

光制御型量子ドットを用いた 量子情報処理

阿部 英介

慶應義塾大学 スピントロニクス研究センター

応用物理情報特別講義A

2017年度春学期後半 金曜4限@14-202

ディビンチェンゾの要請

- **量子計算の要素技術**

1. スケーラブルな量子ビット列
2. 初期化
3. ユニバーサル量子ゲート
4. 長いコヒーレンス時間
5. 射影測定

- **量子通信の要素技術**

6. 物質量子ビットと飛行量子ビットの接続
7. 遠隔地間での飛行量子ビットのやり取り

ディビンチェンゾの要請

- **量子通信の要素技術**

- 6. 物質量子ビットと飛行量子ビットの接続

- 異種量子ビット間の量子もつれ
 - **スピン-光子量子もつれ**
 - (スピンは内部自由度、光子は粒子)

- 7. 遠隔地間での飛行量子ビットのやり取り

- 飛行量子ビットを介して遠隔地間の物質量子ビットに量子もつれを生成できる
 - **スピン-スピン量子もつれ**

講義内容

- 自己形成量子ドット
- 光学活性量子ドット中のスピンのコヒーレント制御
- スピン-光子量子もつれ

参考書

- R. J. Warburton
 - **“Single spins in self-assembled quantum dots”**
Nature Mat. **12**, 483 (2013)
- K. B. Gao *et al.*
 - **“Coherent manipulation, measurement and entanglement of individual solid-state spins using optical fields”**
Nature Photon. **9**, 363 (2015)
- 山本喜久、阿部英介
 - **“光制御量子ドットスピンを量子情報処理システムの現状と展望”**
固体物理 **48**, (11) 541 (2013)

講義内容

- **自己形成量子ドット**
- 光学活性量子ドット中のスピンのコヒーレント制御
- スピン-光子量子もつれ

量子ドットレーザーの提案

Multidimensional quantum well laser and temperature dependence of its threshold current

Y. Arakawa and H. Sakaki

Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Minato-ku, Tokyo 106, Japan

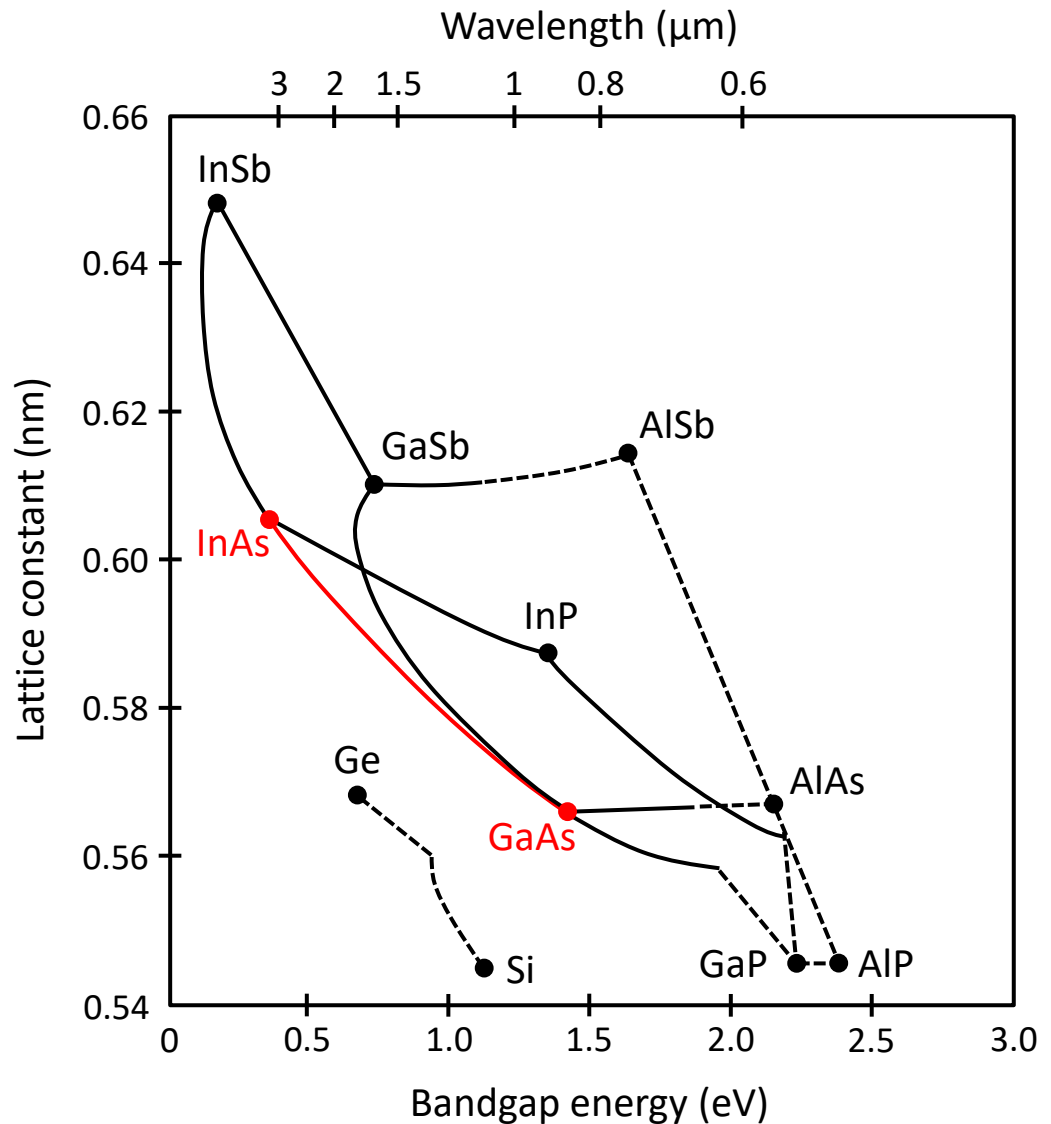
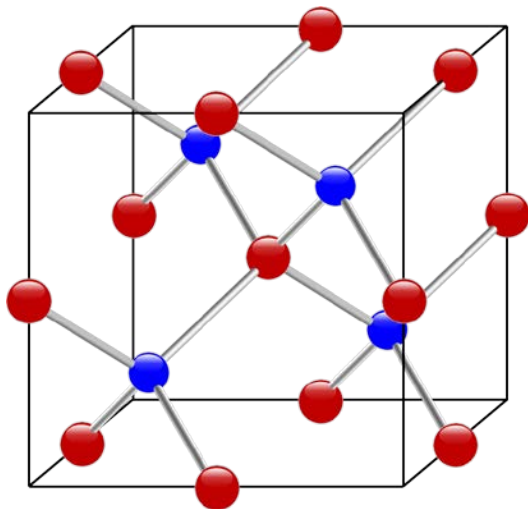
(Received 19 January 1982; accepted for publication 23 March 1982)

A new type of semiconductor laser is studied, in which injected carriers in the active region are quantum mechanically confined in two or three dimensions (2D or 3D). Effects of such confinements on the lasing characteristics are analyzed. Most important, the threshold current of such laser is predicted to be far less temperature sensitive than that of conventional lasers, reflecting the reduced dimensionality of electronic state. In the case of 3D-QW laser, the temperature dependence is virtually eliminated. An experiment on 2D quantum well lasers is performed by placing a conventional laser in a strong magnetic field (30 T) and has demonstrated the predicted increase of T_0 value from 144 to 313 °C.

自己形成量子ドット

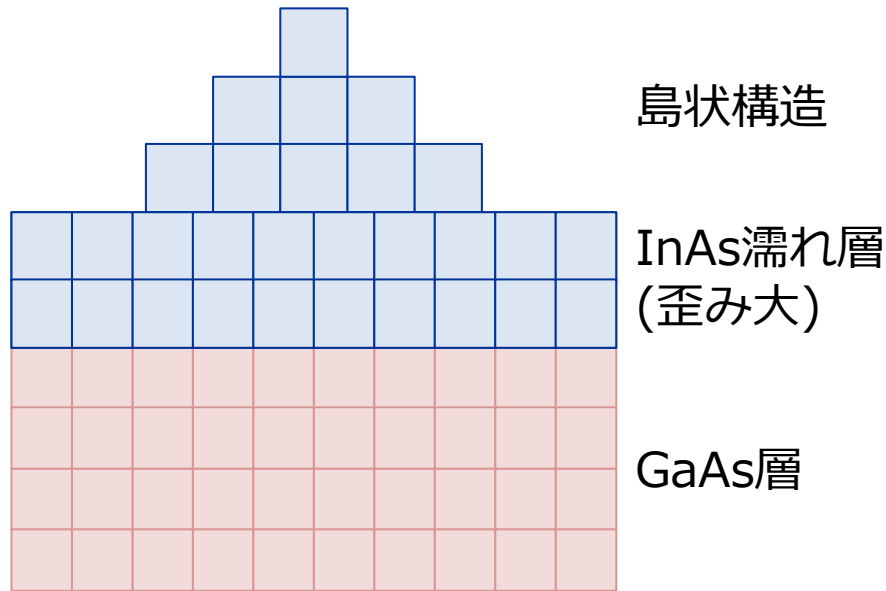
III (13)	IV (14)	V (15)
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In	Sn	Sb

閃亜鉛鋅構造

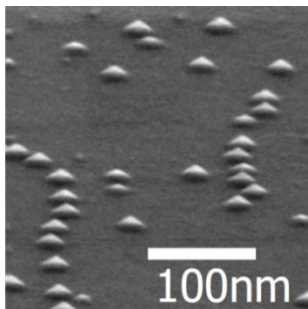
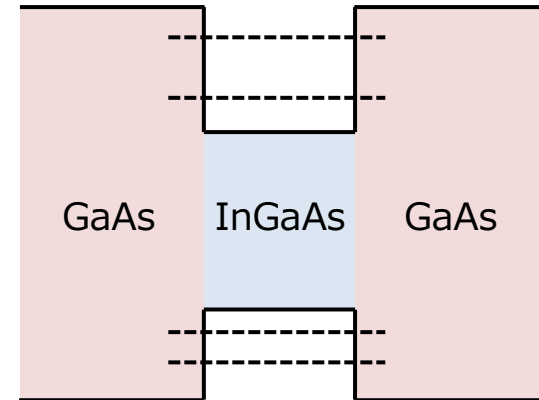


自己形成量子ドット

ストランスキ・クラスタノフ成長モードによるQD形成

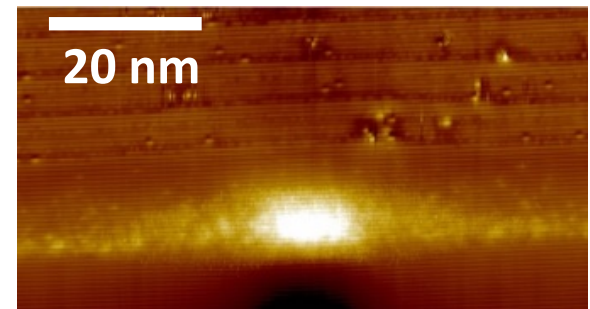


3次元閉じ込め準位の形成

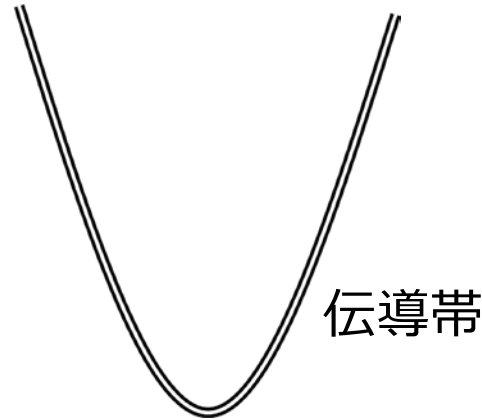


キャップ層なしInAs QD

キャップ層ありInGaAs QD
(アニール処理によるGaの混合)



バルクのバンド構造



$$|CB \uparrow\rangle = |S\rangle|\alpha\rangle$$

$$|CB \downarrow\rangle = |S\rangle|\beta\rangle$$

$$|j, m_j\rangle$$

$$|HH \uparrow\rangle = |3/2, 3/2\rangle$$

$$|HH \downarrow\rangle = |3/2, -3/2\rangle$$

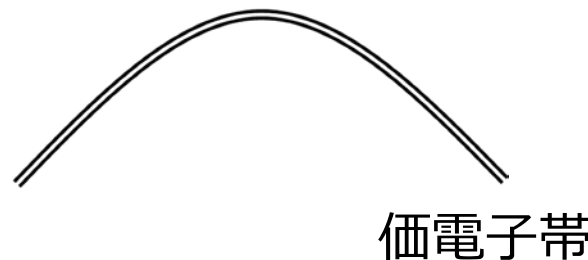
重い正孔帯



$$|LH \uparrow\rangle = |3/2, 1/2\rangle$$

$$|LH \downarrow\rangle = |3/2, -1/2\rangle$$

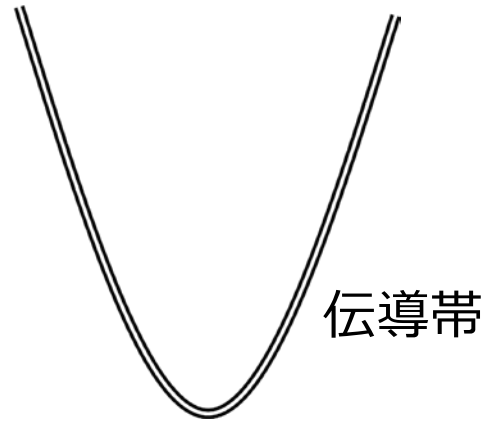
スプリットオフ帯



$$|SO \uparrow\rangle = |1/2, 1/2\rangle$$

$$|SO \downarrow\rangle = |1/2, -1/2\rangle$$

ナノ構造のバンド構造



$$|CB \uparrow\rangle = |S\rangle|\alpha\rangle$$

$$|CB \downarrow\rangle = |S\rangle|\beta\rangle$$

$$|j, m_j\rangle$$

閉じ込めによりHHとLHの縮退が解ける

重い正孔帯



$$|HH \uparrow\rangle = |3/2, 3/2\rangle$$

$$|HH \downarrow\rangle = |3/2, -3/2\rangle$$

$$|LH \uparrow\rangle = |3/2, 1/2\rangle$$

$$|LH \downarrow\rangle = |3/2, -1/2\rangle$$

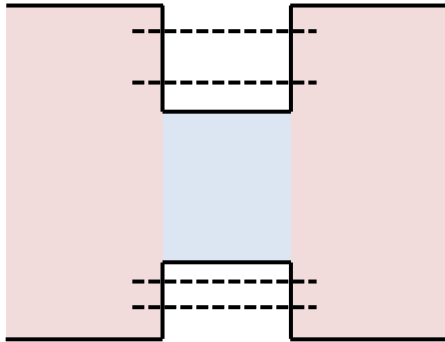
スプリットオフ帯

$$|SO \uparrow\rangle = |1/2, 1/2\rangle$$

$$|SO \downarrow\rangle = |1/2, -1/2\rangle$$

価電子帯

中性励起子

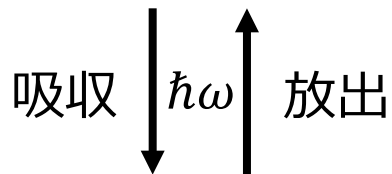


$|0\rangle$ “真空”(詰まった価電子帯と空の伝導帯)

明励起子(光子のヘリシティ ± 1 と結合)

$$|+1\rangle = |\text{CB } \downarrow\rangle_e |\text{HH } \uparrow\rangle_h$$

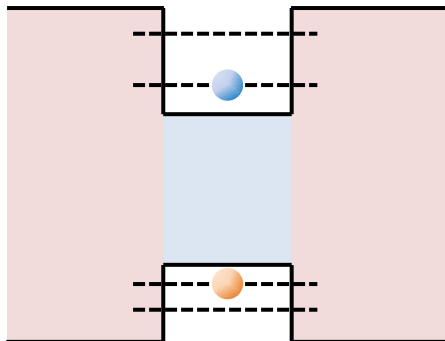
$$|-1\rangle = |\text{CB } \uparrow\rangle_e |\text{HH } \downarrow\rangle_h$$



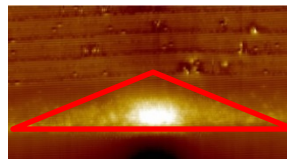
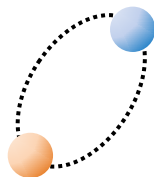
暗励起子

$$|+2\rangle = |\text{CB } \uparrow\rangle_e |\text{HH } \uparrow\rangle_h$$

$$|-2\rangle = |\text{CB } \downarrow\rangle_e |\text{HH } \downarrow\rangle_h$$



$|\pm 1\rangle, |\pm 2\rangle$

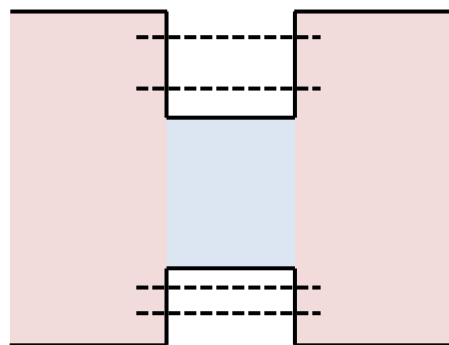


成長方向を量子化軸に取る

中性励起子

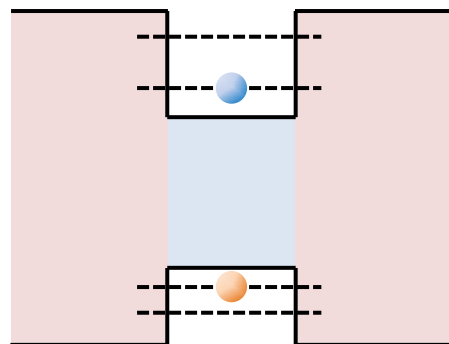
電子-正孔交換相互作用 $\{|+1\rangle, |-1\rangle, |+2\rangle, |-2\rangle\}$

$$H_{\text{Ex}}^N = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \delta_0 & \delta_1 & 0 & 0 \\ \delta_1 & \delta_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\delta_0 & \delta_2 \\ 0 & 0 & \delta_2 & -\delta_0 \end{pmatrix}$$

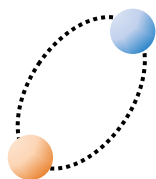


$|0\rangle$

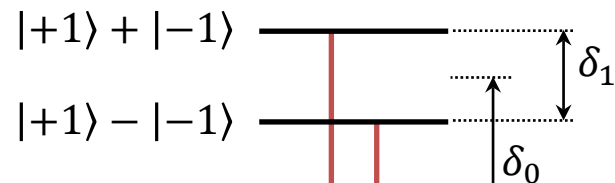
吸收 $\downarrow \hbar\omega$ 放出 \uparrow



$|\pm 1\rangle, |\pm 2\rangle$



明



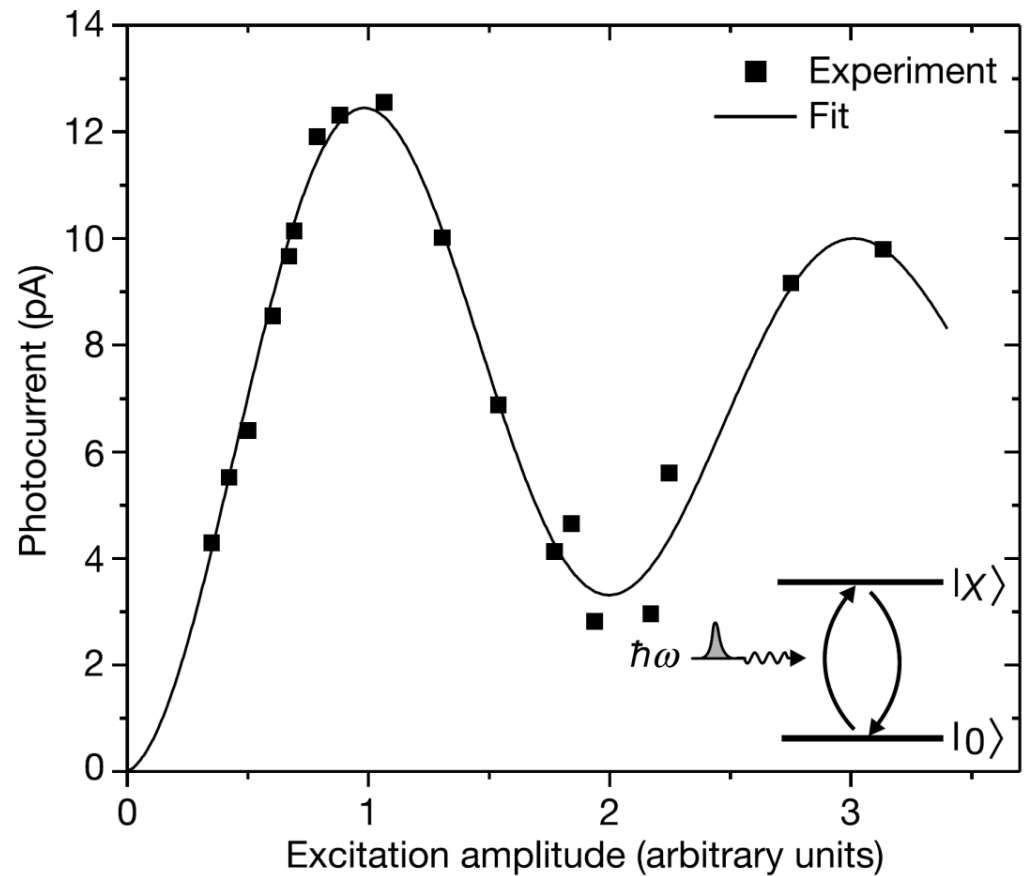
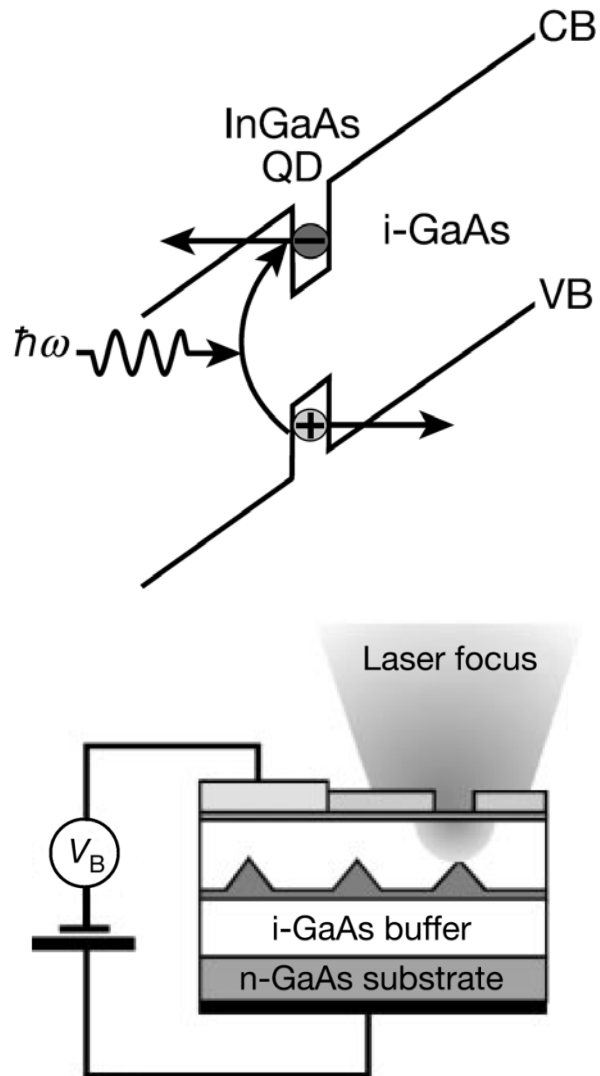
暗



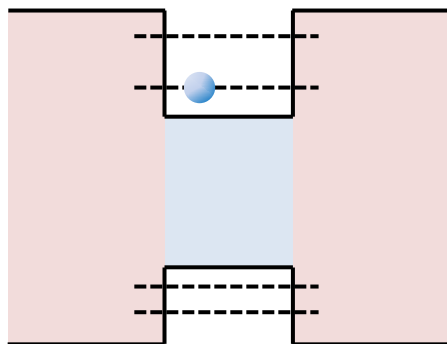
π_H π_V

$|0\rangle$

中性励起子：有效2準位系？



荷電励起子(トリオン)

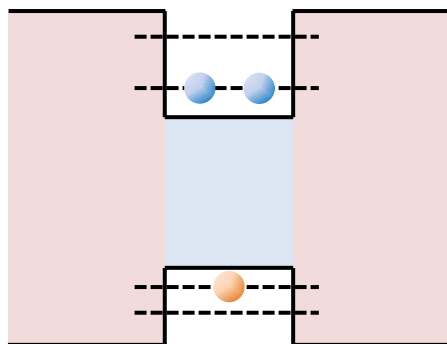


$$|e^{-}\rangle = |\text{CB } \uparrow, \downarrow\rangle_e$$

1電子が常時QD内にトラップ



吸収 $\downarrow \hbar\omega$ 放出 \uparrow



$$|X^{-}\rangle = |S = 0\rangle_{ee} |\text{HH } \uparrow, \downarrow\rangle_h$$

2電子は一重項を組み非磁性化



正孔スピンのみ考慮すればよい

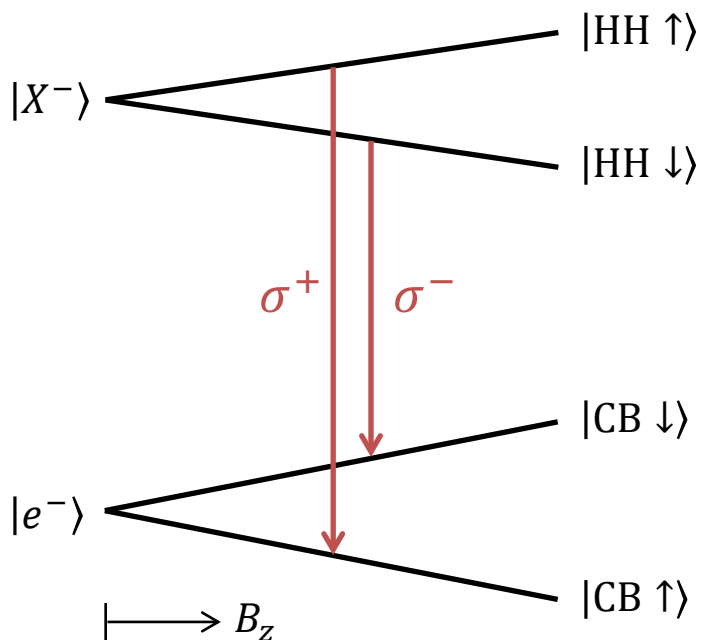
電子-正孔交換相互作用なし

$$H_{\text{Ex}}^X = 0$$

荷電励起子：ゼーマン効果

ファラデー配置

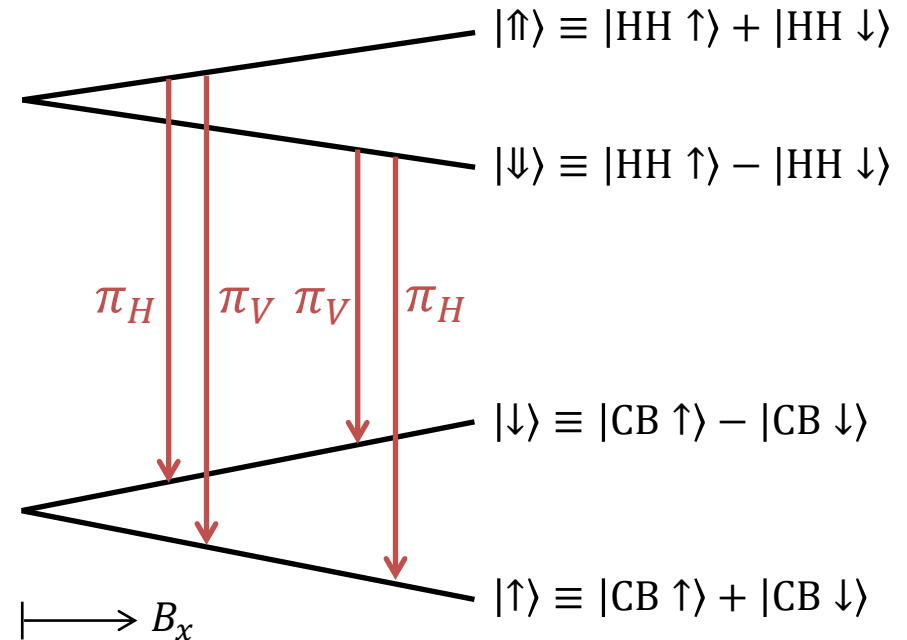
$$H_Z^{X,F} = \frac{\mu_B B_z}{2} \begin{pmatrix} g_{hz} & 0 \\ 0 & -g_{hz} \end{pmatrix}$$



$$H_Z^{e,F} = \frac{\mu_B B_z}{2} \begin{pmatrix} -g_{ez} & 0 \\ 0 & g_{ez} \end{pmatrix}$$

フォイト配置

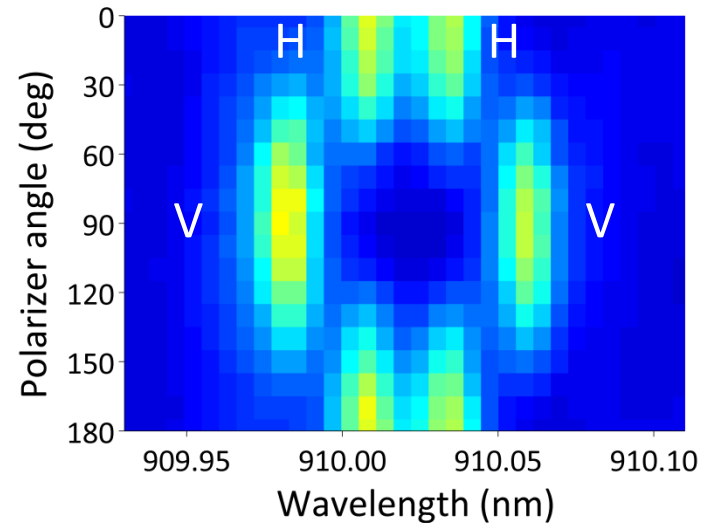
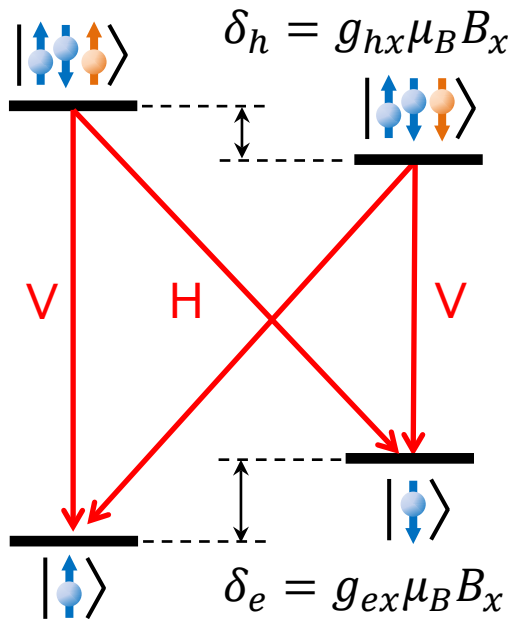
$$H_Z^{X,V} = \frac{\mu_B B_x}{2} \begin{pmatrix} 0 & g_{hx} \\ g_{hx} & 0 \end{pmatrix}$$



$$H_Z^{e,V} = \frac{\mu_B B_x}{2} \begin{pmatrix} 0 & g_{ex} \\ g_{ex} & 0 \end{pmatrix}$$

量子ビットに使うのは…

フォイト配置における荷電量子ドットのゼーマン準位



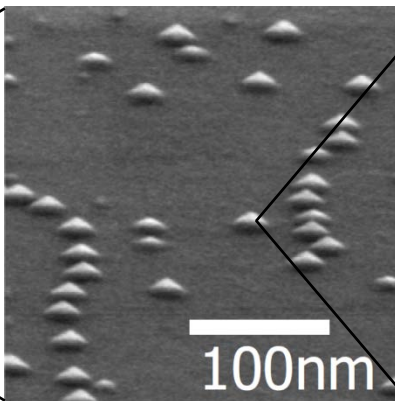
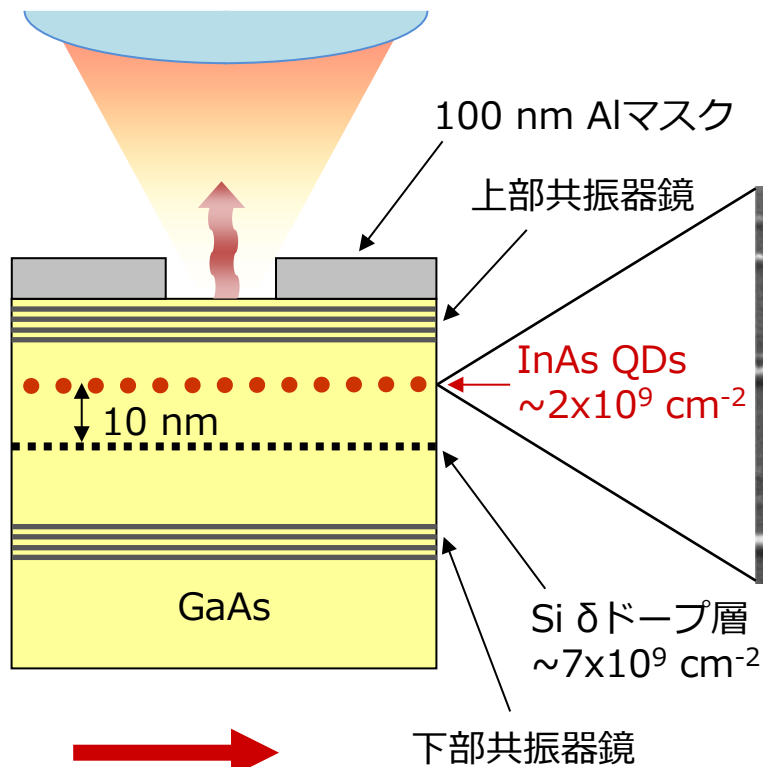
- 電子スピンの長いコヒーレンス時間
- 有効ラムダ型3準位を形成
 - 光ポンピングによる初期化と読み出し
 - 光パルスによる超高速スピン制御
 - スピン-光子量子もつれ生成

講義内容

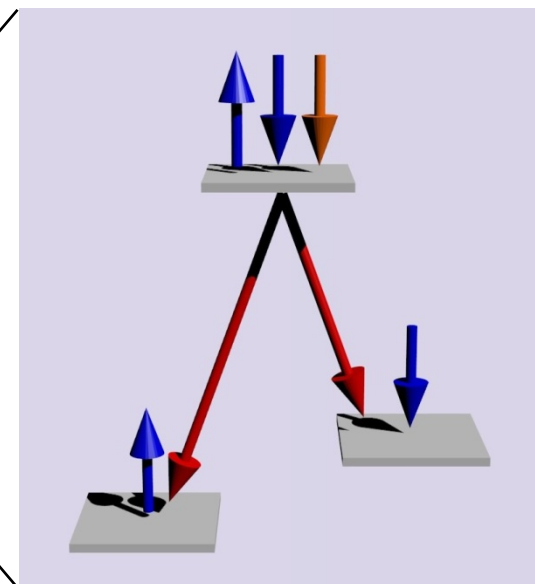
- 自己形成量子ドット
- **光学活性量子ドット中のスピンのコヒーレント制御**
- スピン-光子量子もつれ

光学活性自己形成QD

対物レンズ (クライオスタット内 ~ 1.5 K)



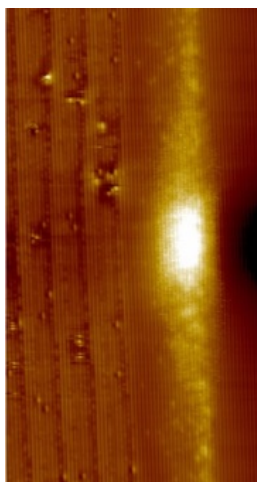
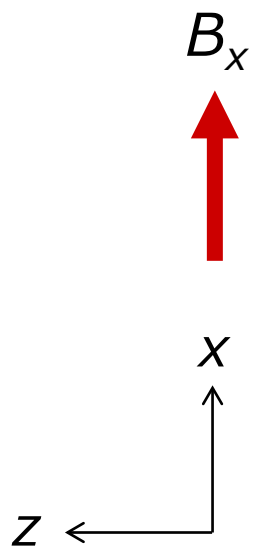
ラムダ型3準位



$B > 3$ T (フォイト配置)

座標軸の対応

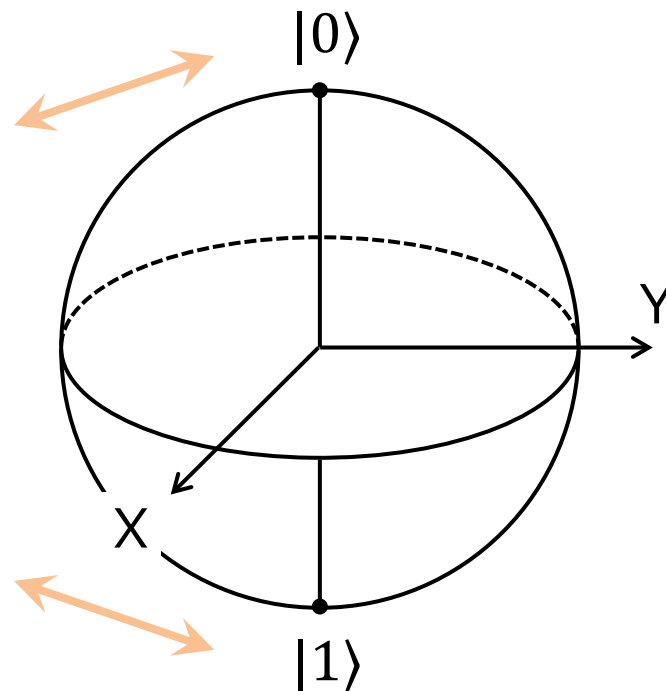
実空間



$$|\uparrow\downarrow\rangle \equiv |\text{CB } \uparrow\rangle + |\text{CB } \downarrow\rangle$$

$$|\downarrow\uparrow\rangle \equiv |\text{CB } \uparrow\rangle - |\text{CB } \downarrow\rangle$$

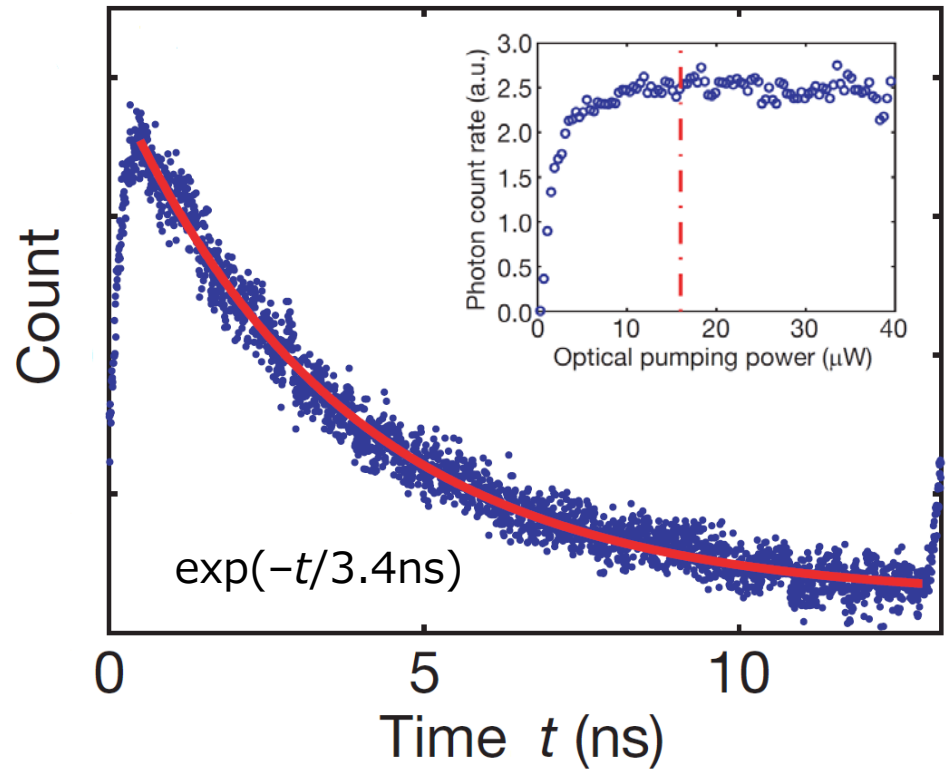
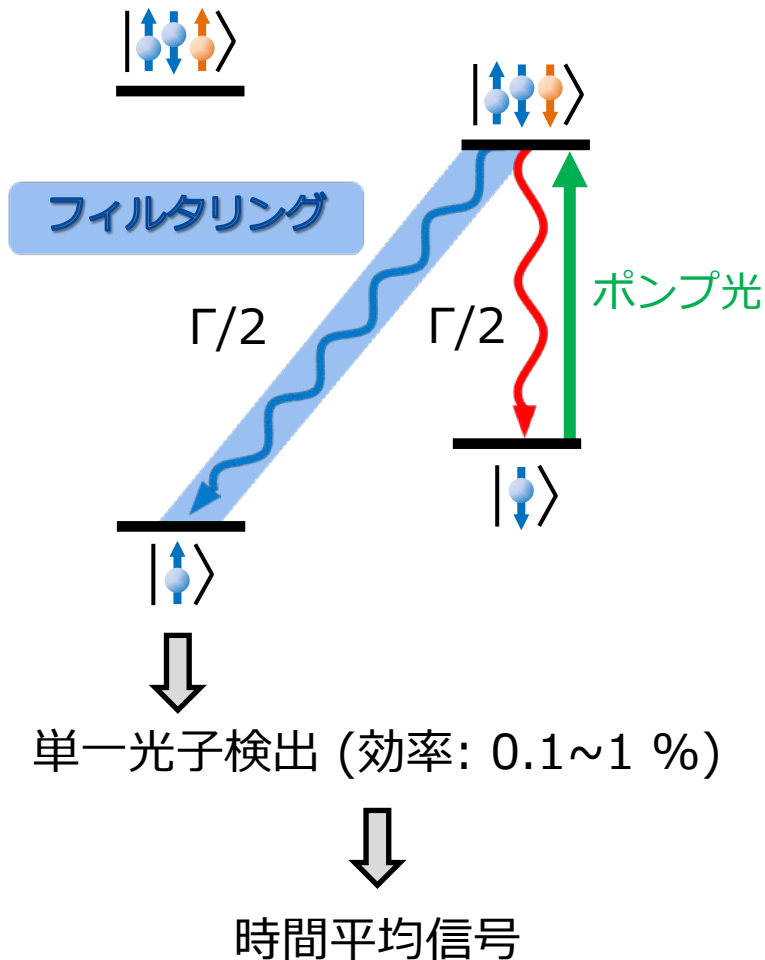
ブロッホ球



実空間のx軸周りのラーモア歳差運動がブロッホ球のZ軸回転ゲートに相当

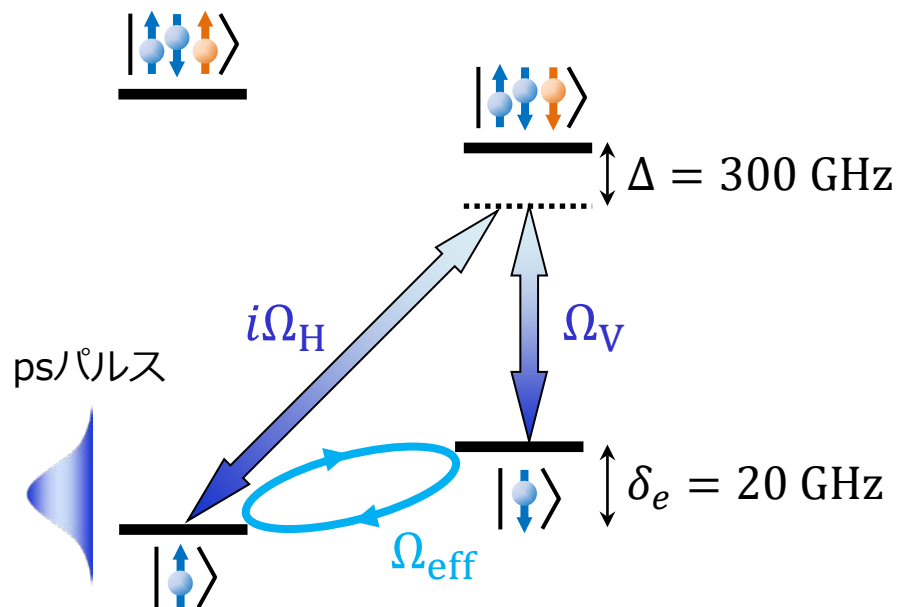
初期化と読み出し

CWレーザー光による光ポンピング

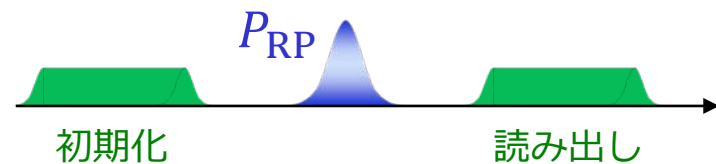
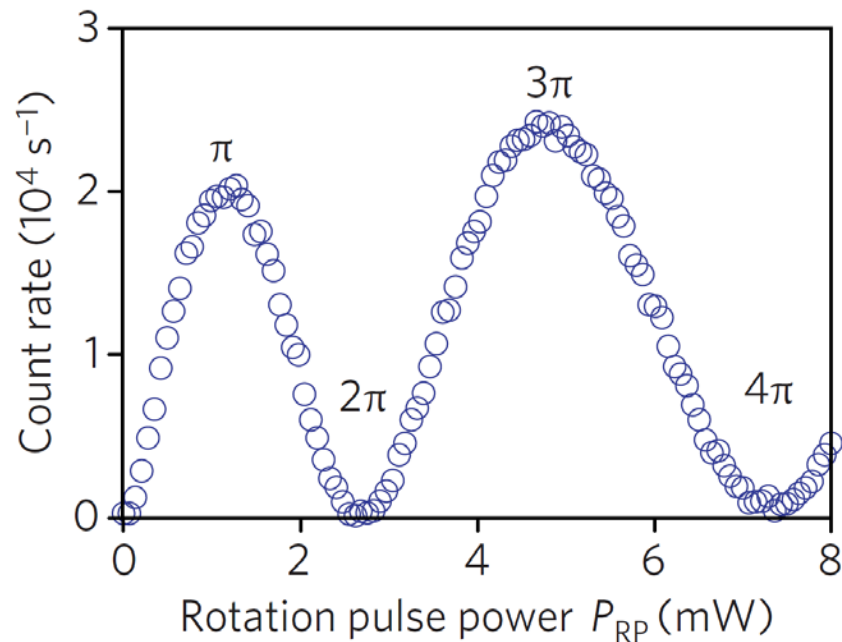


X軸回転

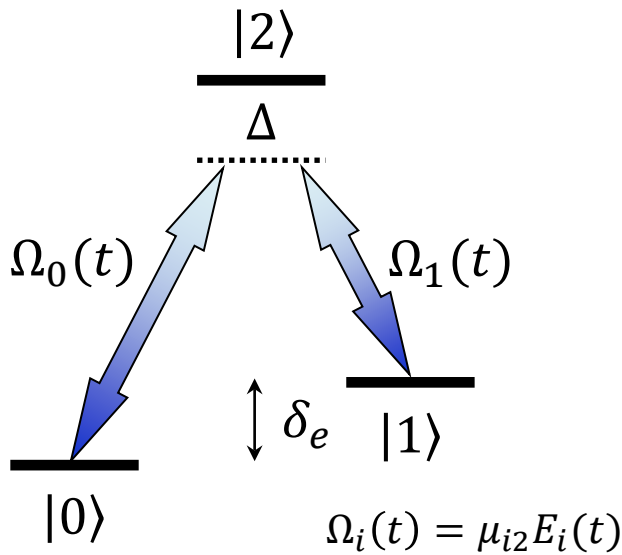
離調円偏光パルス(ラビ振動)



$$\Delta \gg \Omega_{H,V} \gg \delta_e, \quad \Omega_{\text{eff}} \sim |\Omega_H \Omega_V| / 2\Delta$$



誘導ラマン過程



相互作用ハミルトニアン(回転波近似)

$$\frac{d|\Psi\rangle}{dt} = -iH_{\text{int}}|\Psi\rangle$$

$$H_{\text{int}} = \begin{pmatrix} -\delta_e & 0 & -\Omega_0(t)/2 \\ 0 & 0 & -\Omega_1(t)/2 \\ -\Omega_0^*(t)/2 & -\Omega_1^*(t)/2 & \Delta \end{pmatrix}$$

$$|\Psi\rangle = a_0(t)|0\rangle + a_1(t)|1\rangle + a_2(t)|2\rangle$$

断熱近似 ($\Delta \gg \Omega_i \Rightarrow \dot{a}_2 \rightarrow 0$)

$$H_{\text{eff}} = \begin{pmatrix} -\delta_e & -\Omega_{\text{eff}}(t)/2 \\ -\Omega_{\text{eff}}^*(t)/2 & 0 \end{pmatrix} - \underbrace{\begin{pmatrix} |\Omega_0(t)|^2/4\Delta & 0 \\ 0 & |\Omega_1(t)|^2/4\Delta \end{pmatrix}}$$

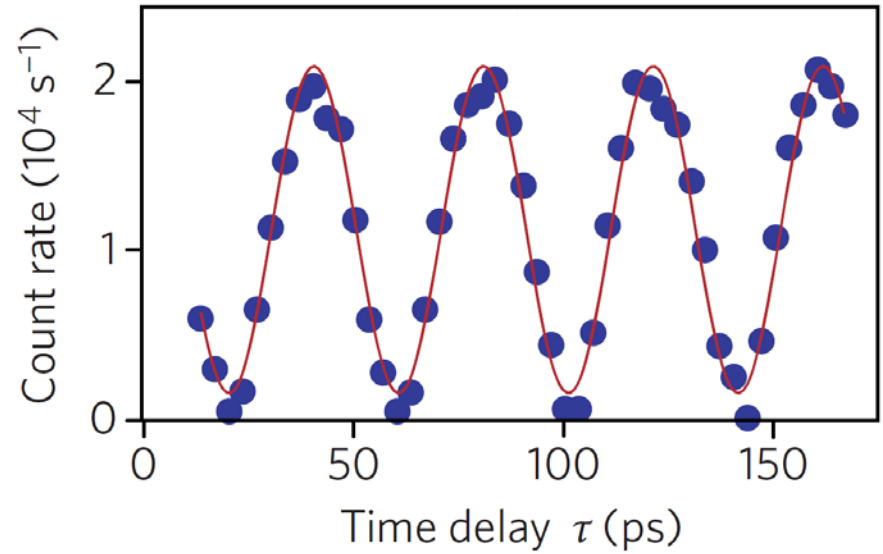
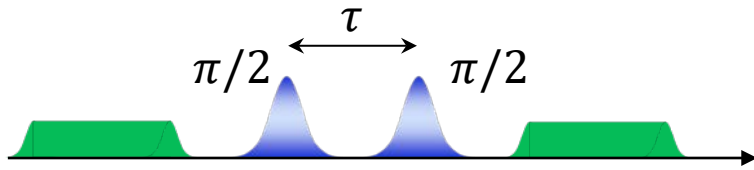
有効ラビ周波数

ACシュタルク効果

$$\Omega_{\text{eff}}(t) \equiv \frac{\Omega_0(t)\Omega_1^*(t)}{2\Delta}$$

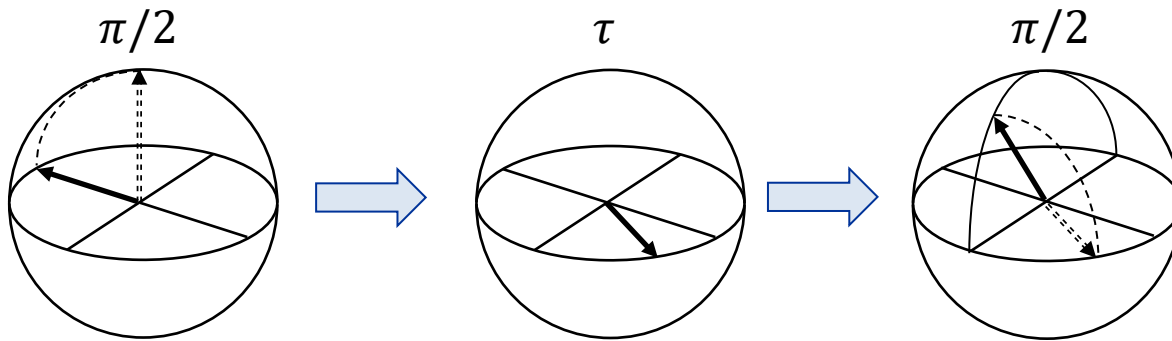
Z軸回転

ラムゼイ干渉(ラーモア歳差運動)

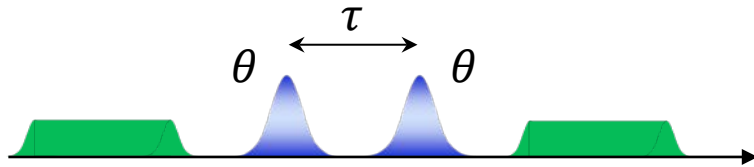


$$|\uparrow\rangle = |0\rangle$$

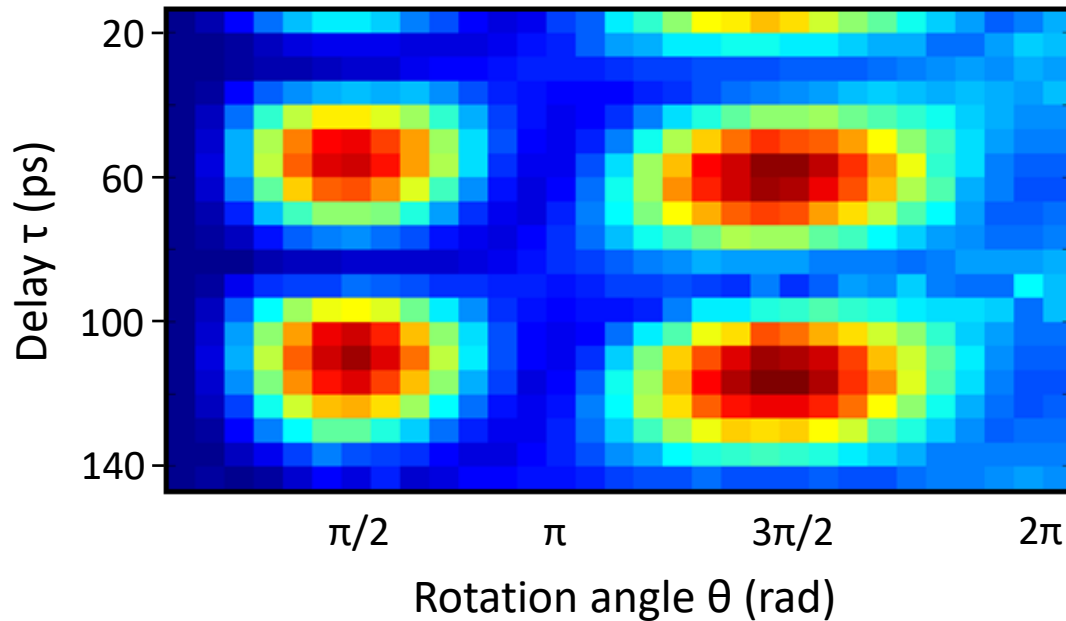
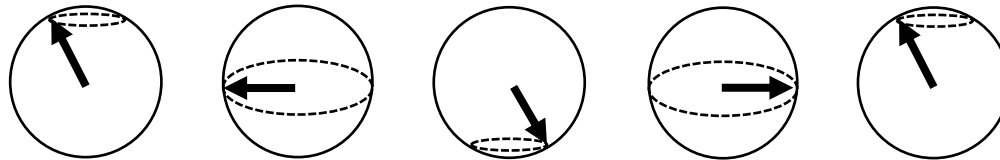
$$|\downarrow\rangle = |1\rangle$$



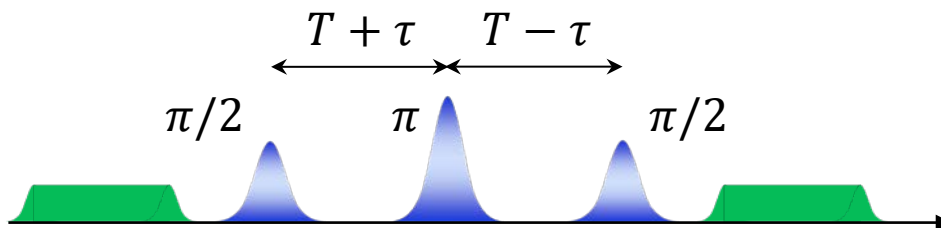
1量子ビットゲート



$R_X(\theta)$ と $R_Z(\varphi)$ の組み合わせで任意の1量子ビットゲートが実現 (XZ分解)



スピンエコー



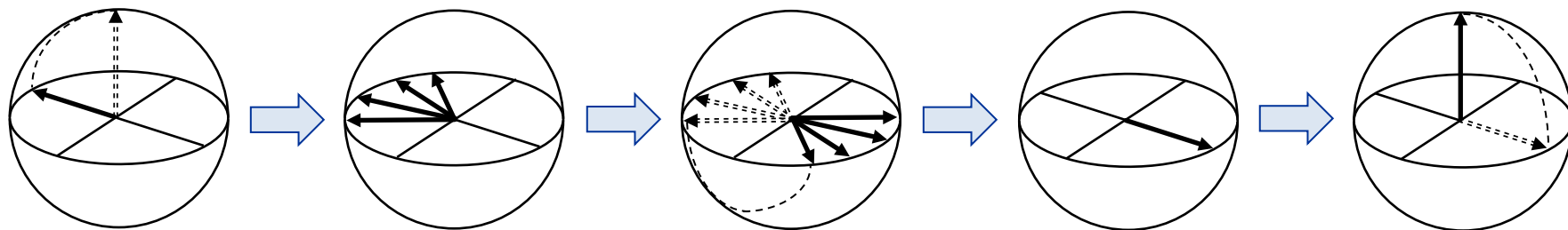
$\pi/2$

不均一広がり

π

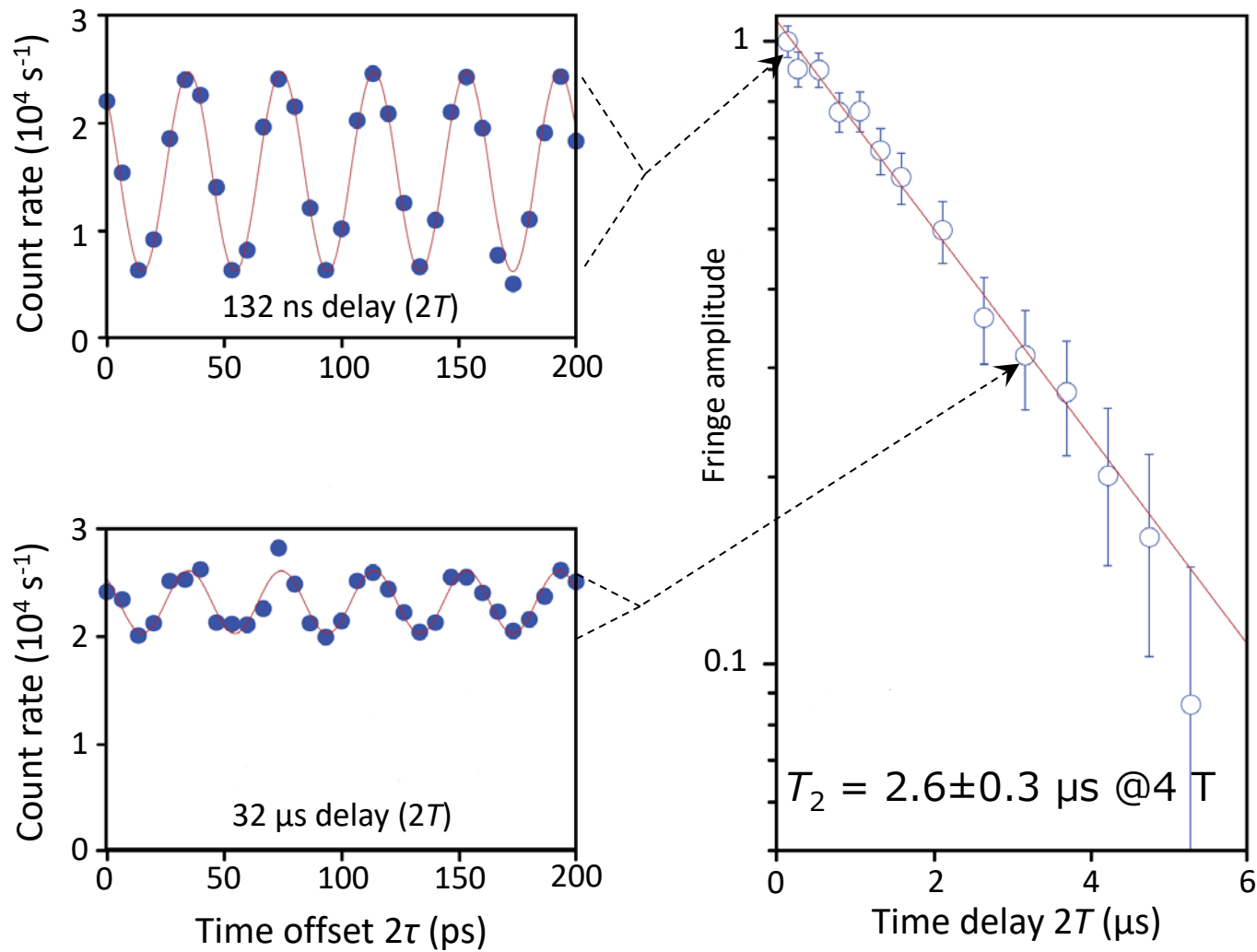
リフォーカス

$\pi/2$

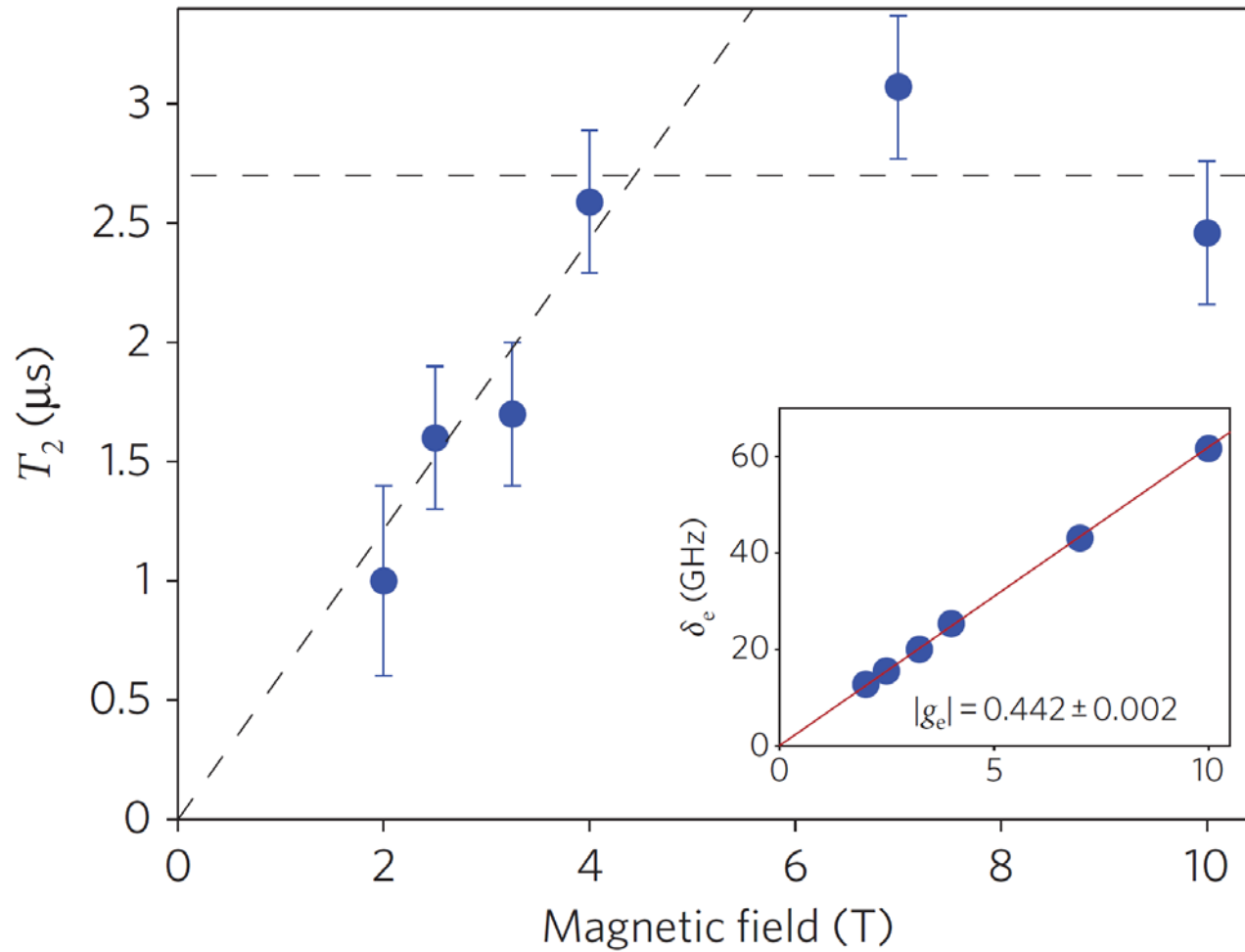


測定ごとの不均一性に起因する見かけの減衰(数ns)を
キャンセルしてコヒーレンス時間を測定する

T_2 測定



T_2 の磁場依存性



講義内容

- 自己形成量子ドット
- 光学活性量子ドット中のスピンのコヒーレント制御
- **スピン-光子量子もつれ**

スピン-光子量子もつれ

Quantum-dot spin-photon entanglement via frequency downconversion to telecom wavelength

Kristiaan De Greve^{1,†}, Leo Yu^{1,*}, Peter L. McMahon^{1,*}, Jason S. Pelc^{1,*}, Chandra M. Natarajan^{1,2}, Na Young Kim¹, Eisuke Abe^{1,3}, Sebastian Maier⁴, Christian Schneider⁴, Martin Kamp⁴, Sven Höfling^{1,4}, Robert H. Hadfield², Alfred Forchel⁴, M. M. Fejer¹ & Yoshihisa Yamamoto^{1,3}

Received 7 June; accepted 12 September 2012.

Nature **491**, 421 (2012) De Greve *et al.*

Observation of entanglement between a quantum dot spin and a single photon

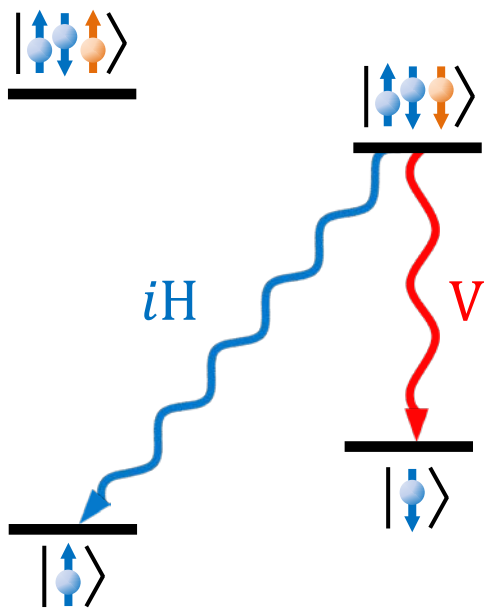
W. B. Gao¹, P. Fallahi¹, E. Togan¹, J. Miguel-Sanchez¹ & A. Imamoglu¹

Received 7 June; accepted 10 September 2012.

Nature **491**, 426 (2012) Gao *et al.*

スピン-光子偏光量子もつれ

$$|\uparrow\rangle|iH\rangle + |\downarrow\rangle|V\rangle = i(|\leftarrow\rangle|\sigma^+\rangle + |\rightarrow\rangle|\sigma^-\rangle)$$



$$|\rightarrow/\leftarrow\rangle \equiv \frac{|\uparrow\rangle \pm |\downarrow\rangle}{\sqrt{2}} \quad |\sigma^\pm\rangle \equiv \frac{|H\rangle \pm i|V\rangle}{\sqrt{2}}$$

$$\left(\frac{|\uparrow\rangle - |\downarrow\rangle}{\sqrt{2}}\right) \left(\frac{|H\rangle + i|V\rangle}{\sqrt{2}}\right) + \left(\frac{|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle}{\sqrt{2}}\right) \left(\frac{|H\rangle - i|V\rangle}{\sqrt{2}}\right)$$

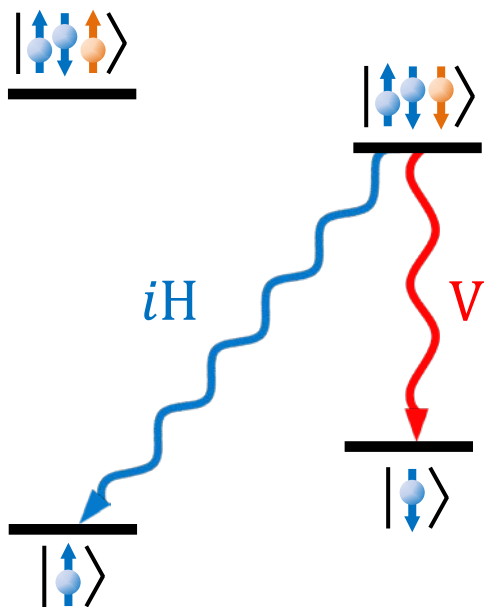
$$= \frac{|\uparrow\rangle|H\rangle + i|\uparrow\rangle|V\rangle - |\downarrow\rangle|H\rangle - i|\downarrow\rangle|V\rangle}{2}$$

$$+ \frac{|\uparrow\rangle|H\rangle - i|\uparrow\rangle|V\rangle + |\downarrow\rangle|H\rangle - i|\downarrow\rangle|V\rangle}{2}$$

$$= |\uparrow\rangle|H\rangle - i|\downarrow\rangle|V\rangle$$

スピン-光子偏光量子もつれ

$$|\uparrow\rangle|iH\rangle + |\downarrow\rangle|V\rangle = i(|\leftarrow\rangle|\sigma^+\rangle + |\rightarrow\rangle|\sigma^-\rangle)$$

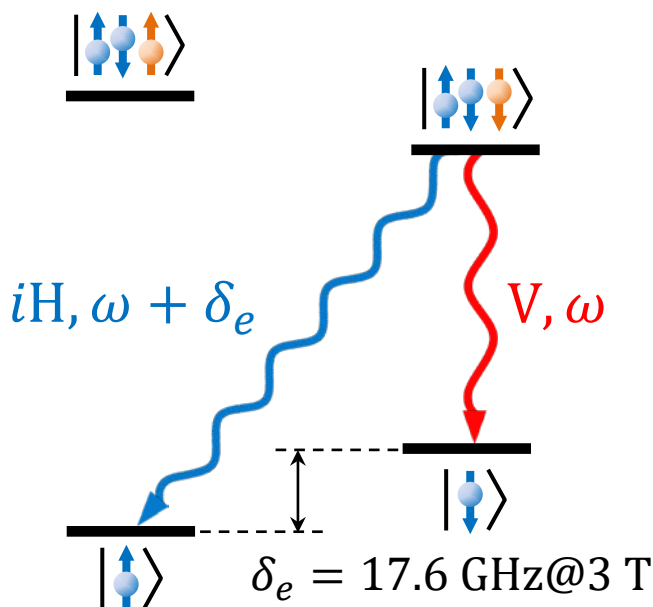


期待される相関 $P(\text{spin}|\text{pol.})$

	\uparrow	\downarrow		\leftarrow	\rightarrow
H	1	0	σ^+	1	0
V	0	1	σ^-	0	1

スピン-光子偏光量子もつれ

$$|\uparrow\rangle|iH\rangle + |\downarrow\rangle|V\rangle = i(|\leftarrow\rangle|\sigma^+\rangle + |\rightarrow\rangle|\sigma^-\rangle)$$



期待される相関 $P(\text{spin}|\text{pol.})$

	\uparrow	\downarrow		\leftarrow	\rightarrow
H	1	0	σ^+	1	0
V	0	1	σ^-	0	1

量子消去と高速検出

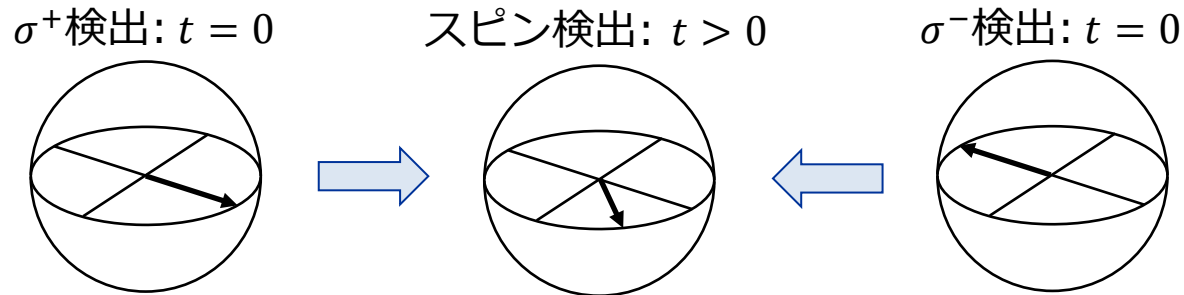
CATCH: スピンは光の偏光と波長の両方とエンタングルしている

$$|\uparrow\rangle|iH, \omega + \delta_e\rangle + |\downarrow\rangle|V, \omega\rangle$$

⇒ 円偏光に射影されるとスピンは歳差運動を始める

$$|\sigma^\pm\rangle \leftrightarrow |\uparrow\rangle \mp e^{i\delta_e t} |\downarrow\rangle$$

⇒ 検出器のタイミング分解能により $t = 0$ の曖昧性が生じる

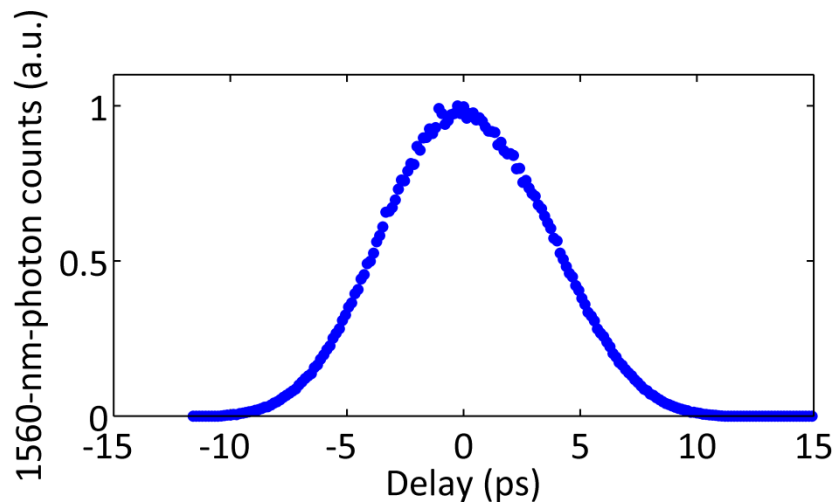
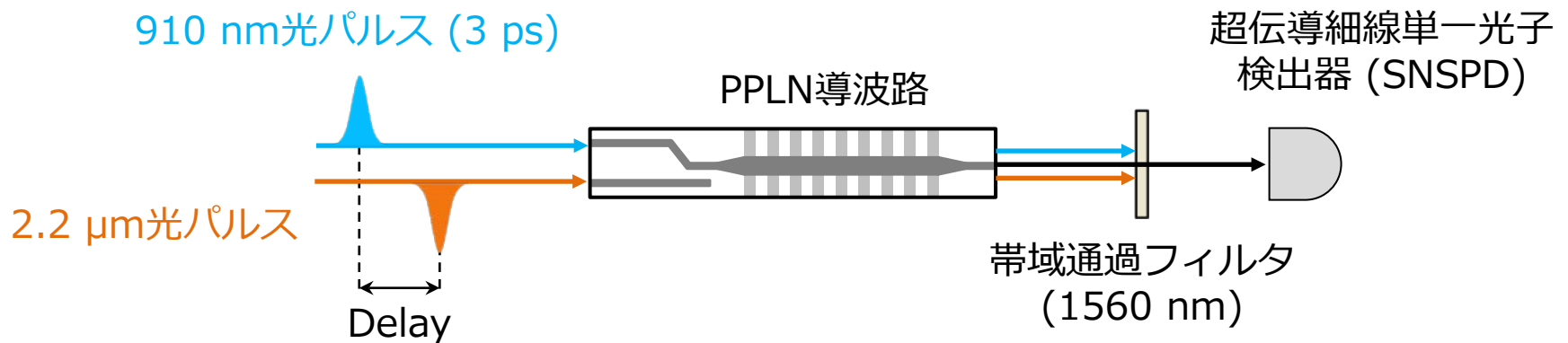


⇒ 波長情報を消去するために歳差周期より十分高いタイミング分解能が必要(量子消去)

高速下方変換技術

解決策: PPLN導波路と2.2 μm 光パルスによるタイムゲート下方変換

2光子が導波路に同時入射したときのみ波長変換される

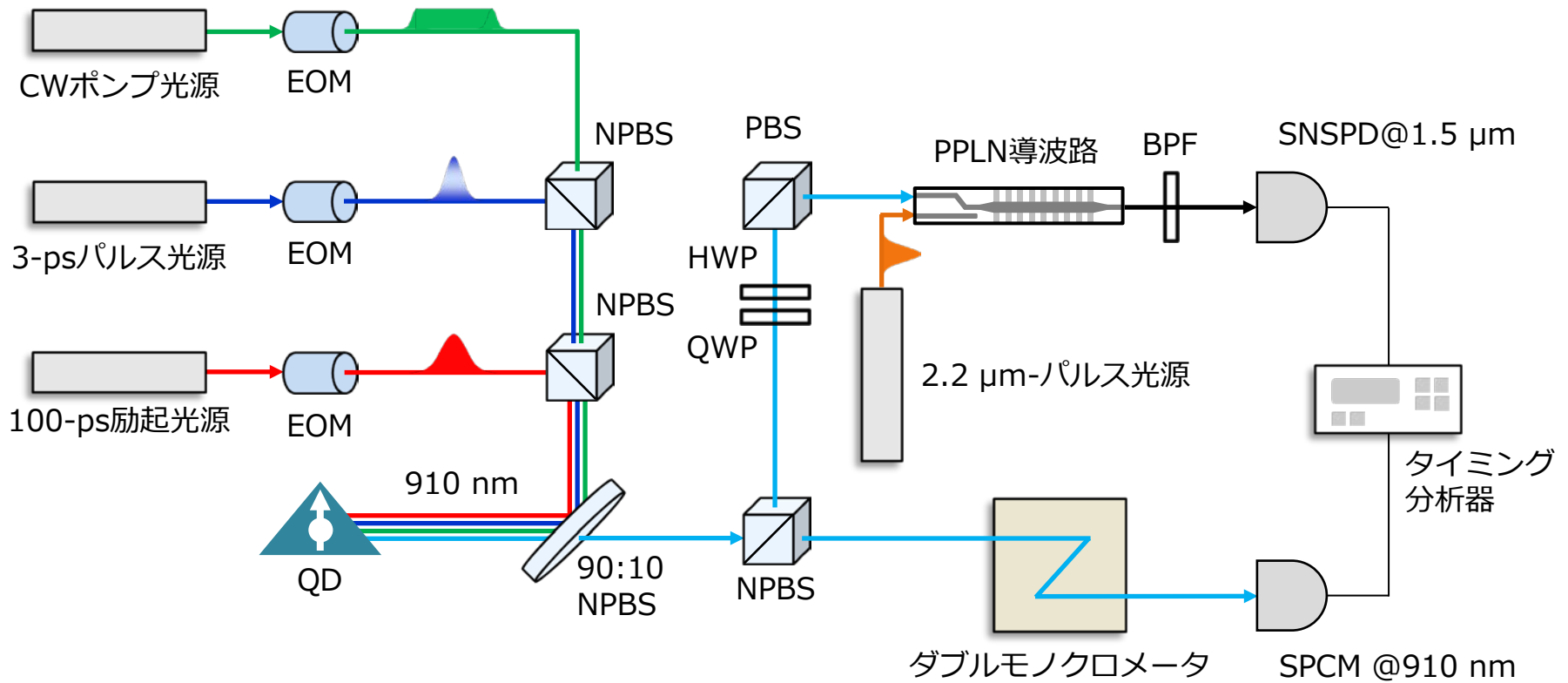


帯域 ~ 100 GHzで量子消去可能

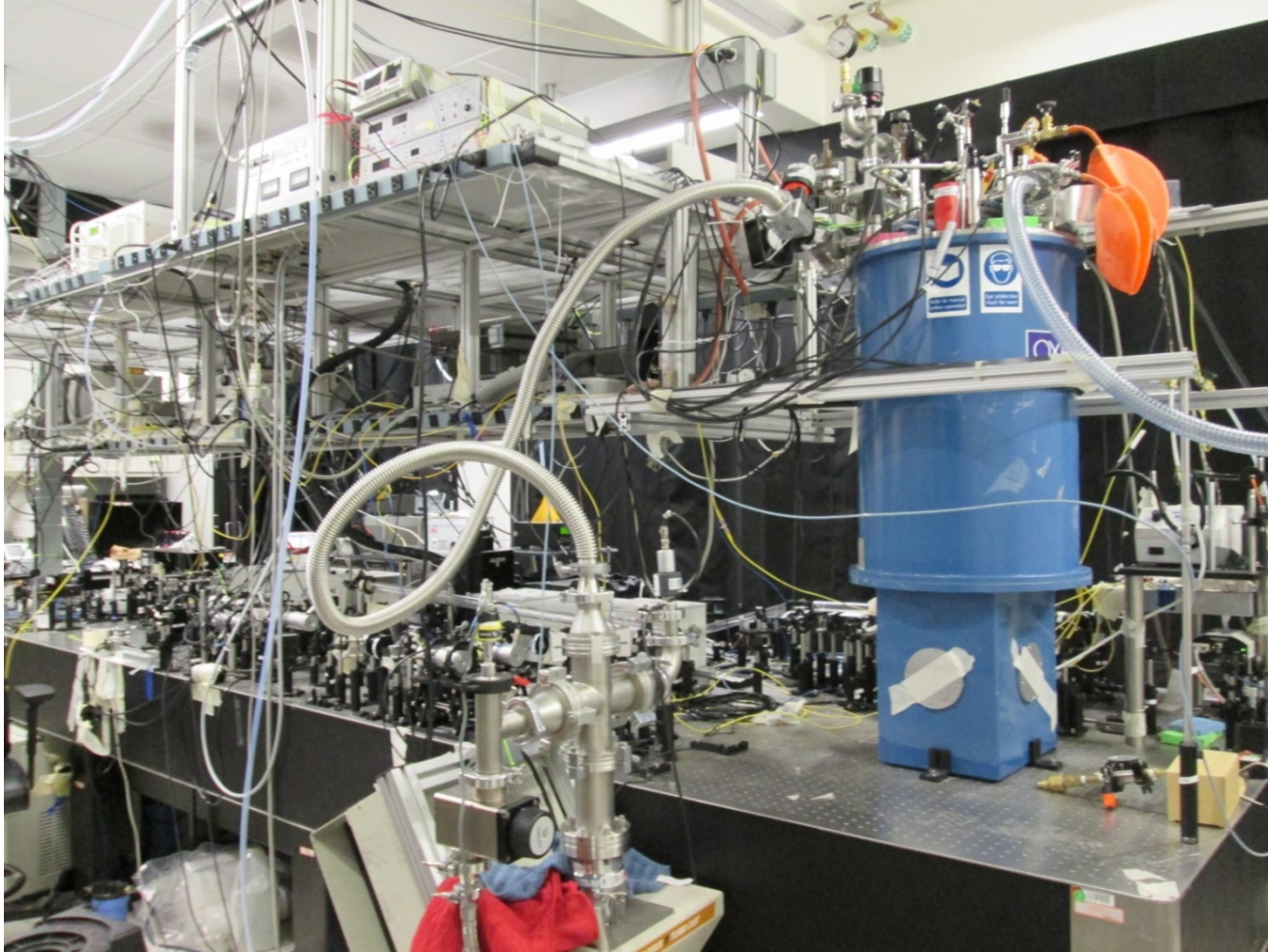
910 nm単一光子レベルでも動作確認

Nature **491**, 421 (2012) De Greve *et al.*

測定系

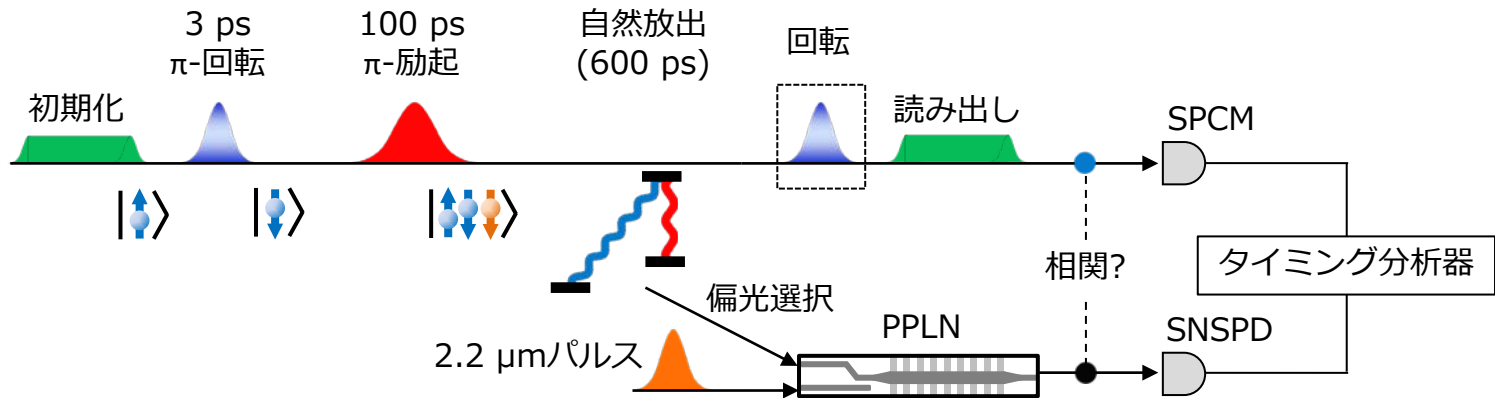
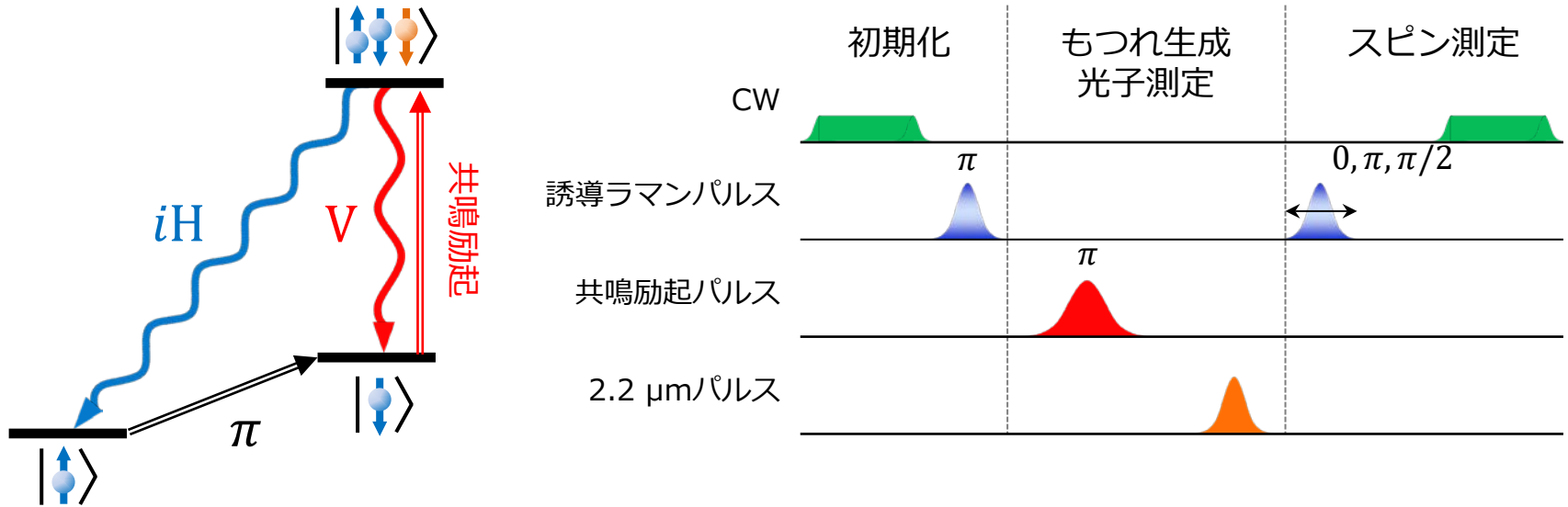


測定系



スタンフォード大学 ギンツトン研究所 山本研究室 (2013)

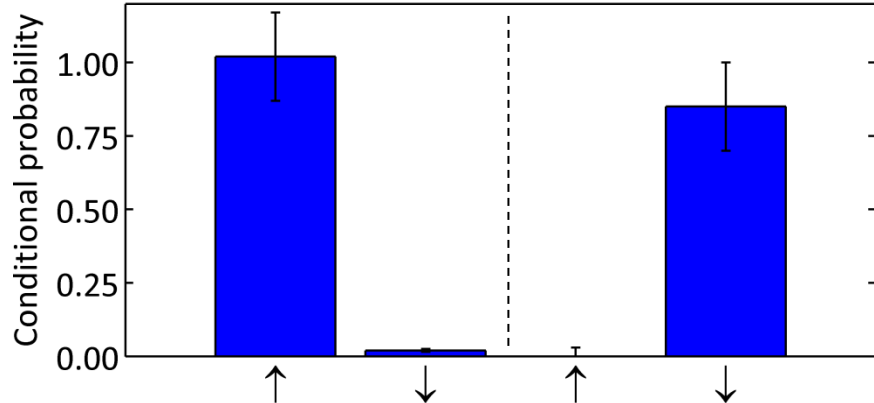
実験プロトコル



相関測定 (I)

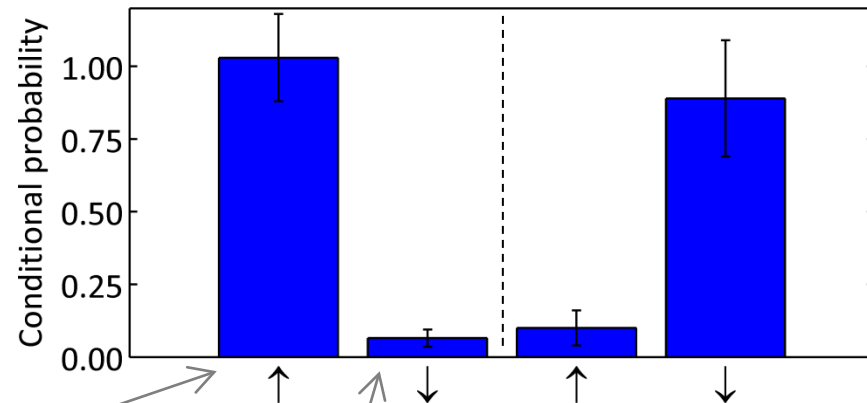
900 nmでの検出

H V

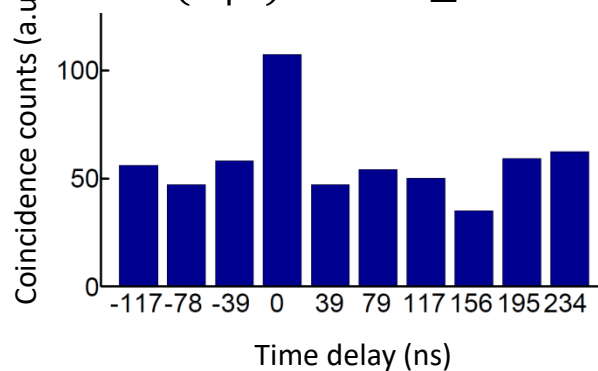


1.5 μmでの検出

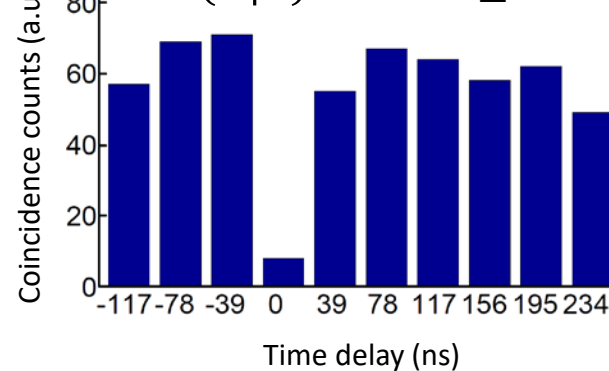
H V



$P(\uparrow | H) = 1.03 \pm 0.15$



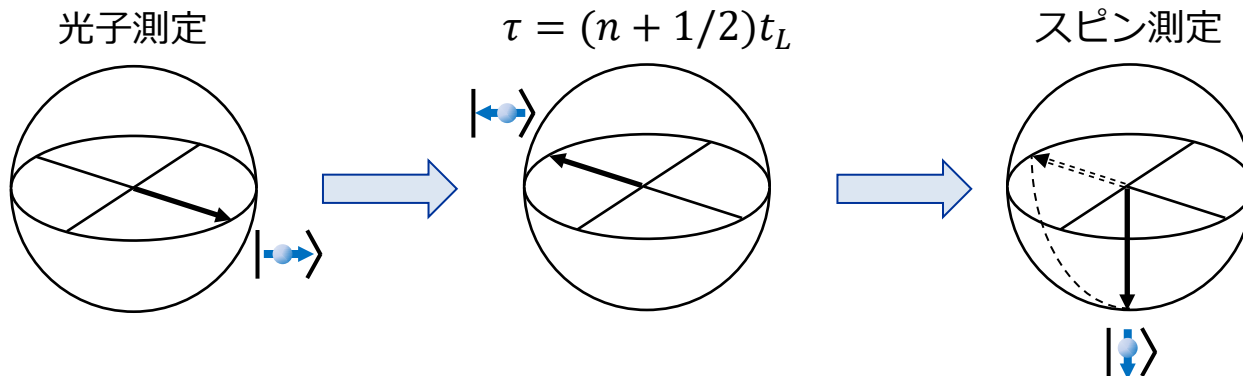
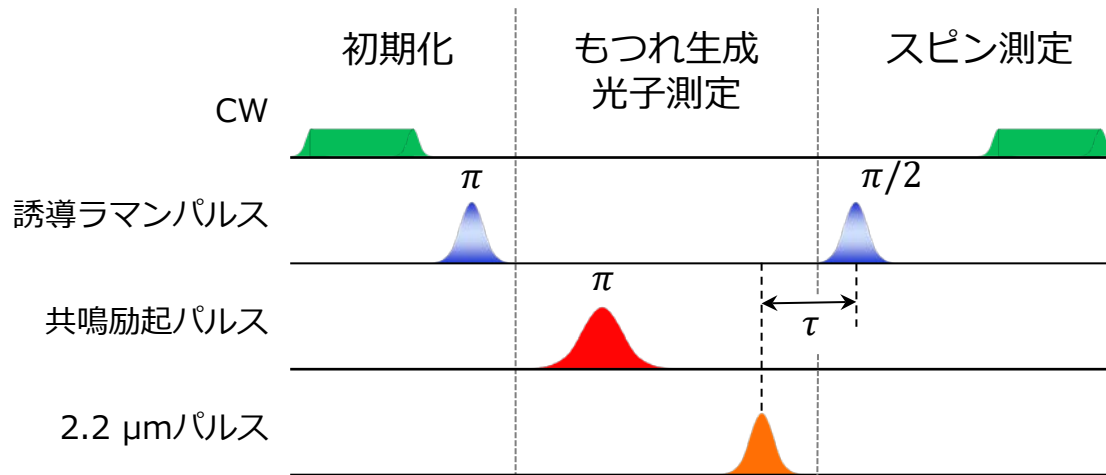
$P(\downarrow | H) = 0.065 \pm 0.03$



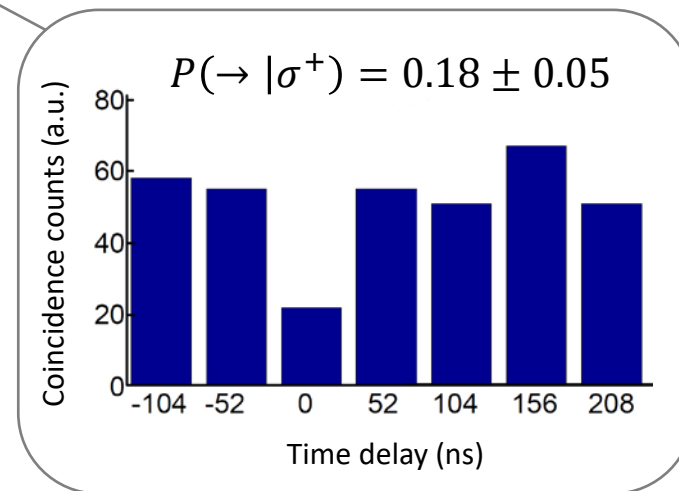
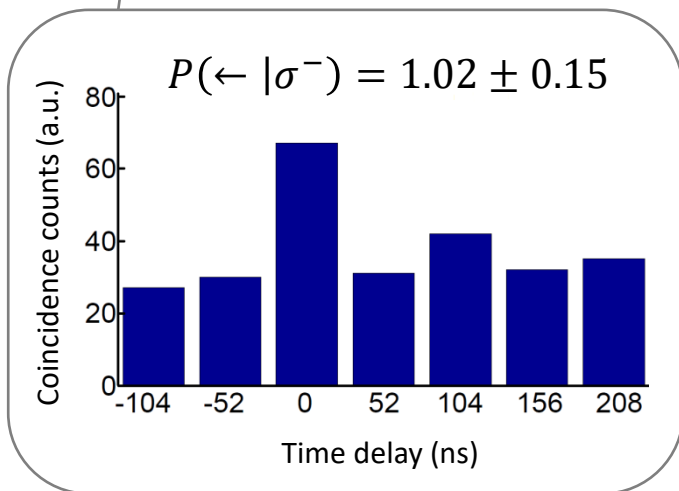
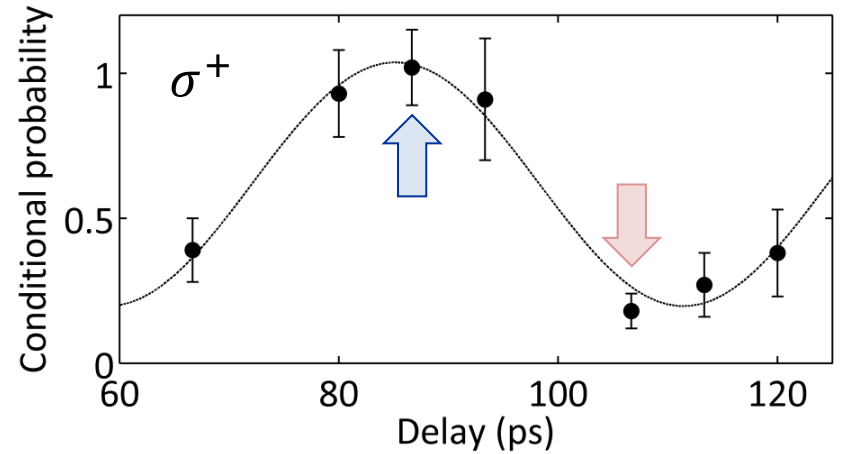
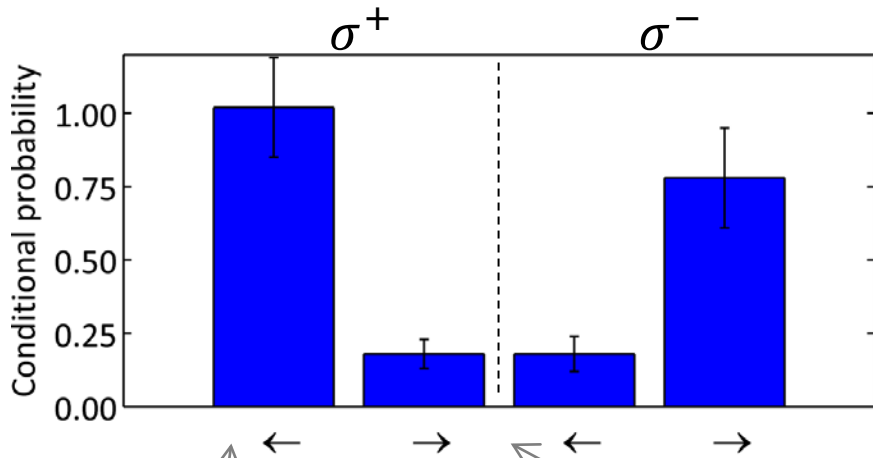
相関測定 (II)

$P(\rightarrow |\sigma^\pm), P(\leftarrow |\sigma^\pm)$ の測定: スピン基底の変換が必要

⇒ $\tau = nt_L$ or $(n + 1/2)t_L$ のタイミングで $\pi/2$ パルス



相関測定 (II)



忠実度 (フィデリティ)

忠実度の下限の見積り

$$F \equiv \langle \Psi_{ME} | \rho | \Psi_{ME} \rangle \geq F_I + F_{II}$$

$$F_I = \frac{1}{2} \left(\rho_{H\uparrow, H\uparrow} + \rho_{V\downarrow, V\downarrow} - 2\sqrt{\rho_{H\downarrow, H\downarrow} \rho_{V\uparrow, V\uparrow}} \right)$$

$$F_{II} = \frac{1}{2} \left(\rho_{\sigma^+\leftarrow, \sigma^+\leftarrow} - \rho_{\sigma^+\rightarrow, \sigma^+\rightarrow} + \rho_{\sigma^-\rightarrow, \sigma^-\rightarrow} - \rho_{\sigma^-\leftarrow, \sigma^-\leftarrow} \right)$$

$$\rho_{\Sigma\Pi, \Sigma\Pi} = \frac{1}{2} P(\Sigma|\Pi) \quad (\Sigma = H, V, \sigma^+, \sigma^- \quad \Pi = \uparrow, \downarrow, \rightarrow, \leftarrow)$$

⇒ F_I と F_{II} はそれぞれ相関測定(I)と(II)から得られる

$$F \geq 0.8 \pm 0.085$$

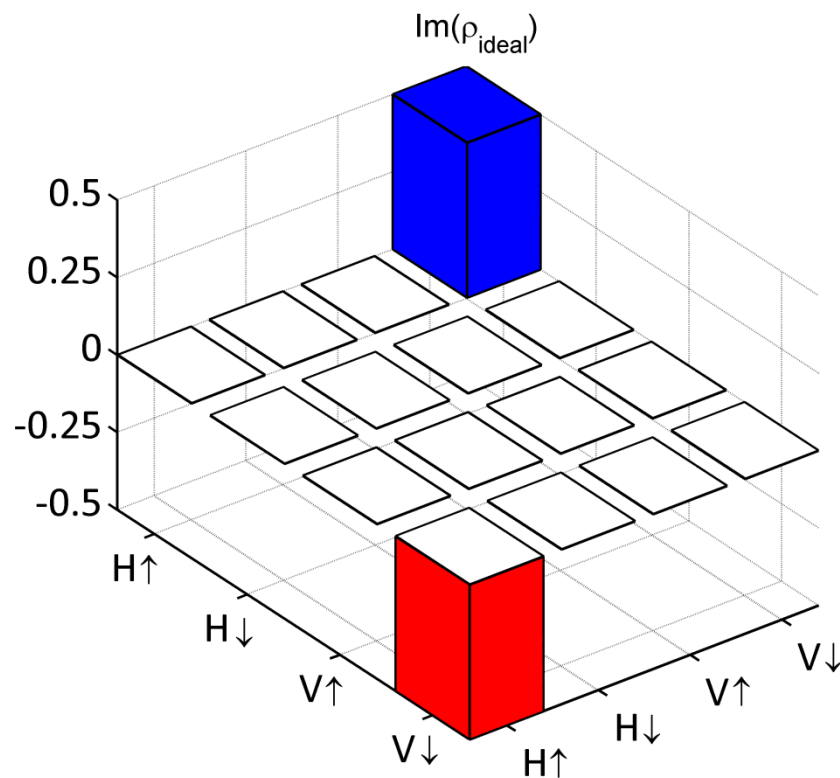
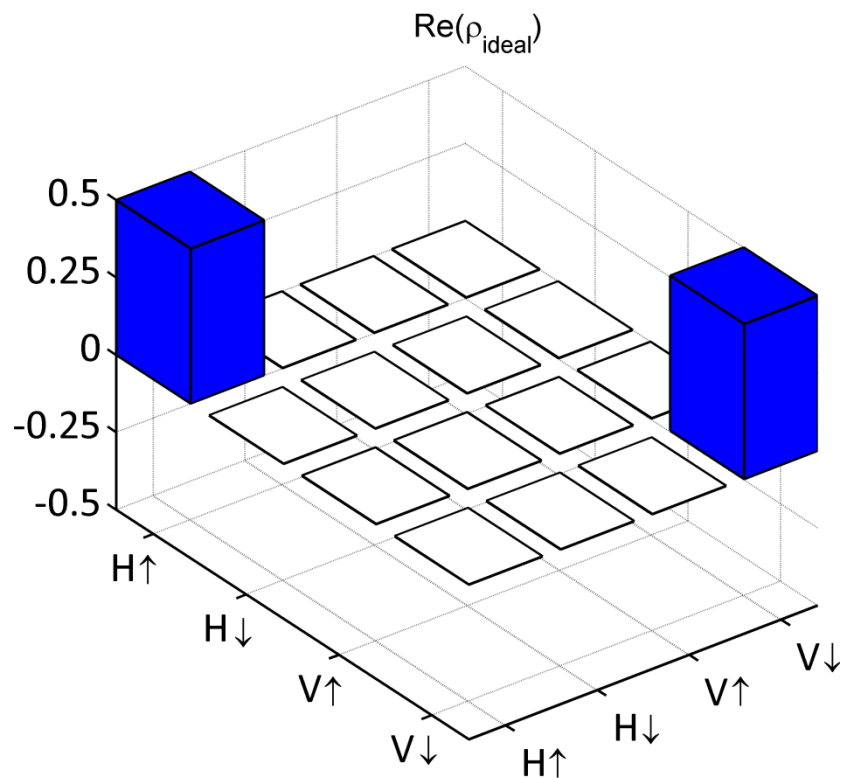
量子もつれの密度行列

純粋状態

$$|\Psi_{\text{ideal}}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle|iH\rangle + |\downarrow\rangle|V\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} i \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\rho_{\text{ideal}} = |\Psi_{\text{ideal}}\rangle\langle\Psi_{\text{ideal}}|$$

$$= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} i \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -i & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$



密度行列の再構成

行列要素の計算

$$\rho_{\text{recon}} = \frac{1}{4} \sum_{i,j} r_{ij} \sigma_i \otimes \sigma_j \quad \longleftrightarrow \quad r_{ij} = \text{Tr}(\rho_{\text{recon}} \sigma_i \otimes \sigma_j)$$

線形独立な基底の組

(最低15組必要)

$$P(\uparrow | H), P(\downarrow | H), P(\uparrow | V), P(\downarrow | V)$$

$$P(\leftarrow_X | H), P(\rightarrow_Y | H), P(\leftarrow_X | V), P(\rightarrow_Y | V)$$

$$P(\leftarrow_X | \sigma^+), P(\rightarrow_Y | \sigma^+), P(\uparrow | \sigma^+), P(\downarrow | \sigma^+)$$

$$P(\leftarrow_X | D^+), P(\leftarrow_Y | D^+), P(\uparrow | D^+), P(\downarrow | D^+)$$

計算例

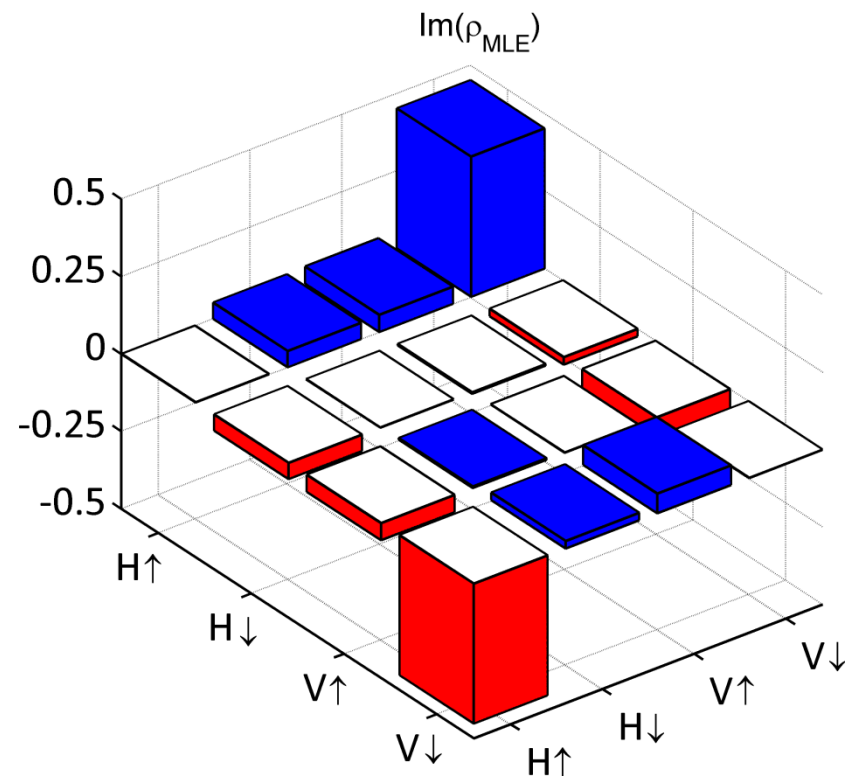
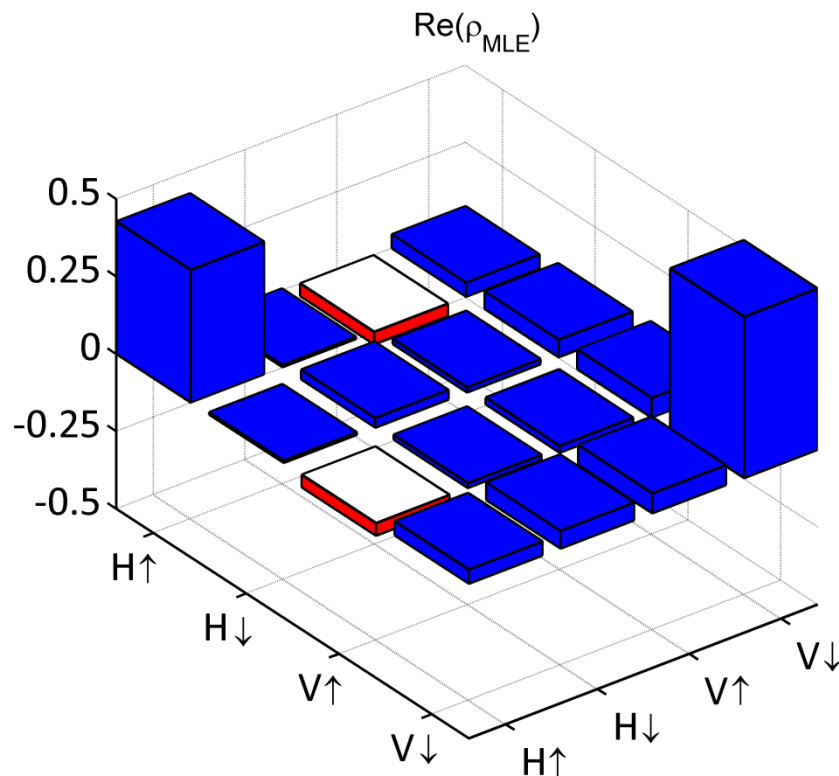
$$\begin{aligned} \sigma_0 \otimes \sigma_X &= (|\uparrow\rangle\langle\uparrow| + |\downarrow\rangle\langle\downarrow|) \otimes (|H\rangle\langle V| + |V\rangle\langle H|) \\ &= (|\uparrow\rangle\langle\uparrow| + |\downarrow\rangle\langle\downarrow|) \otimes (2|D^+\rangle\langle D^+| - |H\rangle\langle H| - |V\rangle\langle V|) \end{aligned}$$

$$r_{01} = 2\rho_{D^+\uparrow, D^+\uparrow} + 2\rho_{D^+\downarrow, D^+\downarrow} - \rho_{H\uparrow, H\uparrow} - \rho_{H\downarrow, H\downarrow} - \rho_{V\uparrow, V\uparrow} - \rho_{V\downarrow, V\downarrow}$$

密度行列の再構成

最尤検定 $\langle \Psi_{\text{ideal}} | \rho_{\text{MLE}} | \Psi_{\text{ideal}} \rangle = 92.1 \pm 3.2\%$

実験データから密度行列が非負のエルミート行列になるよう再構成



その後の進展

Observation of Quantum Jumps of a Single Quantum Dot Spin Using Submicrosecond Single-Shot Optical Readout

Aymeric Delteil, Wei-bo Gao, Parisa Fallahi, Javier Miguel-Sanchez, and Atac Imamoğlu
Institute of Quantum Electronics, ETH Zurich, CH-8093 Zurich, Switzerland

Phys. Rev. Lett. **112**, 116802 (2014) Delteil *et al.*

Quantum teleportation from a propagating photon to a solid-state spin qubit

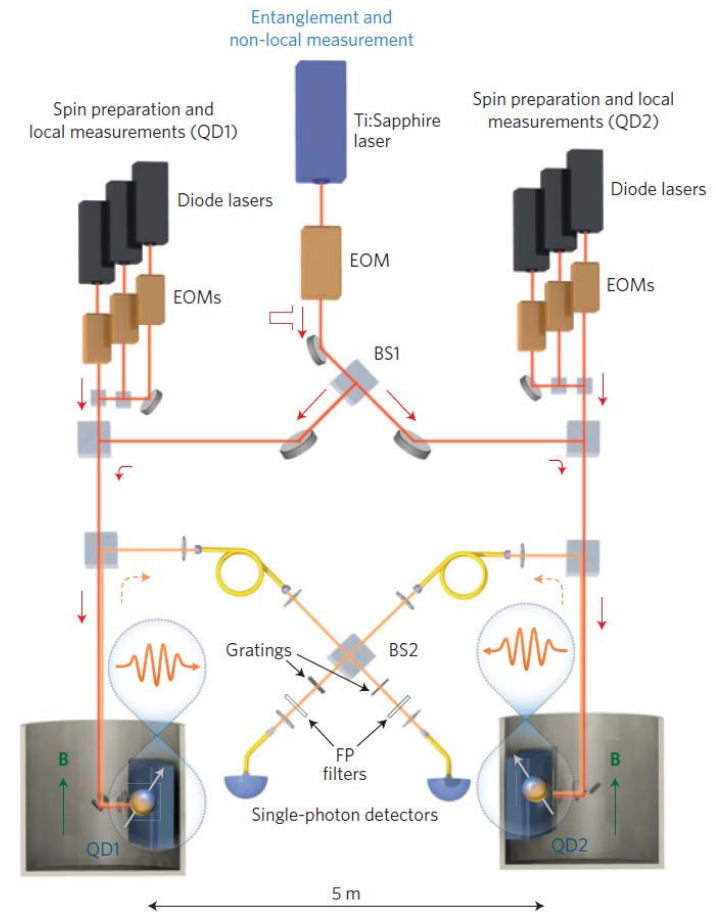
W.B. Gao¹, P. Fallahi¹, E. Togan¹, A. Delteil¹, Y.S. Chin¹, J. Miguel-Sanchez¹ & A. Imamoğlu¹

Nature Commun. **4**, 2744 (2013) Gao *et al.*

Generation of heralded entanglement between distant hole spins

Aymeric Delteil[†], Zhe Sun[†], Wei-bo Gao^{1,2‡}, Emre Togan¹, Stefan Faelt¹ and Ataç Imamoğlu^{1*}

Nature Phys. **12**, 218 (2016) Delteil *et al.*



NV中心での進展

Quantum entanglement between an optical photon and a solid-state spin qubit

E. Togan^{1*}, Y. Chu^{1*}, A. S. Trifonov¹, L. Jiang^{1,2,3}, J. Maze¹, L. Childress^{1,4}, M. V. G. Dutt^{1,5}, A. S. Sørensen⁶, P. R. Hemmer⁷, A. S. Zibrov¹ & M. D. Lukin¹

Nature **466**, 730 (2010) Togan *et al.*

Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres

B. Hensen^{1,2}, H. Bernien^{1,2†}, A. E. Dréau^{1,2}, A. Reiserer^{1,2}, N. Kalb^{1,2}, M. S. Blok^{1,2}, J. Ruitenber^{1,2}, R. F. L. Vermeulen^{1,2}, R. N. Schouten^{1,2}, C. Abellán³, W. Amaya³, V. Pruneri^{3,4}, M. W. Mitchell^{3,4}, M. Markham⁵, D. J. Twitchen⁵, D. Elkouss¹, S. Wehner¹, T. H. Taminiau^{1,2} & R. Hanson^{1,2}

Nature **526**, 682 (2015) Hensen *et al.*

ディビンチェンゾの要請

- **量子計算の要素技術**

1. スケーラブルな量子ビット列…×
2. 初期化…○
3. ユニバーサル量子ゲート…×
4. 長いコヒーレンス時間…○
5. 射影測定…○

- **量子通信の要素技術**

6. 物質量子ビットと飛行量子ビットの接続…○
7. 遠隔地間での飛行量子ビットのやり取り…○

参考書

- R. J. Warburton
 - **“Single spins in self-assembled quantum dots”**
Nature Mat. **12**, 483 (2013)
- K. B. Gao *et al.*
 - **“Coherent manipulation, measurement and entanglement of individual solid-state spins using optical fields”**
Nature Photon. **9**, 363 (2015)
- 山本喜久、阿部英介
 - **“光制御量子ドットスピンを量子情報処理システムの現状と展望”**
固体物理 **48**, (11) 541 (2013)

量子センシングの参考書

- C. L. Degen *et al.*
 - **“Quantum Sensing”**
arXiv:1611.02427 (to appear in Rev. Mod. Phys.)
- R. Schirhagl *et al.*
 - **“Nitrogen-Vacancy Centers in Diamond: Nanoscale Sensors for Physics and Biology”**
Annu. Rev. Phys. Chem. 65, 83 (2014)
- Lily Childress
 - **“Diamond Quantum Sensing Workshop 2015”**
<https://www.youtube.com/watch?v=v8byA25gaJ8>
<https://www.youtube.com/watch?v=hJpRwyHuIS4>