

固体素子による量子技術: 光学活性量子ドット

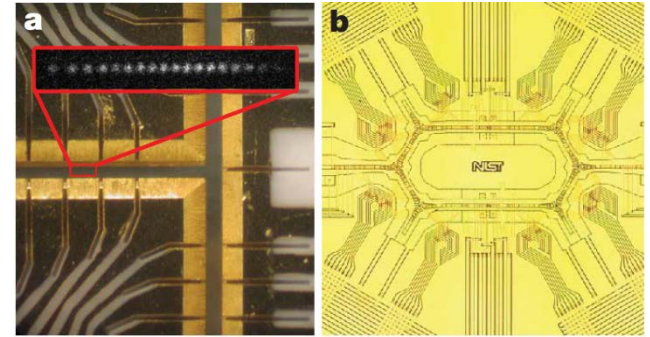
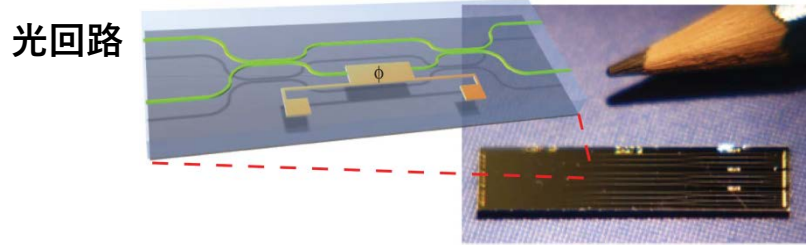
阿部 英介

理化学研究所 創発物性科学研究センター

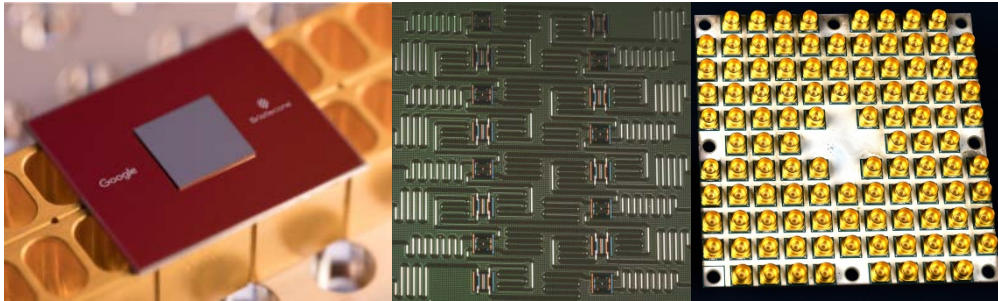
応用物理特別講義A

2020年度春学期後半 金曜4限@~~14-202~~オンライン講義

量子技術のプラットフォーム



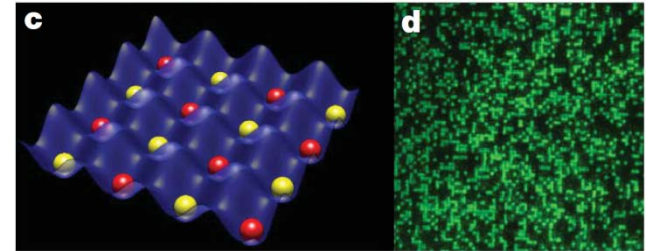
超伝導回路



©Google

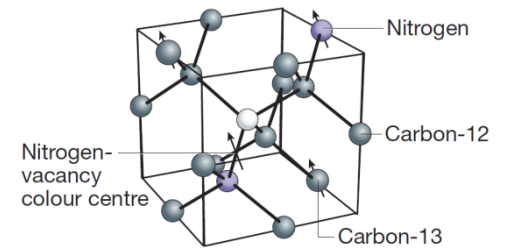
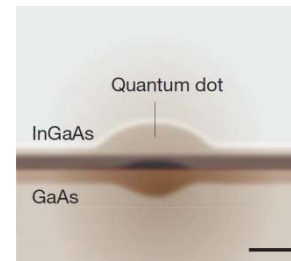
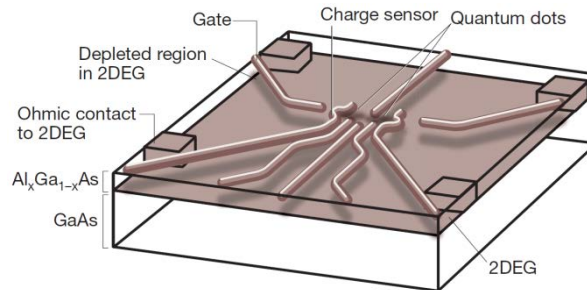
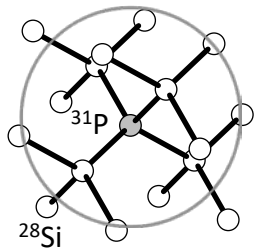
©IBM

©Intel



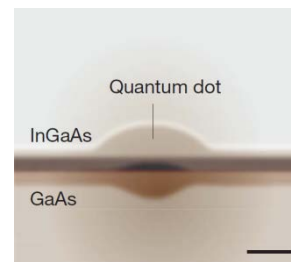
捕捉イオン/冷却原子

半導体スピン

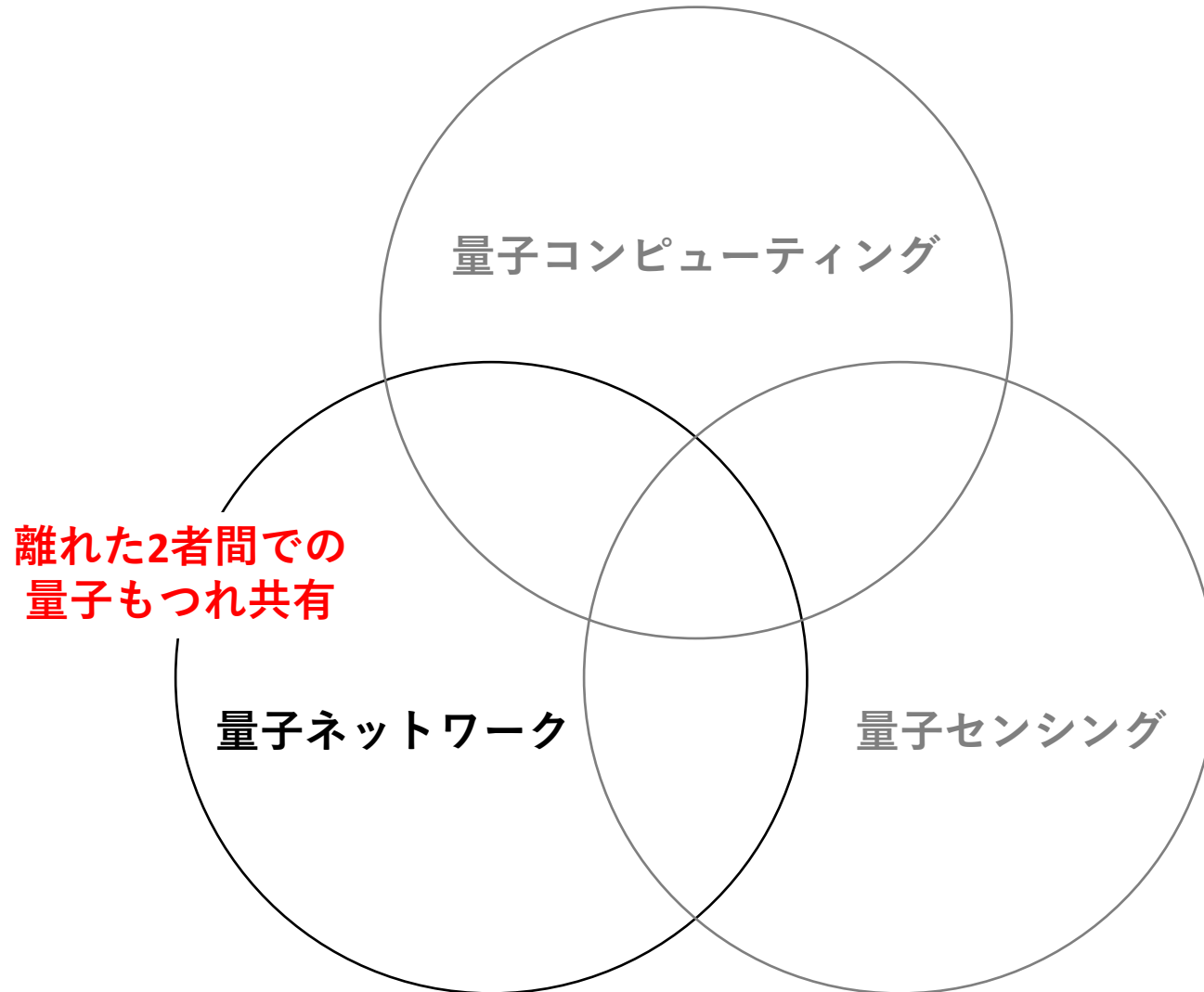


量子技術のプラットフォーム

半導体スピン



量子技術



ディビンチェンゾの要請

- **量子コンピューティングの要素技術**

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

- **量子ネットワークの要素技術**

6. 物質量子ビットと飛行量子ビットの接続
7. 遠隔地間の飛行量子ビットを介したやり取り

講義内容

- **自己形成量子ドットの物理**
 - 荷電励起子(トリオン)
 - 単一スピンの全光コヒーレント制御
- **量子ネットワークの要素技術**
 - スピン-光子量子もつれ
 - スピン-スピン量子もつれ

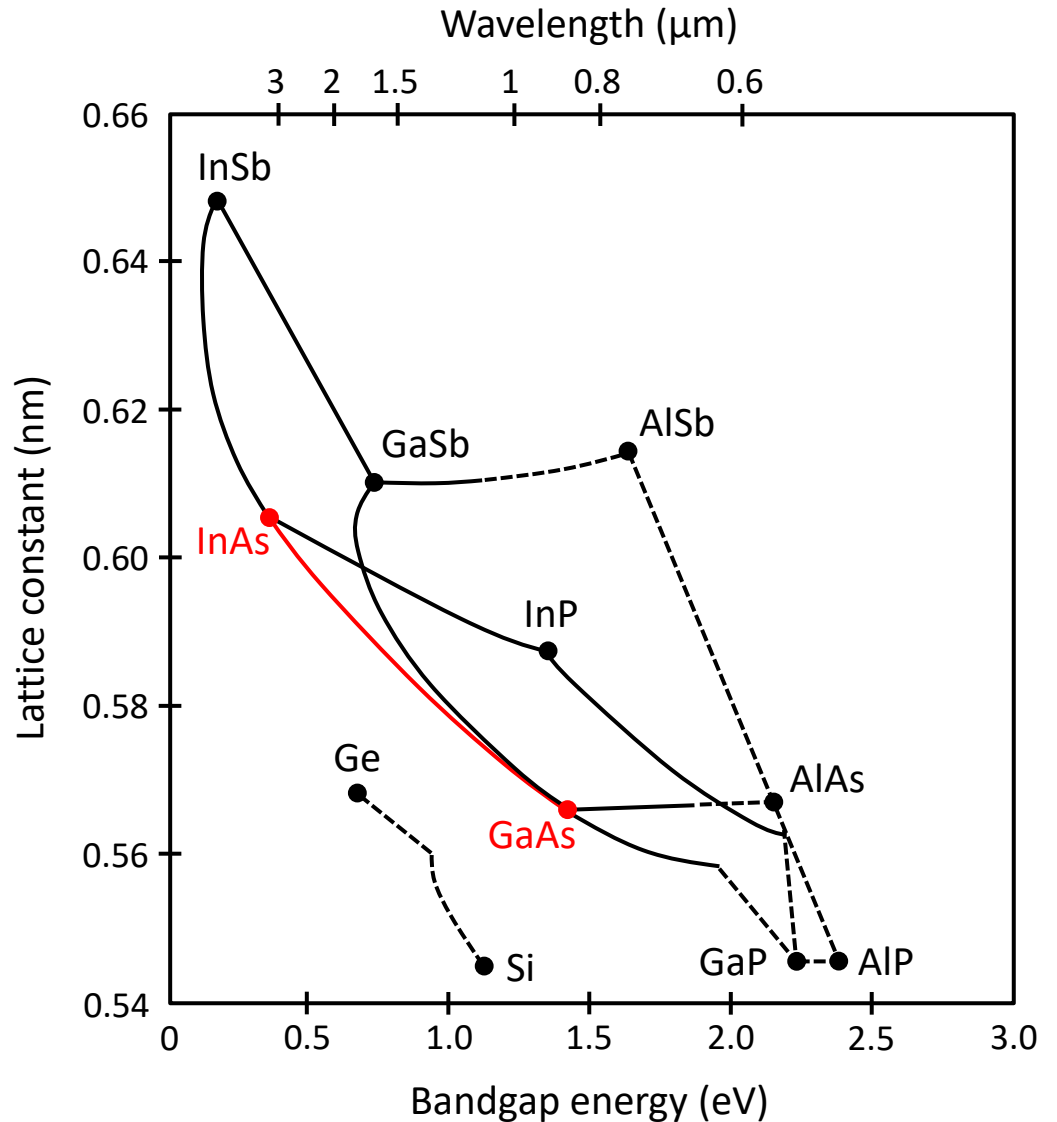
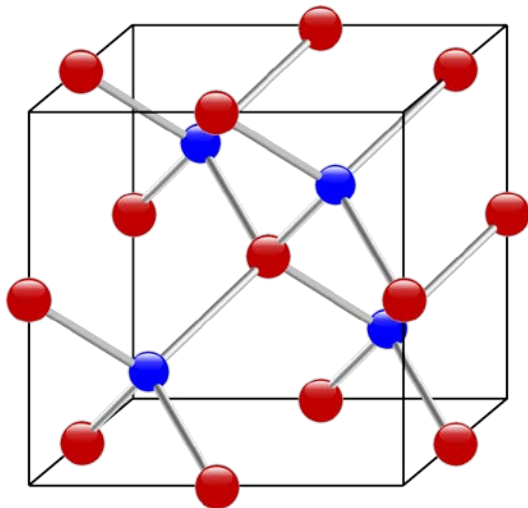
講義内容

- **自己形成量子ドットの物理**
 - 荷電励起子(トリオン)
 - 単一スピンの全光コヒーレント制御
- **量子ネットワークの要素技術**
 - スピン-光子量子もつれ
 - スピン-スピン量子もつれ

自己形成量子ドット

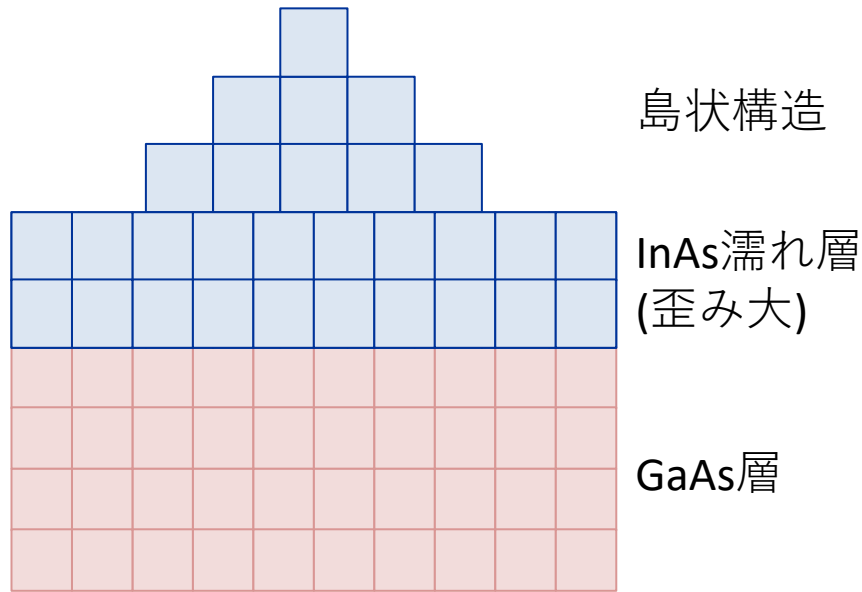
III (13)	IV (14)	V (15)
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In	Sn	Sb

閃亜鉛鉱構造

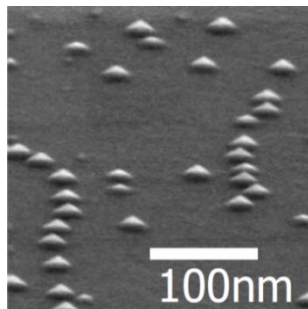
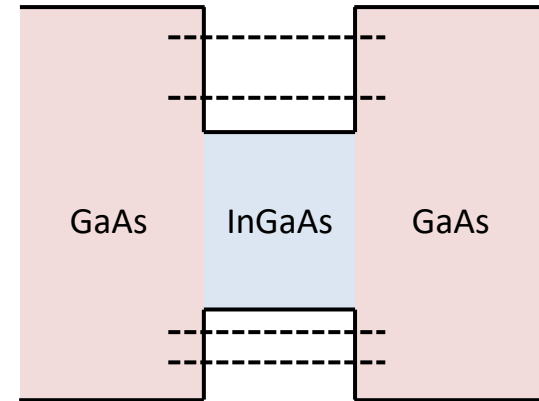


自己形成量子ドット

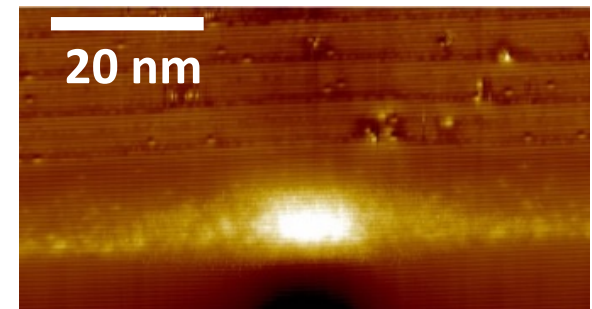
ストランスキ・クラスタノフ成長モードによるQD形成



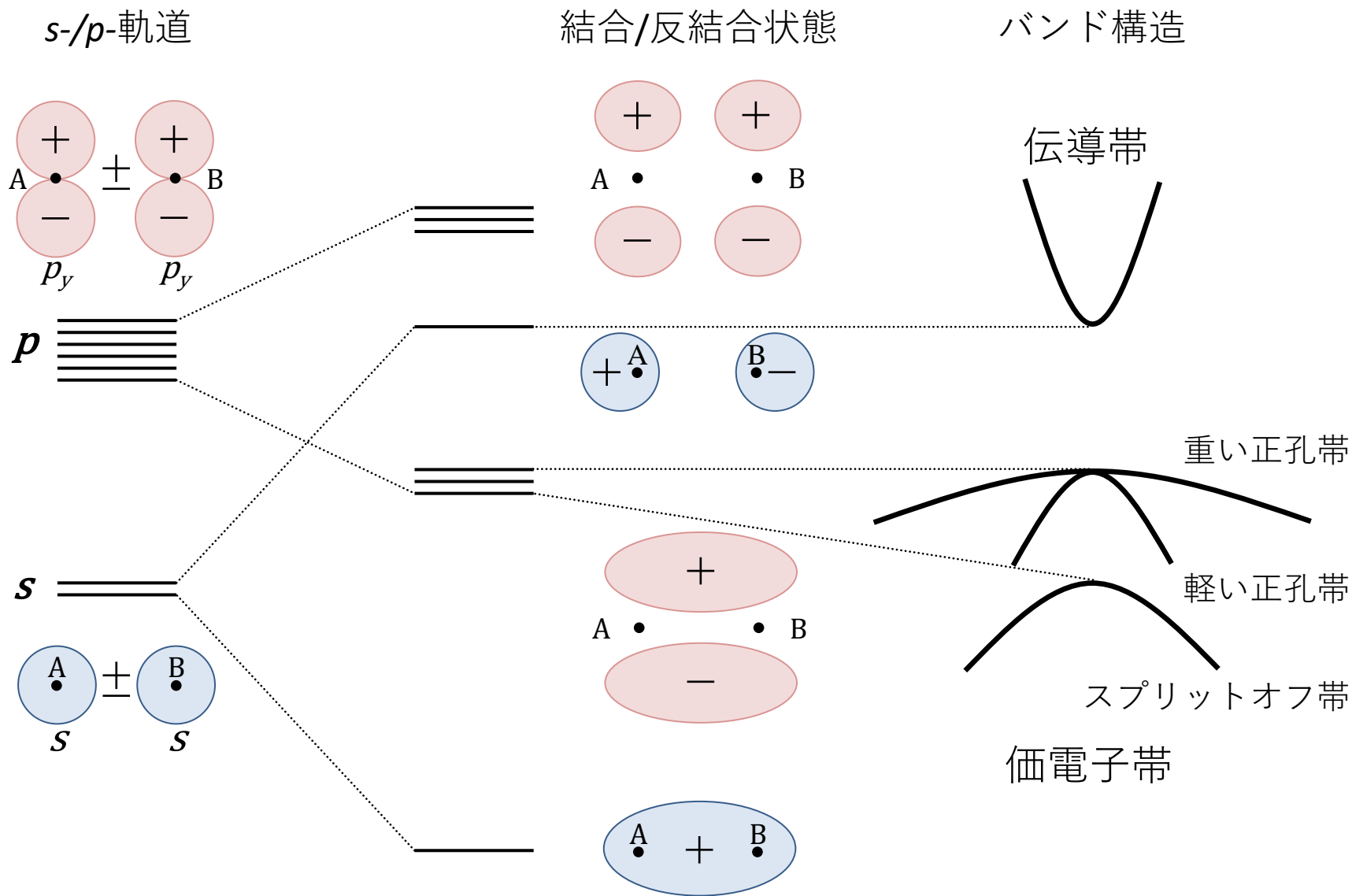
3次元閉じ込め準位の形成



キャップ層ありInGaAs QD
(アニール処理によるGaの混合)



バンド構造: 分子軌道



伝導帯底の記述

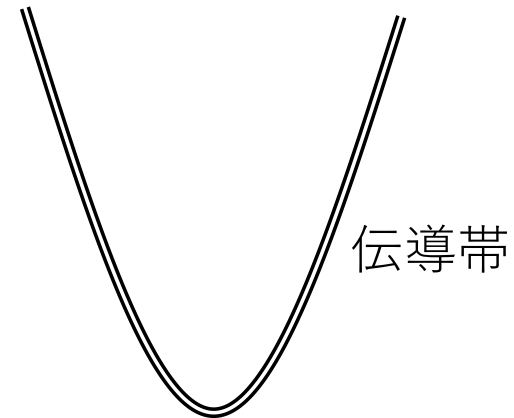
球面調和関数 Y_l^m (中心力場の電子)からの連想で
“s-軌道的な”波動関数 $|S\rangle$ をディラック記法で導入する

軌道成分 $l = 0$

$$|l, m_l\rangle = |0, 0\rangle = |S\rangle$$

スピン成分 $s = 1/2$

$$|s, m_s\rangle = \begin{cases} |1/2, 1/2\rangle & = |\alpha\rangle \\ |1/2, -1/2\rangle & = |\beta\rangle \end{cases}$$



$$|\text{CB } \uparrow\rangle = |S\rangle|\alpha\rangle$$

$$|\text{CB } \downarrow\rangle = |S\rangle|\beta\rangle$$

価電子帯頂上の記述

“p-軌道的な”波動関数 $|X, Y, Z\rangle$ を導入($Y_{l=1}^{m=0, \pm 1}$ のデカルト座標表示)

軌道成分 $l = 1$

スピン成分 $s = 1/2$

$$|l, m_l\rangle = \begin{cases} |1, 1\rangle & = -\frac{1}{\sqrt{2}}(|X\rangle + i|Y\rangle) \\ |1, 0\rangle & = |Z\rangle \\ |1, -1\rangle & = \frac{1}{\sqrt{2}}(|X\rangle - i|Y\rangle) \end{cases} \quad |\alpha\rangle, |\beta\rangle$$

スピン軌道相互作用 $H_{SO} = \lambda \mathbf{l} \cdot \mathbf{s}$

⇒ 全角運動量で対角化 $[\mathbf{j}^2, H_{SO}] = 0 \quad [j_z, H_{SO}] = 0$

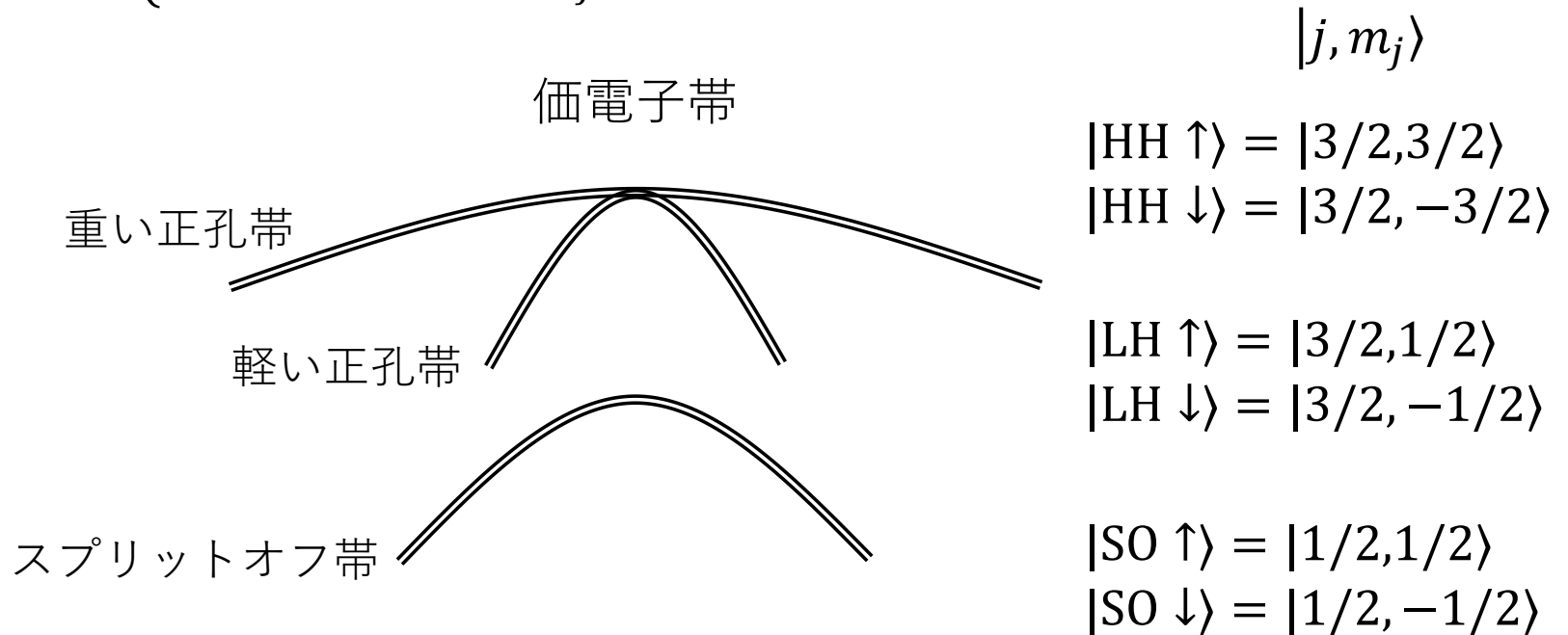
$$\mathbf{j}^2 = (\mathbf{l} + \mathbf{s})^2 = \mathbf{l}^2 + \mathbf{s}^2 + 2\mathbf{l} \cdot \mathbf{s}$$

$$\begin{aligned} [j_z, \mathbf{l} \cdot \mathbf{s}] &= [l_z, l_x s_x] + [l_z, l_y s_y] + [s_z, l_x s_x] + [s_z, l_y s_y] \\ &= i\hbar(l_y s_x - l_x s_y + l_x s_y - l_y s_x) = 0 \end{aligned}$$

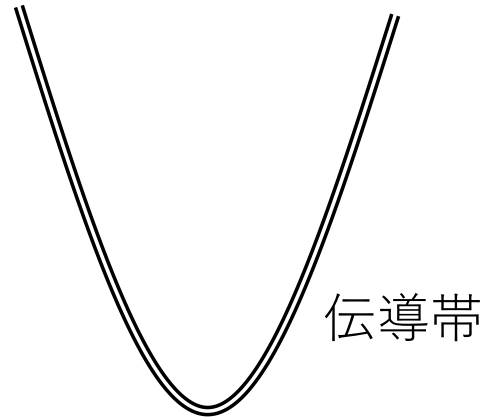
価電子帯頂上の記述

全角運動量

$$j = \begin{cases} l + s = 3/2 & m_j = \pm 3/2, \pm 1/2 \\ l - s = 1/2 & m_j = \pm 1/2 \end{cases}$$



バルクのバンド構造



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

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

$$|j, m_j\rangle$$

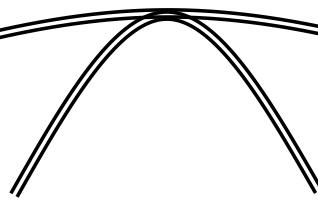
$$|HH \uparrow\rangle = |3/2, 3/2\rangle$$

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

重い正孔帯



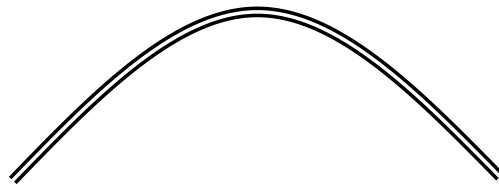
軽い正孔帯



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

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

スプリットオフ帯

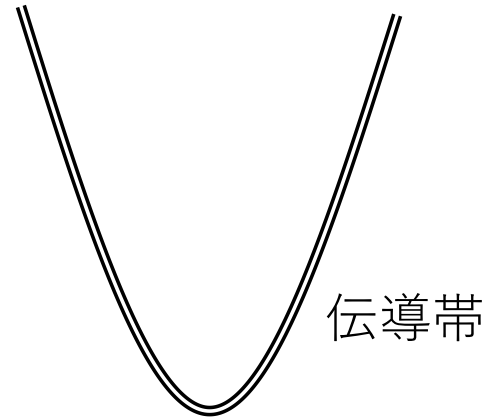


$$|SO \uparrow\rangle = |1/2, 1/2\rangle$$

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

価電子帯

ナノ構造のバンド構造



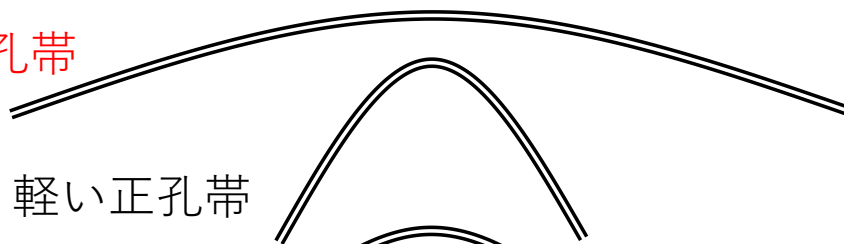
$$|CB \uparrow\rangle = |S\rangle|\alpha\rangle$$

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

$$|j, m_j\rangle$$

閉じ込めによりHHとLHの縮退が解ける

重い正孔帯



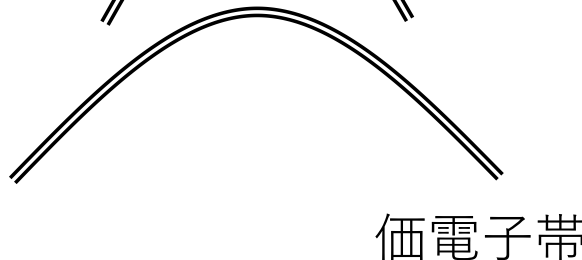
$$|HH \uparrow\rangle = |3/2, 3/2\rangle$$

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

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

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

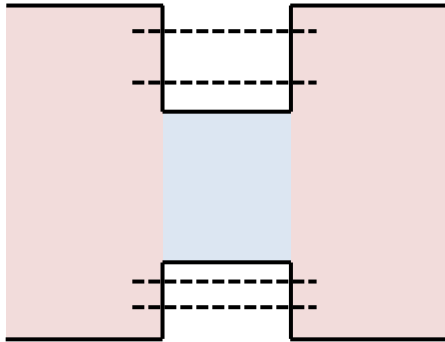
スプリットオフ帯



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

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

中性励起子

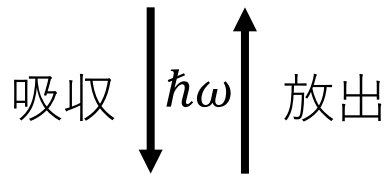


$|0\rangle$ “真空”(詰まった価電子帯と空の伝導帯)

明励起子(光子のヘリシティ ± 1 と結合)

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

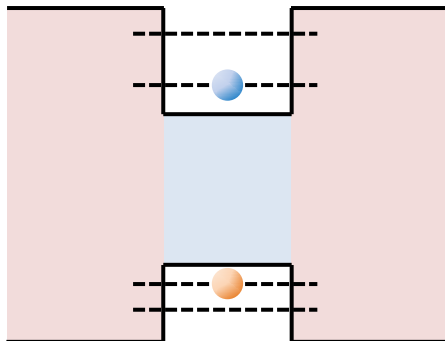
$$|-1\rangle = |\text{CB } \uparrow\rangle_e |\text{HH } \downarrow\rangle_h$$



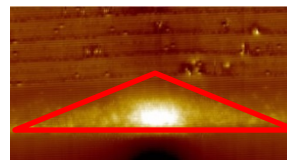
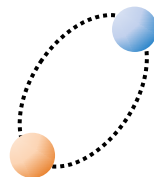
暗励起子

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

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

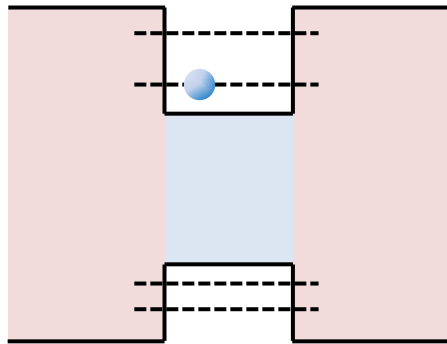


$|\pm 1\rangle, |\pm 2\rangle$



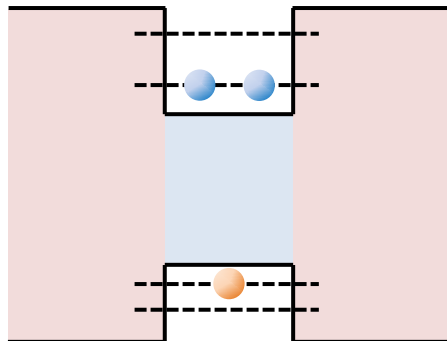
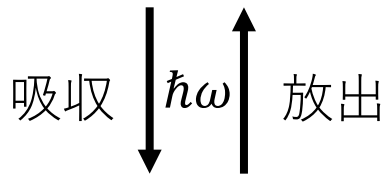
成長方向を量子化軸に取る

荷電励起子(トリオン)



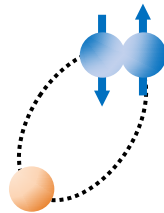
$$|e^{-}\rangle = |\text{CB } \uparrow, \downarrow\rangle_e$$

1電子が常時QD内にトラップ



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

2電子は一重項を組み非磁性化



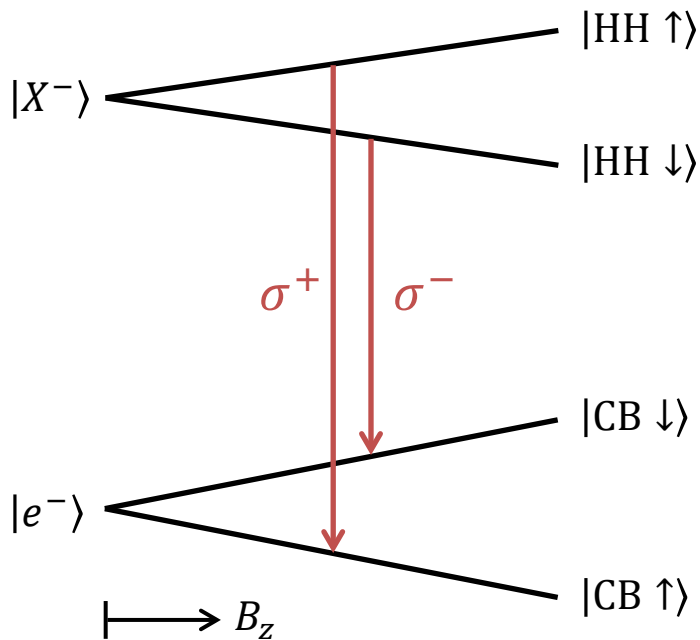
正孔スピンのみ考慮すればよい
電子-正孔交換相互作用なし

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

荷電励起子: ゼーマン効果

ファラデー配置

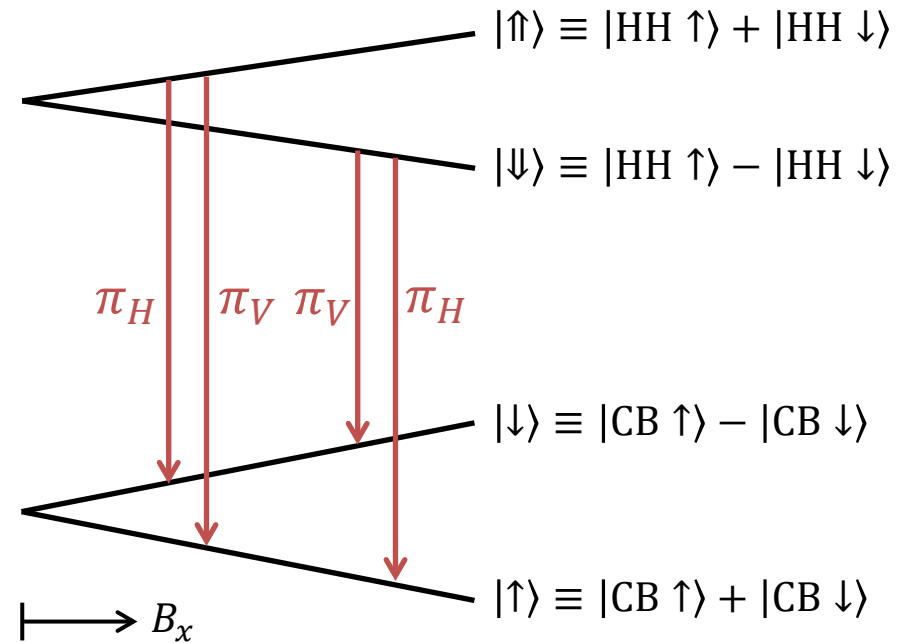
$$H_Z^{X,F} = \frac{\mu_B B_z}{2} \begin{pmatrix} g_{hz} & 0 \\ 0 & -g_{hz} \end{pmatrix}$$



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

フォイト配置

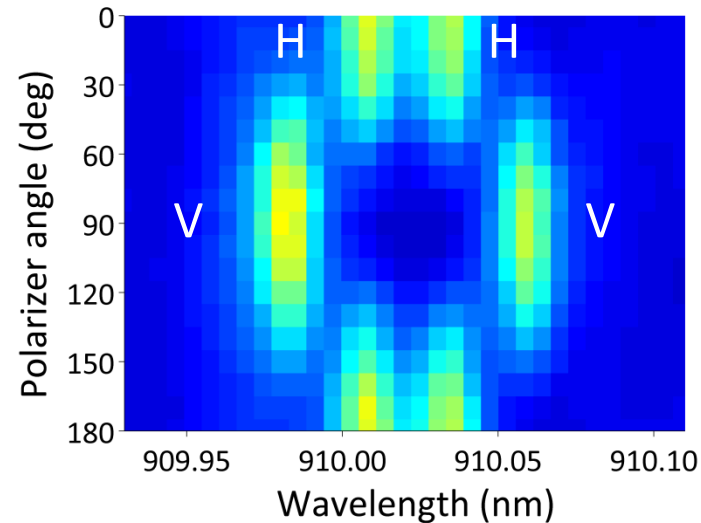
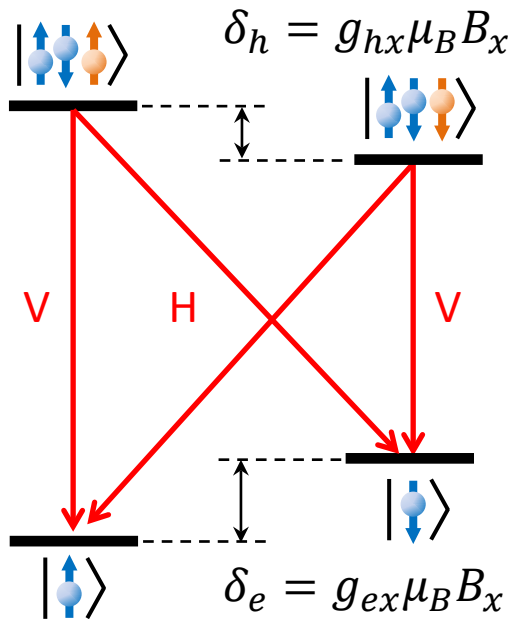
$$H_Z^{X,V} = \frac{\mu_B B_x}{2} \begin{pmatrix} 0 & g_{hx} \\ g_{hx} & 0 \end{pmatrix}$$



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

量子ビットに使うのは...

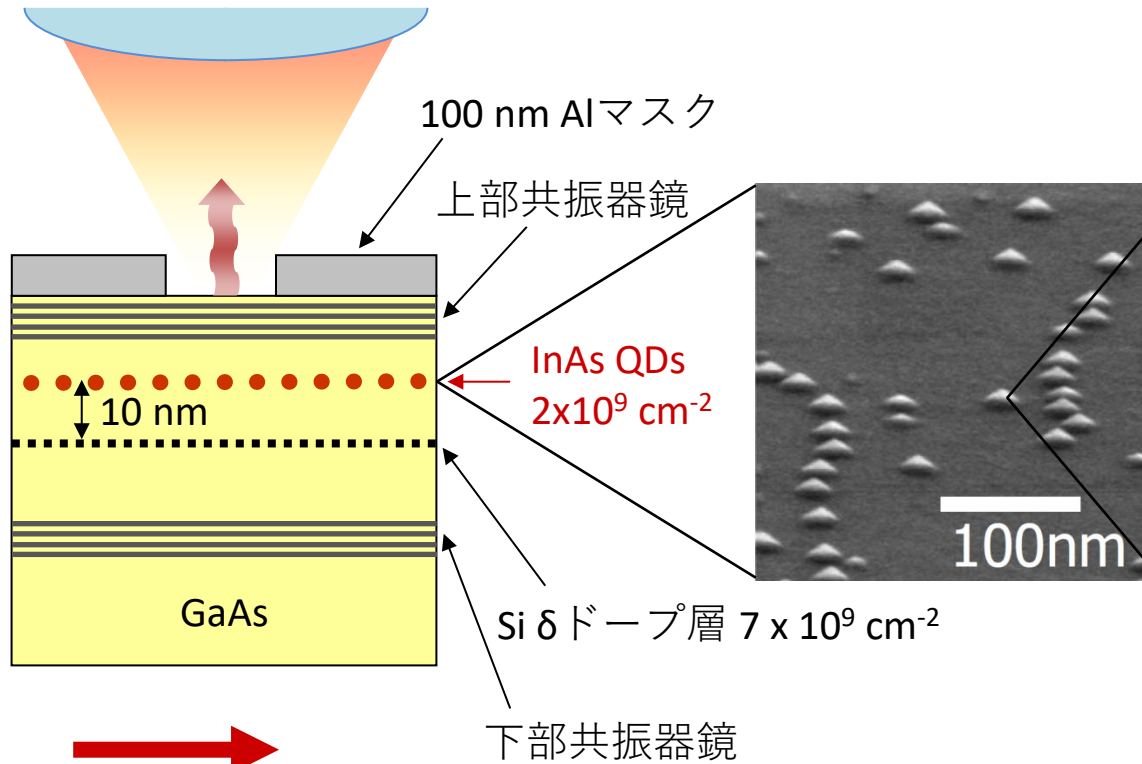
フォイト配置における荷電量子ドットのゼーマン準位



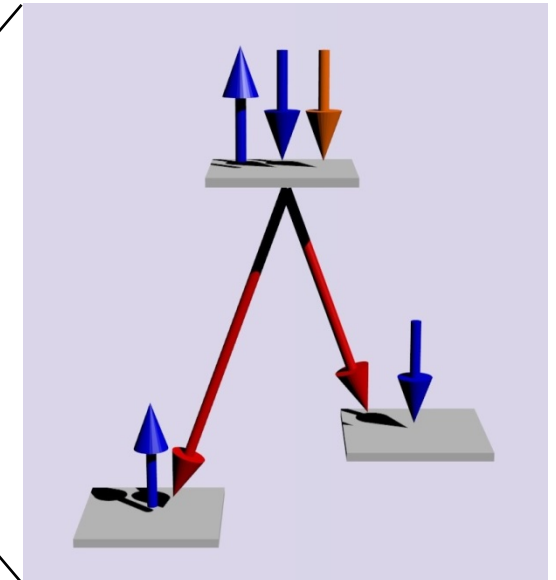
- 単一電子スピン
- 有効ラムダ型3準位を形成
 - 光ポンピングによる初期化と読み出し
 - 光パルスによる超高速スピン制御
 - スピン-光子量子もつれ生成

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)



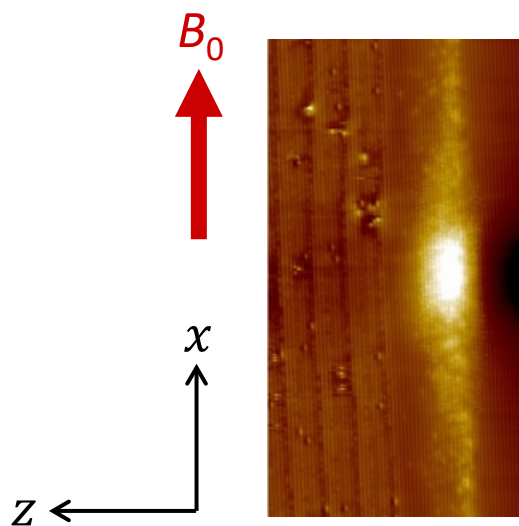
ラムダ型3準位



$B_0 > 3 \text{ T}$ (フォイト配置)

座標軸の対応

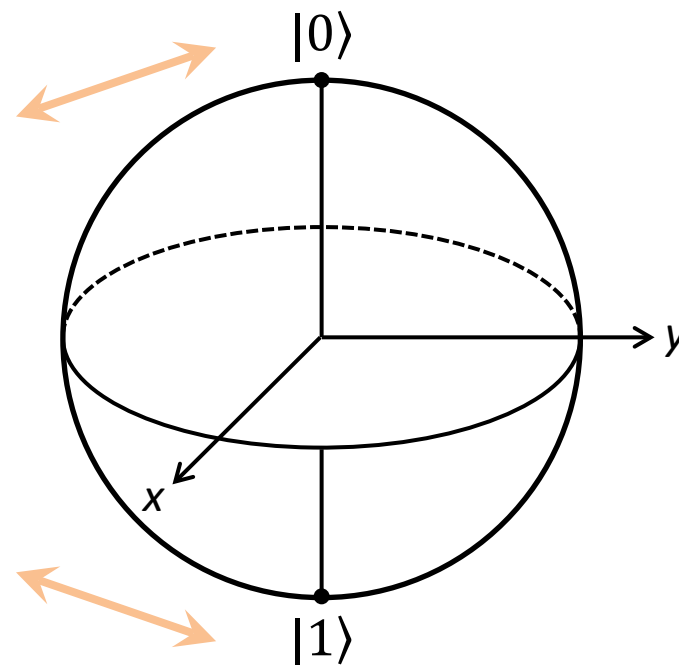
実空間



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

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

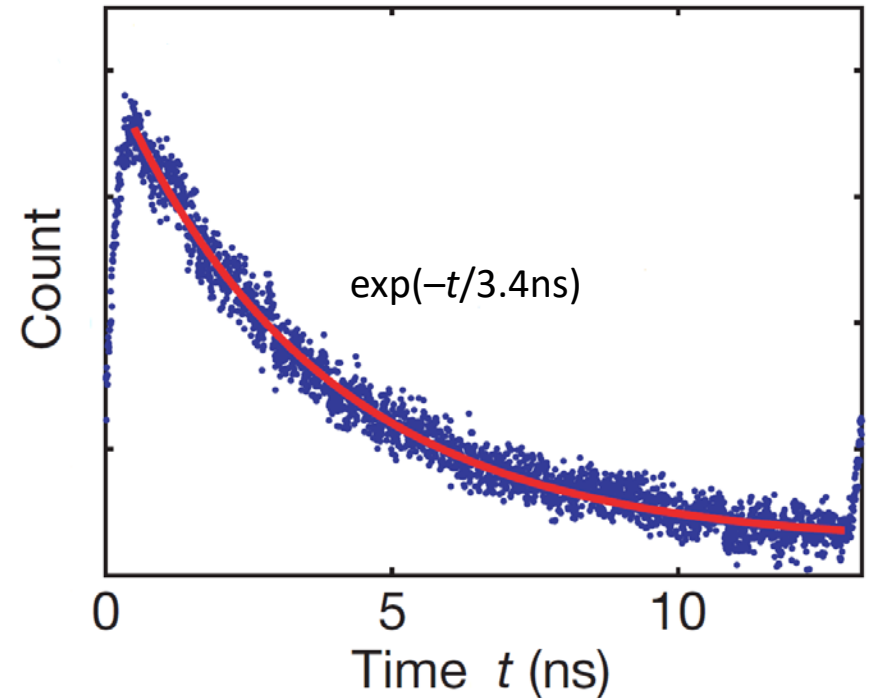
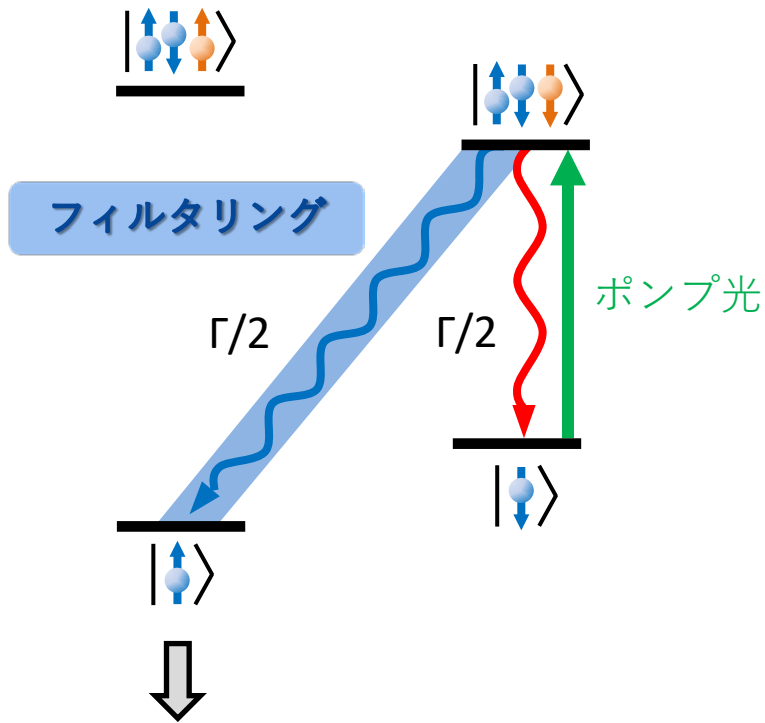
ブロッホ球



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

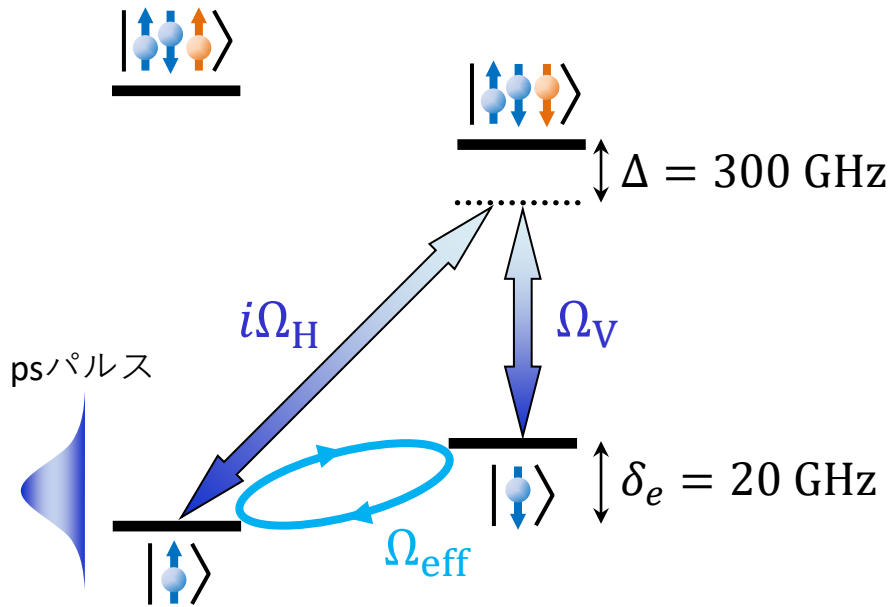
初期化と読み出し

CWレーザー光による光ポンピング

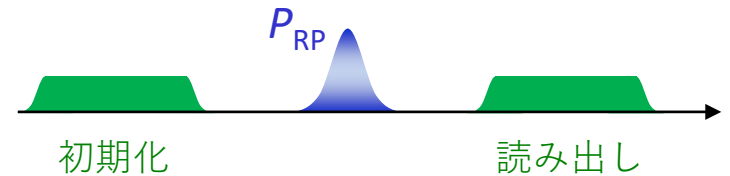
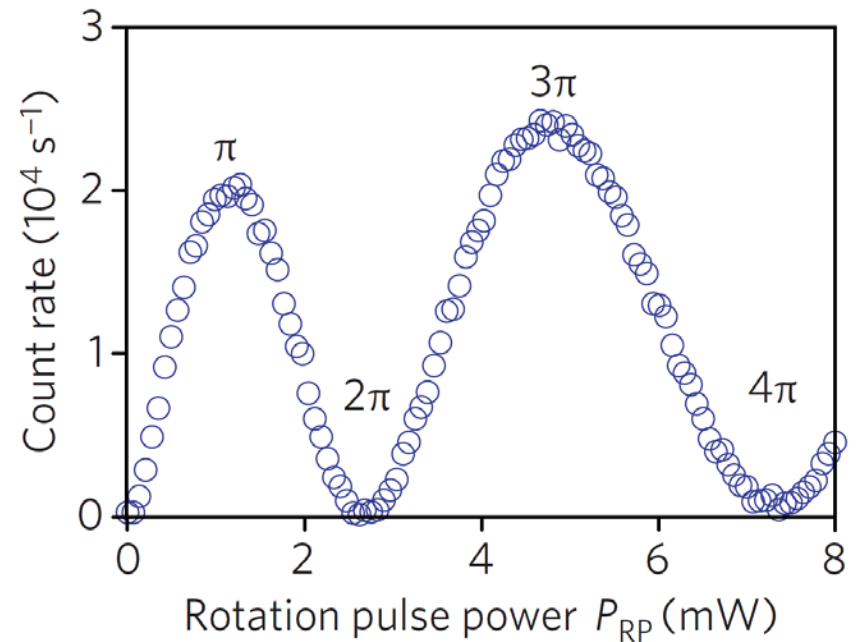


x軸回転

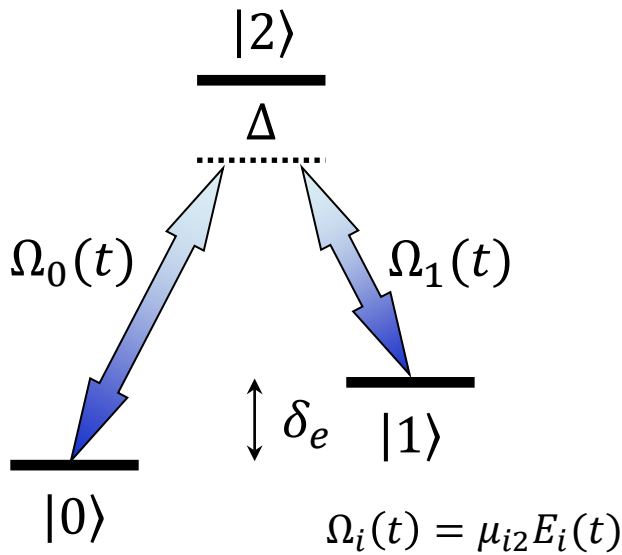
離調円偏光パルス(ラビ振動)



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



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

$$H_{\text{eff}} = \begin{pmatrix} -\delta_e & -\Omega_{\text{eff}}(t)/2 \\ -\Omega_{\text{eff}}^*(t)/2 & 0 \end{pmatrix} - \underbrace{\begin{pmatrix} |\Omega_0(t)|^2/4\Delta & 0 \\ 0 & |\Omega_1(t)|^2/4\Delta \end{pmatrix}}_{\text{ACシュタルク効果}}$$

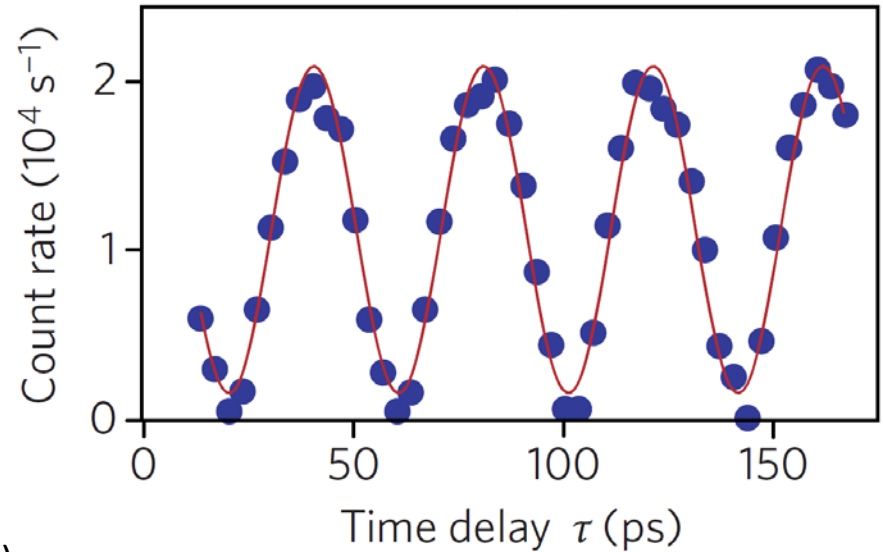
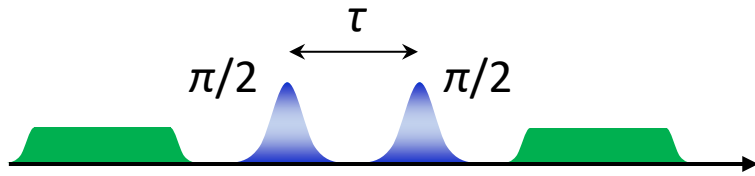
有効ラビ周波数

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

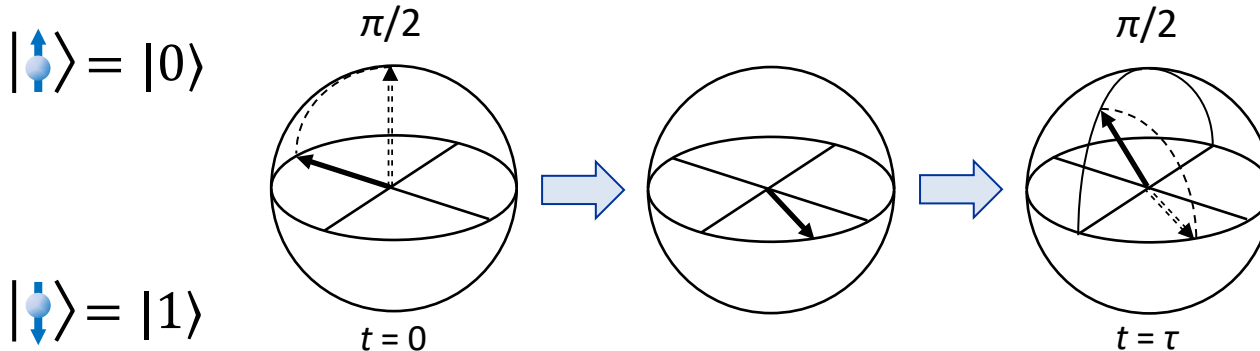
ACシュタルク効果

z軸回転

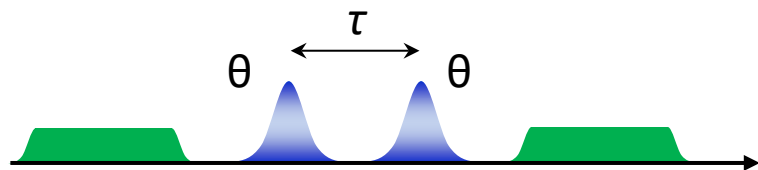
ラムゼー干渉(ラーモア歳差運動)



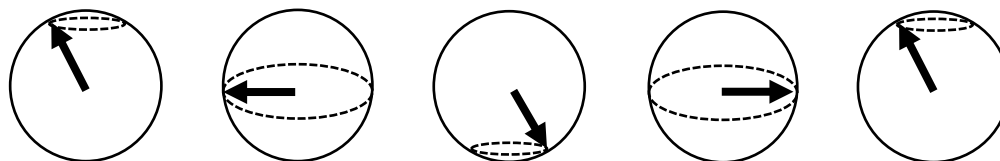
(静止座標系)



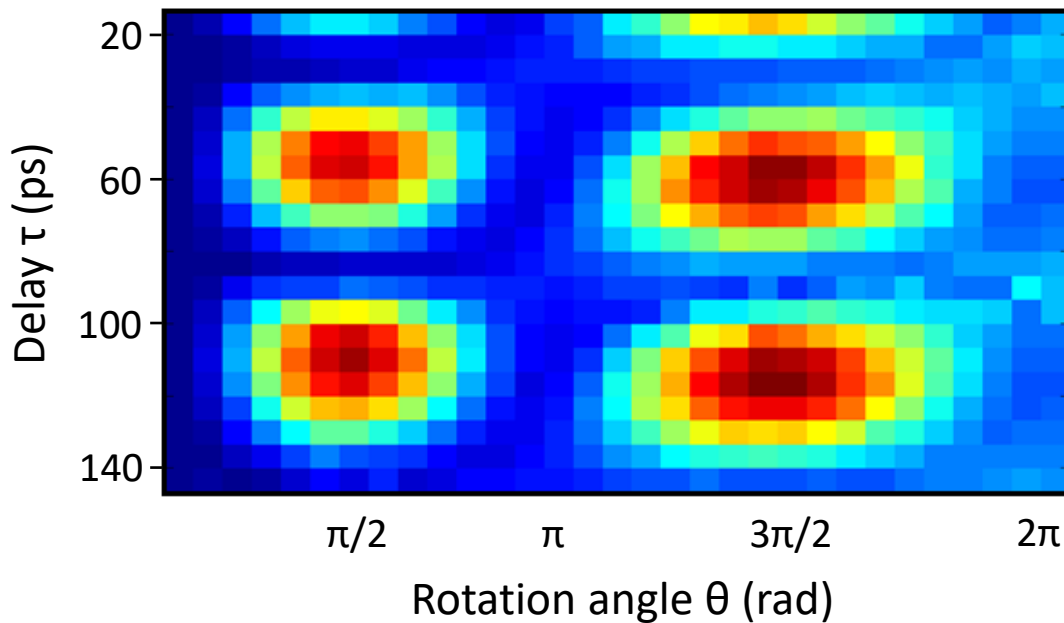
1量子ビットゲート



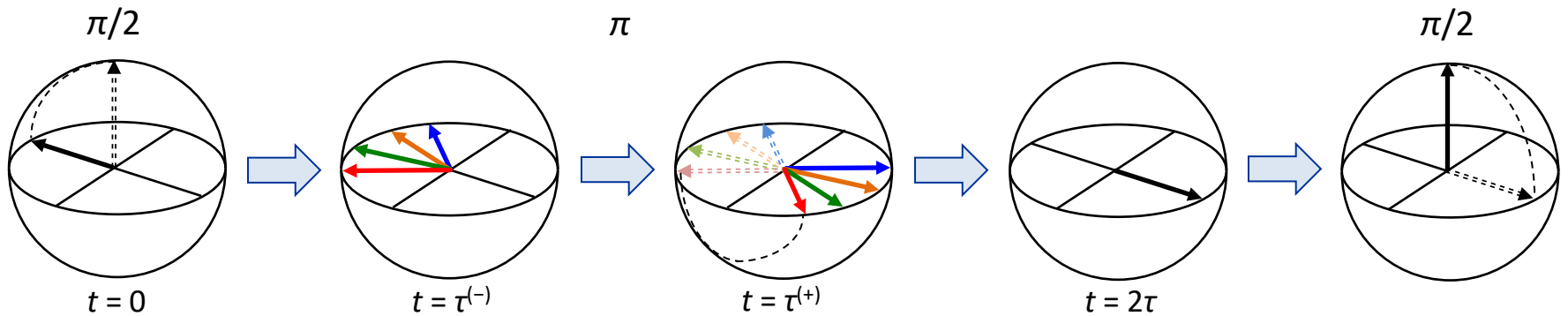
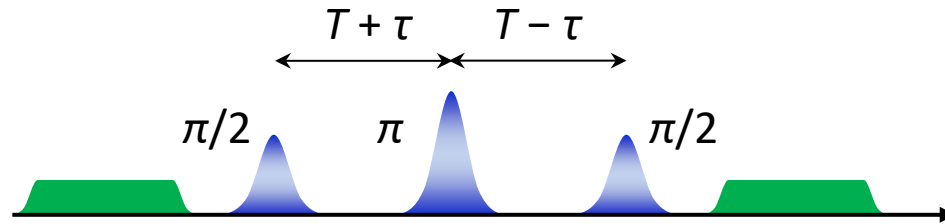
$R_x(\theta)$ と $R_z(\varphi)$ の組み合わせで任意の1量子ビットゲートが実現 (xz分解)



$$\varphi = 2\pi\delta_e\tau$$

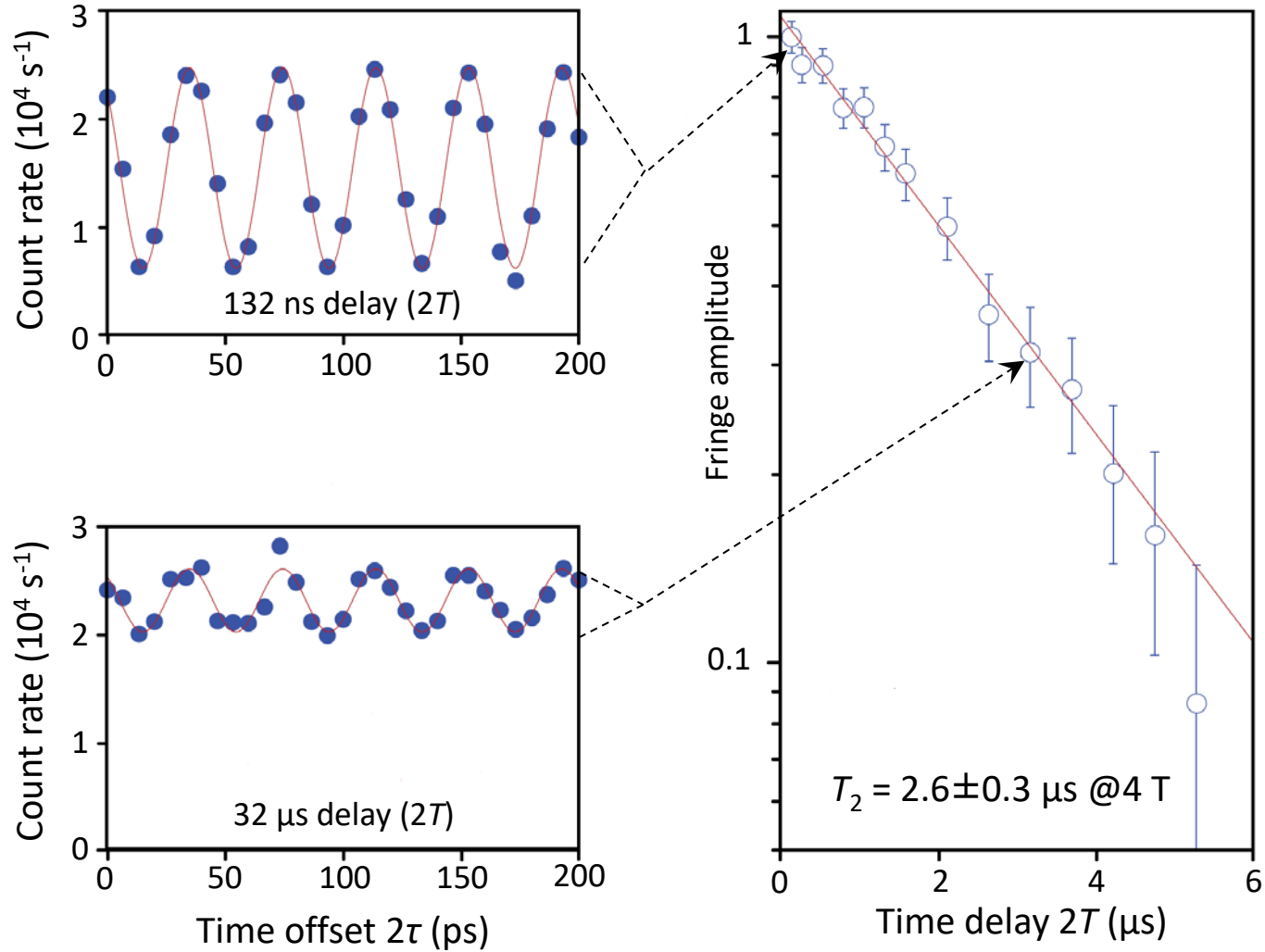


光スピンエコー

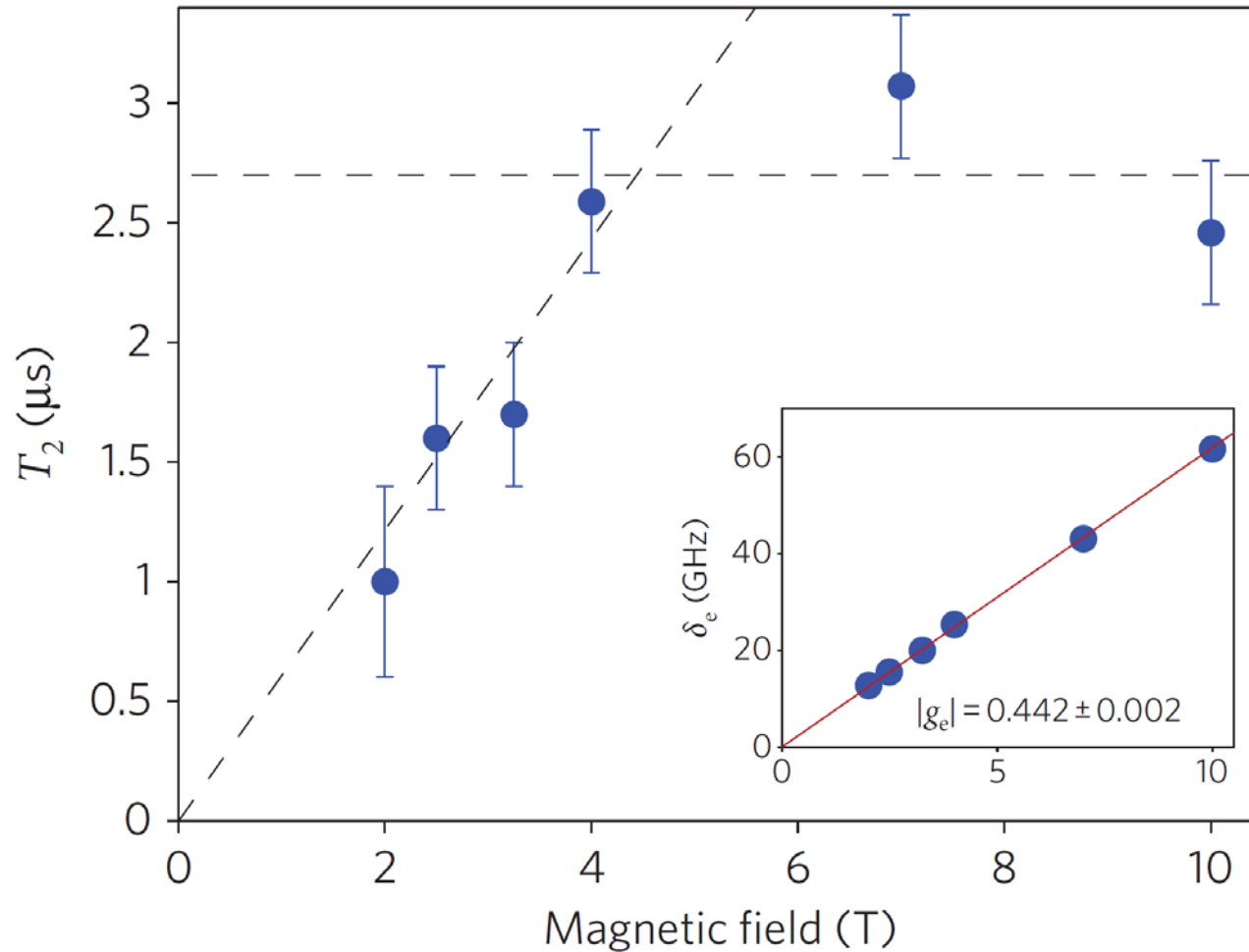


測定ごとの不均一性に起因する見かけの減衰(数ns)を
キャンセルしてコヒーレンス時間を測定する

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の物理**
 - 荷電励起子(トリオン)
 - 単一スピンの全光コヒーレント制御
- **量子ネットワークの要素技術**
 - スピン-光子量子もつれ
 - スピン-スピン量子もつれ

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

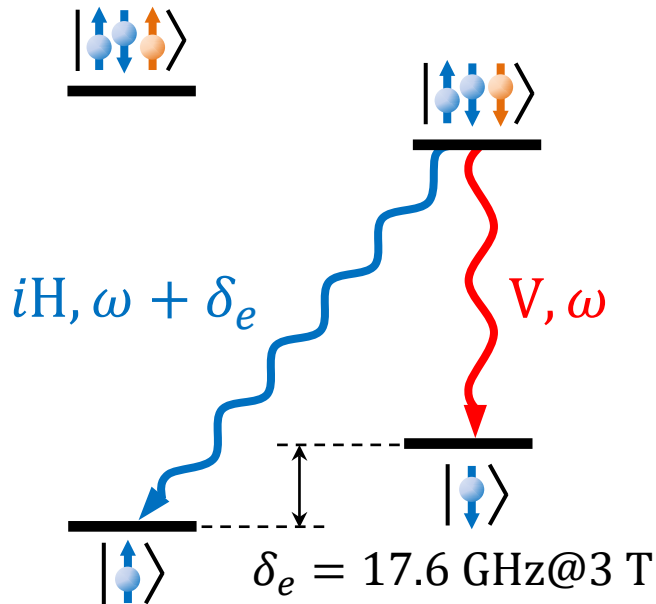
W. B. Gao¹, P. Fallahi¹, E. Togan¹, J. Miguel-Sanchez¹ & A. Imamoglu¹

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

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



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

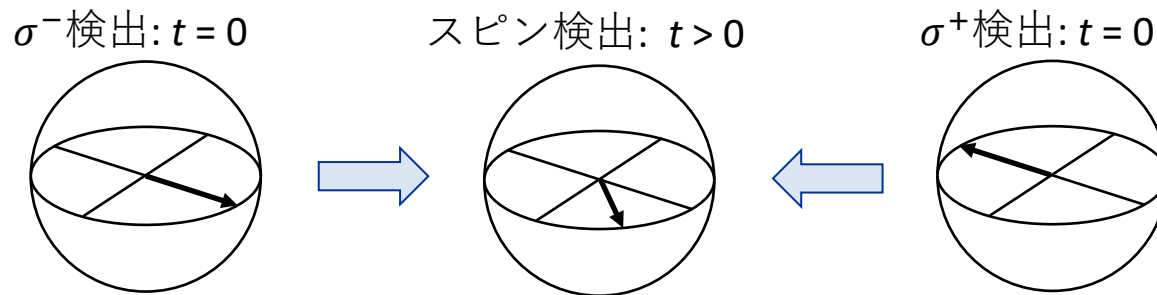
CATCH: スピンは光の偏光と波長の両方と相関している

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

⇒ 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

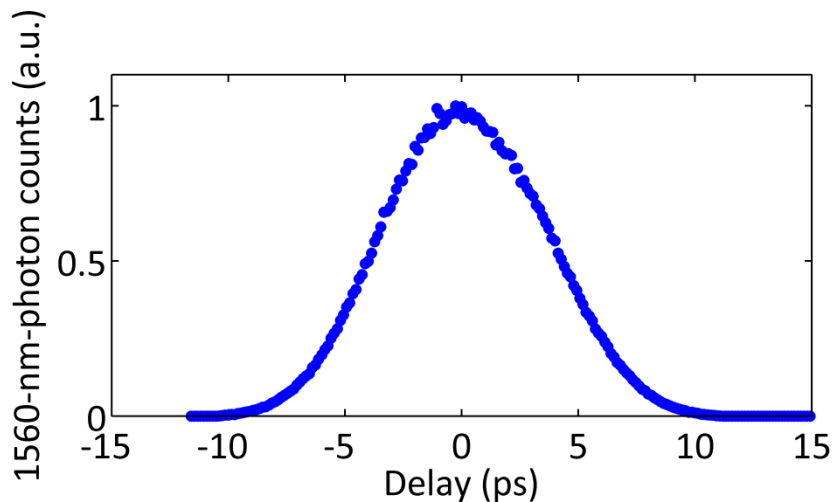
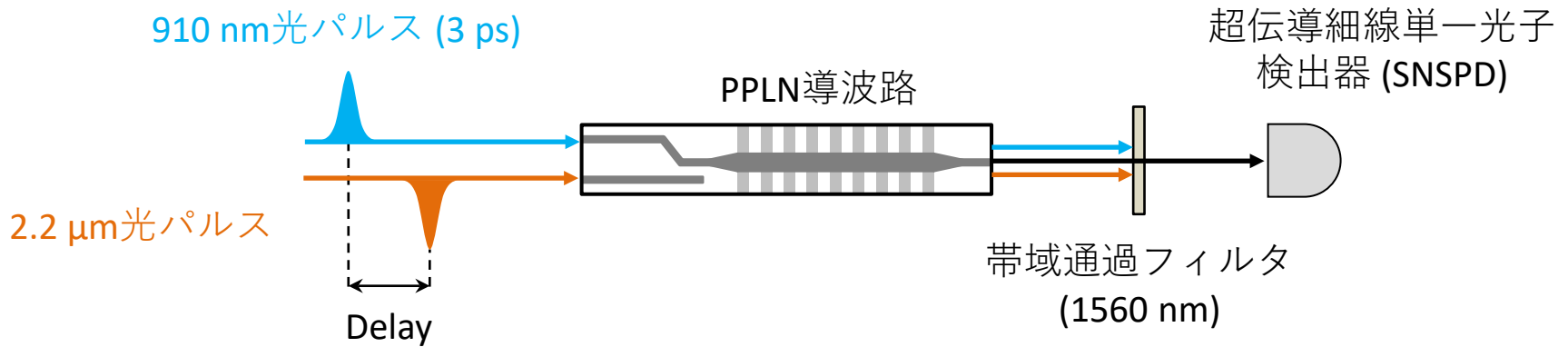


⇒ 波長情報を消去するために歳差周期より十分高いタイミング分解能が必要(量子消去)

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

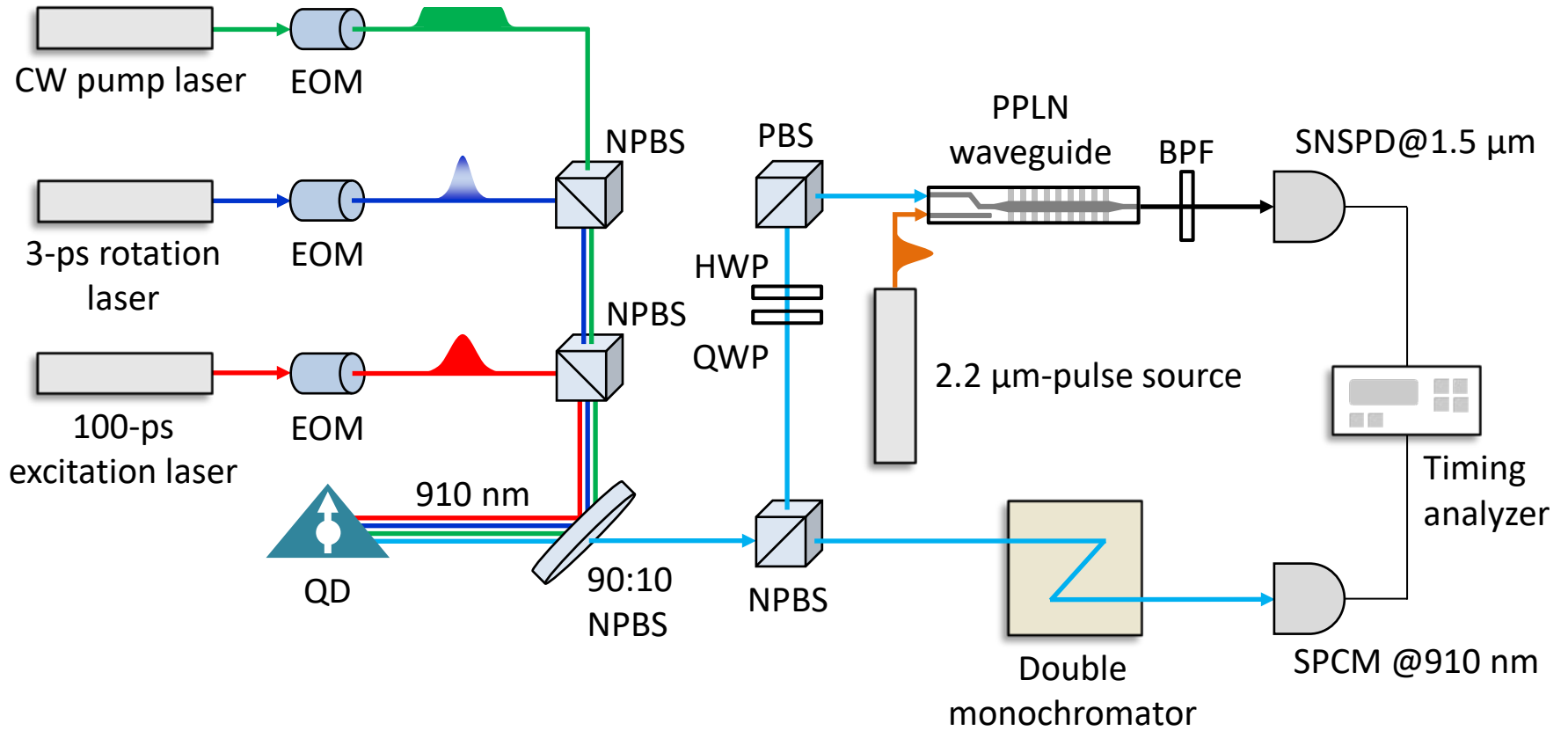
2光子が導波路に同時入射したときのみ波長変換される



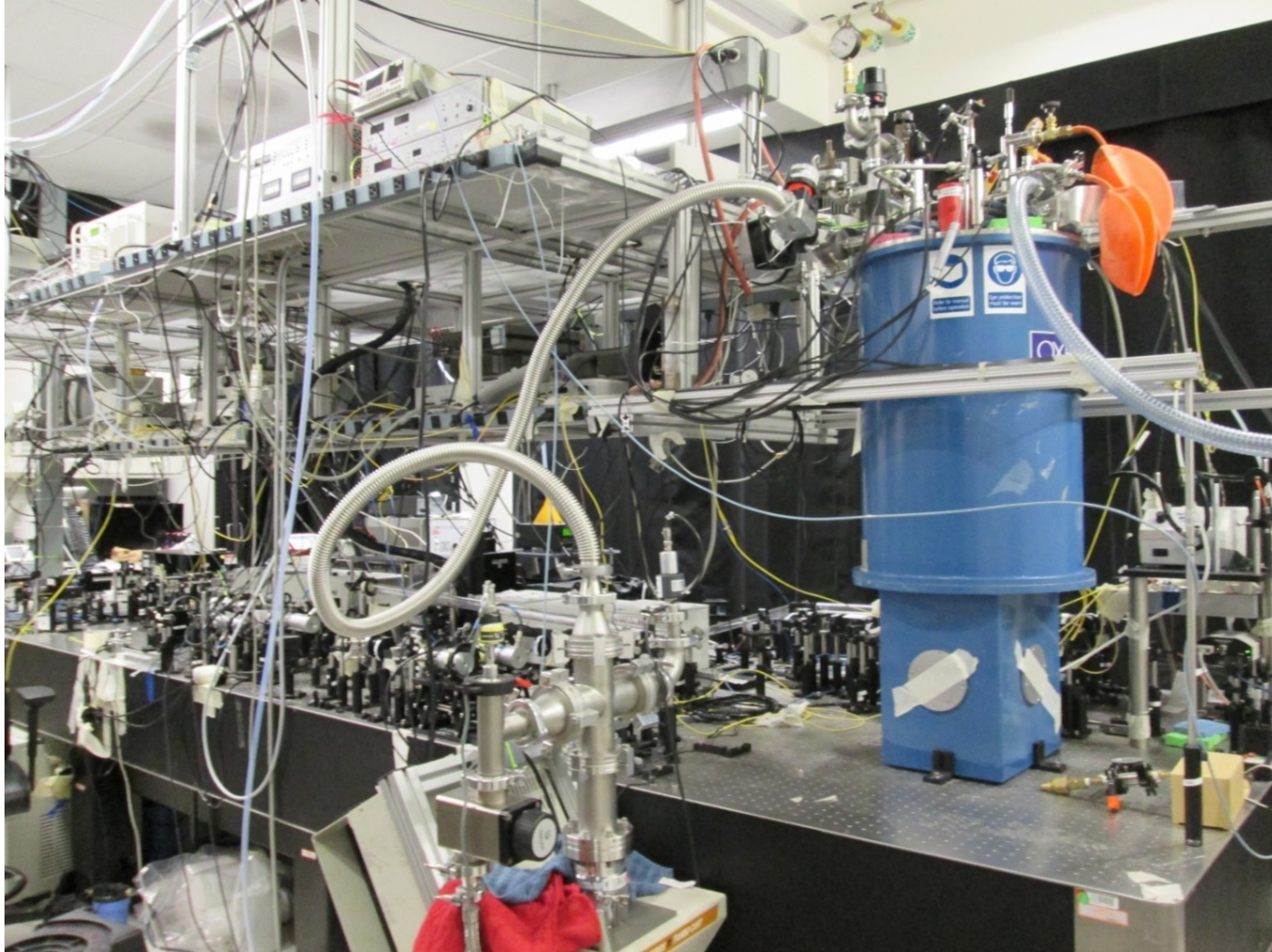
帯域 ≈ 100 GHzで量子消去可能

910 nm単一光子レベルでも動作確認

測定系

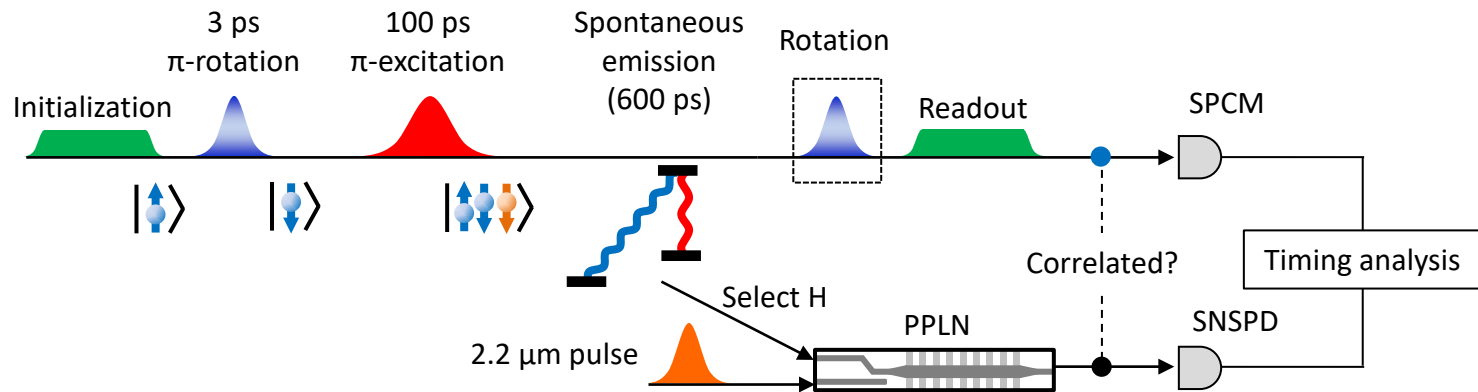
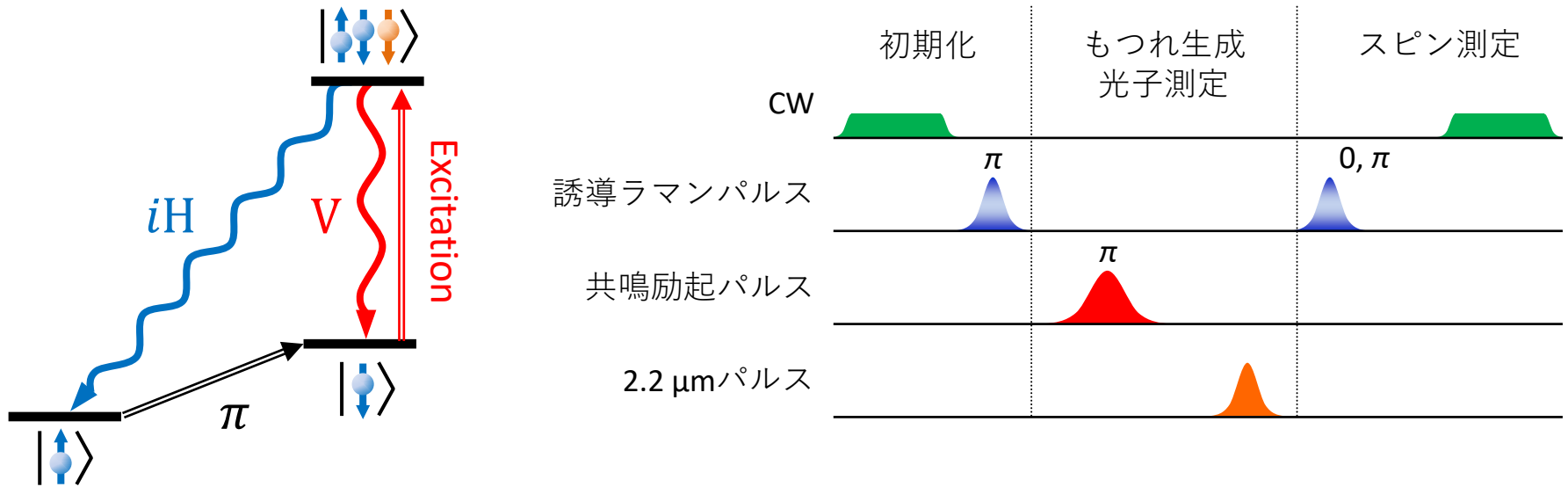


測定系



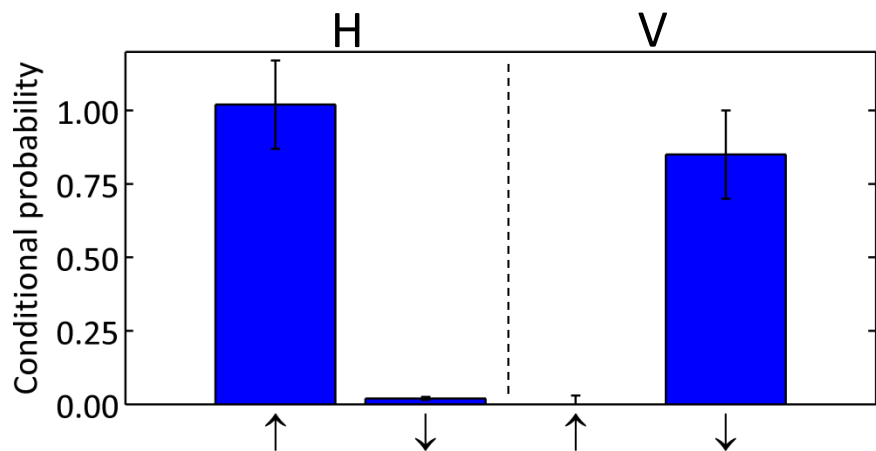
スタンフォード大学 ギンツトン研究所 山本研究室 (2013)

実験プロトコル

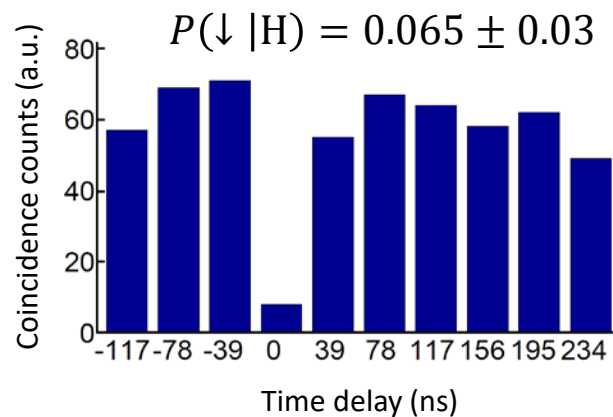
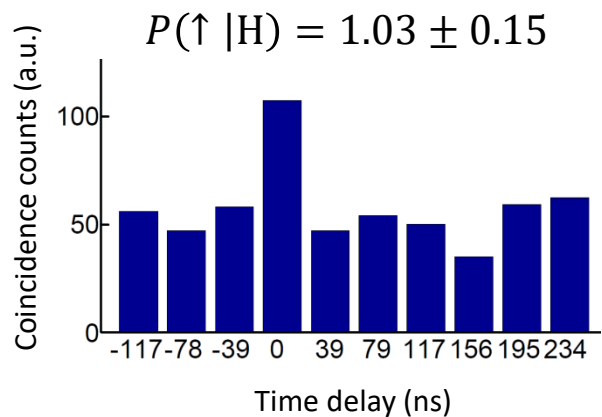
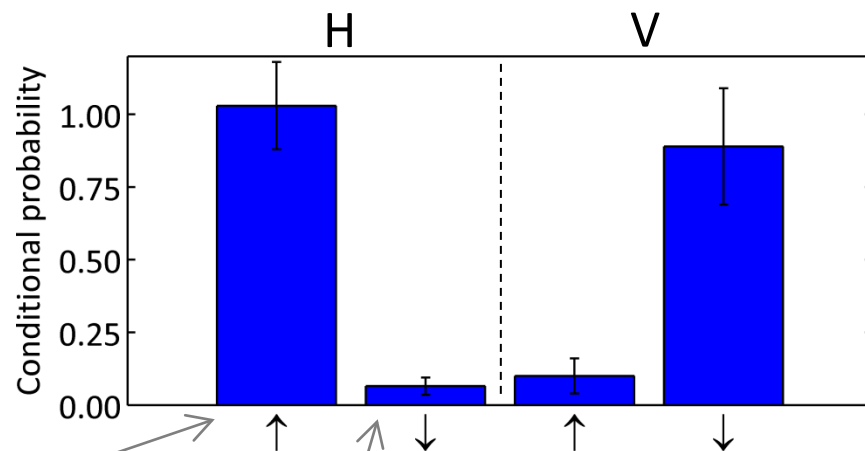


相関測定(I)

900 nmでの検出



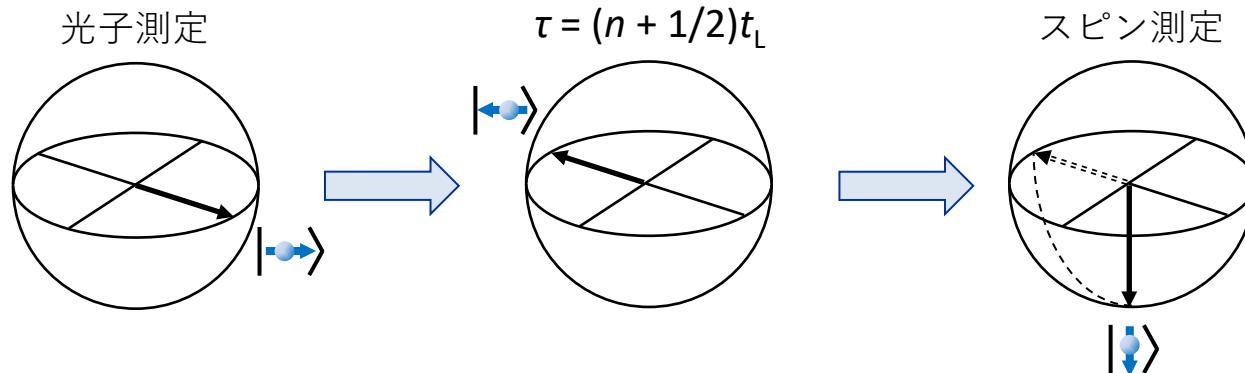
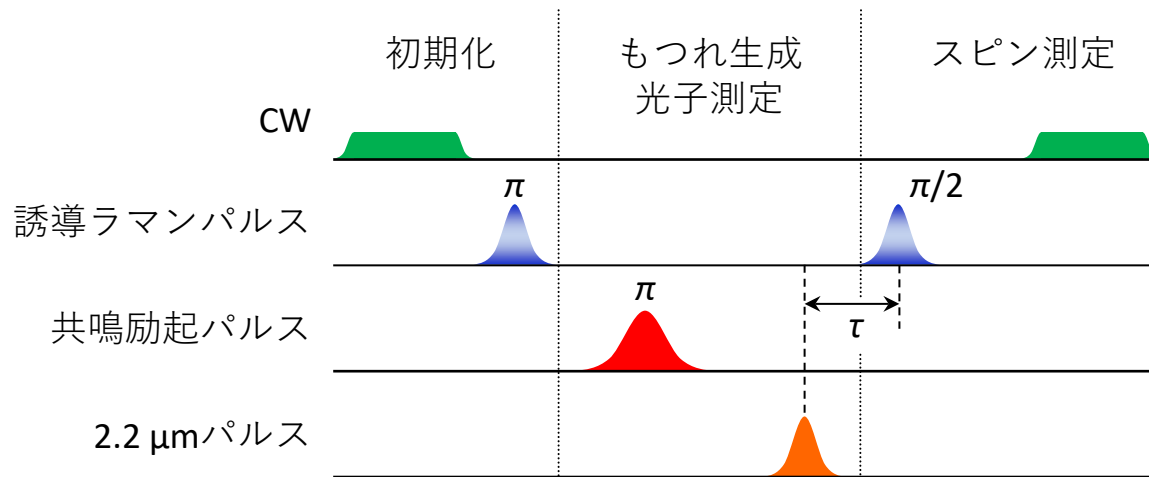
1.5 μmでの検出



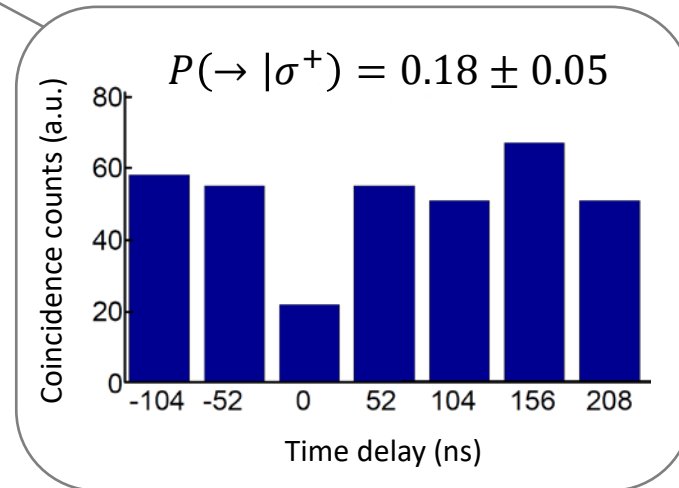
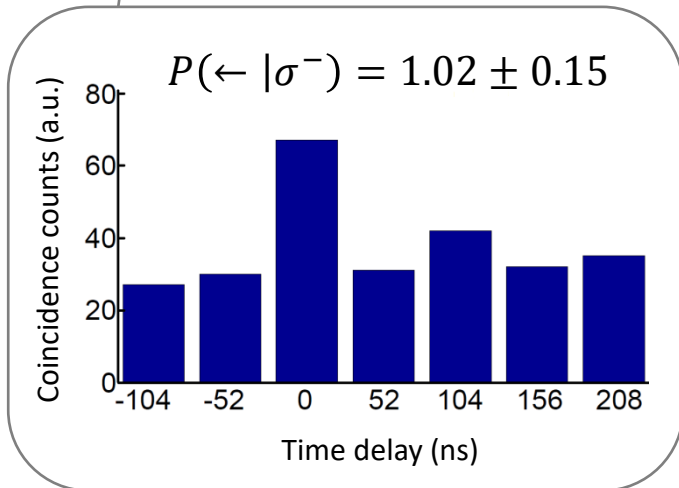
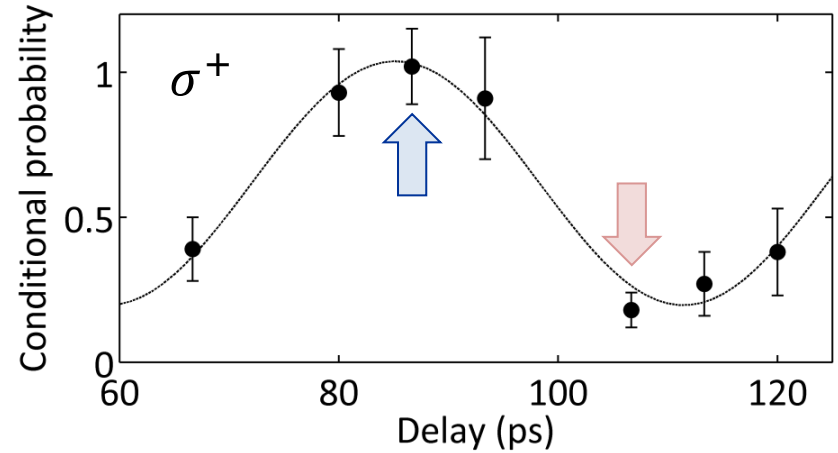
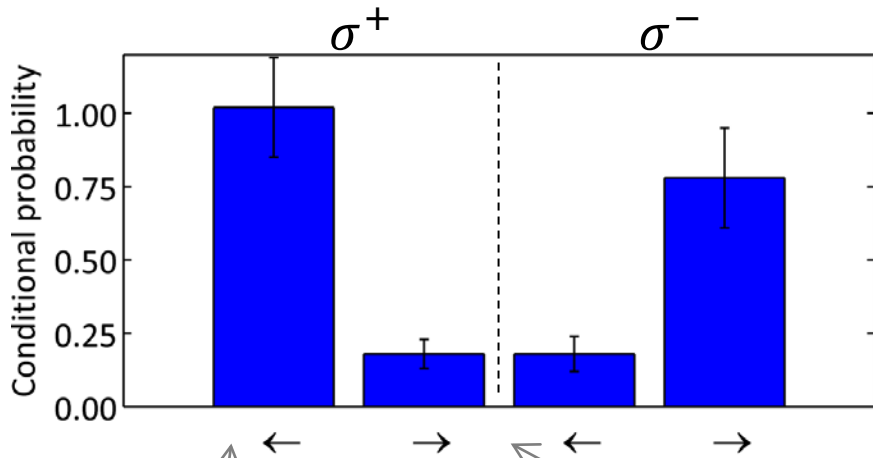
相関測定(II)

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

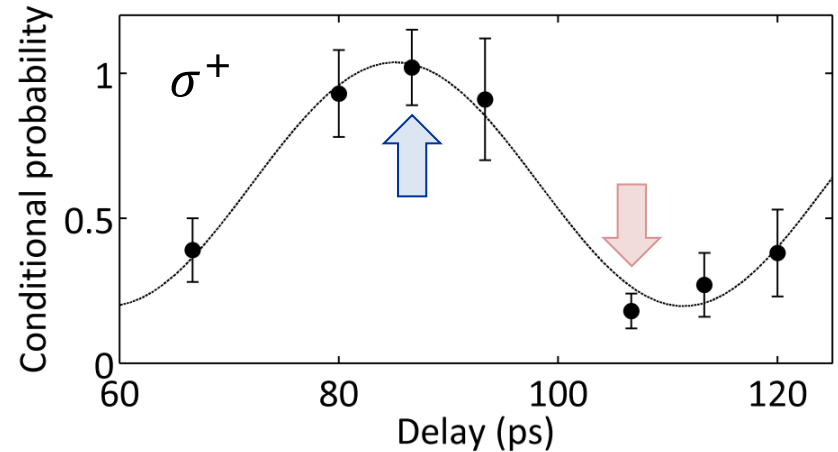
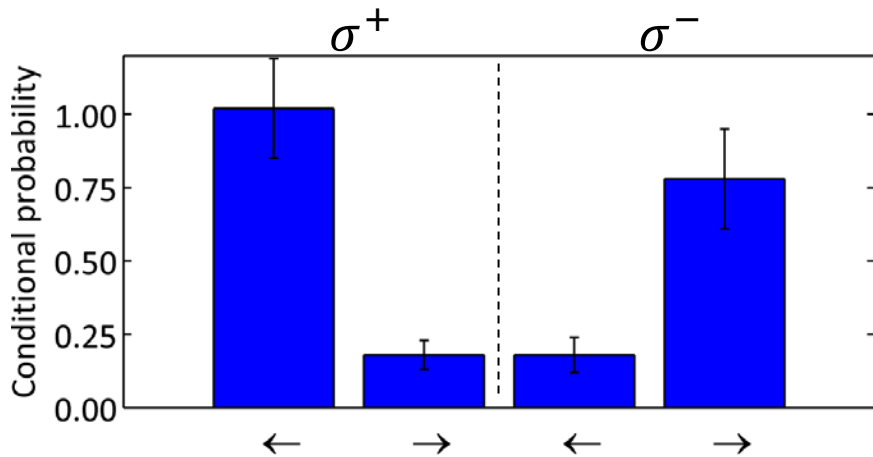
⇒ $\tau = nt_L$ or $(n + 1/2)t_L$ のタイミングで $\pi/2$ パルス



相関測定(II)



相関測定(II)

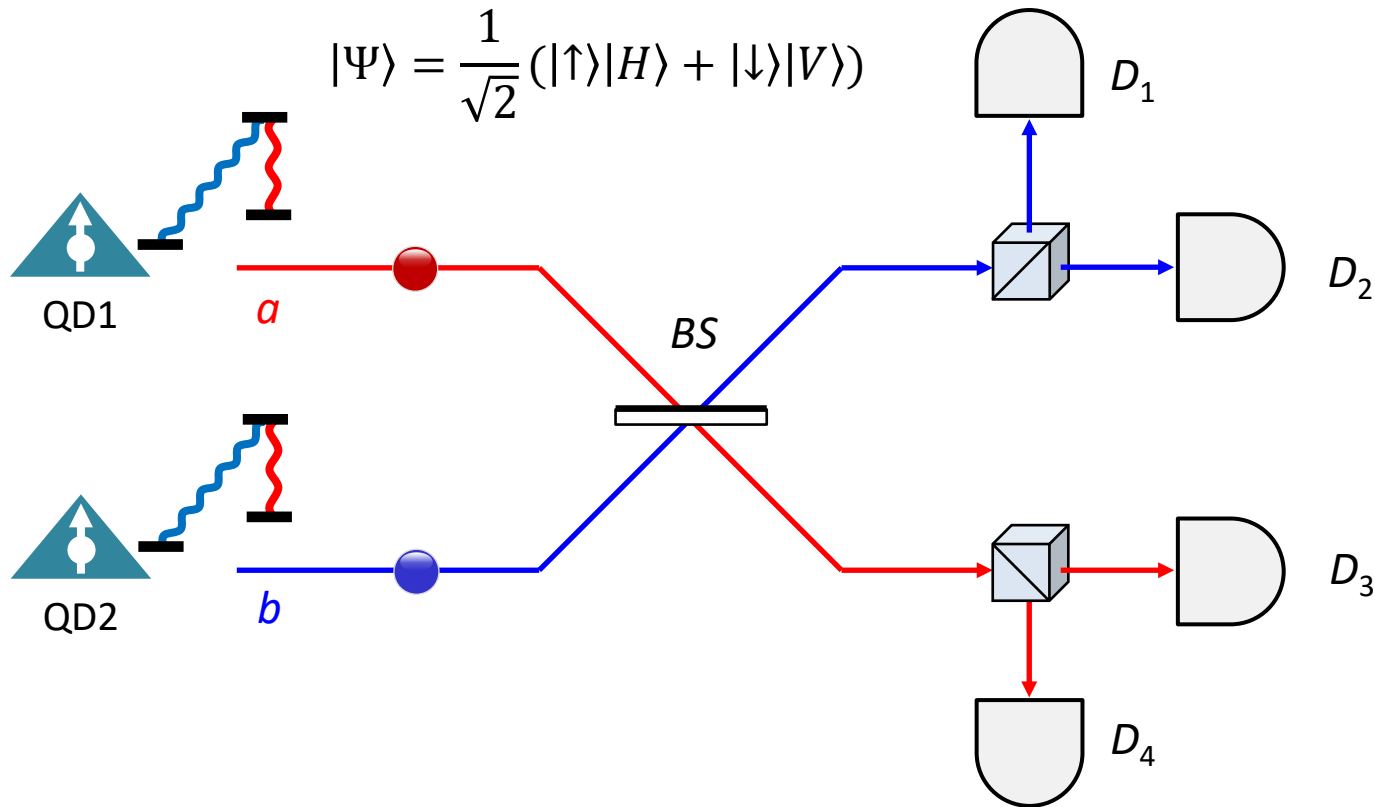


⇒ 相関測定(I)と(II)の結果から得られる忠実度(フィデリティ)の下限

$$F \geq 80 \pm 8.5\%$$

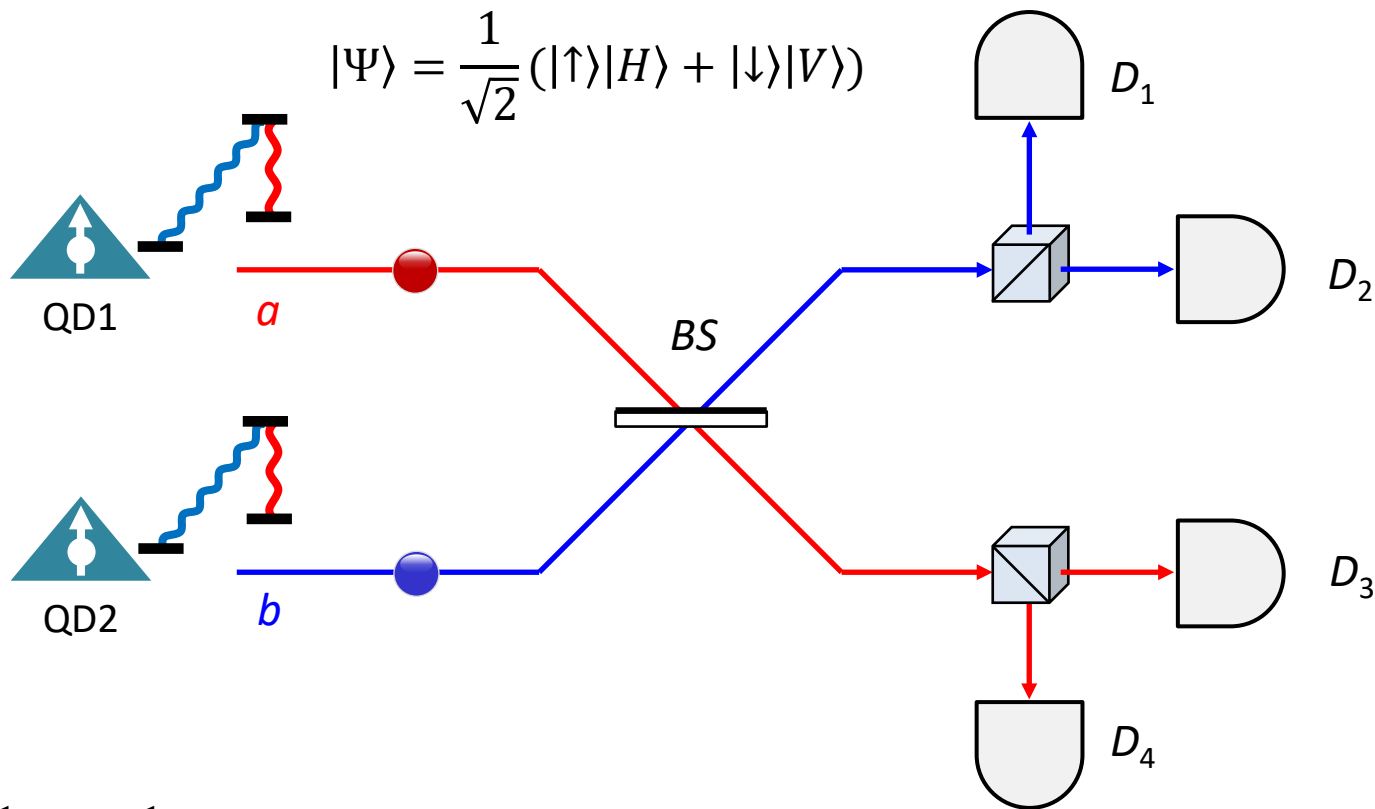
密度行列の再構成: $F = 92.1 \pm 3.2\%$

スピンスピン量子もつれ

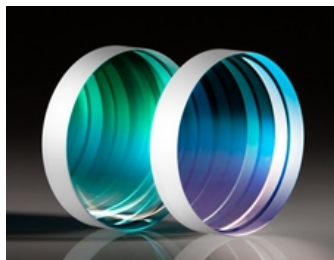


$$|\Psi\rangle_a |\Psi\rangle_b = (|\uparrow\rangle_a |H\rangle_a + |\downarrow\rangle_a |V\rangle_a)(|\uparrow\rangle_b |H\rangle_b + |\downarrow\rangle_b |V\rangle_b)$$

スピンスピン量子もつれ



$$n_{\text{air}} < n_{\text{coat}} < n_{\text{glass}}$$



©Edmund Optics

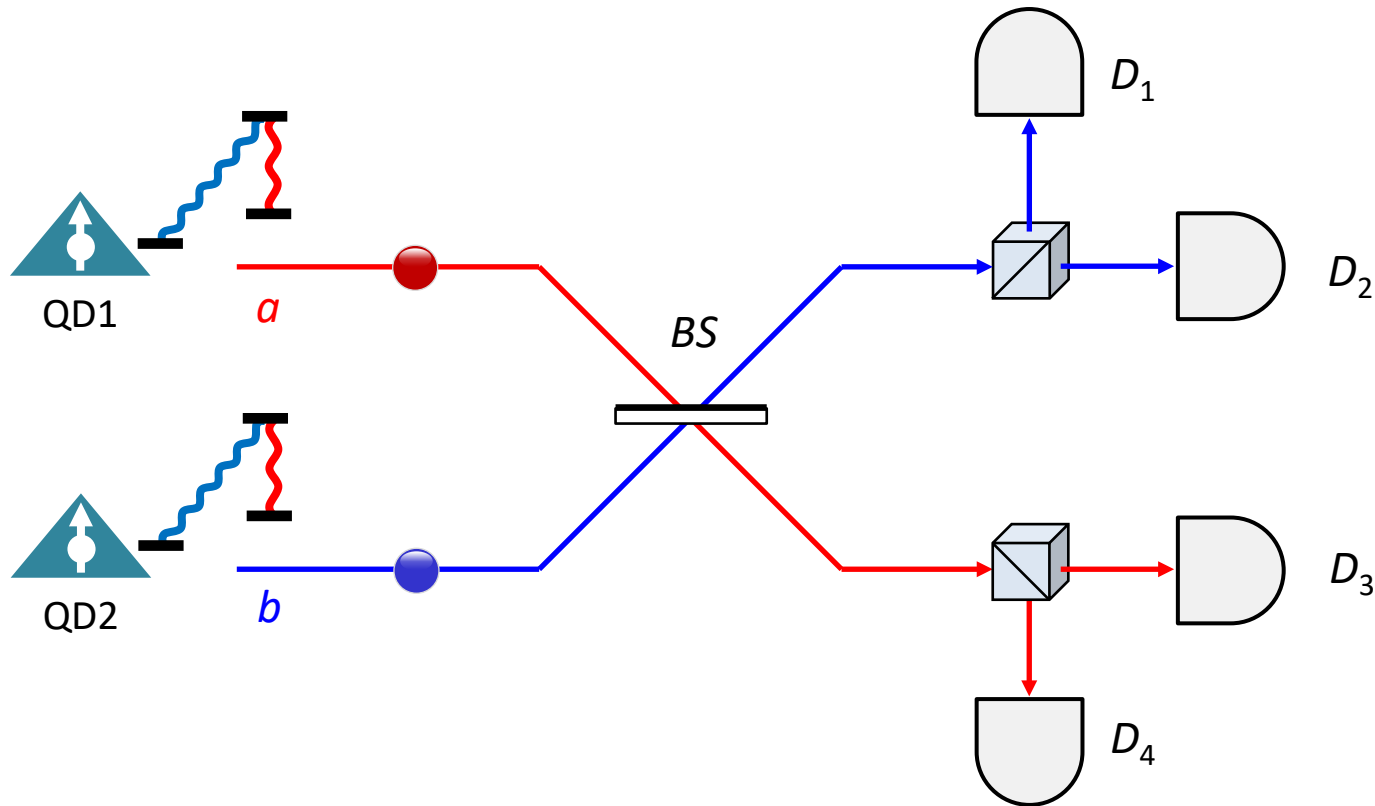
$$T = \frac{1}{2} \text{ (透過率)}$$

$$R = \frac{1}{2} \text{ (反射率)}$$

$$T + R = 1$$

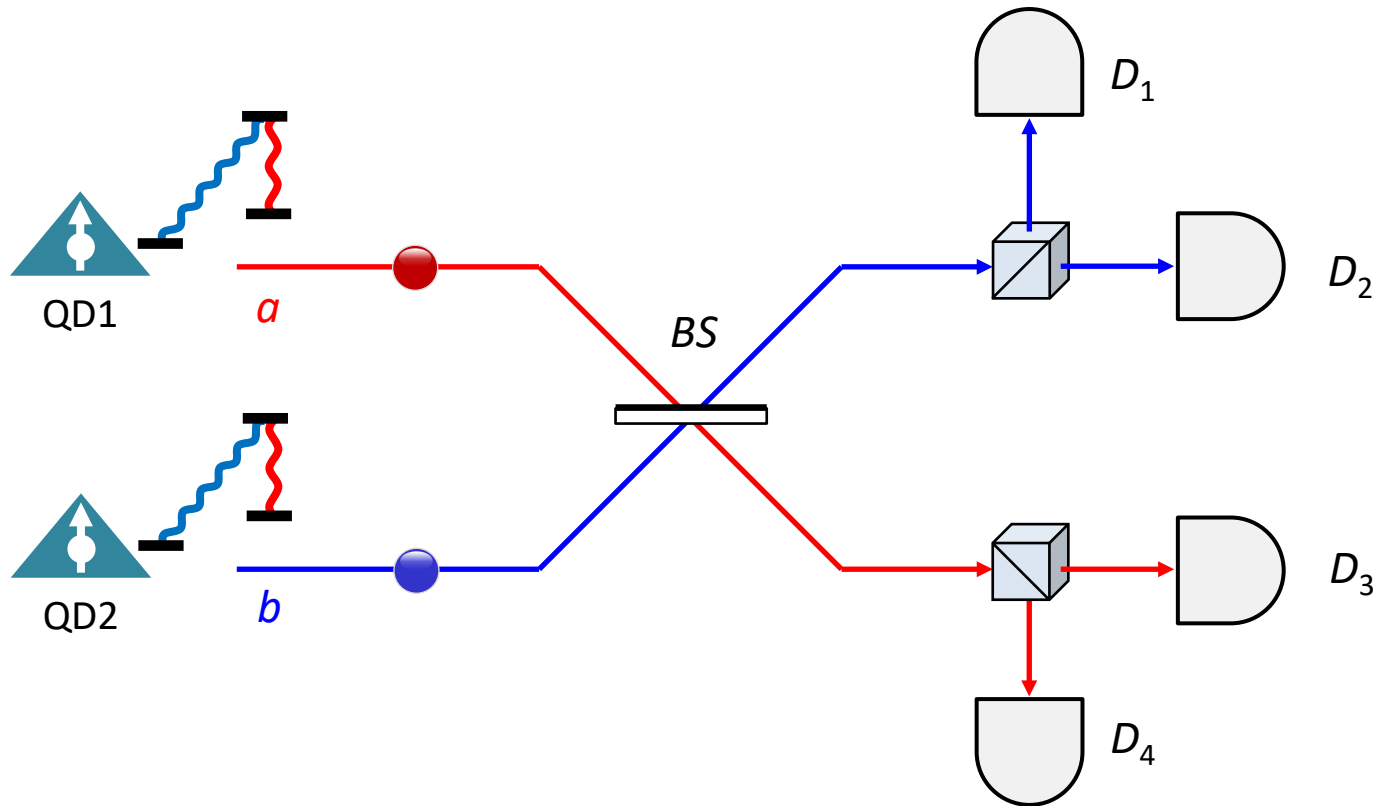
$$BS = \begin{pmatrix} \sqrt{T} & \sqrt{R} \\ -\sqrt{R} & \sqrt{T} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$$

スピンスピン量子もつれ



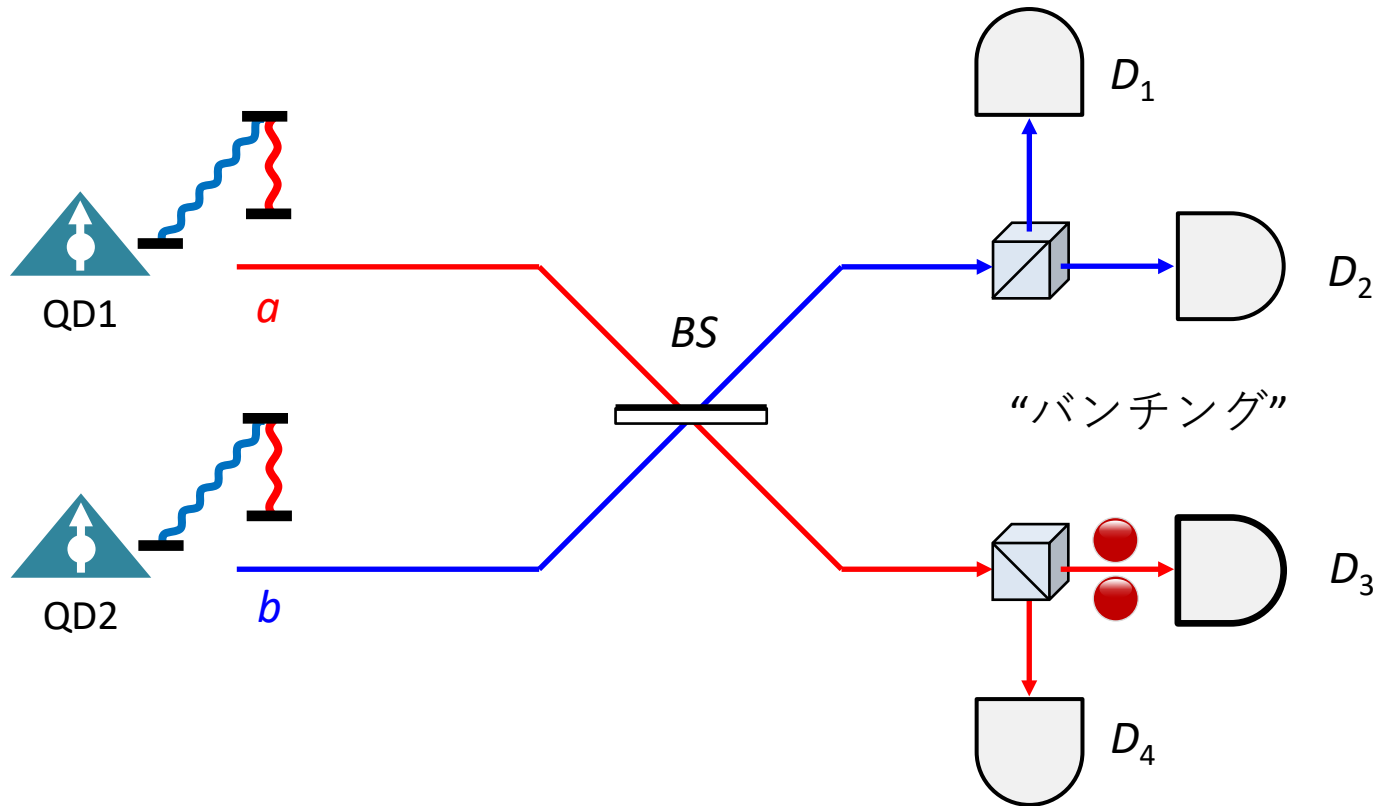
$$\begin{aligned}
 BS|\Psi\rangle_a|\Psi\rangle_b &= BS(|\uparrow\rangle_a|H\rangle_a + |\downarrow\rangle_a|V\rangle_a)(|\uparrow\rangle_b|H\rangle_b + |\downarrow\rangle_b|V\rangle_b) \\
 &= (|\uparrow\rangle_a|H\rangle_a - |\uparrow\rangle_a|H\rangle_b + |\downarrow\rangle_a|V\rangle_a - |\downarrow\rangle_a|V\rangle_b) \\
 &\otimes (|\uparrow\rangle_b|H\rangle_a + |\uparrow\rangle_b|H\rangle_b + |\downarrow\rangle_b|V\rangle_a + |\downarrow\rangle_b|V\rangle_b)
 \end{aligned}$$

スピンスピン量子もつれ



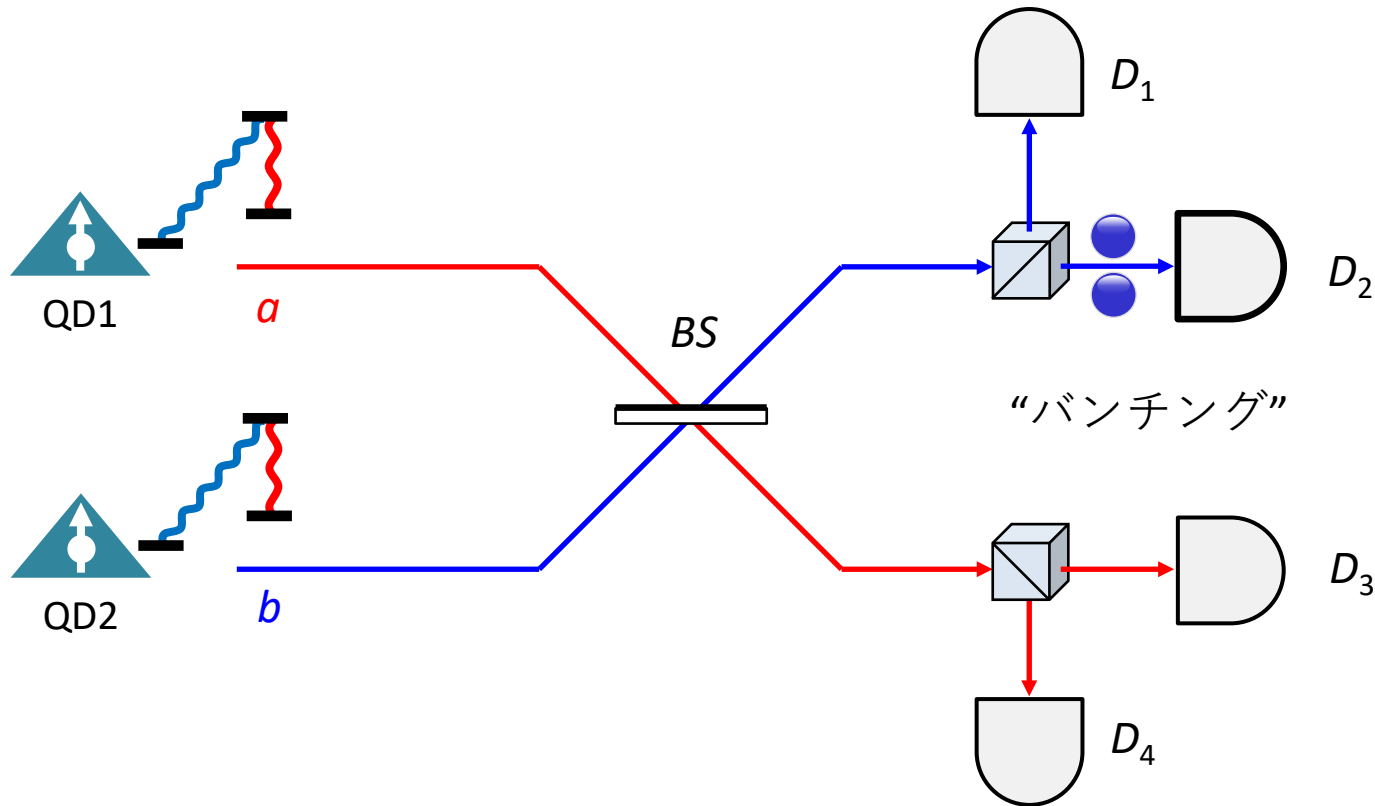
$$\begin{aligned}
 BS|\Psi\rangle_a|\Psi\rangle_b &= |\uparrow\rangle_a|\uparrow\rangle_b(|H\rangle_a|H\rangle_a - |H\rangle_b|H\rangle_b) + |\downarrow\rangle_a|\downarrow\rangle_b(|V\rangle_a|V\rangle_a - |V\rangle_b|V\rangle_b) \\
 &\quad + (|\uparrow\rangle_a|\downarrow\rangle_b + |\downarrow\rangle_a|\uparrow\rangle_b)(|H\rangle_a|V\rangle_a - |H\rangle_b|V\rangle_b) \\
 &\quad + (|\uparrow\rangle_a|\downarrow\rangle_b - |\downarrow\rangle_a|\uparrow\rangle_b)(|V\rangle_a|H\rangle_b - |H\rangle_a|V\rangle_b)
 \end{aligned}$$

スピンスピン量子もつれ



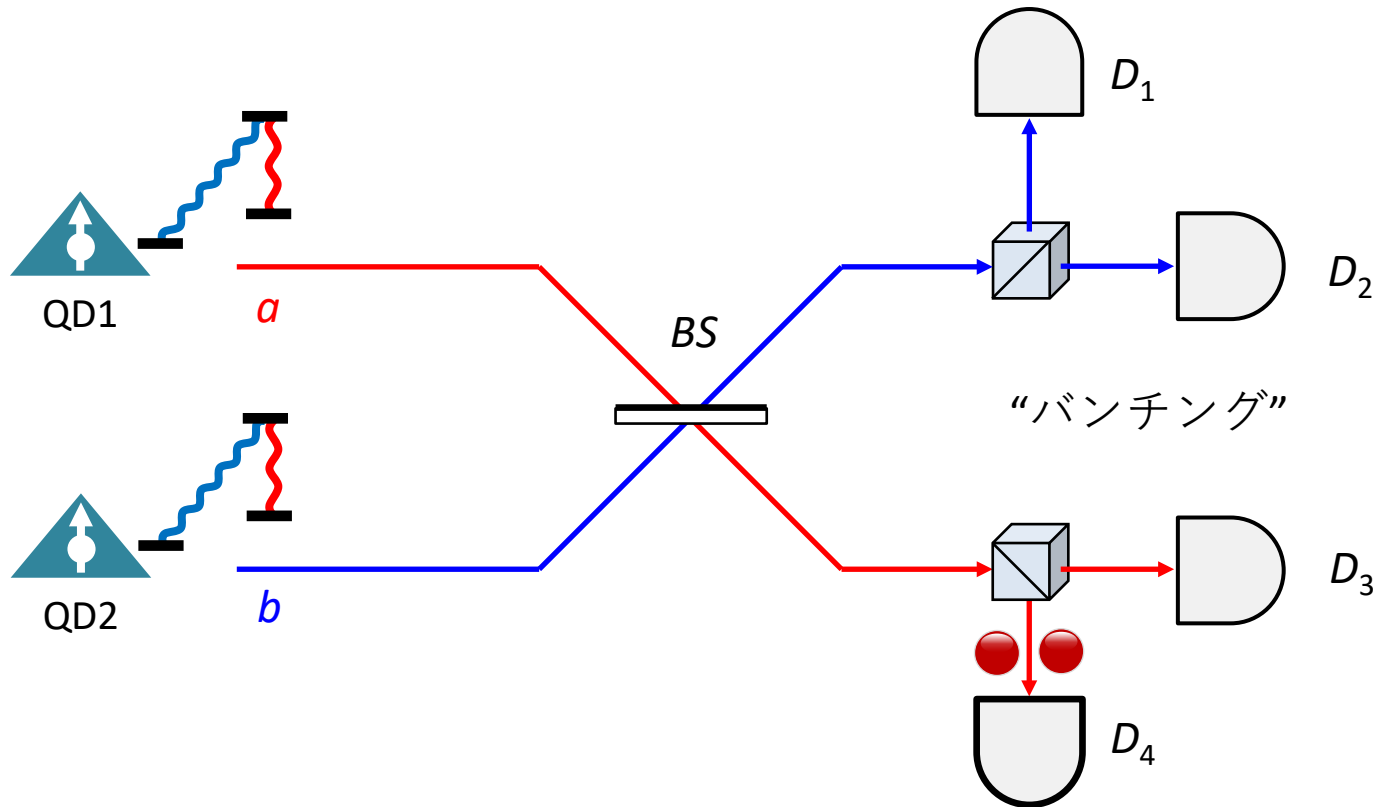
$$\begin{aligned}
 BS|\Psi\rangle_a|\Psi\rangle_b &= |\uparrow\rangle_a|\uparrow\rangle_b(|H\rangle_a|H\rangle_a - |H\rangle_b|H\rangle_b) + |\downarrow\rangle_a|\downarrow\rangle_b(|V\rangle_a|V\rangle_a - |V\rangle_b|V\rangle_b) \\
 &\quad + (|\uparrow\rangle_a|\downarrow\rangle_b + |\downarrow\rangle_a|\uparrow\rangle_b)(|H\rangle_a|V\rangle_a - |H\rangle_b|V\rangle_b) \\
 &\quad + (|\uparrow\rangle_a|\downarrow\rangle_b - |\downarrow\rangle_a|\uparrow\rangle_b)(|V\rangle_a|H\rangle_b - |H\rangle_a|V\rangle_b)
 \end{aligned}$$

スピンスピン量子もつれ



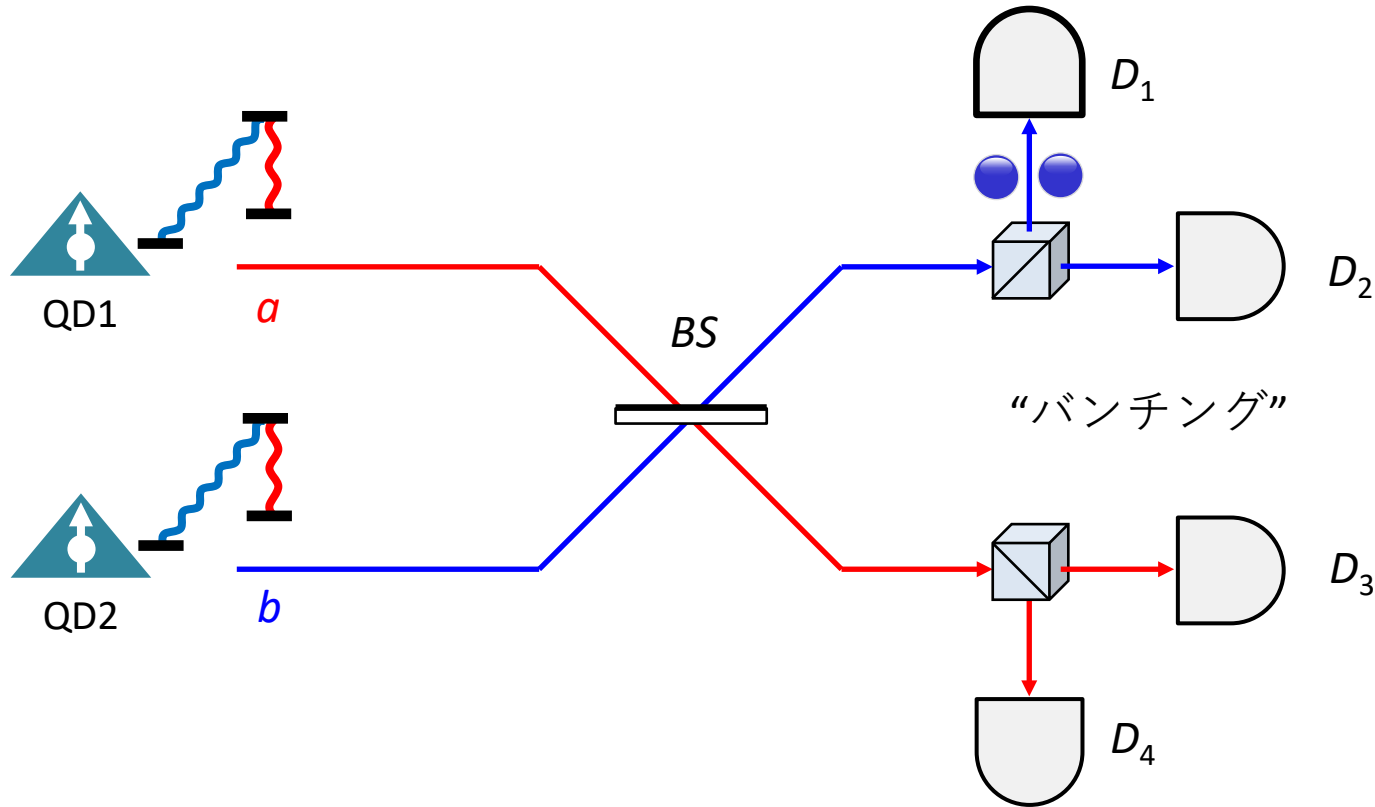
$$\begin{aligned}
 BS|\Psi\rangle_a|\Psi\rangle_b &= |\uparrow\rangle_a|\uparrow\rangle_b(|H\rangle_a|H\rangle_a - |H\rangle_b|H\rangle_b) + |\downarrow\rangle_a|\downarrow\rangle_b(|V\rangle_a|V\rangle_a - |V\rangle_b|V\rangle_b) \\
 &\quad + (|\uparrow\rangle_a|\downarrow\rangle_b + |\downarrow\rangle_a|\uparrow\rangle_b)(|H\rangle_a|V\rangle_a - |H\rangle_b|V\rangle_b) \\
 &\quad + (|\uparrow\rangle_a|\downarrow\rangle_b - |\downarrow\rangle_a|\uparrow\rangle_b)(|V\rangle_a|H\rangle_b - |H\rangle_a|V\rangle_b)
 \end{aligned}$$

スピンスピン量子もつれ



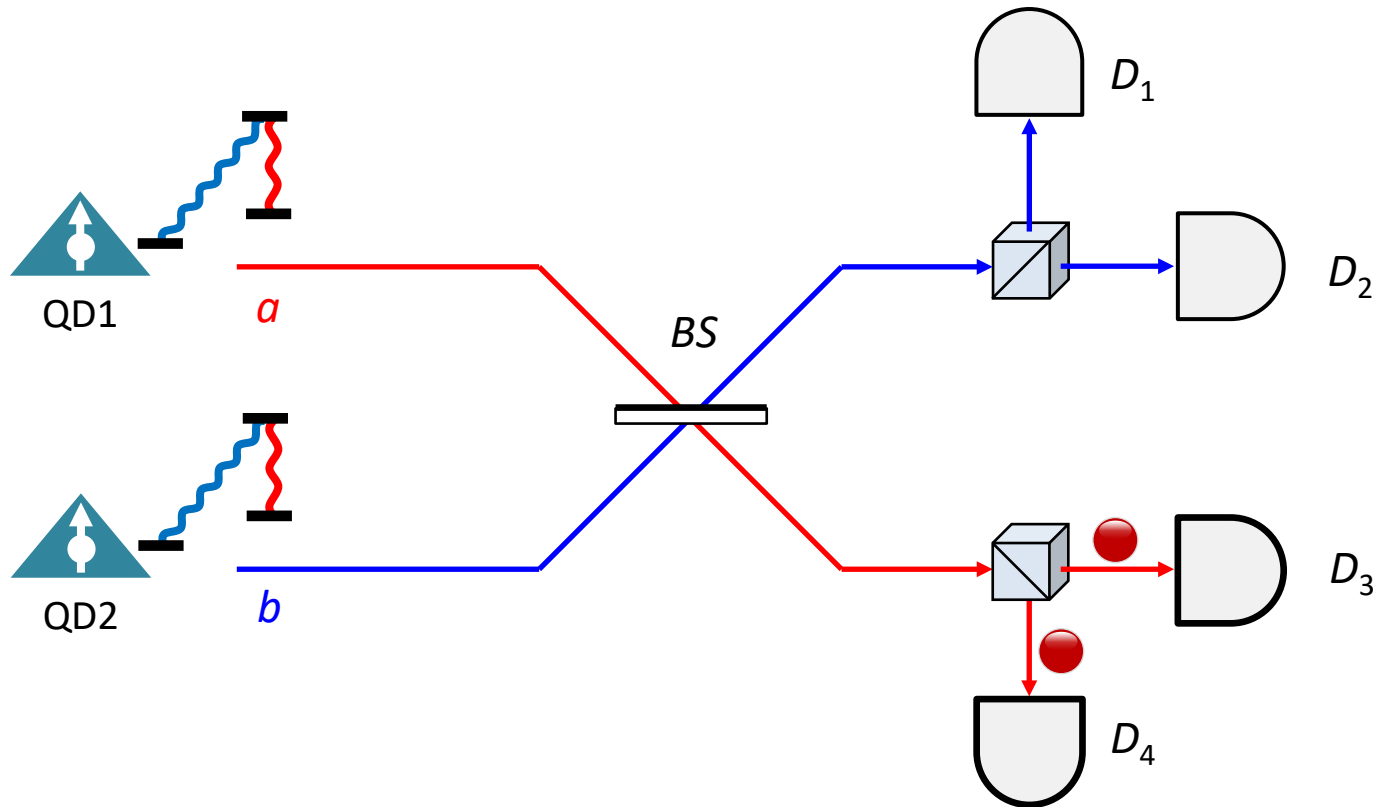
$$\begin{aligned}
 BS|\Psi\rangle_a|\Psi\rangle_b &= |\uparrow\rangle_a|\uparrow\rangle_b(|H\rangle_a|H\rangle_a - |H\rangle_b|H\rangle_b) + |\downarrow\rangle_a|\downarrow\rangle_b(|V\rangle_a|V\rangle_a - |V\rangle_b|V\rangle_b) \\
 &\quad + (|\uparrow\rangle_a|\downarrow\rangle_b + |\downarrow\rangle_a|\uparrow\rangle_b)(|H\rangle_a|V\rangle_a - |H\rangle_b|V\rangle_b) \\
 &\quad + (|\uparrow\rangle_a|\downarrow\rangle_b - |\downarrow\rangle_a|\uparrow\rangle_b)(|V\rangle_a|H\rangle_b - |H\rangle_a|V\rangle_b)
 \end{aligned}$$

スピンスピン量子もつれ



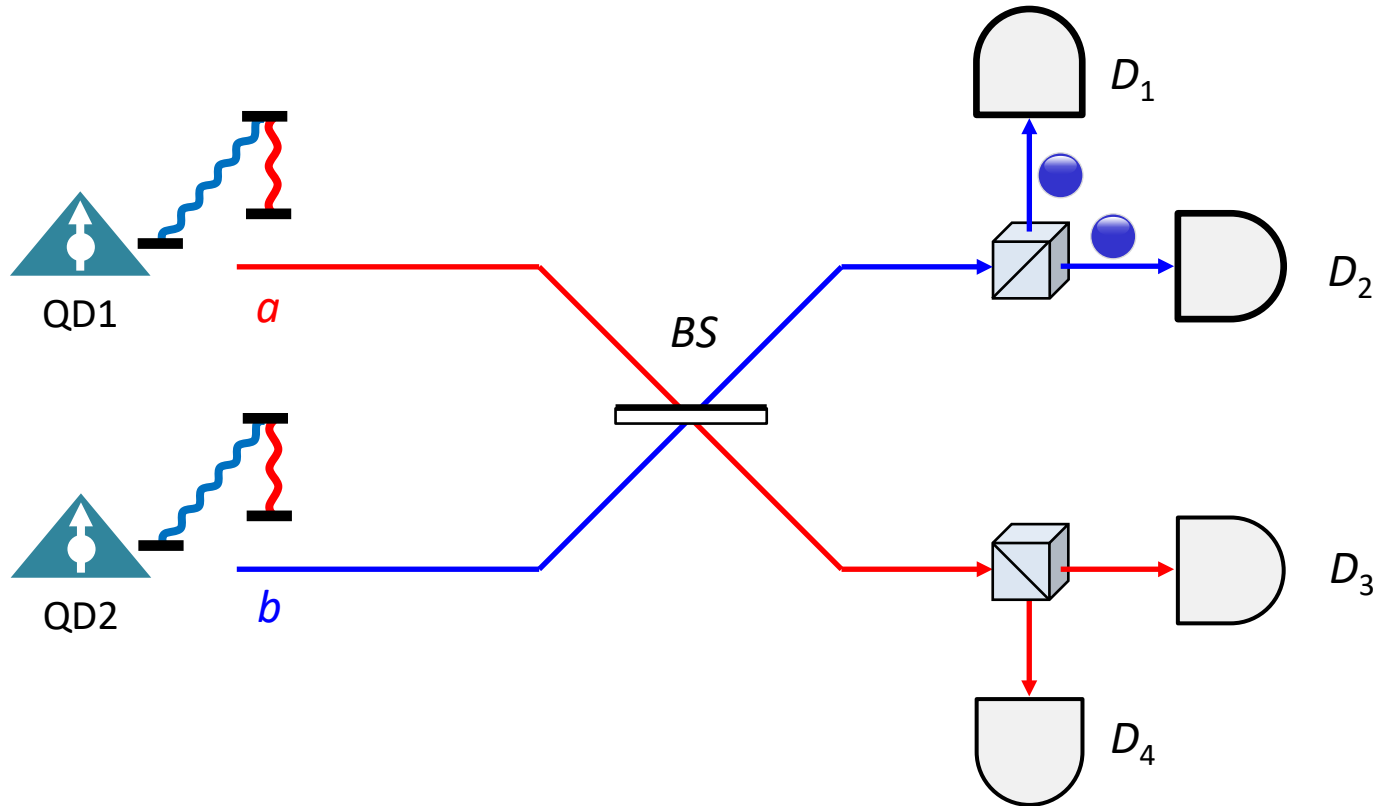
$$\begin{aligned}
 BS|\Psi\rangle_a|\Psi\rangle_b &= |\uparrow\rangle_a|\uparrow\rangle_b(|H\rangle_a|H\rangle_a - |H\rangle_b|H\rangle_b) + |\downarrow\rangle_a|\downarrow\rangle_b(|V\rangle_a|V\rangle_a - |V\rangle_b|V\rangle_b) \\
 &\quad + (|\uparrow\rangle_a|\downarrow\rangle_b + |\downarrow\rangle_a|\uparrow\rangle_b)(|H\rangle_a|V\rangle_a - |H\rangle_b|V\rangle_b) \\
 &\quad + (|\uparrow\rangle_a|\downarrow\rangle_b - |\downarrow\rangle_a|\uparrow\rangle_b)(|V\rangle_a|H\rangle_b - |H\rangle_a|V\rangle_b)
 \end{aligned}$$

スピンスピン量子もつれ



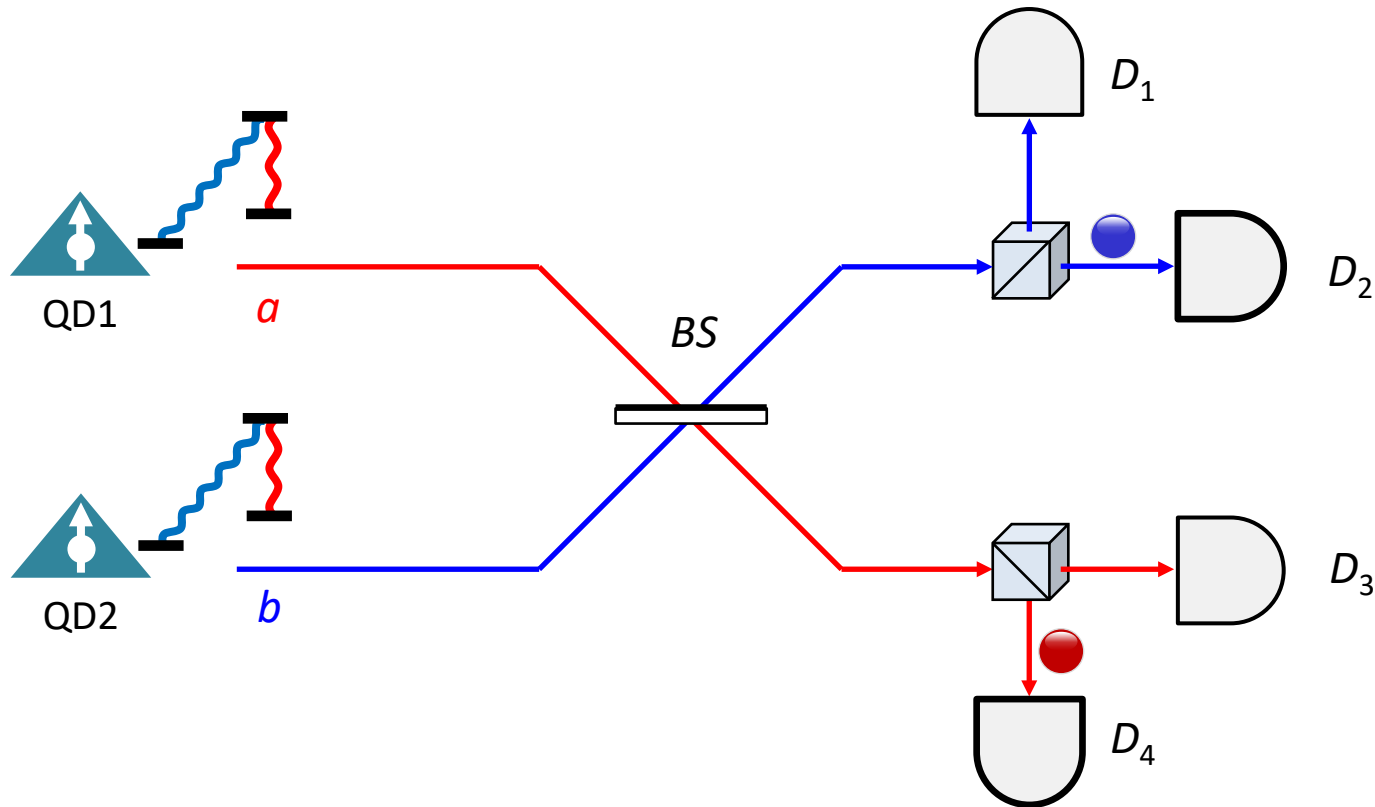
$$\begin{aligned}
 BS|\Psi\rangle_a|\Psi\rangle_b &= |\uparrow\rangle_a|\uparrow\rangle_b(|H\rangle_a|H\rangle_a - |H\rangle_b|H\rangle_b) + |\downarrow\rangle_a|\downarrow\rangle_b(|V\rangle_a|V\rangle_a - |V\rangle_b|V\rangle_b) \\
 &\quad + (|\uparrow\rangle_a|\downarrow\rangle_b + |\downarrow\rangle_a|\uparrow\rangle_b)(|H\rangle_a|V\rangle_a - |H\rangle_b|V\rangle_b) \\
 &\quad + (|\uparrow\rangle_a|\downarrow\rangle_b - |\downarrow\rangle_a|\uparrow\rangle_b)(|V\rangle_a|H\rangle_b - |H\rangle_a|V\rangle_b)
 \end{aligned}$$

スピンスピン量子もつれ



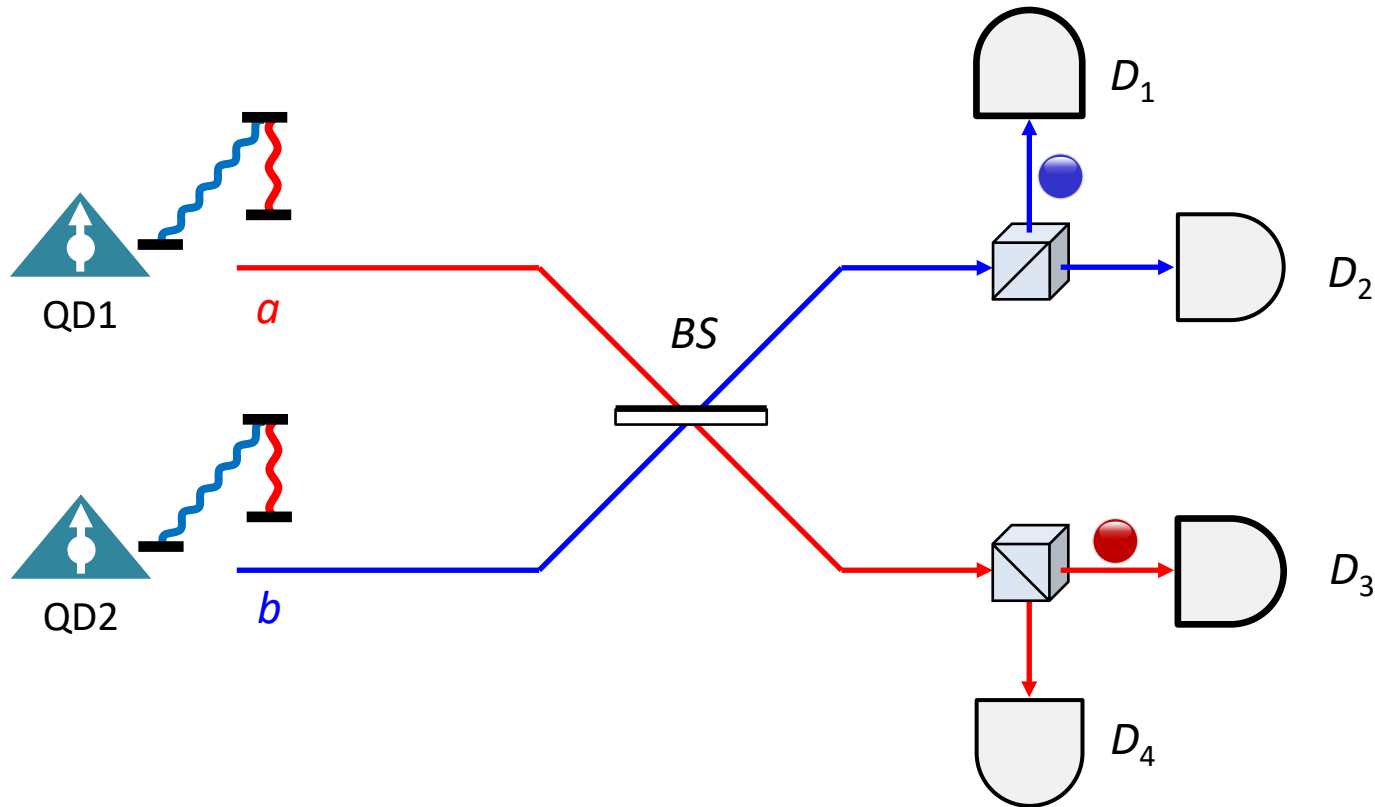
$$\begin{aligned}
 BS|\Psi\rangle_a|\Psi\rangle_b &= |\uparrow\rangle_a|\uparrow\rangle_b(|H\rangle_a|H\rangle_a - |H\rangle_b|H\rangle_b) + |\downarrow\rangle_a|\downarrow\rangle_b(|V\rangle_a|V\rangle_a - |V\rangle_b|V\rangle_b) \\
 &\quad + (|\uparrow\rangle_a|\downarrow\rangle_b + |\downarrow\rangle_a|\uparrow\rangle_b)(|H\rangle_a|V\rangle_a - |H\rangle_b|V\rangle_b) \\
 &\quad + (|\uparrow\rangle_a|\downarrow\rangle_b - |\downarrow\rangle_a|\uparrow\rangle_b)(|V\rangle_a|H\rangle_b - |H\rangle_a|V\rangle_b)
 \end{aligned}$$

スピンスピン量子もつれ



$$\begin{aligned}
 BS|\Psi\rangle_a|\Psi\rangle_b &= |\uparrow\rangle_a|\uparrow\rangle_b(|H\rangle_a|H\rangle_a - |H\rangle_b|H\rangle_b) + |\downarrow\rangle_a|\downarrow\rangle_b(|V\rangle_a|V\rangle_a - |V\rangle_b|V\rangle_b) \\
 &\quad + (|\uparrow\rangle_a|\downarrow\rangle_b + |\downarrow\rangle_a|\uparrow\rangle_b)(|H\rangle_a|V\rangle_a - |H\rangle_b|V\rangle_b) \\
 &\quad + (|\uparrow\rangle_a|\downarrow\rangle_b - |\downarrow\rangle_a|\uparrow\rangle_b)(|V\rangle_a|H\rangle_b - |H\rangle_a|V\rangle_b)
 \end{aligned}$$

スピンスピン量子もつれ

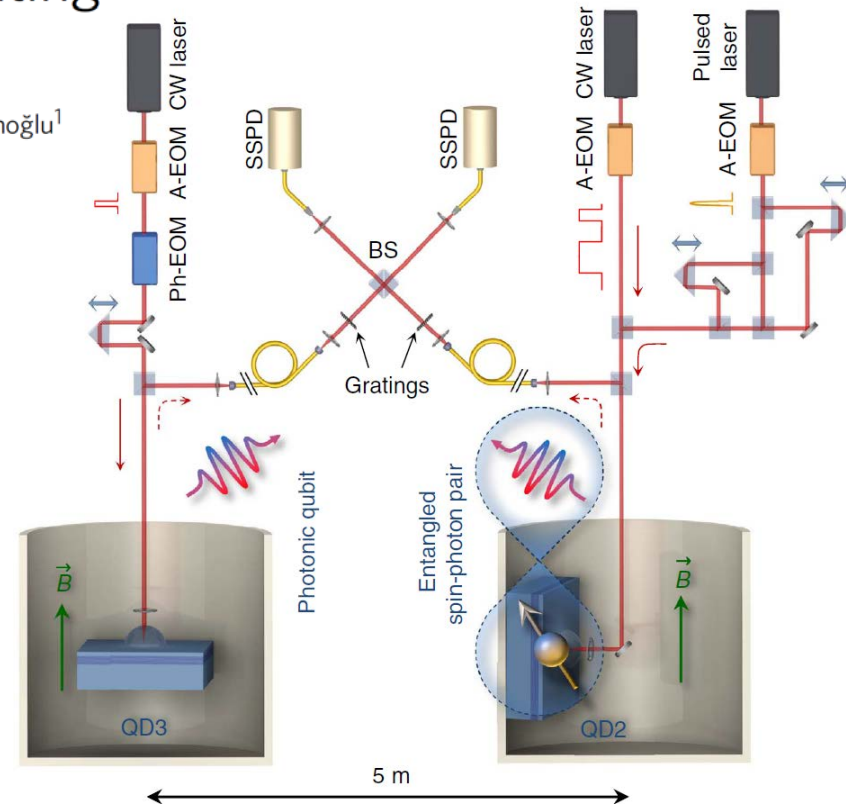
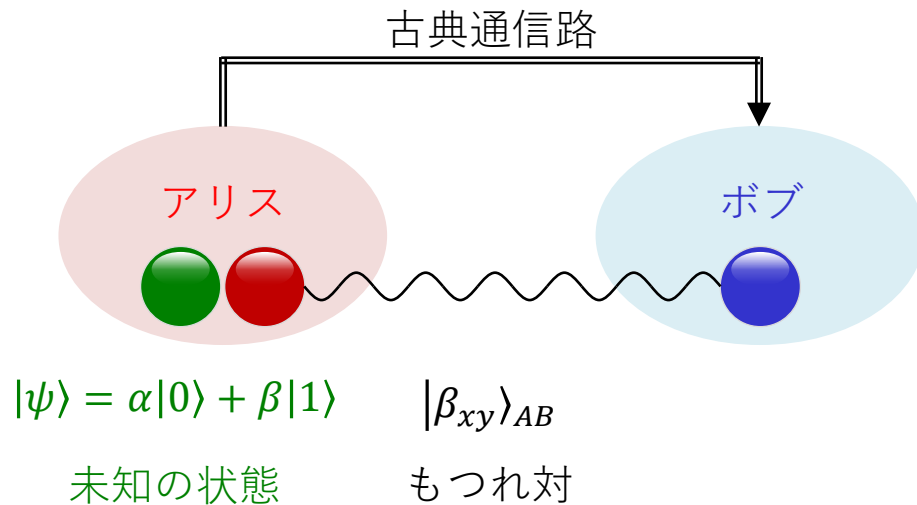


$$\begin{aligned}
 BS|\Psi\rangle_a|\Psi\rangle_b &= |\uparrow\rangle_a|\uparrow\rangle_b(|H\rangle_a|H\rangle_a - |H\rangle_b|H\rangle_b) + |\downarrow\rangle_a|\downarrow\rangle_b(|V\rangle_a|V\rangle_a - |V\rangle_b|V\rangle_b) \\
 &\quad + (|\uparrow\rangle_a|\downarrow\rangle_b + |\downarrow\rangle_a|\uparrow\rangle_b)(|H\rangle_a|V\rangle_a - |H\rangle_b|V\rangle_b) \\
 &\quad + (|\uparrow\rangle_a|\downarrow\rangle_b - |\downarrow\rangle_a|\uparrow\rangle_b)(|V\rangle_a|H\rangle_b - |H\rangle_a|V\rangle_b)
 \end{aligned}$$

スピン-光子量子もつれを用いた 量子テレポーテーション

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

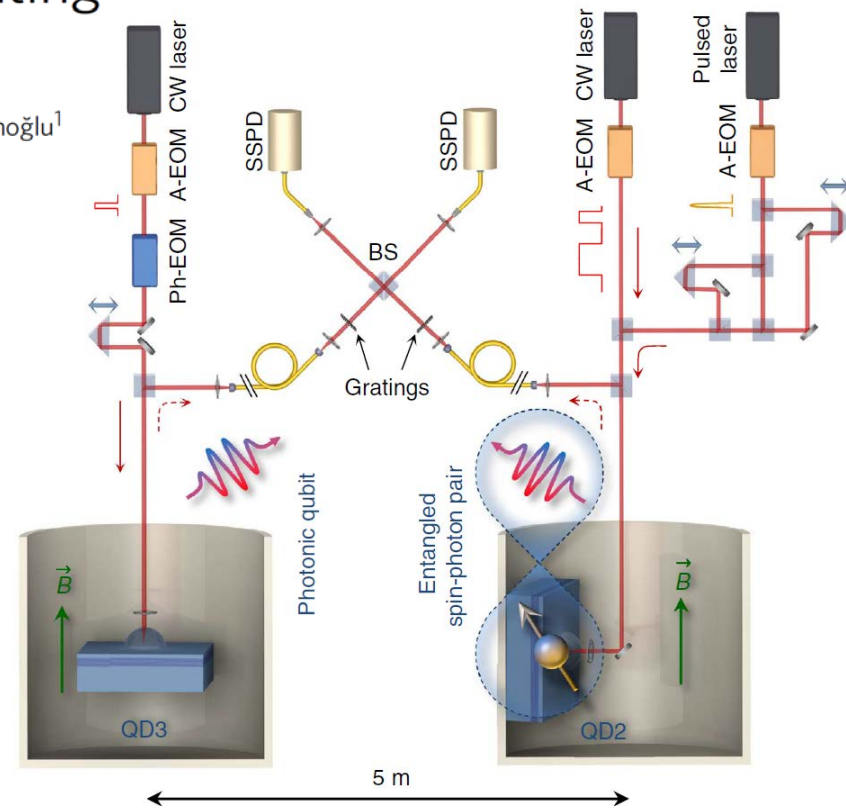
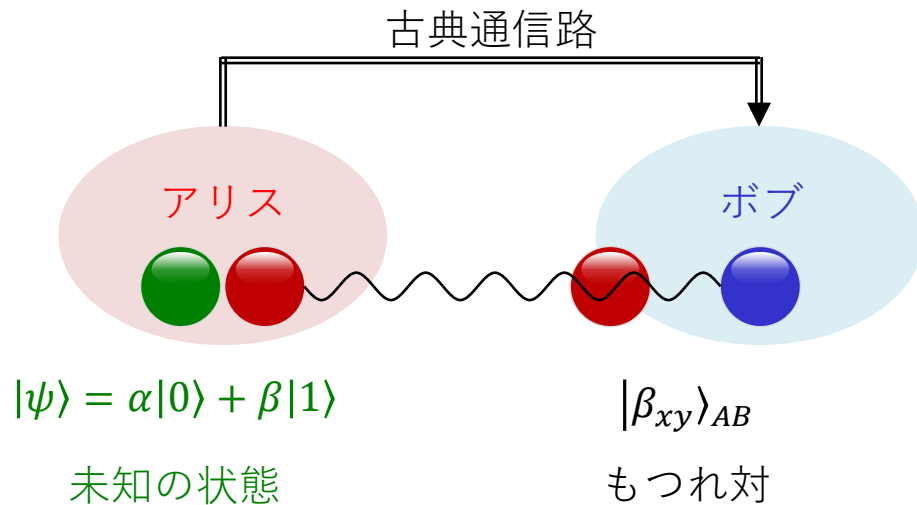
W.B. Gao¹, P. Fallahi¹, E. Togan¹, A. Delteil¹, Y.S. Chin¹, J. Miguel-Sanchez¹ & A. Imamoglu¹



スピン-光子量子もつれを用いた 量子テレポーテーション

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

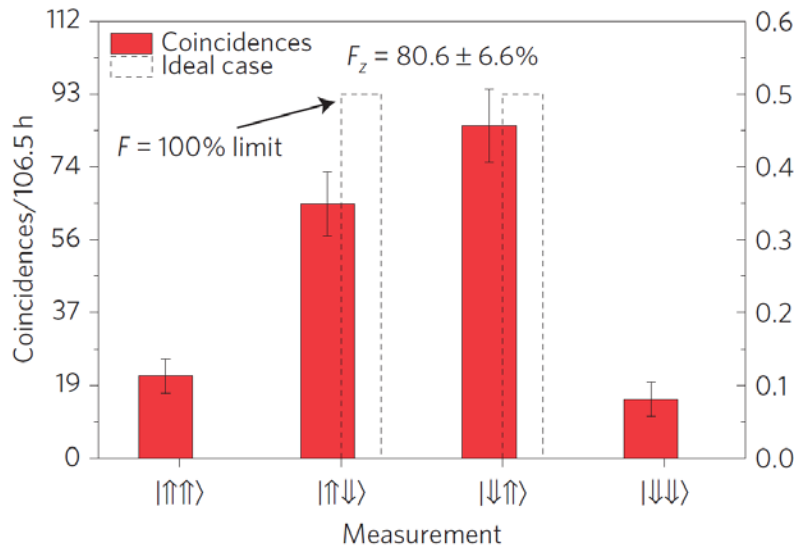
W.B. Gao¹, P. Fallahi¹, E. Togan¹, A. Delteil¹, Y.S. Chin¹, J. Miguel-Sanchez¹ & A. Imamoglu¹



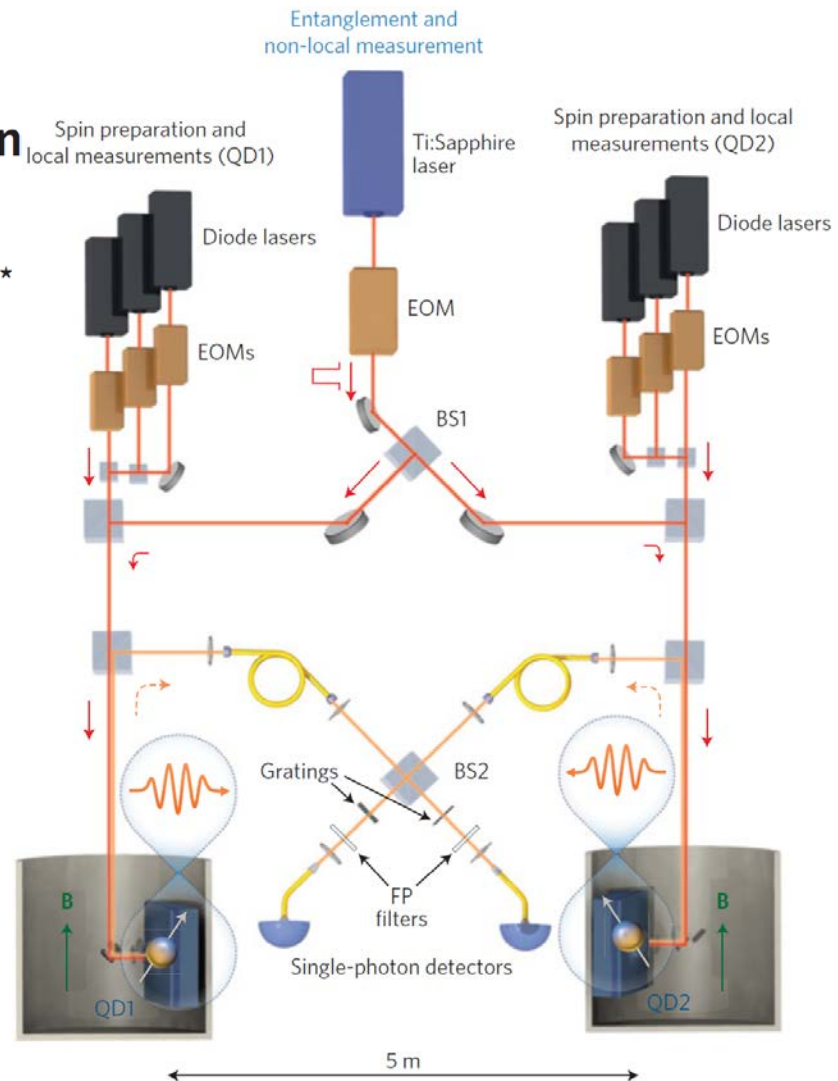
スピンスピン量子もつれ

Generation of heralded entanglement between distant hole spins

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



$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\downarrow\rangle + e^{-i\theta} |\downarrow\uparrow\rangle)$$



ダイヤモンドにおける進展

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.*

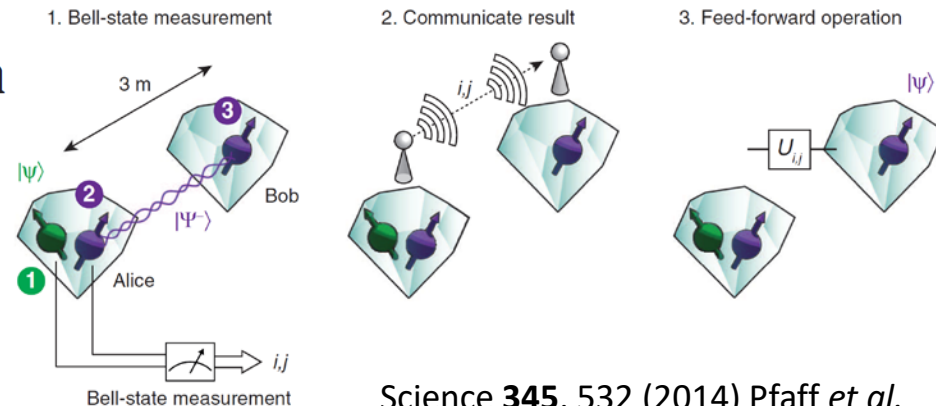
Heralded entanglement between solid-state qubits separated by three metres

H. Bernien¹, B. Hensen¹, W. Pfaff¹, G. Koolstra¹, M. S. Blok¹, L. Robledo¹, T. H. Taminiau¹, M. Markham², D. J. Twitchen², L. Childress³ & R. Hanson¹

Nature **497**, 86 (2013) Bernien *et al.*

Unconditional quantum teleportation between distant solid-state quantum bits

W. Pfaff,^{1*} B. J. Hensen,¹ H. Bernien,¹ S. B. van Dam,¹ M. S. Blok,¹ T. H. Taminiau,¹ M. J. Tiggeleman,¹ R. N. Schouten,¹ M. Markham,² D. J. Twitchen,² R. Hanson^{1†}

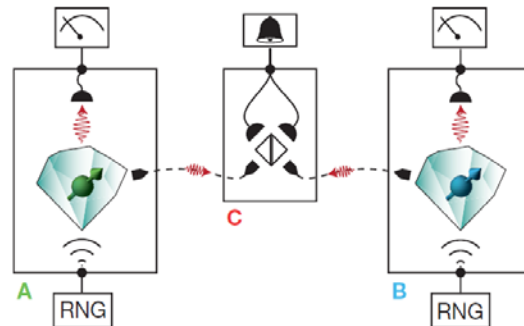
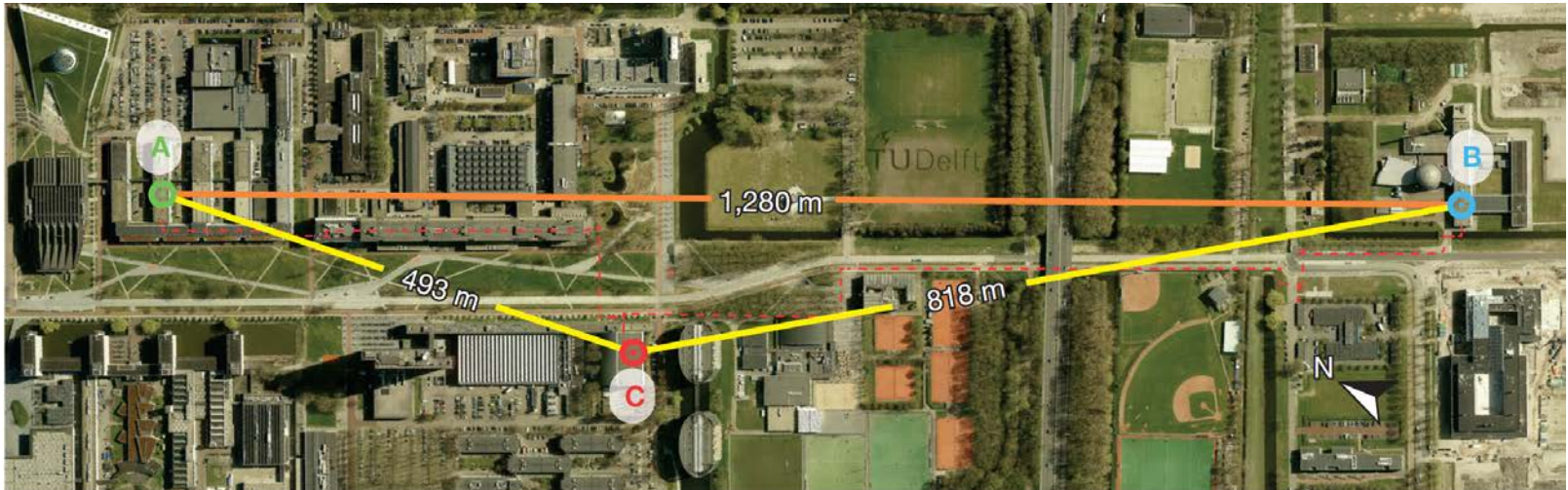


Science **345**, 532 (2014) Pfaff *et al.*

ダイヤモンドにおける進展

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. Ruitenberg^{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.*