

ICTイノベーションフォーラム2012

2012. 10. 2 幕張メッセ 国際会議場

# 室温固体素子を用いた 量子中継器実現へ向けた研究開発

研究代表者

小坂 英男

(東北大学電気通信研究所)

研究分担者

水落 憲和 (大阪大学基礎工学部)

力武 克彰 (仙台高等専門学校)

# 発表内容

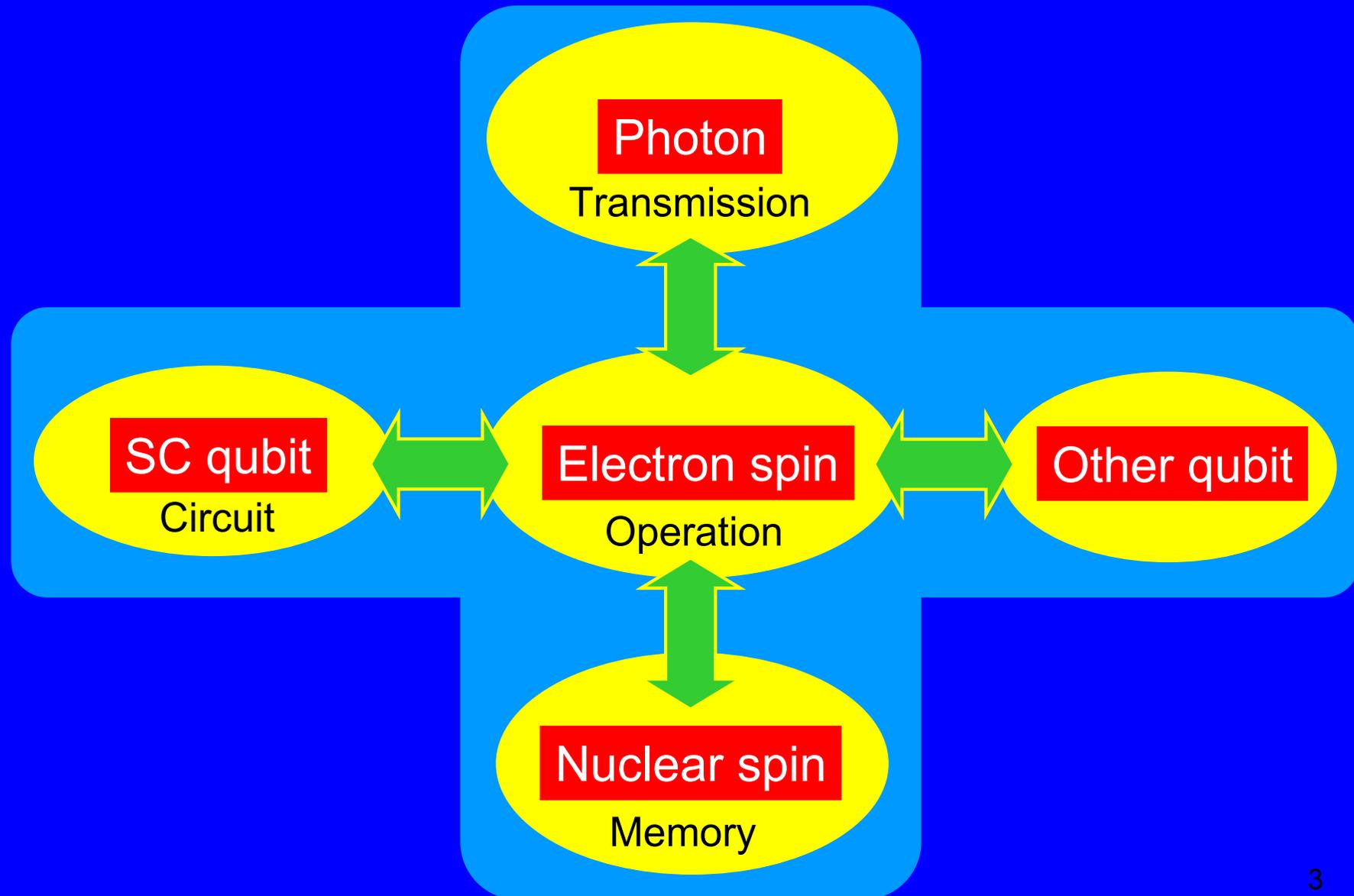
## 1. 研究の背景

ハイブリッド量子システム  
量子中継

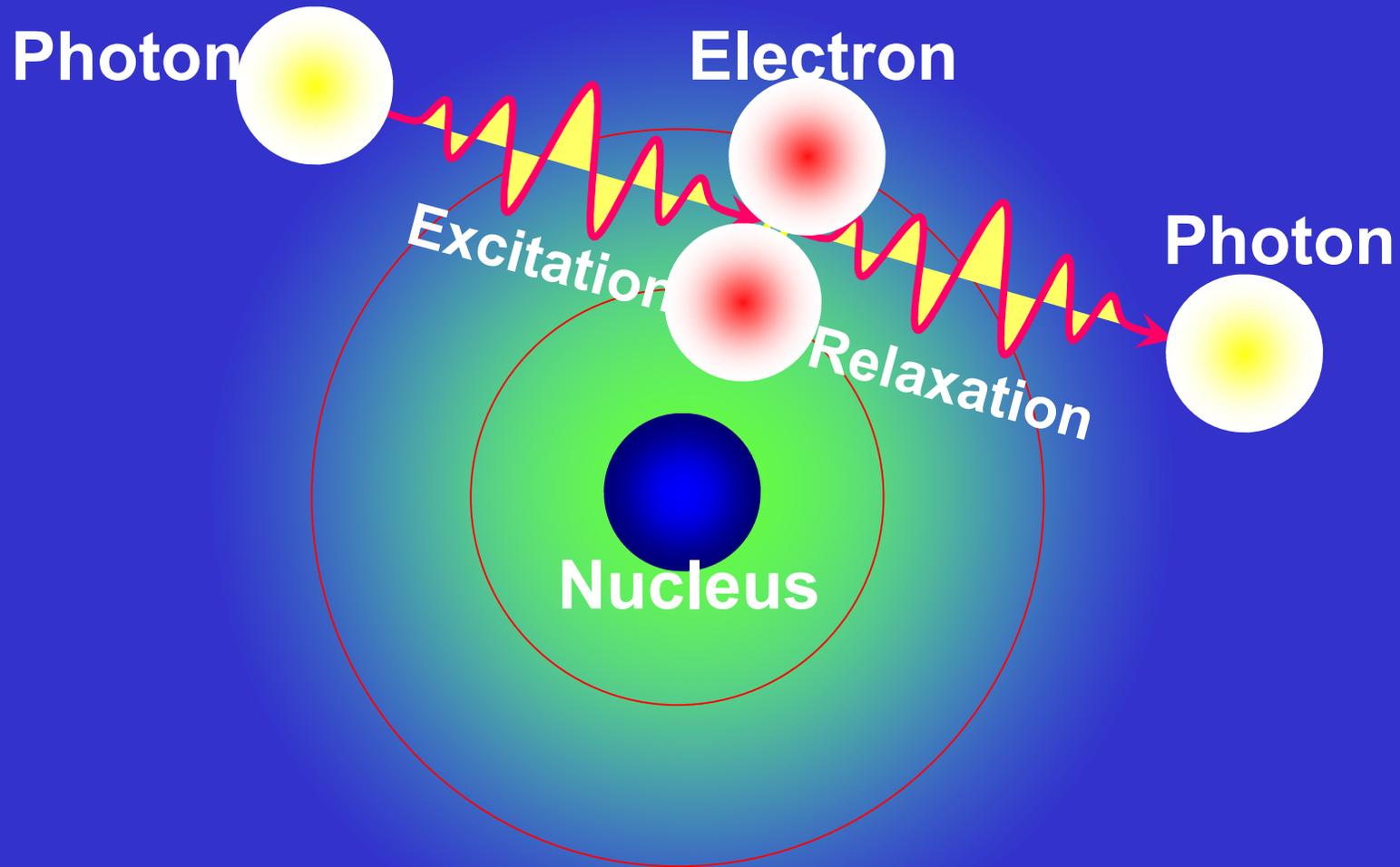
## 2. ダイヤモンドを用いた光子から核スピン への量子メディア変換

## 3. 核スピんに記録された2量子ビット間 の量子もつれ検出

# ハイブリッド固体量子システム



# Quantum Media Conversion

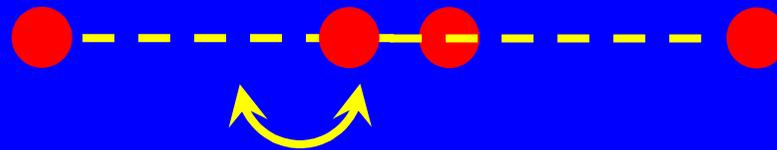


**Quantum Energy Conversion**

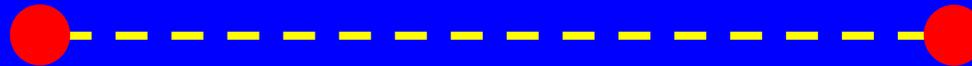
**Quantum Information Conversion**

# Quantum Repeater

## 1. Entanglement Generation

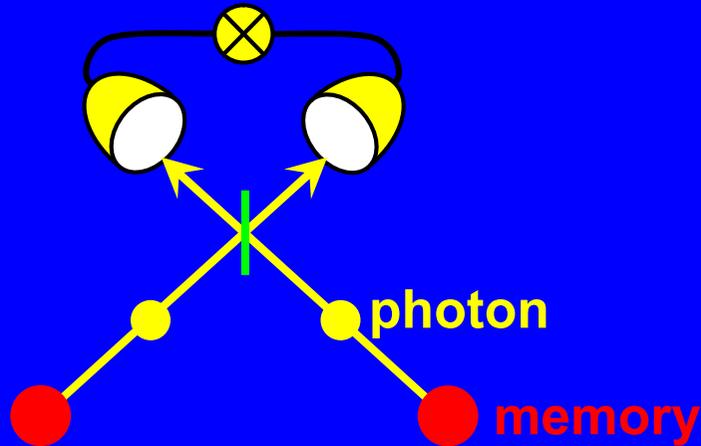


## 2. Entanglement Swapping

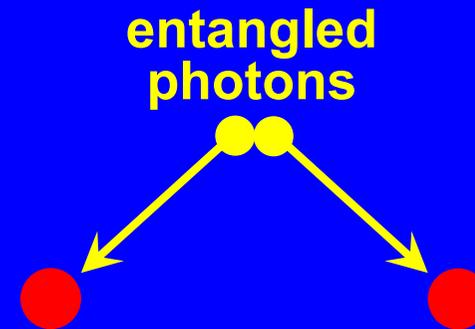


# Entanglement Generation

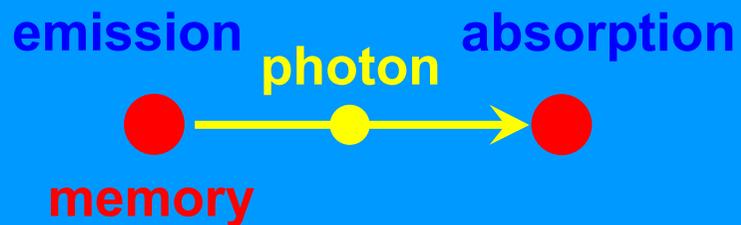
## 1. Emission



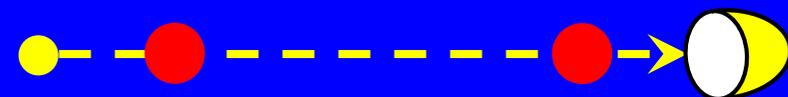
## 2. Absorption



## 3. Emission & Absorption

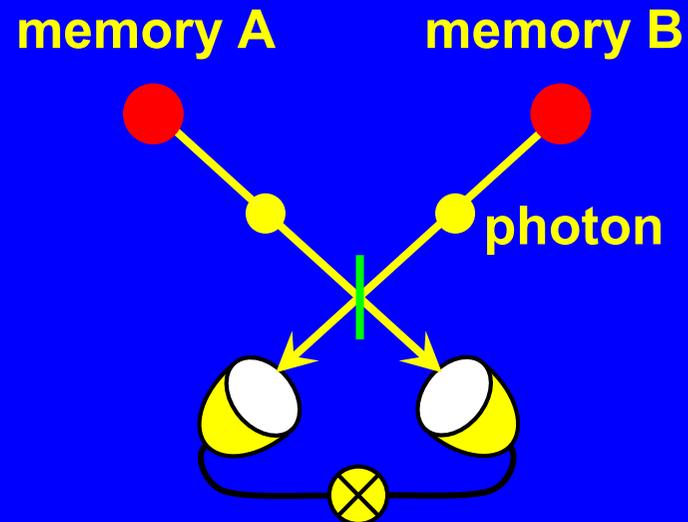


## 4. Scattering

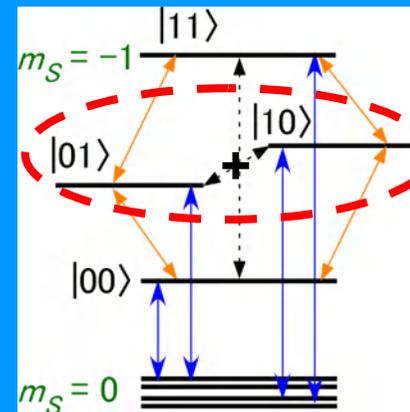
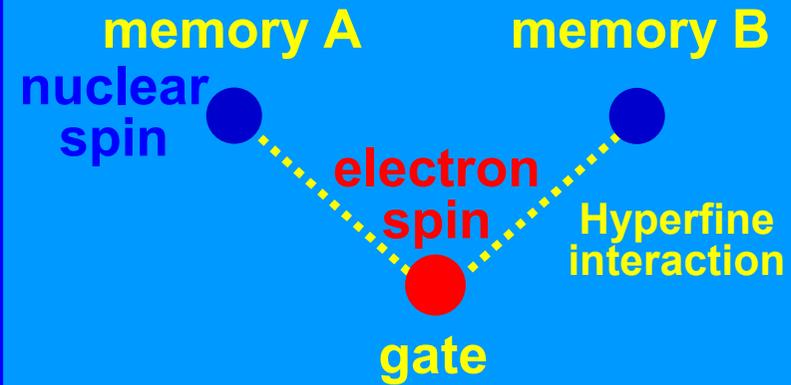


# Entanglement Swapping

## 1. Emission

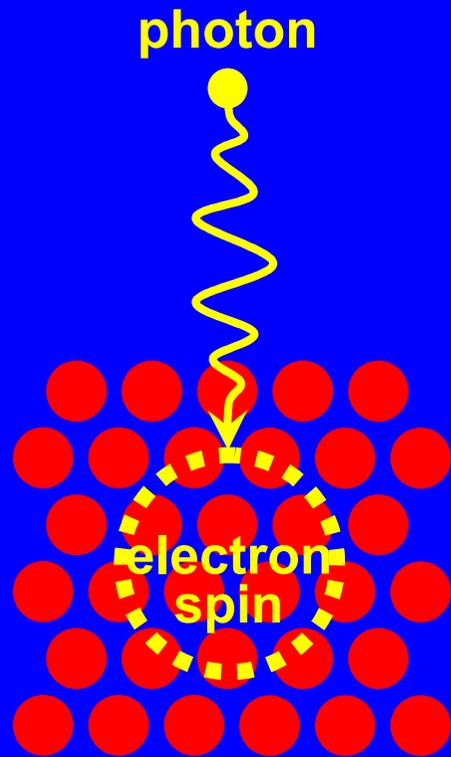


## 2. Local operation



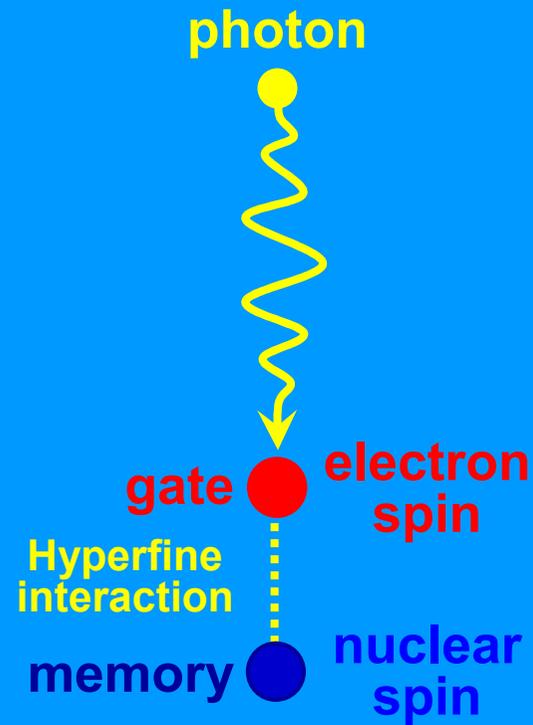
# Memory Configuration

## 1. Ensemble system



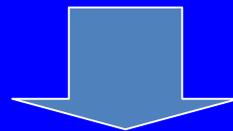
Collective  
single excitation  
(W state)

## 2. Single system

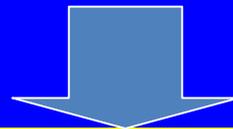


# Requirements for Memory

- Initialize
- Write
- Read out
- Gate operation
- Scalability

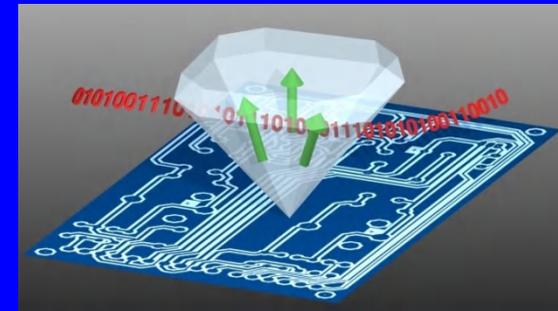
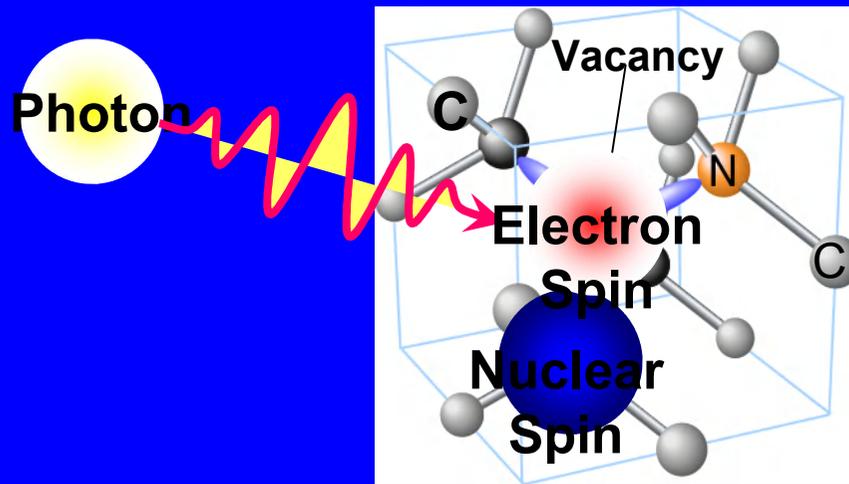


High fidelity



Long coherence time

# Material System for Memory



1. NV center in diamond
2. Semiconductor quantum dot
3. Rare-earth impurity in crystal

# 発表内容

## 1. 研究の背景

ハイブリッド量子システム  
量子中継

2. ダイヤモンドを用いた光子から核スピン  
への量子メディア変換

3. 核スピンに記録された2量子ビット間  
の量子もつれ検出

# Diamond NV center

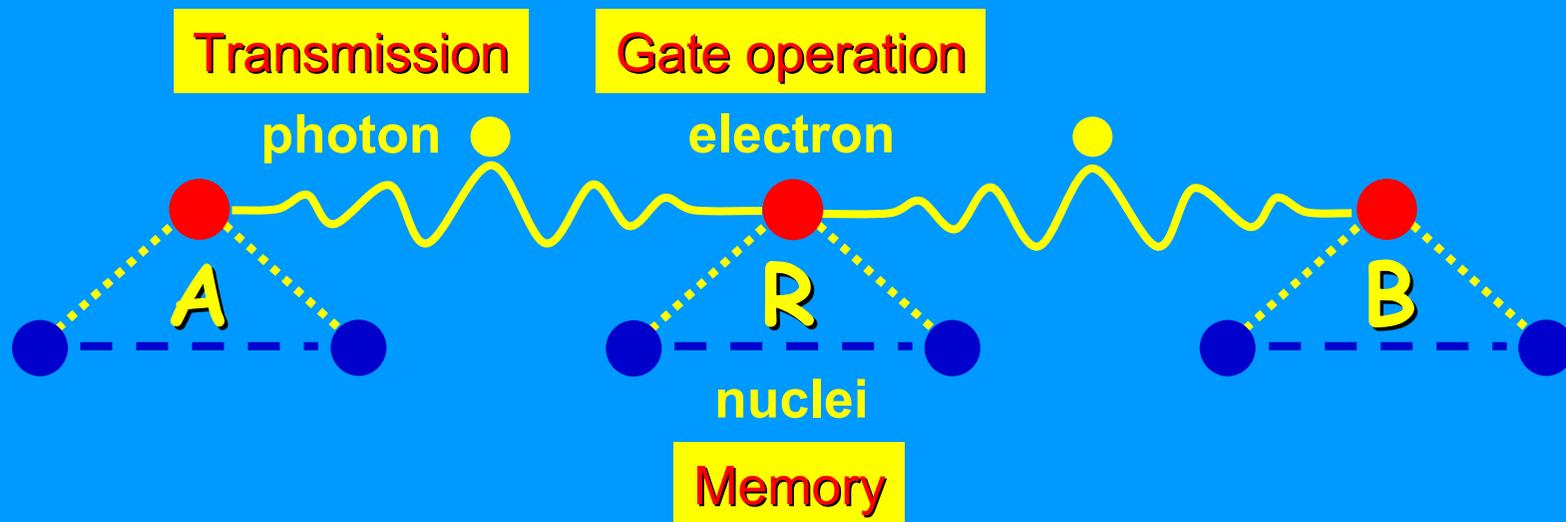
## Demonstrated features



- **Long coherence time** ( $T_2^e > 1 \text{ ms}$  &  $T_2^n > 1 \text{ s}$  at RT)
- Single electron/nuclear spin manipulation
  - **Gate operation**
- Optical pumping of electron/nuclear spins at RT
  - **Initialization**
- **Entanglement** generation between spins and photons
- Quantum non-demolition measurement of a nuclear spin
  - **Read out**
- Multiple quantum memories on nuclear spins
  - **Scalability**
- **Long coherence** of nuclear spin Bell-states ( $T_2 = 5 \text{ ms}$  at RT)

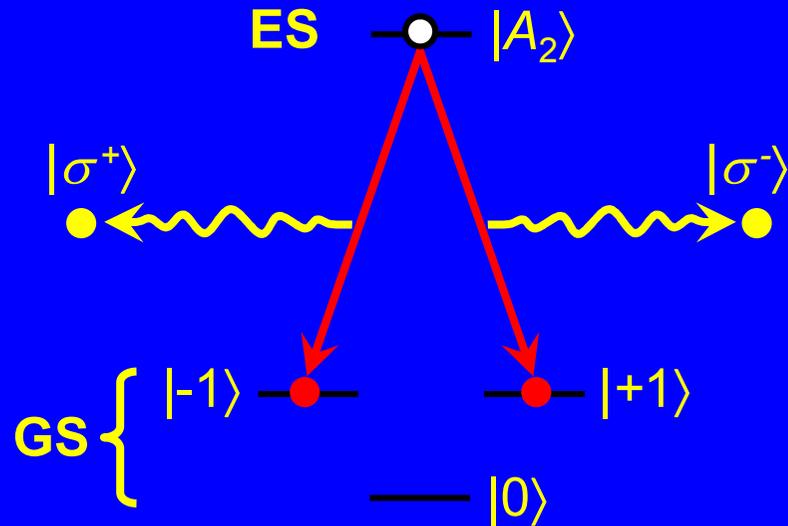
**Writing function has not yet been demonstrated** <sup>12</sup>

# Hybrid Quantum Repeater

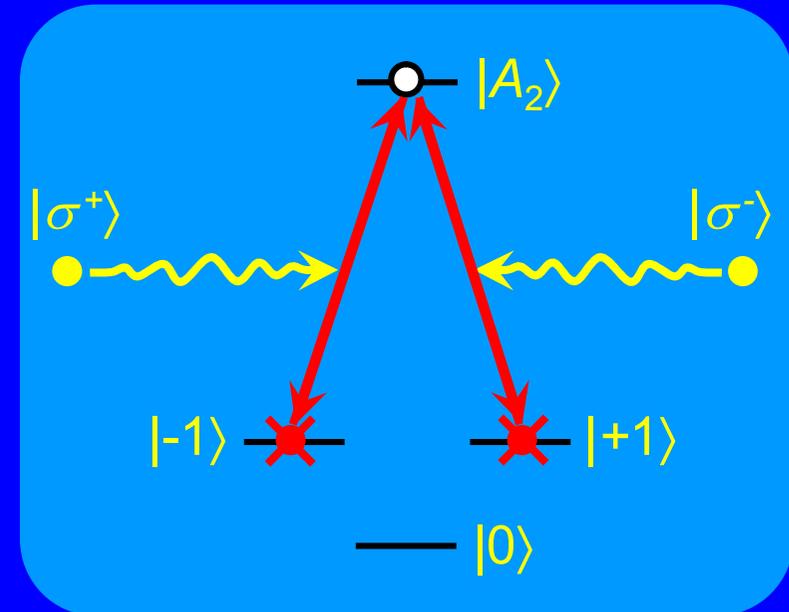


# Emission and Absorption

## 1. Emission

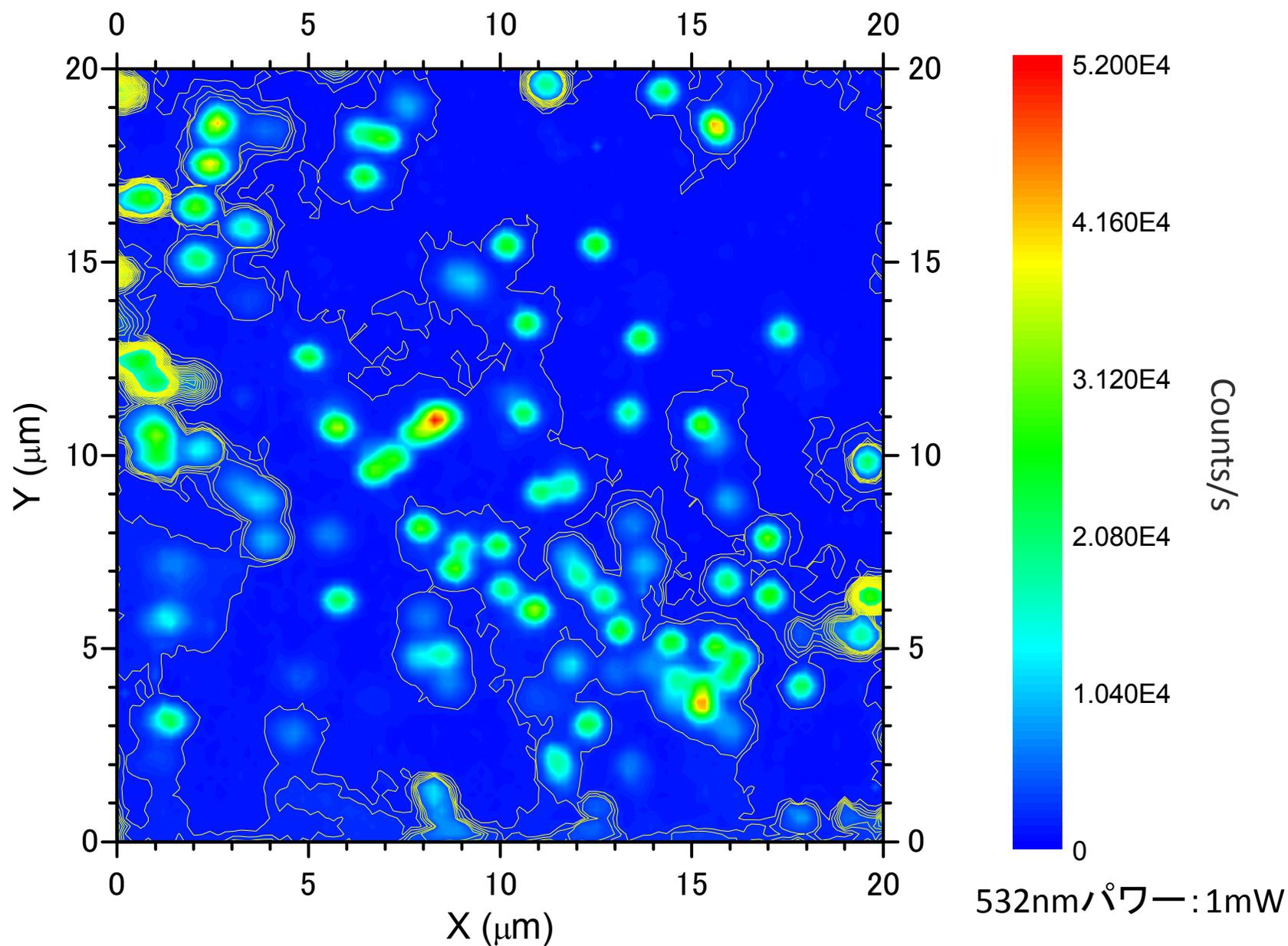


## 2. Absorption

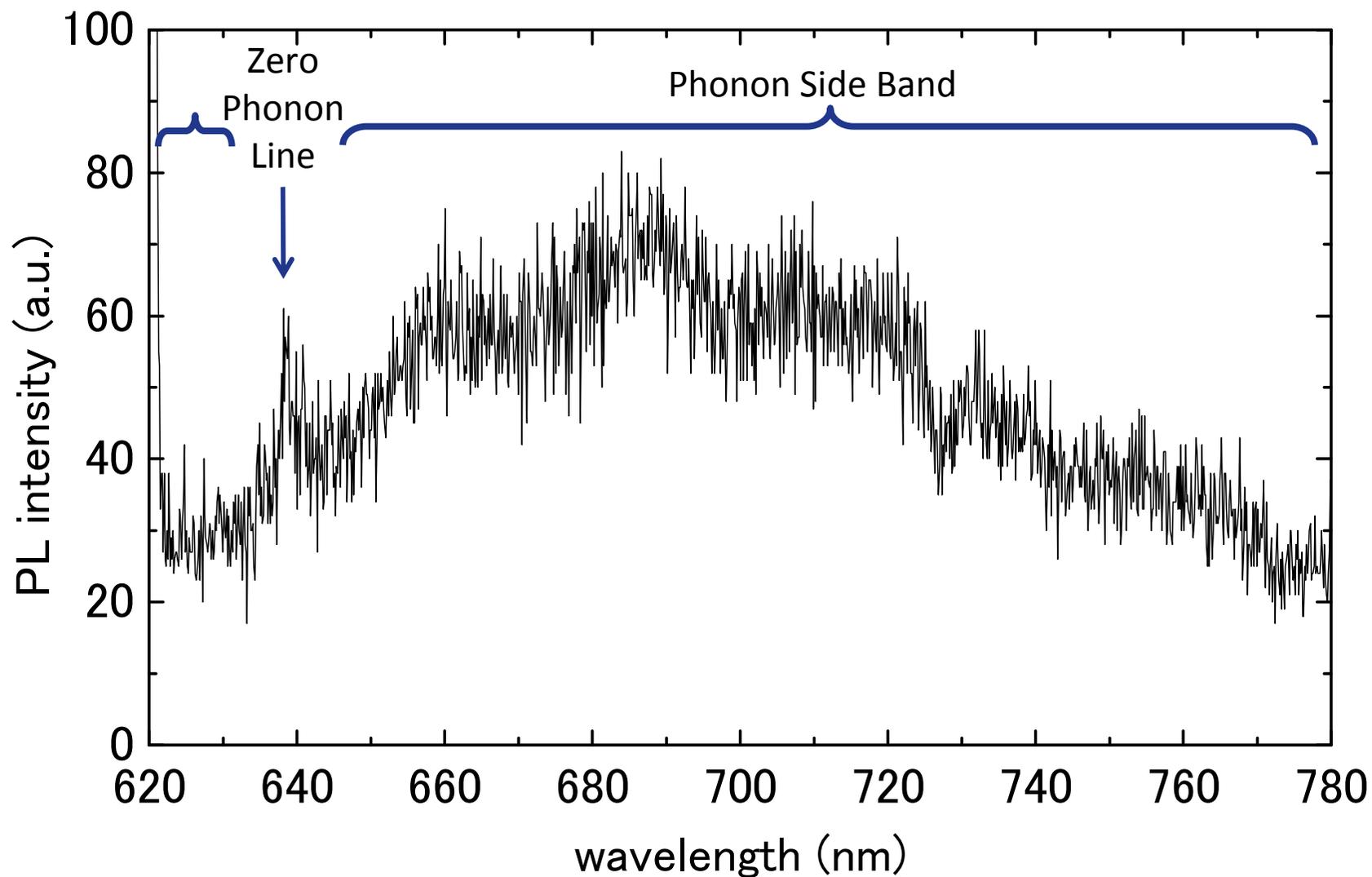


	orbit spin	photon spin
ES	$ A_2\rangle =  E_- \rangle \otimes  +1\rangle +  E_+ \rangle \otimes  -1\rangle$	$ \star^+\rangle =  \sigma^- \rangle \otimes  +1\rangle +  \sigma^+ \rangle \otimes  -1\rangle$
	$ A_1\rangle =  E_- \rangle \otimes  +1\rangle -  E_+ \rangle \otimes  -1\rangle$	
	$ E_x\rangle =  X\rangle \otimes  0\rangle$	
	$ E_y\rangle =  Y\rangle \otimes  0\rangle$	
	$ E_1\rangle =  E_- \rangle \otimes  -1\rangle -  E_+ \rangle \otimes  +1\rangle$	
	$ E_2\rangle =  E_- \rangle \otimes  -1\rangle +  E_+ \rangle \otimes  +1\rangle$	

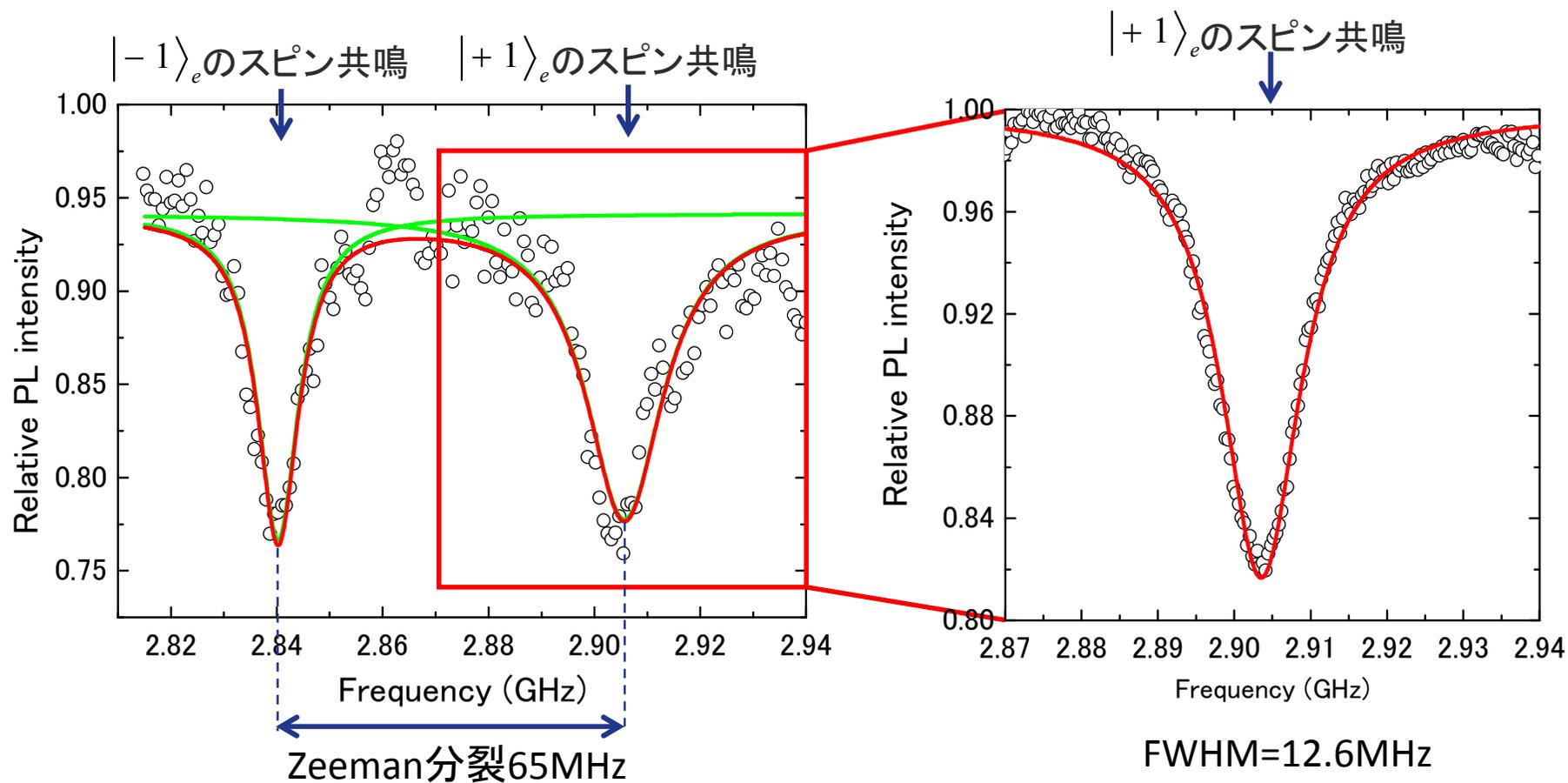
# 実験結果 室温におけるNV中心発光イメージ



# 実験結果 室温における単一NV発光スペクトル



# 実験結果 室温における単一NVの光検出磁気共鳴

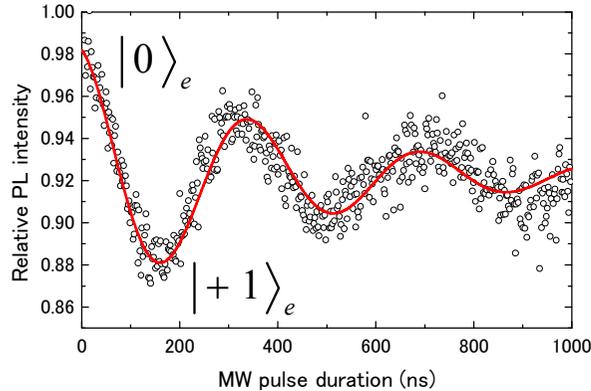


- $| 0 \rangle_e$  と  $| +1 \rangle_e$ ,  $| -1 \rangle_e$  の間の電子スピ共鳴の観測
- $| 0 \rangle_e$  と  $| +1 \rangle_e$  の共鳴周波数の確認

# 実験結果 室温における単一NVのラビ振動

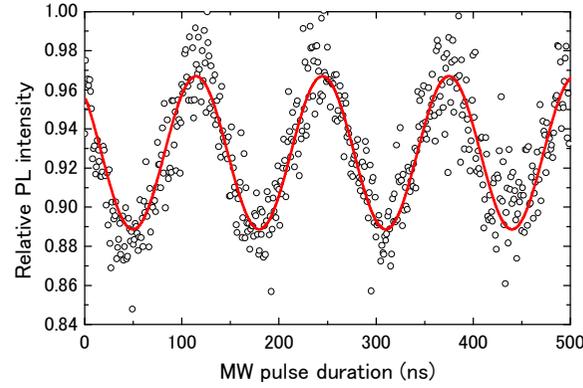
## ◆ Rabi振動波形

▪ MW power: 3.2mW



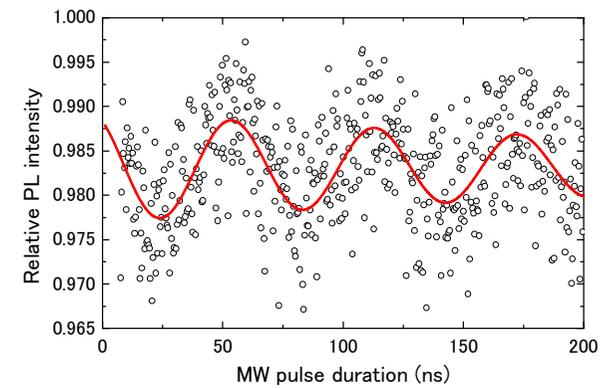
$T=350\text{ns}$ ,  $\Omega = 2\pi \cdot 2.8\text{MHz}$   
(Accum. #146)

▪ MW power: 32mW



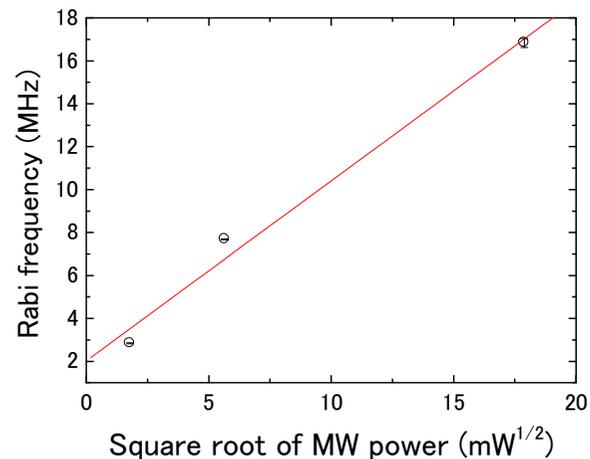
$T=130\text{ns}$ ,  $\Omega = 2\pi \cdot 7.7\text{MHz}$   
(Accum. #56)

▪ MW power: 320mW



$T=59\text{ns}$ ,  $\Omega = 2\pi \cdot 17.0\text{MHz}$   
(Accum. #635)

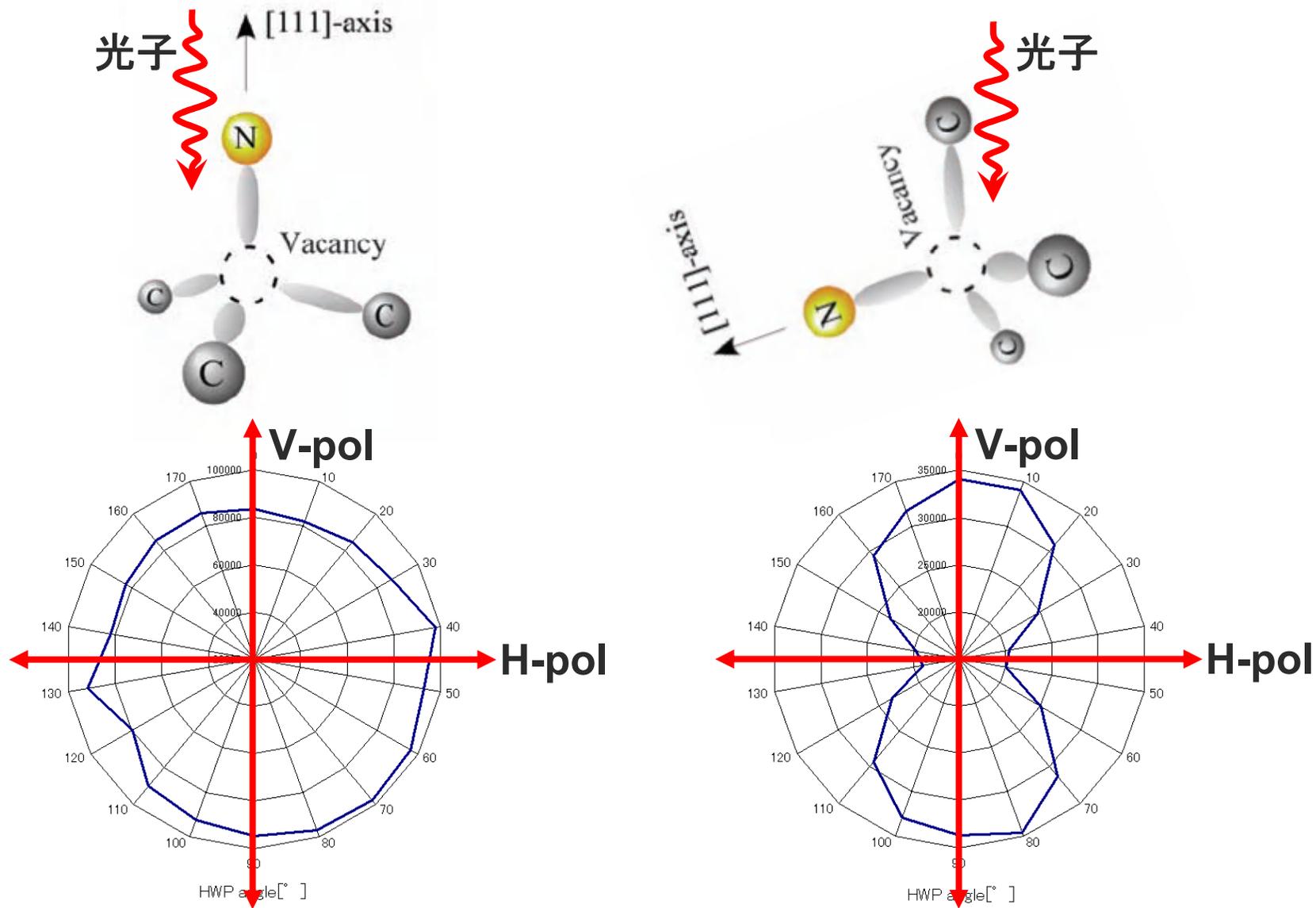
## ◆ Rabi周波数のMWパワー依存性



532nmレーザーパワー: 1mW  
温度: 室温

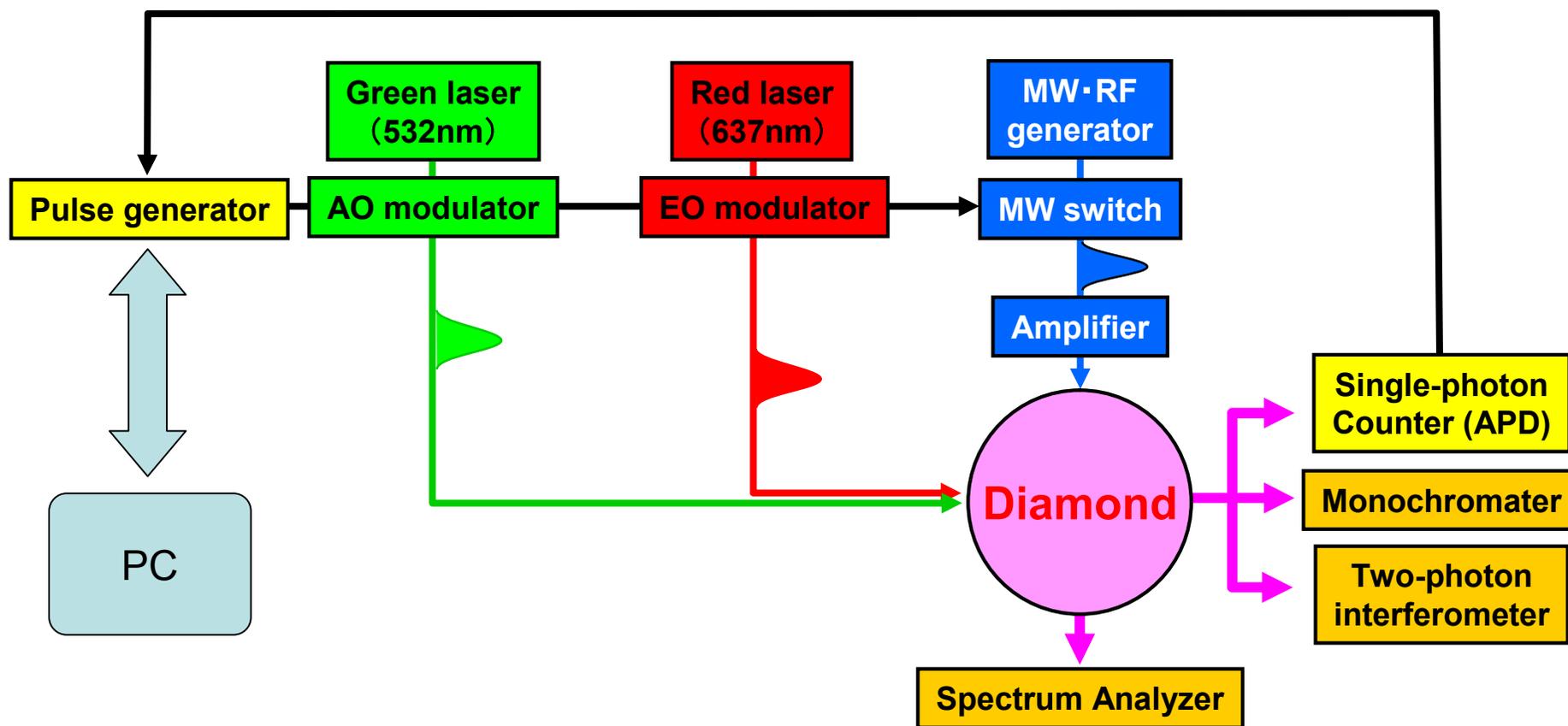
- $|0\rangle_e$  と  $|+1\rangle_e$  の間のRabi振動を観測  
→コヒーレント操作の達成
- $\Omega \propto \sqrt{I_{MW}}$

# 実験結果 室温における単一NVの偏光依存性



■ 偏光状態の転写に必要な偏光依存性の取得

# 開発したダイヤモンド量子状態転写評価システム



# 発表内容

## 1. 研究の背景

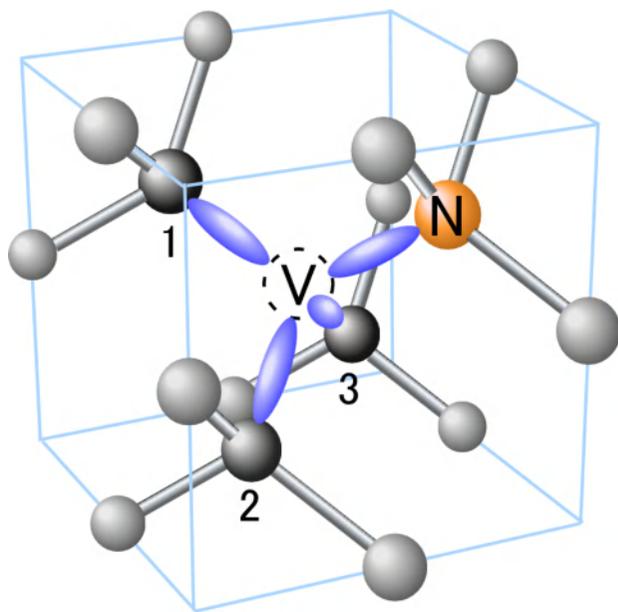
ハイブリッド量子システム  
量子中継

## 2. ダイヤモンドを用いた光子から核スピン への量子メディア変換

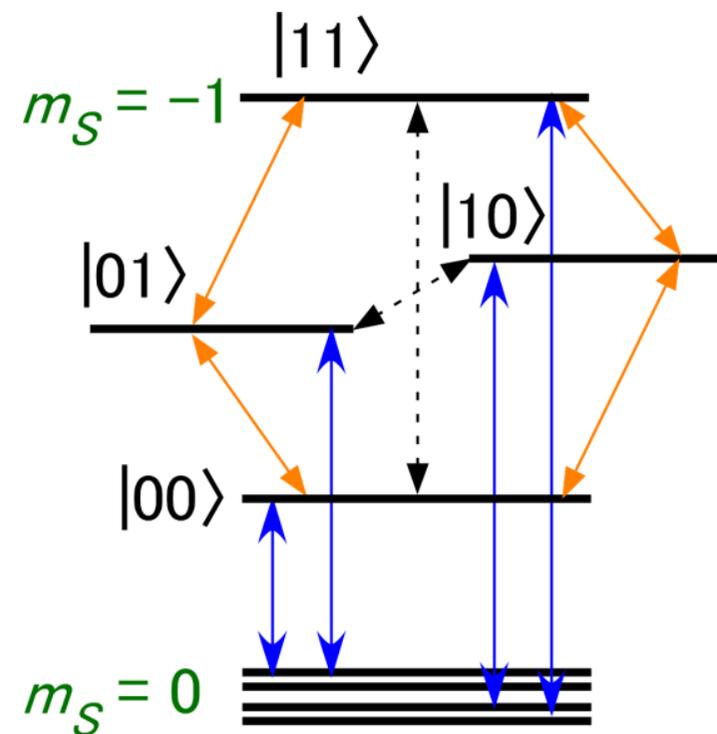
## 3. 核スピんに記録された2量子ビット間 の量子もつれ検出

# 2核スピン間のもつれ生成と読み出し

NV center with 2 NN  $^{13}\text{C}$



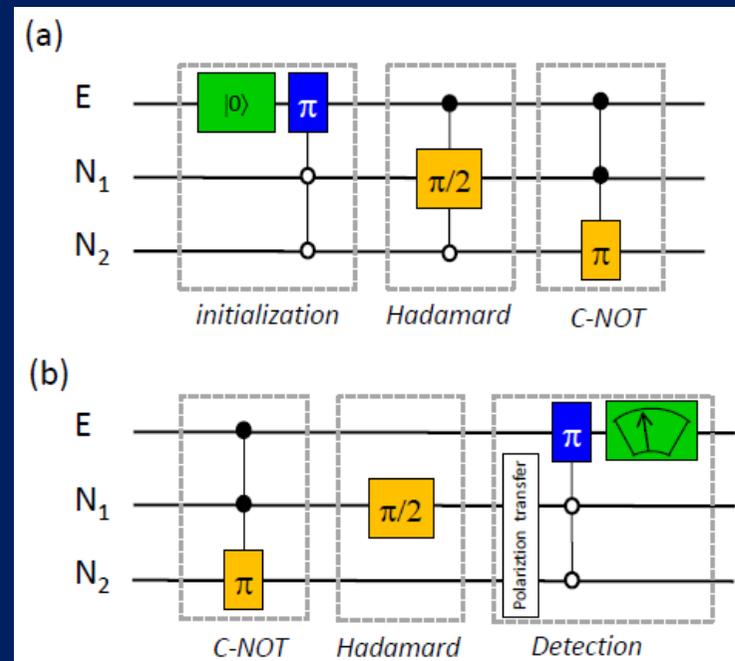
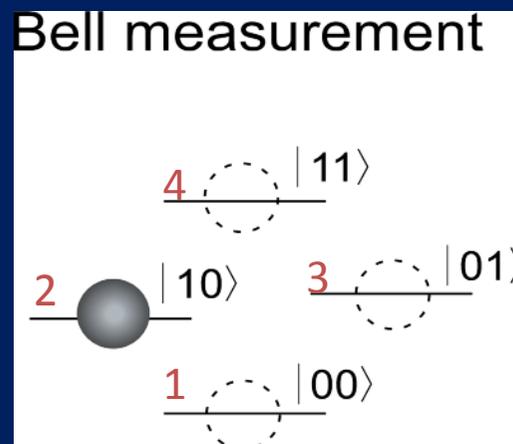
4 states with 2 nuclear spins



# ベル測定実験

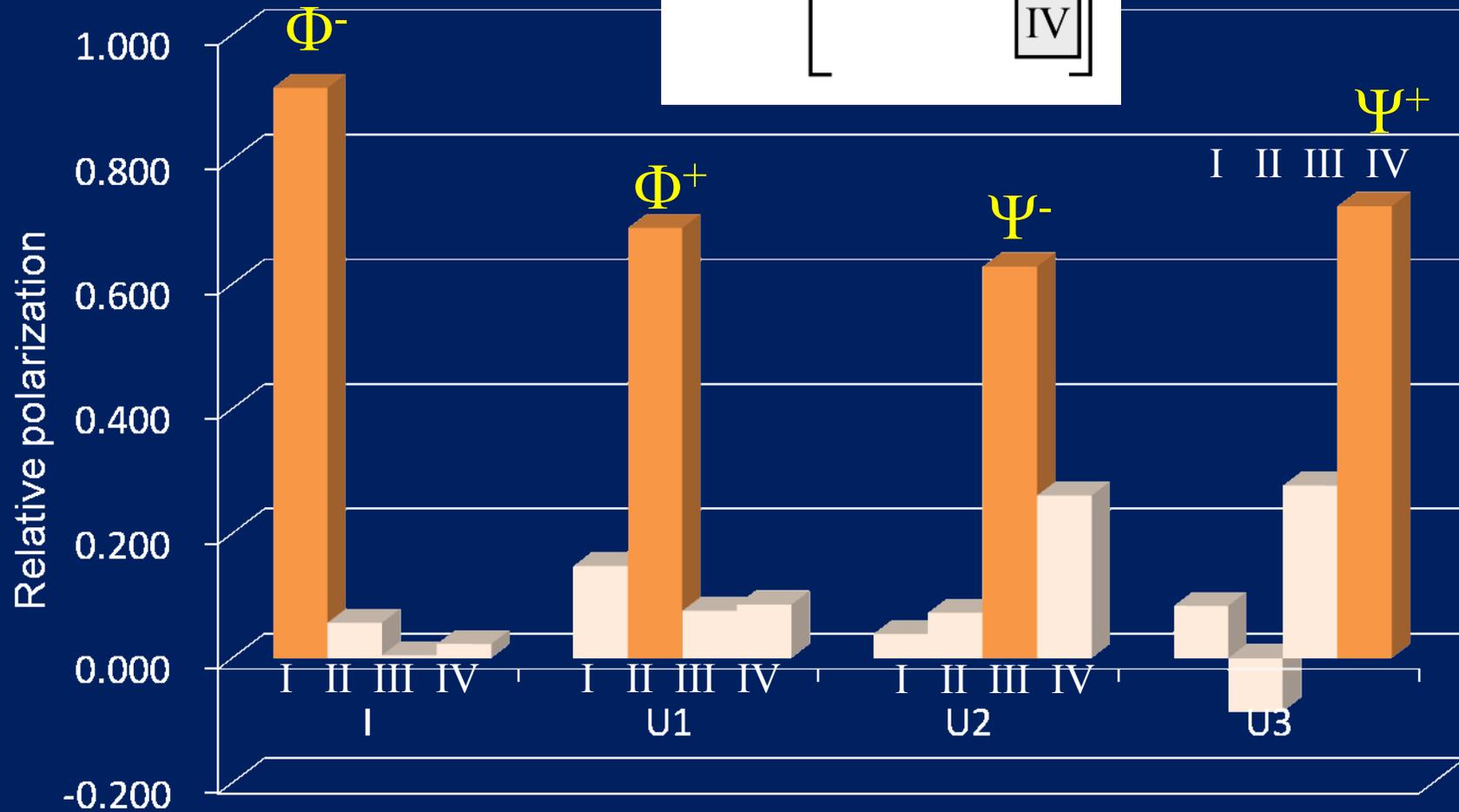
## 手順

- 2つの核スピン間にベル状態生成
- 4つのベル状態を4つの核スピン状態の分極に変換
- 4つの核スピン状態の分極を測定



# 実験結果

$$\rho = \begin{bmatrix} |00\rangle & |10\rangle & |01\rangle & |11\rangle \\ \hline \text{I} & & & \\ & \text{II} & & \\ & & \text{III} & \\ & & & \text{IV} \end{bmatrix}$$



4つのベル状態測定を実現

# まとめ

## 室温固体素子を用いた 量子中継器実現へ向けた研究開発

1. ダイヤモンドを用いた光子から核スピンへの量子メディア変換
2. 核スピんに記録された2量子ビット間の量子もつれ検出