

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

**Matteo Barbagiovanni**

**Relatore:** Dott. Jacopo Forneris

**Correlatore:** Dott. Sviatoslav Ditalia Tchernij

**A.A. 2021 - 2022**

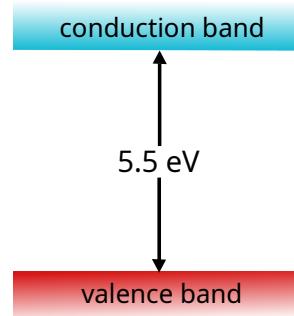


**UNIVERSITÀ  
DI TORINO**

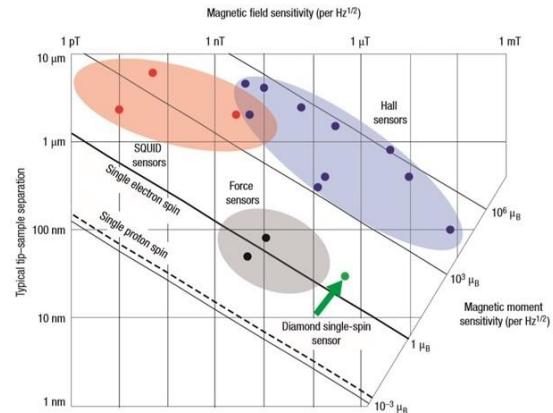
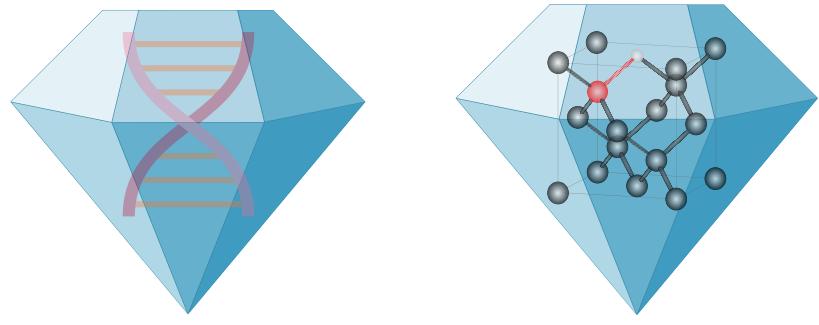
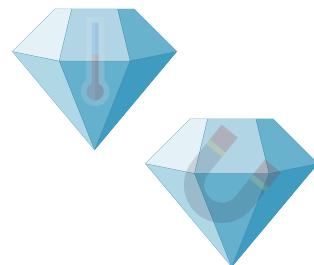
# Difetti fotoluminescenti in diamante

- Perchè il diamante?

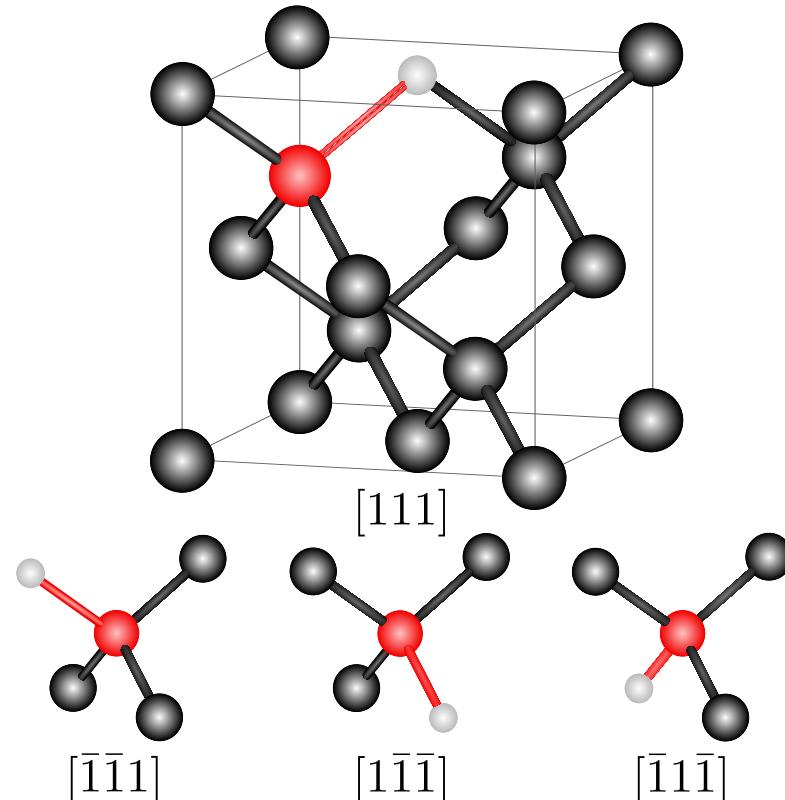
- $\Delta E_{gap} = 5.5 \text{ eV} \rightarrow \text{Isolante}$
- Biocompatibilità
- Alterazione reticolo cristallino



- Metrologia
  - Nano-termometria
  - Magnetometria

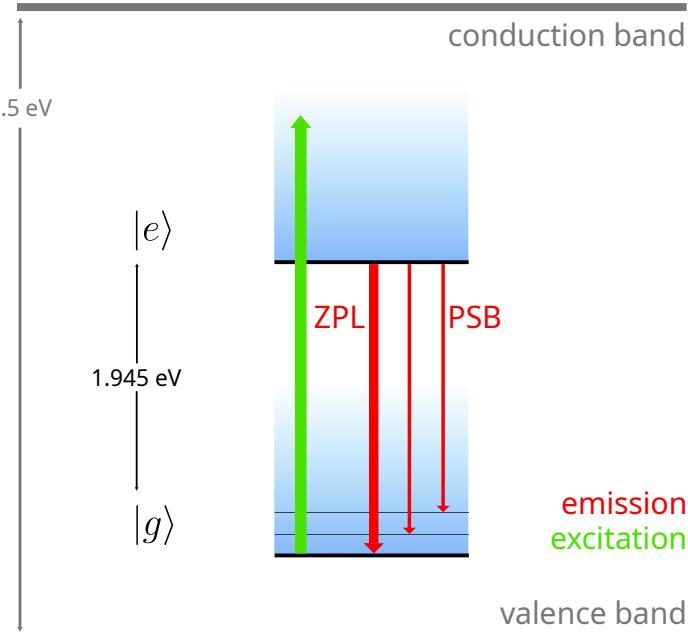
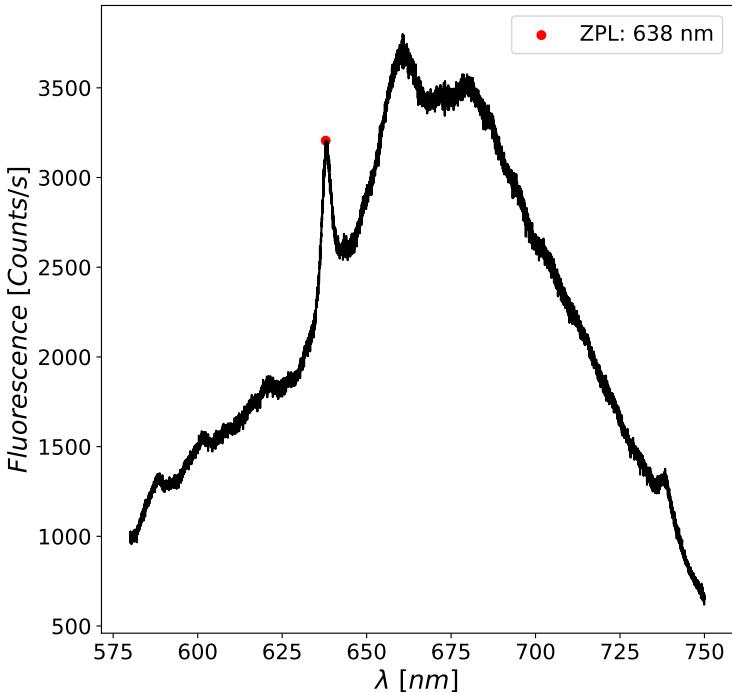


# Proprietà cristallografiche



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

# Complesso azoto-vacanza

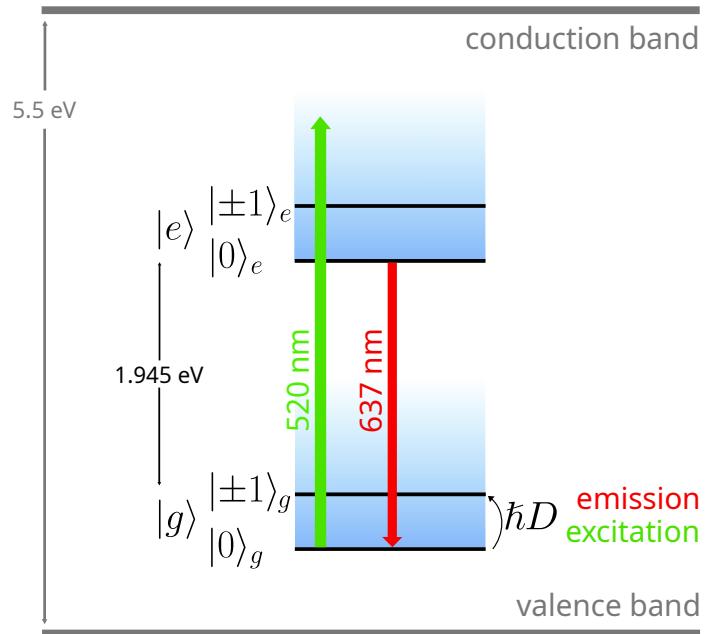


- Stato di carica  $NV^-$
- Zero phonon line  
 $ZPL = 638 \text{ nm}$
- Livelli energetici in band gap

# Hamiltoniana dello stato fondamentale

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

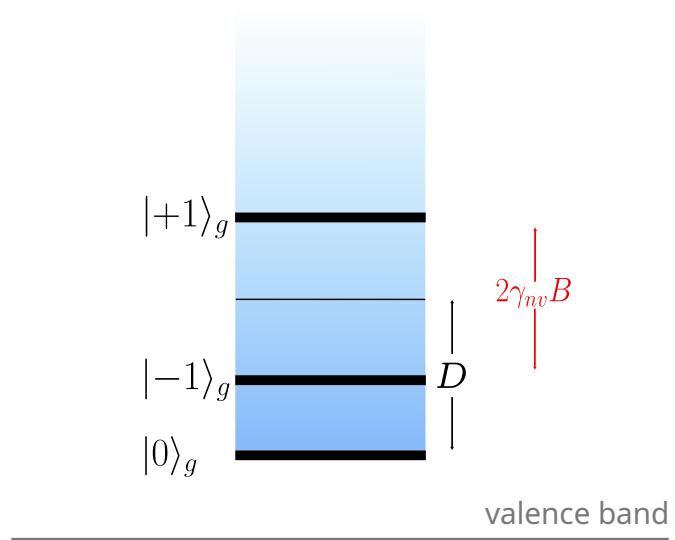
- Zero-field term
- $D = 2.87 \text{ GHz}$  Zero-field splitting
- Hamiltoniana dello stato fondamentale  $|g\rangle$
- Tripletto di spin  $m_s = 0, \pm 1$



# Hamiltoniana dello stato fondamentale

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

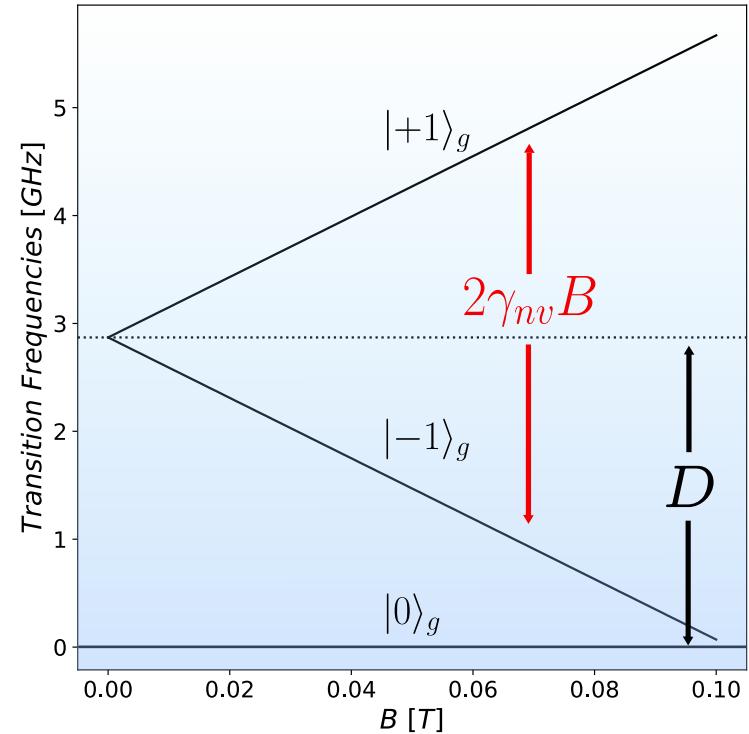
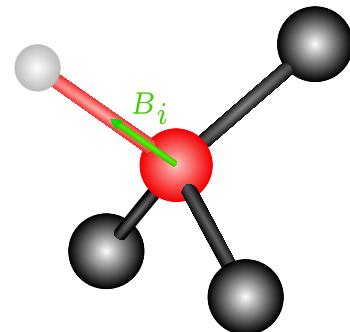
- Magnetic interaction term
- $\gamma_{nv} = g_e \mu_B = 28 \frac{GHz}{T}$  Gyromagnetic Ratio
- Degenerazione  $m_s = \pm 1$  rimossa da  $B$
- Autovalori  $\hat{H}$  hanno dipendenza lineare da  $B_z$



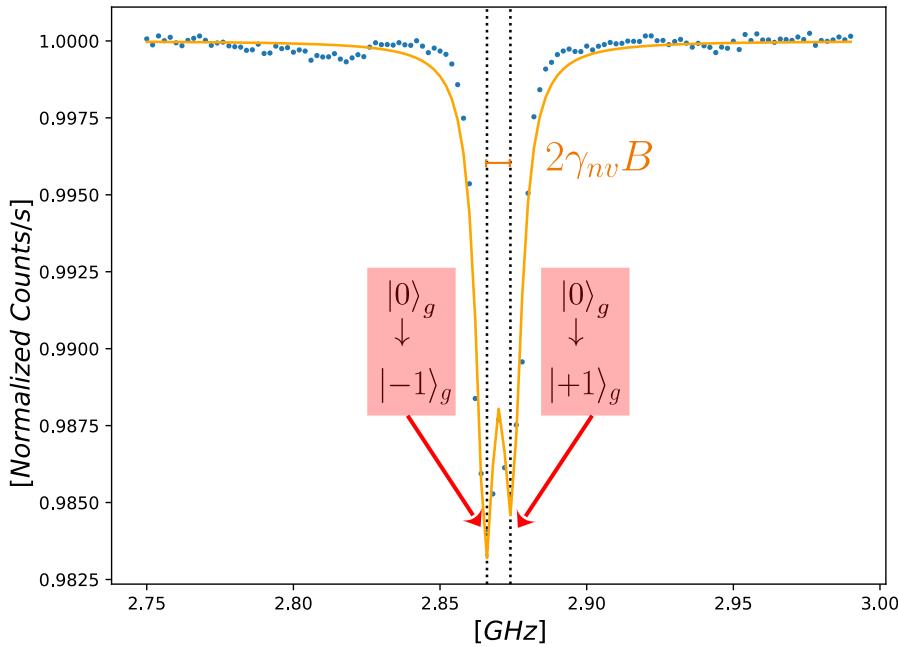
# Effetto Zeeman sullo stato fondamentale

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

- Allineamento tra  $B_z$  e l'asse del complesso NV
- Splitting Zeeman
  - $\Delta\nu_{[m_s=+1]} = +\gamma_{nv} |\vec{B} \cdot \hat{u}|$
  - $\Delta\nu_{[m_s=-1]} = -\gamma_{nv} |\vec{B} \cdot \hat{u}|$
  - $\Delta\nu_{[m_s=0]} = 0$

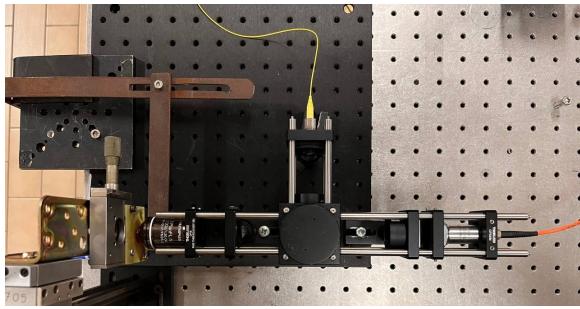


# Lettura ottica dello stato di spin



- 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

y

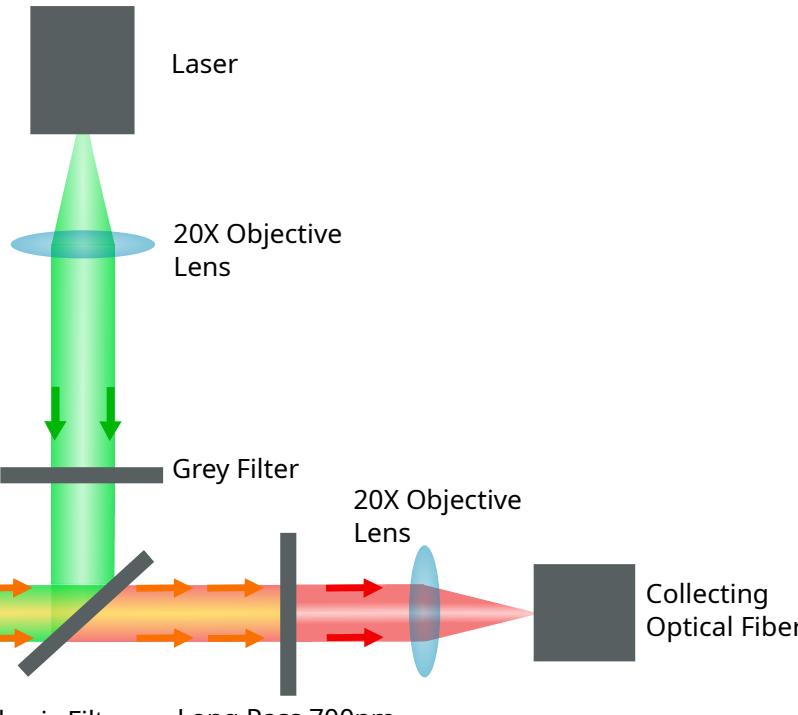
3D Support

3D Support

3D Support

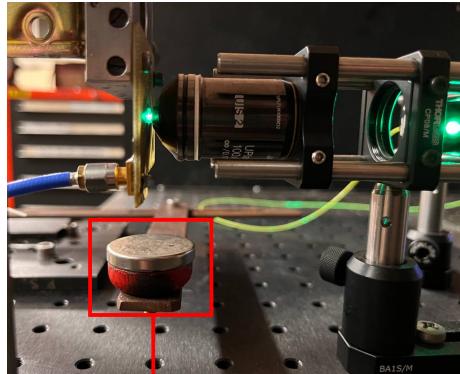
9

Apparato sperimentale

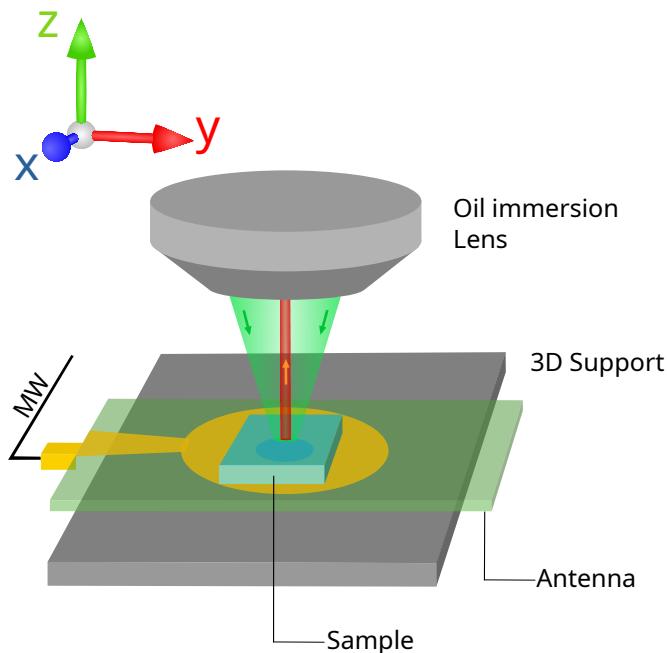


- Laser 520 nm
- Visione singolo punto del campione
- Sezione ottica
- Indagine tridimensionale
- Aumento risoluzione e profondità di campo

# Erogazione di microonde



External Magnet



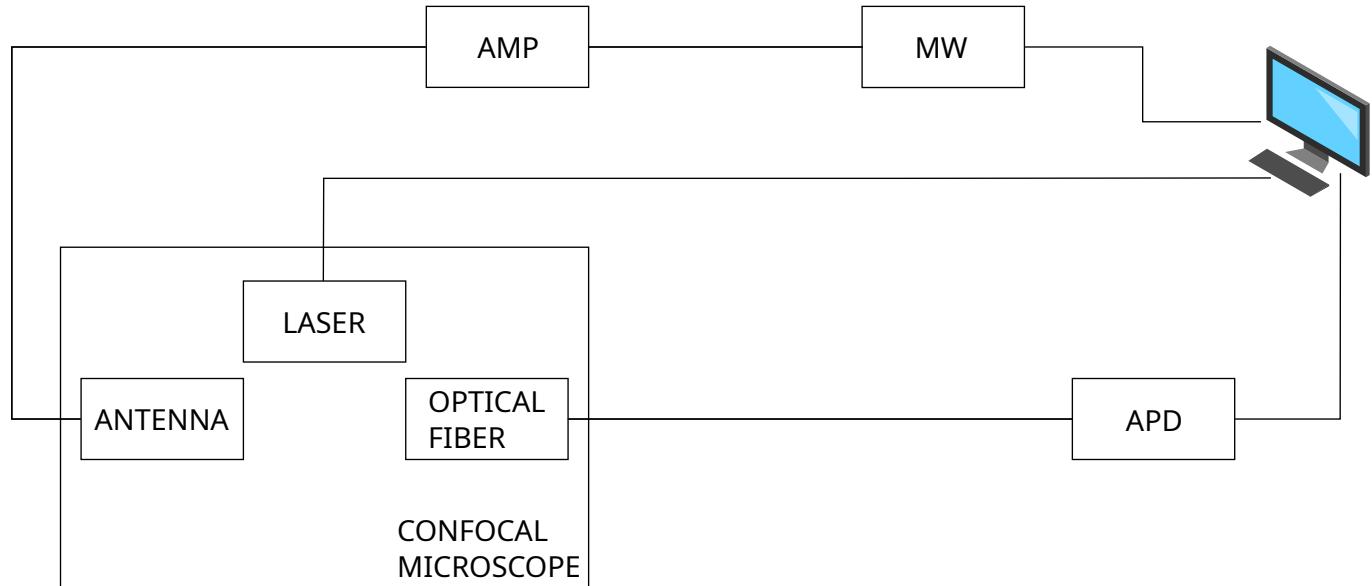
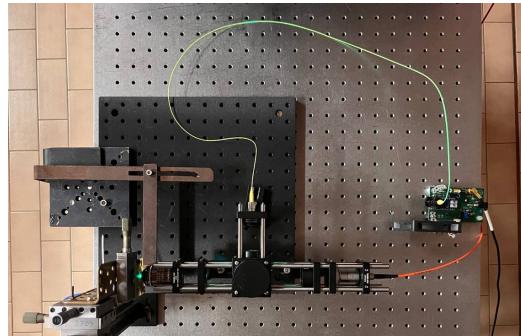
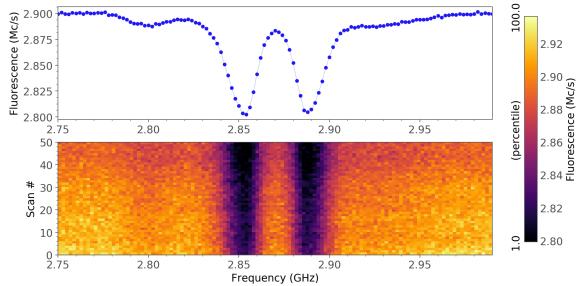
- Antenna MW

- Ottimizzata per l'invio di microonde per il controllo dello spin del complesso NV
- Genera un campo magnetico omogeneo nella zona occupata dal campione

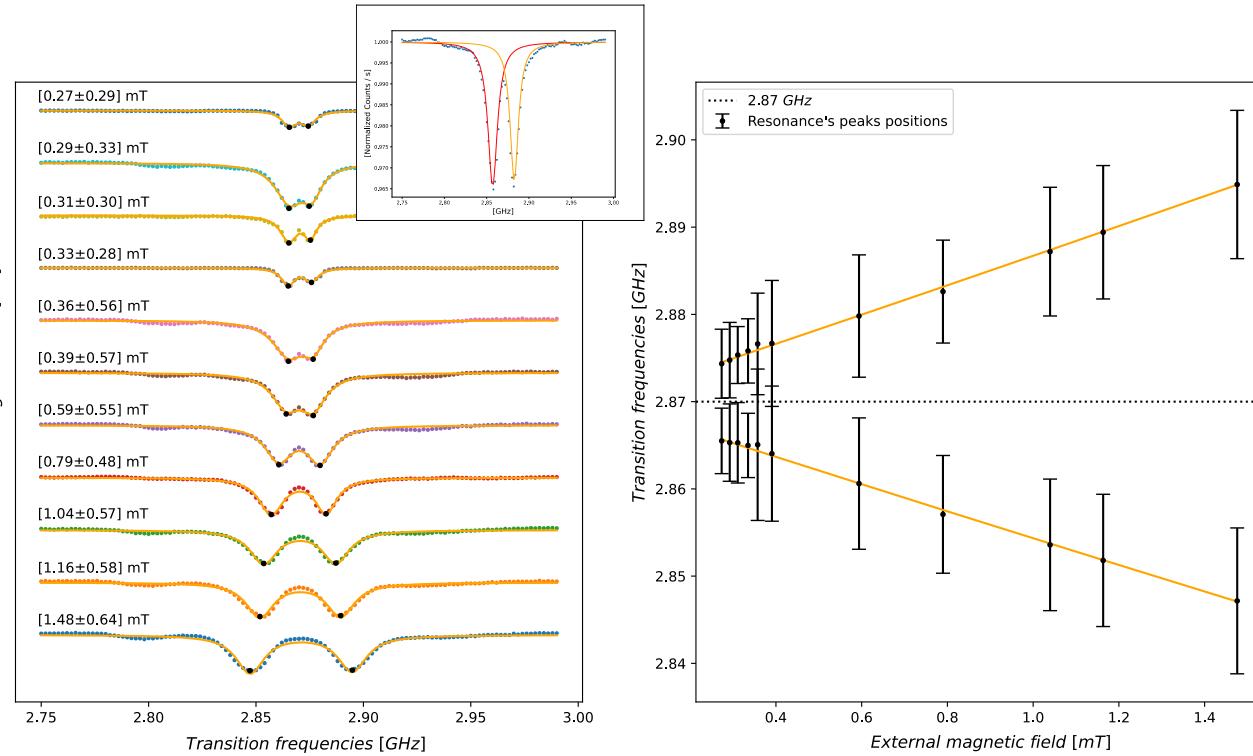
- Campione

- Diamante CVD [Chemical Vapour Deposition]
- $[N] = 10 \text{ ppm}$ ;  $[\text{NV}] = 1 \% [\text{N}]$
- $O(10^4)$  centri NV/ $\mu\text{m}^3$

# Configurazione di lavoro

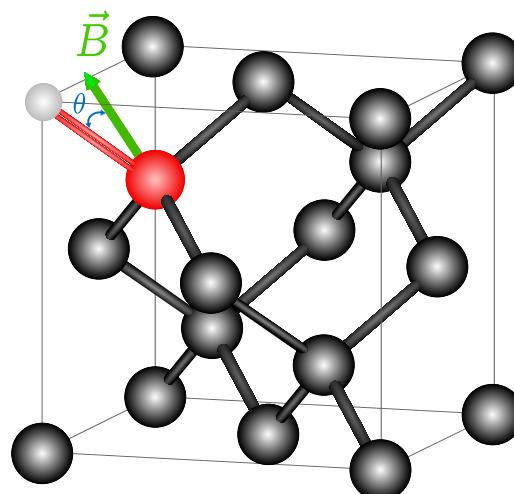
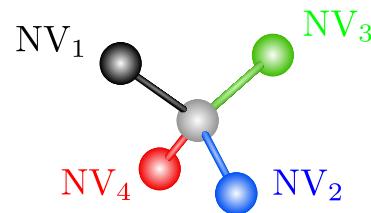
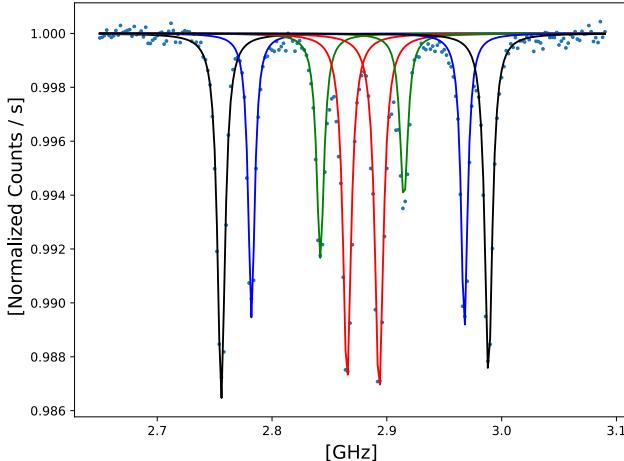


# Magnetometria ODMR con campo magnetico omogeneo



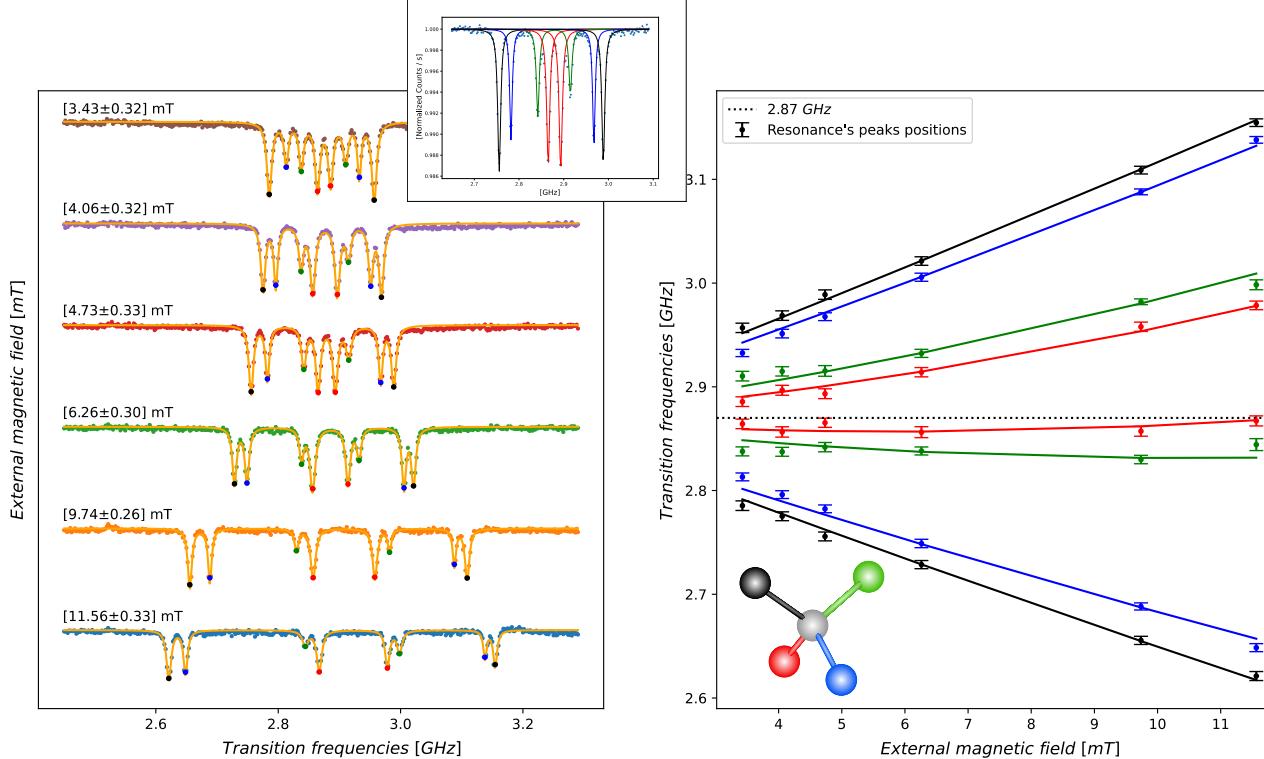
- Campo magnetico omogeneo nelle 4 direzioni del difetto
  - Lo splitting Zeeman è uguale in ogni orientazione
- Gli spettri sono fittati con lorenziane
  - $\Delta\nu_i = \nu_{i[+1]} - \nu_{i[-1]}$
  - $B_i = \Delta\nu_i / 2\gamma_{nv}$
- Magnete avvicinato gradualmente
- Andamento teorico verificato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

# Direzionalità del campo magnetico



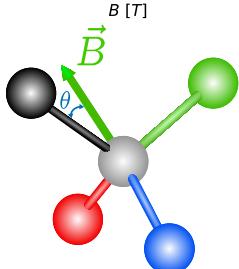
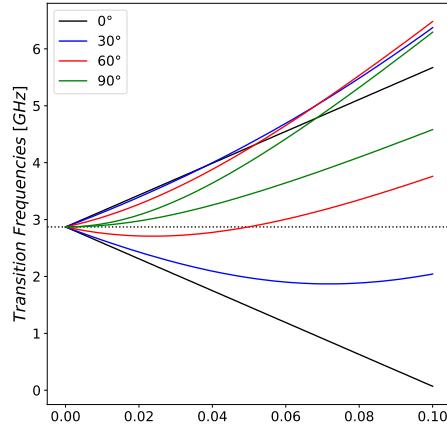
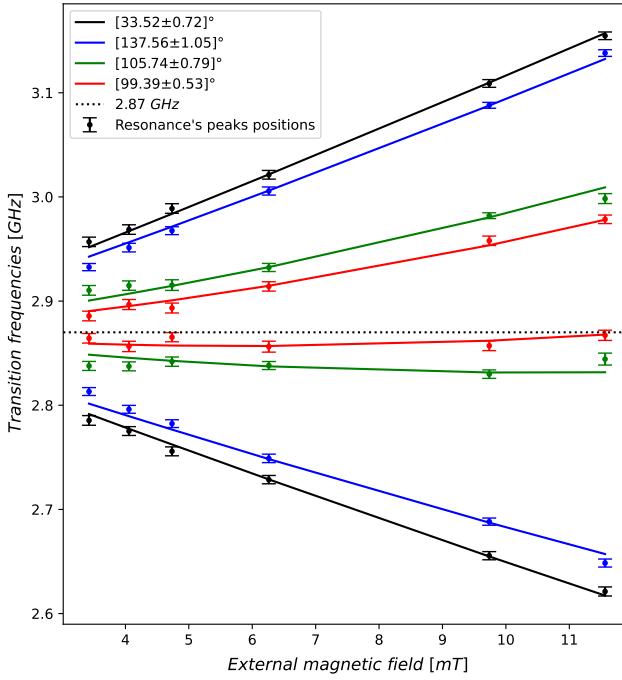
- Proiezioni di  $\vec{B}$  differenti in modulo lungo le 4 orientazioni del complesso
- Si osservano 4 coppie di frequenze di risonanza  $[NV_i]$ 
  - $\vec{B} \cdot \hat{u}_i = \Delta\nu_i/2\gamma_{nv} = B_i$

# 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

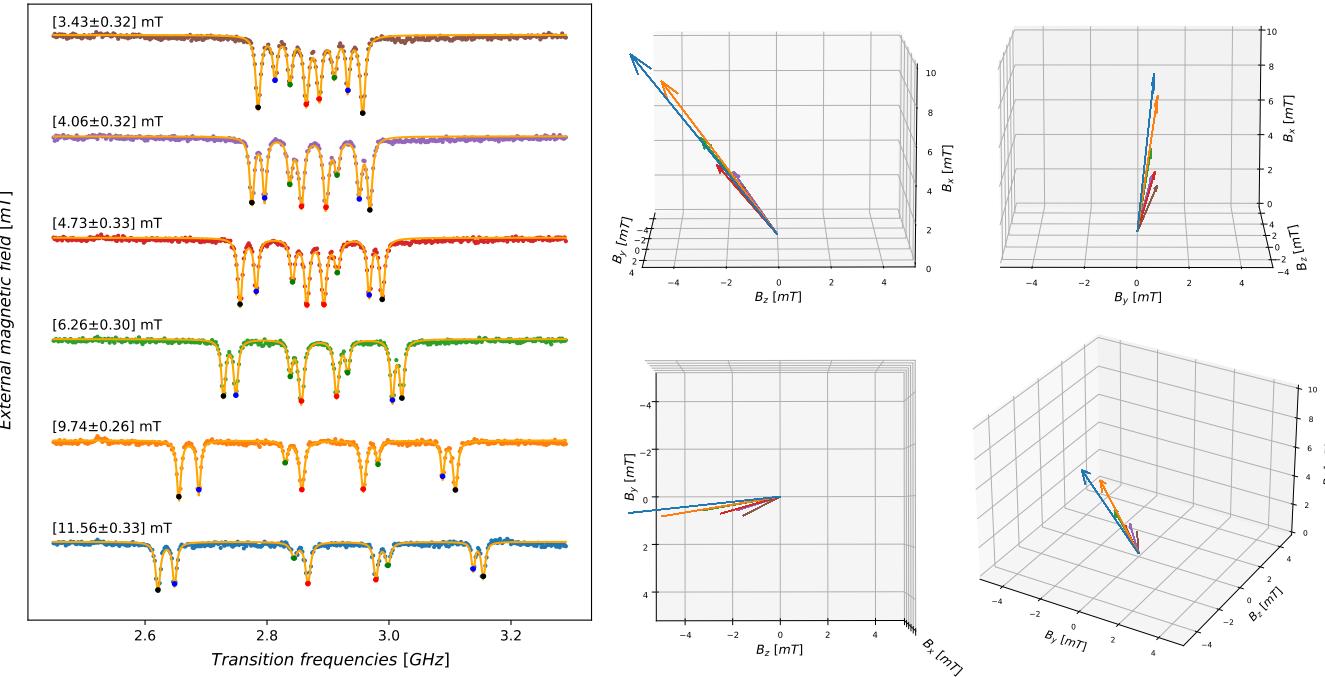
# Considerazioni aggiuntive sull'hamiltoniana



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

- $H_{\perp} \ll H_{||}$  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



- 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  $0.3 \text{ mT}$  ]
  - 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 coerente sullo stato di spin dell'ensemble di difetti
  - Incremento della risoluzione magnetica con tecniche di readout di spin
  - Processamento informazione quantistica
    - QBIT

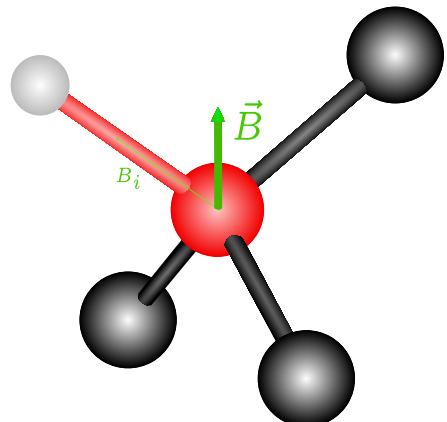
# Grazie per l'attenzione

*Ringrazio in particolare **Jacopo Forneris** e **Sviatoslav Ditalia Tchernij** per la disponibilità con cui mi hanno seguito in questi mesi*

## Fonti:

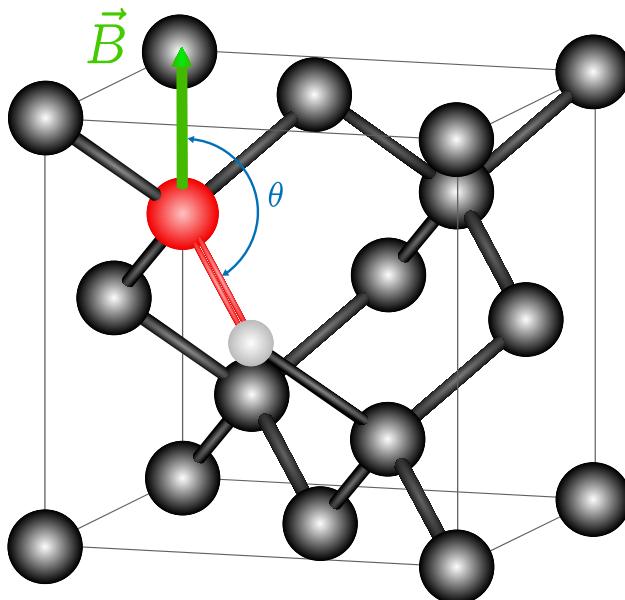
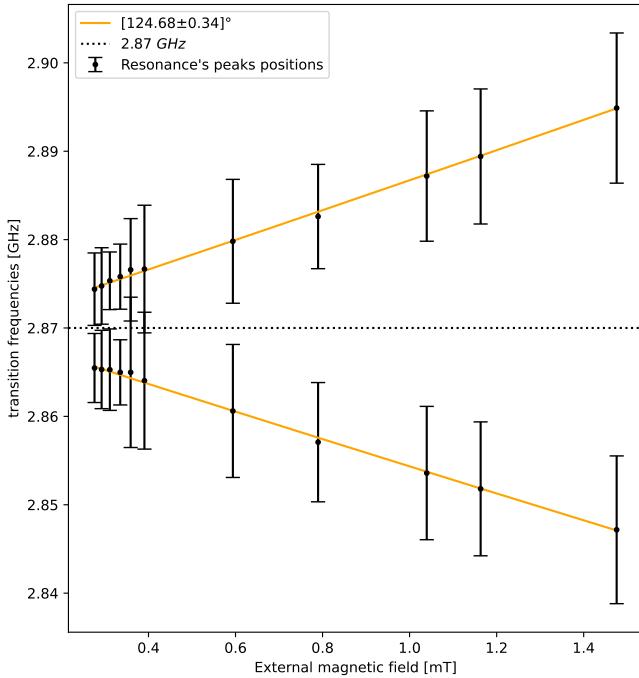
- L. Rondin *et al.*, 'Magnetometry with nitrogen-vacancy defects in diamond', *Rep. Prog. Phys.* **77** (2014) 056503
- E. Abe *et al.*, 'Tutorial: Magnetic resonance with nitrogen-vacancy centers in diamond—microwave engineering, materials science, and magnetometry', *J. Appl. Phys.* **123**, 161101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

# Calcolo vettore B



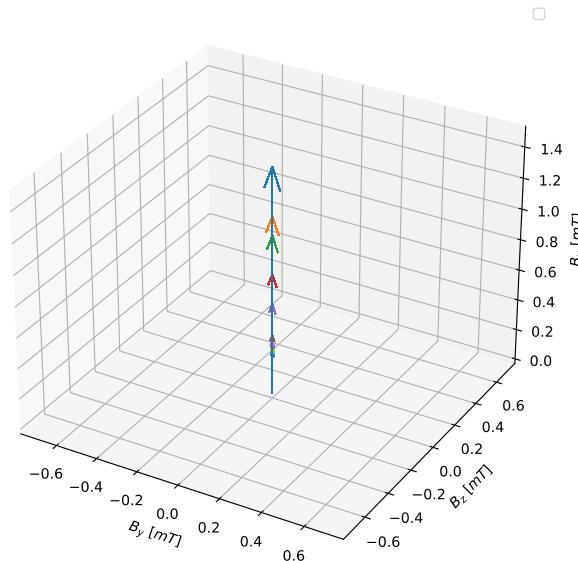
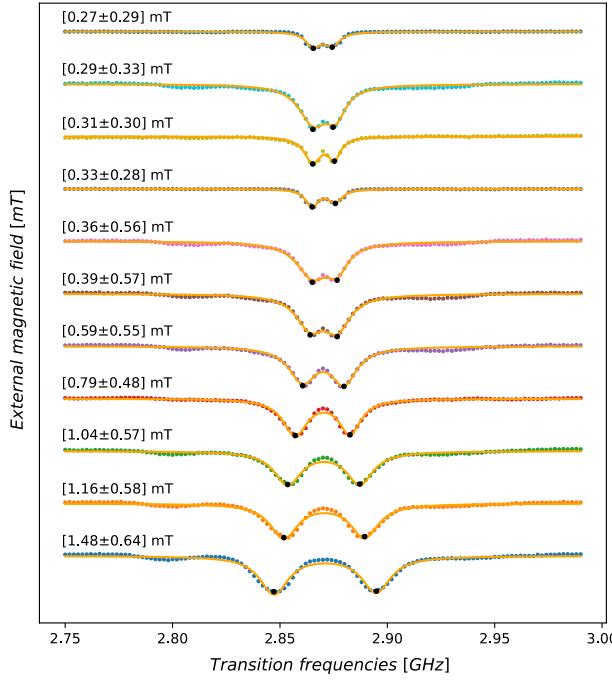
- Calcolo delle permutazioni dei versori (segno compreso)
  - $[\hat{u}_1, \hat{u}_2, \hat{u}_3, \hat{u}_4]; [-1, -1, 1, 1]$
- $\begin{cases} \vec{B} \cdot \hat{u}_{list}[i]_1 = B_1 \\ \vec{B} \cdot \hat{u}_{list}[i]_2 = B_2 \\ \vec{B} \cdot \hat{u}_{list}[i]_3 = B_3 \end{cases}$
- Seleziono la permutazione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



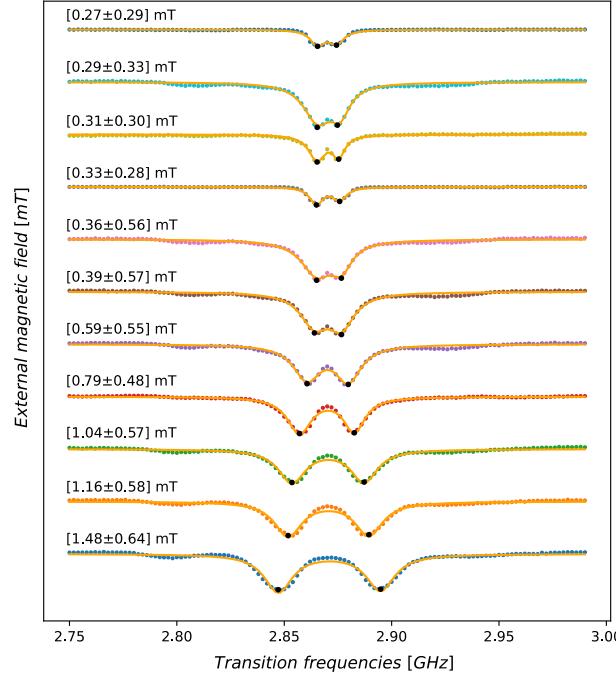
- Gli angoli teoricamente accettabili affinchè i moduli  $B_i$  siano identici sono:
  - $\theta_1 = 109.5^\circ / 2 = 54.75^\circ$
  - $\theta_2 = 180^\circ - 54.75^\circ = 125.5^\circ$

# Calcolo vettore B per risonanze degeneri



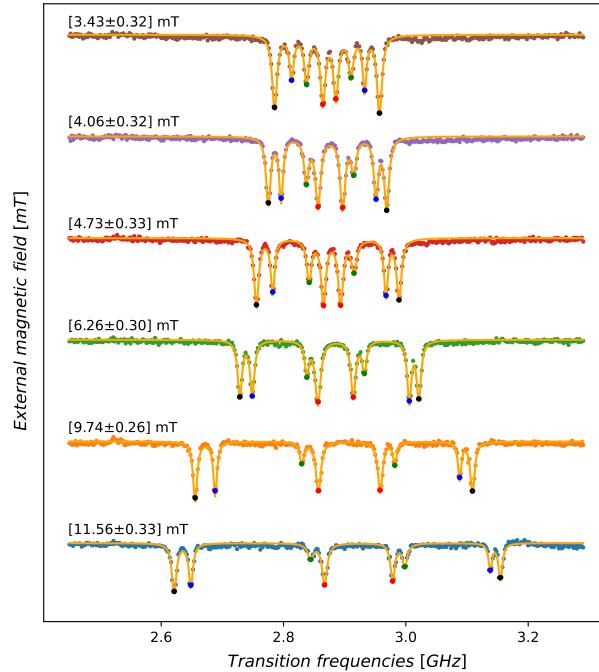
- 4 Risonanze degeneri
- $B_i$  tutti uguali in modulo
- Incertezza sulla direzione da attribuire

# Calcolo vettore B per risonanze degeneri



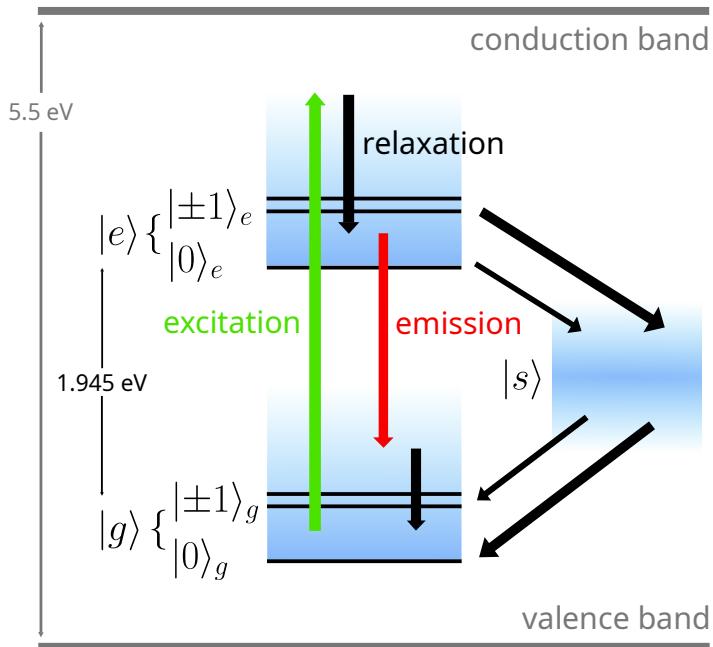
Calculated			Hall	
$B_x \text{ [mT]}$	$B_y \text{ [mT]}$	$B_z \text{ [mT]}$	$B_x \text{ [mT]}$	$B_z \text{ [mT]}$
$0.27 \pm 0.17$	$0.00 \pm 0.17$	$0.00 \pm 0.17$	$0.27 \pm 0.11$	$0.13 \pm 0.11$
$0.29 \pm 0.19$	$0.00 \pm 0.19$	$0.00 \pm 0.19$	$0.28 \pm 0.11$	$0.15 \pm 0.11$
$0.31 \pm 0.17$	$0.00 \pm 0.17$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

# Calcolo vettore B per risonanze non degeneri



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

# Livelli energetici



- 2 Tripletto:

- Stato fondamentale
- Stato eccitato

- 1 Singoletto

- Stato metastabile

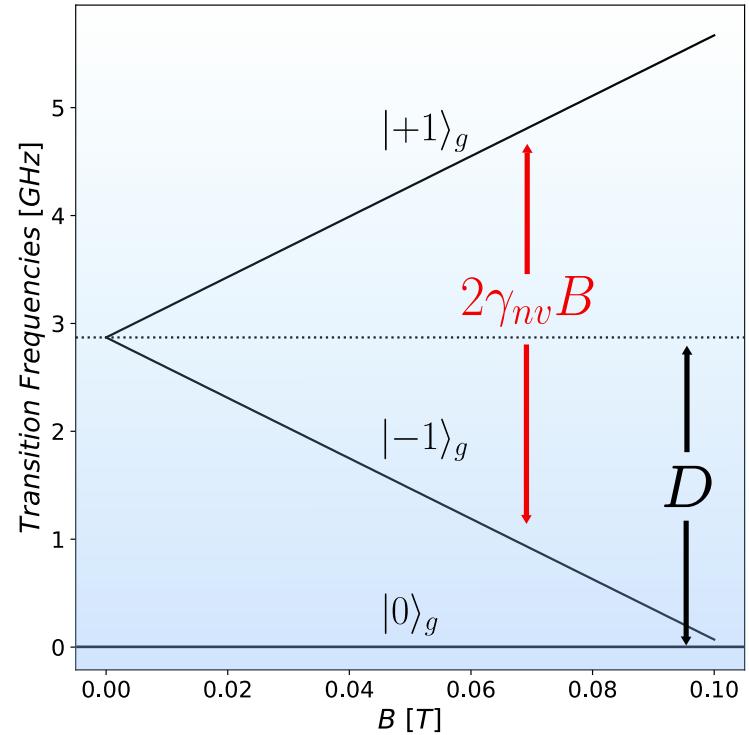
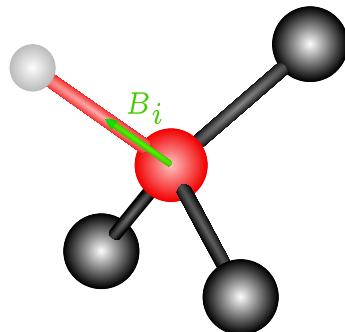
- Eccitazione: 532 nm

- Emissione: 638 nm

# Autovalori hamiltoniana

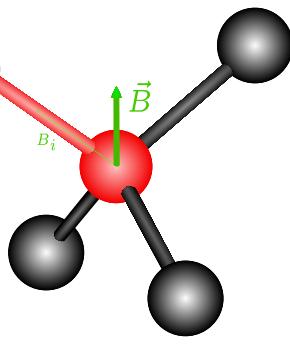
$$\hat{H} = \hbar D \hat{S}_z^2 + \hbar \gamma_{nv} B_z \hat{S}_z$$

- Allineamento tra  $B_z$  e l'asse del complesso NV
- 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

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



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

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

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

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

