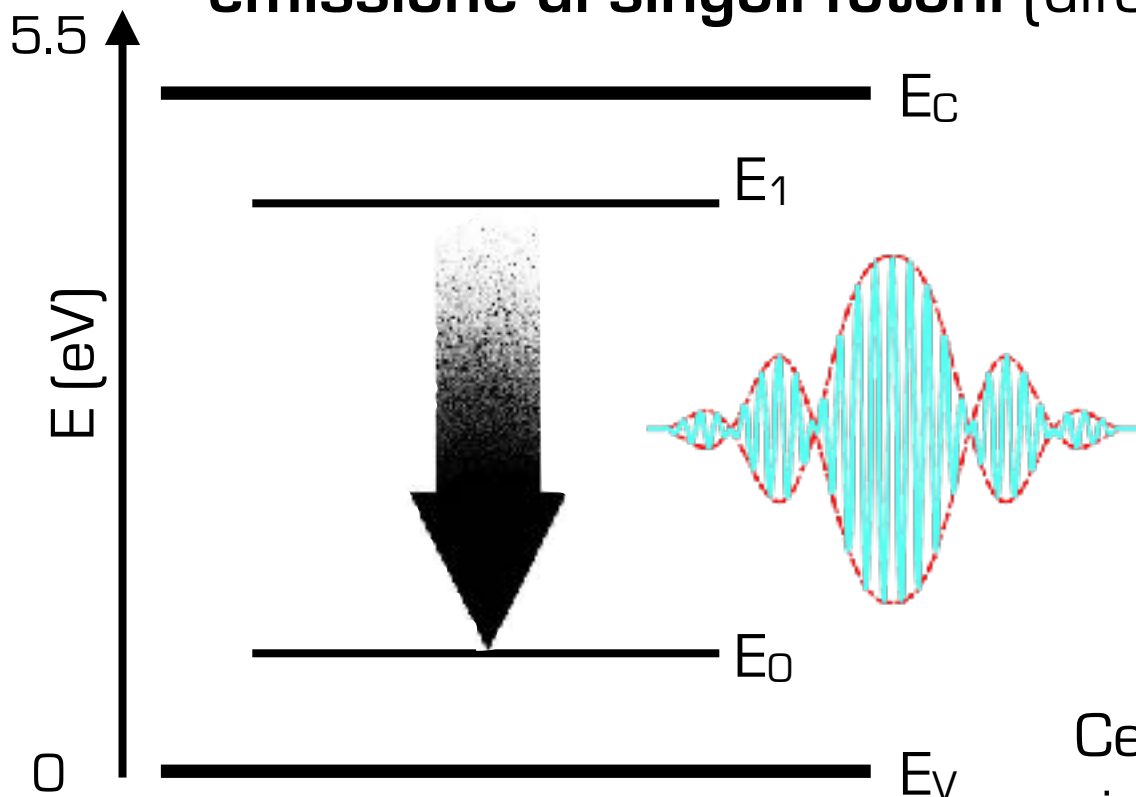
Centri di colore in diamante

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

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

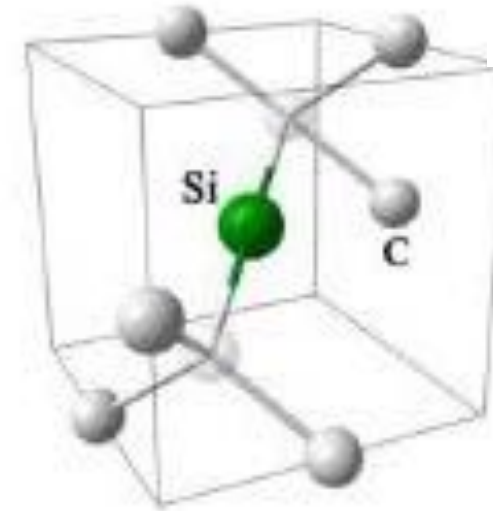
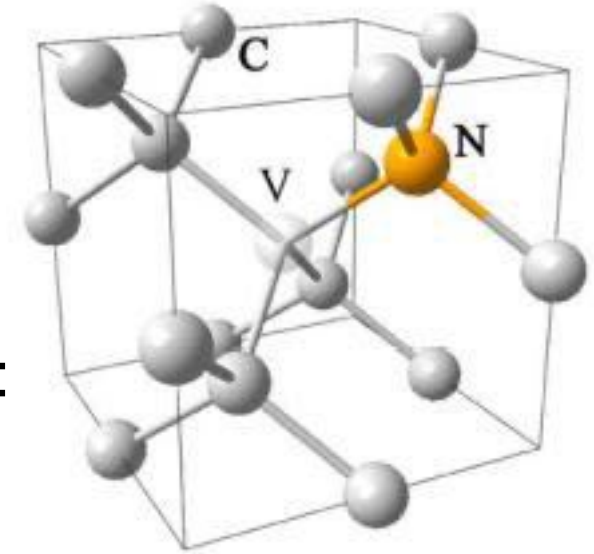
Molti centri sono caratterizzati da:

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

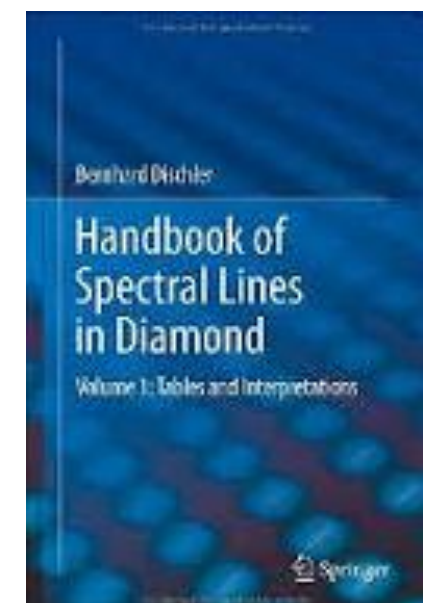
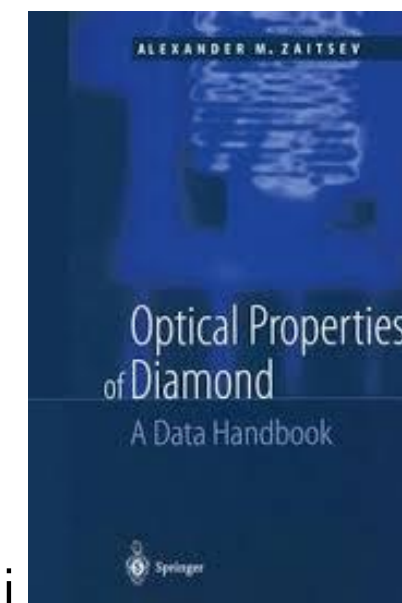


Centinaia di righe spettrali
riportate nella letteratura scientifica

complesso azoto-vacanza



complesso silicio-divacanza



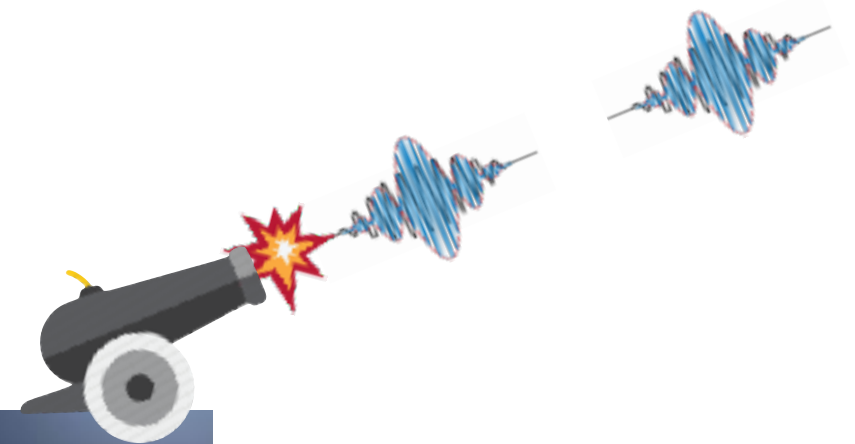
Sorgenti di singolo fotone

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

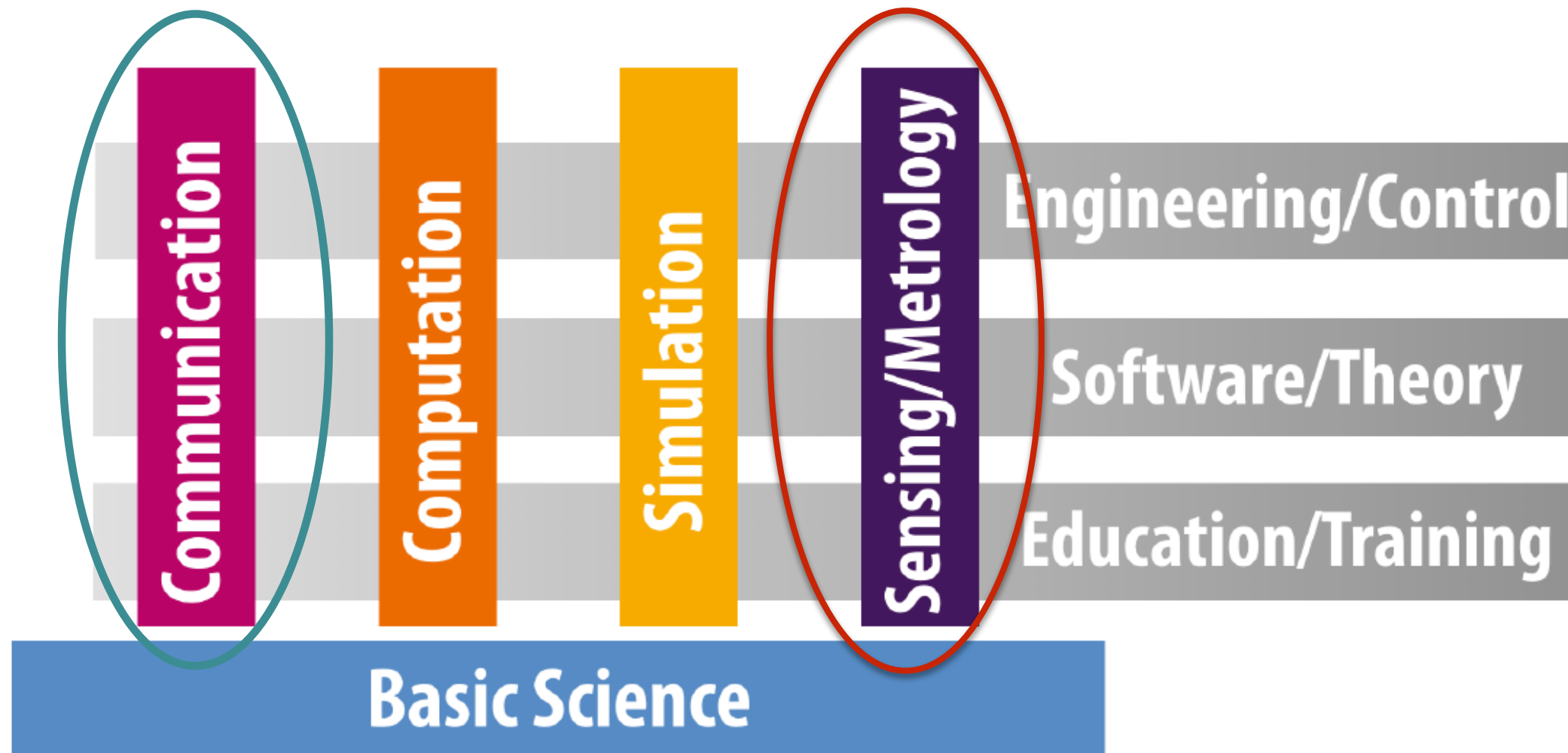
Centri di colore individuali: sorgenti di singolo fotone



Tecnologie quantistiche

Dal Quantum Technologies Flagship Final report (2017)

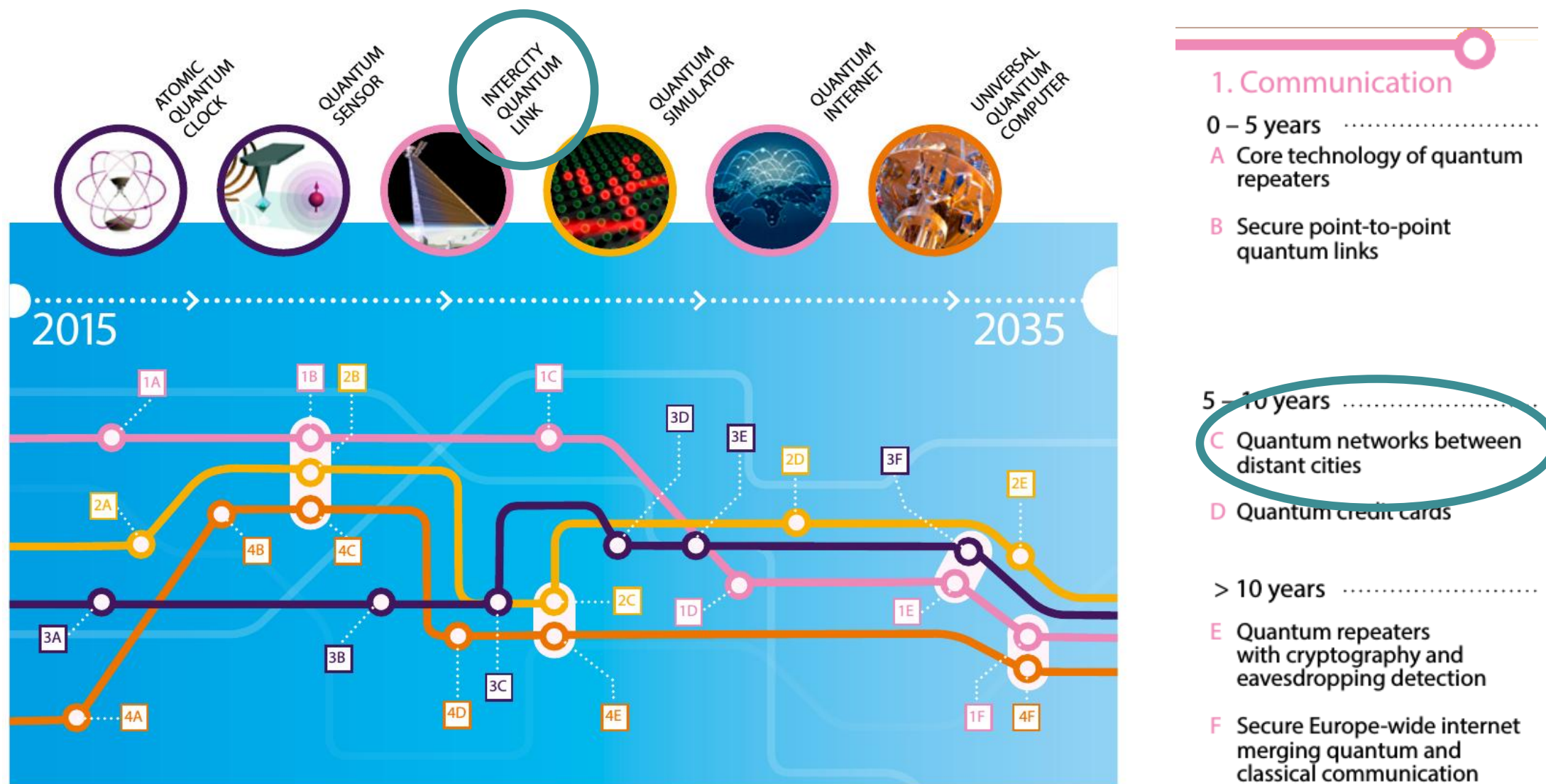
"The developments in the **leading domains of Quantum Technologies - Communication, Computation, Simulation, Sensing and Metrology** - can be expected to produce transformative applications with real practical impact on ordinary people"



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,

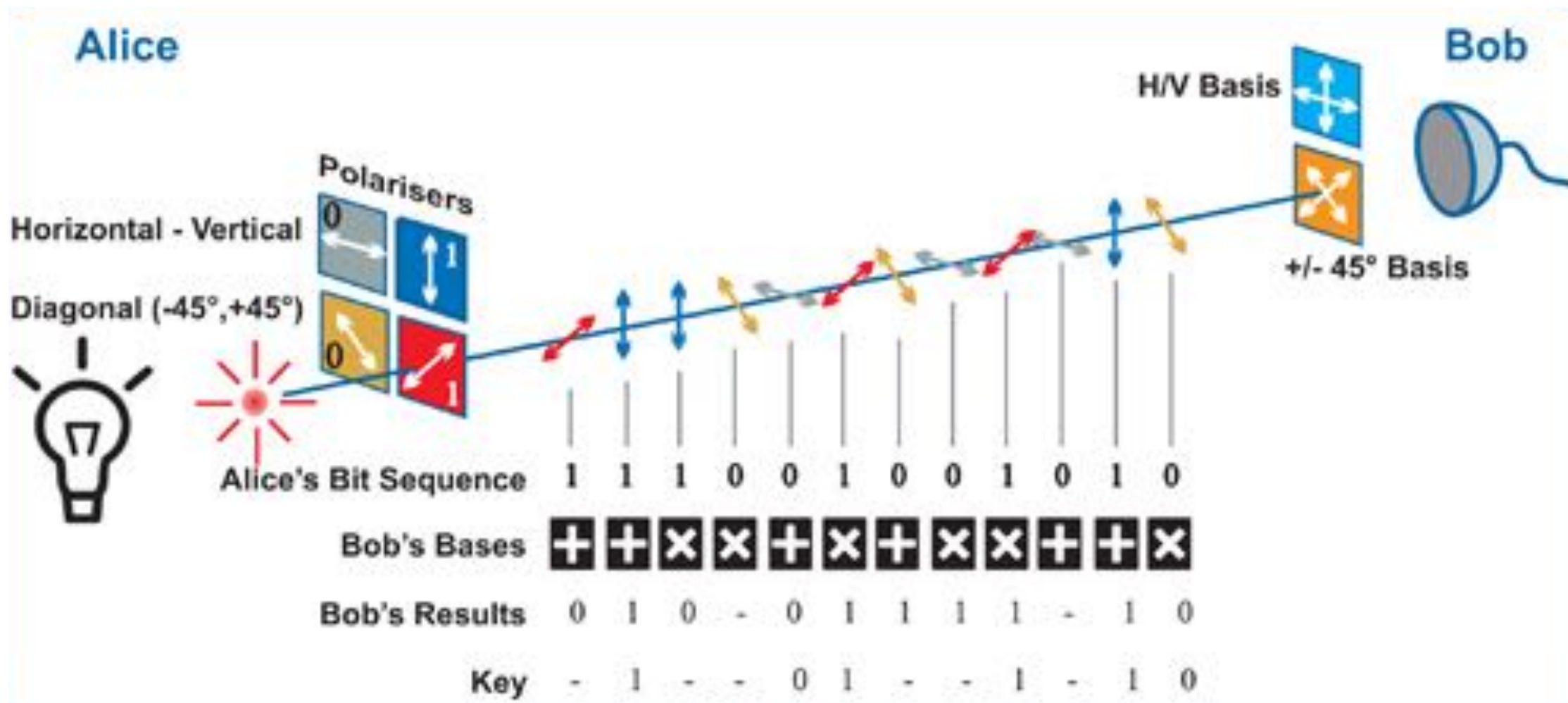
even when the users share no secret information initially. We also present a protocol for coin-tossing by exchange of quantum messages, which is secure against traditional kinds of cheating, even by an opponent with unlimited computing power, but ironically can be subverted by use of a still subtler 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	0	0	1
Random sending bases.....	D	R	D	R	R	R	R	R	D	D	R	D	D	D	R
Photons Alice sends.....	↕	↖	↗	↕	↕	↔	↔	↔	↖	↗	↕	↖	↗	↗	↕
Random receiving bases.....	R	D	D	R	R	D	D	R	D	R	D	D	D	D	R
Bits as received by Bob.....	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	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	
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



$$\nearrow = \frac{\updownarrow + \leftrightarrow}{\sqrt{2}}$$

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

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

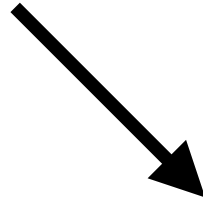
Attività di ricerca @ UniTo

Sorgenti di singolo fotone

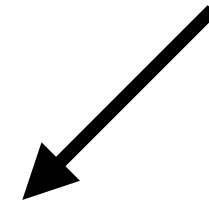
informazione codificata nelle **proprietà**
(energia, polarizzazione) dei fotoni emessi

Attività di ricerca @ UniTo

Caratterizzazione di classi di emettitori

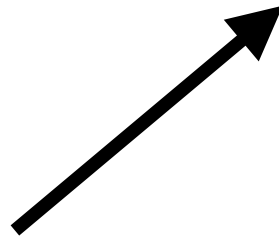


Fabbricazione di sorgenti

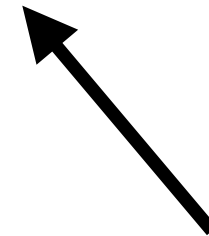


Sorgenti di singolo fotone
informazione codificata nelle **proprietà**
(energia, polarizzazione) dei fotoni emessi

**Interazione con
l'ambiente esterno**

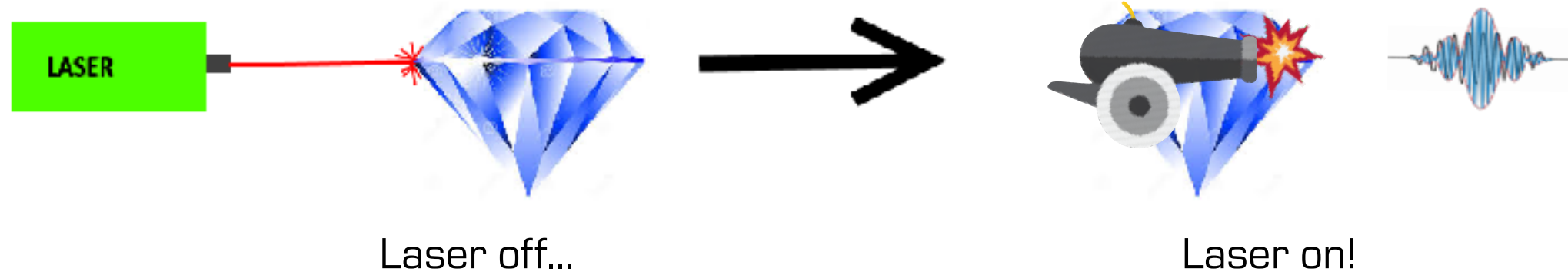


**Integrabilità con la tecnologia
elettronica esistente**



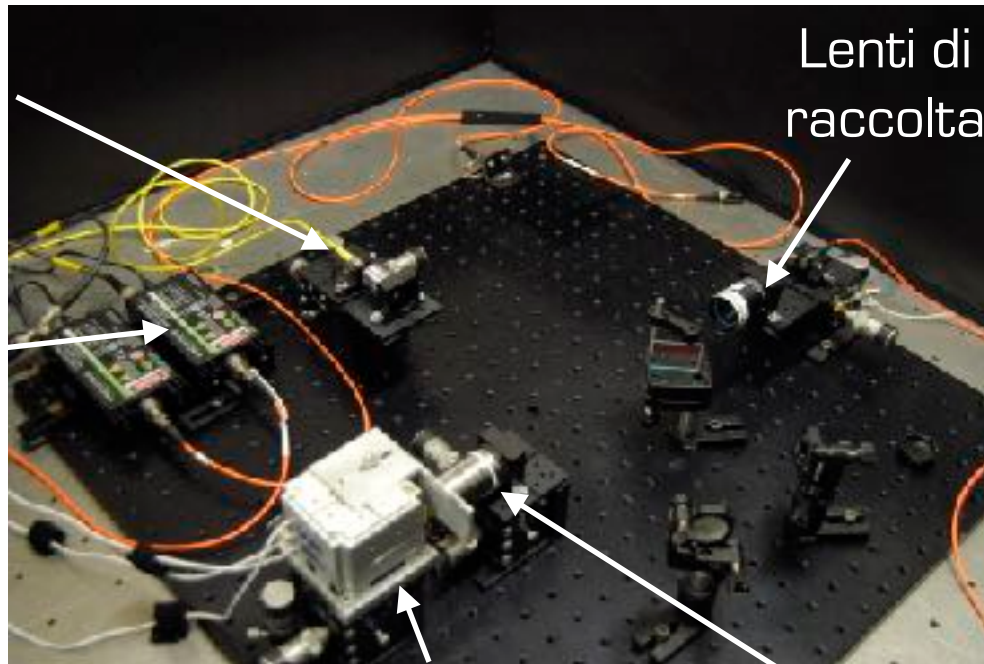
Caratterizzazione di centri di colore in diamante

Microscopia confocale



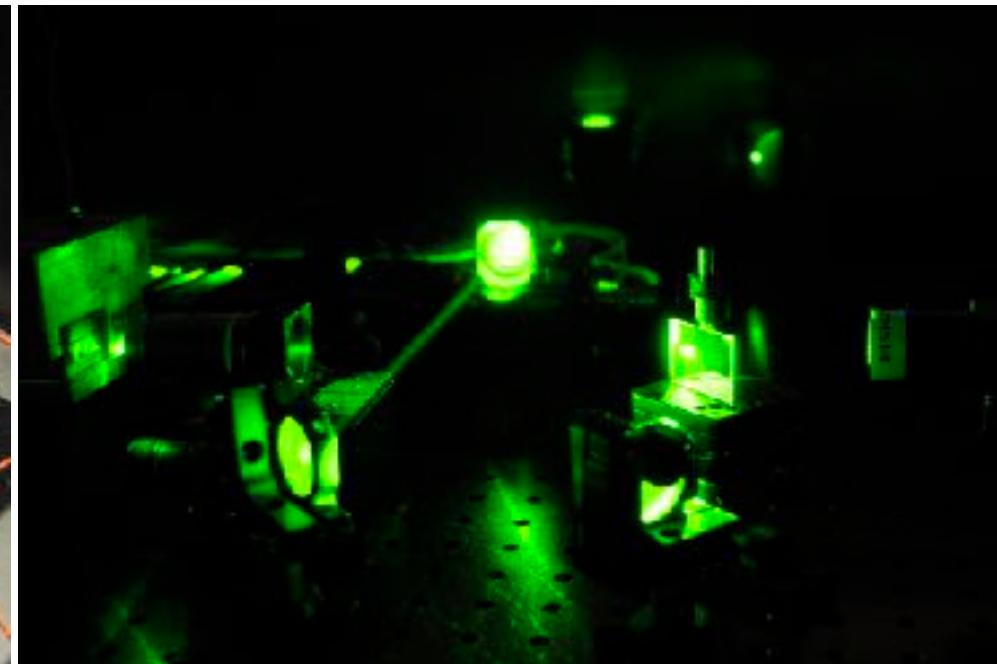
Sorgente laser

Rivelatori di singolo fotone



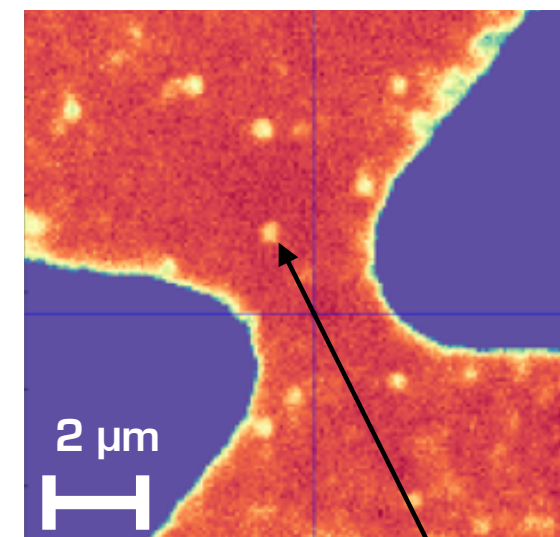
Movimentatore con risoluzione spaziale <10 nm

Obiettivo ottico



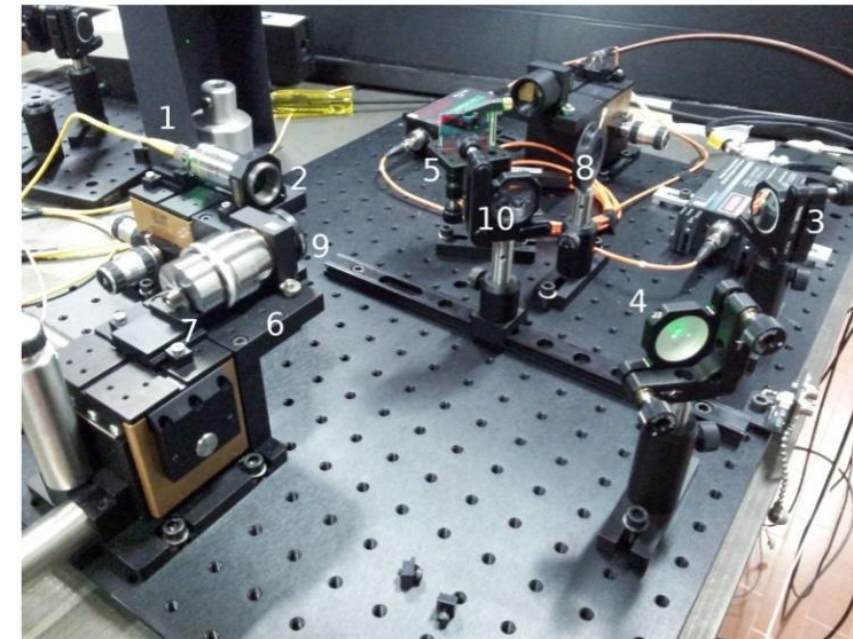
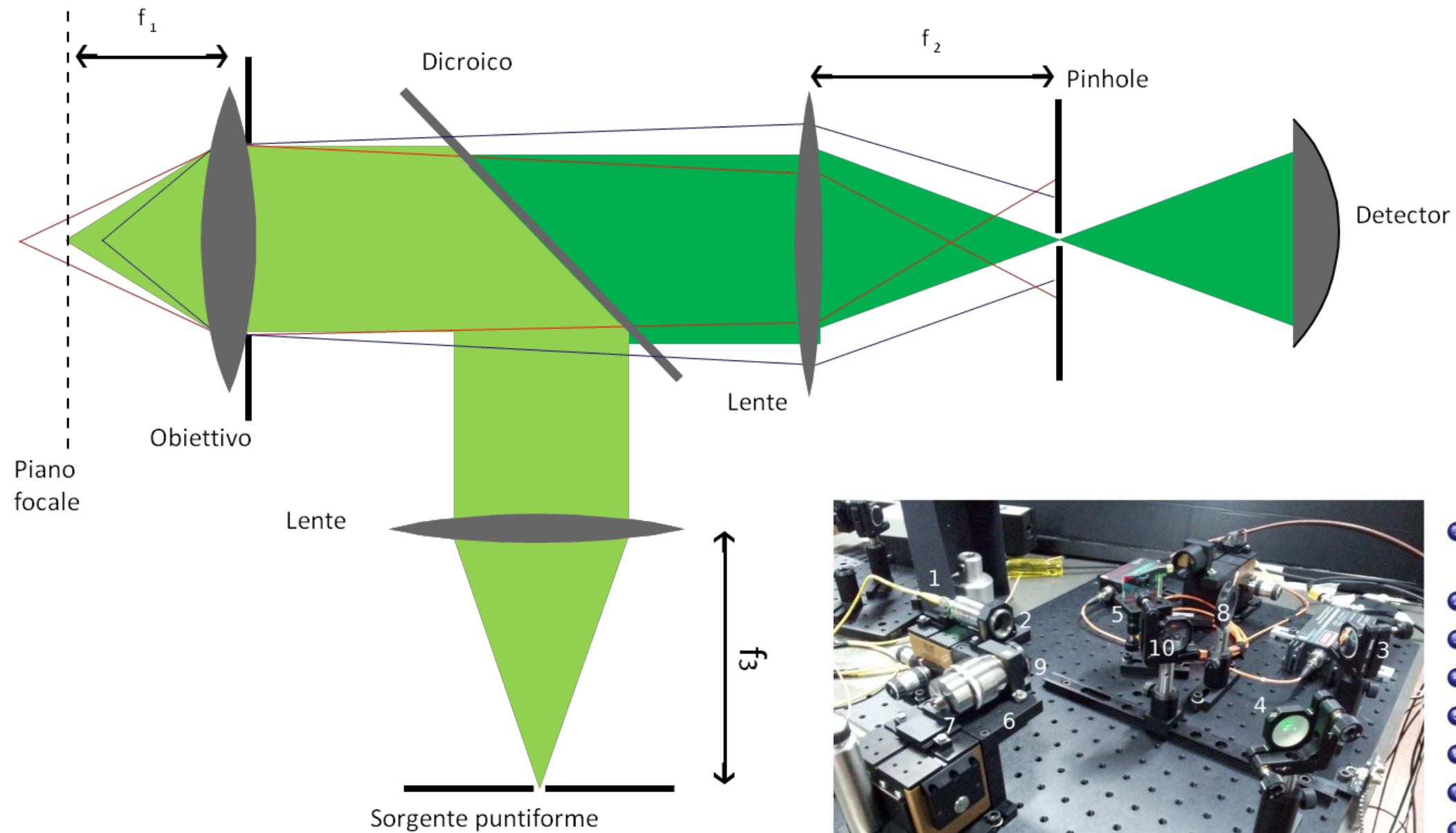
Obiettivo 100x: Eccitazione (laser) e raccolta puntuale

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



Caratterizzazione di centri di colore in diamante

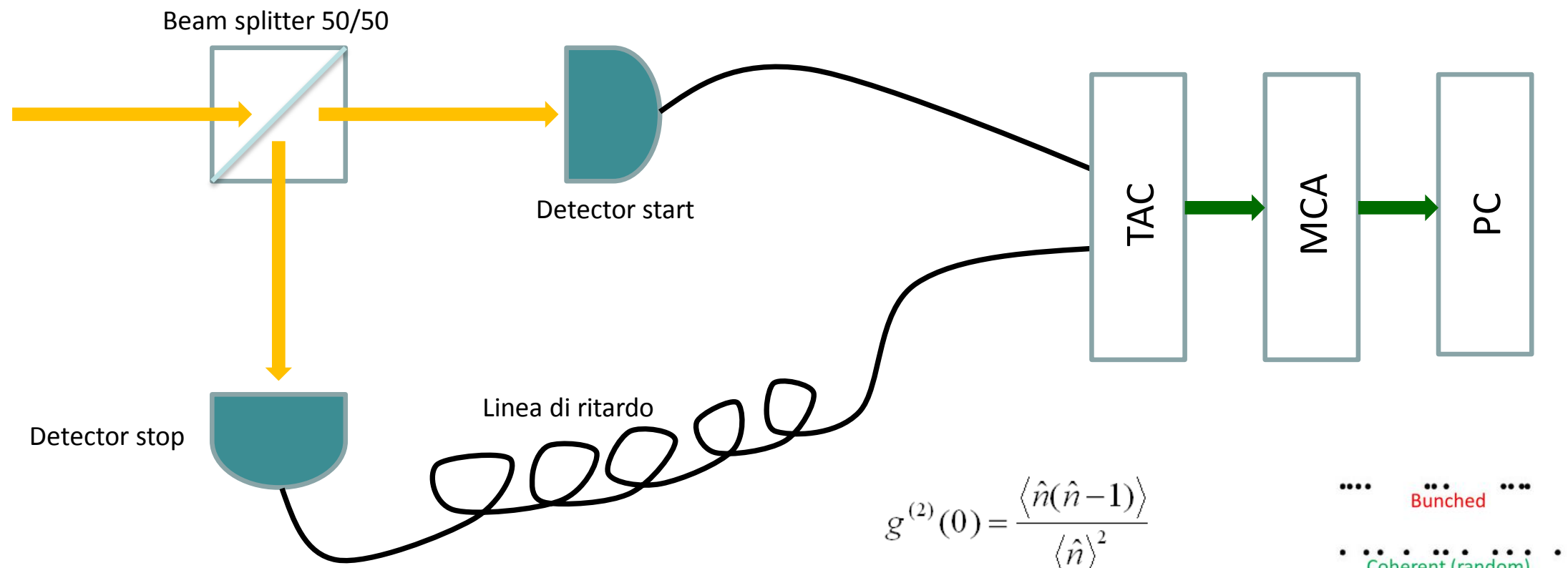
Microscopia confocale



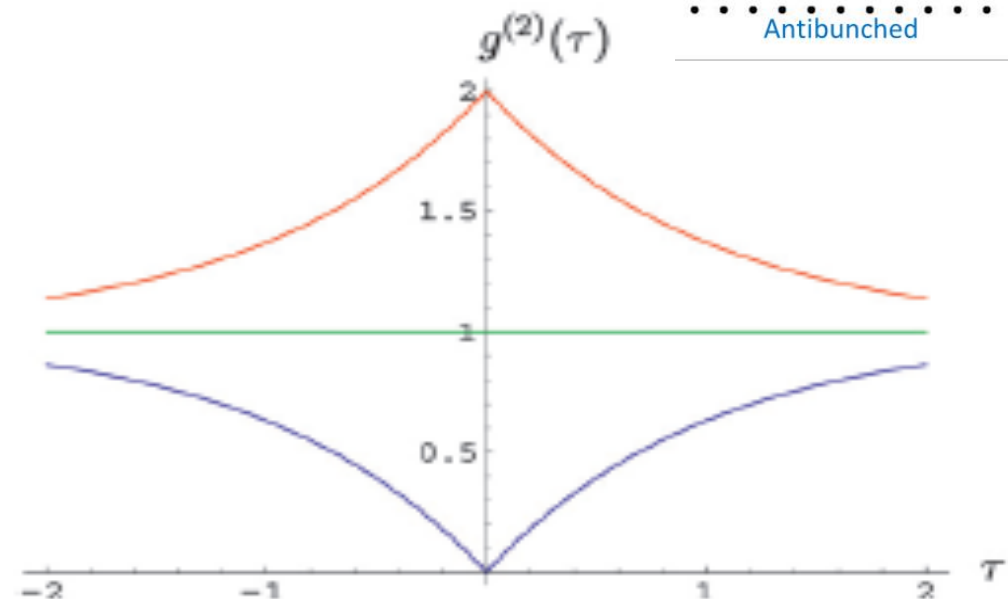
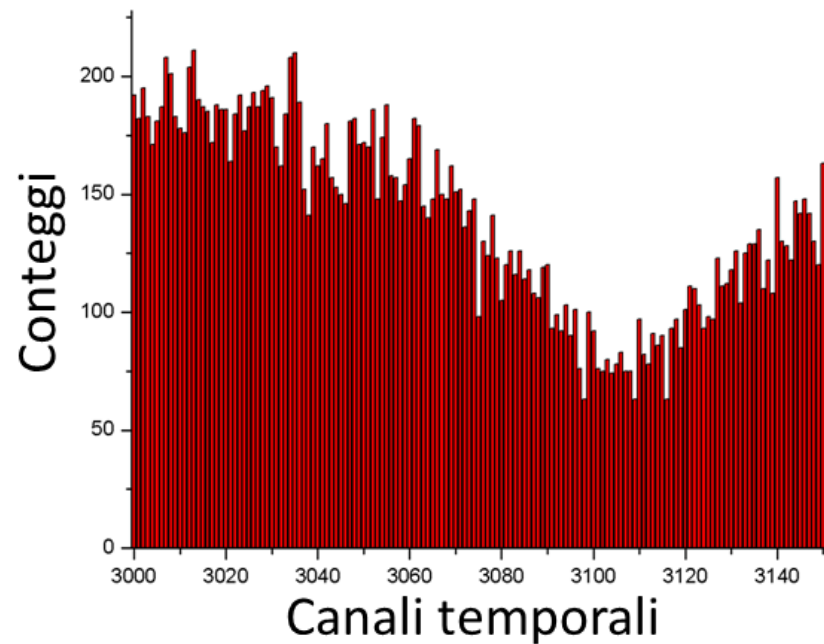
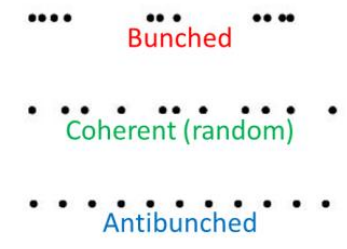
- 1 Fibra single mode
- 2 Obiettivo 4×
- 3 Specchio
- 4 Specchio
- 5 Dicroico
- 6 Piattaforma
- 7 Portacampioni
- 8 Iride
- 9 Obiettivo 100×
- 10 Beam splitter

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

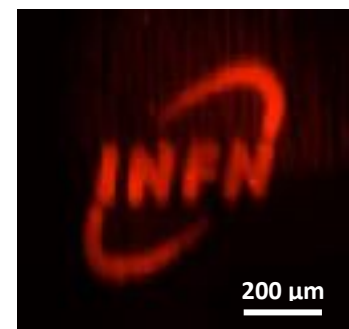
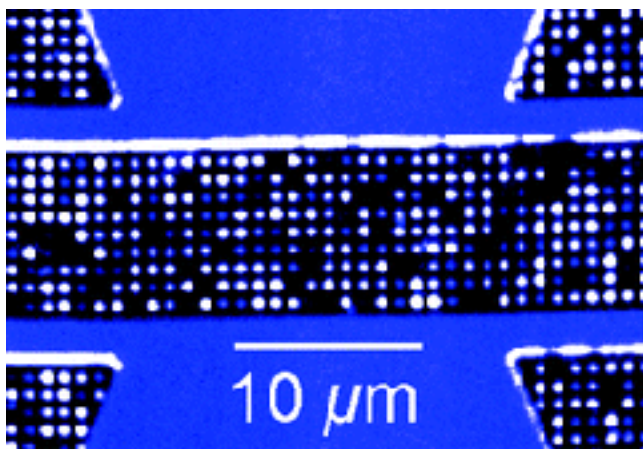
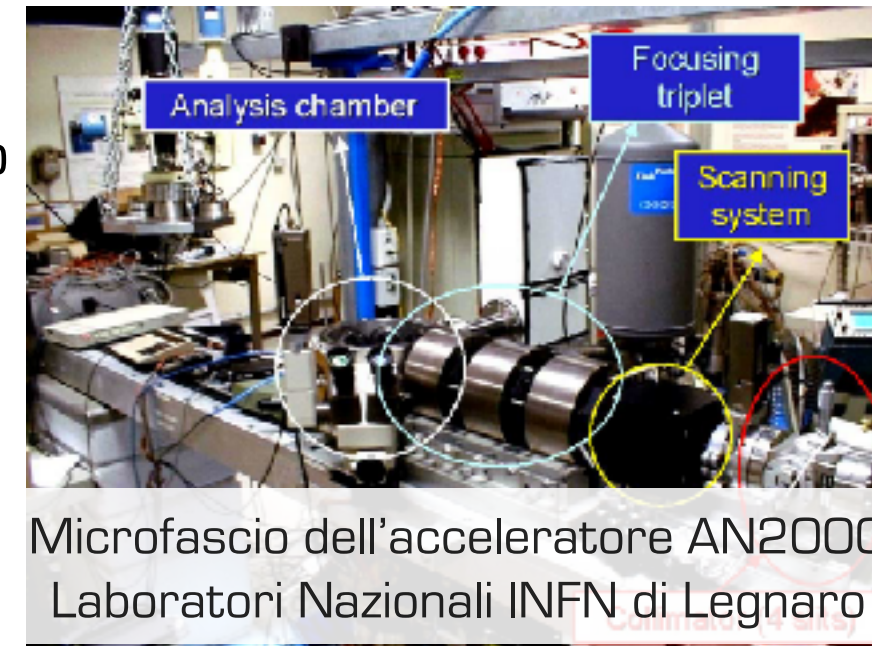
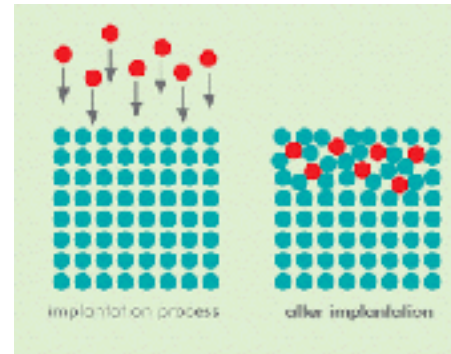
Complessi di tipo impurezza-vacanza:

- 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



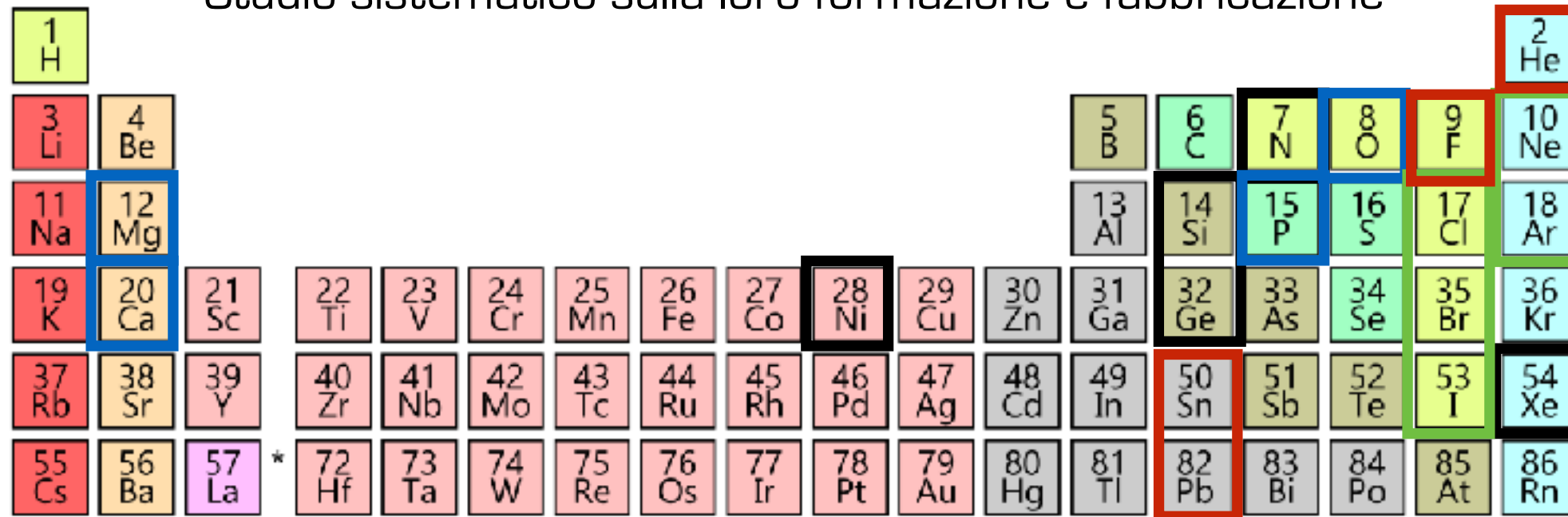
Sfide tecnologiche:

- Qual'è l'impurezza ottimale come sorgente?

Difetti luminescenti in diamante - 2019

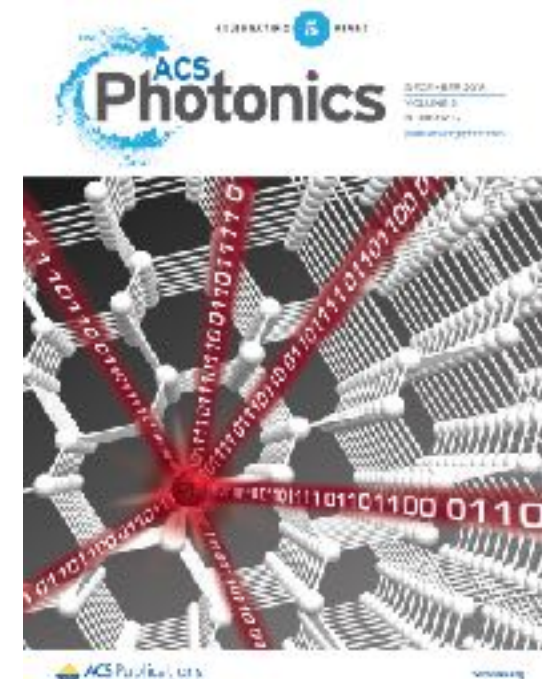
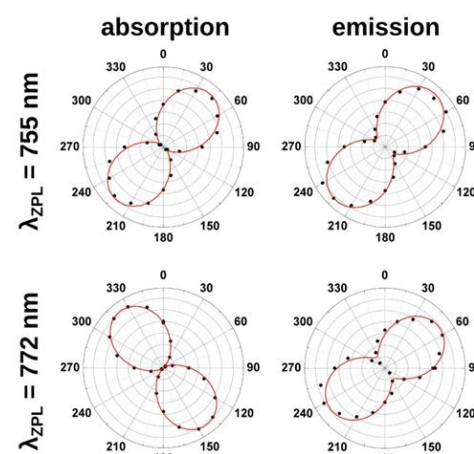
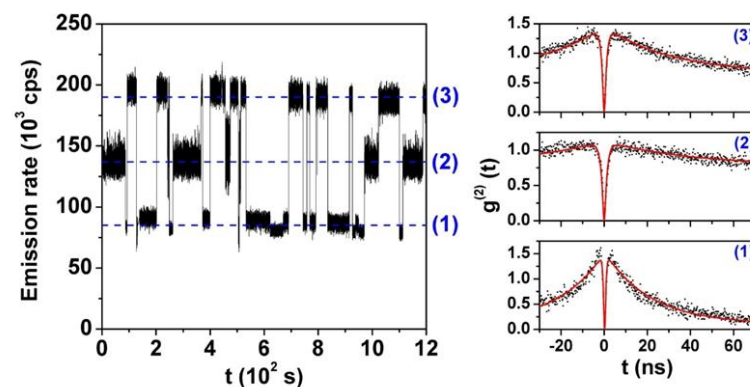
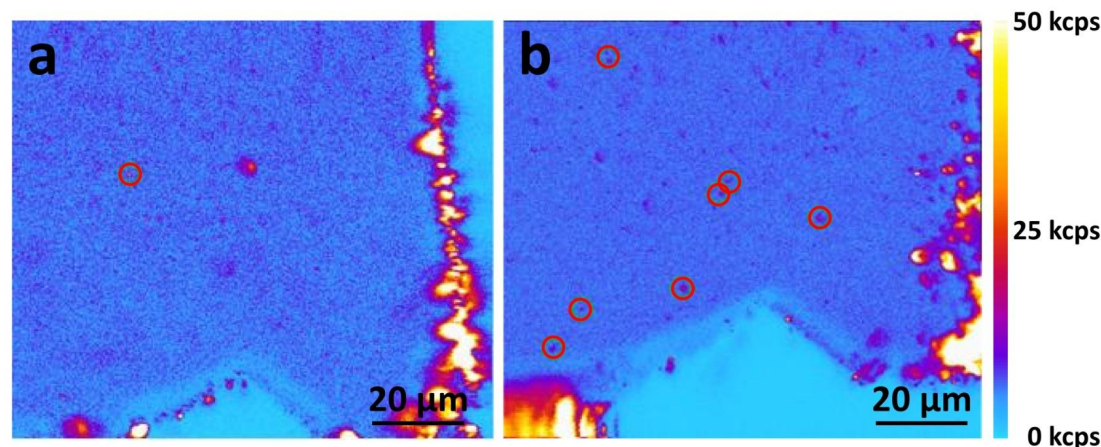
Qual'è l'impurezza ottimale come sorgente?

Studio sistematico sulla loro formazione e fabbricazione

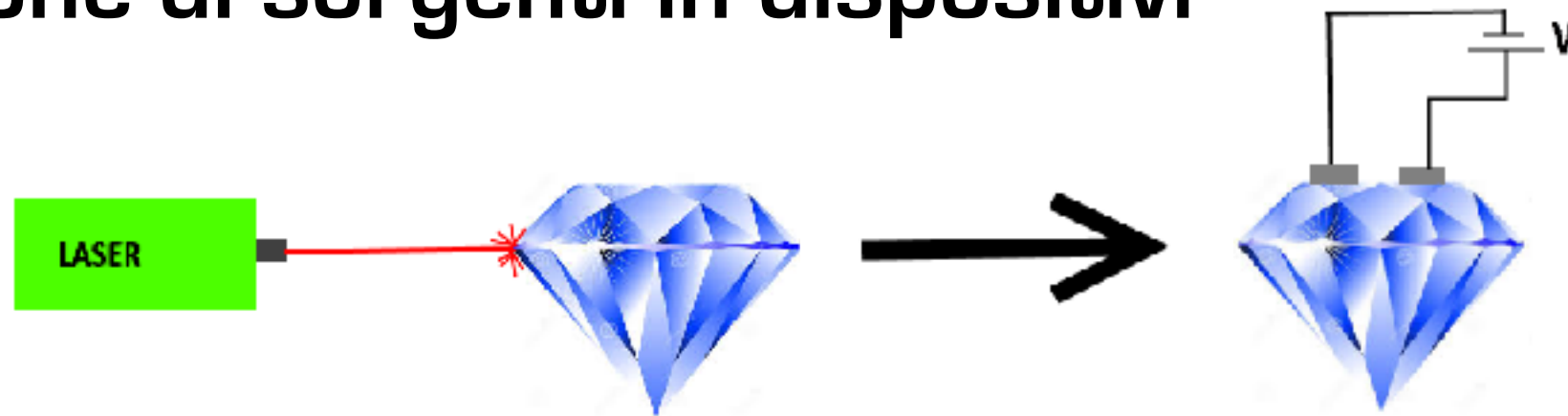


 **INFN/UNiTO**

■ In fase di studio



Integrazione di sorgenti in dispositivi



Eccitazione laser (fotoluminescenza): meccanismo ingombrante e complesso

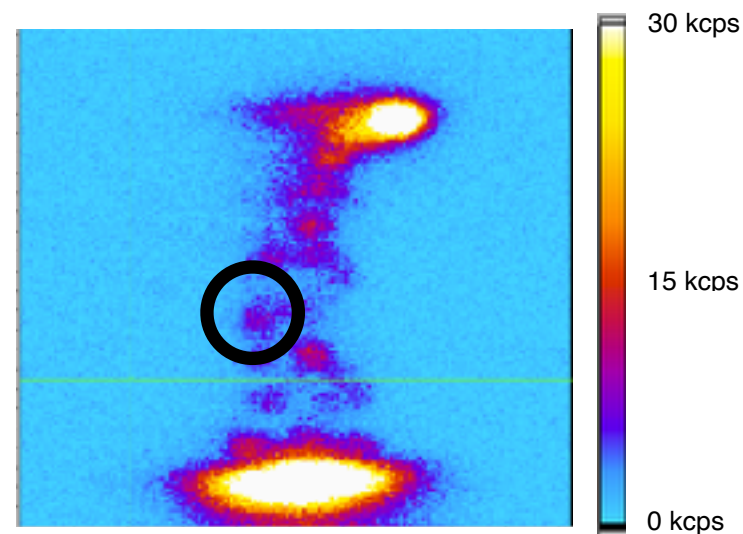
Eccitazione **elettrica** (elettroluminescenza): consente il controllo elettrico di sorgenti



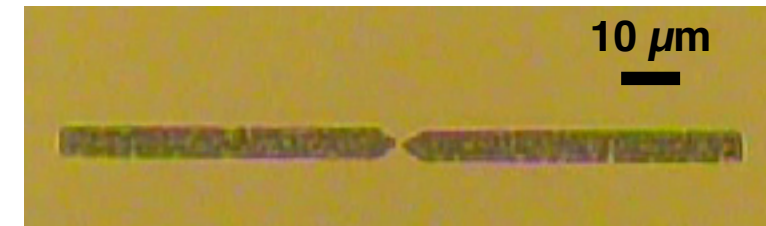
Micro-fabbricazione di elettrodi conduttivi in grafite mediante scrittura diretta con fasci di ioni MeV



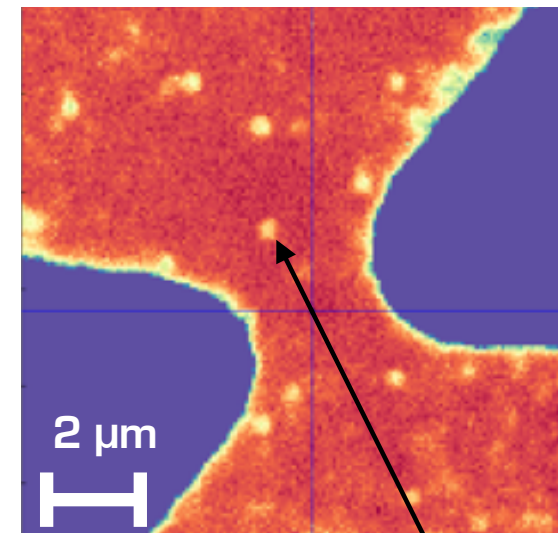
Elettroluminescenza da un insieme di difetti luminescenti (2014)



Elettroluminescenza da sorgenti di singolo fotone (2015)



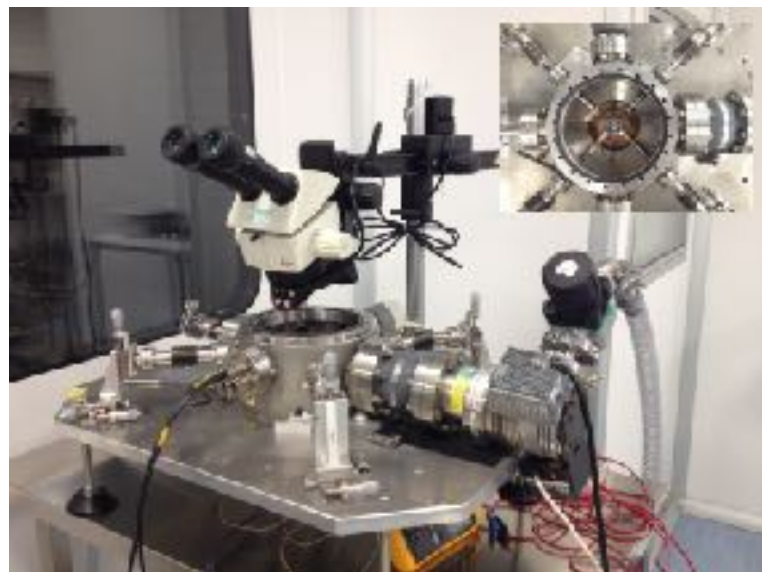
Nuova generazione di dispositivi integrati



Processamento e fabbricazione di dispositivi



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

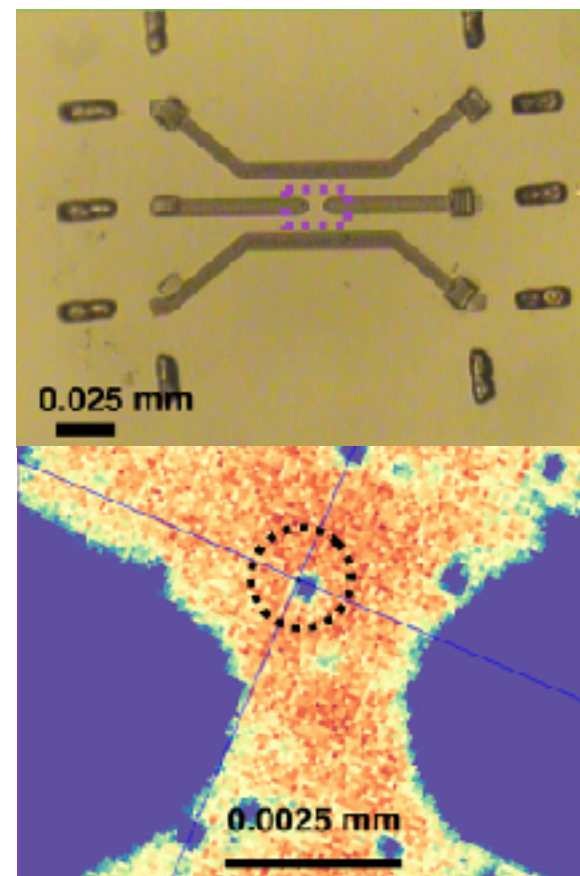


Probe Station ad alto vuoto

Caratterizzazione elettrica di campioni e dispositivi



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

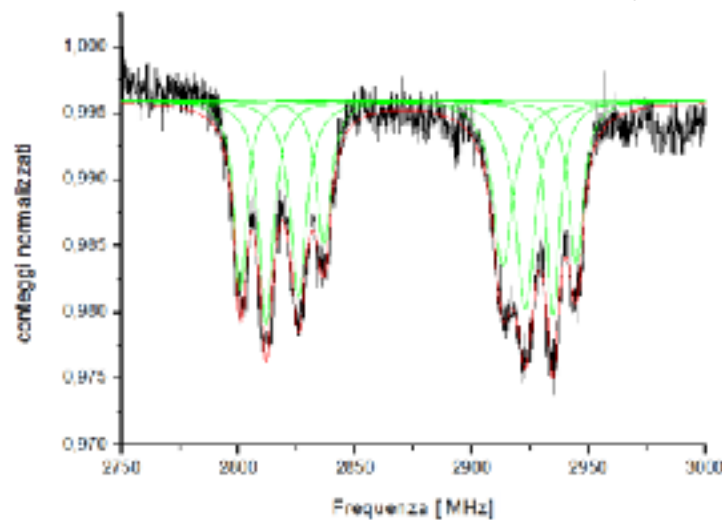
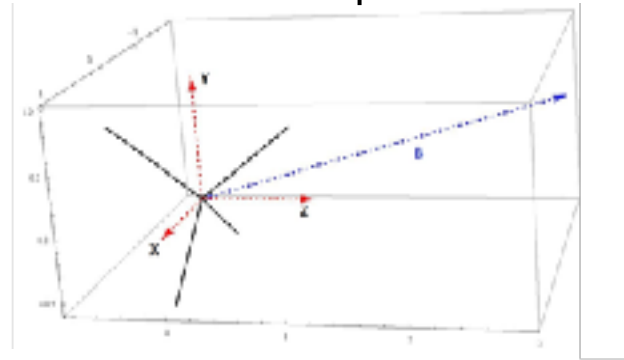
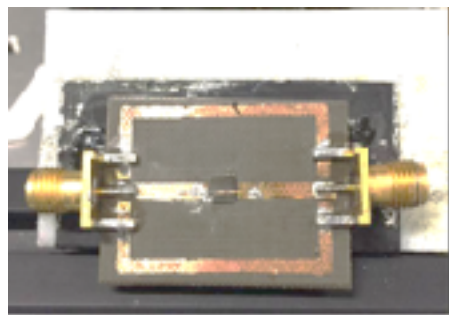
L'interazione dei difetti luminescenti con l'**ambiente esterno** (campi di interazione) **modifica** le loro proprietà di emissione (rateo di emissione, lunghezza d'onda, ...)

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

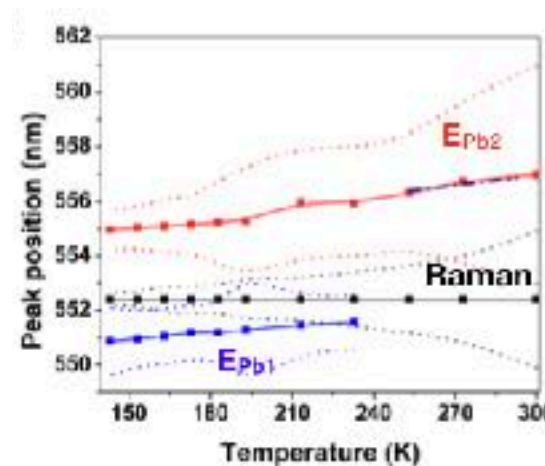


Campi Magnetici

Modulazione nell'emissione del complesso azoto-vacanza

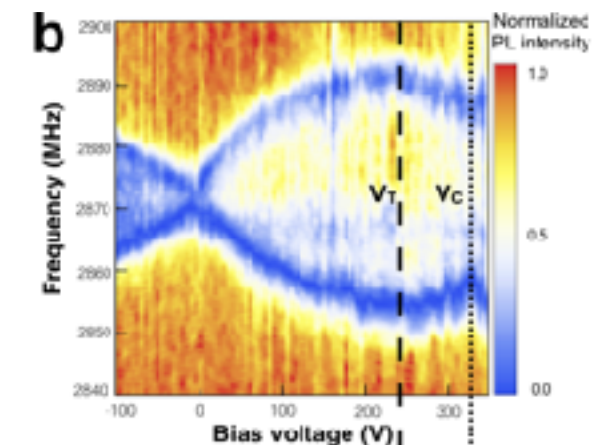
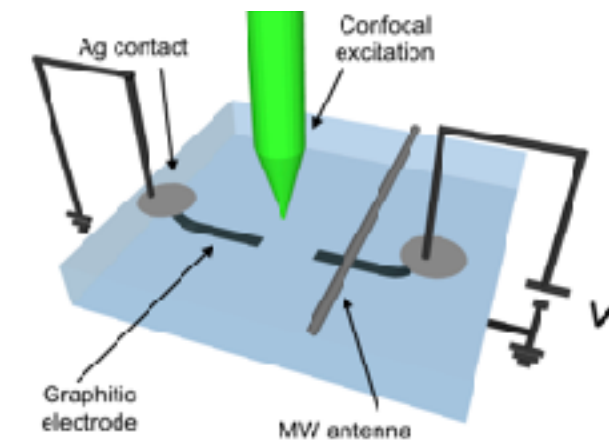


Temperatura

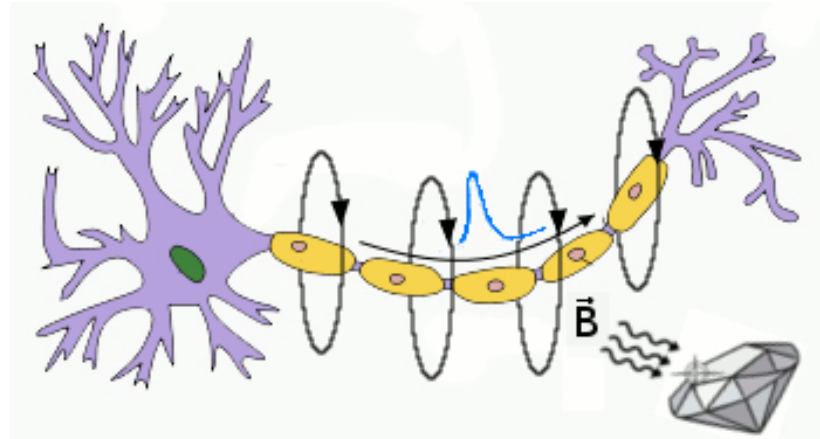


Shift nella lunghezza d'onda di emissione di centri a base Pb

Campi elettrici



Sensori cellulari quantistici

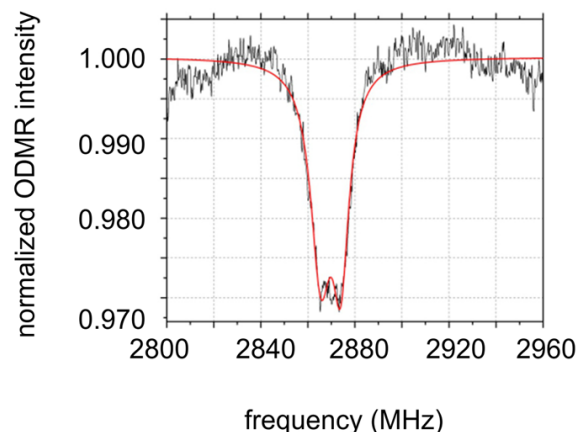
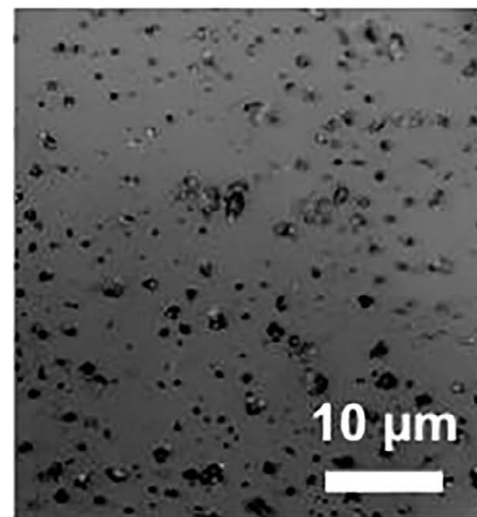


Gli impulsi neuronali generano deboli campi magneti. Una classe di difetti in diamante ha il potenziale per rivelarli

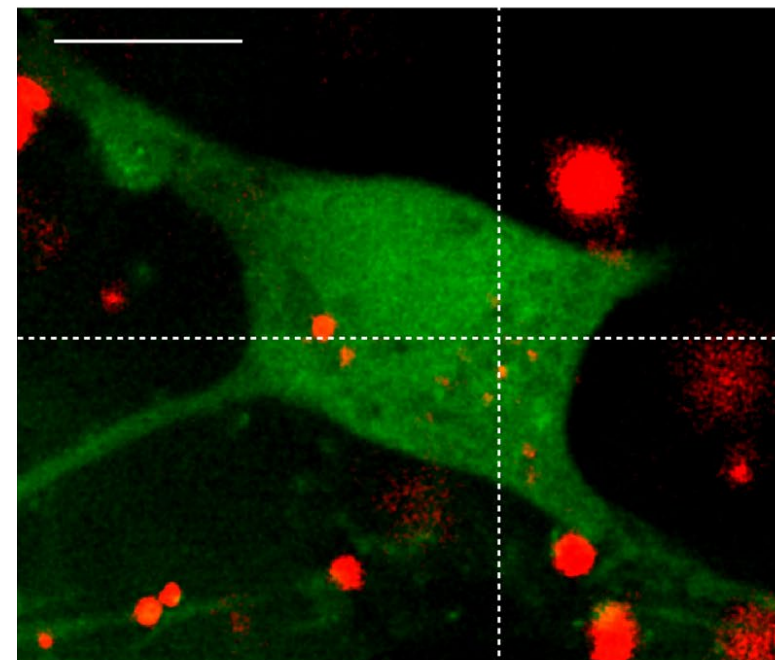


Processamento chimico e fisico di polveri di nanodiamanti

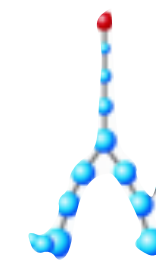
Dispersione su vetrino
Analisi e selezione dei nano-cristalli



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)



DSTF

INRiM
ISTITUTO NAZIONALE
DI RICERCA METROLOGICA

INFN
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Fisica
Torino
Dipartimento
di Eccellenza

cfr. **Dr. Federico Picollo**

Grazie per la vostra attenzione



Contatti

jacopo.forneris@unito.it

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