

スピン量子コンピューティング

阿部 英介

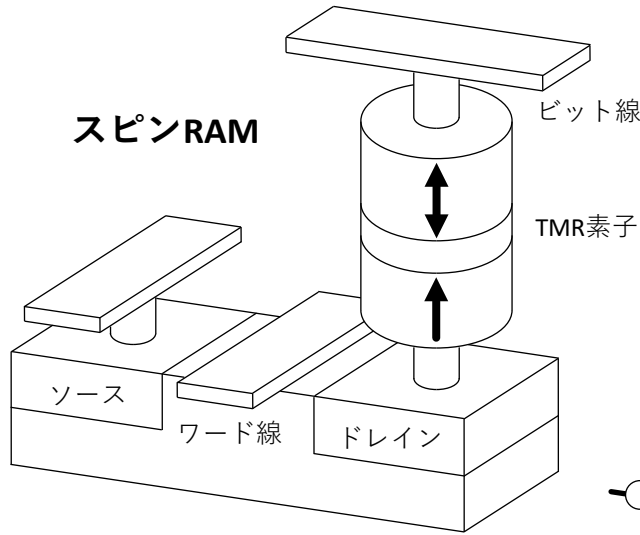
理化学研究所 創発物性科学研究センター

第19回スピントロニクス入門セミナー(ウェブ開催)

2021年1月8日(金)

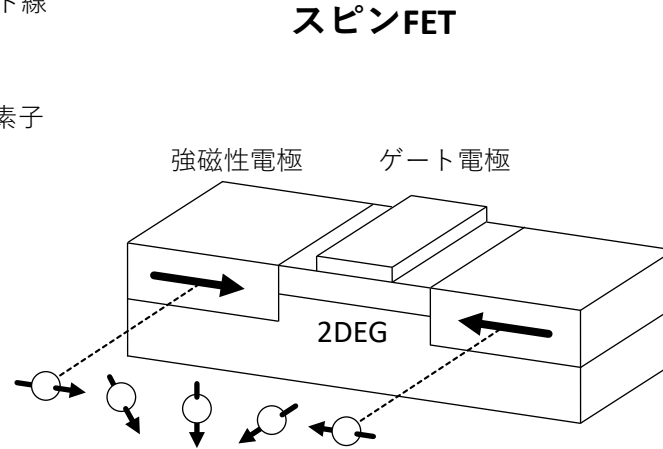


スピントロニクスデバイス



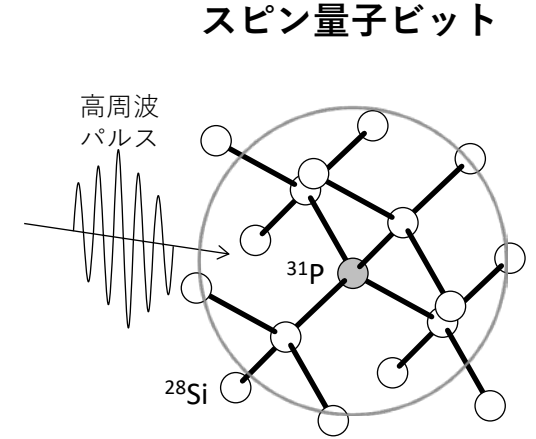
スピンRAM

磁性体の磁化



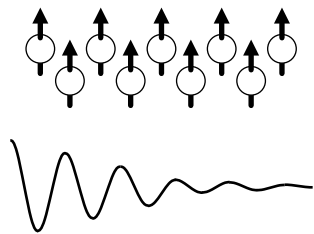
スピンFET

スピン軌道相互作用を受ける伝導電子



スピン量子ビット

単ーリン不純物の電子・核スピン



多

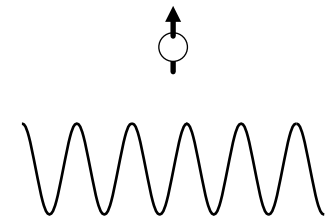
スピン数

少

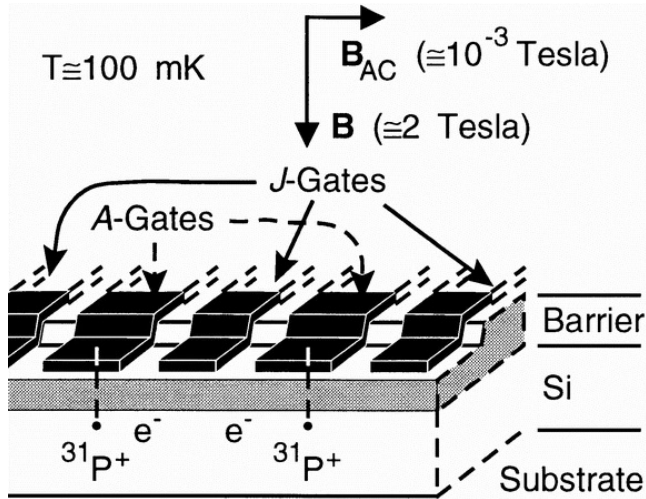
短

スピンコヒーレンス時間

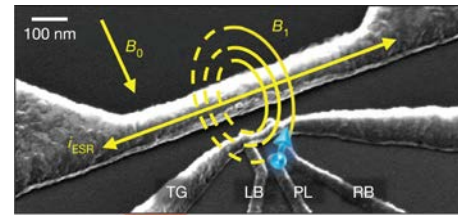
長



スピン量子コンピューティング

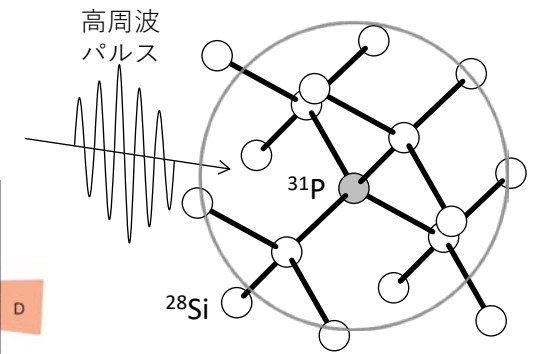


[Nature 393, 133 \(1998\) Kane](#)

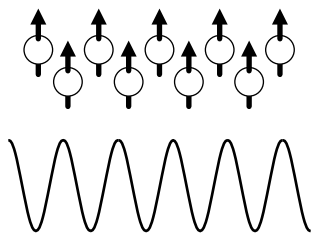


[Nature 489, 541 \(2012\) Pla et al.](#)

スピン量子ビット



単ーリン不純物の電子・核スピン



多

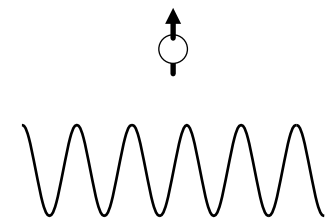
スピン数

少

長

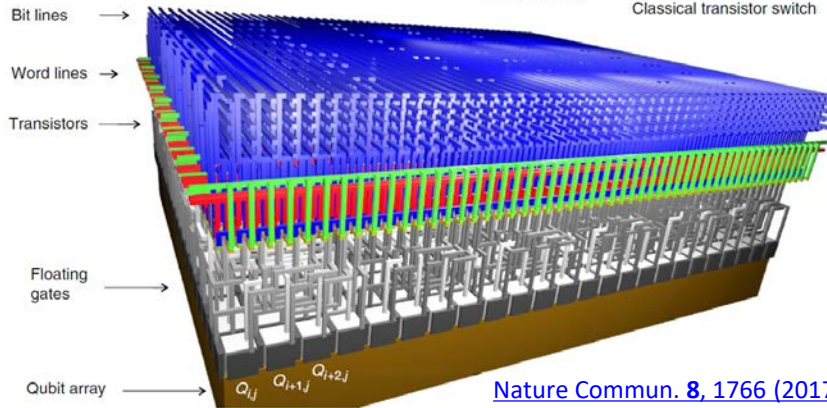
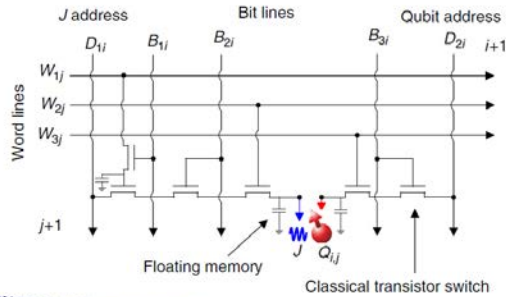
スピンコヒーレンス時間

長

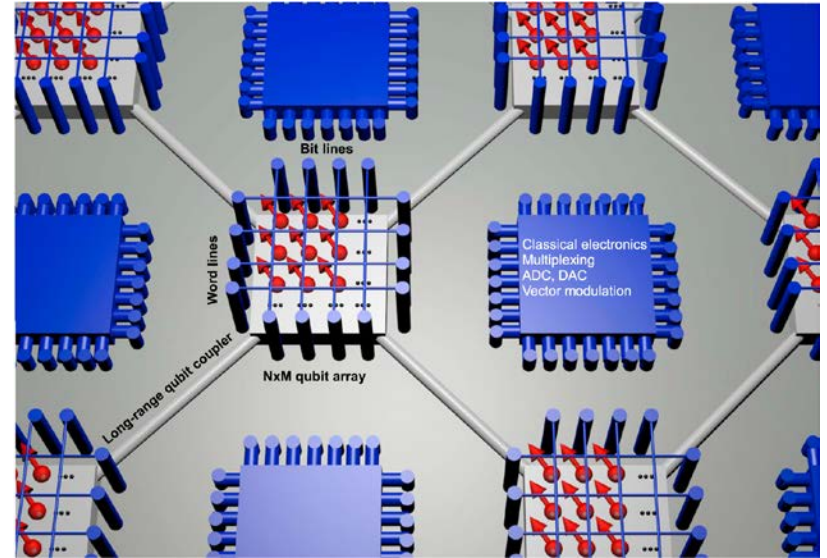


スピン量子コンピューティング

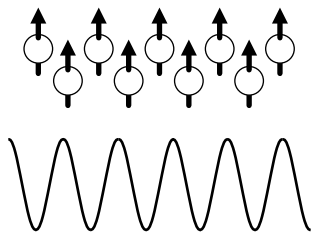
Input layer	SiO ₂
Transistor layer	Si
Interconnect layer	SiO ₂
Qubit layer	²⁸ Si



[Nature Commun. 8, 1766 \(2017\) Veldhorst et al.](#)



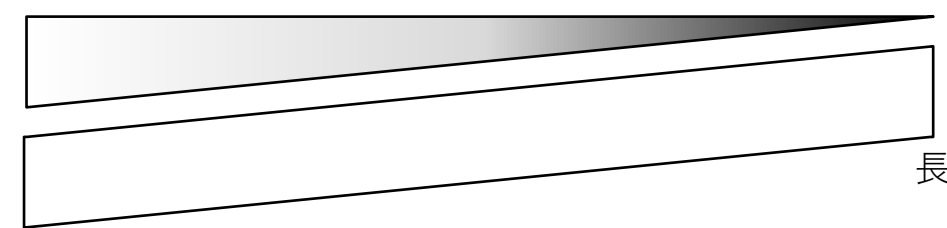
(Review) [npj Quant. Info. 3, 34 \(2017\) Vandersypen et al.](#)



多

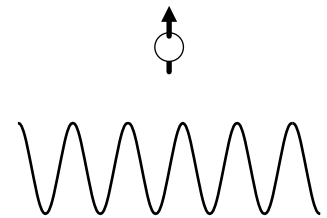
スピン数

少

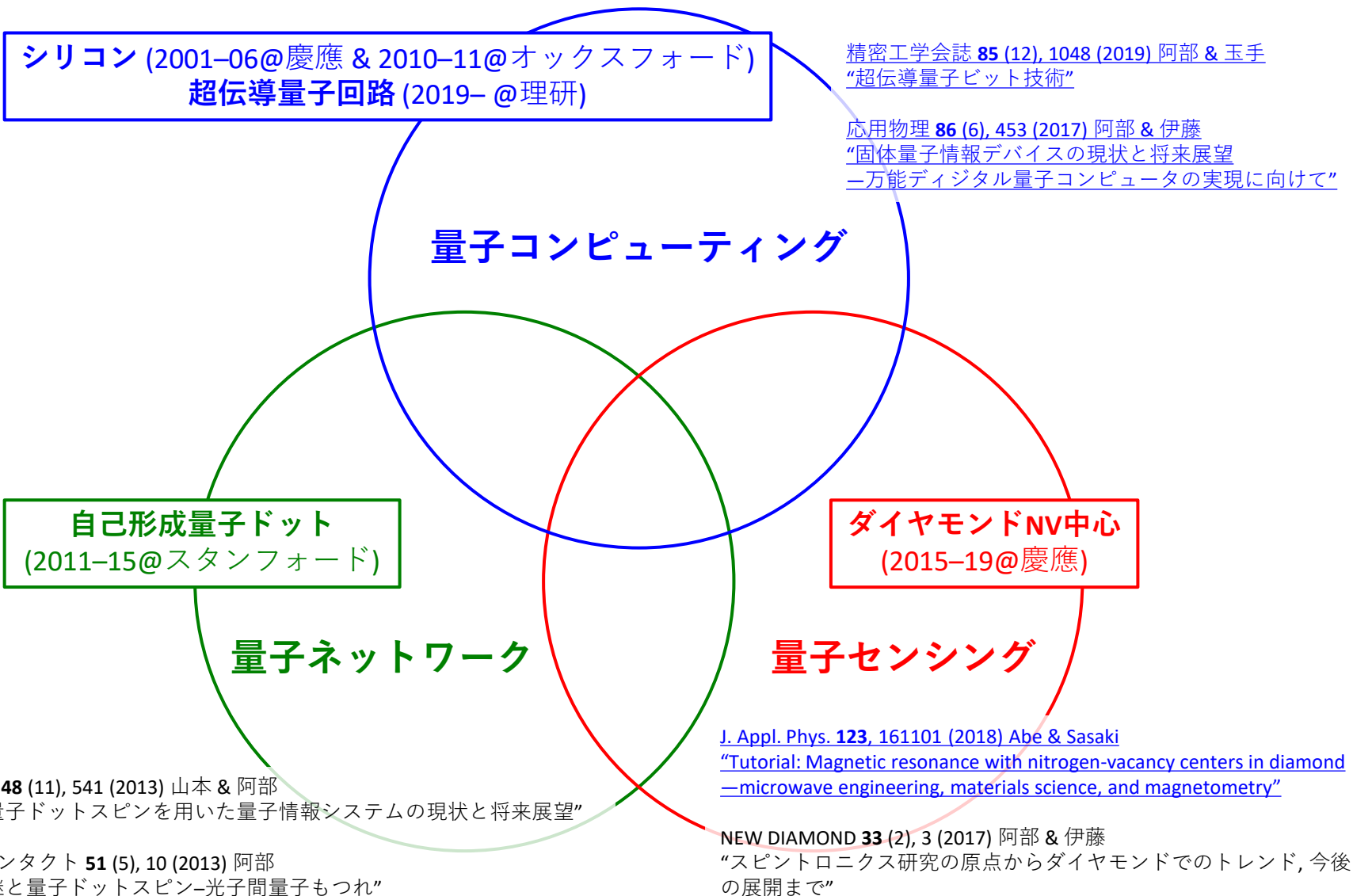


長

スピンコヒーレンス時間



量子技術



講義内容

- **磁気共鳴の基礎**
 - 磁気共鳴と1量子ビット操作
 - T_1 と T_2 (シリコン中のリンドナーの例)
- **各論**
 - シリコンスピン量子ビット
 - ✓ 単一リンドナー
 - ✓ MOS量子ドット
 - ✓ Si/SiGe量子ドット
 - ✓ ... and more
 - 光学活性スピン量子ビット
 - ✓ InAs自己形成量子ドット
 - ✓ ダイヤモンド中のNV⁻中心
 - ✓ ダイヤモンド中のSiV⁻中心
 - ✓ ... and more

(コメント1) 講義スライドの最新版は講義終了後 <https://quantum.riken.jp/lecture.html> にアップロードします。

(コメント2) “スピン量子コンピューティング”の示す範囲が極めて広く、また、聴衆の興味も多岐に渡ることが予想されるため、少数の系に絞って詳細に説明するよりも、多くの系を手広く紹介することにしました。**引用文献にはDOIのリンクが付いている**ので、個別のトピックについてより詳しく知りたい場合には、それらも参照して下さい。分量的に本講義時間内には全部説明し切れません。

(コメント3) オンラインのため、本スライドのフォントは通常発表より小さめです。

ディビンチェンゾの要請

[Fortschr. Phys. 48, 771 \(2000\) DiVincenzo](#)

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 T_2
4. ユニバーサル量子ゲート
5. 射影測定



D. DiVincenzo

©RWTH Aachen U.

ディビンチェンゾの要請

[Fortschr. Phys. 48, 771 \(2000\) DiVincenzo](#)

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 T_2
4. ユニバーサル量子ゲート
5. 射影測定



D. DiVincenzo

©RWTH Aachen U.

シリコン量子コンピュータ

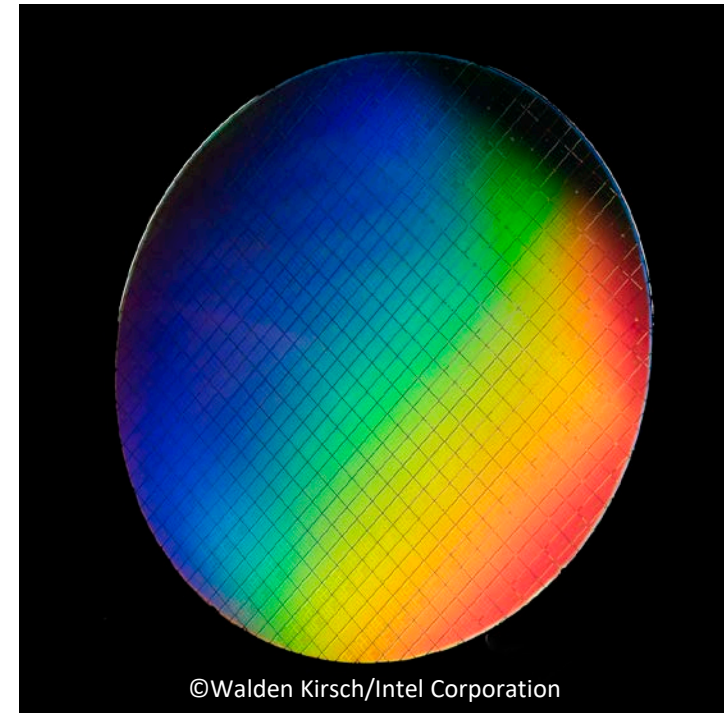
[Nature 393, 133 \(1998\) Kane](#)

[Phys. Rev. A 57, 120 \(1998\) Loss & DiVincenzo](#)

[Phys. Rev. A 62, 012306 \(2000\) Vrijen *et al.*](#)

[Phys. Rev. Lett. 89, 017901 \(2002\) Ladd *et al.*](#)

→ 集積性、古典回路との融合



©Walden Kirsch/Intel Corporation

ディビンチェンゾの要請

[Fortschr. Phys. 48, 771 \(2000\) DiVincenzo](#)

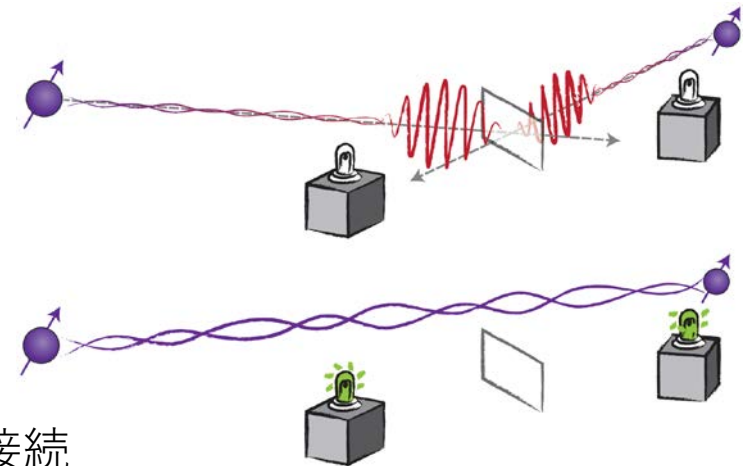
量子コンピューティングの要素技術

1. スケーラブルな量子ビット列
2. 初期化
3. 長い T_2
4. ユニバーサル量子ゲート
5. 射影測定



D. DiVincenzo

©RWTH Aachen U.



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
→ スピン-光子量子もつれ
7. 遠隔地間の飛行量子ビットを介したやり取り
→ スピン-スピン量子もつれ

(Review) [MRS Bulletin 38, 134 \(2013\) Childress & Hanson](#)

量子もつれと量子計算

Demonstrating the viability of universal quantum computation using teleportation and single-qubit operations

Daniel Gottesman*† & Isaac L. Chuang‡

* Theoretical Astrophysics T-6, MS B-288, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico 87545, USA

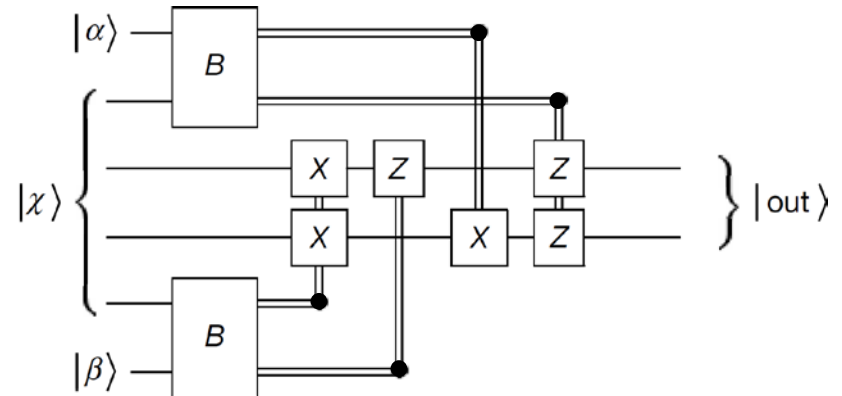
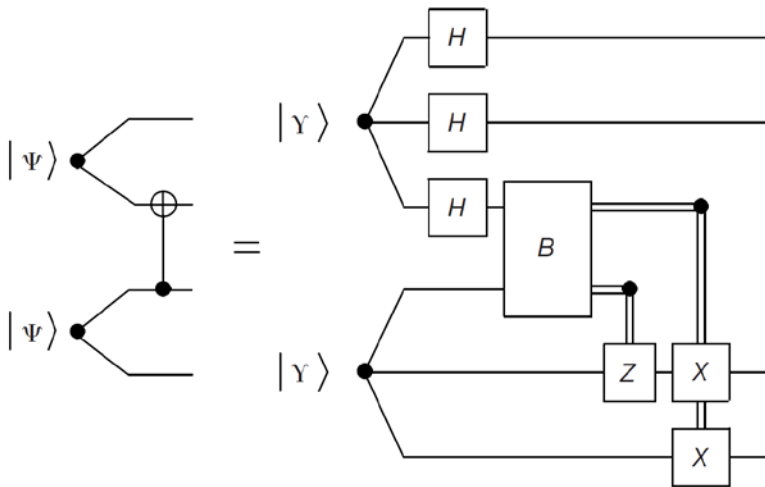
† Microsoft Research, One Microsoft Way, Redmond, Washington 87545, USA

‡ IBM Almaden Research Center, 650 Harry Road, San Jose, California 95120, USA

事前に準備した量子もつれ状態を用いた量子テレポーテーション、ベル測定、1量子ビットゲートでユニバーサル量子計算が可能



2量子ビットゲートを実行するより量子もつれを生成の方が容易なことがある(測定型量子計算)



[Nature 402, 390 \(1999\) Gottesman & Chuang](#)

[Nature Phys. 5, 19 \(2009\) Briegel et al. "Measurement-based quantum computation"](#)

講義内容

- **磁気共鳴の基礎**
 - 磁気共鳴と1量子ビット操作
 - T_1 と T_2 (シリコン中のリンドナーの例)
- **各論**
 - シリコンスピン量子ビット
 - ✓ 単一リンドナー
 - ✓ MOS量子ドット
 - ✓ Si/SiGe量子ドット
 - ✓ ... and more
 - 光学活性スピン量子ビット
 - ✓ InAs自己形成量子ドット
 - ✓ ダイヤモンド中のNV⁻中心
 - ✓ ダイヤモンド中のSiV⁻中心
 - ✓ ... and more

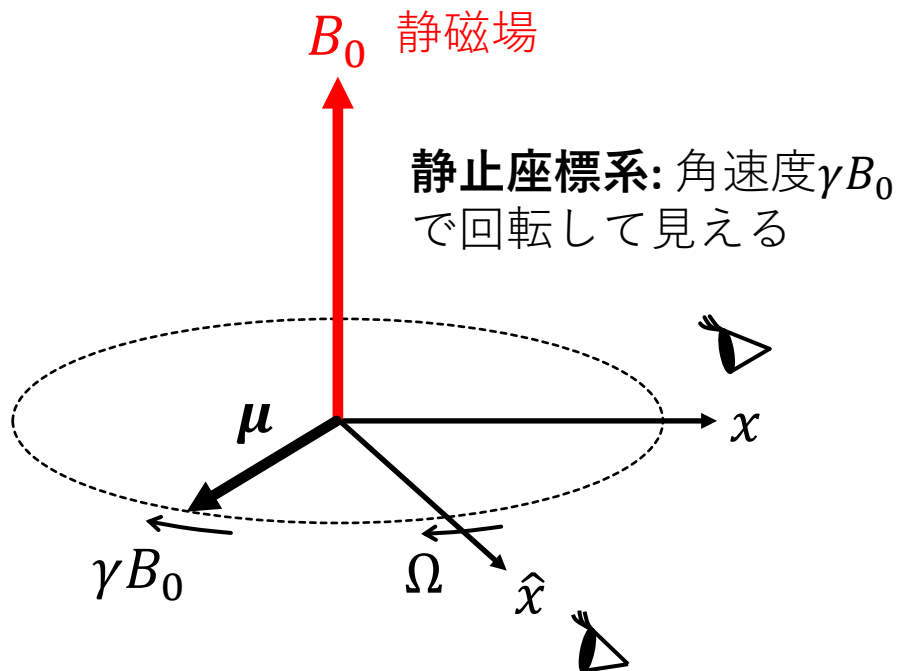
磁気共鳴

トルク方程式(ラーモア歳差運動)

$$\frac{d\boldsymbol{\mu}}{dt} = \boldsymbol{\mu} \times \gamma \mathbf{B}_0$$

磁気回転比: $g_e \mu_B$

磁気モーメント: $\boldsymbol{\mu} = \gamma \mathbf{J}$



静止座標系: 角速度 γB_0 で回転して見える

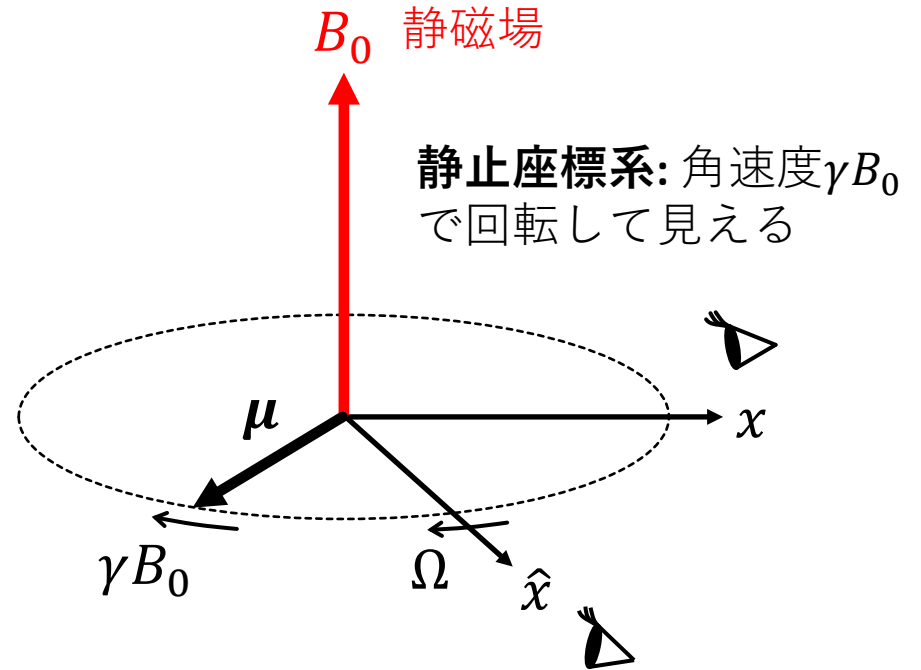
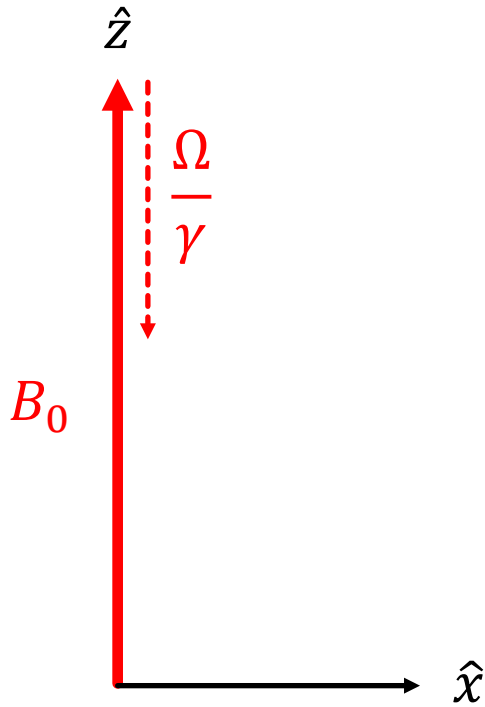
角速度 Ω で回転する座標系: 遅くなって見える...なぜ??



Joseph Larmor
(1857–1942)

(from Wikipedia)

磁気共鳴

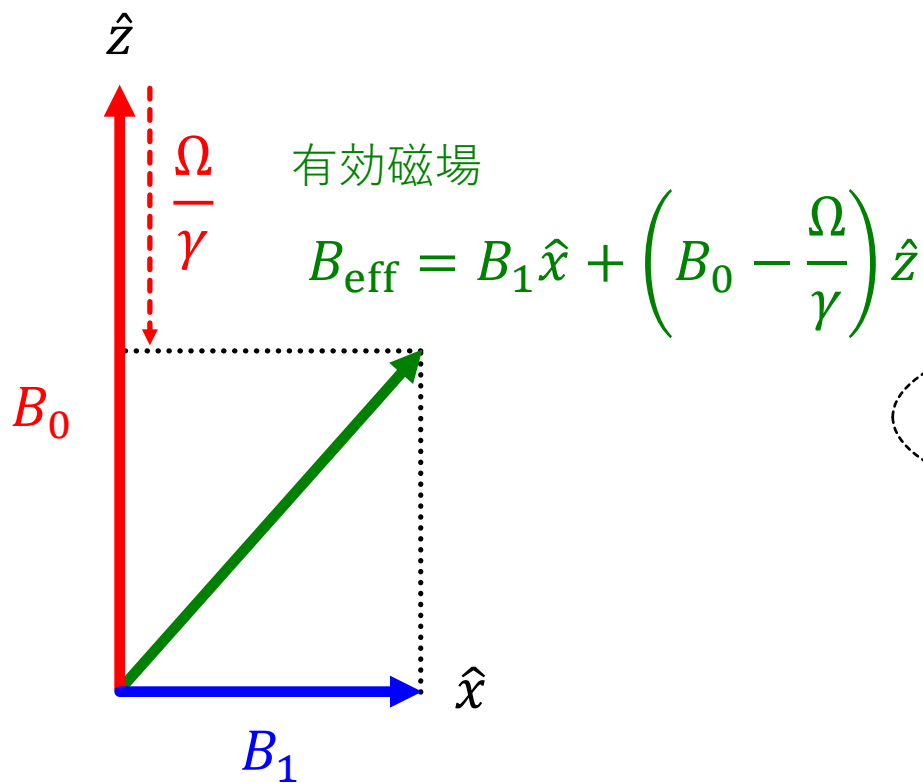


角速度 Ω で回転する座標系:
遅くなって見える...なぜ??

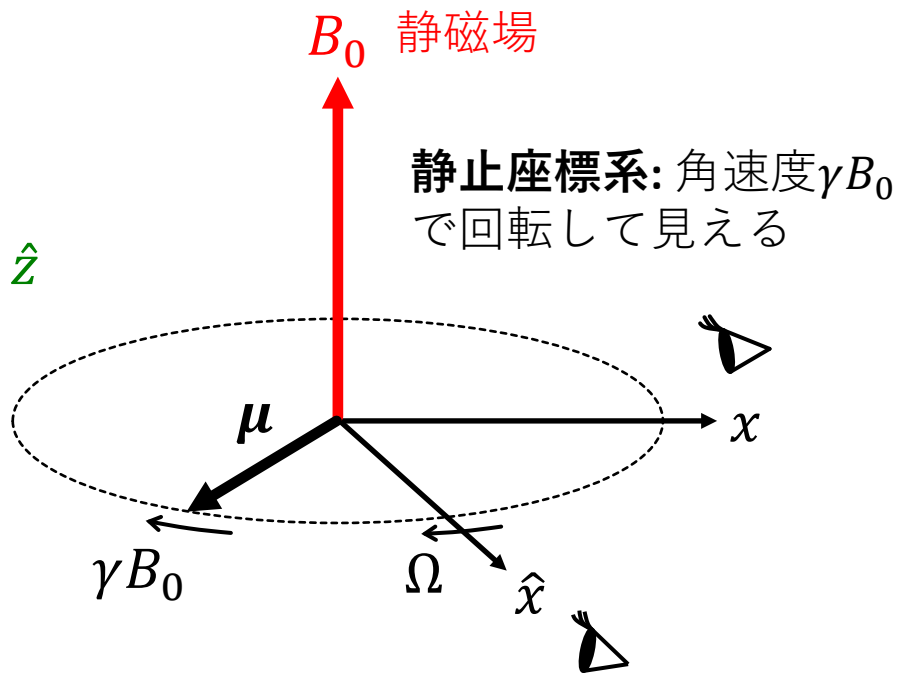


z方向の磁場が弱くなったから

磁気共鳴



xy 平面を角速度 Ω で回転する交流磁場



角速度 Ω で回転する座標系:
遅くなって見える...なぜ??

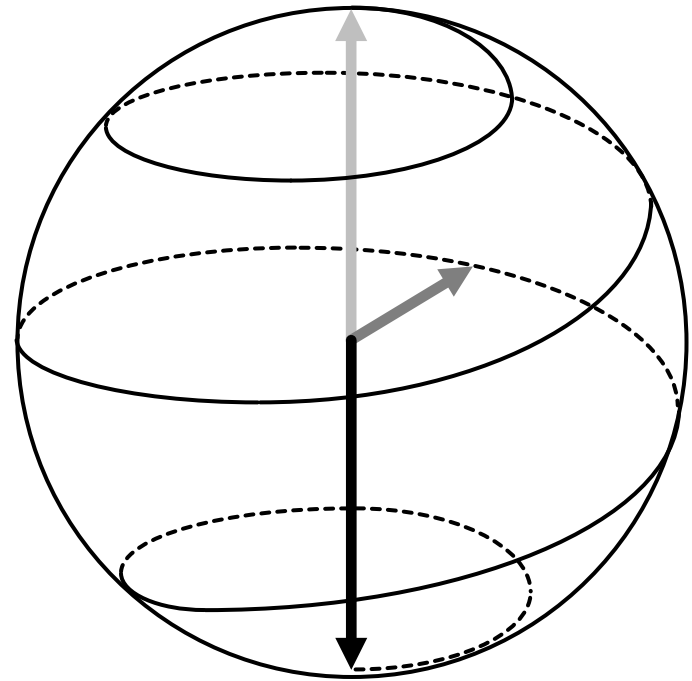
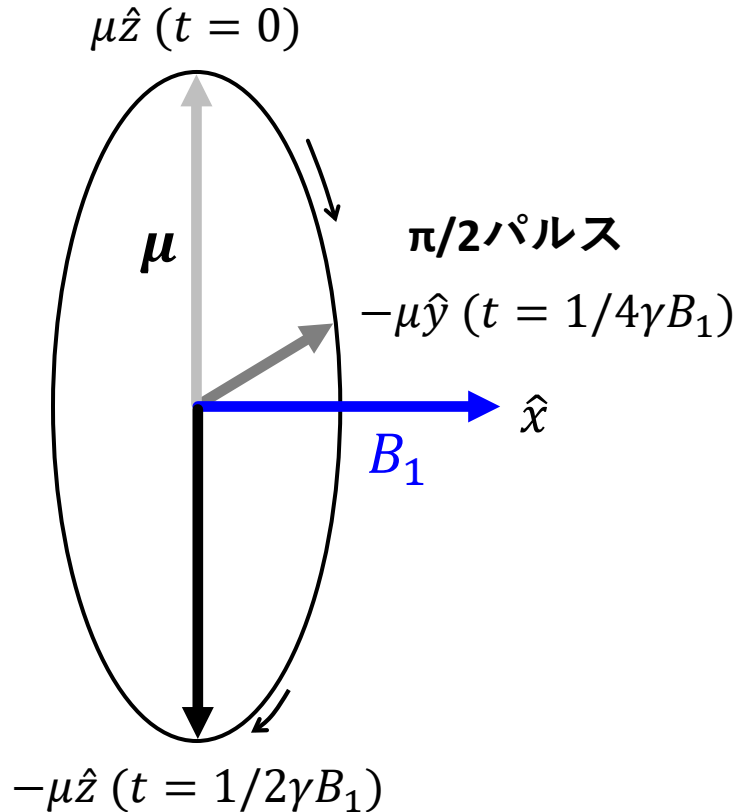


z 方向の磁場が弱くなったから

1量子ビット操作

$\Omega = \gamma B_0$ で回転する座標系

静止座標系



π パルス

- 交流磁場の位相を調整すれば $\pm\hat{x}, \pm\hat{y}$ 軸周りの回転が実現
- 静止座標系では z 軸周りの回転が加わる

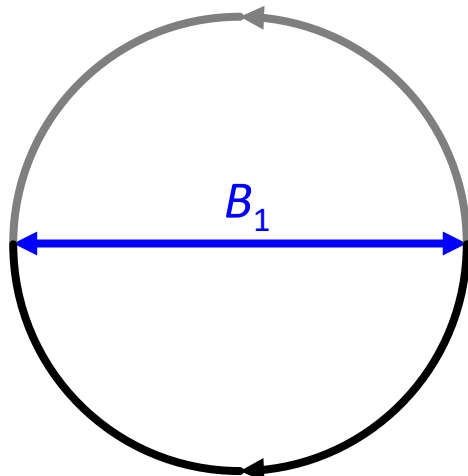
実験における回転座標系とは?

xy 平面を角速度 Ω で回転する円偏光交流磁場を生成するのは(可能だが)面倒



通常は周波数 $\Omega/2\pi$ で x 方向に振動する直線偏光交流磁場を生成する

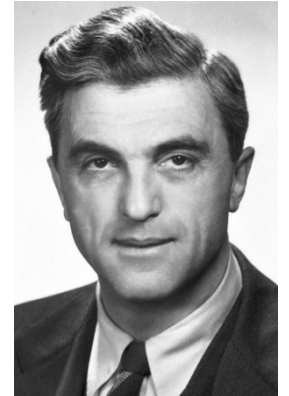
CCW (counter clockwise)



CW (clockwise)

- 直線偏光 B_1 のCW成分はスピンと同方向に回転して磁気共鳴に寄与
- CCW成分は非共鳴なので無視できる(回転波近似、RWA)
- 検出系を発振器の周波数に同期することで回転座標系でスピンを“見る”ことになる

T_1 と T_2



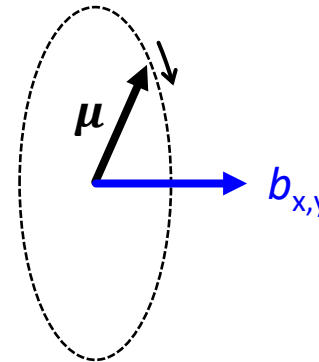
Felix Bloch
(1905–1983)

©Nobel Foundation

ブロツホ方程式

[Phys. Rev. 70, 460 \(1946\) Bloch](#)

$$\frac{d\boldsymbol{\mu}}{dt} = \boldsymbol{\mu} \times \gamma \mathbf{B}_0 - \frac{\mu_{\parallel} - \mu_0}{T_1} \hat{\mathbf{z}} - \frac{\boldsymbol{\mu}_{\perp}}{T_2}$$

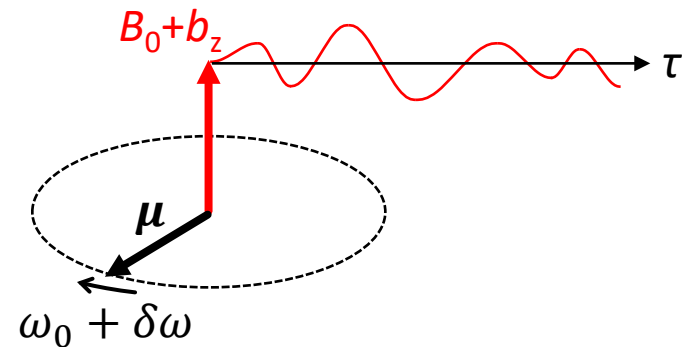


エネルギー緩和(スピンの向きを変える)

$$\frac{1}{T_1} = \frac{\gamma^2}{2} \int_{-\infty}^{\infty} [\langle b_x(\tau) b_x(0) \rangle + \langle b_y(\tau) b_y(0) \rangle] \cos(\omega_0 \tau) d\tau$$

位相緩和(歳差速度を変える)

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{2T_1} + \frac{\gamma^2}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \langle b_z(\tau) b_z(0) \rangle d\tau$$



[IBM J. Res. Dev. 1, 19 \(1957\) Redfield](#)

→ インコヒーレントな過程

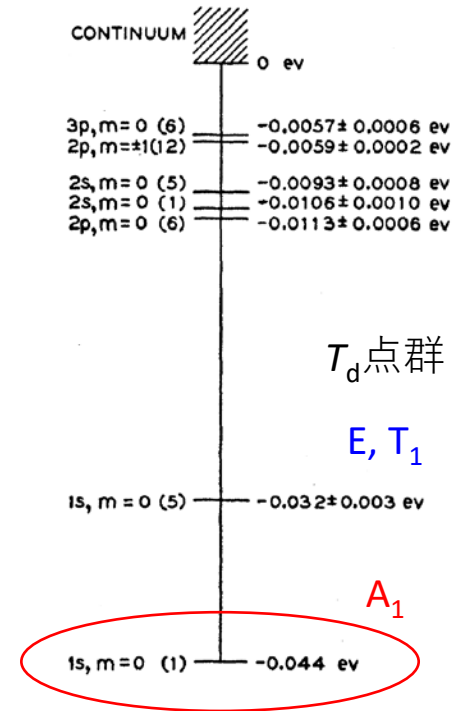
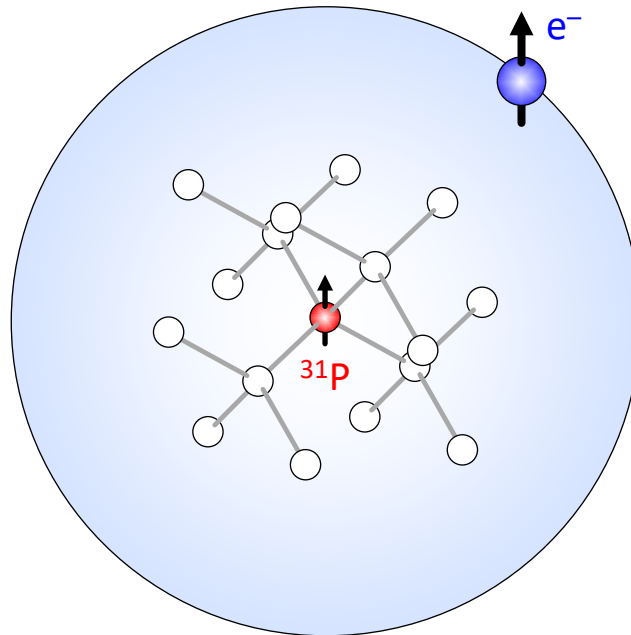
シリコン中のリンドナー

低温下で電子はリンに束縛される → 水素原子様浅い不純物(有効質量近似)

有効ボーア半径 $a_B^* = 3.2 \text{ nm}$ (格子定数 $a_{\text{Si}} = 0.54 \text{ nm}$)

III (13)	IV (14)	V (15)
B	C	N
Al	Si	P
Ga	Ge	As

$S = \frac{1}{2}, I = \frac{1}{2}$ (^{31}P , 100%)



[Phys. Rev. 98, 915 \(1955\) Kohn & Luttinger](#)

(Review) [Rep. Prog. Phys. 44, 1297 \(1981\) Ramdas & Rodriguez](#)

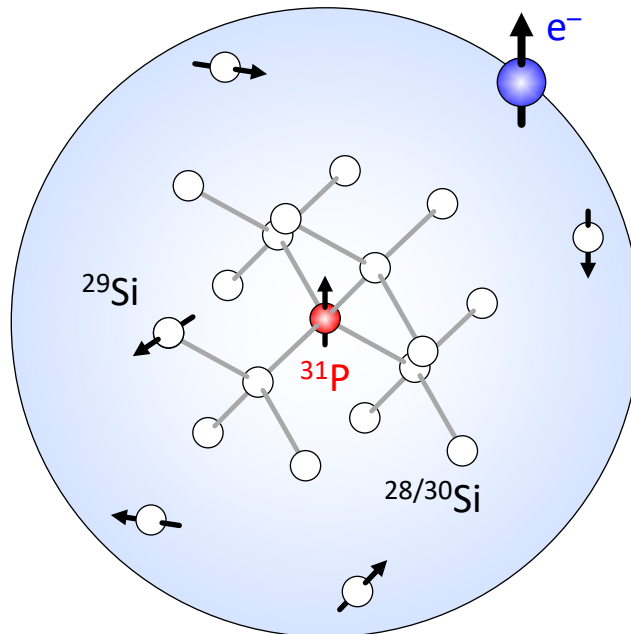
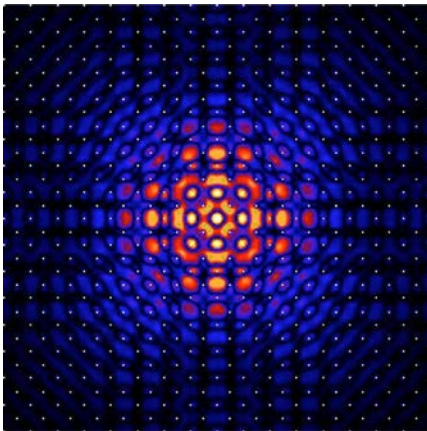
シリコン中のリンドナー

低温下で電子はリンに束縛される → 水素原子様浅い不純物(有効質量近似)

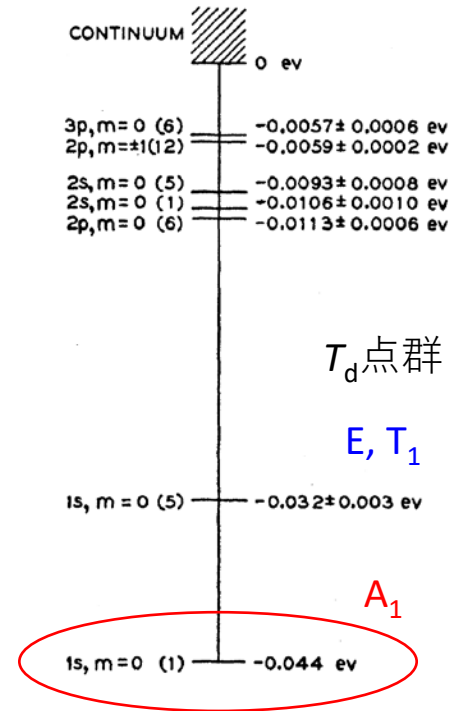
有効ボーア半径 $a_B^* = 3.2 \text{ nm}$ (格子定数 $a_{\text{Si}} = 0.54 \text{ nm}$)

$S = 1/2, I = 1/2$ (^{31}P , 100%)

[100]面(中心セル補正, 谷干渉)



$I = 1/2$ (^{29}Si , 4.7%)



Phys. Rev. **98**, 915 (1955) Kohn & Luttinger

Phys. Rev. B **72**, 085202 (2005) Wellard *et al.*

(Exp.) Nature Mater. **13**, 605 (2014) Salfi *et al.*

(Review) Rep. Prog. Phys. **44**, 1297 (1981) Ramdas & Rodriguez

シリコン中のリンドナー

スピンハミルトニアン

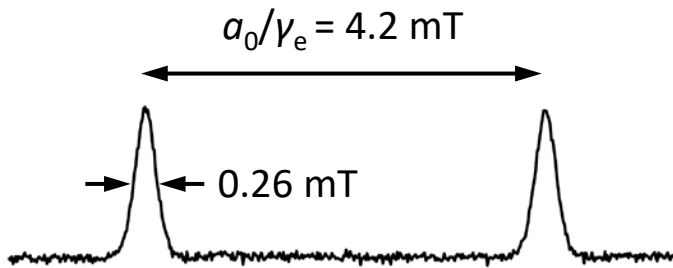
$$H = \gamma_e B_0 S_z - \gamma_P B_0 I_z + a_0 S_z I_z$$

$$B_0 \approx 350 \text{ mT}$$

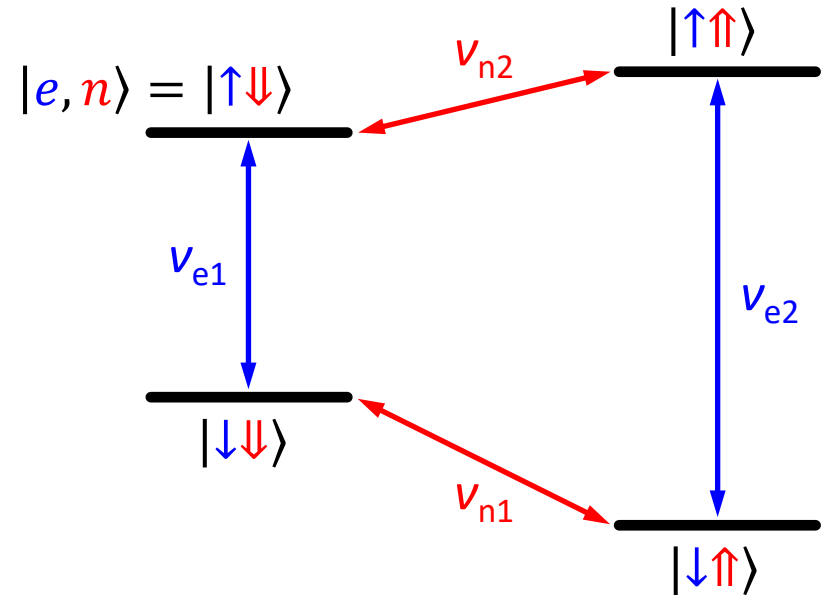
$$\gamma_e/2\pi = 27.97 \text{ GHz/T}$$

$$\gamma_P/2\pi = 17.23 \text{ MHz/T}$$

$$a_0/2\pi = 117.53 \text{ MHz}$$



アンサンブル電子スピン共鳴(^{nat}Si、磁場掃引)



$$v_{e1} = \gamma_e B_0 - a_0/2$$

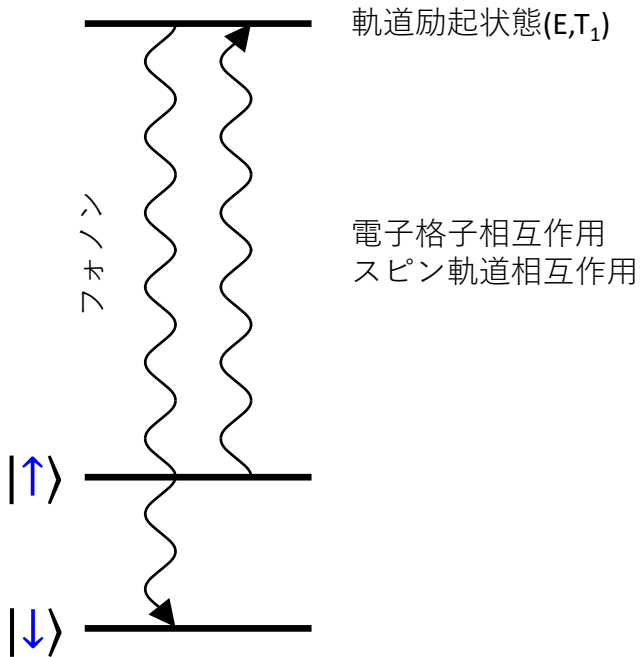
$$v_{e2} = \gamma_e B_0 + a_0/2$$

$$v_{n1} = a_0/2 + \gamma_P B_0$$

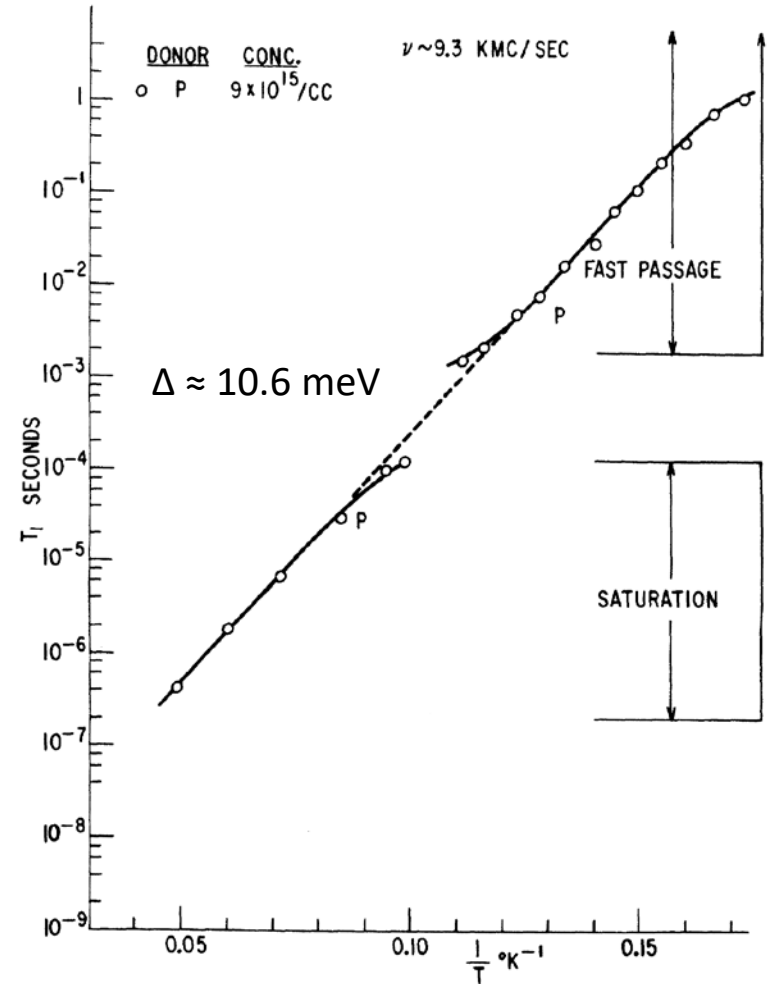
$$v_{n2} = a_0/2 - \gamma_P B_0$$

T_1 機構

オーバック過程

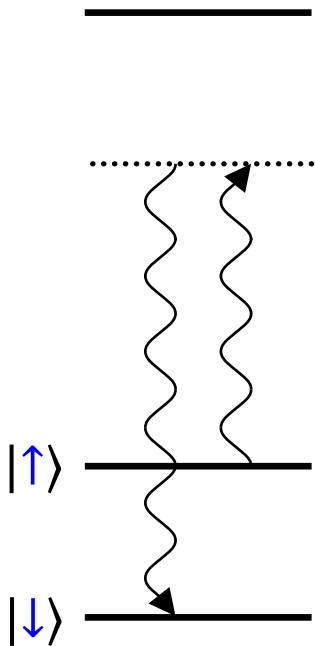


$$\frac{1}{T_1} \propto \exp\left(-\frac{\Delta}{k_B T}\right)$$



T_1 機構

ラマン過程

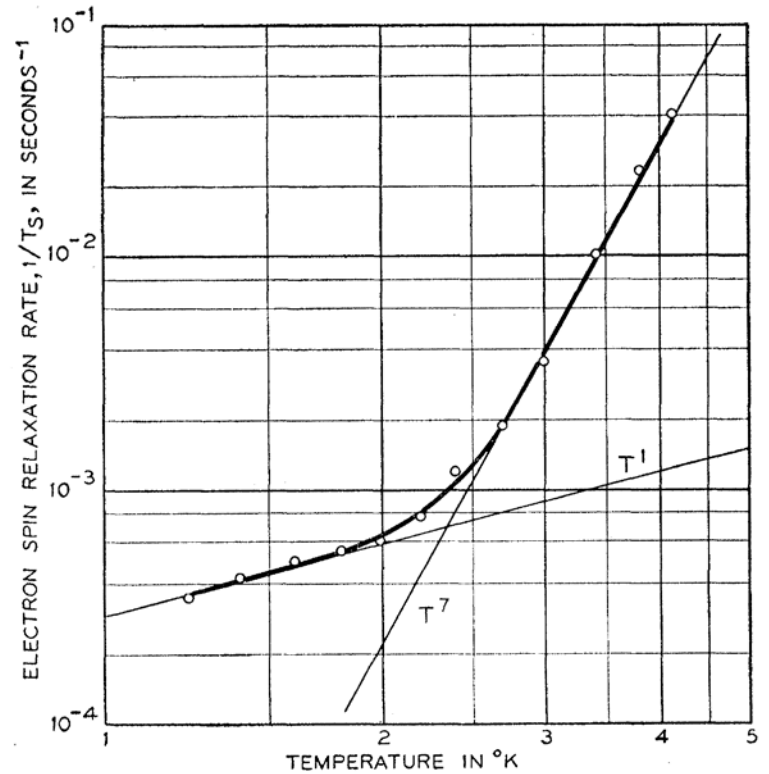


$$\frac{1}{T_1} \propto T^7$$

直接過程

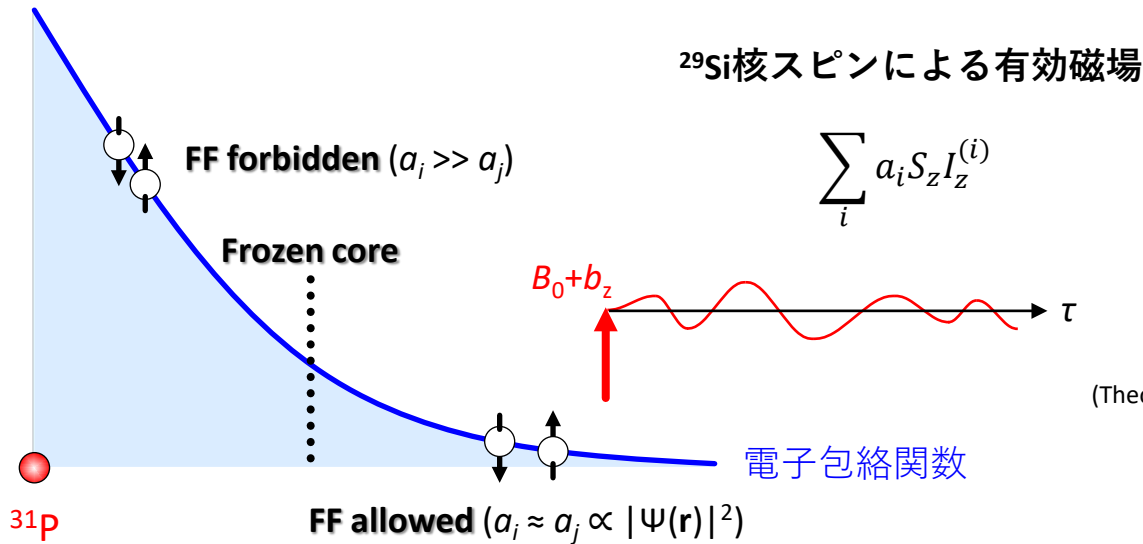
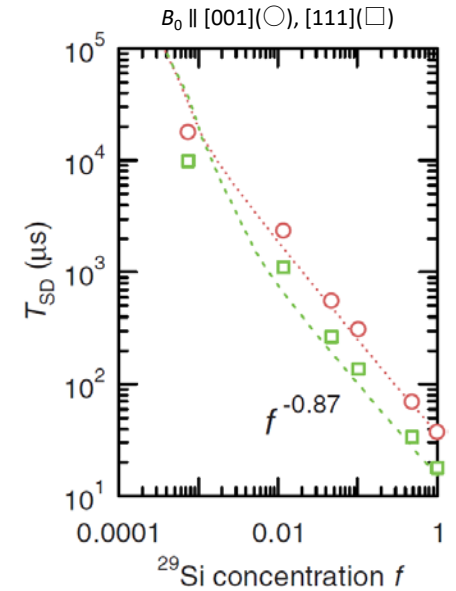
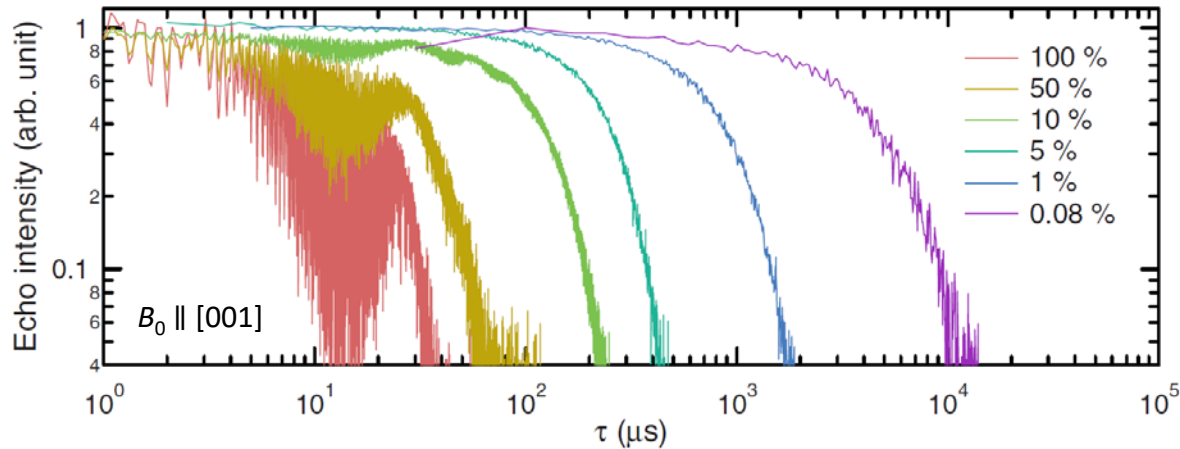


$$\frac{1}{T_1} \propto T$$

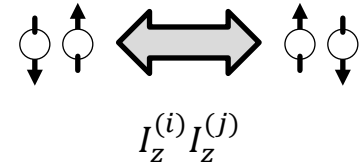


- 温度依存性はスピン(整数、半整数)にも依存
- 詳細な理解は第一原理計算を用いる必要あり

T_2 機構



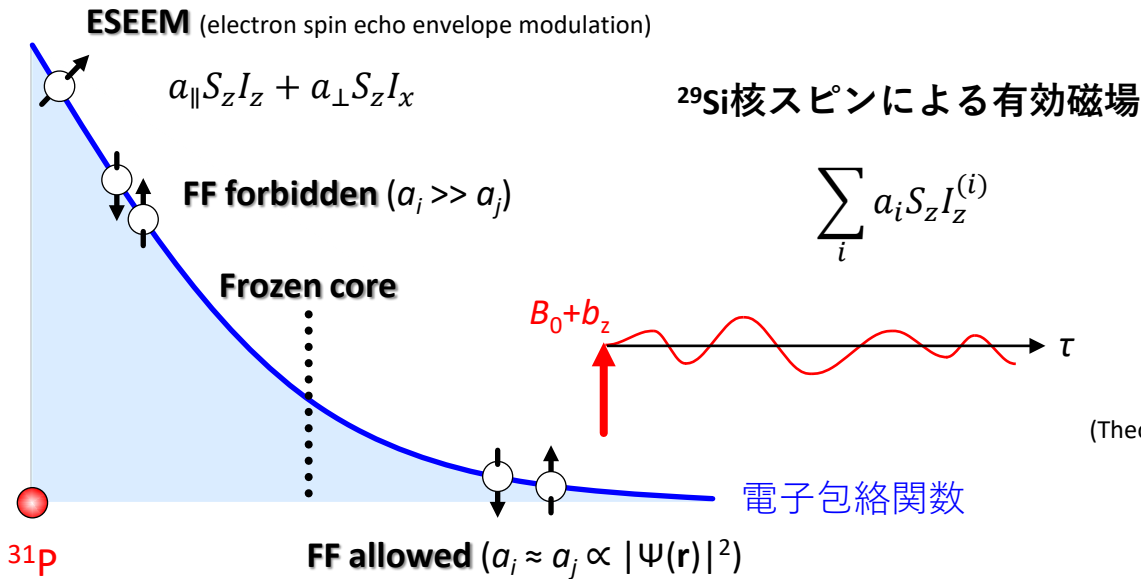
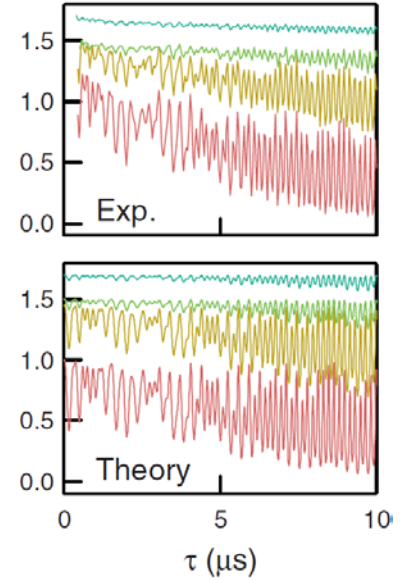
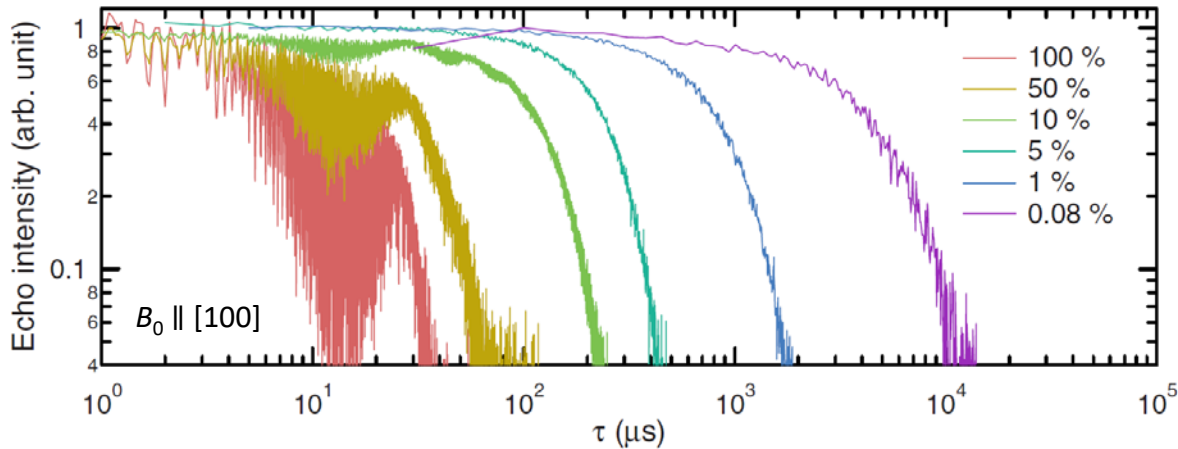
^{29}Si 核スピン相互反転(FF)



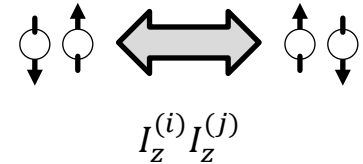
[Phys. Rev. B **82**, 121201 \(2010\) Abe et al.](#)

(Theory) [Phys. Rev. B **74**, 035322 \(2006\) Witzel & Das Sarma](#)

T_2 機構



^{29}Si 核スピン相互反転(FF)



[Phys. Rev. B **82**, 121201 \(2010\) Abe et al.](#)

(Theory) [Phys. Rev. B **74**, 035322 \(2006\) Witzel & Das Sarma](#)

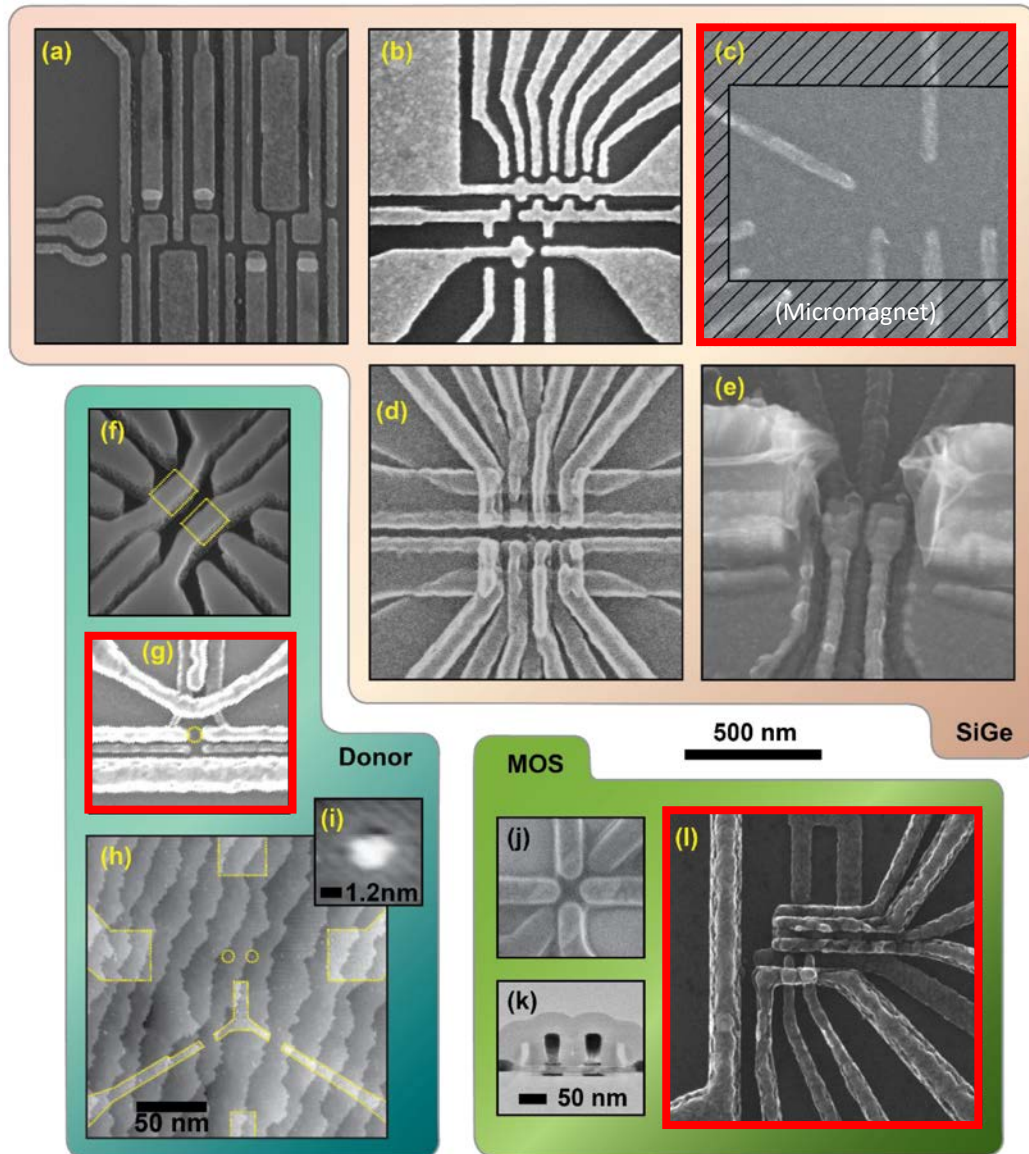
(ESEEM) [Phys. Rev. B **70**, 033204 \(2004\) Abe et al.](#)

(Theory) [Phys. Rev. B **76**, 035212 \(2007\) Witzel et al.](#)

講義内容

- **磁気共鳴の基礎**
 - 磁気共鳴と1量子ビット操作
 - T_1 と T_2 (シリコン中のリンドナーの例)
- **各論**
 - シリコンスピン量子ビット
 - ✓ 単一リンドナー
 - ✓ MOS量子ドット
 - ✓ Si/SiGe量子ドット
 - ✓ ... and more
 - 光学活性スピン量子ビット
 - ✓ InAs自己形成量子ドット
 - ✓ ダイヤモンド中のNV⁻中心
 - ✓ ダイヤモンド中のSiV⁻中心
 - ✓ ... and more

シリコン量子ビットギャラリ



[Encyclopedia of Modern Optics \(2nd Ed.\) 1, 467 \(2018\) Ladd & Carroll "Silicon Qubits"](#)

(a) By courtesy of Mark Eriksson (U. Wisconsin)
[npj Quant. Info. 2, 16032 \(2016\) Ward et al.](#)

(b) Fabricated by Christian Volk (QuDev)

(c) By courtesy of Kenta Takeda (RIKEN)
[Sci. Adv. 2, e1600694 \(2016\) Takeda et al.](#)

(d) By courtesy of Jason Petta (Princeton U.)
[Appl. Phys. Lett. 106, 223507 \(2015\) Zajac et al.](#)

(e) By courtesy of the Vandersypen group, ©TU Delft

(f) Device from Sandia National Laboratory
[Nature Commun. 8, 1029 \(2017\) Harvey-Collard et al.](#)

(g) By courtesy of Andrea Morello (UNSW)
[Nature Nano. 9, 986 \(2014\) Muhonen et al.](#)

(h,i) By courtesy of T. F. Watson (CQC2T, UNSW)
[Phys. Rev. Lett. 115, 166806 \(2015\) Watson et al.](#)

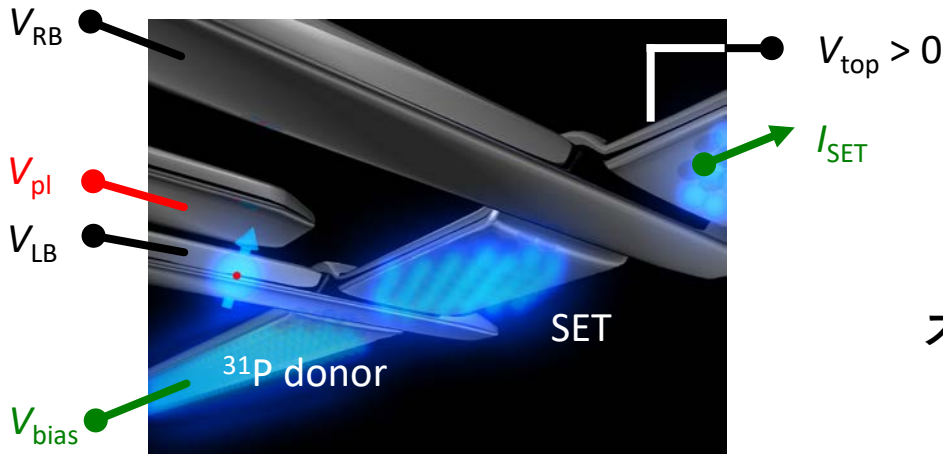
(j) By courtesy of Fernando Gonzalez-Zalba (Hitachi Cambridge)
[Appl. Phys. Lett. 108, 203108 \(2016\) Betz et al.](#)

(k) By courtesy of Maud Vinet (LETI)
[Nature Commun. 7, 13575 \(2016\) Maurand et al.](#)

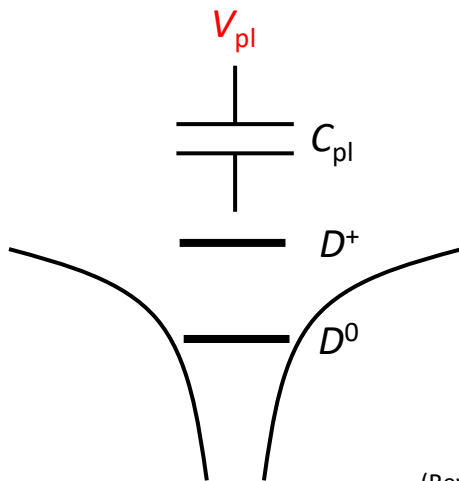
(l) By courtesy of Andrew Dzurak (UNSW)
[Nature 526, 410 \(2015\) Veldhorst et al.](#)

単一ドナー電子スピン

単一ドナー-SETハイブリッドデバイス



©W. Algar-Chuklin, College of Fine Arts, UNSW



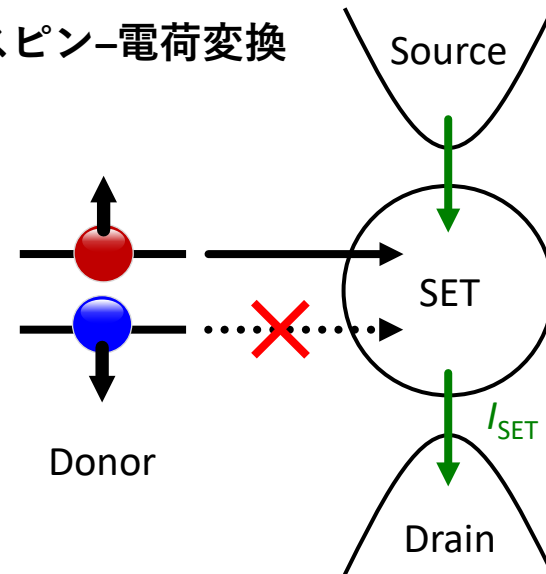
$$E(D^+) - E(D^0) = 45 \text{ meV}$$

$$E_C = 1.5 \text{ meV}$$

$$E_z = 28 \text{ GHz} = 116 \text{ } \mu\text{eV} @ B_0 = 1 \text{ T}$$

$$T_{\text{elec}} = 200 \text{ mK} = 17 \text{ } \mu\text{eV}$$

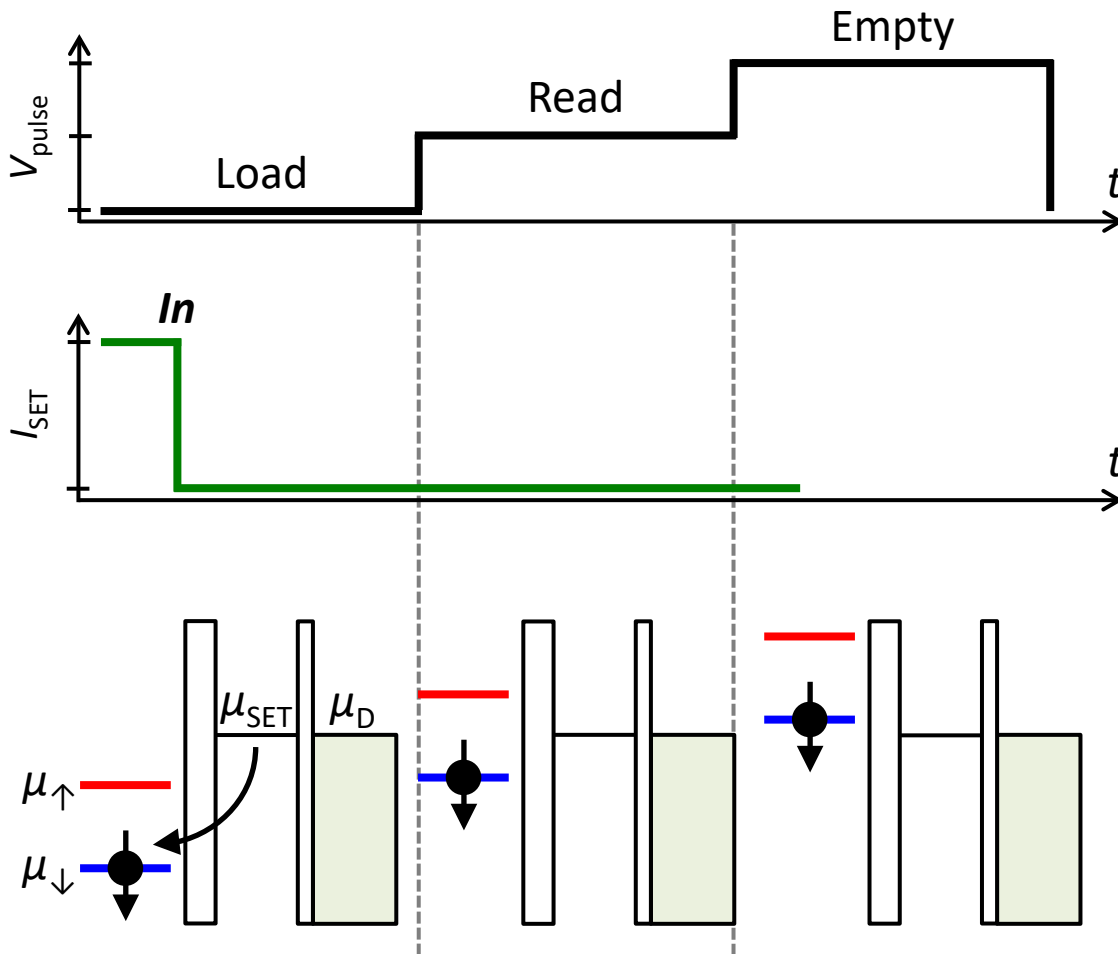
スピン-電荷変換



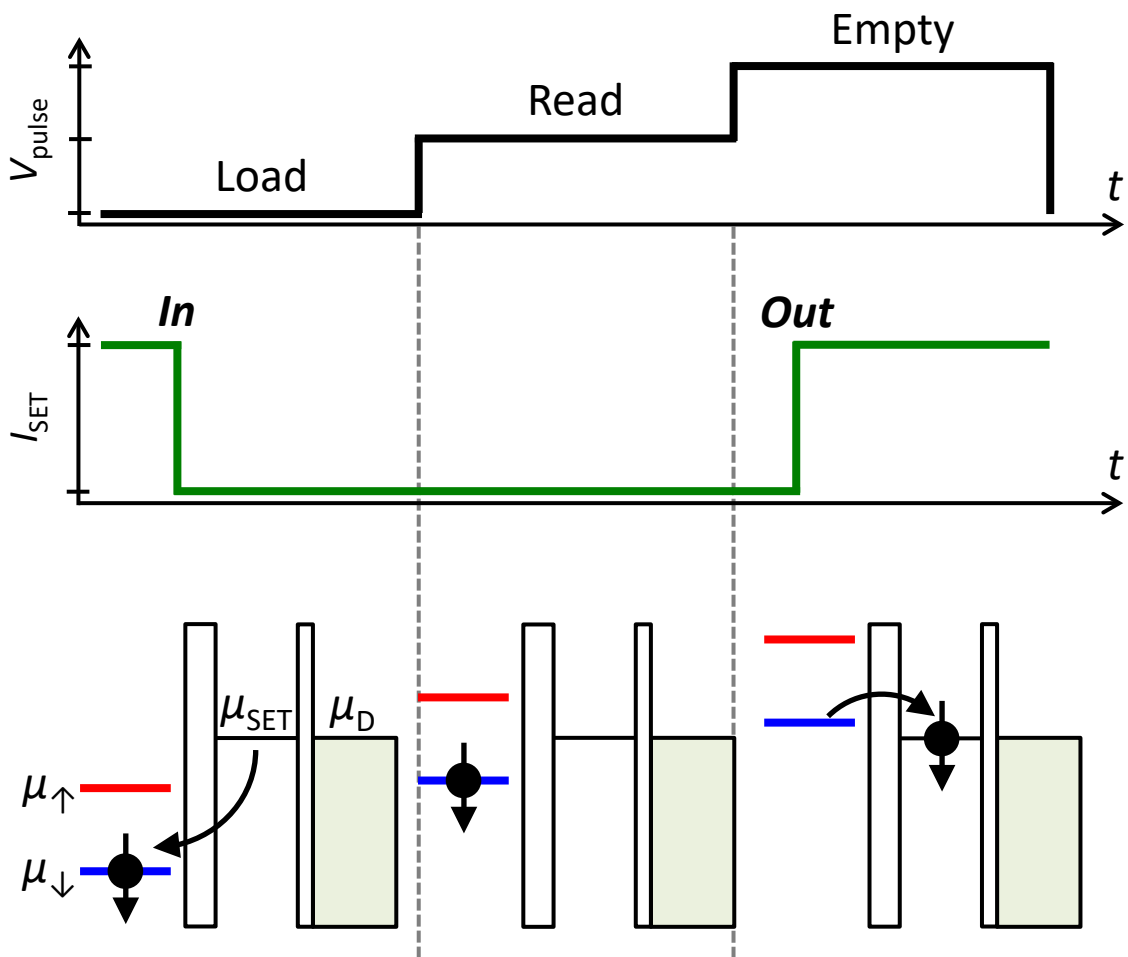
(Review) [Adv. Quant. Technol.](#) **3**, 2000005 (2020) Morello *et al.*

(Review) [Defects in Advanced Electronic Materials and Novel Low Dimensional Structures](#) P.241 (2018) Abe & Itoh

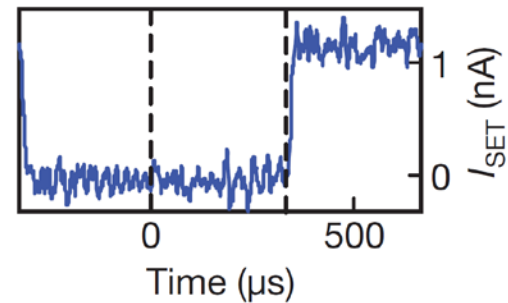
スピン測定(↓)



スピン測定(↓)



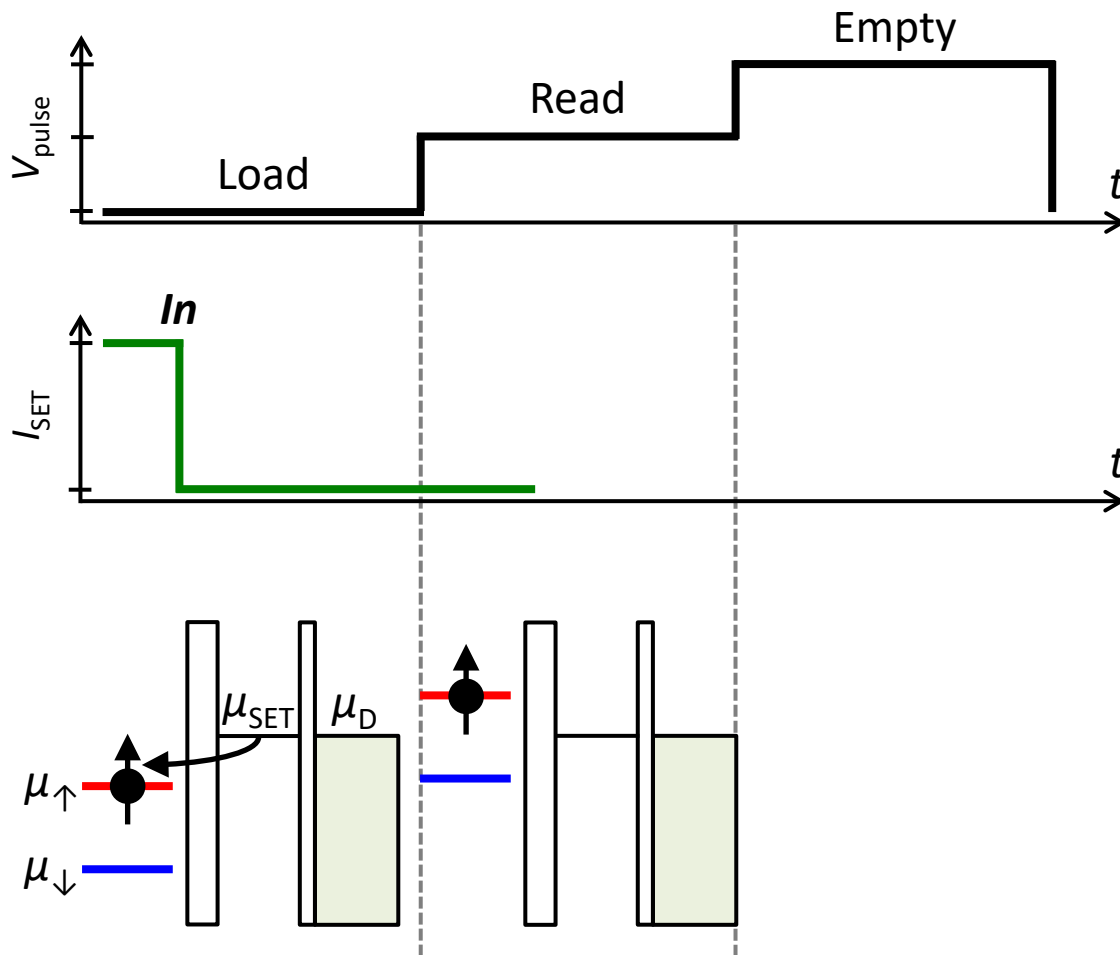
単発単一スピン測定



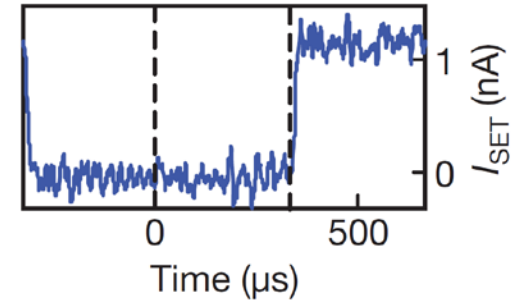
[Nature 467, 687 \(2010\) Morello et al.](#)

(GaAs QD) [Nature 430, 431 \(2004\) Elzerman et al.](#)

スピン測定(↑)



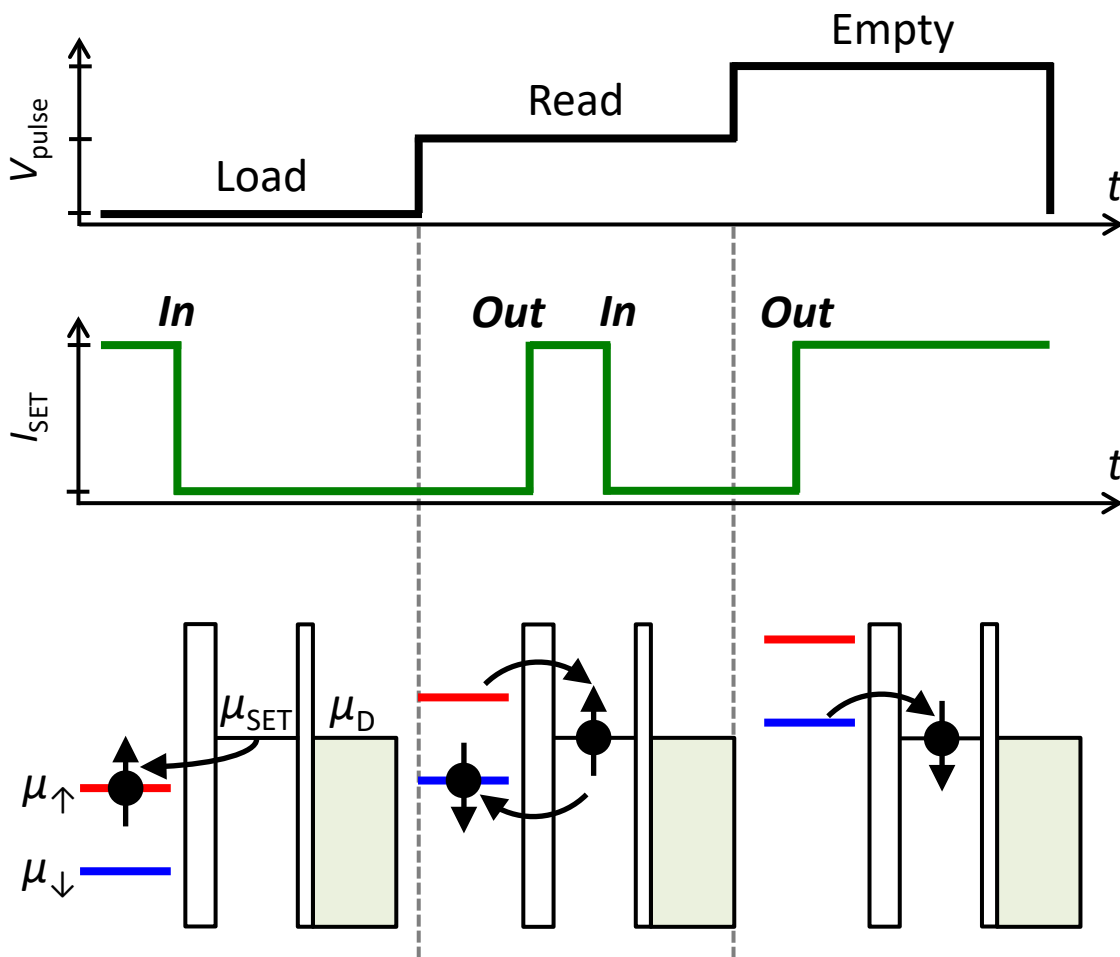
単発単一スピン測定



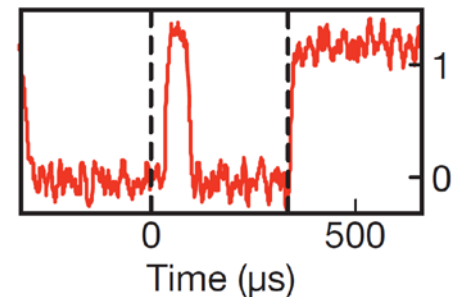
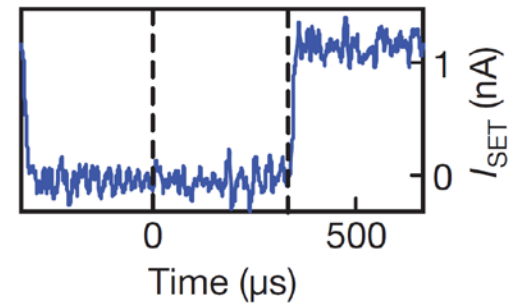
[Nature 467, 687 \(2010\) Morello et al.](#)

(GaAs QD) [Nature 430, 431 \(2004\) Elzerman et al.](#)

スピン測定(↑)



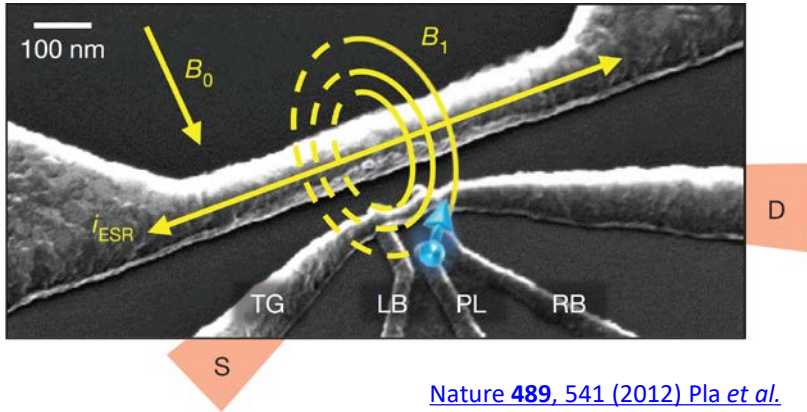
単発単一スピン測定



[Nature 467, 687 \(2010\) Morello et al.](#)

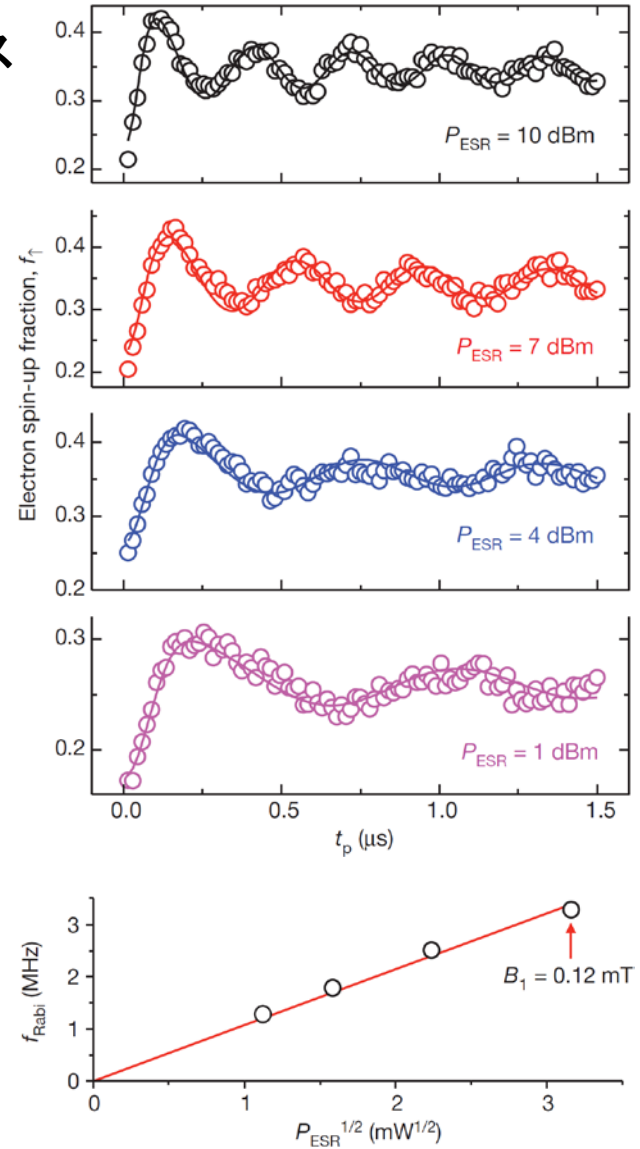
(GaAs QD) [Nature 430, 431 \(2004\) Elzerman et al.](#)

コヒーレント制御: ラビ振動



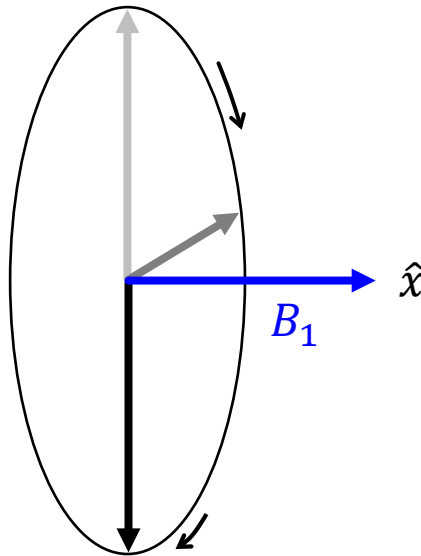
natSiデバイス

[Nature 489, 541 \(2012\) Pla et al.](#)

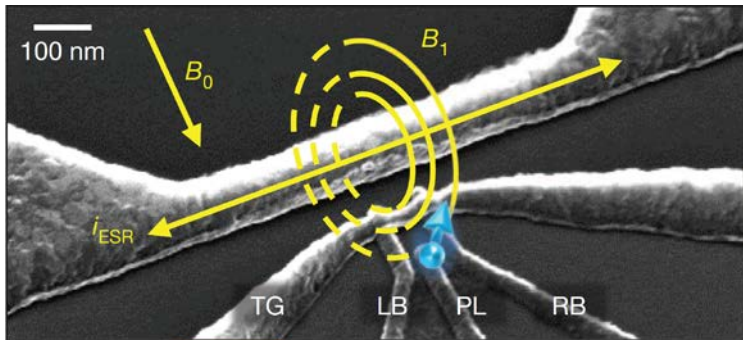


Isidor Rabi
(1898–1988)

©Nobel Foundation



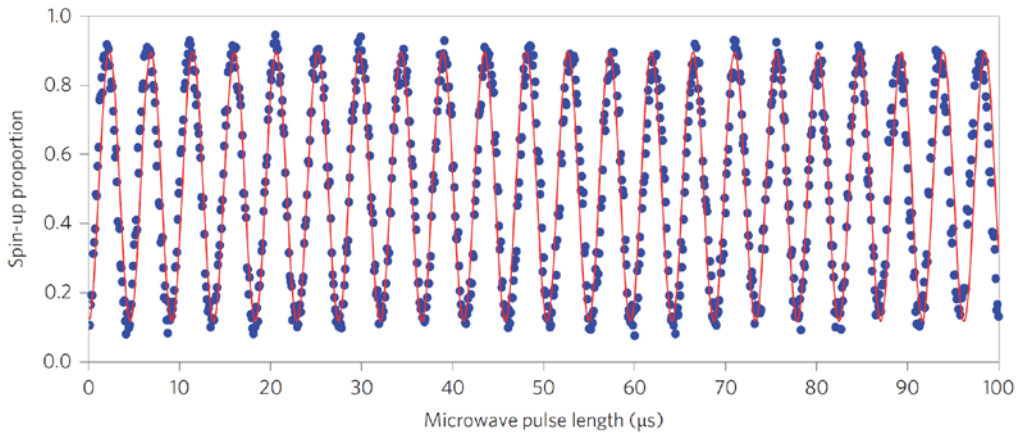
コヒーレント制御: ラビ振動



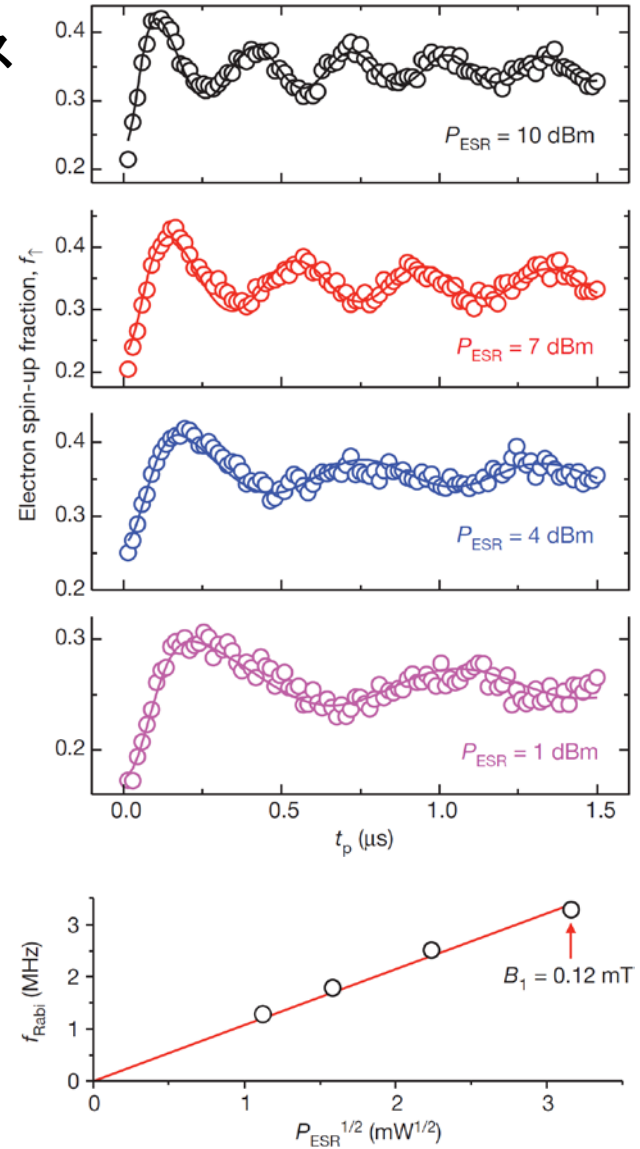
natSiデバイス

[Nature 489, 541 \(2012\) Pla et al.](#)

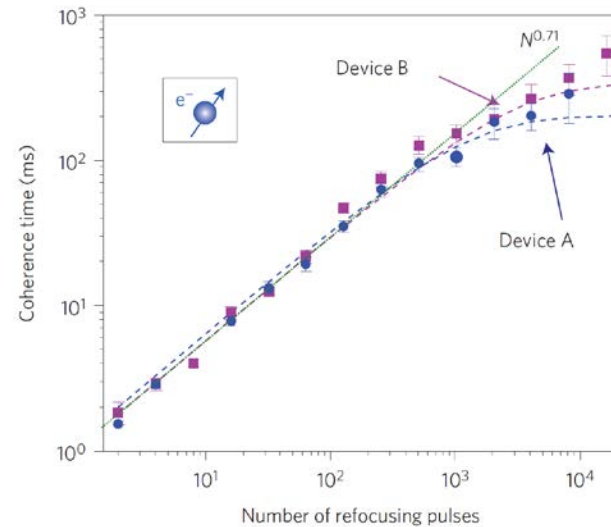
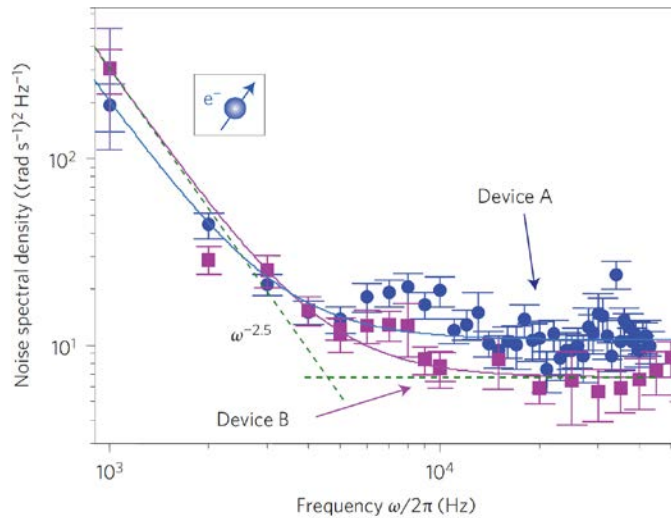
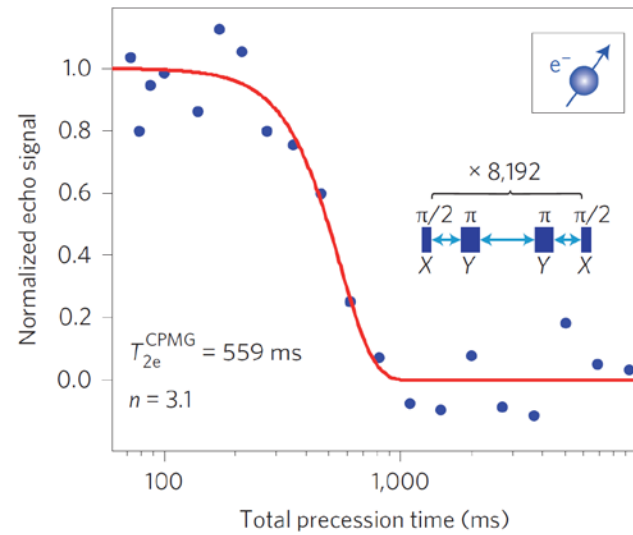
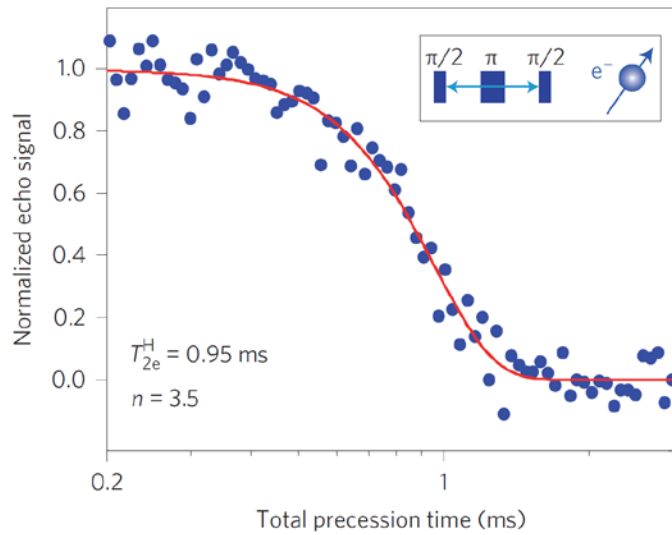
^{28}Si (99.92%)デバイス



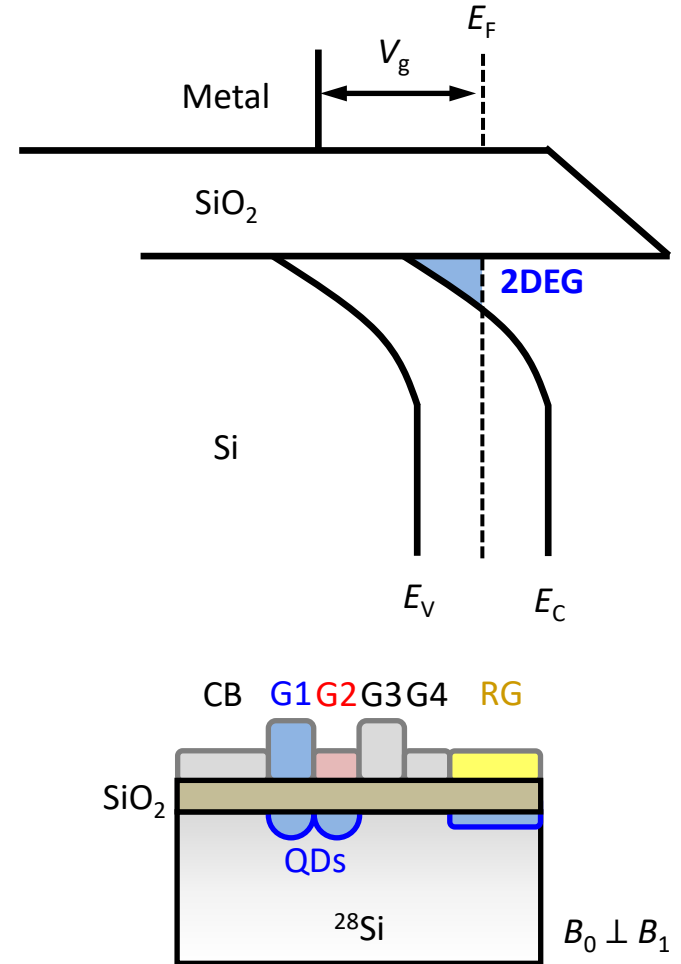
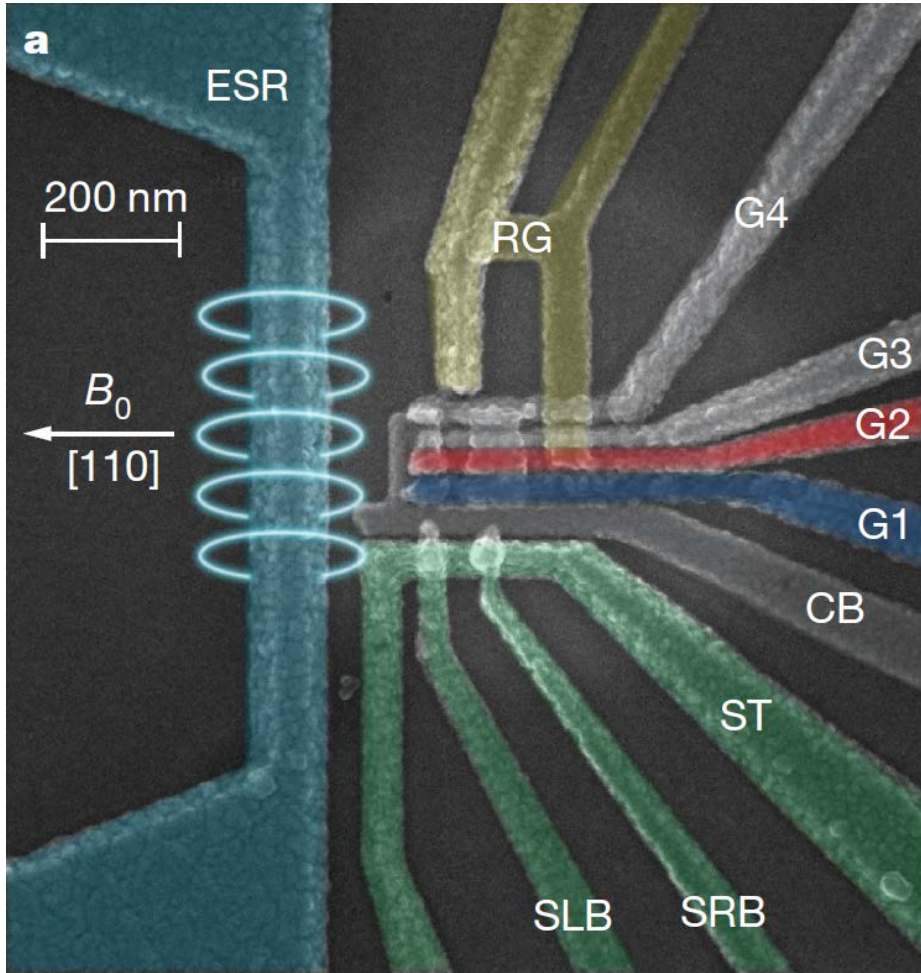
[Nature Nano. 9, 986 \(2014\) Muhonen et al.](#)



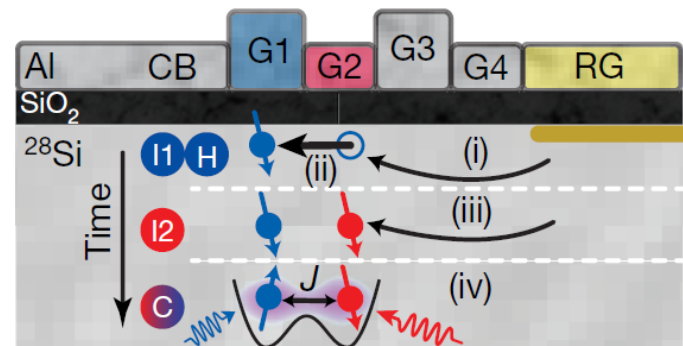
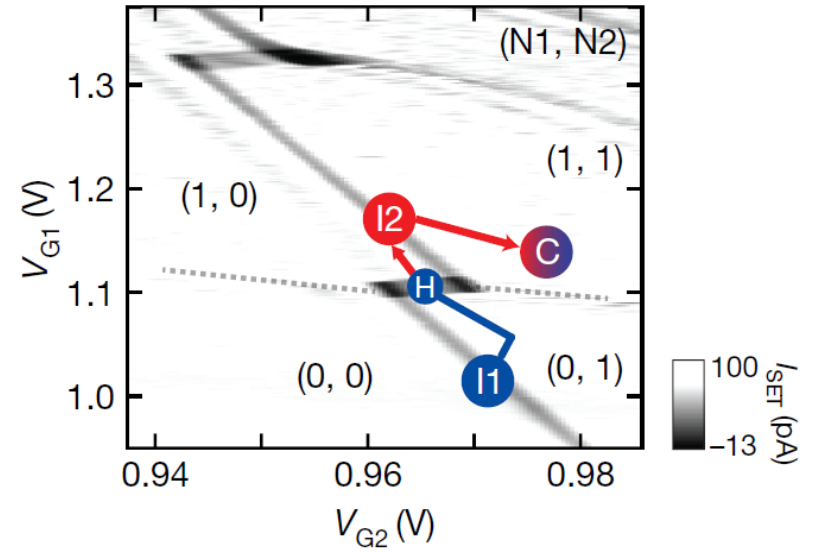
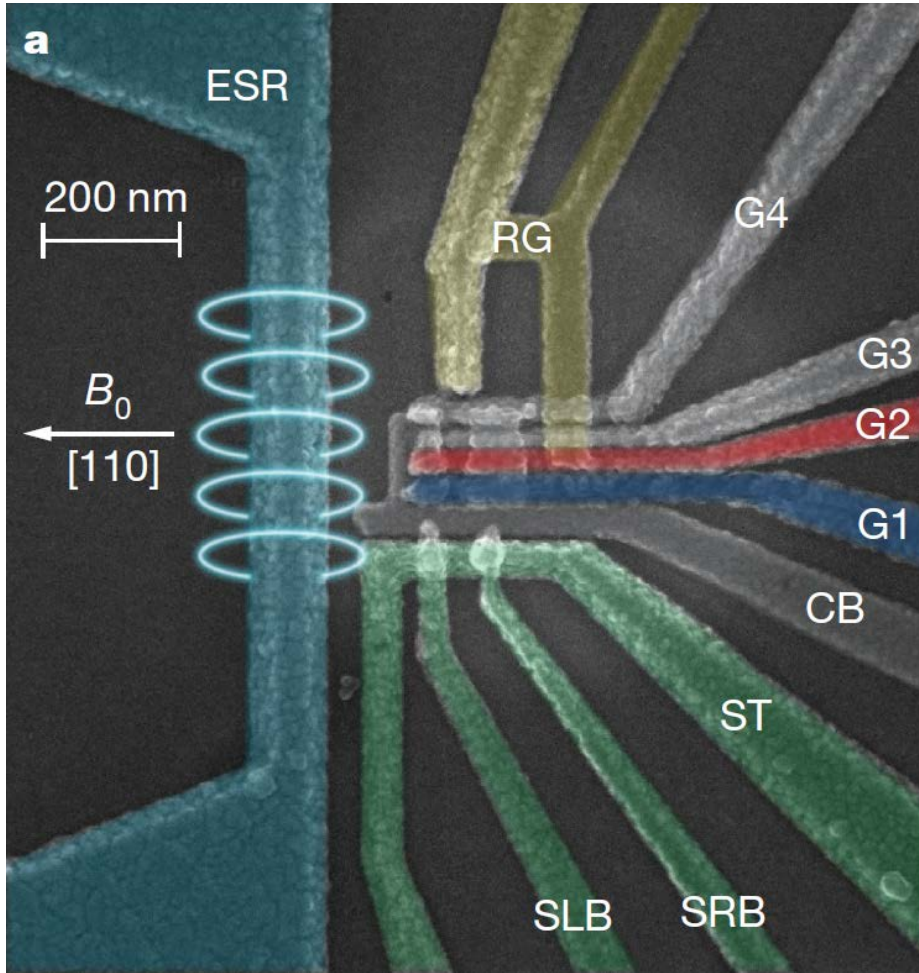
コヒーレンス



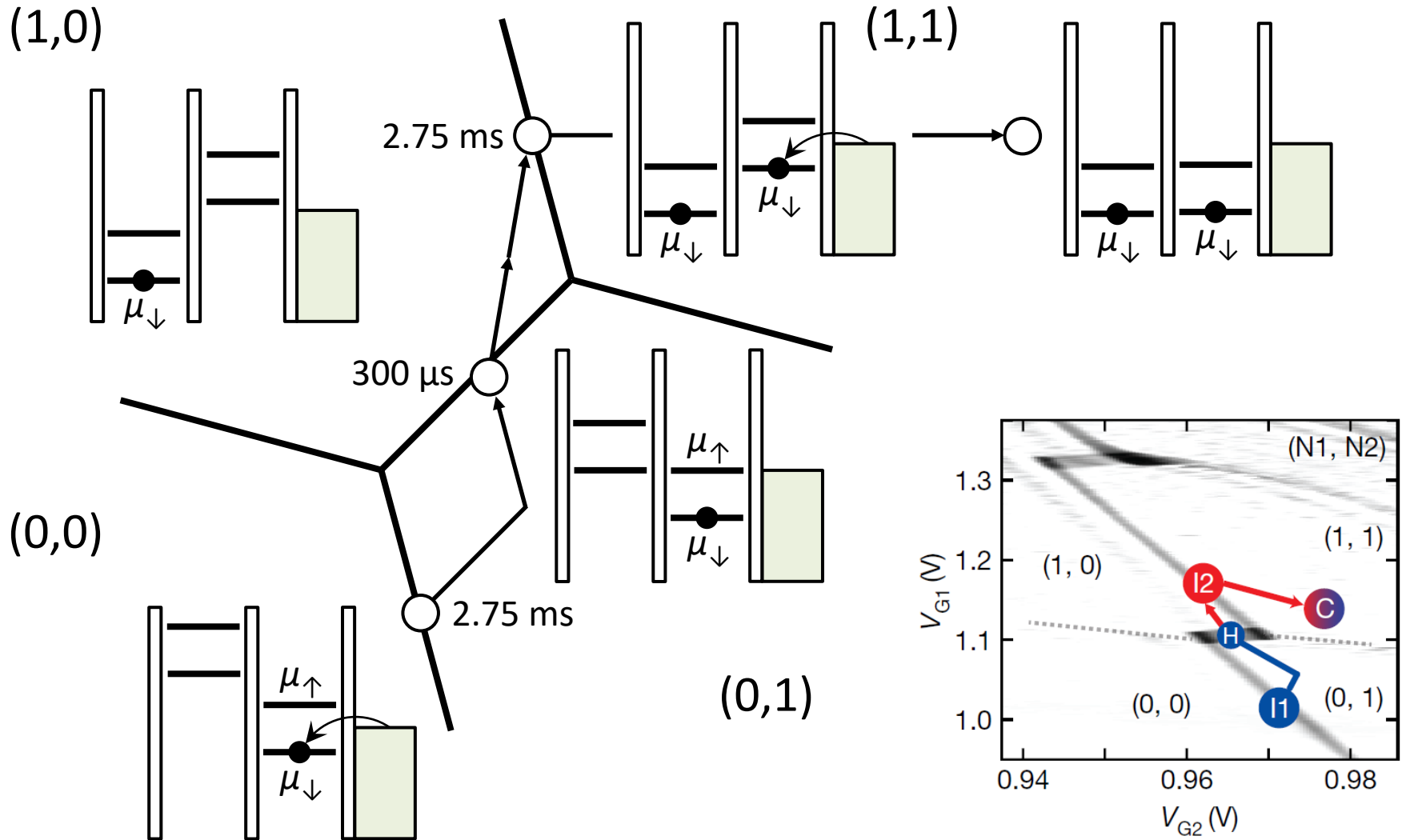
界面MOS構造



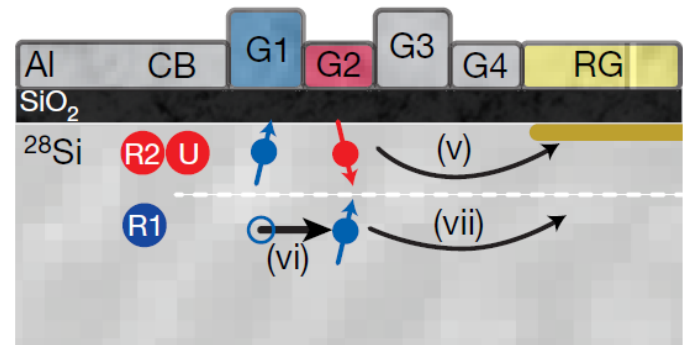
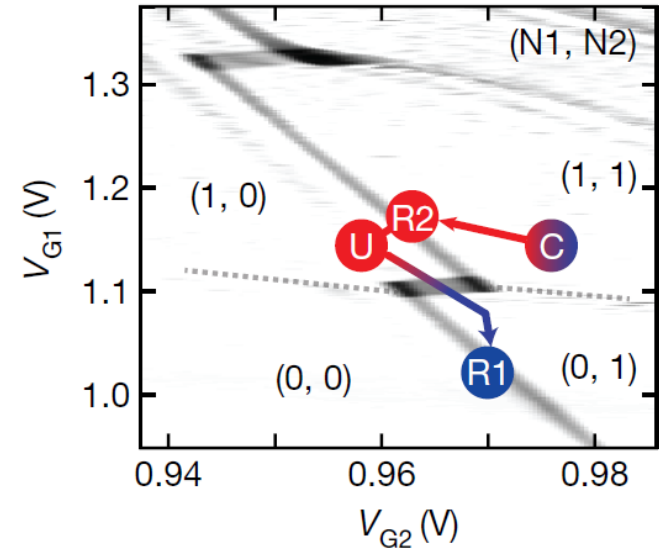
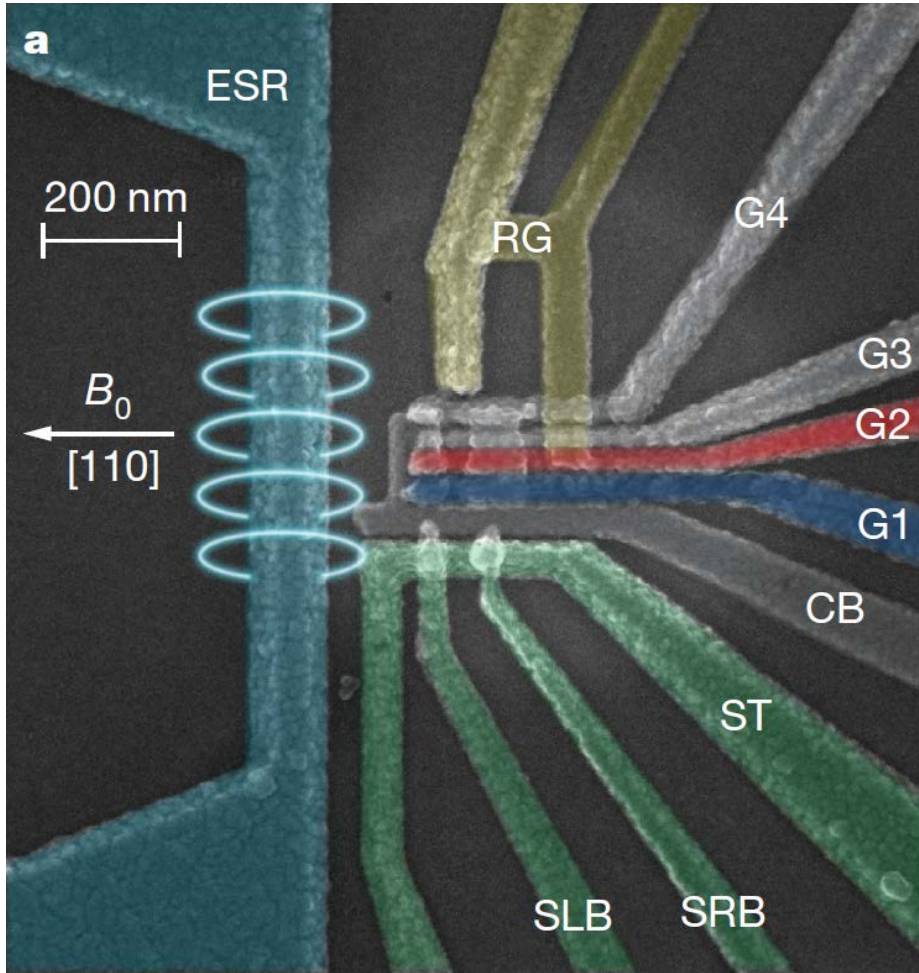
量子ビット操作



初期化

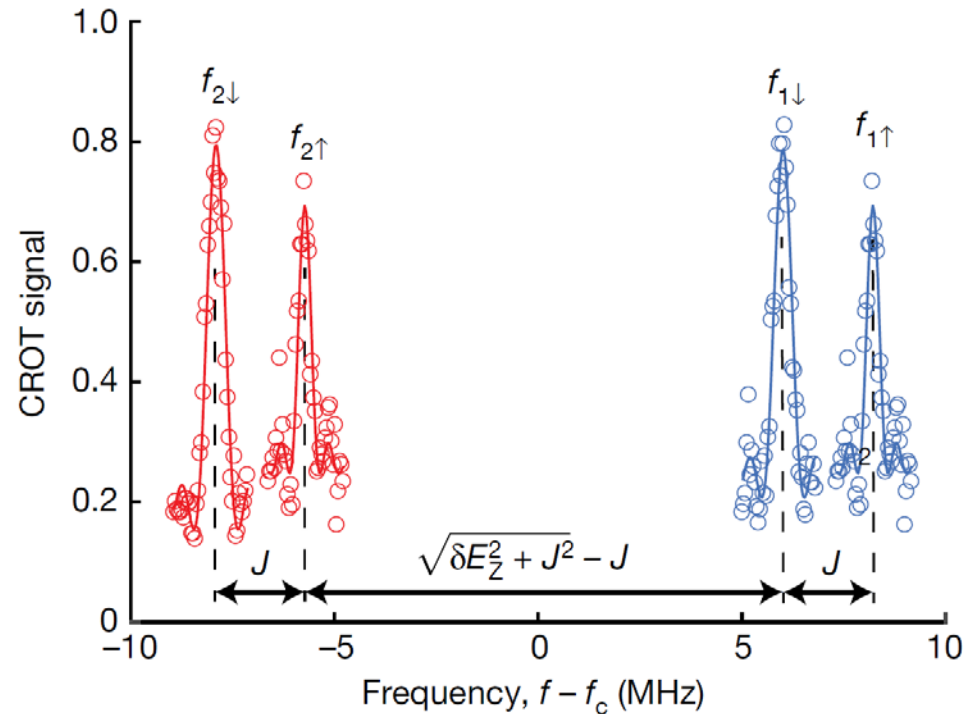
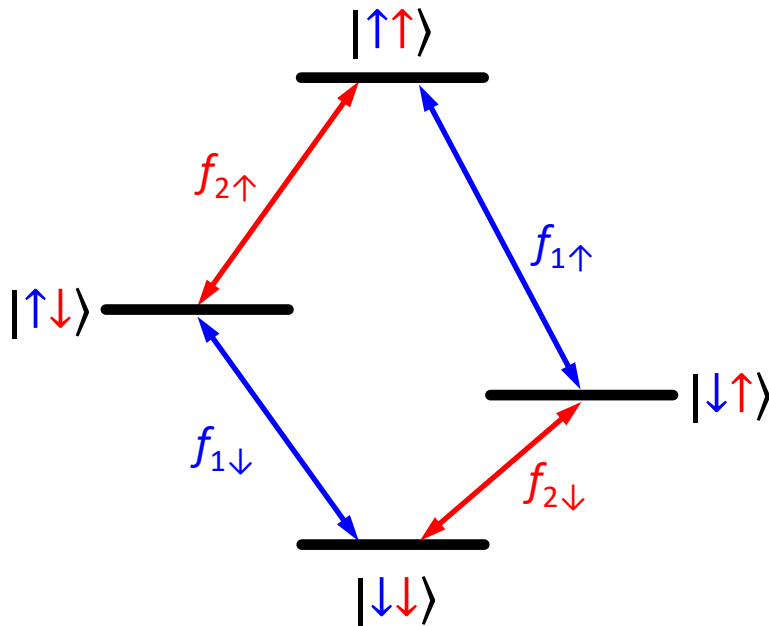


測定



CROTゲート

- 界面スピン軌道効果、シュタルク効果、ドット間交換相互作用(J)
 - 全ての遷移が異なる周波数を持つ
 - 選択励起の π パルスにより2量子ビットゲートが実現可能
 - 1量子ビットゲートには2周波数が必要(J 固定の場合)

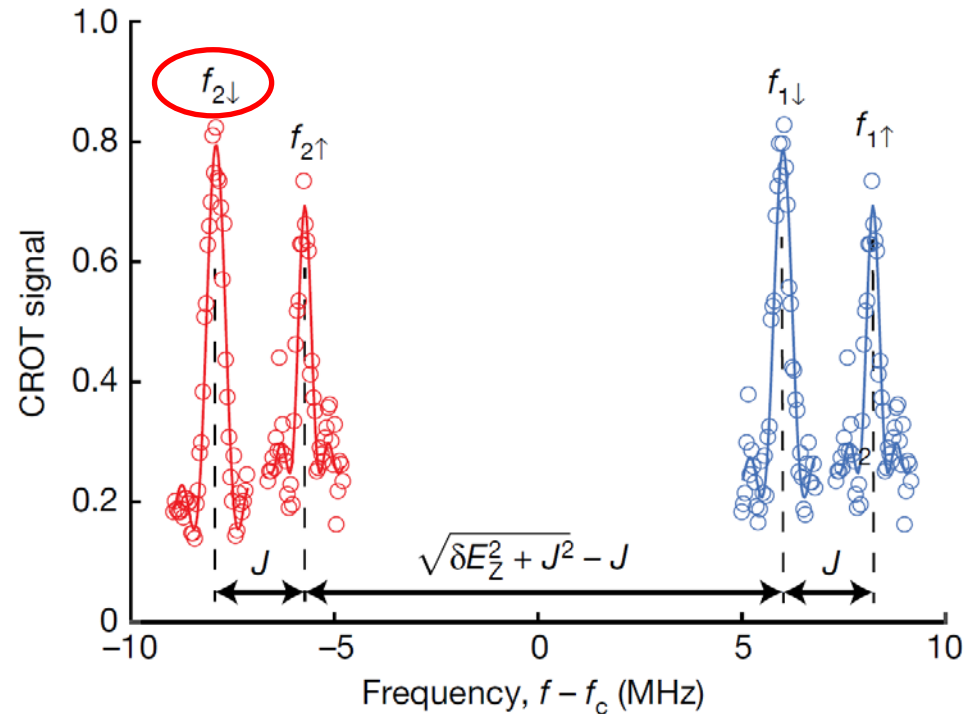
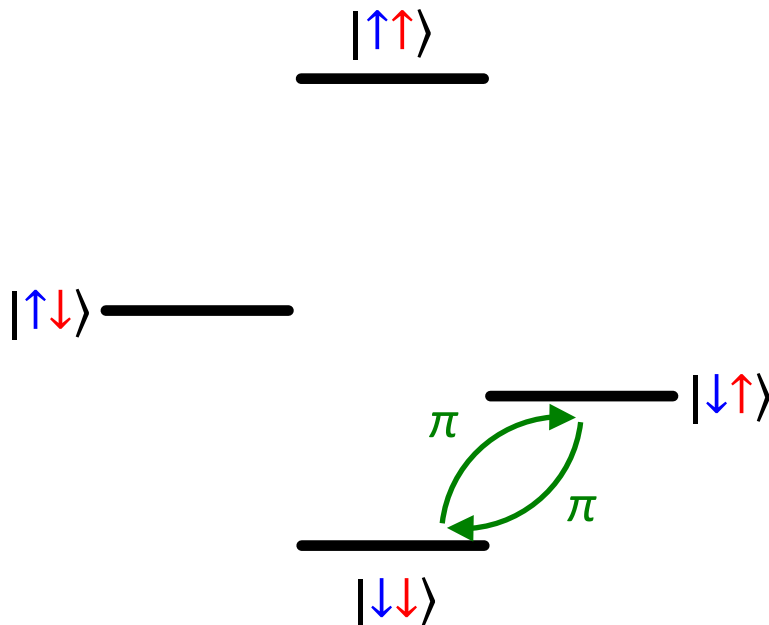


$$\bar{E}_z/h = f_c = 39.33 \text{ GHz} @ B_0 = 1.42 \text{ T}$$

$$\delta E_z/h = 13.26 \text{ MHz} \quad J/h = 1.59 \text{ MHz}$$

CROTゲート

- 界面スピン軌道効果、シュタルク効果、ドット間交換相互作用(J)
 - 全ての遷移が異なる周波数を持つ
 - 選択励起の π パルスにより2量子ビットゲートが実現可能
 - 1量子ビットゲートには2周波数が必要(J 固定の場合)

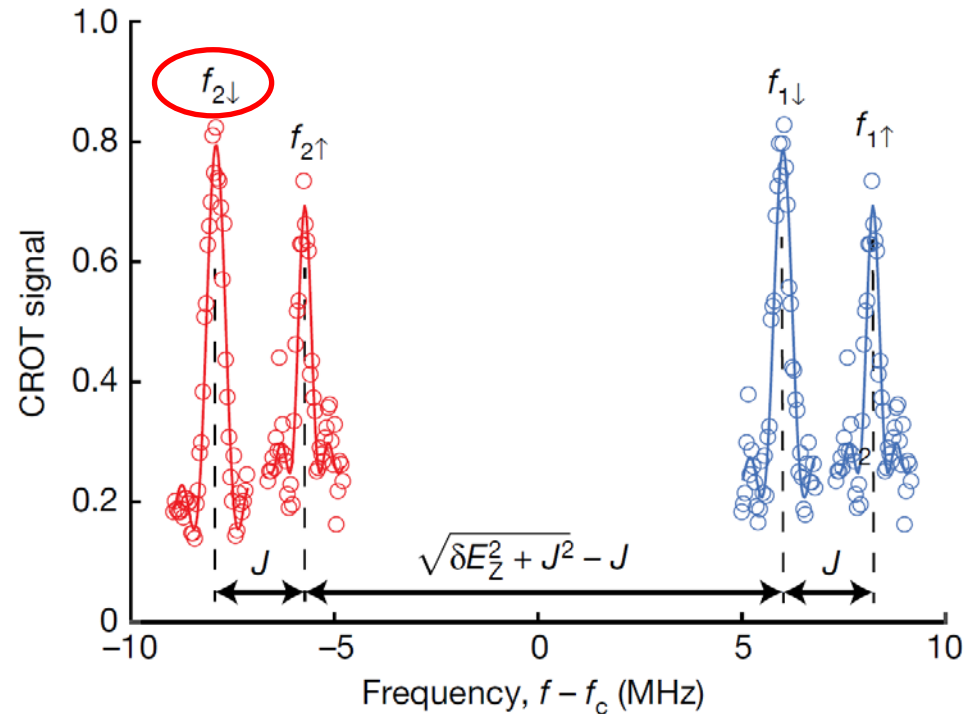
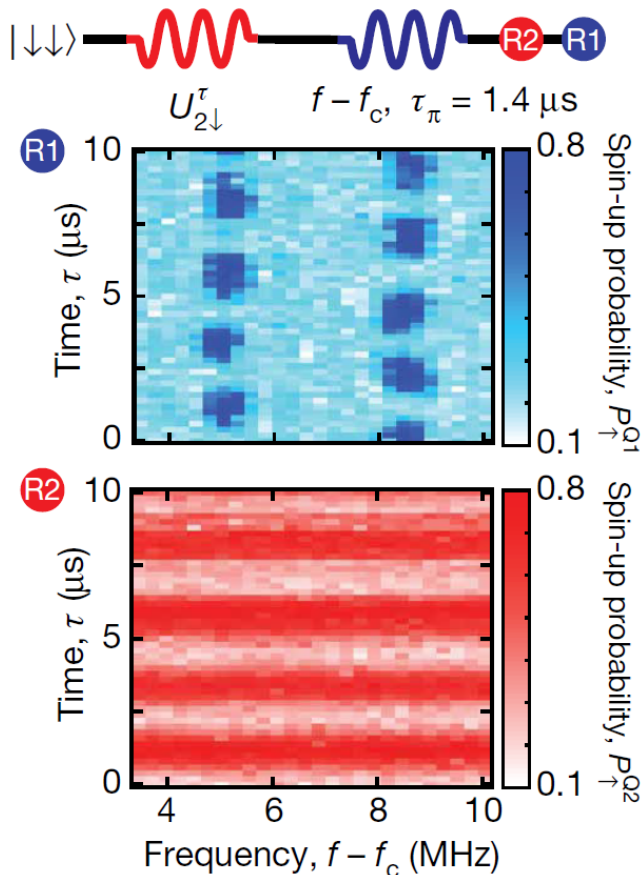


$$\bar{E}_z/h = f_c = 39.33 \text{ GHz} @ B_0 = 1.42 \text{ T}$$

$$\delta E_z/h = 13.26 \text{ MHz} \quad J/h = 1.59 \text{ MHz}$$

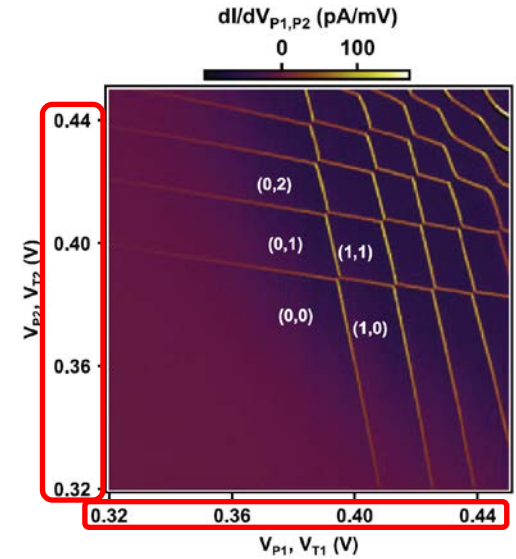
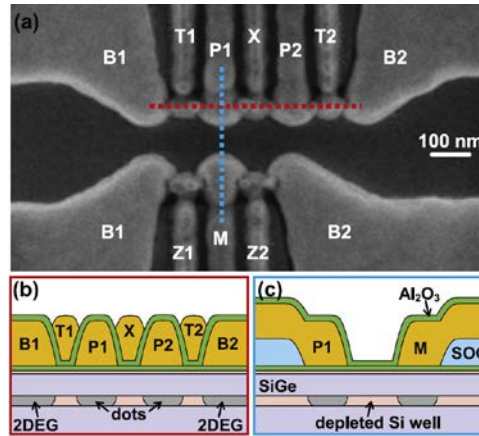
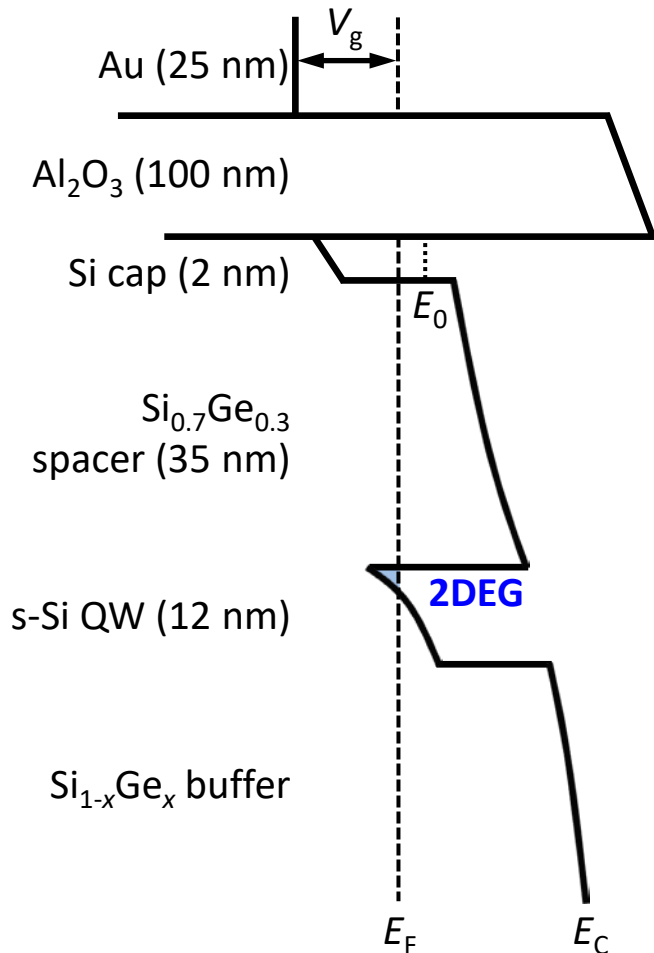
CROTゲート

- 界面スピン軌道効果、シュタルク効果、ドット間交換相互作用(J)
 - 全ての遷移が異なる周波数を持つ
 - 選択励起の π パルスにより2量子ビットゲートが実現可能
 - 1量子ビットゲートには2周波数が必要(J 固定の場合)

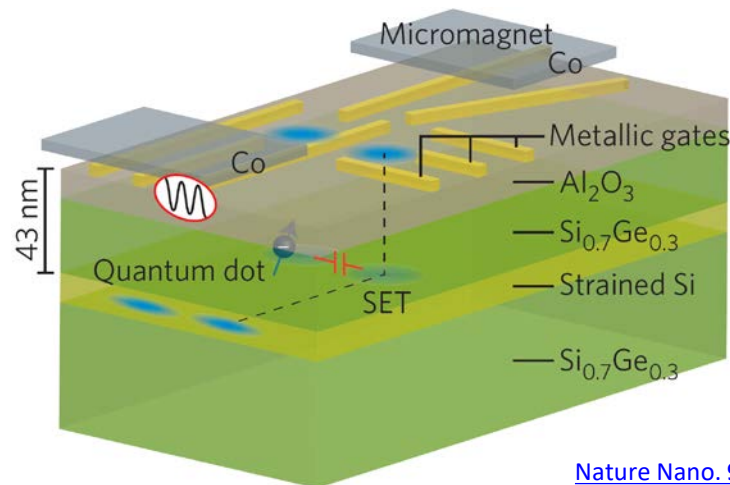


Si/SiGeへテロ構造

ノンドープ構造による蓄積型QD



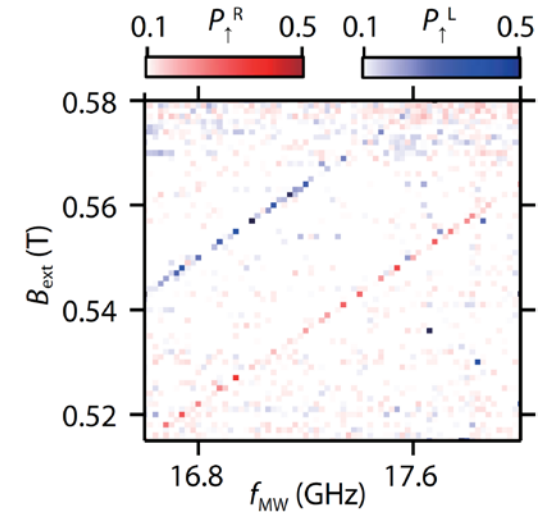
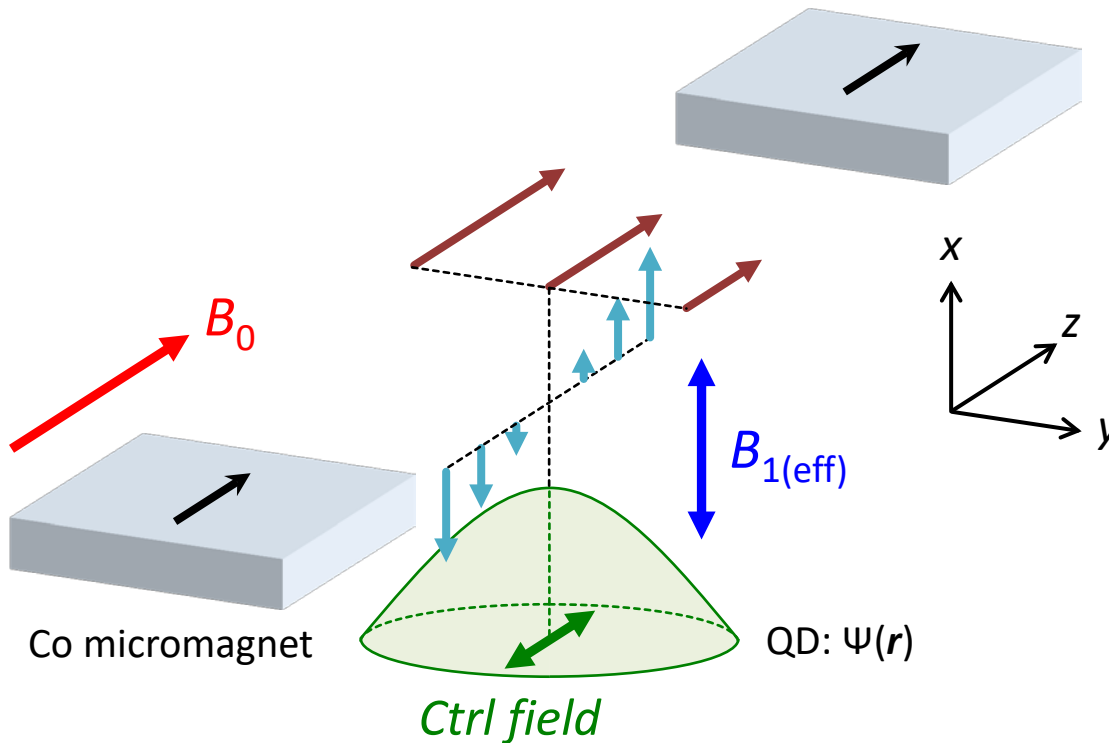
[Nanotechnology 26, 375202 \(2015\) Borselli et al.](#)



[Nature Nano. 9, 966 \(2014\) Schreiber & Bluhm](#)

電気双極子スピン共鳴

- **y方向の磁場勾配**によって共鳴周波数を制御
- **±z方向に電子波動関数を“揺する”**ことで**x方向に実効的な交流磁場**を生成



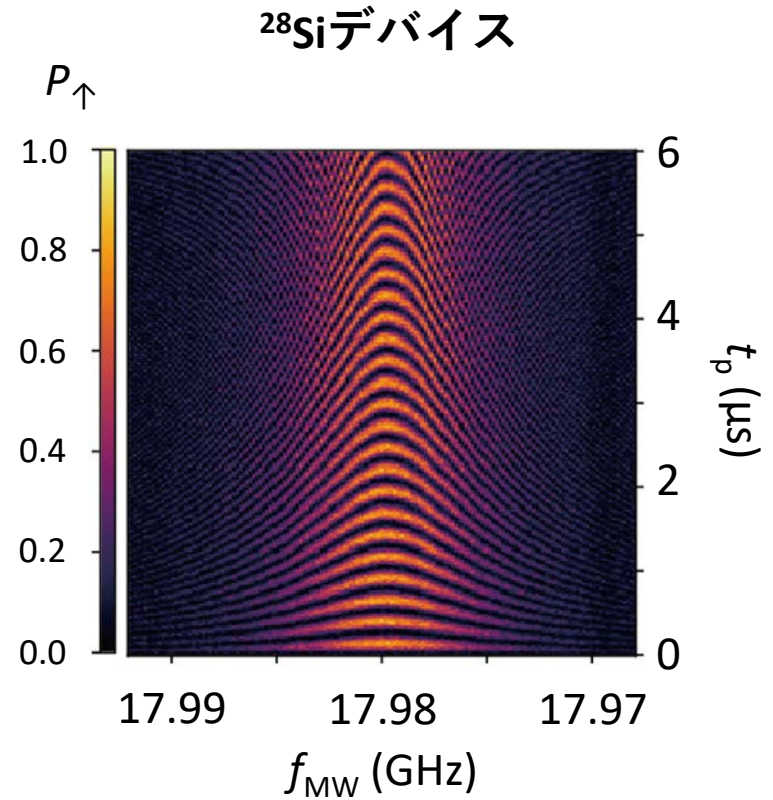
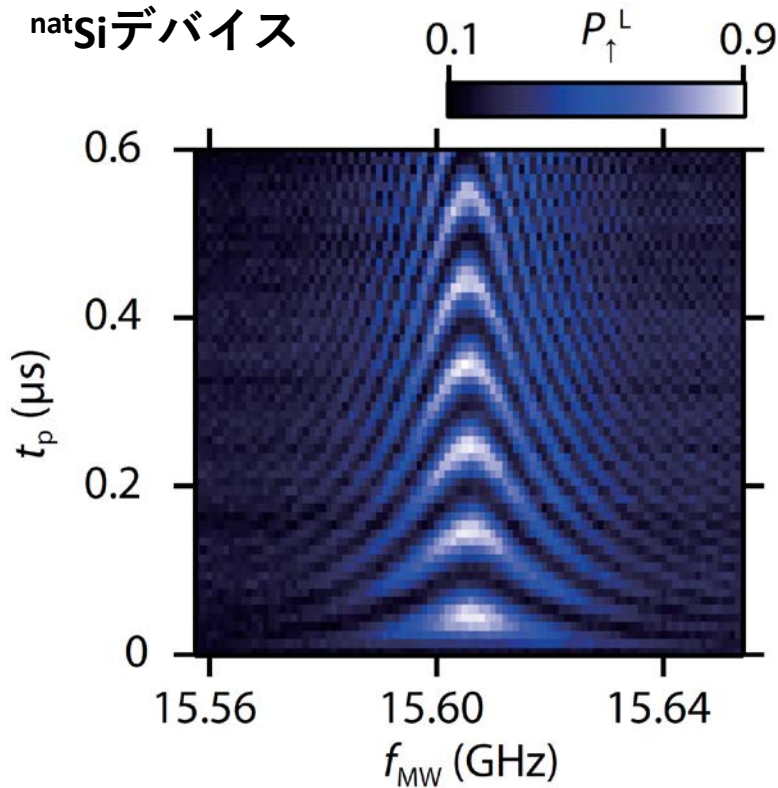
[Sci. Adv. 2, e1600694 \(2016\) Takeda et al.](#)

(Theory) [Phys. Rev. Lett. 96, 047202 \(2006\) Tokura et al.](#)

(GaAs QD) [Nature Phys. 4, 776 \(2008\) Pioro-Ladrière et al.](#)

(Magnet design) [Appl. Phys. Express 8, 084401 \(2015\) Yoneda et al.](#)

電気双極子スピン共鳴



- ラビ周波数 $f_R \approx 30$ MHz
- フィデリティ $F^{\text{RB}} = 99.6\% \rightarrow > 99.9\%$
- $T_2^* = 2 \mu\text{s} \rightarrow 20 \mu\text{s}$, $T_2^{\text{CPMG}} = 3.1$ ms

(Review) [Physics Today](#) **72**, (8) 38 (2019) Vandersypen & Eriksson

(2-Qubit) [Science](#) **359**, 439 (2018) Zajac *et al.* [Nature](#) **555**, 633 (2018) Watson *et al.*

(Singlet-triplet) [Phys. Rev. Lett.](#) **124**, 117701 (2020) Takeda *et al.*

See also [Nature Nano.](#) **9**, 666 (2014) Kawakami *et al.* [PNAS](#) **113**, 11738 (2016) Kawakami *et al.*

[Nature Nano.](#) **13**, 102 (2018) Yoneda *et al.*

[Sci. Adv.](#) **2**, e1600694 (2016) Takeda *et al.*

シリコンスピン量子ビットの現状

物理系	1量子ビット	2量子ビット	多量子ビット化
単一ドナー	$T_{2e}^{\text{CPMG}} = 559 \text{ ms}$ $T_{2n+}^{\text{CPMG}} = 35.6 \text{ s}$ $F_{2n+} = 99.99\% (*1)$	cf. $F_{ZZ, \sqrt{S}} = 90\% (*4)$ cf. $F^{\text{Bell}(e-n)} = 97\% (*5)$	“フリップフロップ” 量子ビット (*8)
MOS量子ドット	$T_2^{\text{CPMG}} = 28 \text{ ms}$ $F^{\text{RB}} = 99.6\% (*2)$	$F^{\text{Bell}} = 89\%$ $F^{\text{RB}} = 98\% (*6)$	CMOS/DRAM技術 との融合 (*9,10)
Si/SiGe量子ドット	$T_2^{\text{CPMG}} = 3.1 \text{ ms}$ $F^{\text{RB}} > 99.9\% (*3)$	$F^{\text{Bell}} = 89\% (*7)$	スピン-MW光子結合 による回路QED (*11-14)

CPMG: Carr-Purcell-Meboom-Gill
[Phys. Rev. **94**, 630 \(1954\) Carr & Purcell](#)
[Rev. Sci. Instrum. **29**, 6881 \(1958\) Meiboom & Gill](#)

RB: Randomized Benchmarking
[J. Opt. B **7**, S347 \(2005\) Emerson et al.](#)

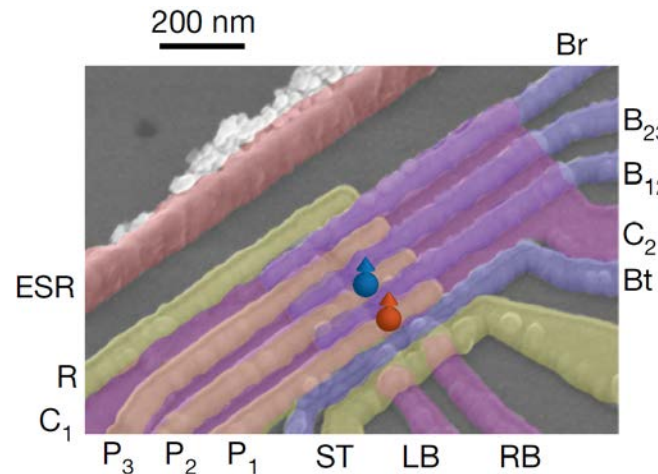
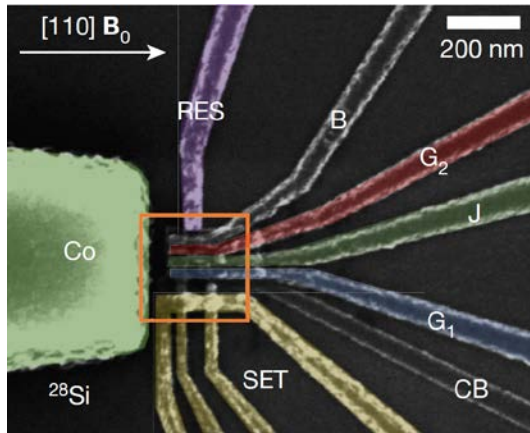
*1: [Nature Nano. **9**, 986 \(2014\) Muhonen et al.](#)
 *2: [Nature Nano. **9**, 981 \(2014\) Veldhorst et al.](#)
 *3: [Nature Nano. **13**, 102 \(2018\) Yoneda et al.](#)
 *4: [Nature **571**, 371 \(2019\) He et al.](#) (donor QDs)
 *5: [Nature Nano. **11**, 242 \(2016\) Dehollain et al.](#)
 *6: [Nature **569**, 532 \(2019\) Huang et al.](#)
 *7: [Nature **555**, 633 \(2018\) Watson et al.](#)

*8: [Nature Commun. **8**, 450 \(2017\) Tosi et al.](#)
 *9: [Nature Commun. **8**, 1766 \(2017\) Veldhorst et al.](#)
 *10: [Sci. Adv. **4**, eaar3960 \(2018\) Li et al.](#)
 *11: [Nature **555**, 599 \(2018\) Mi et al.](#)
 *12: [Science **359**, 1123 \(2018\) Samkharadze et al.](#)
 *13: [Nature **560**, 179 \(2018\) Landig et al.](#)
 *14: [Nature **577**, 195 \(2020\) Borjans et al.](#)

高温動作(> 1 K)

初期化・測定にリザバを用いない → パウリ閉塞(パリティ測定)

[Science 297, 1313 \(2002\) Ono et al.](#)



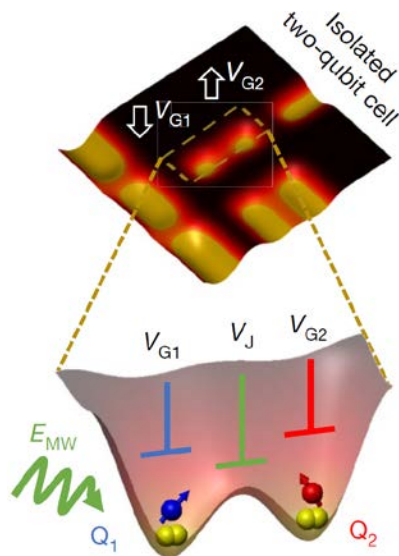
[Nature 580, 355 \(2020\) Petit et al.](#)

@1.1K, $B_0 = 0.25$ T

$T_2^* = 2.7$ μ s

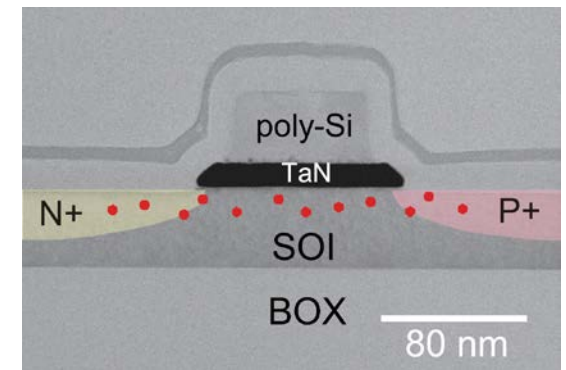
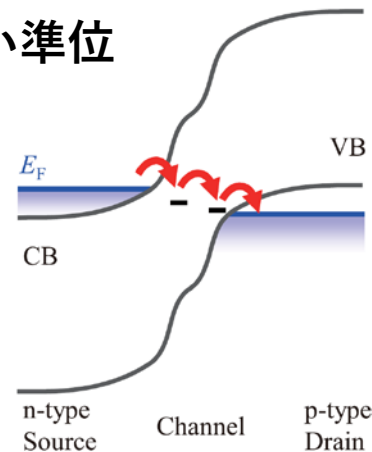
$F_{1\text{-Qubit Clifford}} = 99.3\%$

$F_{2\text{-Qubit Clifford}} = 86.1\%$



[Nature 580, 350 \(2020\) Yang et al.](#)

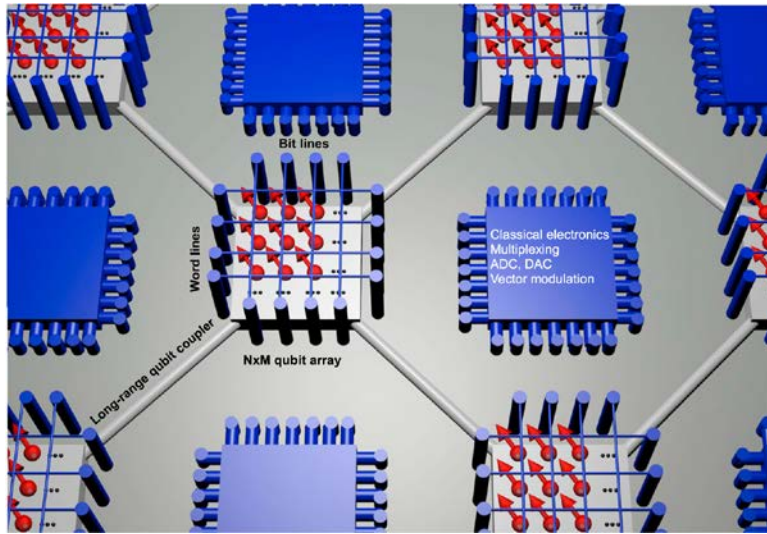
深い準位



[Sci. Rep. 9, 469 \(2019\) Ono et al.](#)

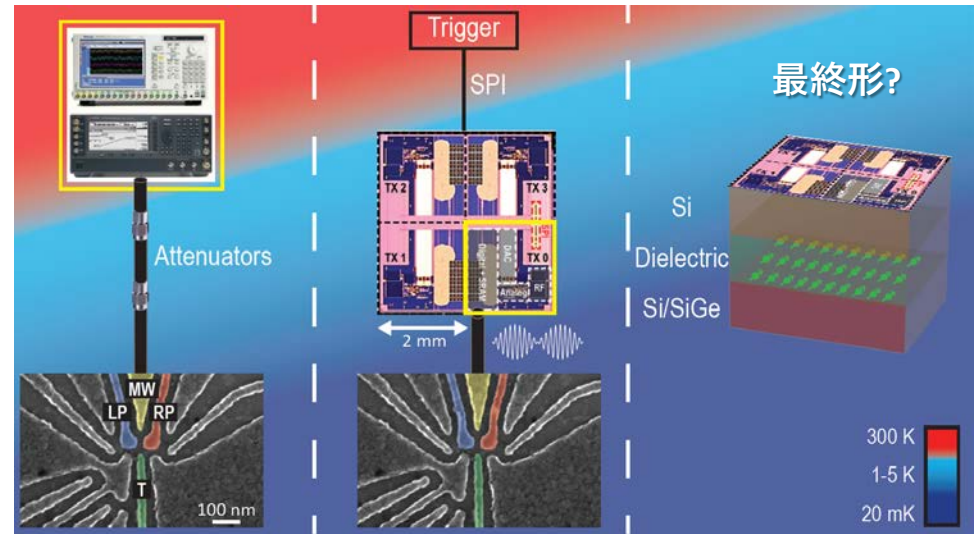
低温回路技術

arXiv:2011.01480 Bardin *et al.* "Microwaves in Quantum Computing"

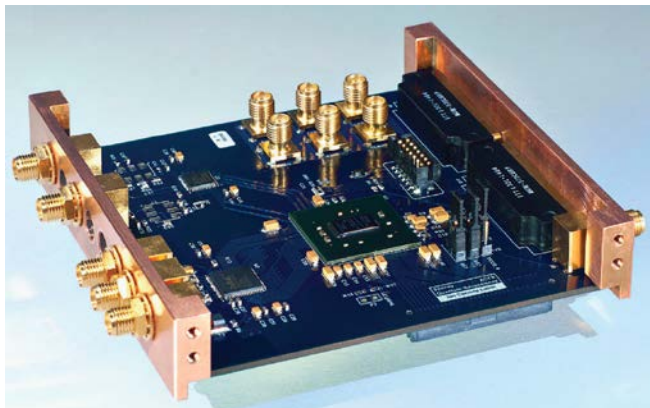


(Review) [npj Quant. Info. 3, 34 \(2017\) Vandersypen *et al.*](#)

[Quantum Sci. Technol. 5, 015004 \(2020\) Geck *et al.*](#)

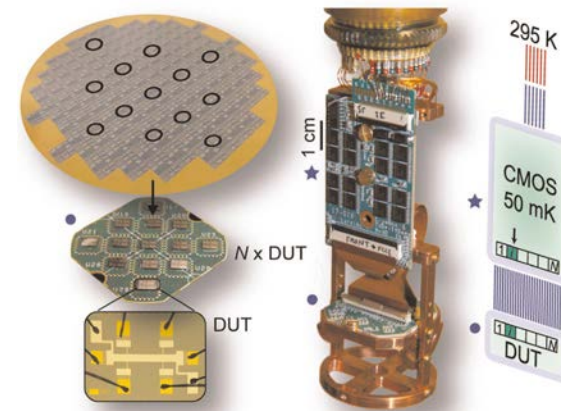


(Cryogenic-CMOS-based qubit control) [arXiv:2009.14185 Xue *et al.*](#)



(Review) [npj Quant. Info. 1, 15011 \(2015\) Reilly](#)

(Cryogenic FPGA) [Rev. Sci. Instrum. 87, 014701 \(2016\) Conway Lamb *et al.*](#)

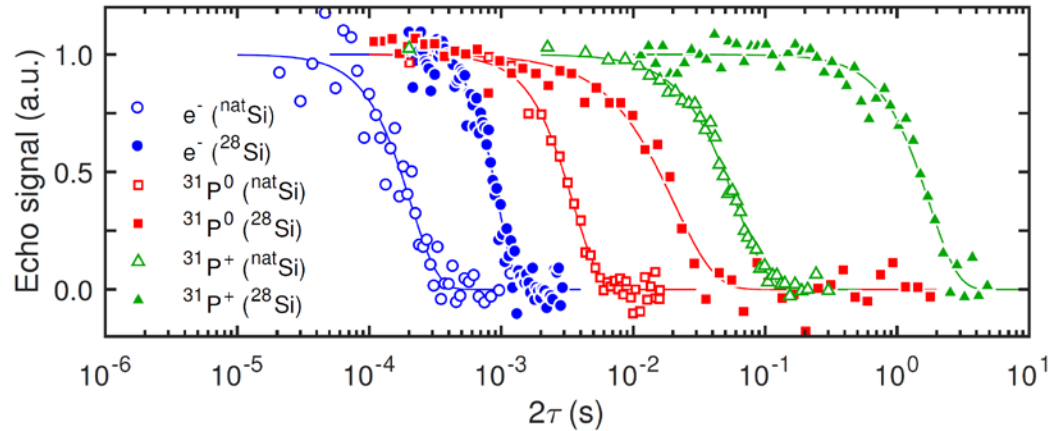


(Cryogenic MUX) [npj Quant. Info. 6, 43 \(2020\) Paquelet Wuetz *et al.*](#)

[Phys. Rev. Appl. 13, 054072 \(2020\) Pauka *et al.*](#)

... and more

^{31}P ドナー核スピン



[Defects in Advanced Electronic Materials and Novel Low Dimensional Structures P.241 \(2018\) Abe & Itoh](#)

[Nature 489, 541 \(2012\) Pla et al.](#) [Nature 496, 334 \(2013\) Pla et al.](#) [Nature Nano. 9, 986 \(2014\) Muhonen et al.](#)

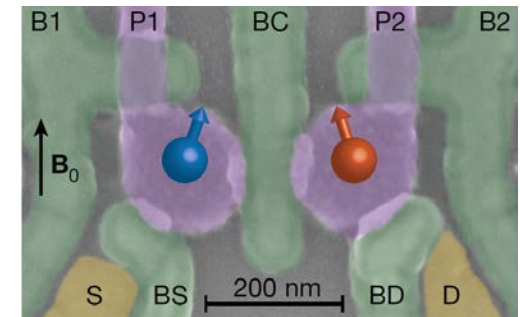
ゲルマニウム量子ドット

(Review) [Nature Rev. Mater. \(2020\) Scappucci et al.](#)

[arXiv:2009.04268 Hendrickx et al.](#)

[Nature Commun. 11, 3478 \(2020\) Hendrickx et al.](#)

[Nature 577, 487 \(2020\) Hendrickx et al.](#)



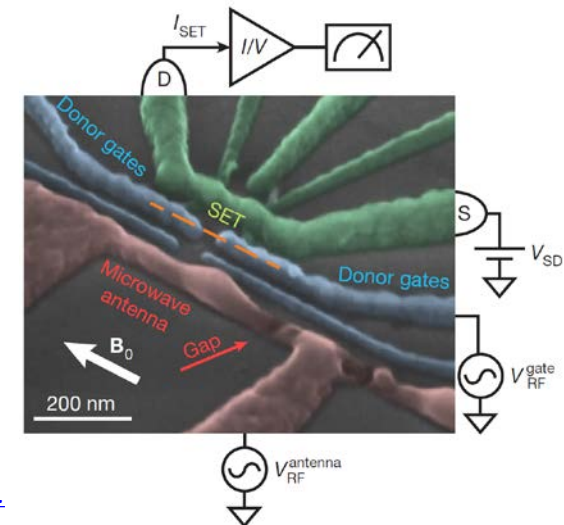
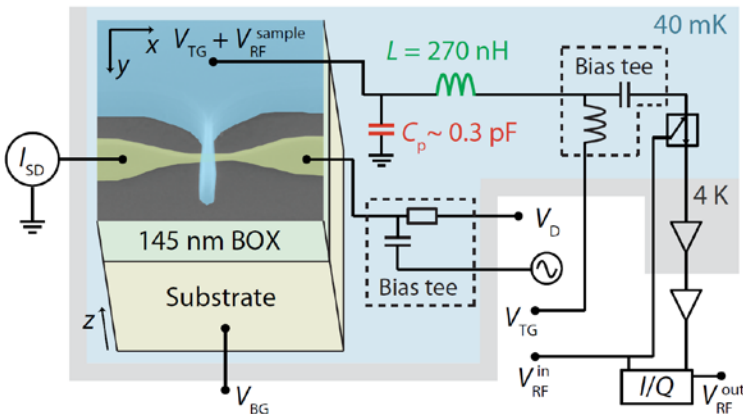
アクセプター

[Sci. Adv. 4, eaat9199 \(2018\) van der Heijden et al.](#)

[Nature Mater. 20, 38 \(2021\) Kobayashi et al.](#)

^{121}Sb ドナー核スピン

[Nature 579, 205 \(2020\) Asaad et al.](#)



講義内容

- 磁気共鳴の基礎
 - 磁気共鳴と1量子ビット操作
 - T_1 と T_2 (シリコン中のリンドナーの例)
- 各論
 - シリコンスピン量子ビット
 - ✓ 単一リンドナー
 - ✓ MOS量子ドット
 - ✓ Si/SiGe量子ドット
 - ✓ ... and more
 - 光学活性スピン量子ビット
 - ✓ InAs自己形成量子ドット
 - ✓ ダイヤモンド中のNV⁻中心
 - ✓ ダイヤモンド中のSiV⁻中心
 - ✓ ... and more

光学活性スピン量子ビット

物理系	コヒーレンス	光学特性	ナノフォトニクス
InAs自己形成量子ドット	$T_2^{\text{Hahn}} \approx 3 \mu\text{s}$ (*1) cf. $^{113/115}\text{In}(I = 9/2)$, $^{69/71}\text{Ga}$, $^{75}\text{As}(I = 3/2)$	$\lambda_{\text{ZPL}} = 900\text{--}1000 \text{ nm}$ DW > 0.95 QE ≈ 1	微細加工技術は成熟しているが、QDの位置・サイズ制御に課題 (*6)
ダイヤモンド中のNV-中心	$T_2^{\text{Hahn}} = 1.8\text{--}2.4 \text{ ms@RT}$, $^{13}\text{C}(I = 1/2) \leq 0.5\%$ (*2,3) $T_2^{\text{Decoupling}} = 0.97 \text{ s}$ @3.7 K, $^{13}\text{C} = 1.1\%$ (*4)	$\lambda_{\text{ZPL}} = 637 \text{ nm}$ DW ≈ 0.04 QE > 0.8	ダイヤモンドへの微細加工技術は発展途上 (*7)
ダイヤモンド中のSiV-中心	$T_2^{\text{CPMG}} = 13 \text{ ms}$ @100 mK (*5)	$\lambda_{\text{ZPL}} = 737 \text{ nm}$ DW > 0.7 QE ≈ 0.1 + 低スペクトル分散	単一イオン注入で量子ビット位置制御できる可能性(リンドナーとも共通点 *8)

λ_{ZPL} : Zero-phonon line emission wavelength

DW: Debye-Waller factor (Emission fraction into ZPL)

QE: Quantum efficiency (Radiative decay rate over the total decay rate)

*1: [Nature Photon. 4, 367 \(2010\) Press et al.](#)

*2: [Nature Mater. 8, 383 \(2009\) Balasubramanian et al.](#)

*3: [Nature Commun. 10, 3766 \(2019\) Herbschleb et al.](#)

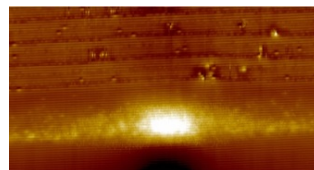
*4: [Nature Commun. 9, 2552 \(2018\) Abobeih et al.](#)

*5: [Phys. Rev. Lett. 119, 223602 \(2017\) Sukachev et al.](#)

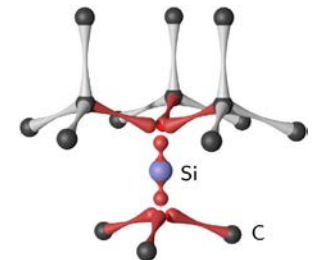
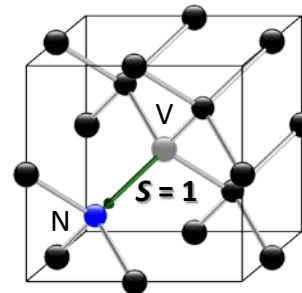
*6: [Rev. Mod. Phys. 87, 347 \(2015\) Lodahl et al.](#)

*7: [J. Opt. Soc. Am. B 33, B65 \(2016\) Schröder et al.](#)

*8: [arXiv:2009.02892 Jakob et al.](#)



[Nature Mater. 12, 483 \(2013\) Warburton](#)

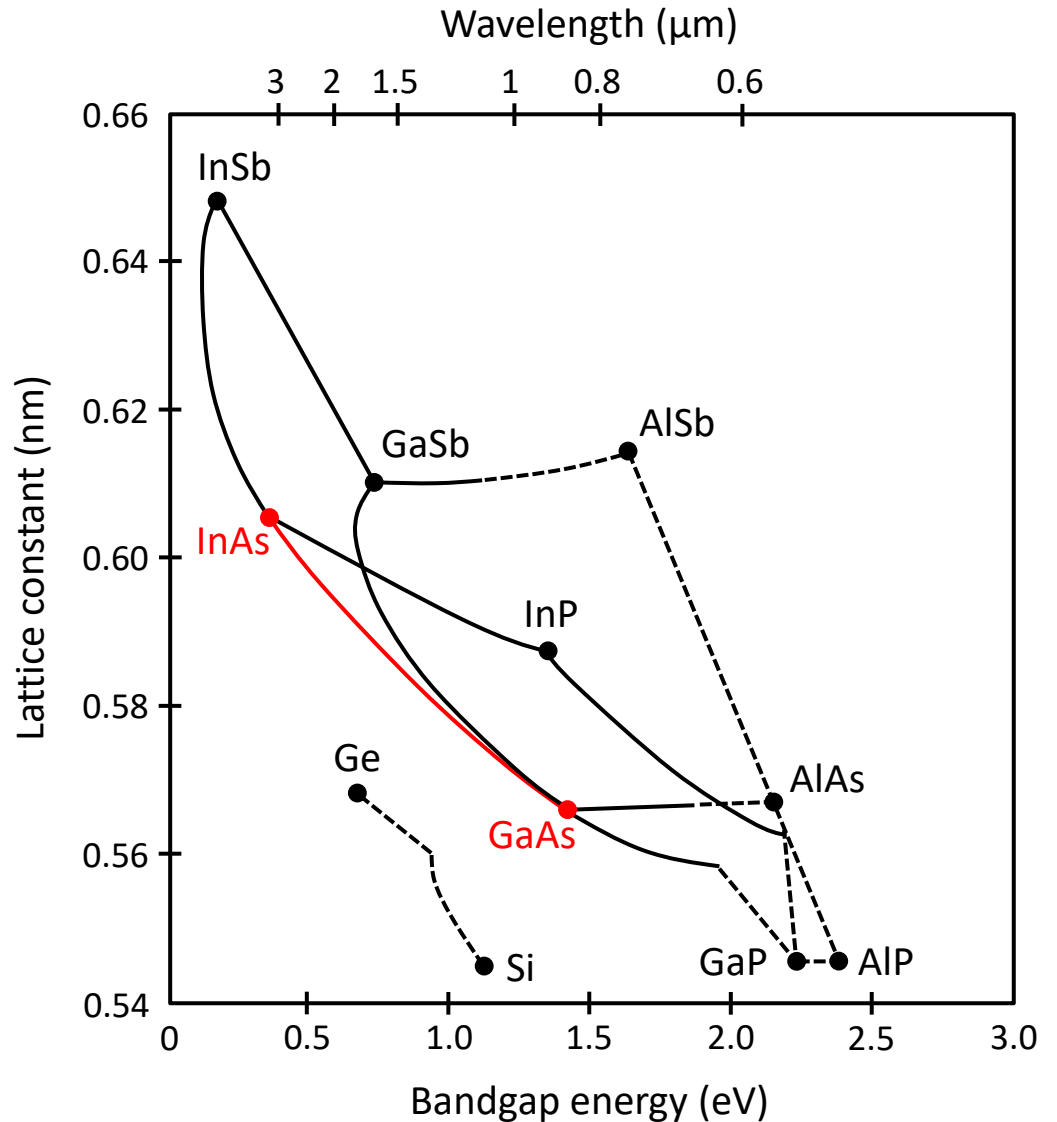
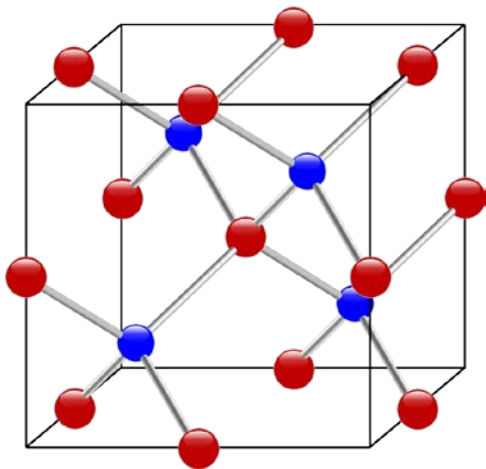


[Phys. Rev. Lett. 113, 263602 \(2014\) Rogers et al.](#)

自己形成量子ドット

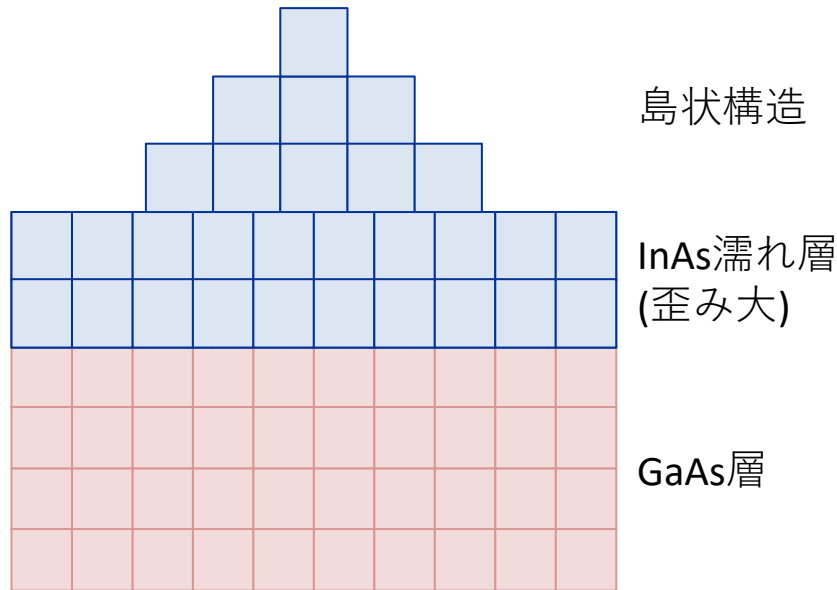
III (13)	IV (14)	V (15)
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In	Sn	Sb

閃亜鉛鉱構造

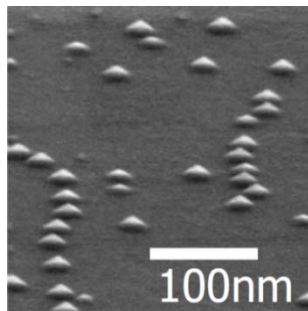
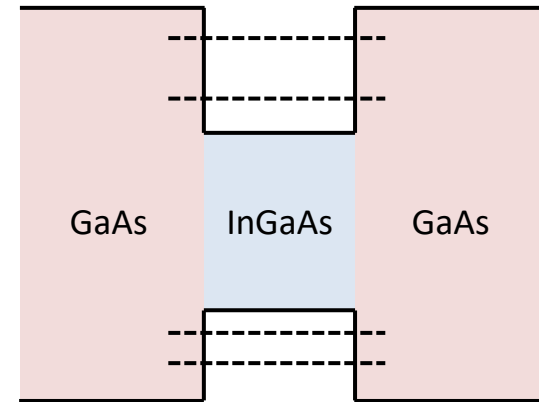


自己形成量子ドット

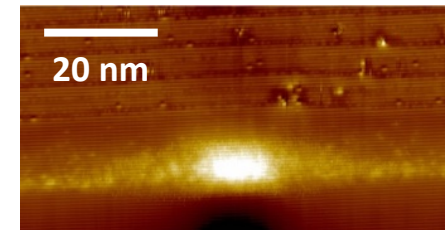
ストランスキー-クラスタノフ成長モードによるQD形成



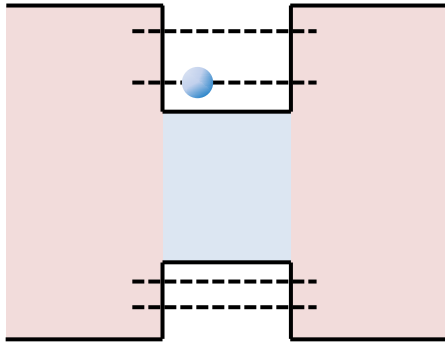
3次元閉じ込め準位の形成



キャップ層ありInGaAs QD
(アニール処理によるGaの混合)

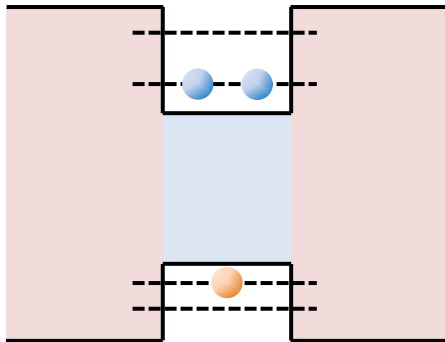
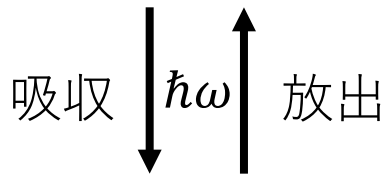


荷電励起子(トリオン)



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

1電子が常時QD内にトラップ



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

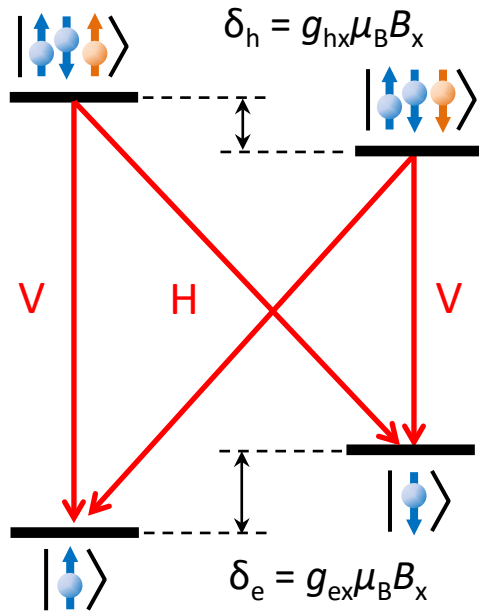
2電子は一重項を組み非磁性化

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

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

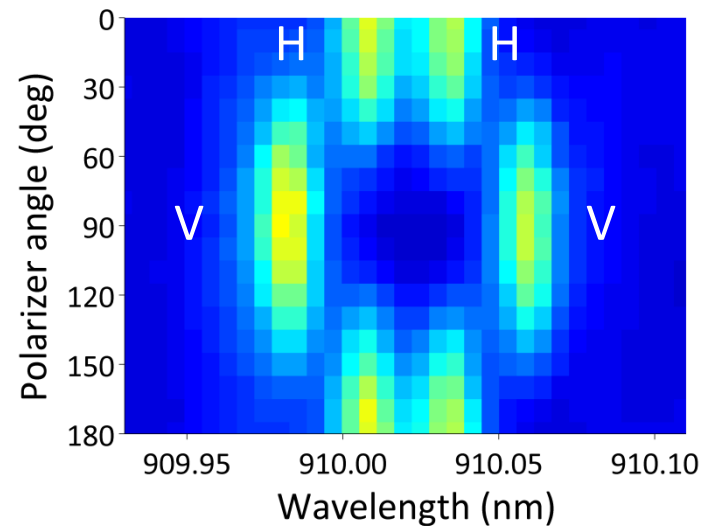
量子ビット

フォイト配置(面内磁場 $B_0 \approx 3$ T)



有効ラムダ(Λ)型3準位

- 光ポンピングによる初期化と測定
- 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



(Reviews)

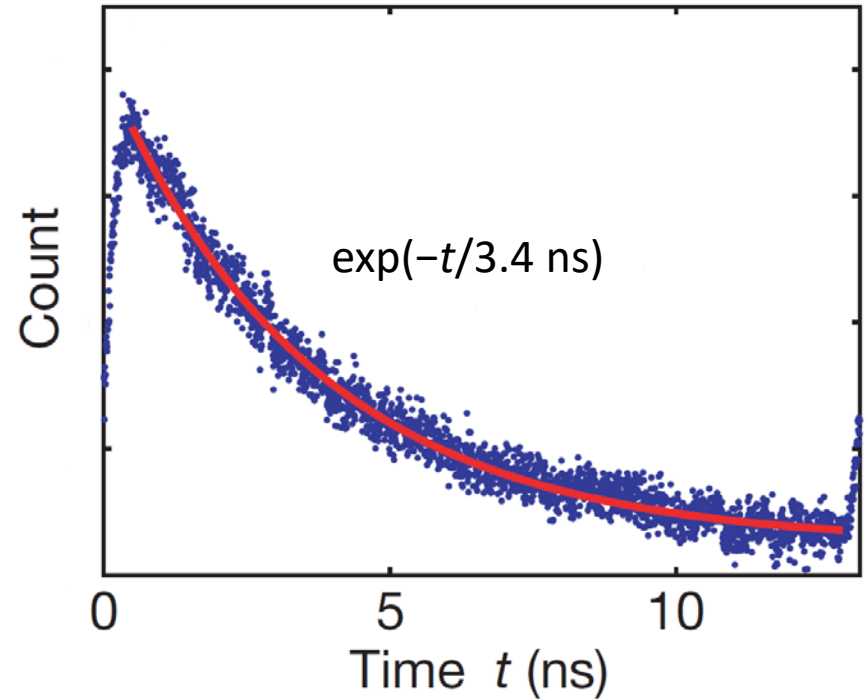
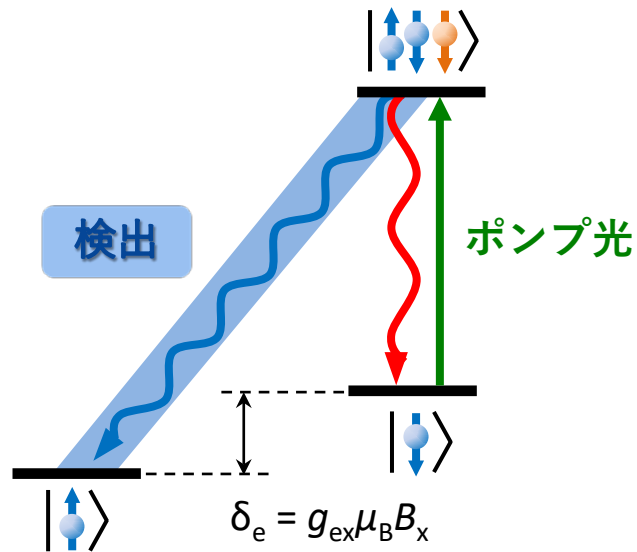
[Nature Photon. 9, 363 \(2015\) Gao et al.](#)

[Rep. Prog. Phys. 76, 092501 \(2013\) De Greve et al.](#)

[Nature Mater. 12, 483 \(2013\) Warburton](#)

初期化と測定

CWレーザー光による光ポンピング



(Reviews)

[Nature Photon. 9, 363 \(2015\) Gao et al.](#)

[Rep. Prog. Phys. 76, 092501 \(2013\) De Greve et al.](#)

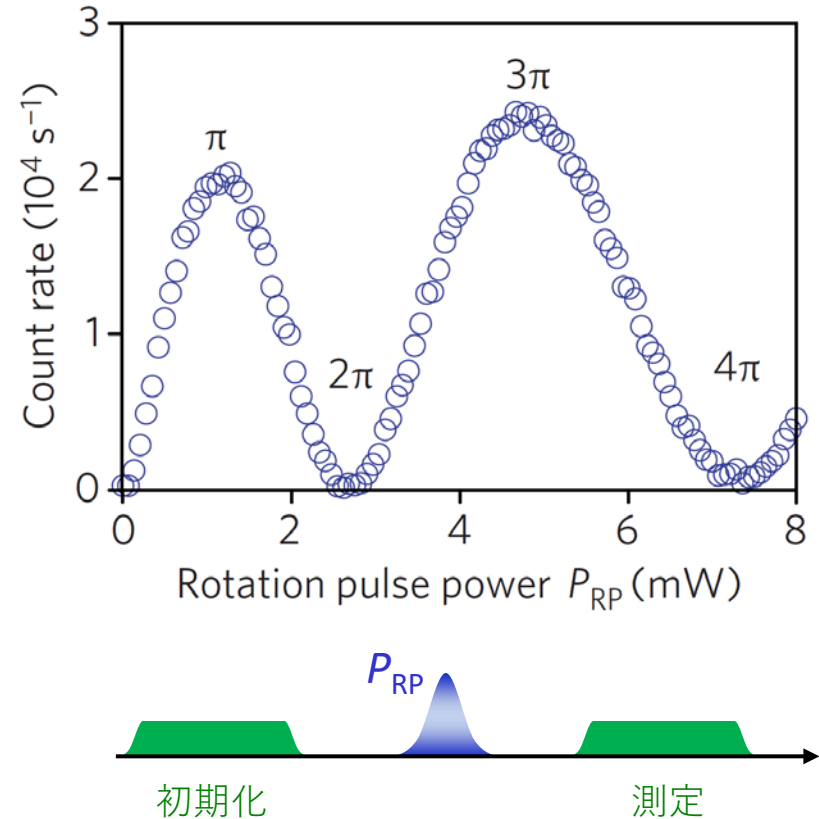
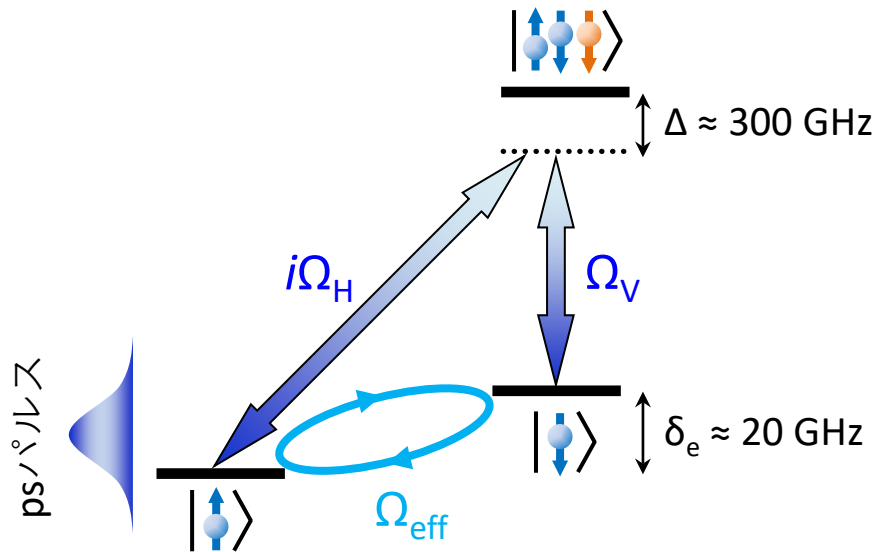
[Nature Mater. 12, 483 \(2013\) Warburton](#)

[Nature 456, 218 \(2008\) Press et al.](#)

スピン操作

離調円偏光パルス → 誘導ラマン遷移

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



$$\rightarrow T_2 = 2.6 \pm 0.3 \mu\text{s} @ 4 \text{ T}$$

(Reviews)

[Nature Photon. 9, 363 \(2015\) Gao et al.](#)

[Rep. Prog. Phys. 76, 092501 \(2013\) De Greve et al.](#)

[Nature Mater. 12, 483 \(2013\) Warburton](#)

[Nature Photon. 4, 367 \(2010\) Press et al.](#)

(Hole spin) [Nature Phys. 7, 872 \(2011\) De Greve et al.](#)

(Hole spin) [Nature Photon. 5, 702 \(2011\) Greilich et al.](#)

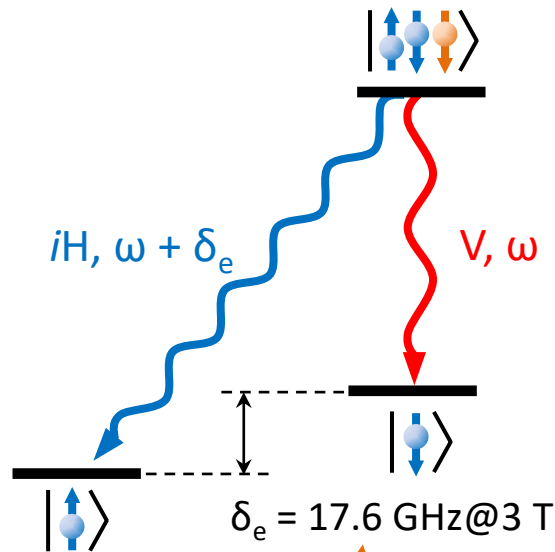
(Decoupling) [Nature Commun. 7, 12745 \(2016\) Stockill et al.](#)

スピン-光子量子もつれ

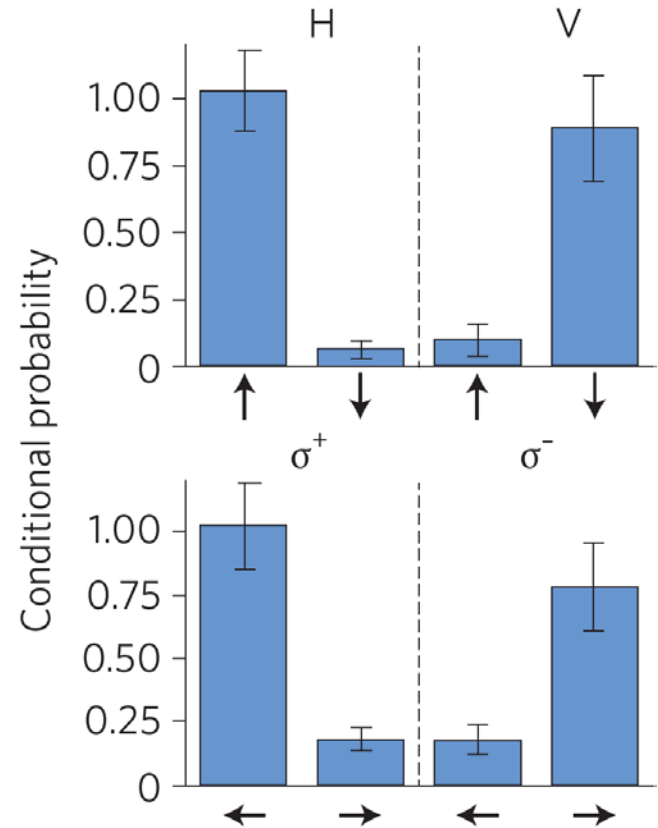
$$|iH\rangle|\uparrow\rangle + |V\rangle|\downarrow\rangle = i(|\sigma^+\rangle|\leftarrow\rangle + |\sigma^-\rangle|\rightarrow\rangle)$$

→ スピン-偏光 or スピン-エネルギー

→ 1.5 μm へ波長変換(量子消去 + 通信波長)



高速検出の必要性



$$F \geq 80 \pm 8.5\% \rightarrow F_{\text{tomography}} = 92.1 \pm 3.2\%$$

$$R_{\text{generation}} = 2-5 \text{ Hz}$$

[Nature 491, 421 \(2012\) De Greve et al.](#)

See also [Nature 491, 426 \(2012\) Gao et al.](#)

(Tomography) [Nature Commun. 4, 2228 \(2013\) De Greve et al.](#)

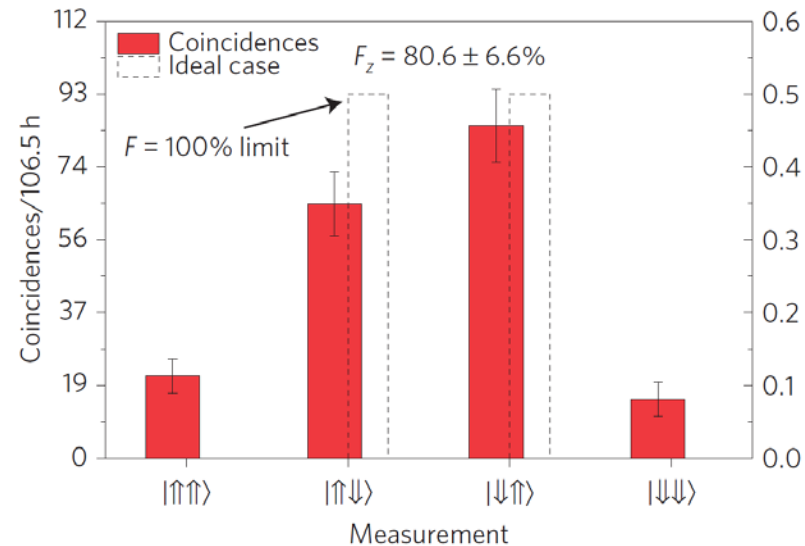
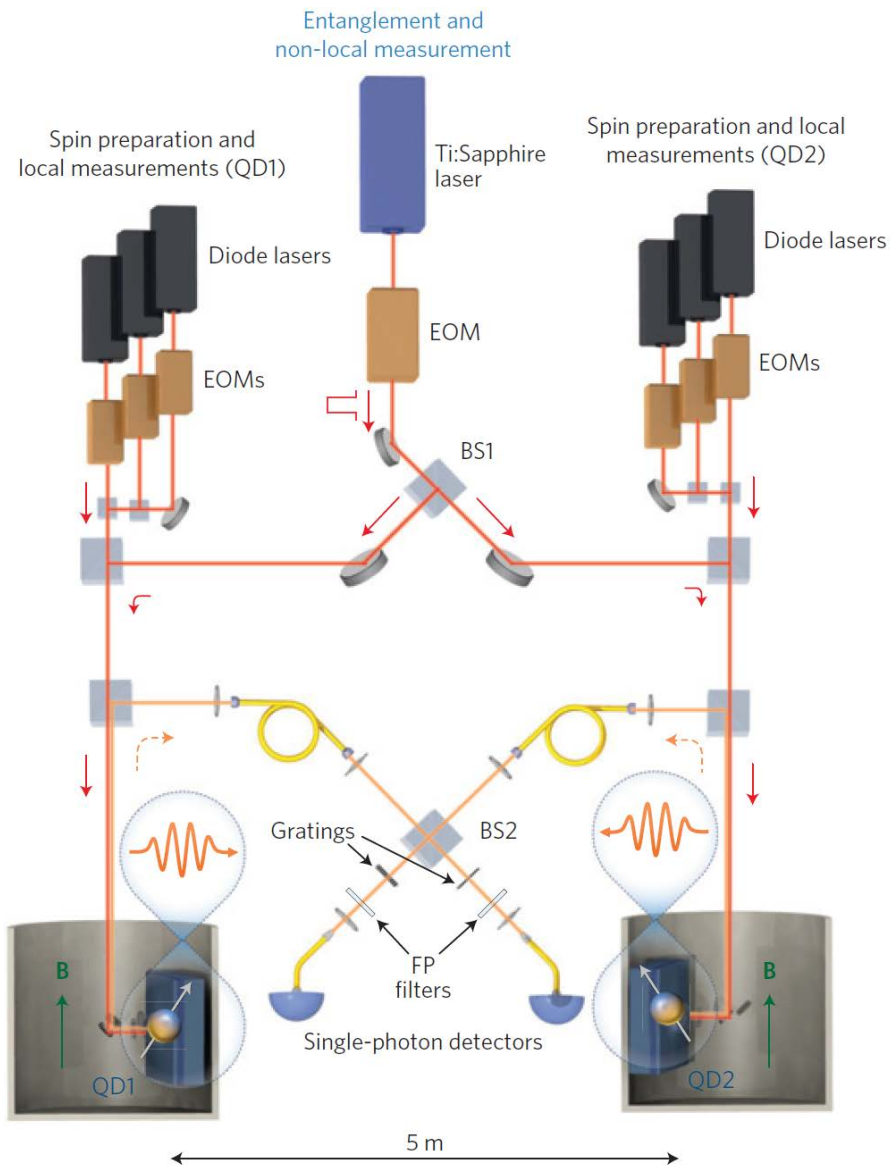
(Reviews)

[Nature Photon. 9, 363 \(2015\) Gao et al.](#)

[Rep. Prog. Phys. 76, 092501 \(2013\) De Greve et al.](#)

[Nature Mater. 12, 483 \(2013\) Warburton](#)

スピンスピン量子もつれ



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

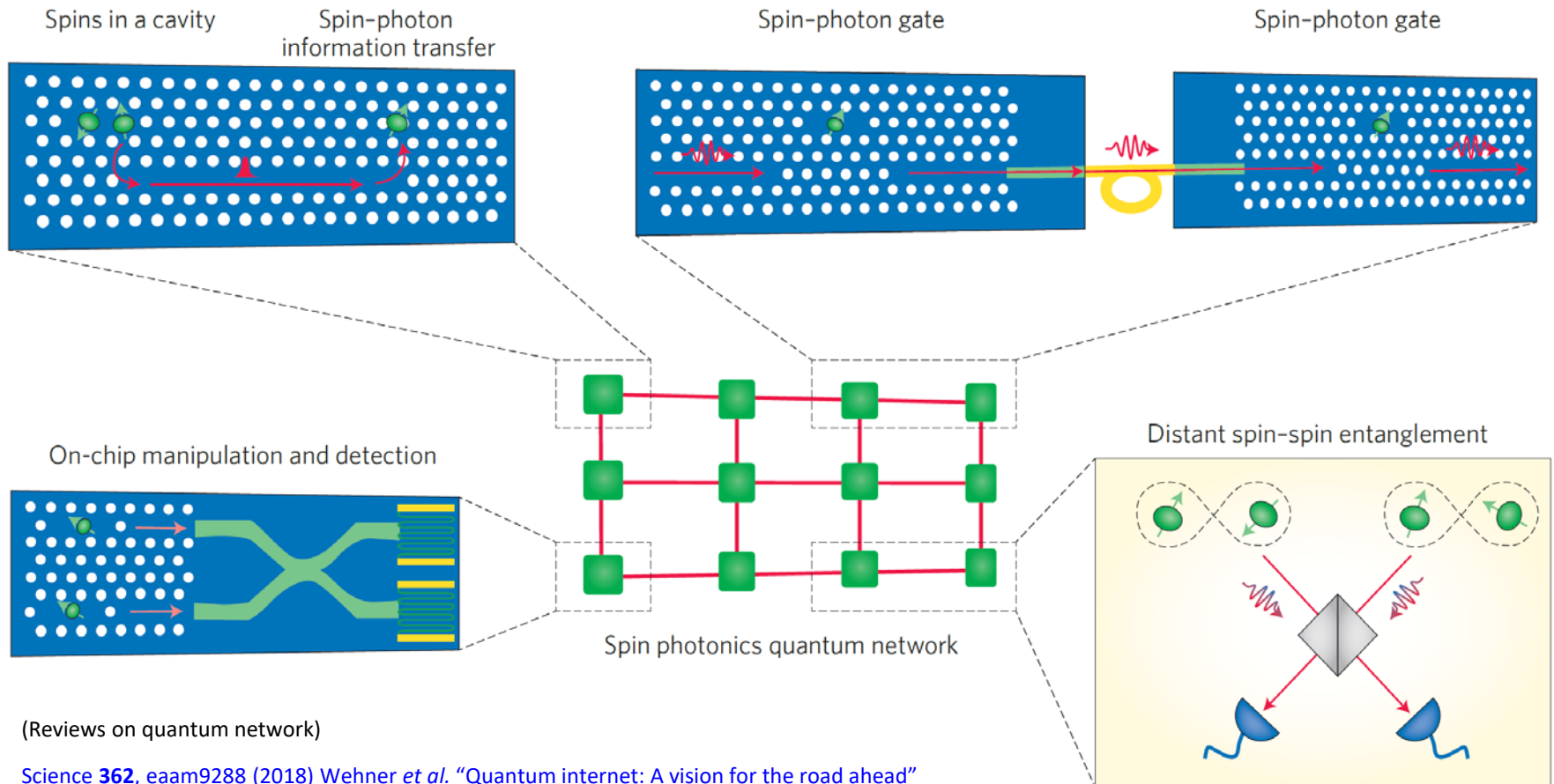
θ : 光路差による位相

$$R_{\text{generation}} = 2.3 \text{ kHz} \rightarrow 7.2 \text{ kHz}$$

(Phase-tuned, highest rate) [Phys. Rev. Lett. 119, 010503 \(2017\) Stockill et al.](#)

[Nature Phys. 12, 218 \(2016\) Delteil et al.](#)

量子ネットワーク



(Reviews on quantum network)

[Science 362, eaam9288 \(2018\) Wehner et al. "Quantum internet: A vision for the road ahead"](#)

[Nature 453, 1023 \(2008\) Kimble "The quantum internet"](#)

[Adv. Quant. Technol. 2, 1800091 \(2019\) Borregaard et al. "Quantum Networks with Deterministic Spin-Photon Interfaces"](#)

[Nature Photon. 12, 516 \(2018\) Awschalom et al. "Quantum technologies with optically interfaced solid-state spins"](#)

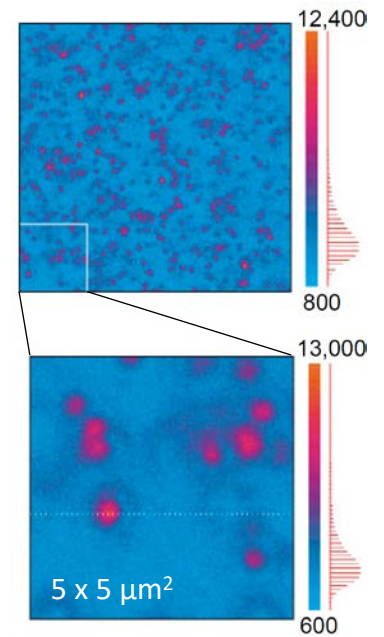
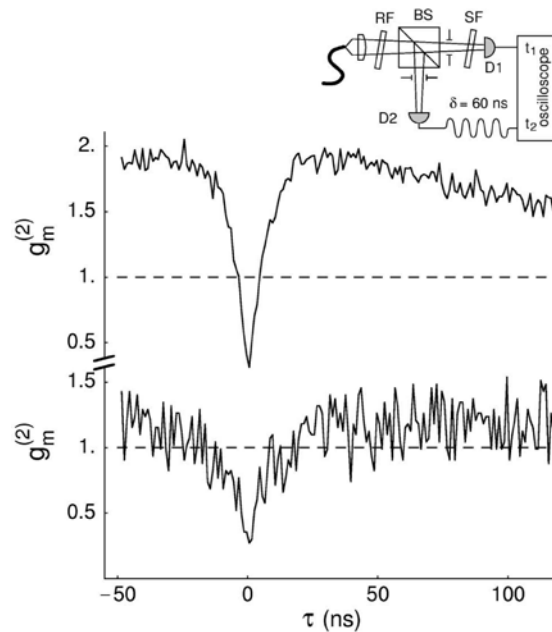
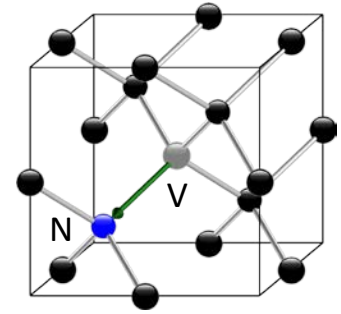
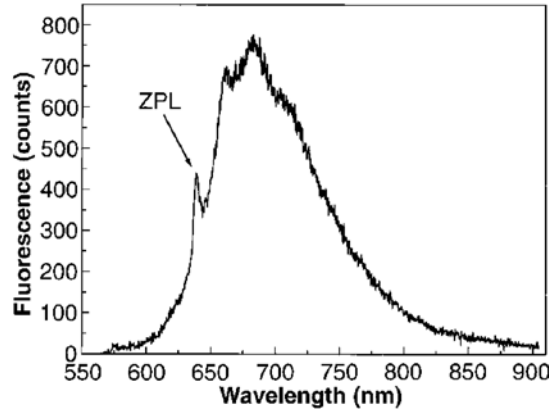
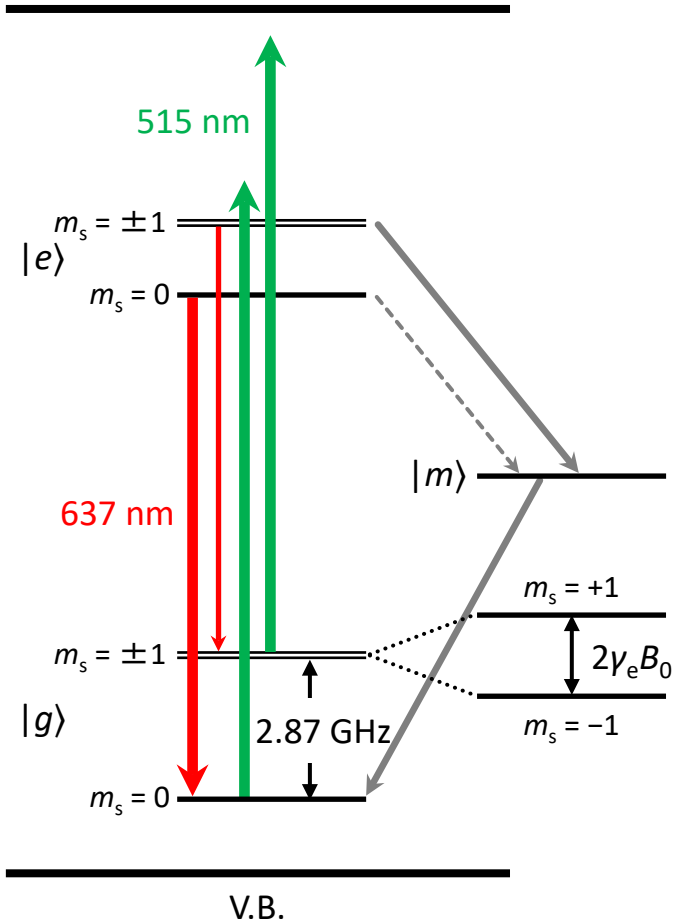
[Nature Rev. Mater. 3, 38 \(2018\) Atatüre et al. "Material platforms for spin-based photonic quantum technologies"](#)

[Nature Photon. 9, 363 \(2015\) Gao et al. "Coherent manipulation measurement and entanglement of individual solid-state spins using optical fields"](#)

ダイヤモンド中のNV-中心

光学特性: 室温下

C.B. ($E_g = 5.47 \text{ eV} = 227 \text{ nm}$)



[Phys. Rev. Lett. 85, 290 \(2000\) Kurtsiefer et al.](#)

[Science 276, 2012 \(1997\) Gruber et al.](#)

光検出磁気共鳴(ODMR)

スピンハミルトニアン

$$H = DS_Z^2 + \gamma_e B_0 S_Z$$

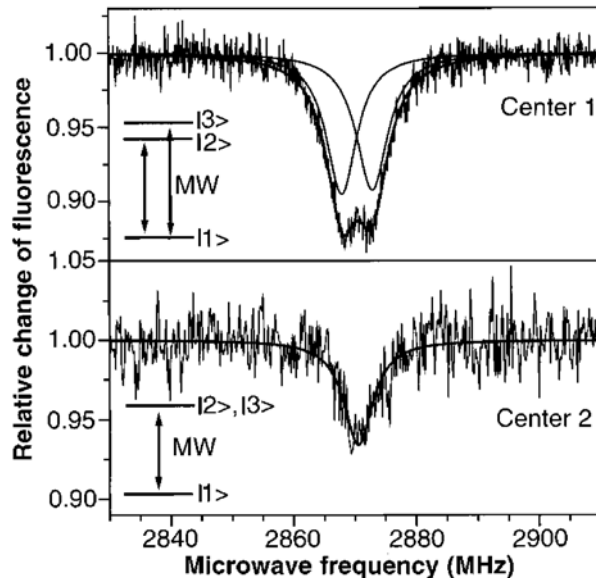
$$D/2\pi = 2.87 \text{ GHz}$$

$$\gamma_e/2\pi = 28 \text{ GHz/T}$$

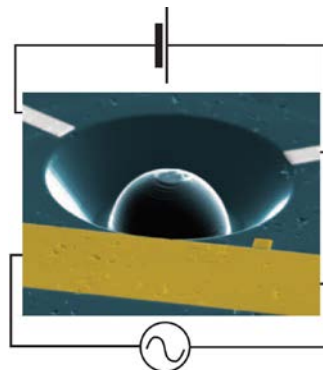
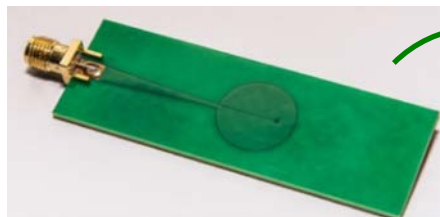
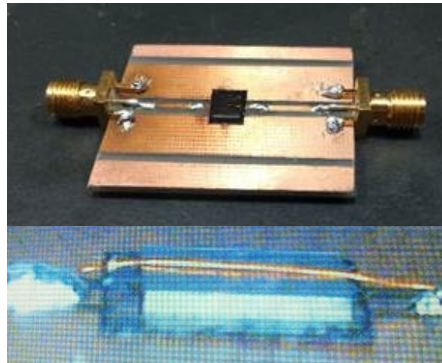
B_0 はNV軸に平行

$^{14/15}\text{N}$ との結合は省略

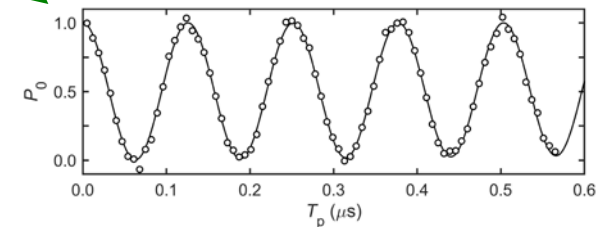
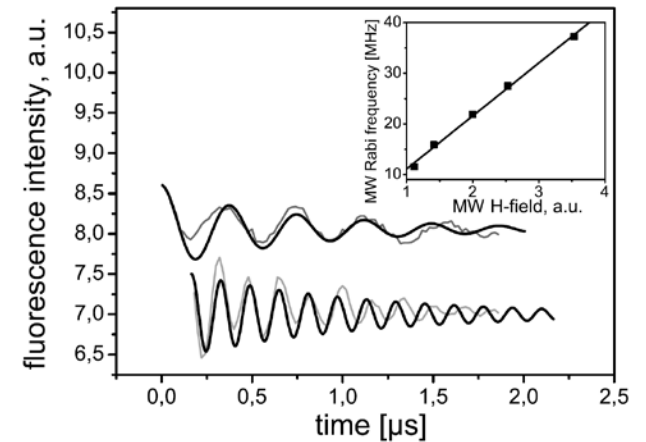
CW



マイクロ波伝送方法



コヒーレント制御



[Nature 497, 86 \(2013\) Bernien et al.](#)

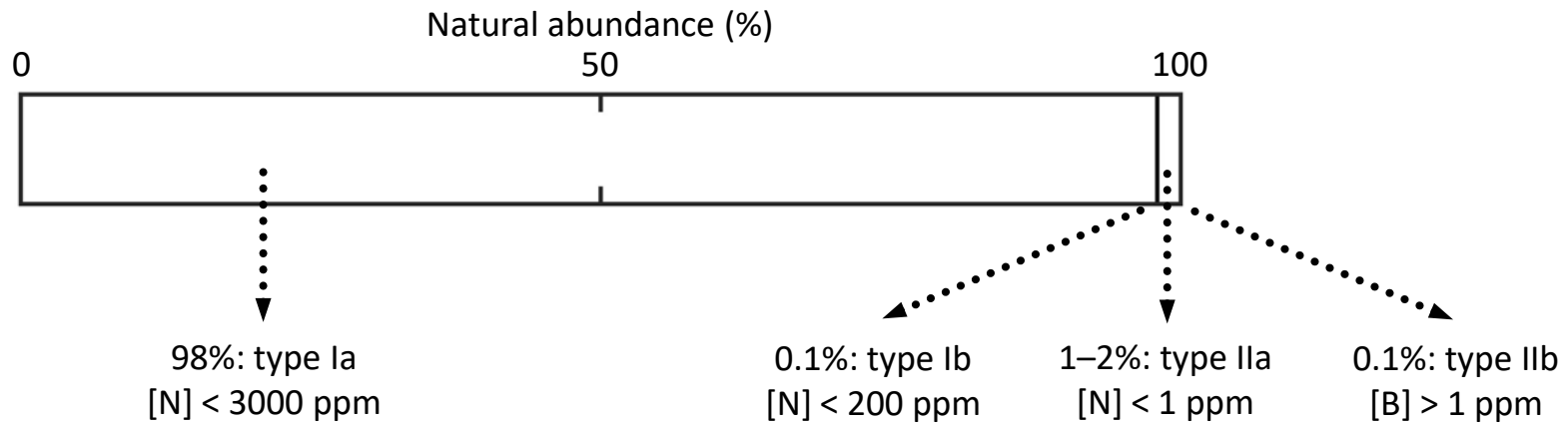
[AIP Adv. 10, 025206 \(2020\) Misonou et al.](#)

[Rev. Sci. Instrum. 87, 053904 \(2016\) Sasaki et al.](#)

[Phys. Rev. Lett. 92, 076401 \(2004\) Jelezko et al.](#)

[Science 276, 2012 \(1997\) Gruber et al.](#)

ダイヤモンドの種類と変遷

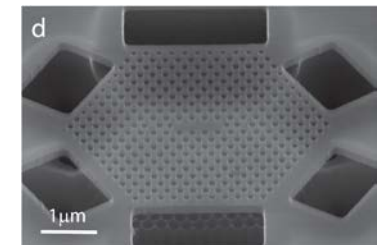


^{13}C ($I = \frac{1}{2}$, 1.1%)

(Review) [MRS Commun. 4, 143 \(2014\)](#)
[Itoh & Watanabe](#)

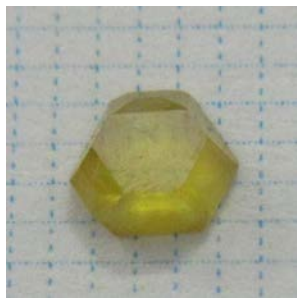
同位体制御
ナノフォトニクス

+

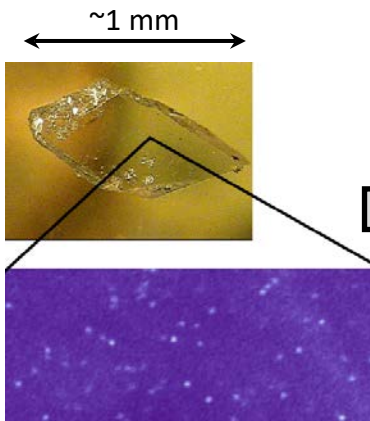
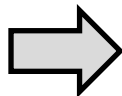


[Phys. Rev. Lett. 109, 033604 \(2012\)](#) Faraon *et al.*

(Review) [Adv. Opt. Mater. 2, 911 \(2014\)](#) Aharonovich & Neu



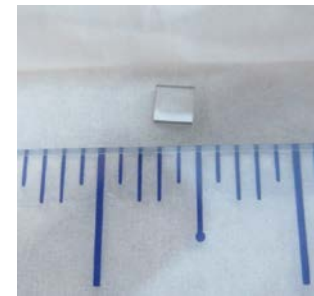
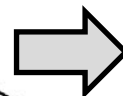
HPHT Ib (111)



“Magic Russian Diamond”
(ca. 2005–2010)

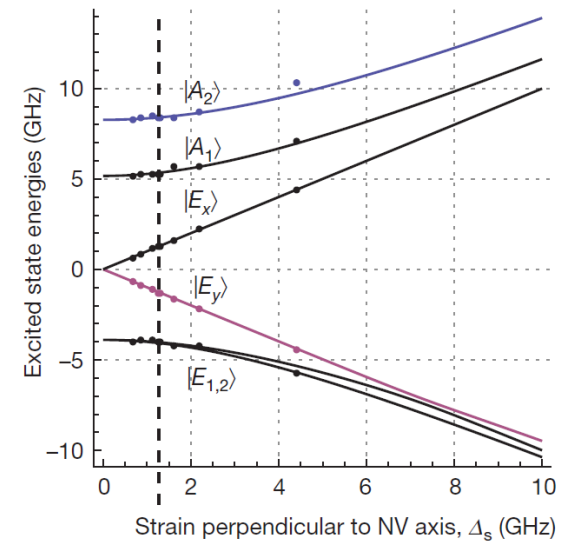
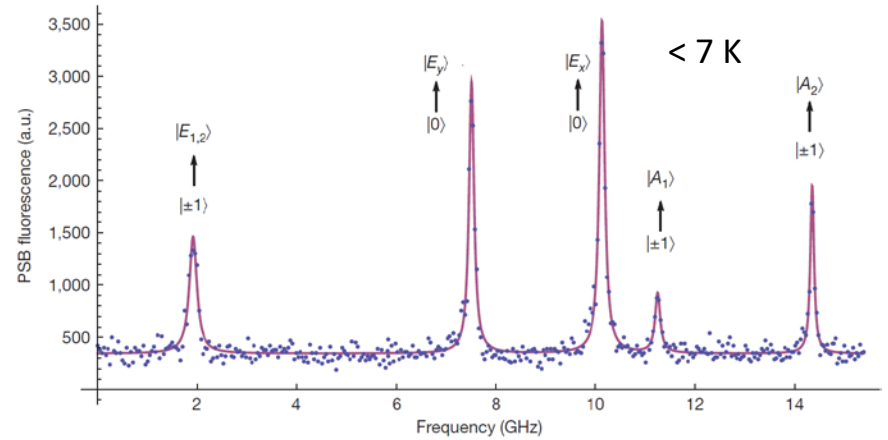
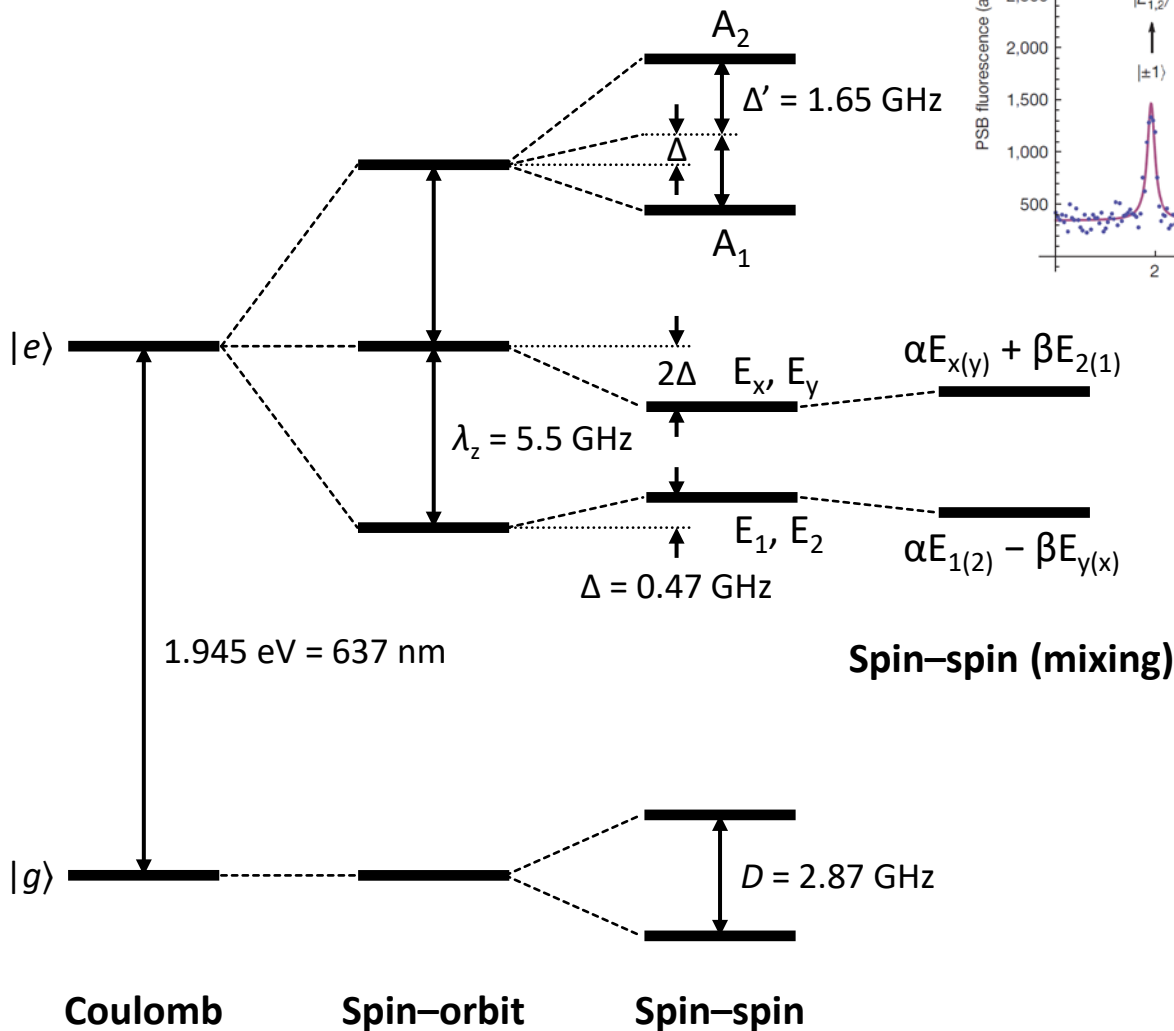
[arXiv:1504.05990](#) Chu & Lukin

[Nature 505, 472 \(2014\)](#) Gibney



CVD IIa (001)
[N] < 5 ppb, [NV] < 0.03 ppb
([Element Six](#))

励起準位微細構造@低温

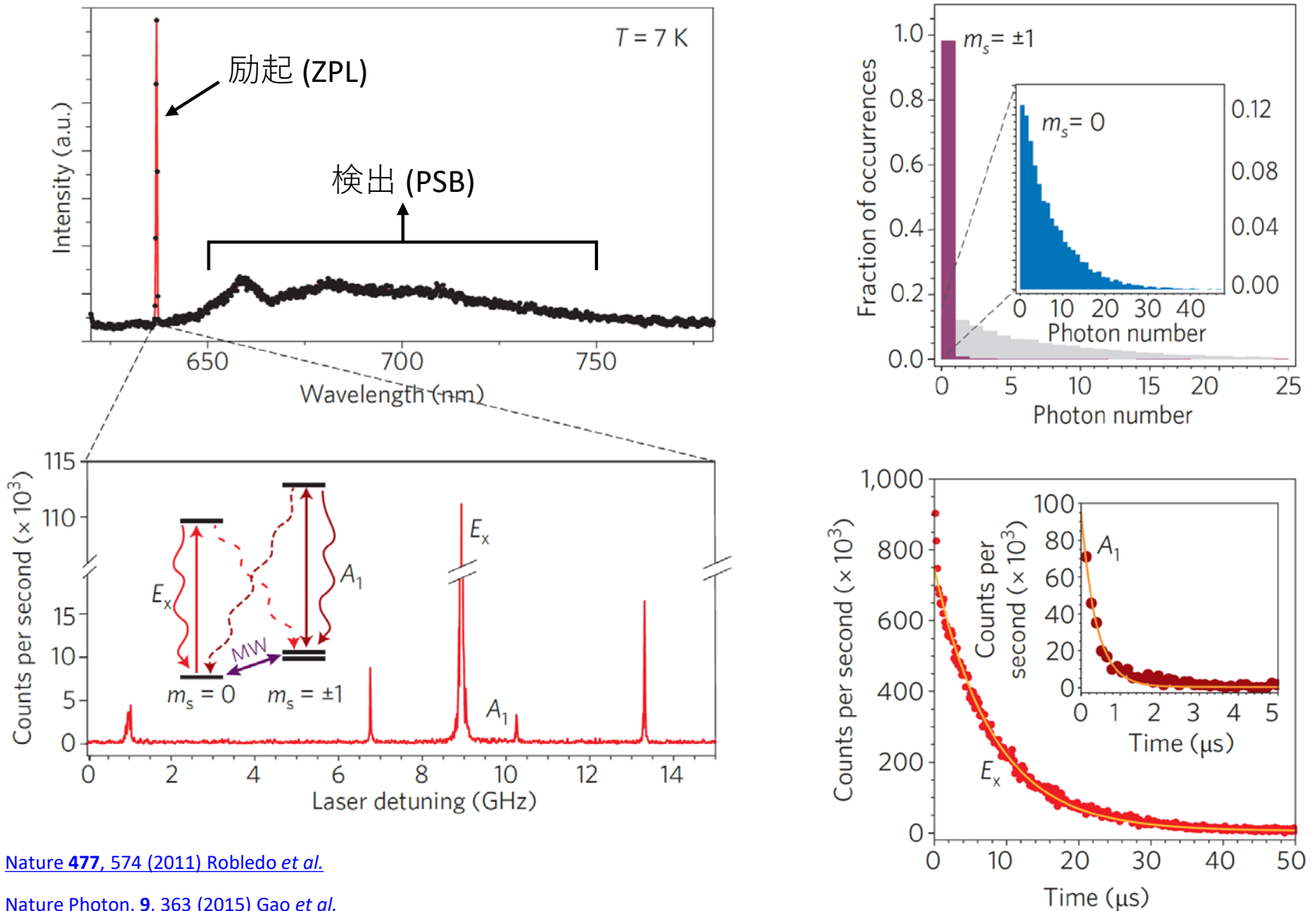


[Nature 466, 730 \(2010\) Togan et al.](#)

(Theory) [New J. Phys. 13, 025025 \(2011\) Maze et al.](#)

(Theory) [New J. Phys. 13, 025019 \(2011\) Doherty et al.](#)

高忠実度初期化・測定



[Nature 477, 574 \(2011\) Robledo et al.](#)

[Nature Photon. 9, 363 \(2015\) Gao et al.](#)

スピン-光子量子もつれ

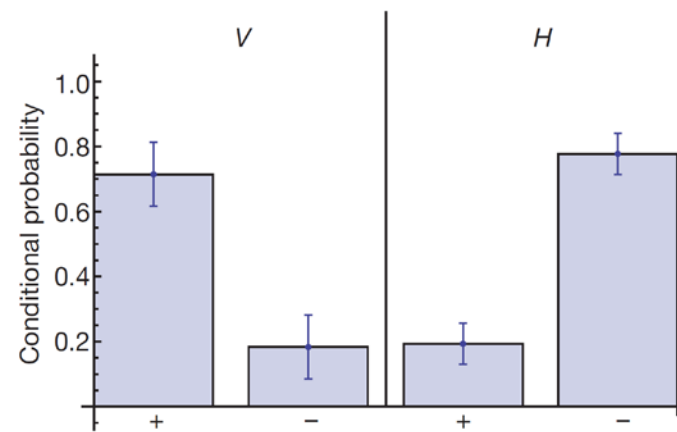
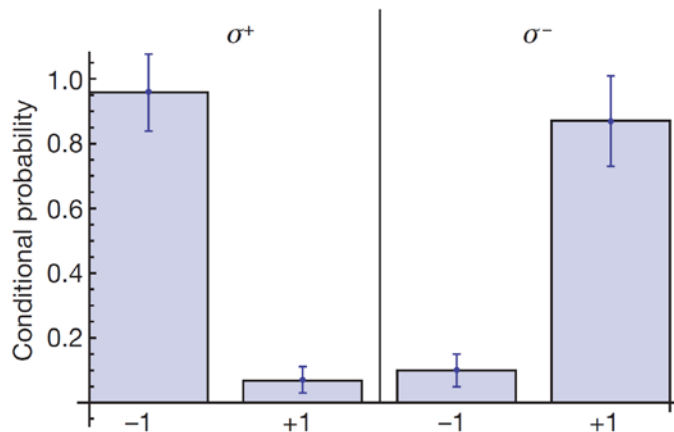
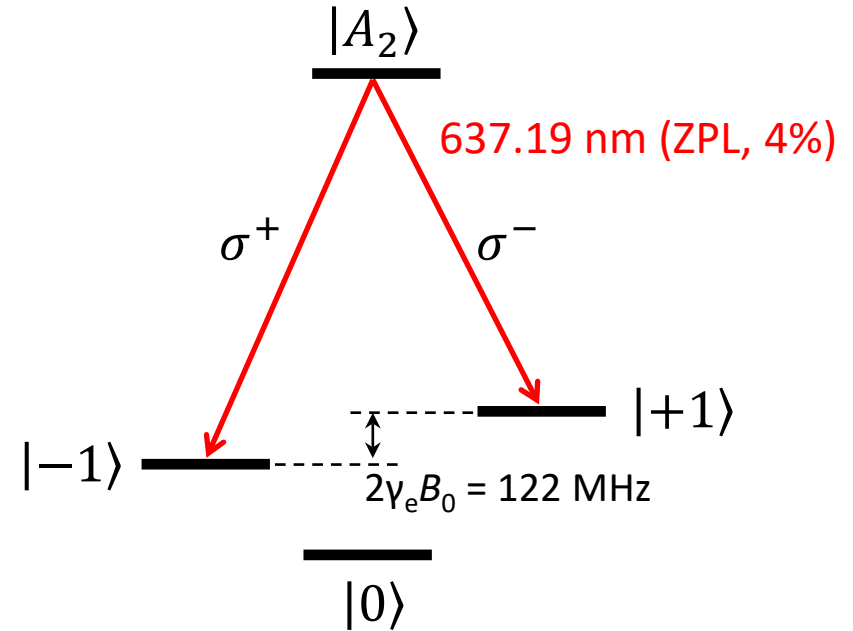
$$|A_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|E_-\rangle|+1\rangle + |E_+\rangle|-1\rangle)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} (|\sigma^-\rangle|+1\rangle + |\sigma^+\rangle|-1\rangle)$$

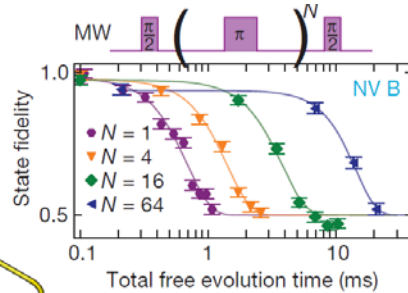
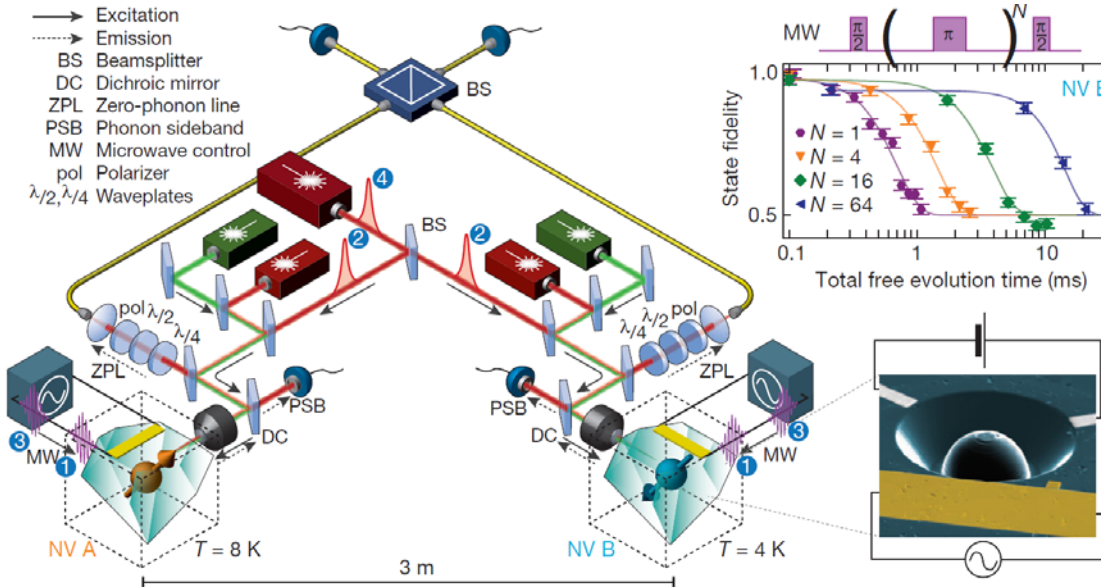
$$F \geq 70 \pm 7.0\%$$

$$R_{\text{experiment}} = 100 \text{ kHz}$$

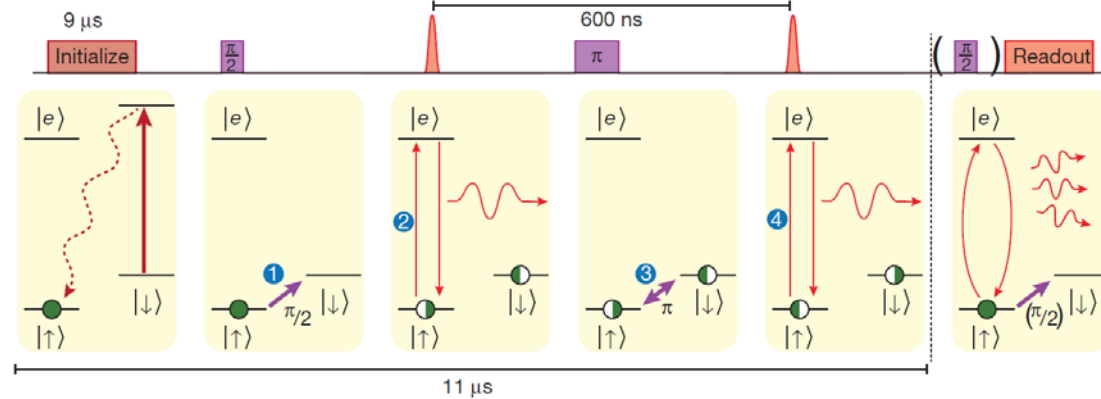
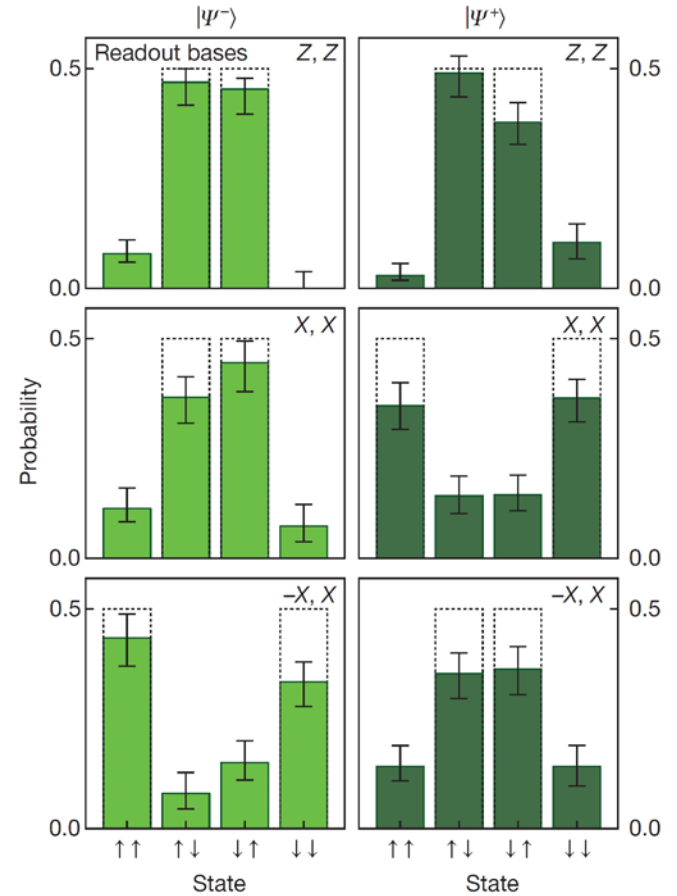
$$\rho_{\text{success}} \approx 10^{-6}$$



スピンスピン量子もつれ



$F \geq 73 \pm 4\%$ $F \geq 64 \pm 5\%$



739 entanglement/158 h

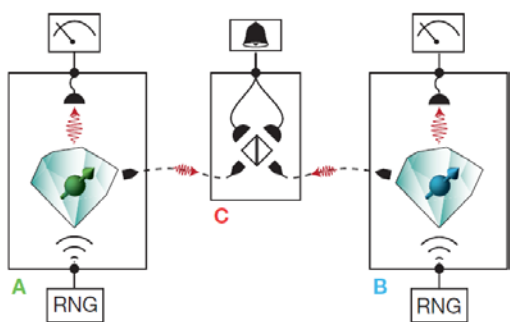
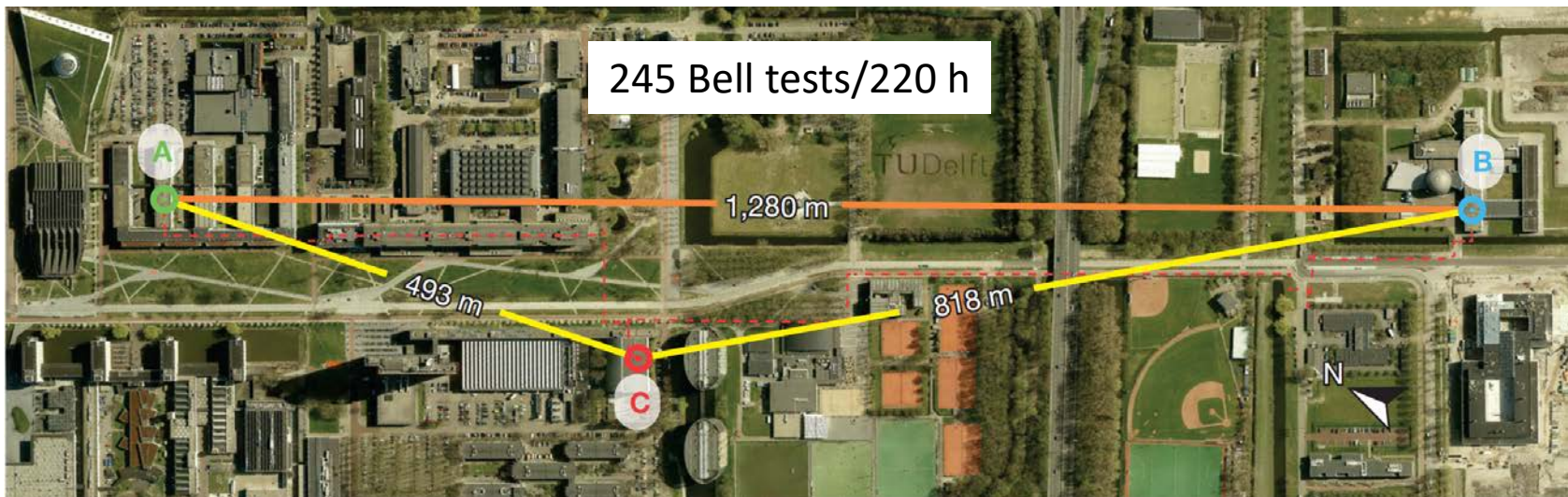
ベルの不等式の破れ



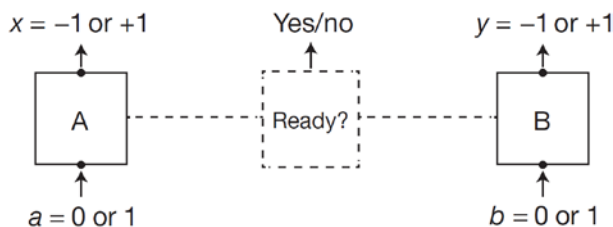
John Bell
(1928–1990)

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}



$$S = |\langle x \cdot y \rangle_{(0,0)} + \langle x \cdot y \rangle_{(0,1)} + \langle x \cdot y \rangle_{(1,0)} - \langle x \cdot y \rangle_{(1,1)}| \leq 2$$

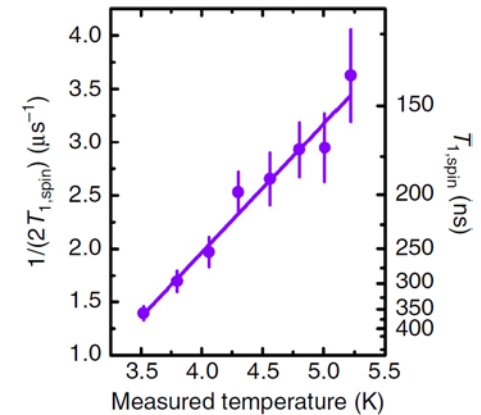
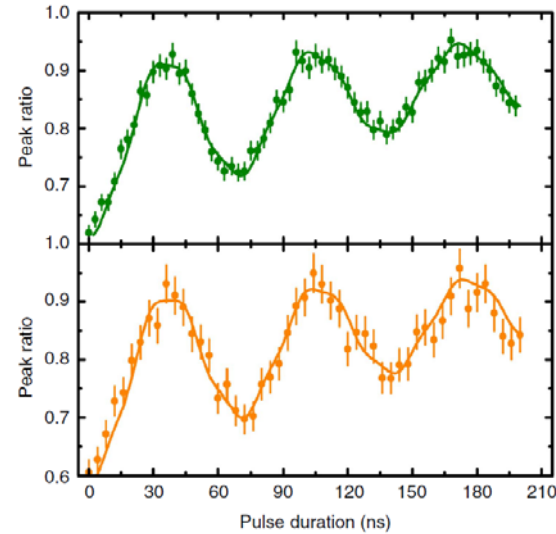
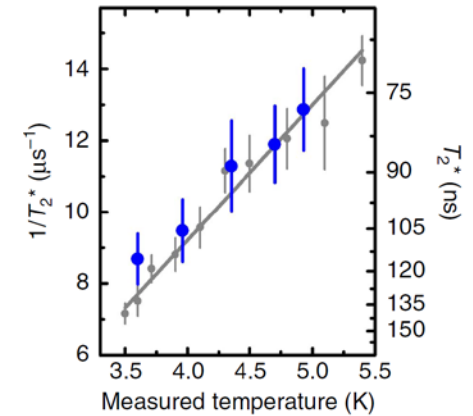
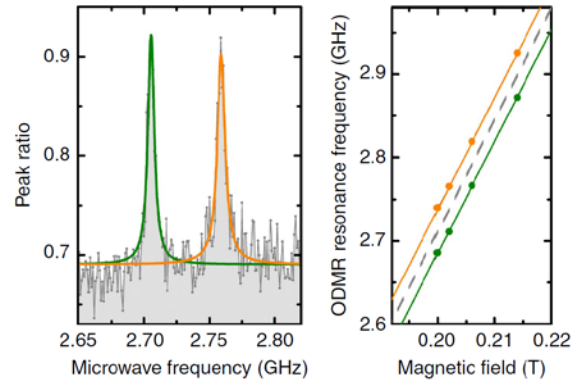
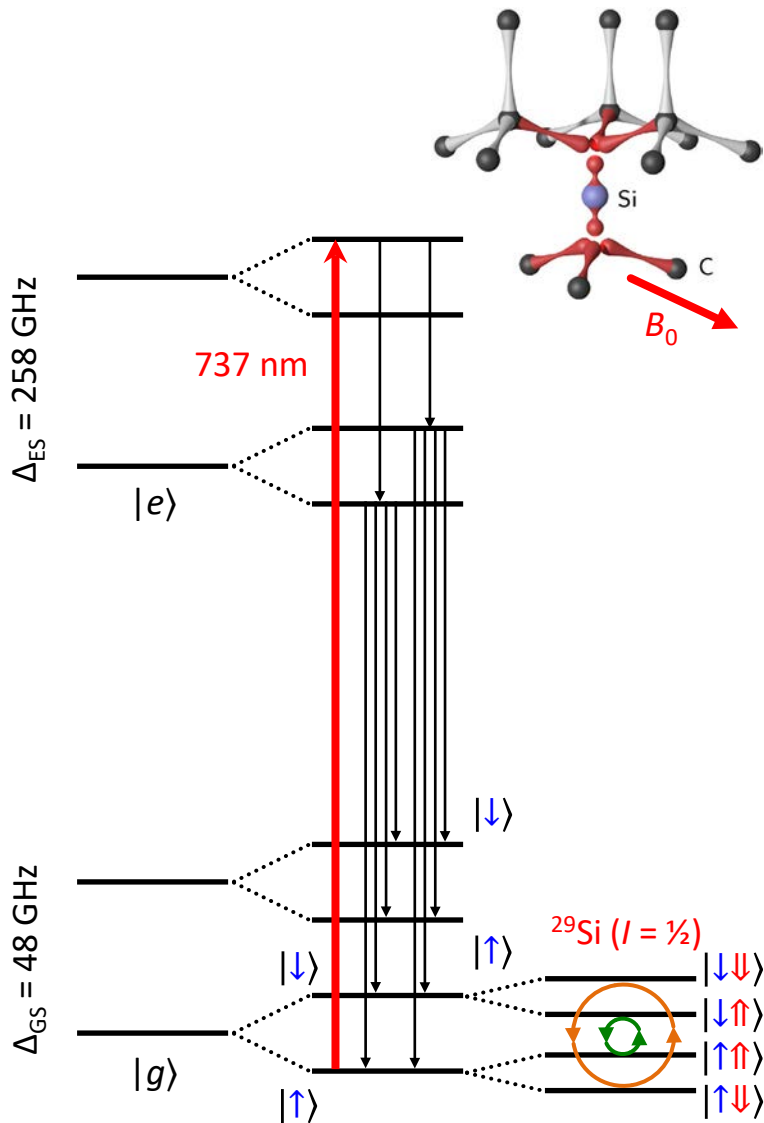


[Phys. Phys. Fiz. 1, 195 \(1964\) Bell](#)

[Phys. Rev. Lett. 23, 880 \(1969\) Clauser et al.](#)

[Nature 526, 682 \(2015\) Hensen et al.](#)

ダイヤモンド中の SiV -中心



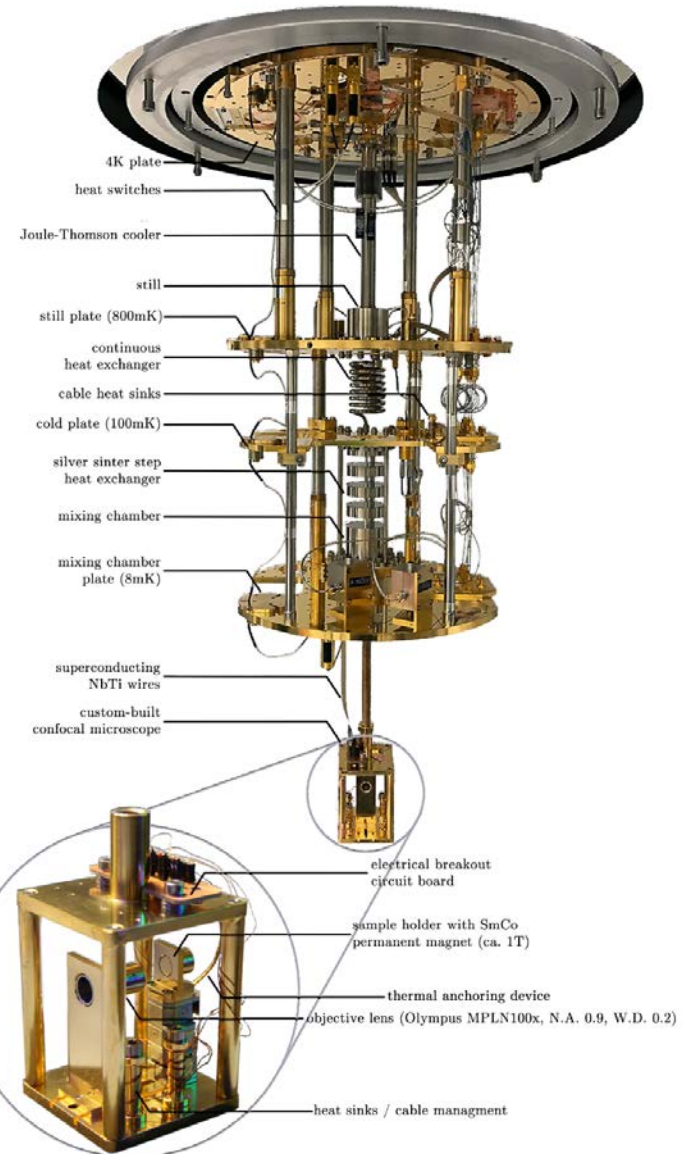
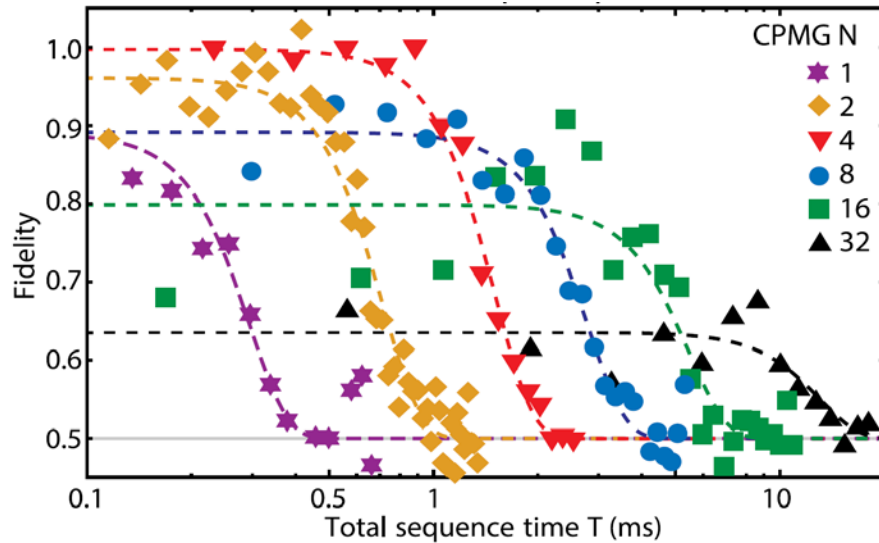
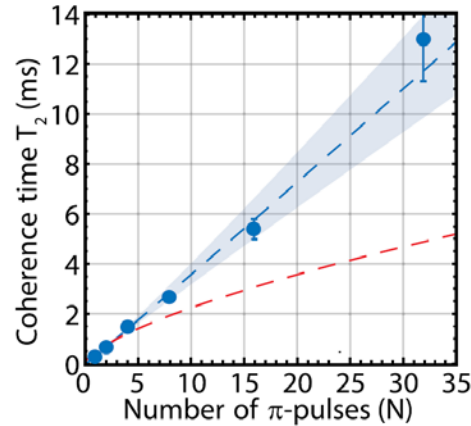
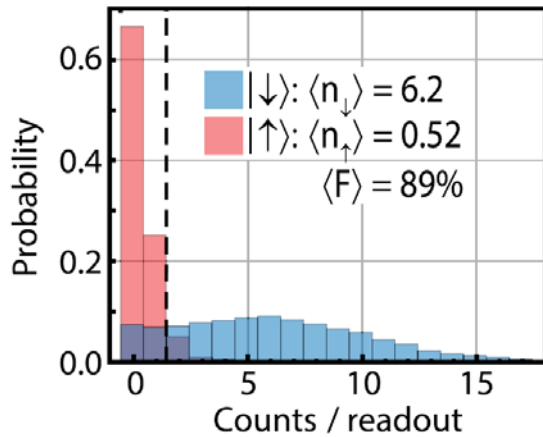
(Optical control) [Phys. Rev. Lett. **113**, 263601 \(2014\) Pingault et al.](#)

(Optical control) [Phys. Rev. Lett. **113**, 263602 \(2014\) Rogers et al.](#)

(Microwave control) [Nature Commun. **8**, 15579 \(2017\) Pingault et al.](#)

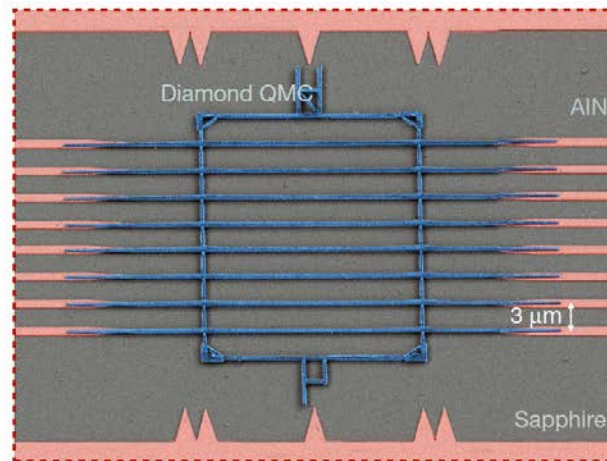
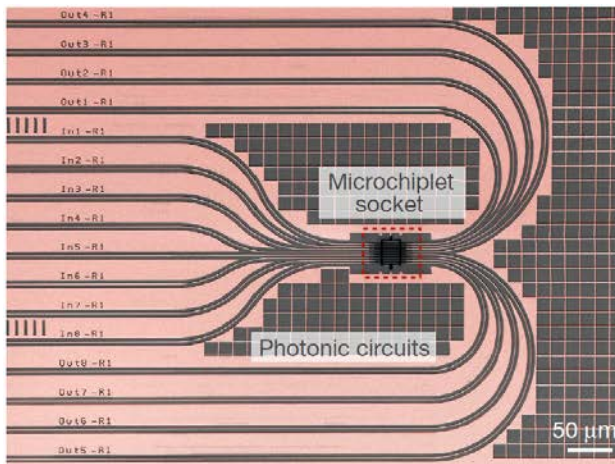
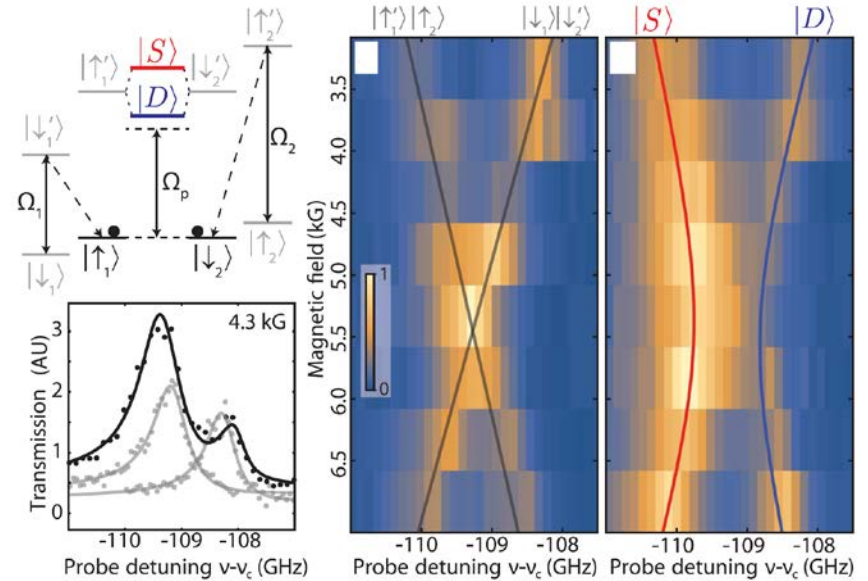
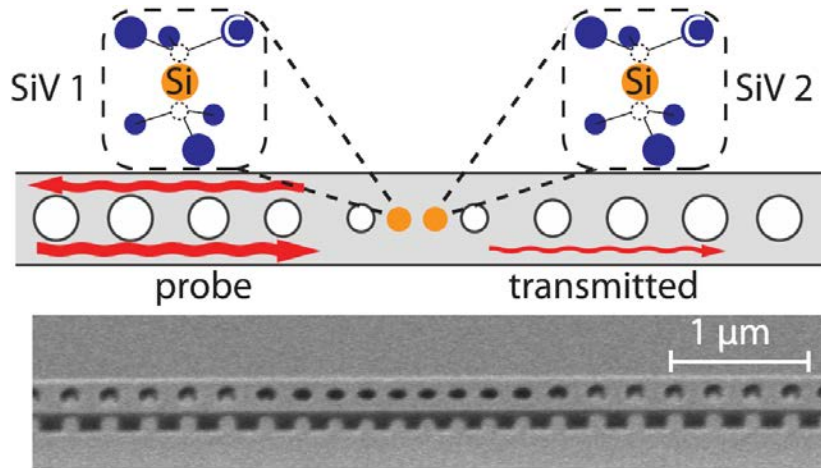
極低温でのコヒーレンス延伸

希釈冷凍機の導入 ($T \leq 100$ mK)



スピン-光子インターフェース

共振器光子を介したSiVの結合



'Quantum microchiplet' (SiV, GeV)

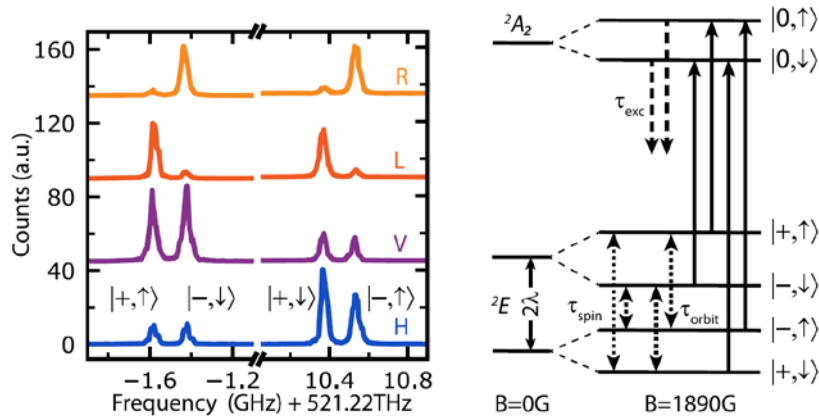
(QMC) [Nature 583, 226 \(2020\) Wan et al.](#)

(Cavity QED, photon-mediated interaction) [Science 362, 662 \(2018\) Evans et al.](#)

(Cavity QED, photon switch) [Science 354, 847 \(2016\) Sipahigil et al.](#)

... and more

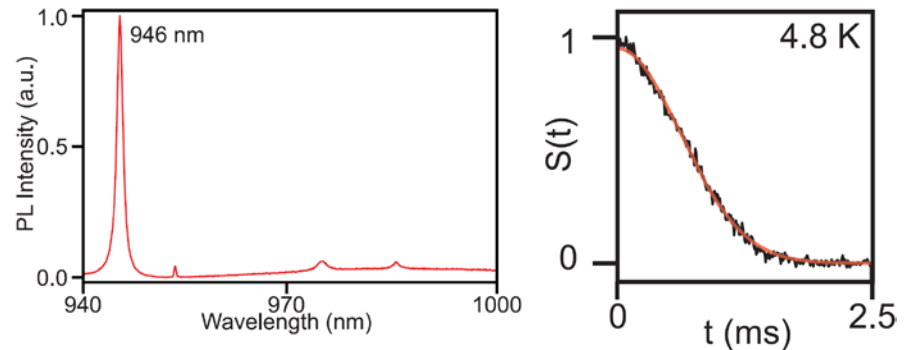
ダイヤモンド中のNV⁰



(Hyperfine fine structure) [Phys. Rev. Lett. **125**, 193601 \(2020\) Baier *et al.*](#)

(Charge-state control) [Phys. Rev. X **4**, 011057 \(2014\) Doi *et al.*](#)

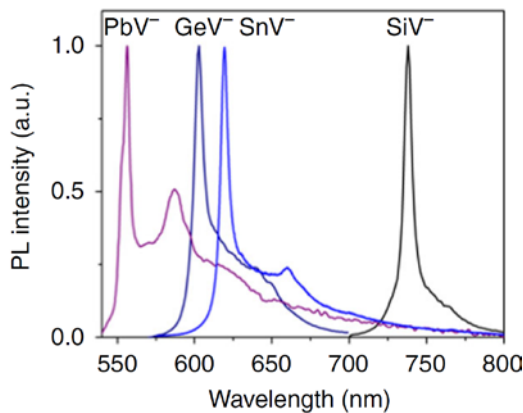
ダイヤモンド中のSiV⁰



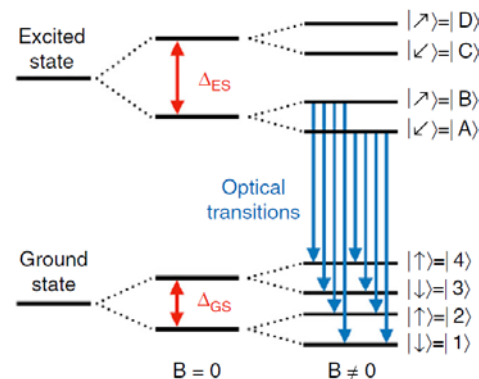
(Ensemble ESR) [Science **361**, 60 \(2018\) Rose *et al.*](#)

(Ensemble ODMR) [Phys. Rev. Lett. **125**, 237402 \(2020\) Zhang *et al.*](#)

ダイヤモンド中のGeV⁻, SnV⁻, PbV⁻



(Review) [Nature Commun. **10**, 5625 \(2019\) Bradac *et al.* "Quantum nanophotonics with group IV defects in diamond"](#)



(GeV) [Sci. Rep. **5**, 12882 \(2015\) Iwasaki *et al.*](#)

(SnV) [Phys. Rev. Lett. **119**, 253601 \(2017\) Iwasaki *et al.*](#)

(PbV) [Phys. Rev. B **99**, 075430 \(2019\) Trusheim *et al.*](#)

(PbV) [ACS Photon. **5**, 4864 \(2018\) Tchernij *et al.*](#)

$\Delta_{GS} \approx 50$ GHz (SiV⁻), 170 (GeV⁻), 850 (SnV⁻), 4200 GHz (PbV⁻)

... and more(ダイヤモンド以外)

[arXiv:2010.16395](https://arxiv.org/abs/2010.16395) Wolfowicz *et al.* "Qubit guidelines for solid-state spin defects"

[arXiv:2005.06564](https://arxiv.org/abs/2005.06564) Chatterjee *et al.* "Semiconductor Qubits In Practice"

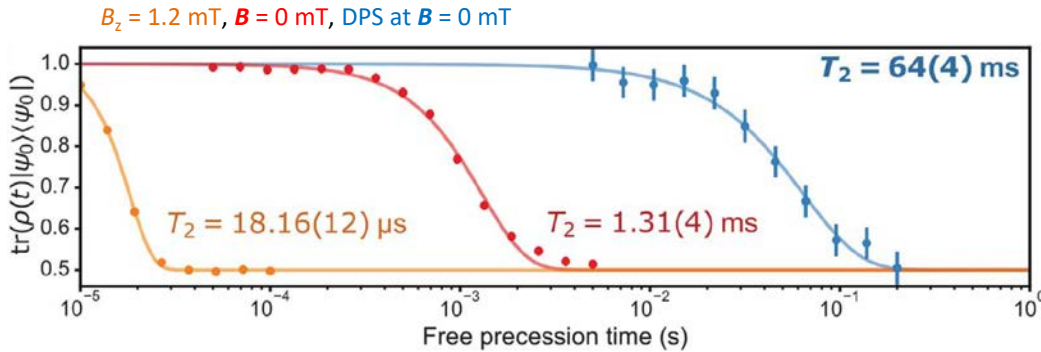
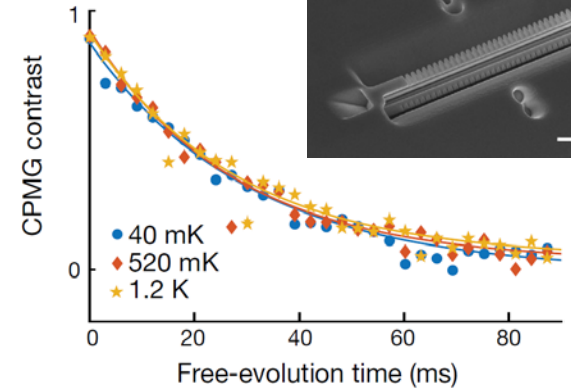
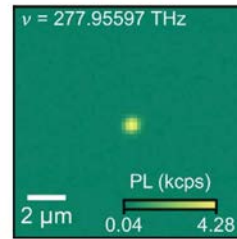
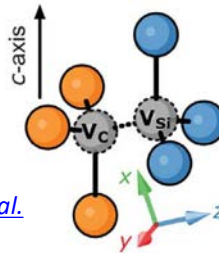
[Appl. Phys. Rev. 7, 031308 \(2020\)](https://doi.org/10.1063/1.5131308) Zhang *et al.* "Material platforms for defect qubits and single-photon emitters"

SiC中のV₂など

[Science 369, 1493 \(2020\)](https://doi.org/10.1126/science.1231493) Miao *et al.*

(Review) [PRX Quant. 1, 020102 \(2020\)](https://doi.org/10.1038/s42005-020-00102-0) Lukin *et al.*

(Review) [Appl. Phys. Lett. 116, 190501 \(2020\)](https://doi.org/10.1063/1.5131308) Son *et al.*



希土類イオン

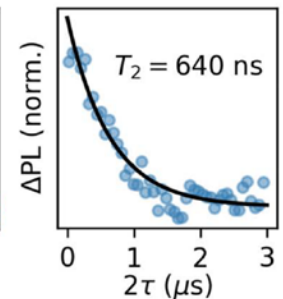
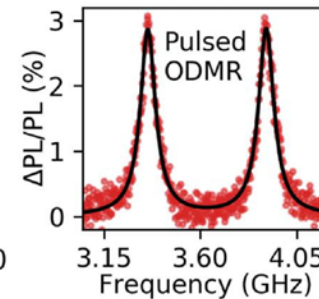
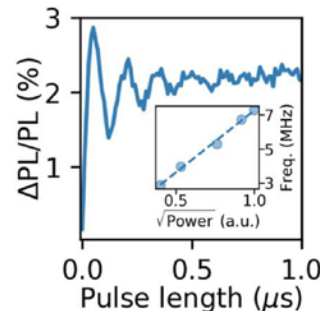
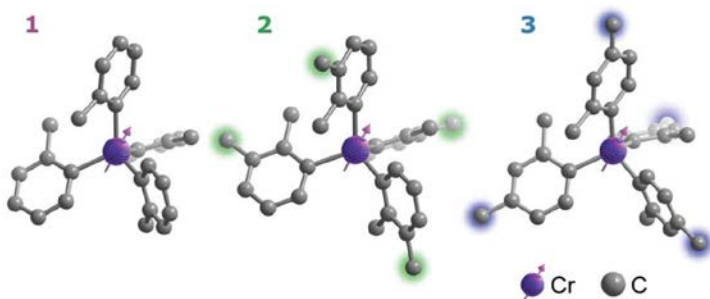
(YVO:Yb³⁺) [Nature 580, 201 \(2020\)](https://doi.org/10.1038/s41586-020-201-0) Kindem *et al.*

(YSO:Er³⁺) [Nature Commun. 11, 1605 \(2020\)](https://doi.org/10.1038/s41467-020-1605-0) Raha *et al.*

(YAG:Ce³⁺) [Nature Commun. 5, 3895 \(2014\)](https://doi.org/10.1038/s41467-014-0389-5) Siyushev *et al.*

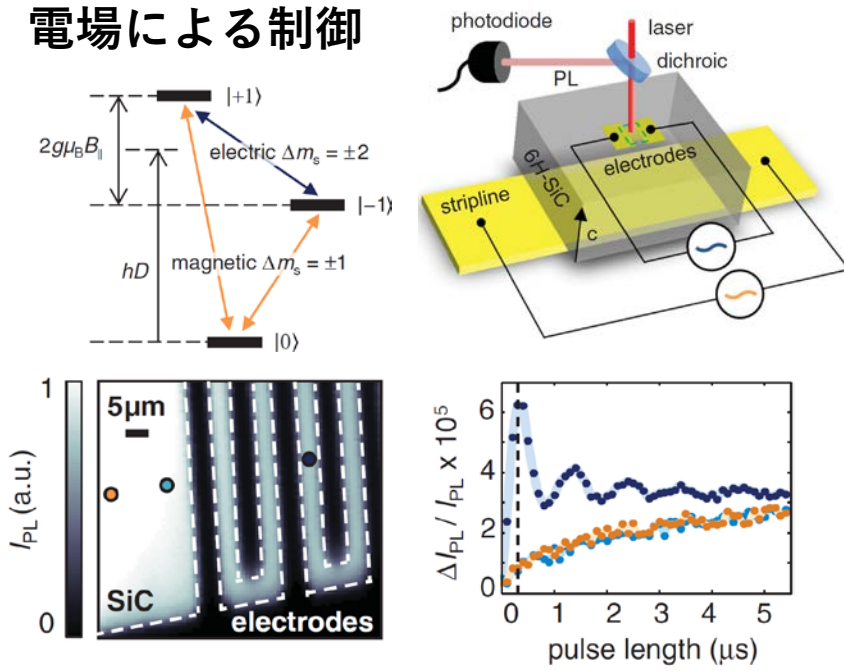
(Ensemble YSO:Eu³⁺, T₂ = 6 h) [Nature 517, 177 \(2015\)](https://doi.org/10.1038/nature12777) Zhong *et al.*

分子 [Science 370, 1309 \(2020\)](https://doi.org/10.1126/science.1231493) Bayliss *et al.*



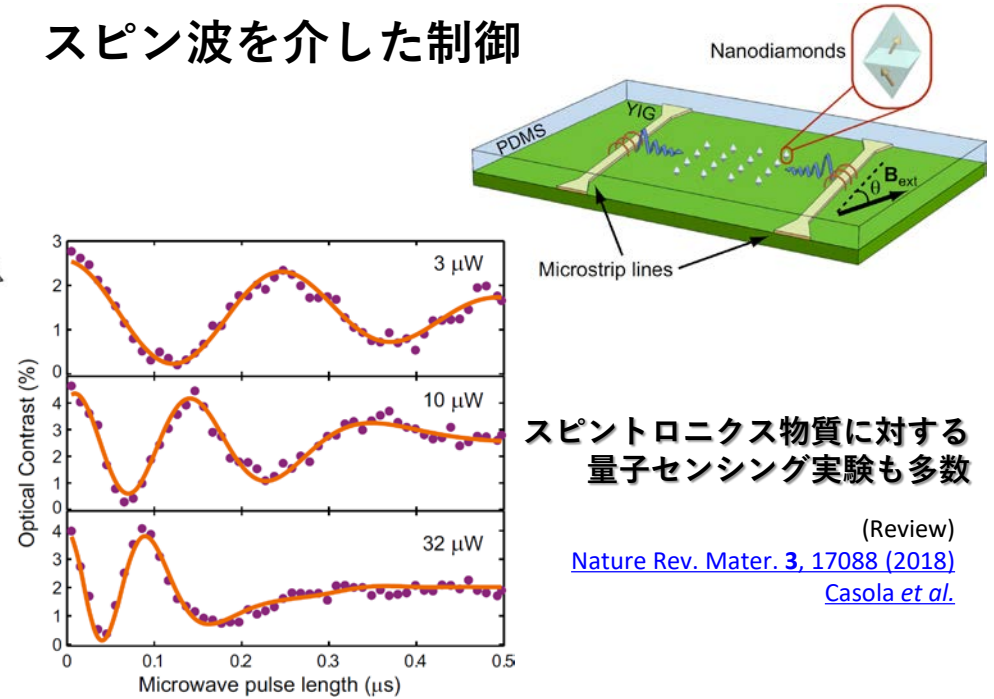
磁場・光以外を用いたスピン制御

電場による制御



[Phys. Rev. Lett. **112**, 087601 \(2014\) Klimov *et al.*](#)

スピン波を介した制御



スピントロニクス物質に対する
量子センシング実験も多数

(Review)

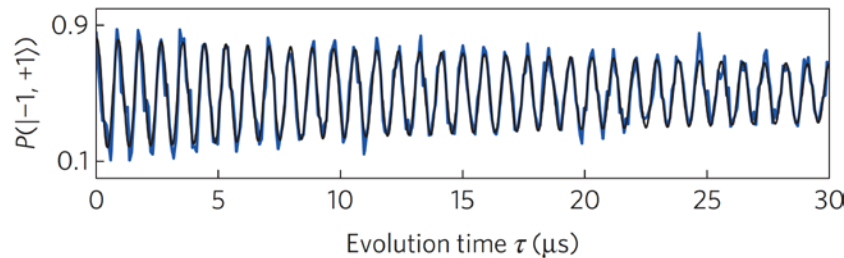
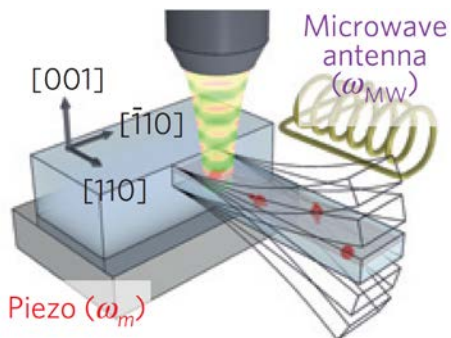
[Nature Rev. Mater. **3**, 17088 \(2018\)](#)

[Casola *et al.*](#)

[npj Quant. Info. **3**, 28 \(2017\) Andrich *et al.*](#)

See also [Appl. Phys. Express **10**, 103004 \(2017\) Kikuchi *et al.*](#)

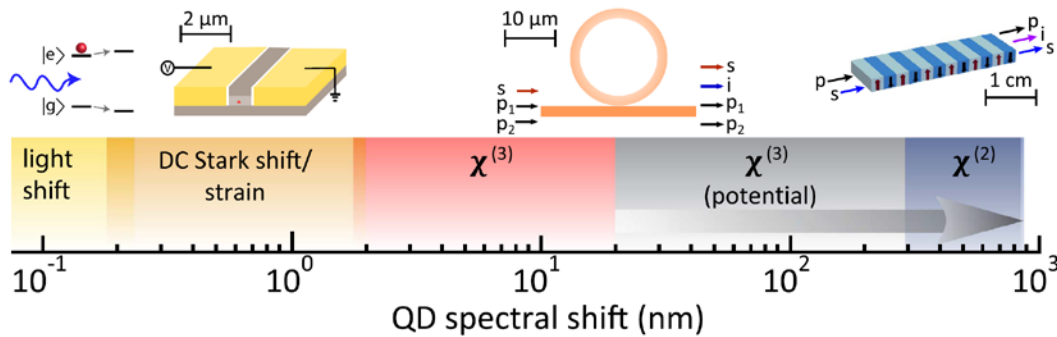
機械振動による制御



[Nature Phys. **11**, 820 \(2015\) Barfuss *et al.*](#)

(Reviews) [Appl. Phys. Lett. **117**, 230501 \(2020\) Wang & Lekavicius](#) [J. Opt. **19**, 033001 \(2017\) Lee *et al.*](#)

光ファイバ通信との親和性

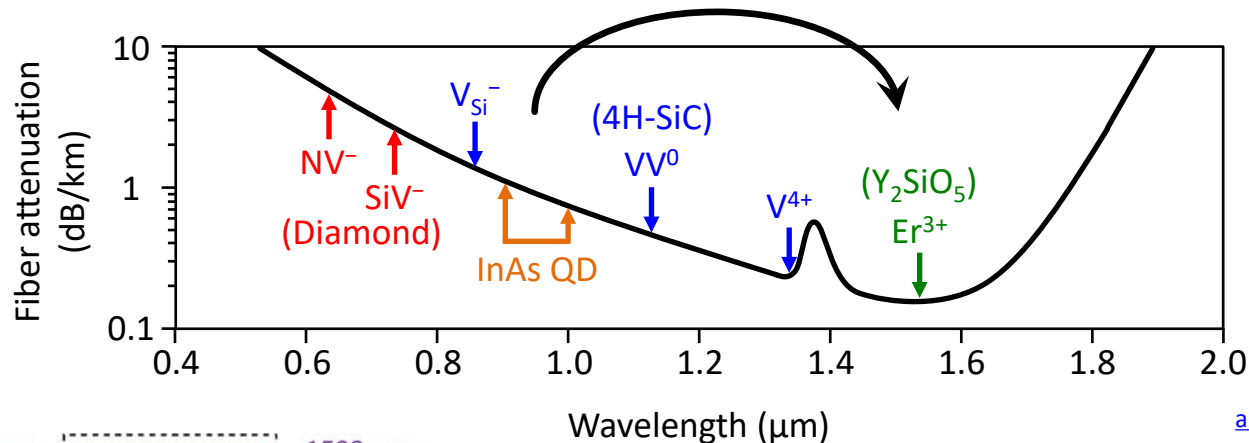


PPLN(周期的分極反転ニオブ酸リチウム)

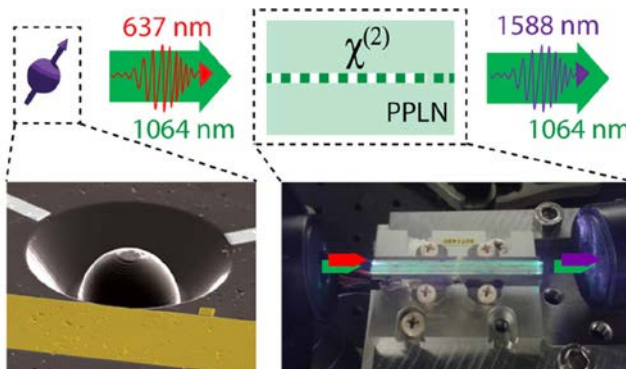
[Eur. Phys. J. D 18, 155 \(2002\) Tanzilli et al.](#)

[Optica 6, 563 \(2019\) Singh et al.](#)

周波数下方変換(FDC)



[arXiv:2010.16395 Wolfowicz et al.](#)



$$(637 \text{ nm})^{-1} - (1064 \text{ nm})^{-1} = (1588 \text{ nm})^{-1}$$

(QD, spin-photon entanglement via FDC) [Nature 491, 421 \(2012\) De Greve et al.](#)

(QD, 2-photon interference at telecom wavelength) [Nature Commun. 6, 8955 \(2015\) Yu et al.](#)

(NV, FDC) [Phys. Rev. Appl. 9, 064031 \(2018\) Dréau et al.](#)

(NV, spin-telecom-photon entanglement) [Phys. Rev. Lett. 123, 063601 \(2019\) Tchebotareva et al.](#)

まとめ

- **まとめ切れないほど沢山のスピン量子ビット候補がある**
 - Si系スピン量子ビット
 - ✓ ドナー(P, Sb, e, n)、アクセプター
 - ✓ MOS量子ドット
 - ✓ Si/SiGe量子ドット
 - ✓ Ge量子ドット
 - 光学活性スピン量子ビット
 - ✓ InAs自己形成量子ドット(e, h)
 - ✓ ダイヤモンド中のNV^{-/0}, SiV^{-/0}, GeV⁻, SnV⁻, PnV⁻, etc.
 - ✓ SiC(ポリタイプ多数)中の色中心(V_{Si}⁻, VV⁰, V⁴⁺, etc.)
 - ✓ 希土類イオン(YVO:Yb³⁺, YSO:Er³⁺, YAG:Ce³⁺, YSO:Eu³⁺, etc.)
 - ✓ 分子(無数?)
 - ... and more
- **スピン初期化・制御・測定方法も多様**
- **集積化にはSiが有利だが、量子ビットごとの特性を活かすことが大事**
 - 役割分担 → ハイブリッド系