

Studio dell'effetto Zeeman su complessi azoto-vacanza in diamante

Matteo Barbagiovanni

Relatore : Dott. Jacopo Forneris

Co-relatore : Dott. Sviatoslav Ditalia Tchernij

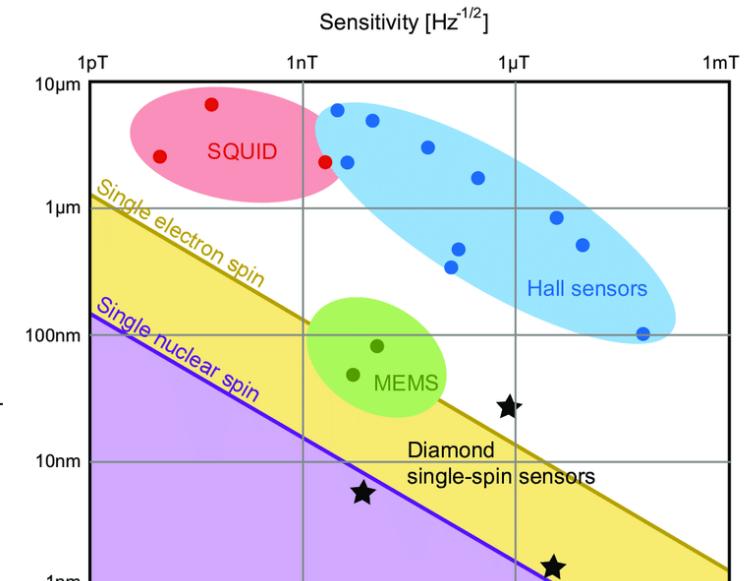
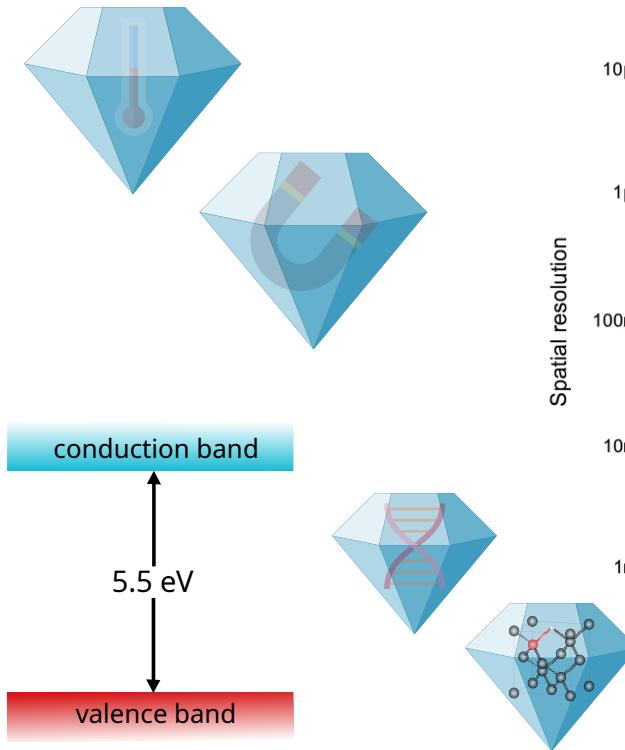
A.A. 2021 - 2022



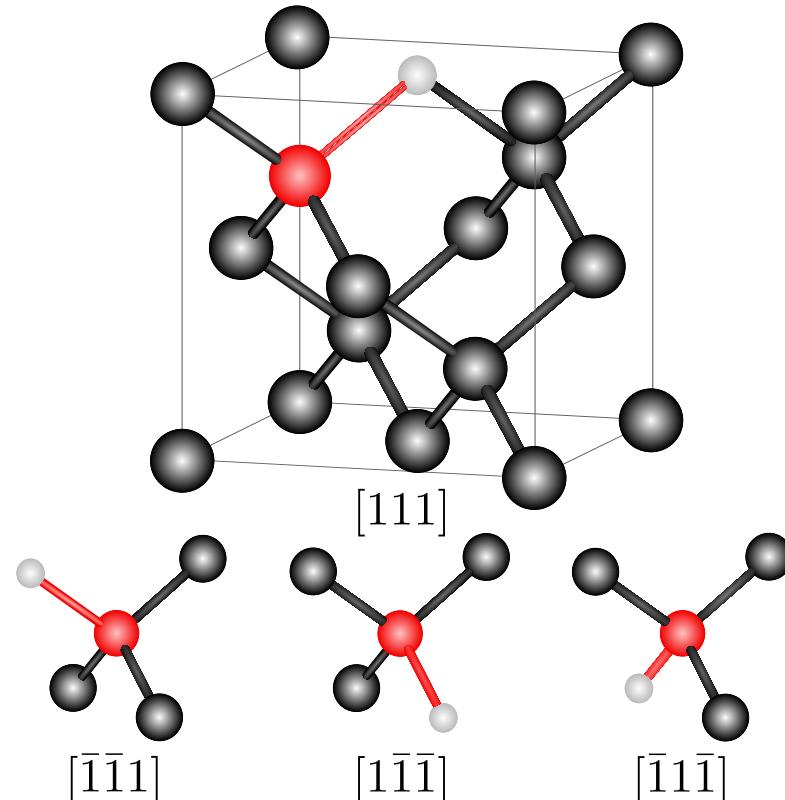
**UNIVERSITÀ
DI TORINO**

Magnetometria a base diamante

- Metrologia
 - Nano-termometria
 - Nano-magnetometria
- Perchè il diamante?
 - $\Delta E_{gap} = 5.5 \text{ eV} \rightarrow$ Isolante
 - Biocompatibilità
 - Alterazione reticolo cristallino

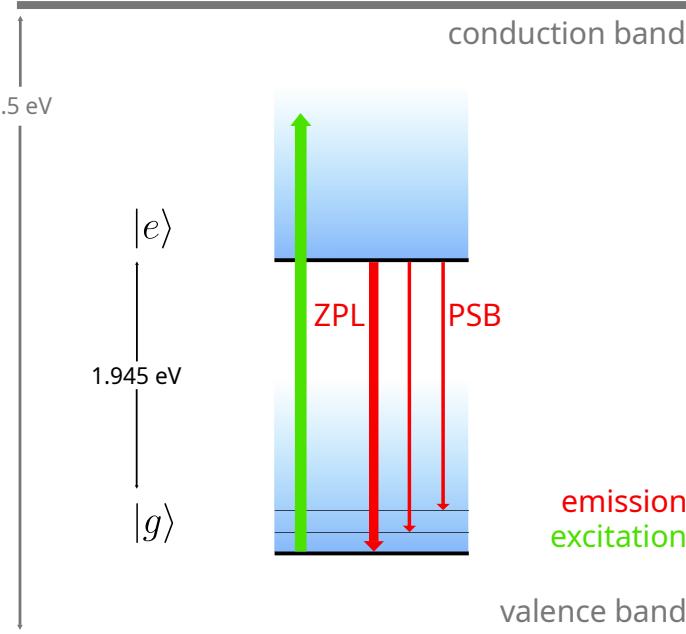
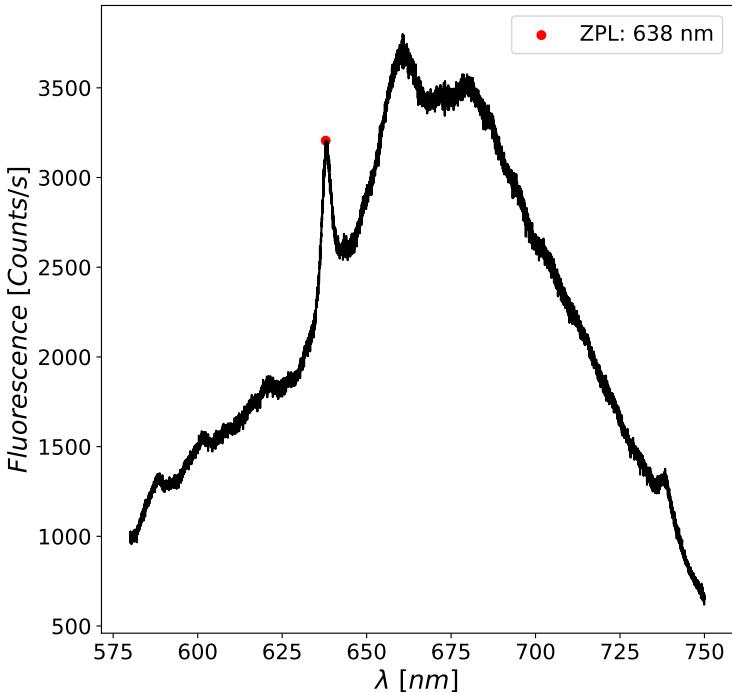


Proprietà cristallografiche



- Reticolo: fcc - base biatomica
- Difetto puntuale in diamante
- C – C sostituito da N = Vacanza
- Complesso NV
- 4 Orientazioni

Complesso azoto-vacanza

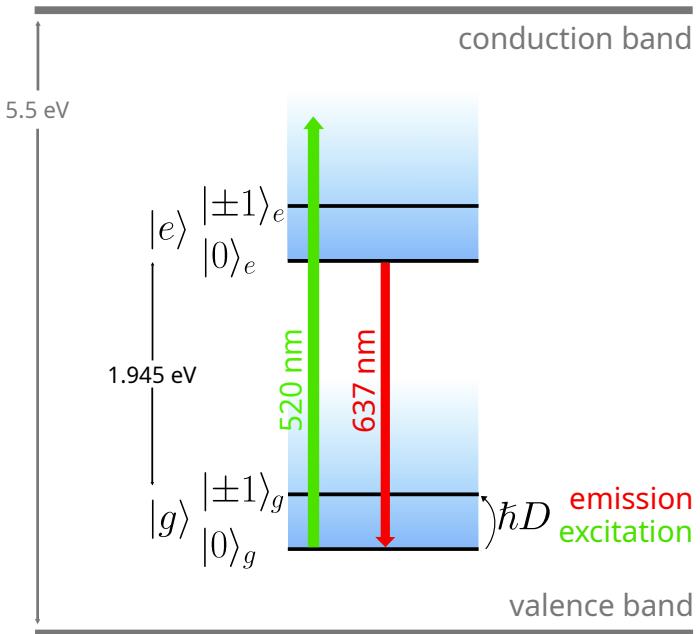


- Stato di carica NV^-
 - Zero phonon line $ZPL = 638 \text{ nm}$
 - Phonon side band PSB
- Livelli energetici in band gap

Hamiltoniana dello stato fondamentale

$$\hat{H} = \hbar D \hat{S}_z^2$$

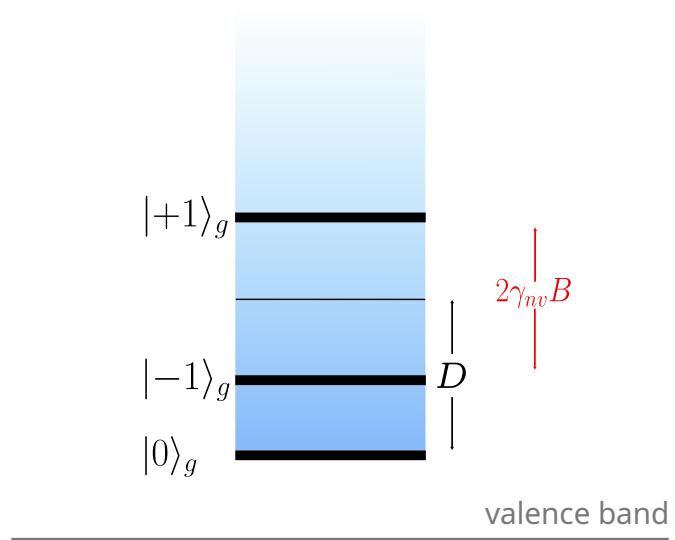
- Tripletto di spin $m_s = 0, \pm 1$
- **Zero-field term**
- $D = 2.87 \text{ GHz}$ Zero-field splitting
 - Distanziamento tra $|\pm 1\rangle_g$ e $|0\rangle_g$



Hamiltoniana dello stato fondamentale

$$\hat{H} = \hbar D \hat{S}_z^2 + \hbar \gamma_{nv} \vec{B} \cdot \hat{\vec{S}}$$

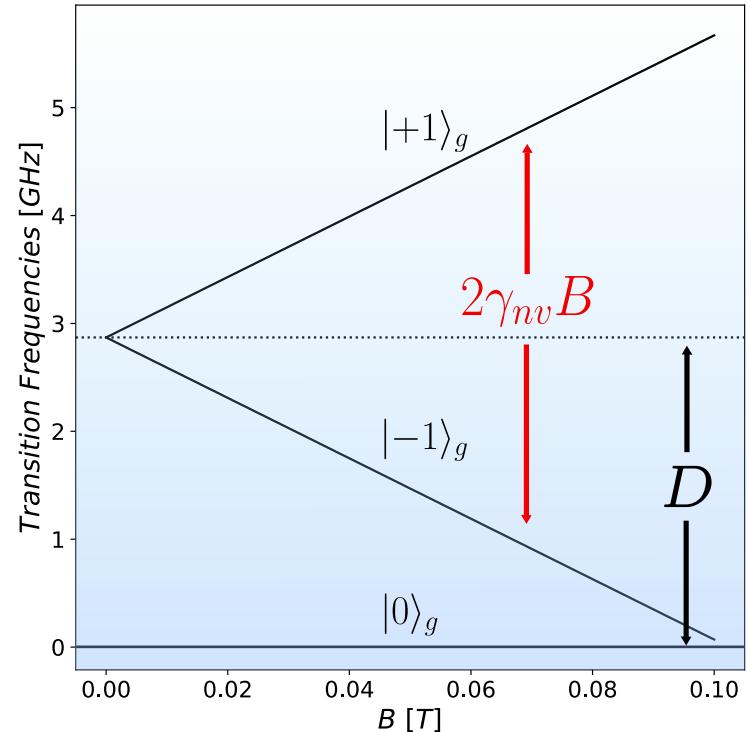
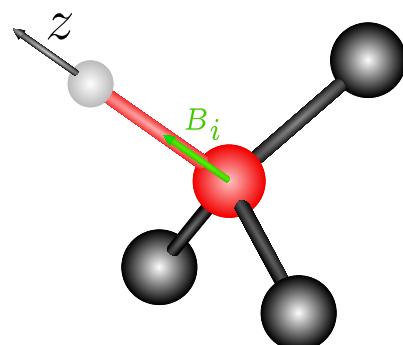
- Magnetic interaction term
- $\gamma_{nv} = g_e \mu_B = 28 \frac{GHz}{T}$ Gyromagnetic Ratio
- Degenerazione $m_s = \pm 1$ rimossa da B
- Autovalori \hat{H} hanno dipendenza lineare da B_z



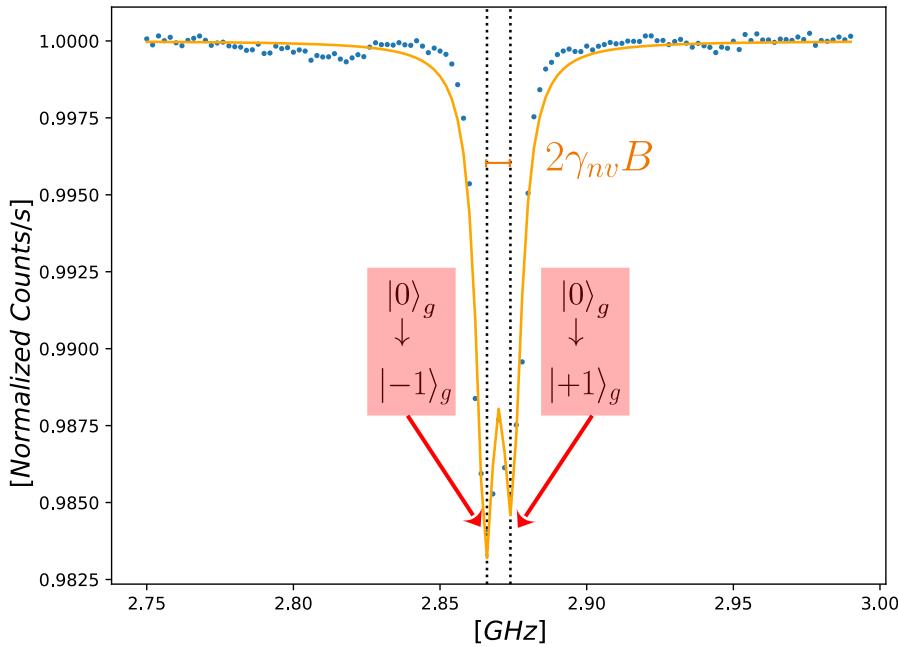
Effetto Zeeman sullo stato fondamentale

$$\hat{H} = \hbar D \hat{S}_z^2 + \hbar \gamma_{nv} B_z \hat{S}_z$$

- B_z proiezione di \vec{B} sull'asse del complesso NV $[\hat{z}]$
- Splitting Zeeman
 - $\Delta\nu_{[m_s=+1]} = +\gamma_{nv} |\vec{B} \cdot \hat{z}|$
 - $\Delta\nu_{[m_s=-1]} = -\gamma_{nv} |\vec{B} \cdot \hat{z}|$
 - $\Delta\nu_{[m_s=0]} = 0$

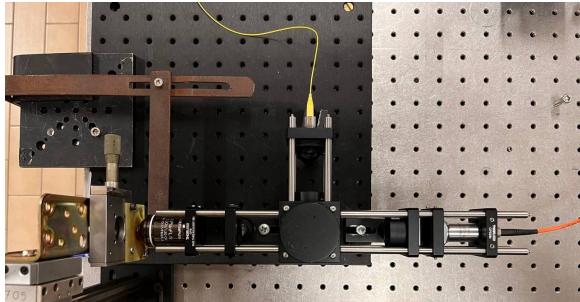


Lettura ottica dello stato di spin



- ODMR (optically detected magnetic resonance)
 - Misura diretta splitting Zeeman per B esterno
 - Laser [520 nm] per eccitazione ottica
 - Antenna MW: Scorrimento in frequenze
 - Transizione $m_s = 0 \leftrightarrow m_s = \pm 1$ quando si ha risonanza
 - Decrescita nella fotoluminescenza del complesso NV
 - I picchi di risonanza rappresentano $m_s = \pm 1$

Microscopio confocale



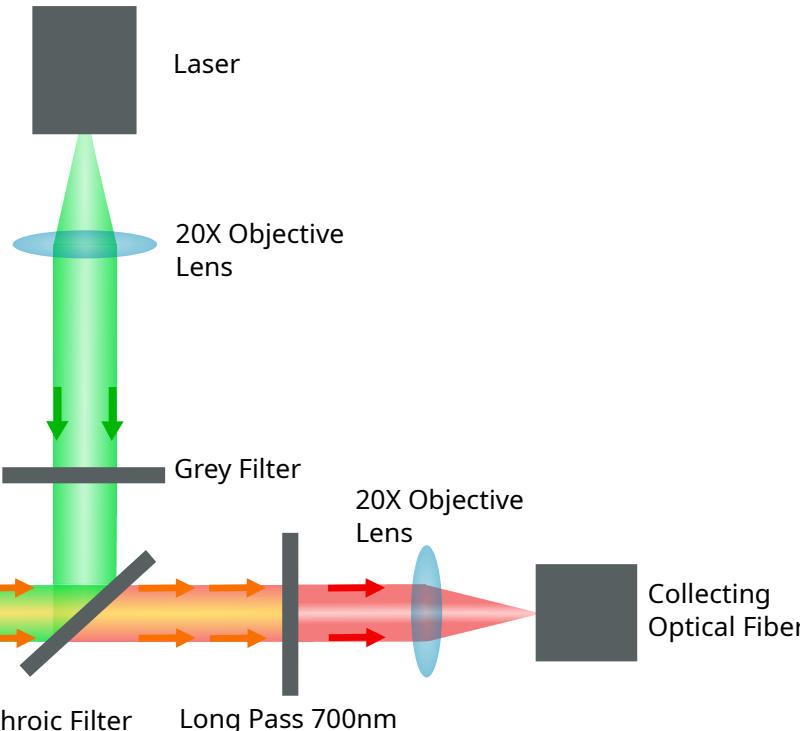
X
y
z

3D Support

Oil immersion
Lens

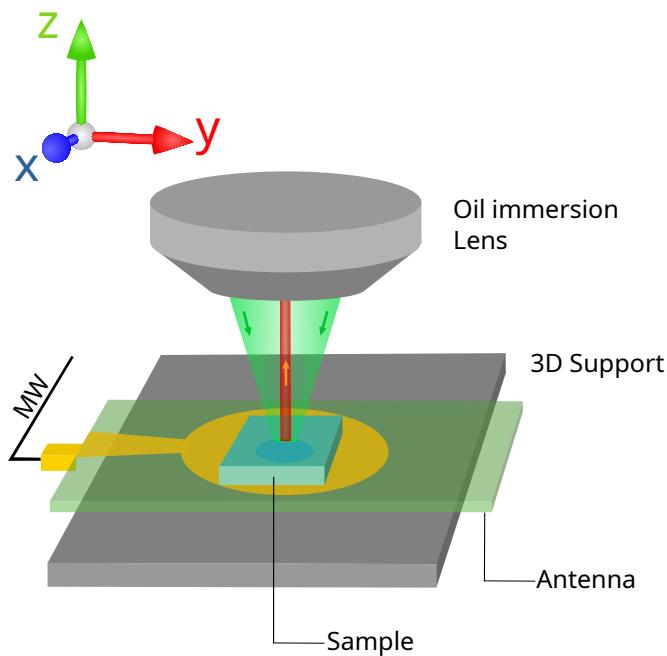
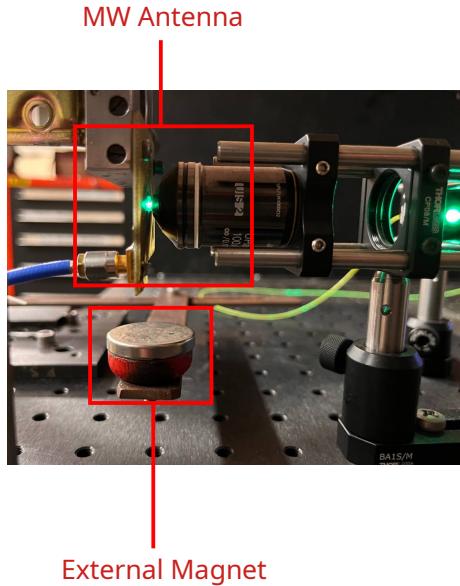


Sample
Antenna



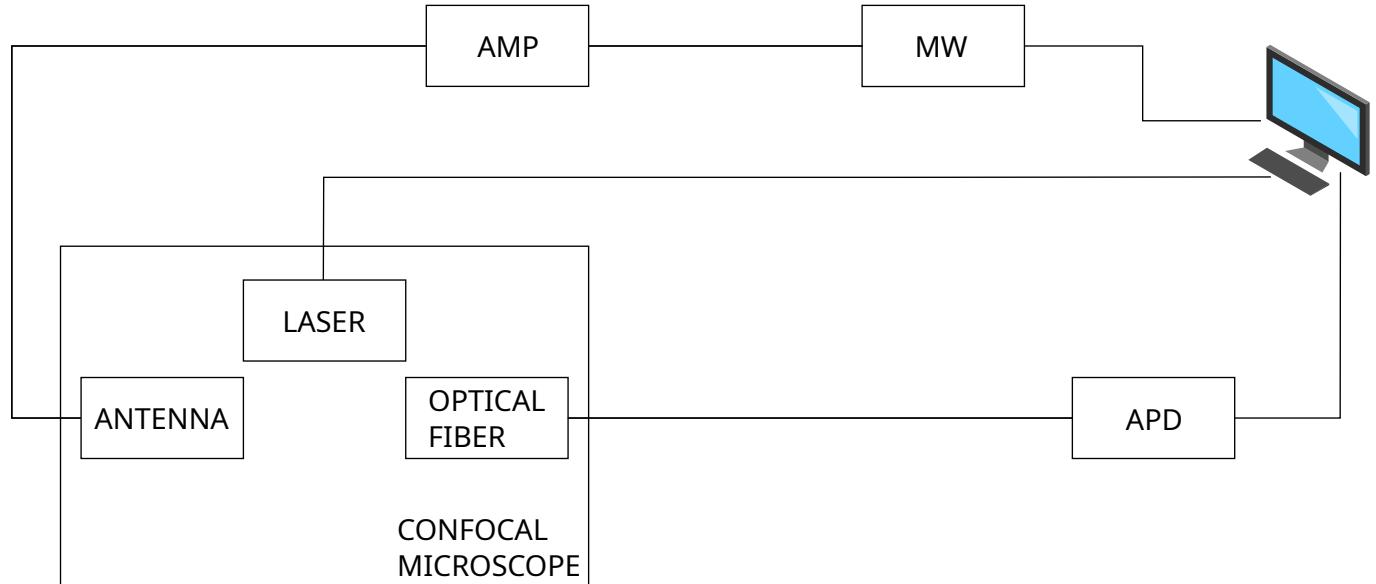
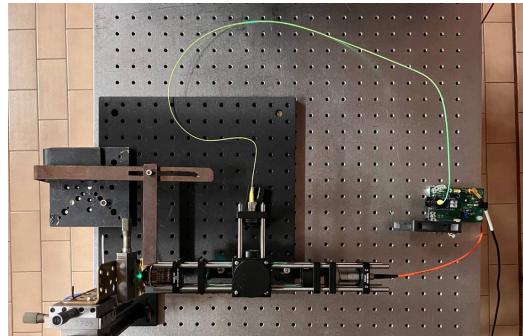
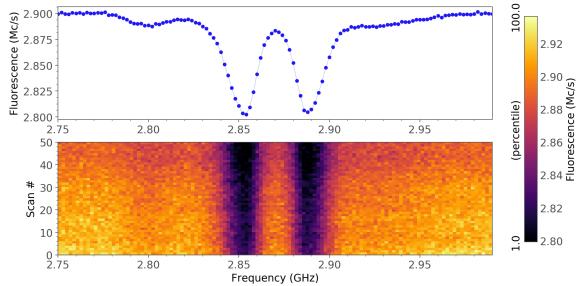
- Assemblato e testato
Laser 520 nm
- 3 punti otticamente coniugati
- Visione singolo punto del campione
 - Sezione ottica
 - Indagine tridimensionale
- Aumento risoluzione e profondità di campo

Erogazione di microonde

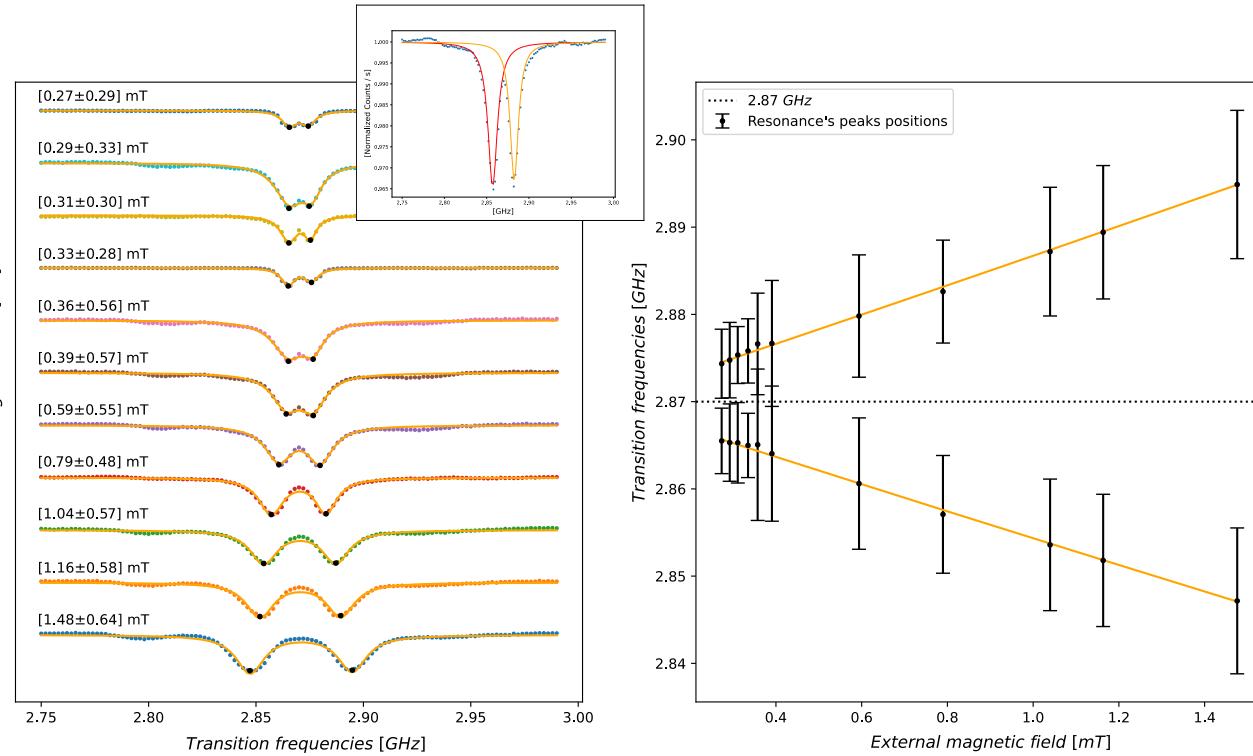


- **Antenna MW**
 - Ottimizzata per l'invio di microonde per il controllo dello spin del complesso NV
 - Genera un campo magnetico omogeneo nella zona occupata dal campione
- **Campione**
 - Diamante CVD [Chemical Vapour Deposition]
 - $[N] = 10 \text{ ppm}$; $[\text{NV}] = 1 \% [\text{N}]$
 - $O(10^4)$ centri $\text{NV}/\mu\text{m}^3$

Configurazione di lavoro



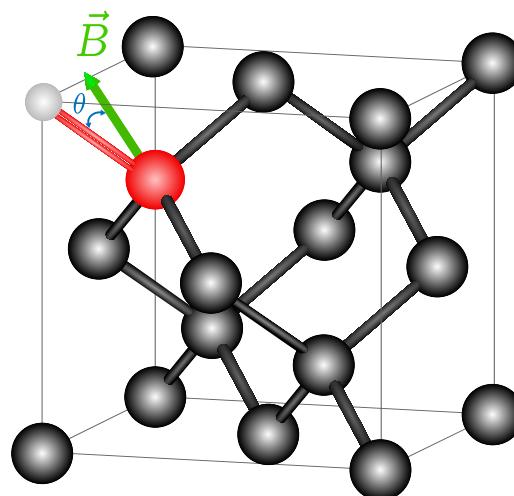
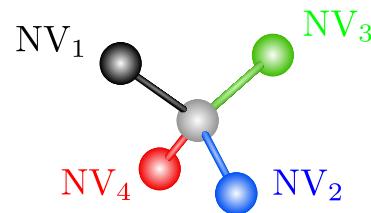
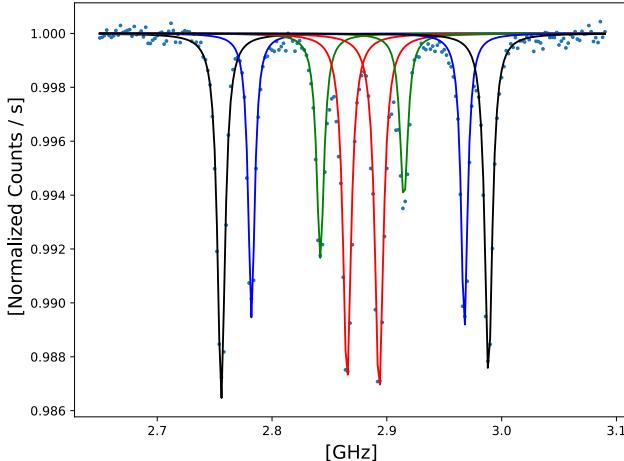
Magnetometria ODMR con campo magnetico omogeneo



Work Parameters : $P_{\text{laser}} = 2 \text{ mW}$; $P_{\text{MW}} = 6 \text{ W}$

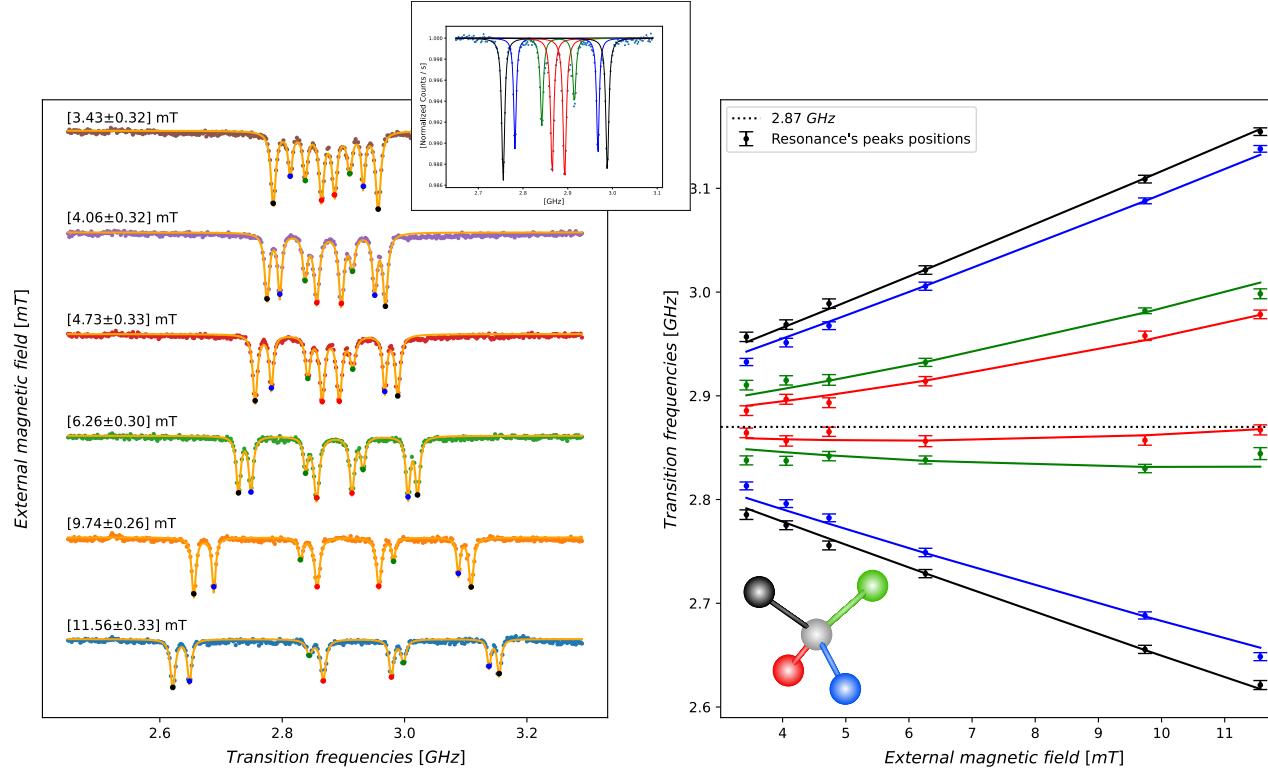
- Campo magnetico omogeneo nelle 4 direzioni del difetto
 - Lo splitting Zeeman è uguale in ogni orientazione
- Gli spettri sono fittati con lorenziane
 - $\Delta\nu_i = \nu_{i[+1]} - \nu_{i[-1]}$
 - $B_i = \Delta\nu_i / 2\gamma_{nv}$
- Magnete avvicinato gradualmente
- Andamento teorico verificato (Validazione con sonda di Hall)
- Le incertezze sovradimensionate dipendono dalle frequenze degeneri

Direzionalità del campo magnetico



- Proiezioni di \vec{B} differenti in modulo lungo le 4 orientazioni del complesso
- Si osservano 4 coppie di frequenze di risonanza $[NV_i]$
 - $\vec{B} \cdot \hat{u}_i = \Delta\nu_i/2\gamma_{nv} = B_i$

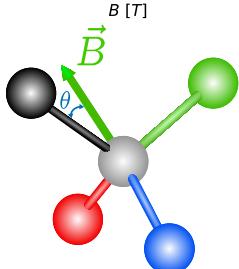
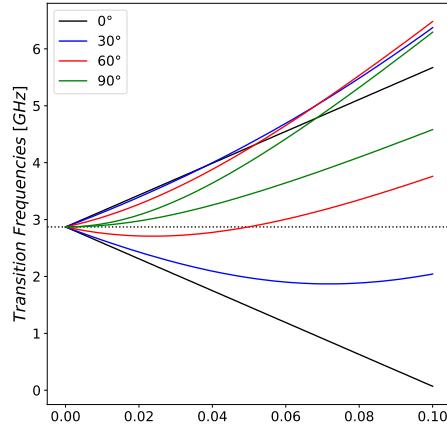
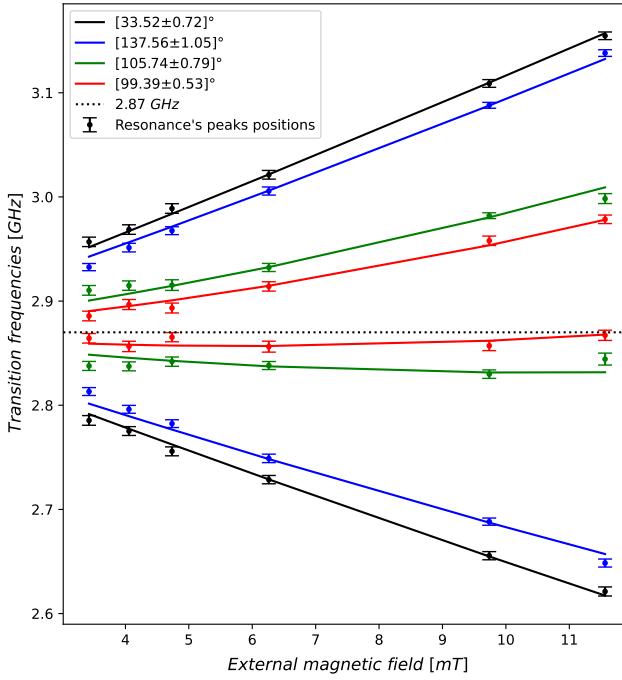
Magnetometria ODMR con campo magnetico disomogeneo



- Campo magnetico differente nelle 4 direzioni del difetto
 - Lo splitting Zeeman è differente in ogni orientazione
- Gli spettri sono fittati con lorenziane
 - $\begin{cases} \vec{B} \cdot \hat{u}_1 = B_1 \\ \vec{B} \cdot \hat{u}_2 = B_2 \\ \vec{B} \cdot \hat{u}_3 = B_3 \\ \vec{B} \cdot \hat{u}_4 = B_4 \end{cases} \xrightarrow{\text{sign check}}$
- Andamento teorico verificato

Work Parameters : $P_{\text{laser}} = 2 \text{ mW}$; $P_{\text{MW}} = 6 \text{ W}$

Considerazioni aggiuntive sull'hamiltoniana

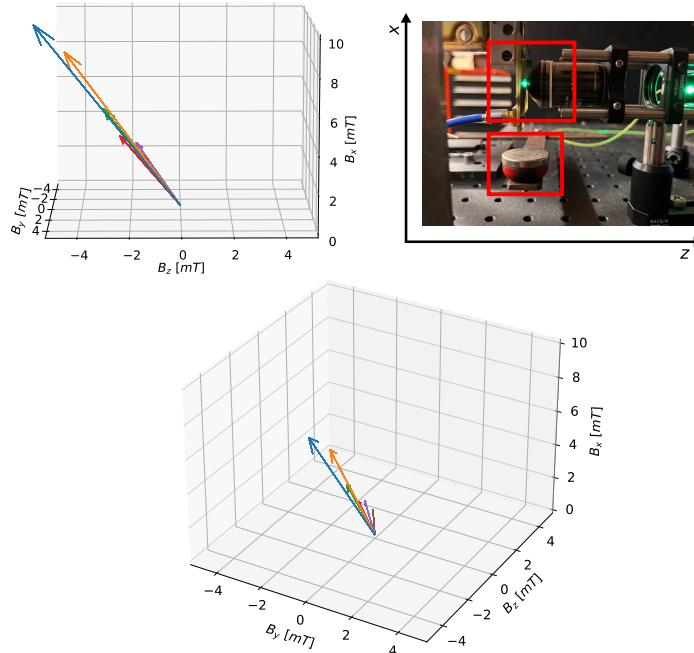
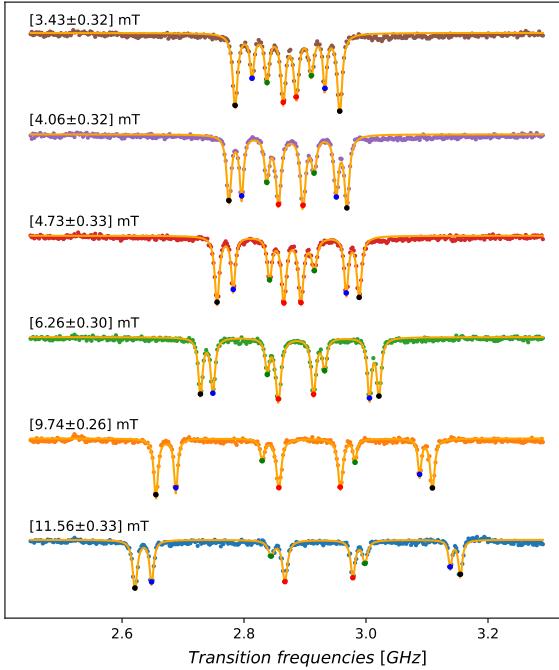


$$\hat{H} = \overbrace{D\hat{S}_z^2 + \gamma_{nv}B_z\hat{S}_z}^{H_{||}} + \overbrace{\gamma_{nv}(B_x\hat{S}_x + B_y\hat{S}_y)}^{H_{\perp}}$$

- $H_{\perp} \ll H_{||}$ non più verificata
 - B_{\perp} induce mixing degli spin elettronici
 - Spin proiettato sull'asse del complesso non è più un buon numero quantico
 - Autostati sono sovrapposizioni $m_s = 0, \pm 1$

Magnetometria vettoriale

External magnetic field [mT]



- Dalle informazioni precedenti si estrapolano $[B_x \ B_y \ B_z]$
 - Rappresentazione vettoriale del campo magnetico
 - Disposizione vettori coerente con la movimentazione del magnete

Conclusioni

Risultati ottenuti:

- Magnetometria vettoriale a temperatura ambiente [risoluzione di 0.3 mT]
 - Implementazione sperimentale di un apparato di microscopia confocale per la magnetometria
 - Validazione dell'apparato con campagna di misure sistematiche
 - Ricostruzione di intensità e direzione del campo magnetico

Prospettive future:

- Setup sperimentale con l'aggiunta di elettronica di controllo con risoluzione temporale $O(ns)$
 - Controllo dinamico sullo stato di spin dell'ensemble di difetti
 - Incremento della risoluzione magnetica
 - Processamento informazione quantistica
 - QBIT

Grazie per l'attenzione

*Ringrazio in particolare
Ettore Bernardi (INRiM)
per il supporto ricevuto durante l'attività di tesi*

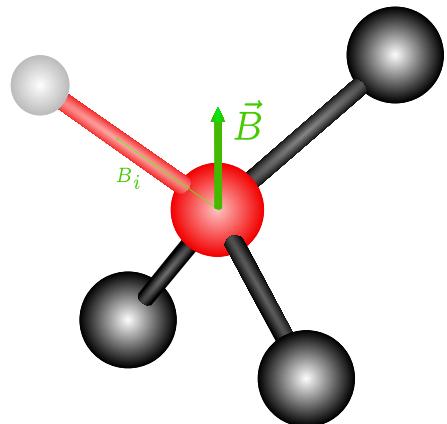
Fonti:

- L. Rondin *et al.*, 'Magnetometry with nitrogen-vacancy defects in diamond', *Rep. Prog. Phys.* **77** (2014) 056503
- E. Abe *et al.*, 'Tutorial: Magnetic resonance with nitrogen-vacancy centers in diamond—microwave engineering, materials science, and magnetometry', *J. Appl. Phys.* **123**, 161101 (2018)
- V. Sewani *et al.*, 'Coherent control of NV centers in diamond in a quantum teaching lab', *American Journal of Physics* **88**, 1156 (2020)



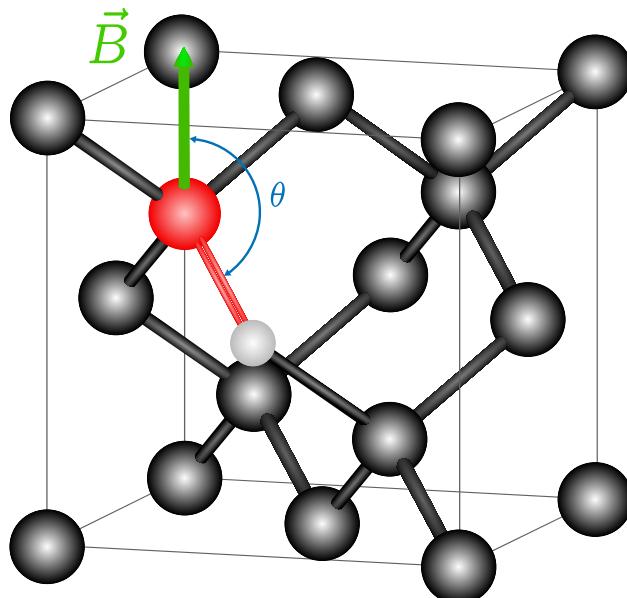
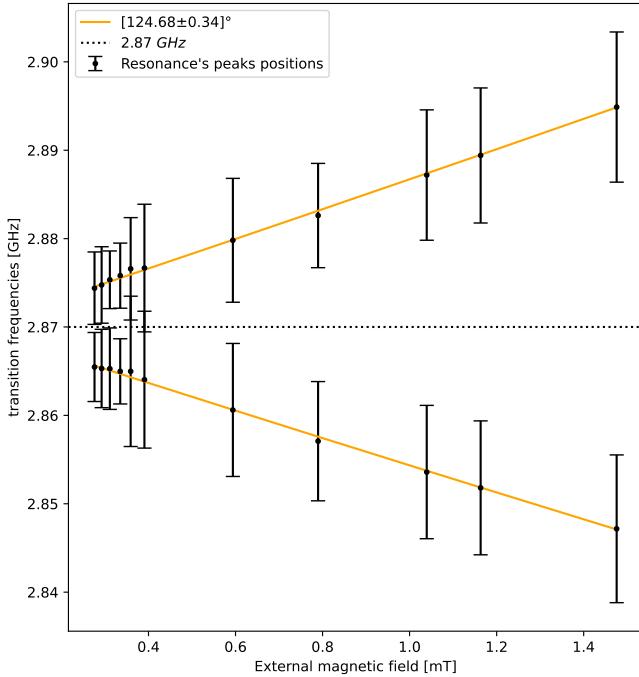
The EMPIR initiative is co-funded by the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and the EMPIR Participating States

Calcolo vettore B



- Calcolo delle permutazioni dei versori (segno compreso)
 - $[\hat{u}_1, \hat{u}_2, \hat{u}_3, \hat{u}_4]; [-1, -1, 1, 1]$
- $\begin{cases} \vec{B} \cdot \hat{u}_{list}[i]_1 = B_1 \\ \vec{B} \cdot \hat{u}_{list}[i]_2 = B_2 \\ \vec{B} \cdot \hat{u}_{list}[i]_3 = B_3 \end{cases}$
- Seleziono la permutazione per cui la differenza percentuale tra $\vec{B} \cdot \hat{u}_{list}[i]_4$ e B_4 è minore

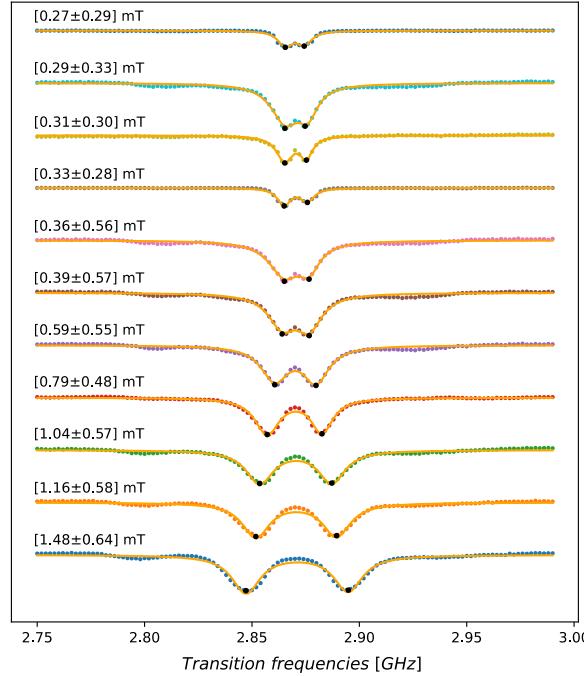
Angolazione tra campo magnetico e centro NV



- Gli angoli corrispondenti alla configurazione degenere sono:
 - $\theta_1 = 109.5^\circ / 2 = 54.75^\circ$
 - $\theta_2 = 180^\circ - 54.75^\circ = 125.5^\circ$

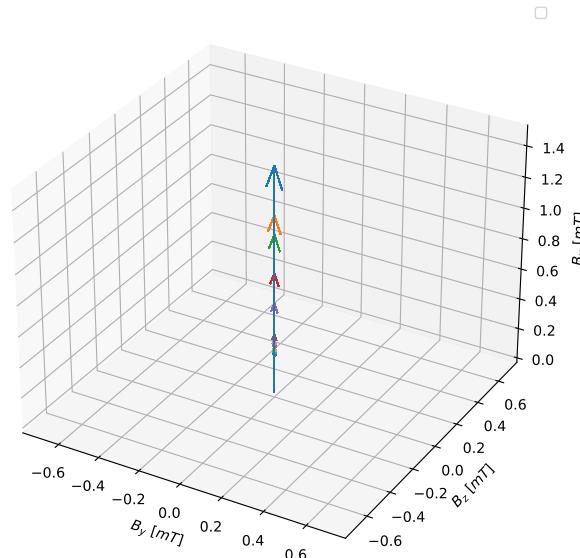
Calcolo vettore B per risonanze degeneri

External magnetic field [mT]



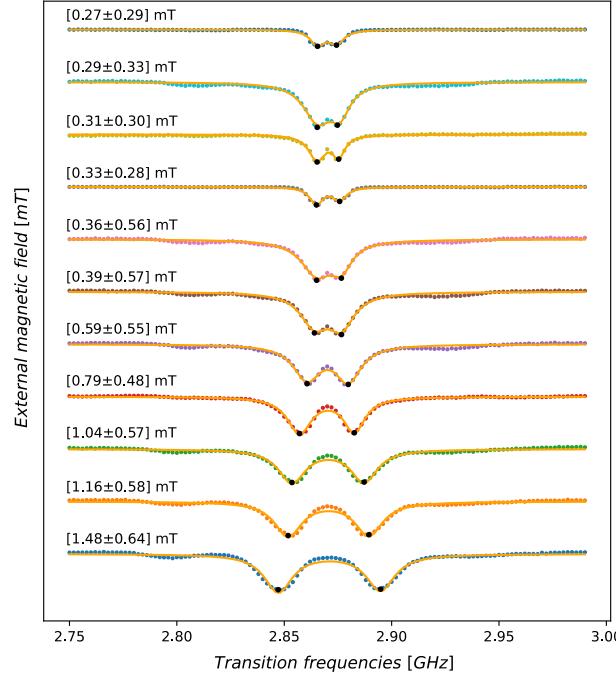
21

Analisi dati



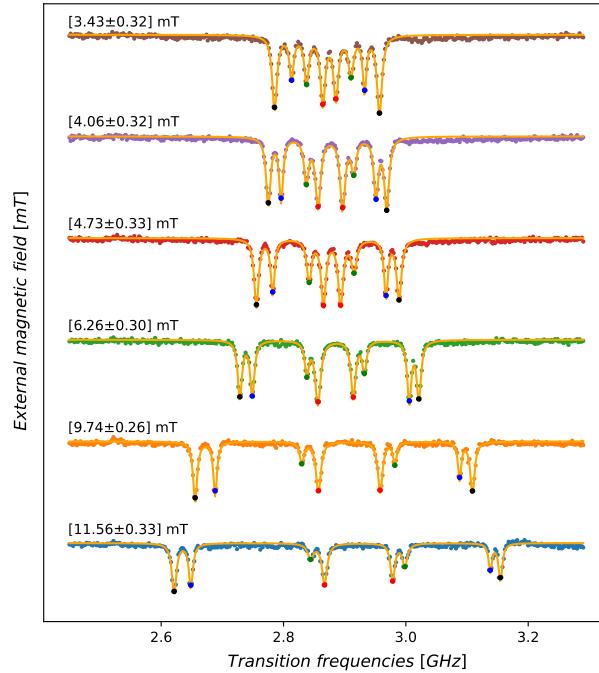
- 4 Risonanze degeneri
- B_i tutti uguali in modulo

Calcolo vettore B per risonanze degeneri



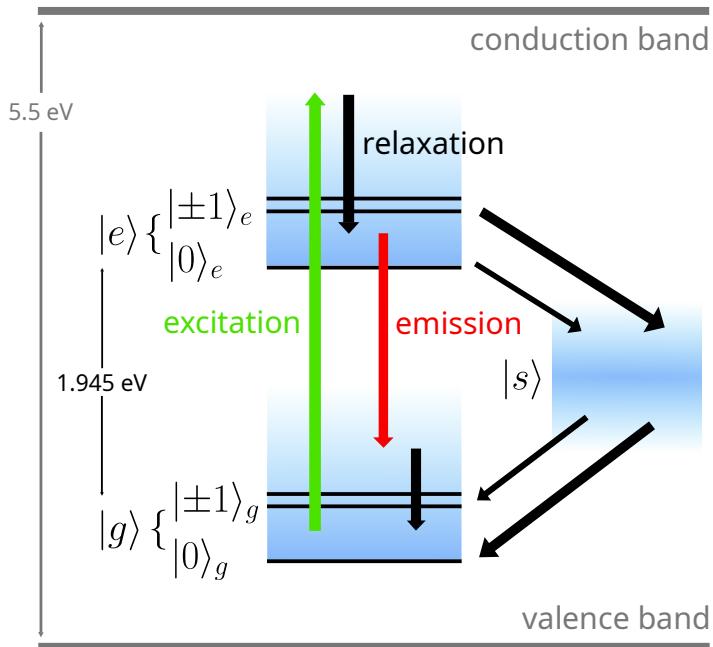
Calculated			Hall	
$B_x \text{ [mT]}$	$B_y \text{ [mT]}$	$B_z \text{ [mT]}$	$B_x \text{ [mT]}$	$B_z \text{ [mT]}$
0.27 ± 0.17	0.00 ± 0.17	0.00 ± 0.17	0.27 ± 0.11	0.13 ± 0.11
0.29 ± 0.19	0.00 ± 0.19	0.00 ± 0.19	0.28 ± 0.11	0.15 ± 0.11
0.31 ± 0.17	0.00 ± 0.17	0.00 ± 0.17	0.30 ± 0.12	0.17 ± 0.11
0.33 ± 0.16	0.00 ± 0.16	0.00 ± 0.16	0.30 ± 0.12	0.14 ± 0.11
0.36 ± 0.32	0.00 ± 0.32	0.00 ± 0.32	0.32 ± 0.12	0.11 ± 0.11
0.39 ± 0.33	0.00 ± 0.33	0.00 ± 0.33	0.38 ± 0.12	0.21 ± 0.11
0.59 ± 0.32	0.00 ± 0.32	0.00 ± 0.32	0.58 ± 0.13	0.21 ± 0.11
0.79 ± 0.28	0.00 ± 0.28	0.00 ± 0.28	0.80 ± 0.14	0.30 ± 0.12
1.04 ± 0.33	0.00 ± 0.33	0.00 ± 0.33	0.90 ± 0.15	0.30 ± 0.12
1.16 ± 0.33	0.00 ± 0.33	0.00 ± 0.33	1.10 ± 0.15	0.22 ± 0.11

Calcolo vettore B per risonanze non degeneri



Calculated			Hall	
B_x [mT]	B_y [mT]	B_z [mT]	B_x [mT]	B_z [mT]
3.60 ± 0.18	0.58 ± 0.19	-1.78 ± 0.18	3.50 ± 0.28	-1.70 ± 0.01
4.00 ± 0.18	0.70 ± 0.20	-2.43 ± 0.19	4.10 ± 0.30	-2.40 ± 0.02
5.42 ± 0.18	0.56 ± 0.17	-3.08 ± 0.17	5.30 ± 0.36	-3.00 ± 0.05
8.01 ± 0.19	1.09 ± 0.18	-3.33 ± 0.18	7.80 ± 0.49	-3.40 ± 0.07
8.53 ± 0.15	0.79 ± 0.16	-4.62 ± 0.15	8.00 ± 0.50	-4.70 ± 0.13
9.95 ± 0.17	0.66 ± 0.20	-5.85 ± 0.19	9.90 ± 0.59	-5.70 ± 0.18
12.01 ± 0.15	0.68 ± 0.16	-9.12 ± 0.17	11.70 ± 0.68	-9.00 ± 0.35

Livelli energetici

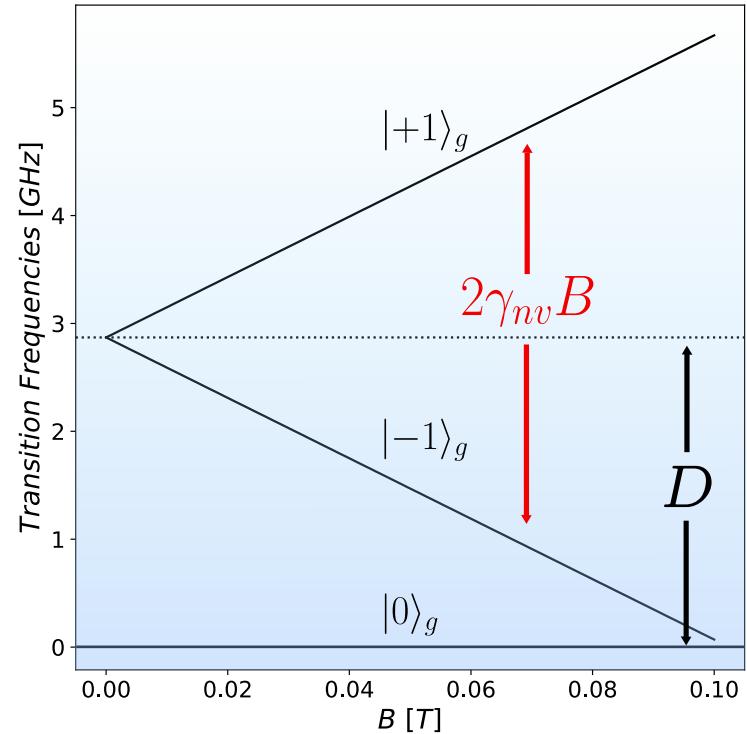
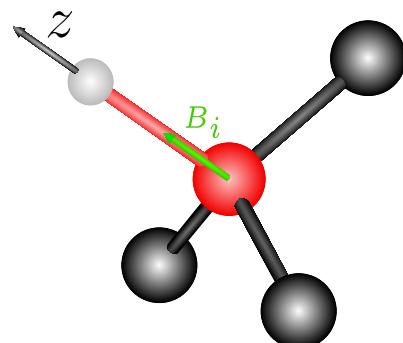


- 2 Tripletto:
 - Stato fondamentale
 - Stato eccitato
- 1 Singoletto
 - Stato metastabile
- Eccitazione: 532 nm
- Emissione: 638 nm

Autovalori hamiltoniana

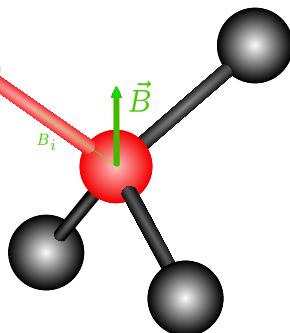
$$\hat{H} = \hbar D \hat{S}_z^2 + \hbar \gamma_{nv} B_z \hat{S}_z$$

- B_z proiezione di \vec{B} sull'asse del complesso NV [\hat{z}]
- Autovalori
 - $\nu_{[m_s=+1]} = D + \gamma_{nv} B_z$
 - $\nu_{[m_s=-1]} = D - \gamma_{nv} B_z$
 - $\nu_{[m_s=0]} = 0$



Autovalori hamiltoniana

$$\hat{H} = \hbar D \hat{S}_z^2 + \hbar \gamma_{nv} \vec{B} \cdot \hat{\vec{S}}$$



- $\nu_{[m_s=+1]} = \frac{2D}{3} - \frac{\sigma_2}{2\sigma_1} - \frac{\sigma_1}{2} + \frac{\sqrt{3} \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} - \sigma_1 \right) i}{2}$
- $\nu_{[m_s=-1]} = \frac{2D}{3} - \frac{\sigma_2}{2\sigma_1} - \frac{\sigma_1}{2} - \frac{\sqrt{3} \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} - \sigma_1 \right) i}{2}$

$$\sigma_1 = \left(\sigma_3 + \sqrt{\left(\sigma_3 + \frac{8D^3}{27} - Dg^2x^2 - Dg^2y^2 \right)^2 - \sigma_2^3} + \frac{8D^3}{27} - Dg^2x^2 - Dg^2y^2 \right)^{1/3}$$

$$\sigma_2 = \frac{D^2}{9} + \frac{2g^2x^2}{3} + \frac{2g^2y^2}{3} + \frac{g^2z^2}{3}$$

$$\sigma_3 = \frac{D(-D^2 + 2g^2x^2 + 2g^2y^2 + g^2z^2)}{3}$$

