

スピン量子コンピューティング

阿部 英介

理化学研究所 量子コンピュータ研究センター



第20回スピントロニクス入門セミナー(ウェブ開催)

2022年3月29日(火)



創発物性科学研究センター



量子コンピュータ研究センター

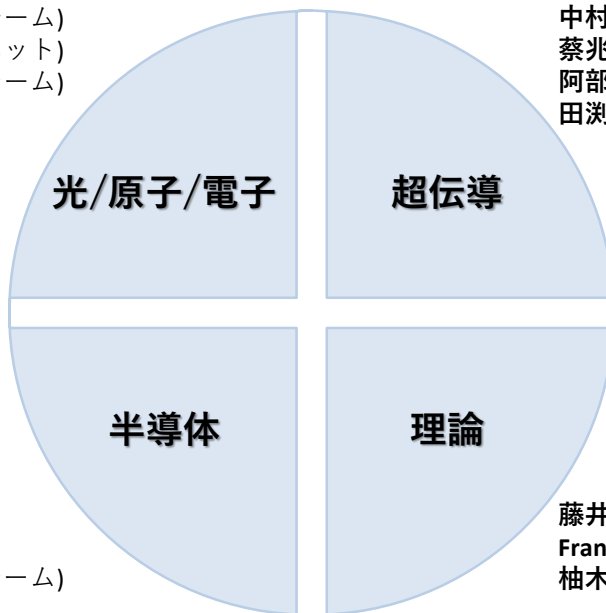


<https://rqc.riken.jp/>

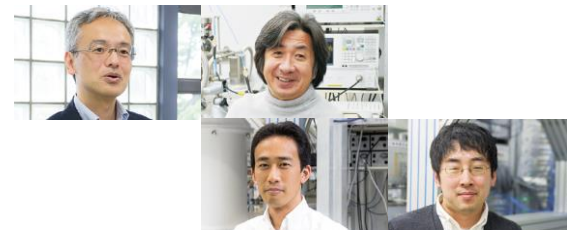
野口篤史(ハイブリッド量子回路研究チーム)



古澤明(光量子計算研究チーム)
福原武(量子多体ダイナミクス研究ユニット)
川上恵里加(浮揚電子量子情報理研白眉研究チーム)



中村泰信(超伝導量子エレクトロニクス研究チーム)
蔡兆申(超伝導量子シミュレーション研究チーム)
阿部英介(超伝導量子エレクトロニクス連携研究ユニット)
田淵豊(超伝導量子計算システム研究ユニット)



樽茶清悟(半導体量子情報デバイス研究チーム)



Daniel Loss(半導体量子情報デバイス理論研究チーム)



藤井啓祐(量子計算理論研究チーム)
Franco Nori(量子情報物理理論研究チーム)
柚木清司(量子計算科学研究チーム)



量子技術

シリコン (2001-06@慶應 & 2010-11@オックスフォード)
超伝導量子回路 (2019- @理研)

精密工学会誌 [85 \(12\), 1048 \(2019\)](#) 阿部 & 玉手
“超伝導量子ビット技術”

応用物理 [86 \(6\), 453 \(2017\)](#) 阿部 & 伊藤
“固体量子情報デバイスの現状と将来展望
—万能デジタル量子コンピュータの実現に向けて”

量子コンピューティング

自己形成量子ドット
(2011-15@スタンフォード)

ダイヤモンドNV中心
(2015-19@慶應)

量子ネットワーク

量子センシング

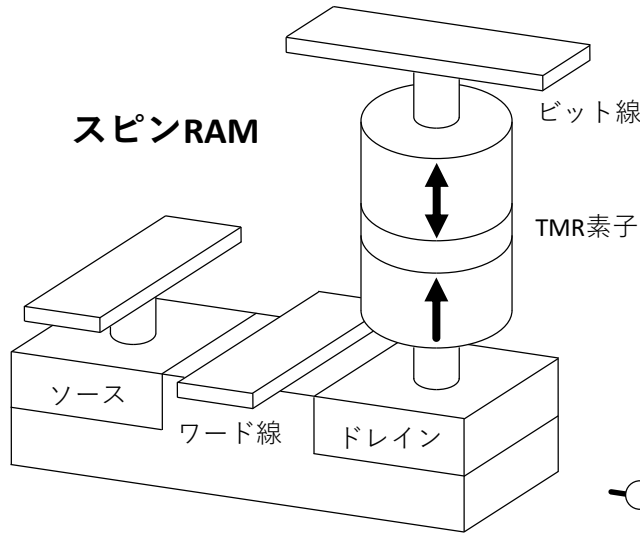
固体物理 [48 \(11\), 541 \(2013\)](#) 山本 & 阿部
“光制御量子ドットスピンを用いた量子情報システムの現状と将来展望”

スピントロニクスのための計算機ナノマテリアルデザイン
第11章 (2022年2月) 阿部
“ダイヤモンド量子スピントロニクス”

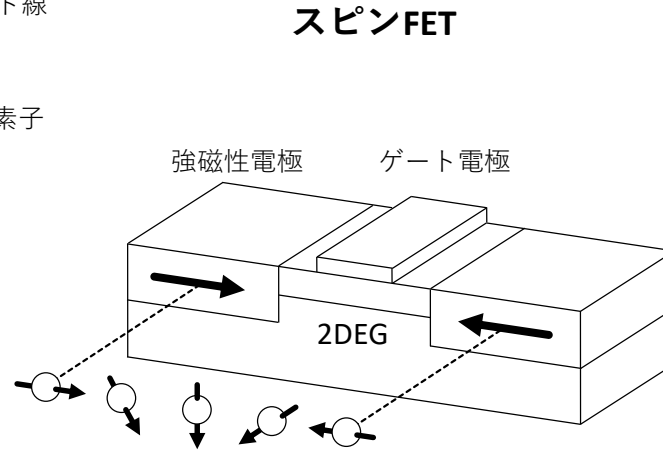
光技術コンタクト [51 \(5\), 10 \(2013\)](#) 阿部
“量子中継と量子ドットスピン-光子間量子もつれ”

J. Appl. Phys. [123, 161101 \(2018\)](#) Abe & Sasaki
“Tutorial: Magnetic resonance with nitrogen-vacancy centers in diamond
—microwave engineering, materials science, and magnetometry”

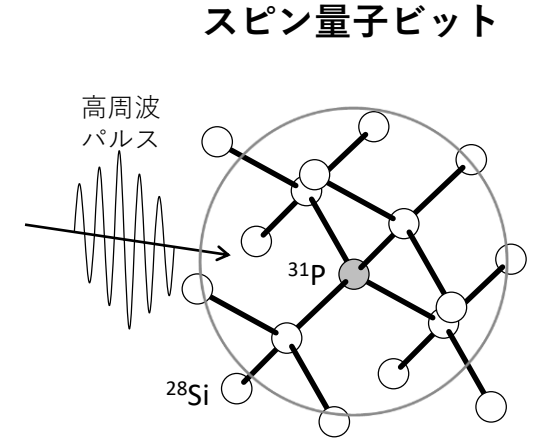
スピントロニクスデバイス



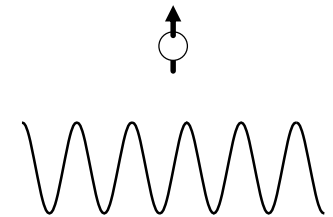
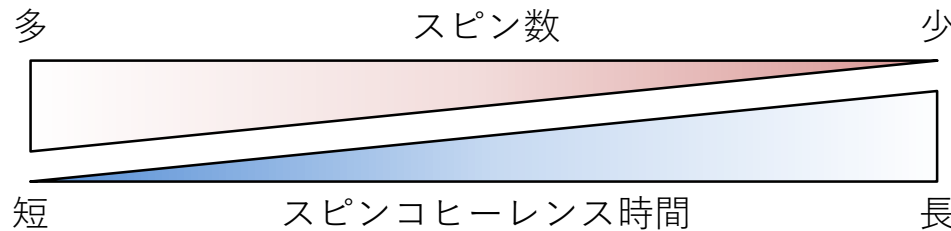
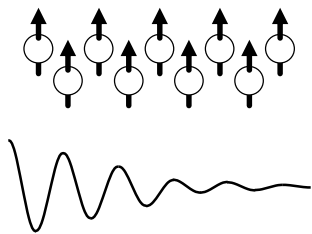
磁性体の磁化



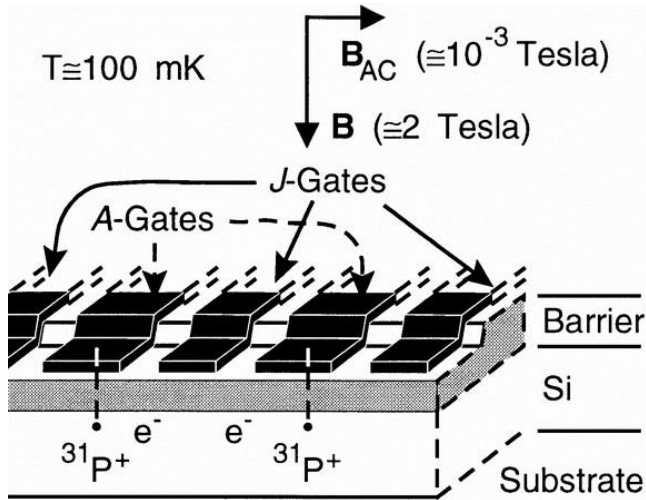
スピントロニクス相互作用を受ける伝導電子



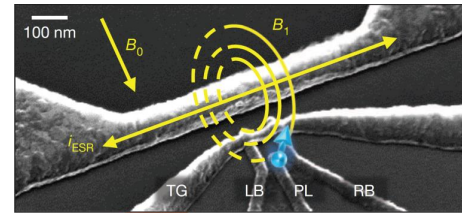
単一リン不純物の電子・核スピン



スピン量子コンピューティング

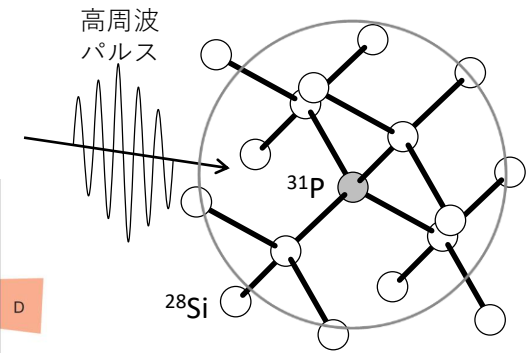


[Nature 393, 133 \(1998\) Kane](#)

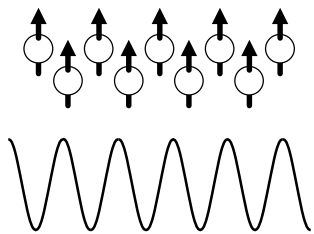


[Nature 489, 541 \(2012\) Pla et al.](#)

スピン量子ビット



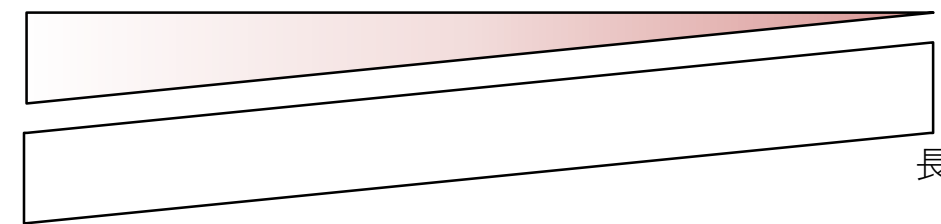
単ーリン不純物の電子・核スピン



多

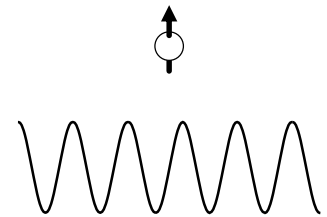
スピン数

少



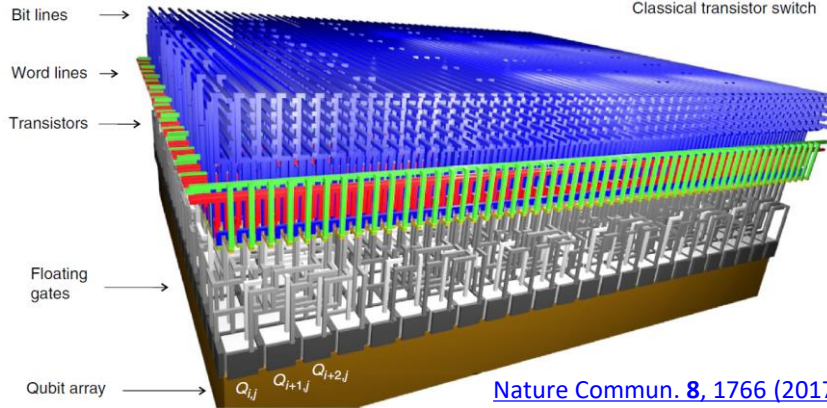
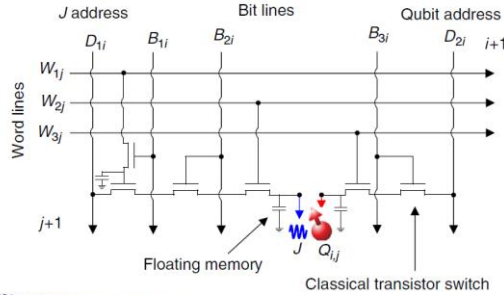
長

スピンコヒーレンス時間

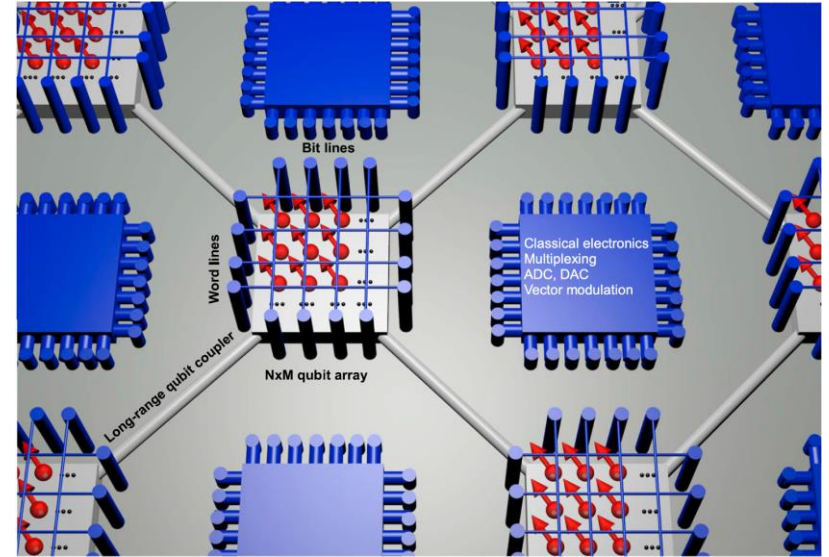


スピン量子コンピューティング

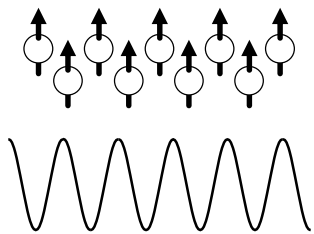
Input layer	SiO ₂
Transistor layer	Si
Interconnect layer	SiO ₂
Qubit layer	²⁸ Si



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



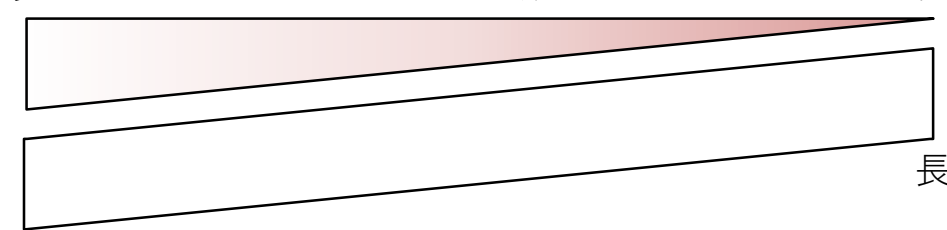
(Review) [npj Quant. Info. 3, 34 \(2017\) Vandersypen et al.](#)



多

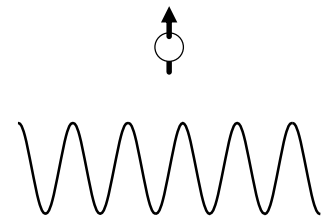
スピン数

少



長

スピンコヒーレンス時間



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](#)

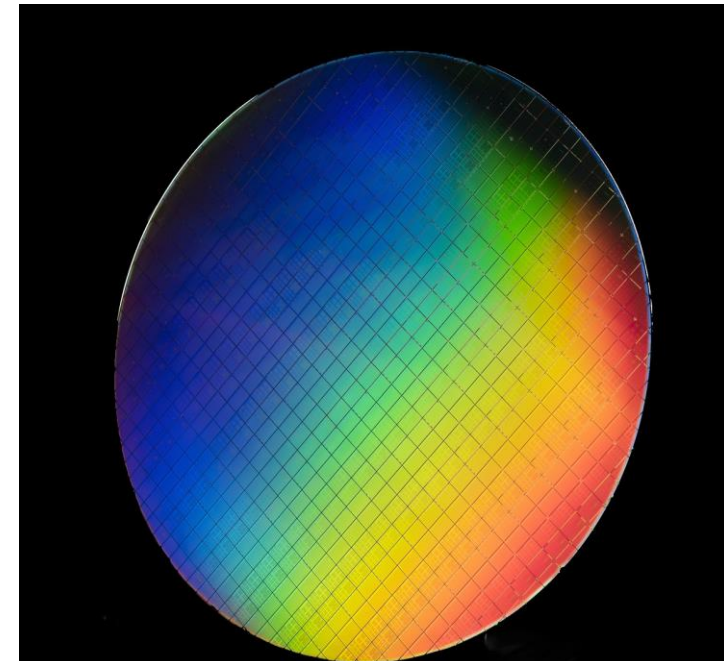
[Phys. Rev. A 57, 120 \(1998\) Loss & DiVincenzo](#)

[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

(Review) [Nature Electron. 4, 872 \(2021\) Gonzalez-Zalba et al.](#)
["Scaling silicon-based quantum computing using CMOS technology"](#)



©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

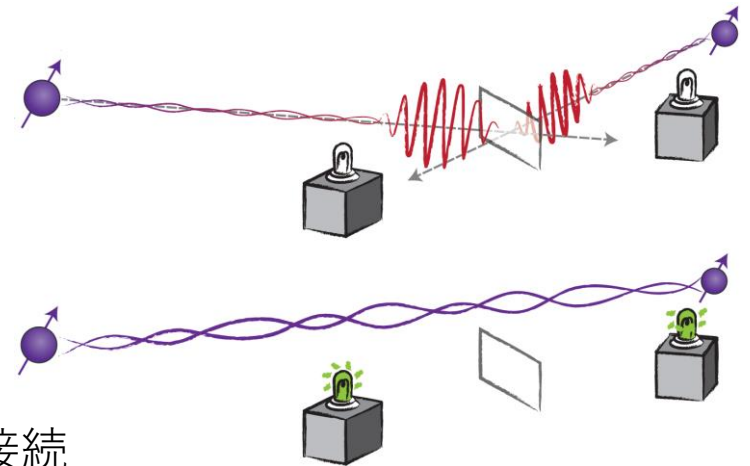


D. DiVincenzo

©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

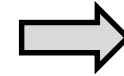
Daniel Gottesman^{*†} & Isaac L. Chuang[‡]

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

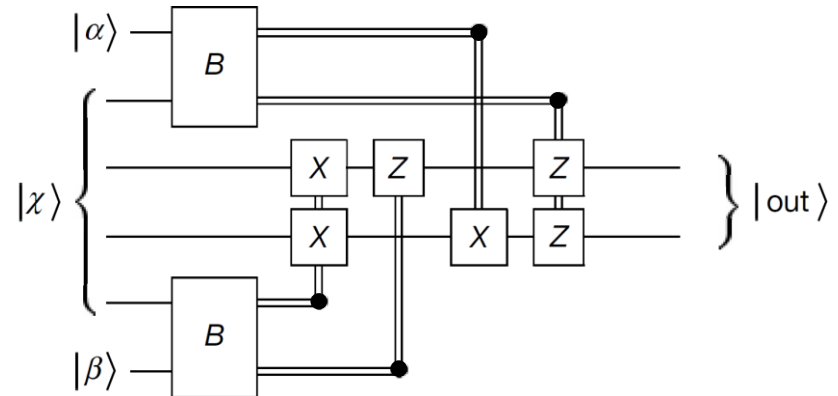
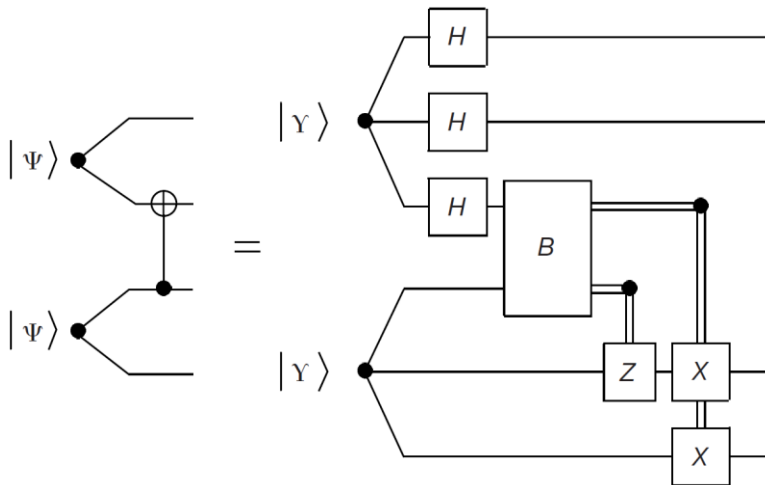
[†]Microsoft Research, One Microsoft Way, Redmond, Washington 87545, USA

[‡]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](#)

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

講義内容

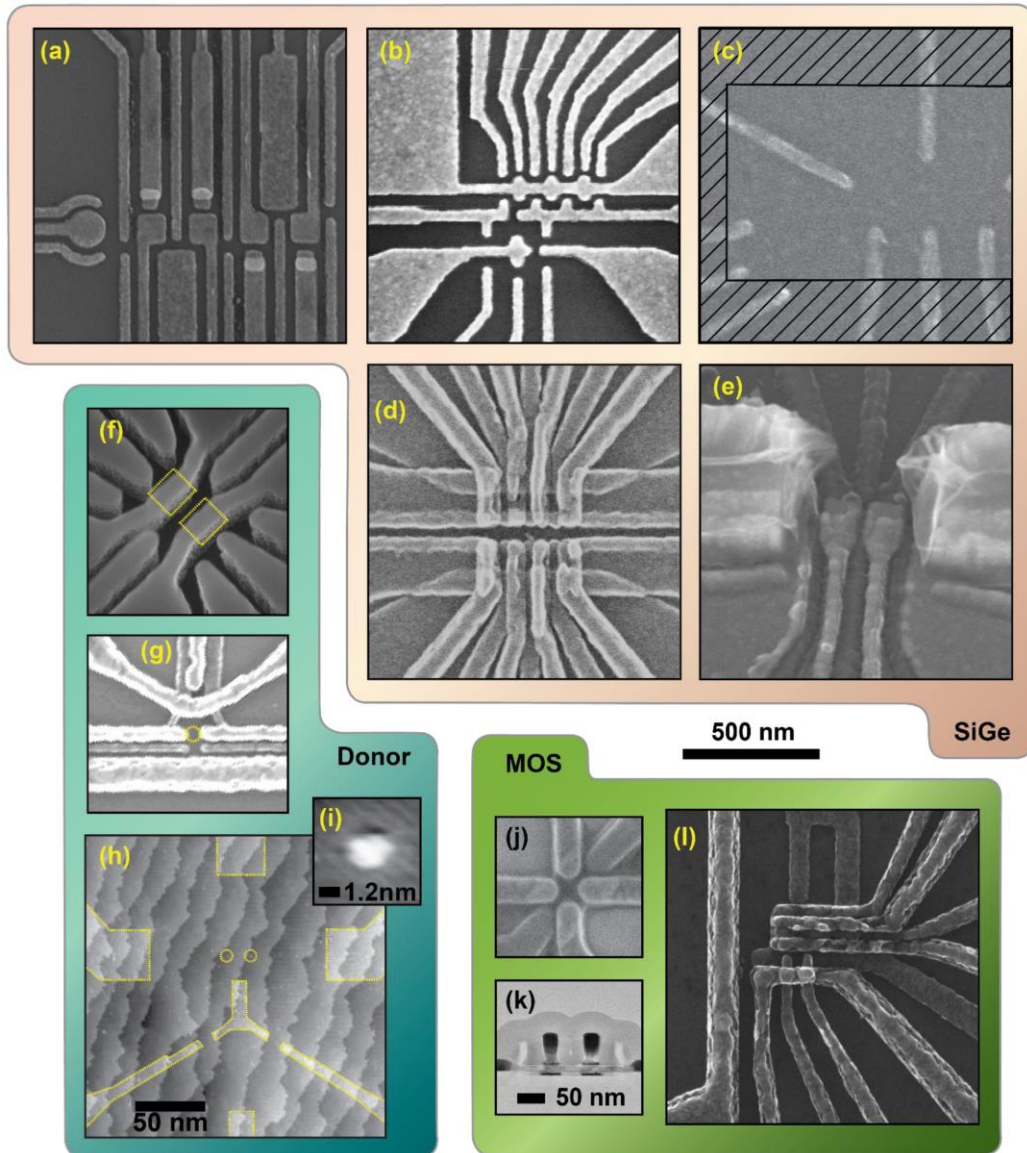
- イン트로ダクション
- **磁気共鳴の基礎**
 - 磁気共鳴と1量子ビット操作
 - T_1 と T_2 (シリコン中のリンドナーの例)
- **シリコンスピン量子ビット**
 - 単一リンドナー
 - MOS量子ドット
 - Si/SiGe量子ドット

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

(コメント2) **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。

(コメント3) 本講義の話題は、シリコンスピン量子ビットに限定します。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・SiV-中心など)については[第19回スピントロニクス入門セミナー“スピン量子コンピューティング”の講義スライド](#)P.49以降を参照して下さい。

シリコン量子ビットギャラリー



[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.](#)

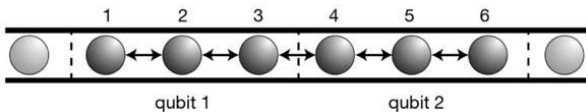
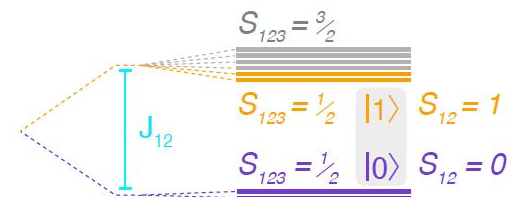
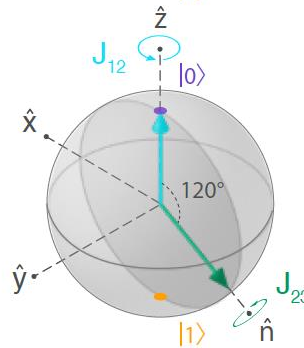
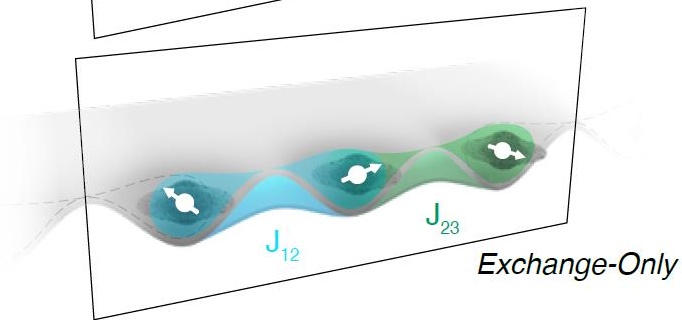
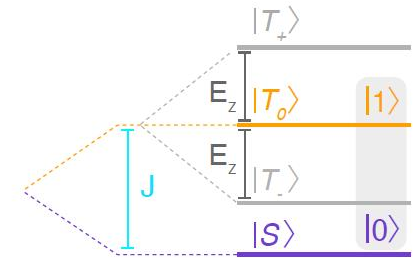
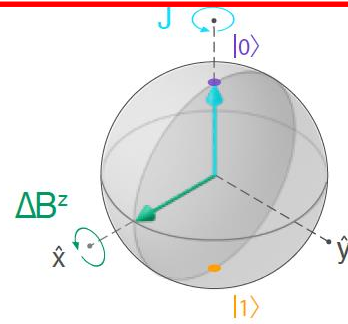
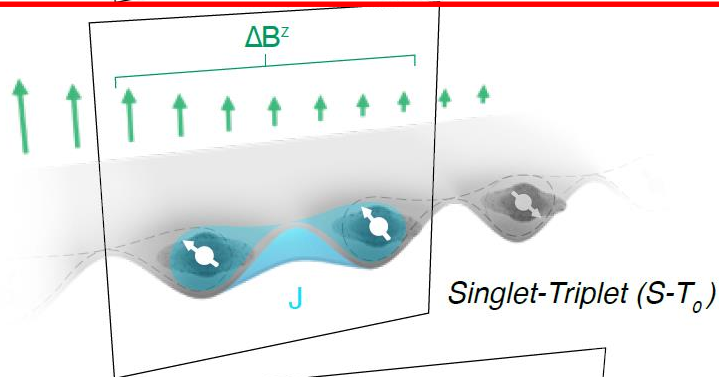
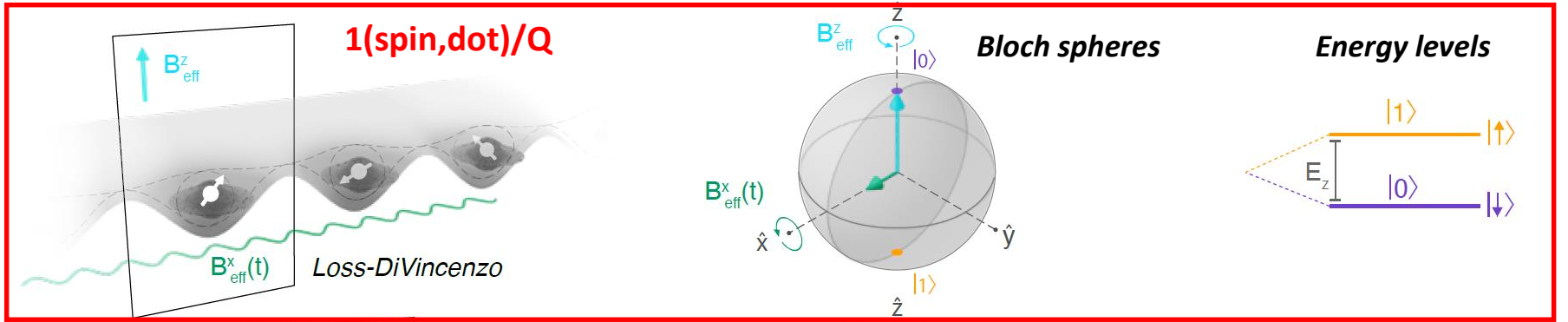
(h,i) By courtesy of T. F. Watson (CQC2T, UNSW)
[Phys. Rev. Lett. 115, 166806 \(2015\) Watson et al.](#)

(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.](#)

量子ドット系における量子ビットの表現



Nature **408**, 339 (2000) DiVincenzo *et al.*
 “Universal quantum computation with the exchange interaction”

(Review) arXiv:2112.08863 Burkard *et al.*
 “Semiconductor Spin Qubits”

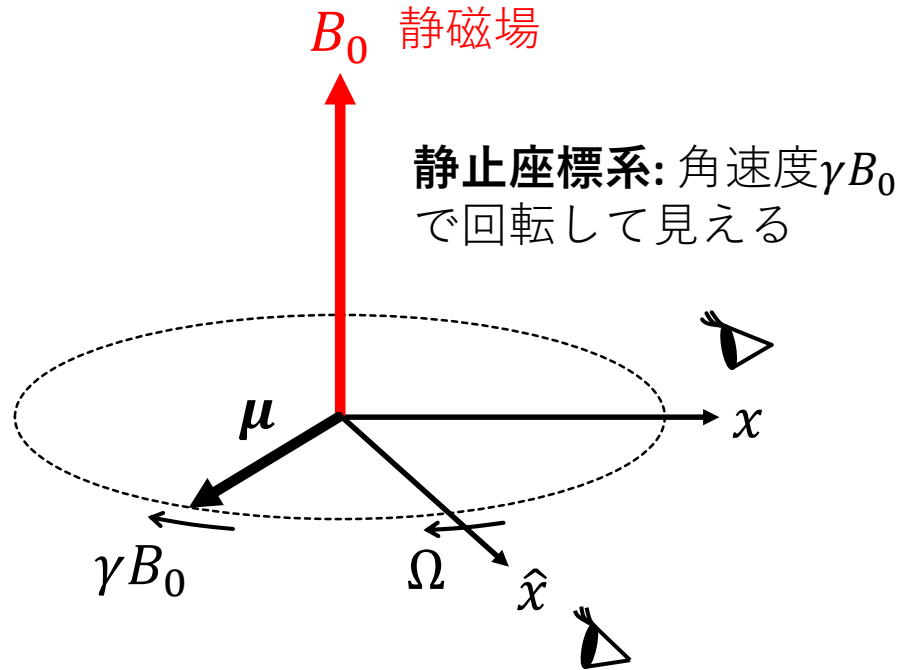
磁気共鳴

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: $g_e \mu_B$

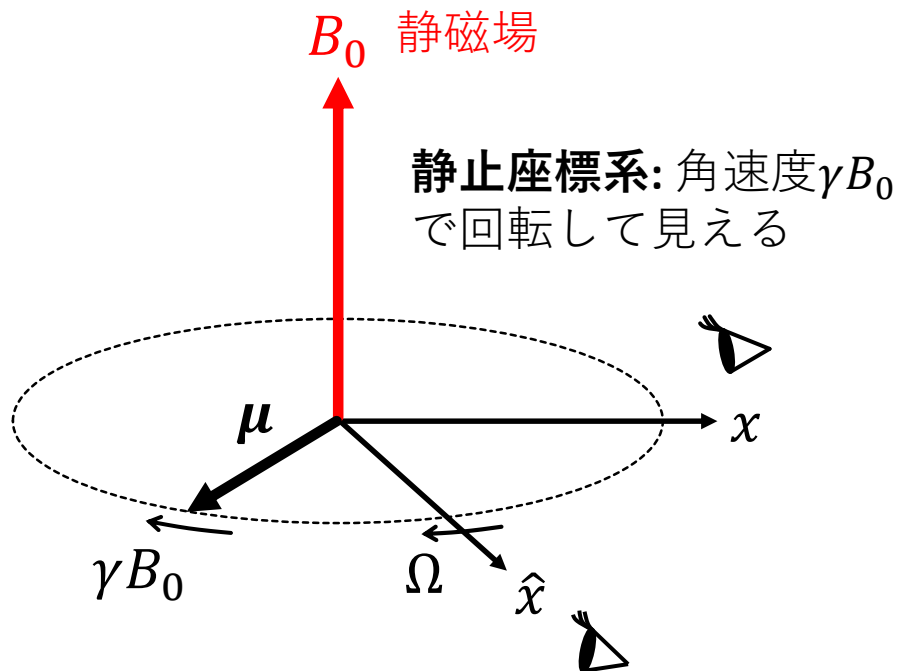
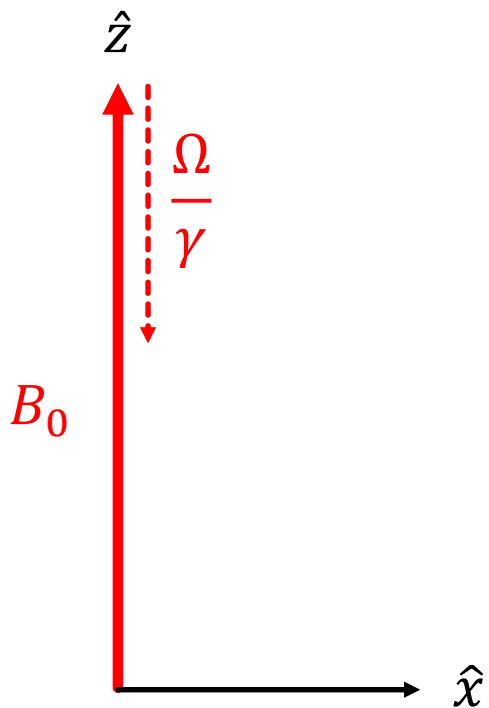
磁気モーメント: $\boldsymbol{\mu} = \gamma \mathbf{J}$



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??

磁気共鳴

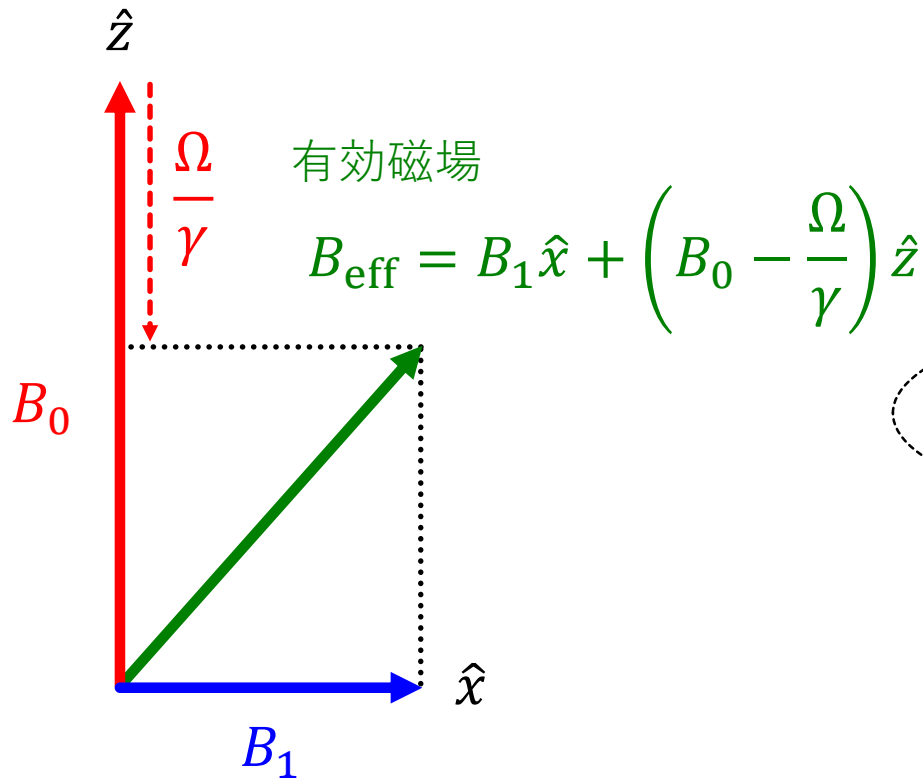


角速度 Ω で回転する座標系:
遅くなって見える...なぜ??

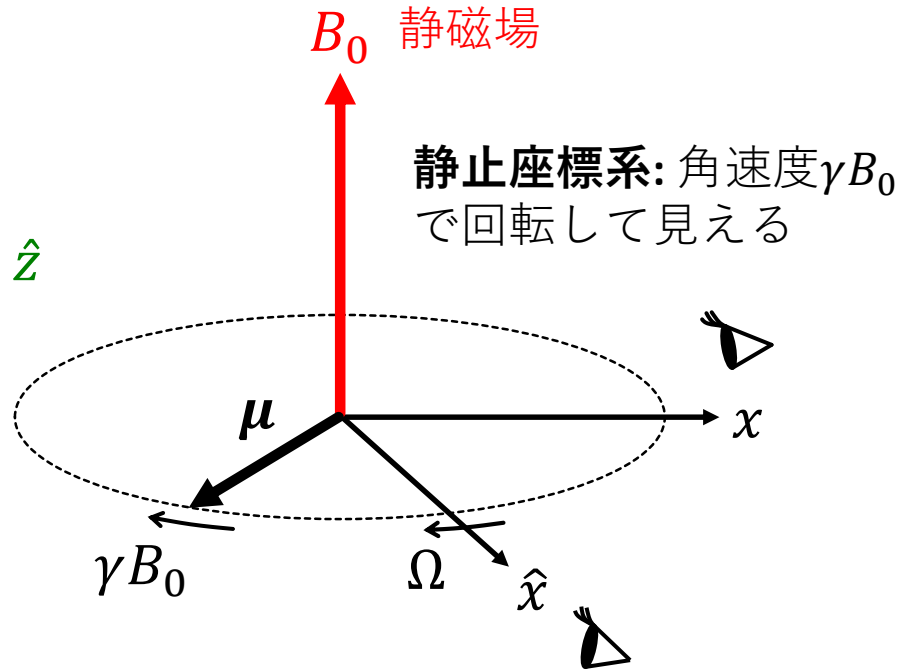


z 方向の磁場が弱くなったから

磁気共鳴



xy 平面を角速度 Ω で回転する交流磁場



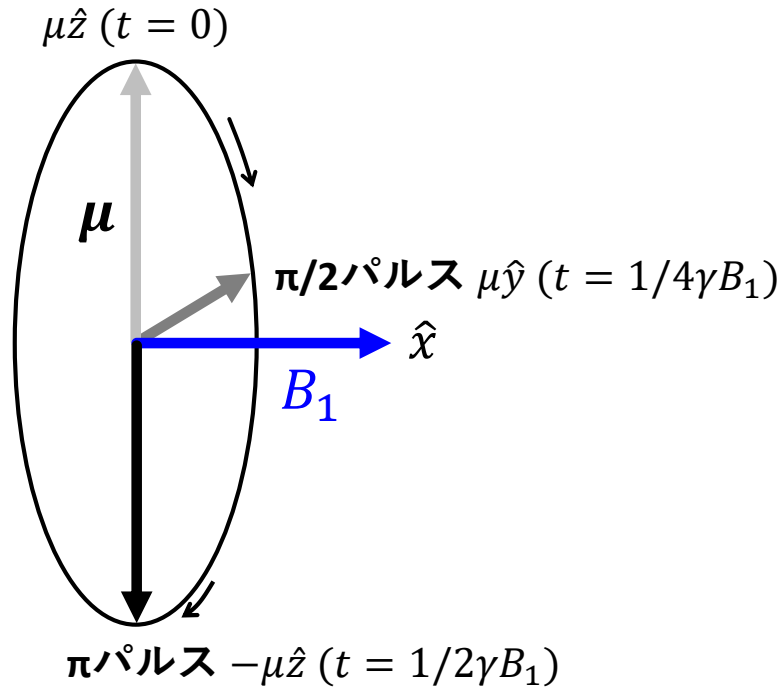
角速度 Ω で回転する座標系:
遅くなって見える...なぜ??



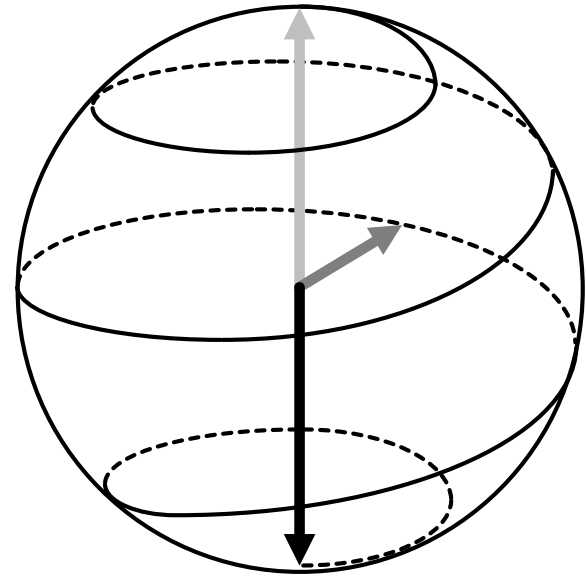
z 方向の磁場が弱くなったから

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



- 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
→ 任意のSU(2)操作を実行可能
- 静止座標系では \hat{z} 軸周りの回転(ラーモア歳差運動)が加わる
→ 1スピン/量子ビットの系では**ブロッホ球は回転座標系に一致させる**のが一般的
→ \hat{z} 軸周りの回転はソフトウェア処理で“仮想的に”実現可能

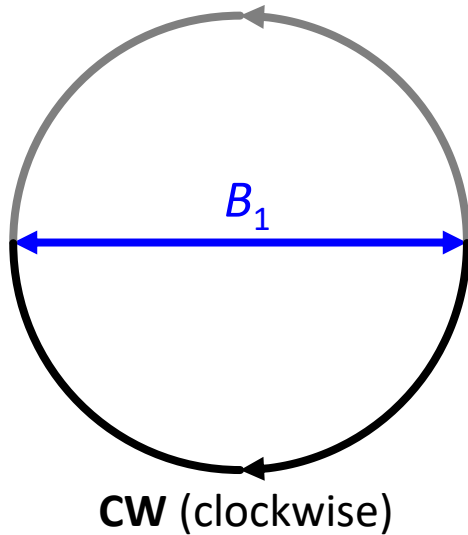
実験における回転座標系とは?

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)



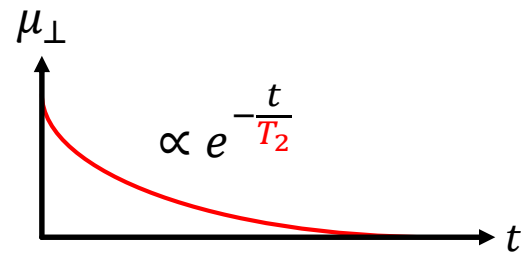
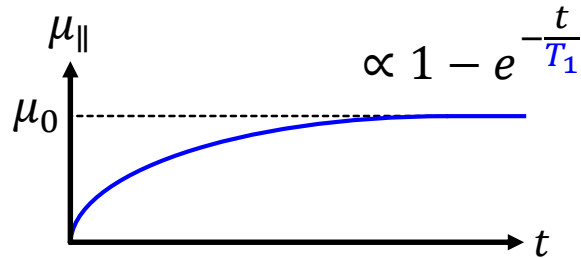
- 直線偏光 B_1 のCW成分はスピンと同方向に回転して磁気共鳴に寄与
- CCW成分は非共鳴なので無視できる(回転波近似, RWA)
- 検出系を発振器の周波数に同期することで回転座標系でスピンを“見る”ことになる
- 検出系の位相は途中で変えられる(仮想Zゲート)

緩和時間: T_1 と T_2

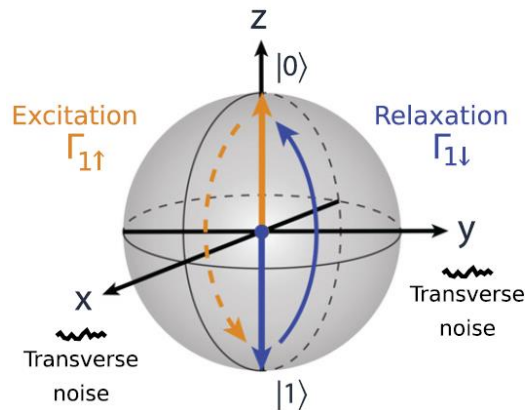
ブロッホ方程式

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

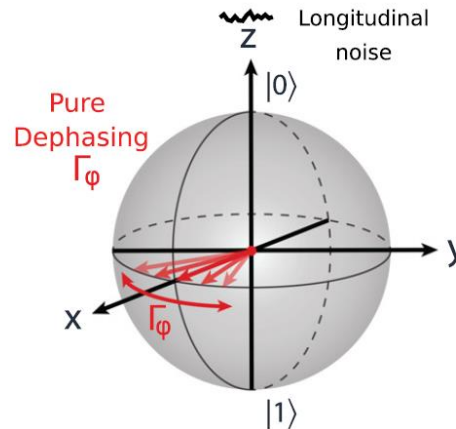
$$\frac{d\boldsymbol{\mu}}{dt} = \boldsymbol{\mu} \times \gamma \mathbf{B}_0 - \frac{\mu_{\parallel} - \mu_0}{T_1} \hat{\mathbf{z}} - \frac{\boldsymbol{\mu}_{\perp}}{T_2}$$



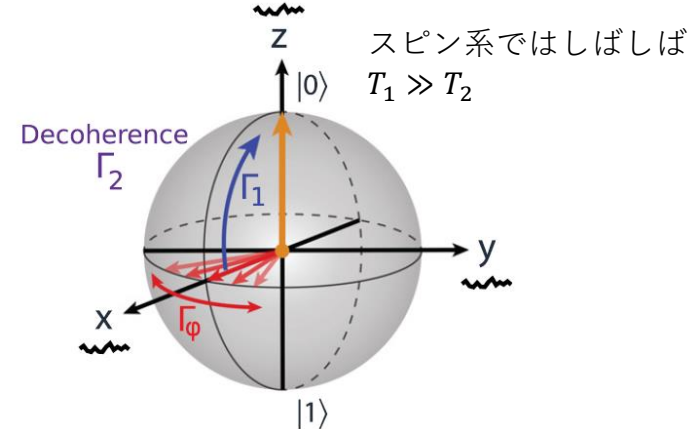
Longitudinal relaxation



Pure dephasing



Transverse relaxation

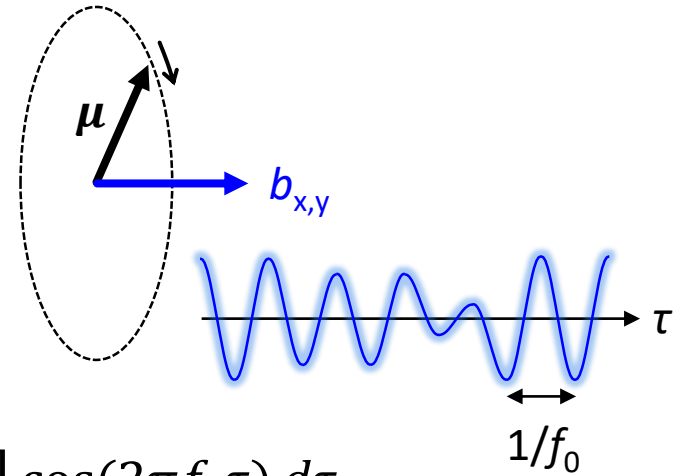


緩和時間: T_1 と T_2

ブロッホ方程式

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

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

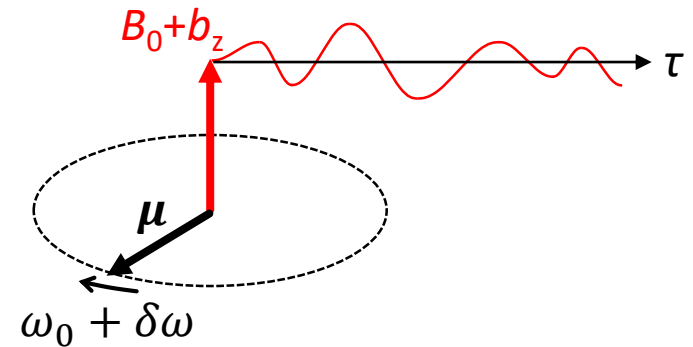


エネルギー緩和(スピンの向きを変える)

$$\frac{1}{T_1} = \frac{\gamma^2}{2} \int_{-\infty}^{\infty} [\langle b_x(\tau)b_x(0) \rangle + \langle b_y(\tau)b_y(0) \rangle] \cos(2\pi f_0 \tau) d\tau$$

位相緩和(歳差速度を変える)

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



→ インコヒーレントな過程

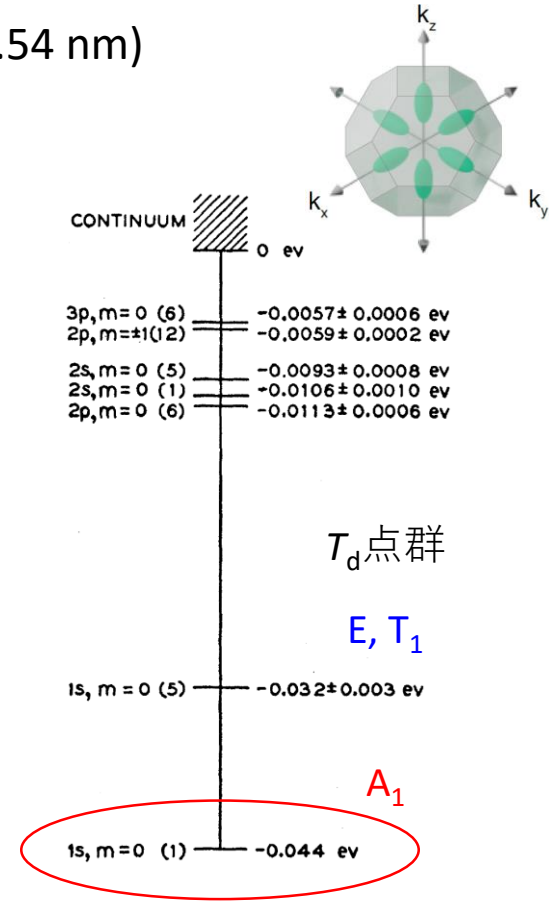
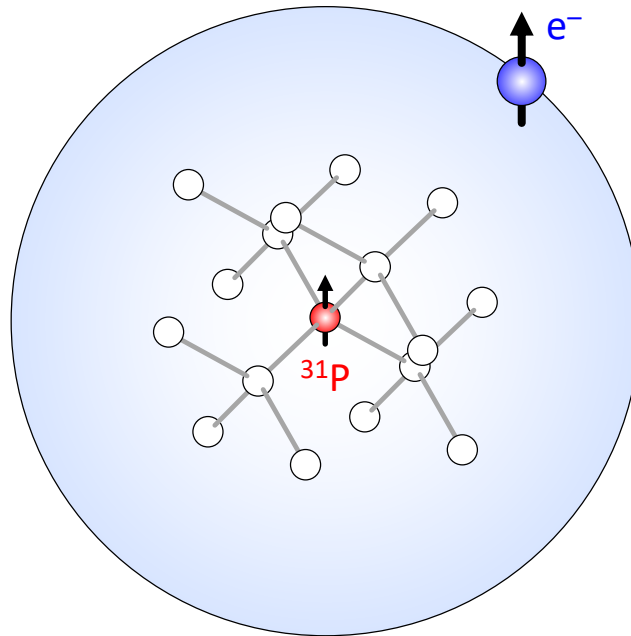
リンドナー

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

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



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

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

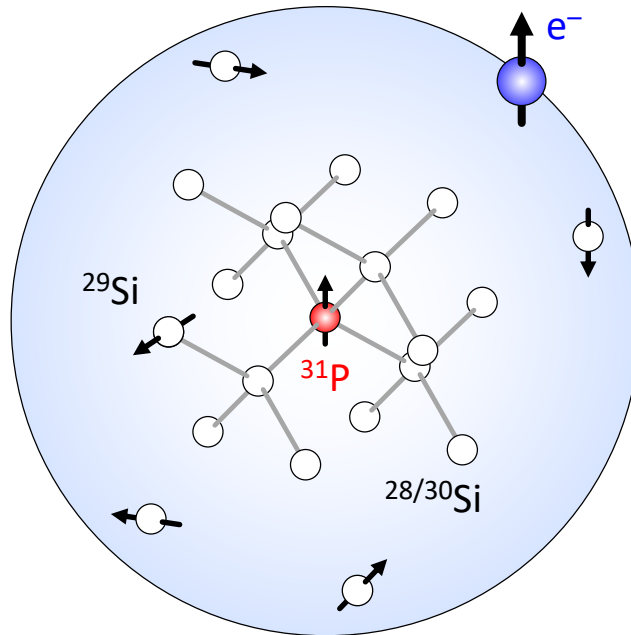
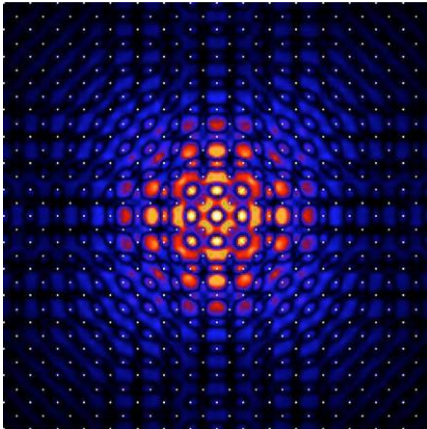
リンドナー

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)

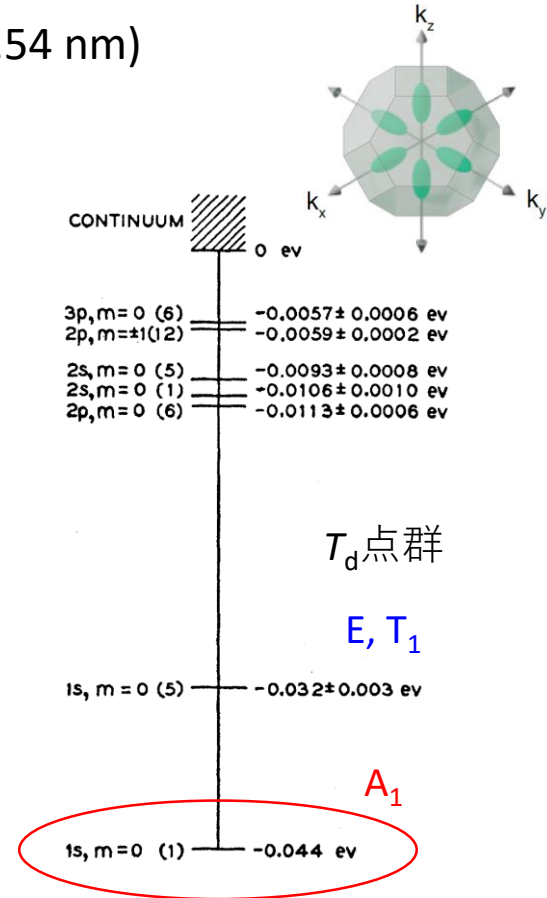
有効ボーア半径 $a_B^* = 3.2 \text{ nm}$ (格子定数 $a_{\text{Si}} = 0.54 \text{ nm}$)

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

[100]面(中心セル補正, 谷干渉)



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



[Phys. Rev. B 72, 085202 \(2005\) Wellard et al.](#)

(Exp.) [Nature Mater. 13, 605 \(2014\) Salfi et al.](#)

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

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

リンドナー

スピンハミルトニアン

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

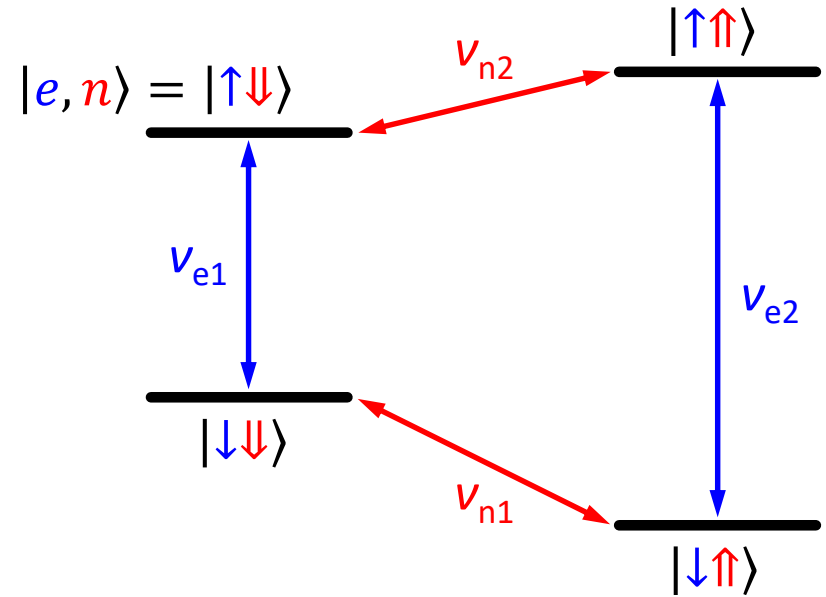
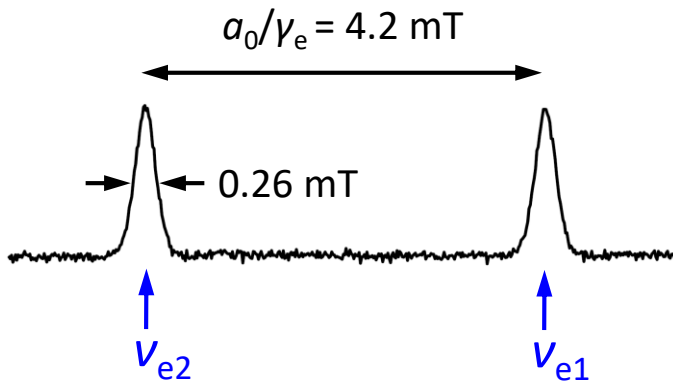
$$B_0 \approx 350 \text{ mT}$$

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

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

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

アンサンブル電子スピン共鳴(natSi、磁場掃引)



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

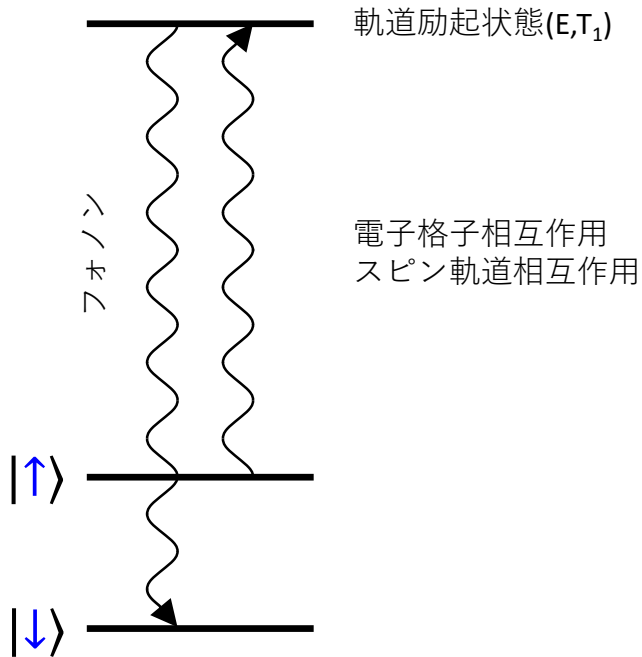
$$\nu_{e2} = \gamma_e B_0 + a_0/2$$

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

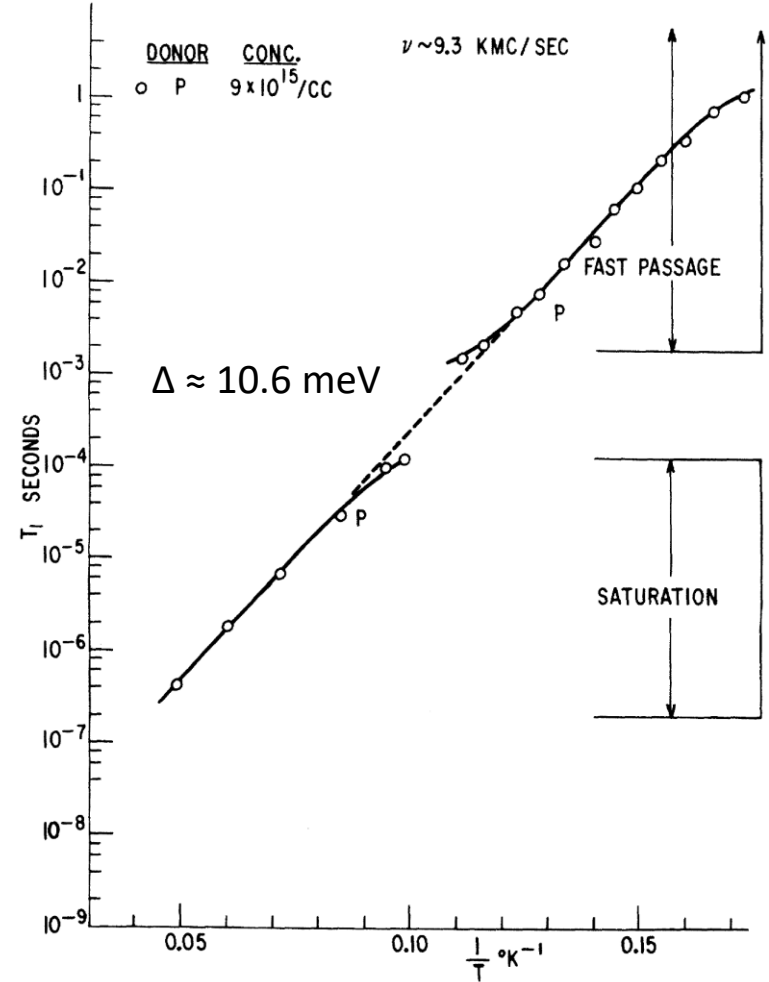
$$\nu_{n2} = a_0/2 - \gamma_P B_0$$

T_1 機構

オーバック過程

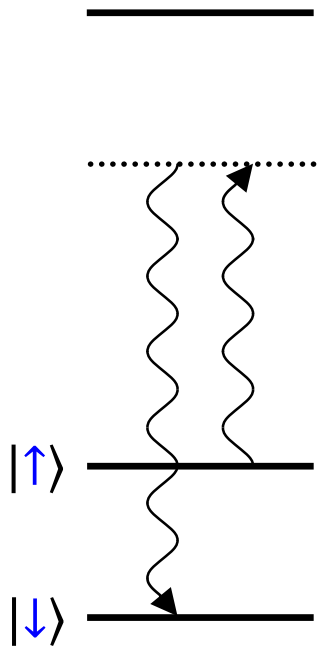


$$\frac{1}{T_1} \propto \exp\left(-\frac{\Delta}{k_B T}\right)$$



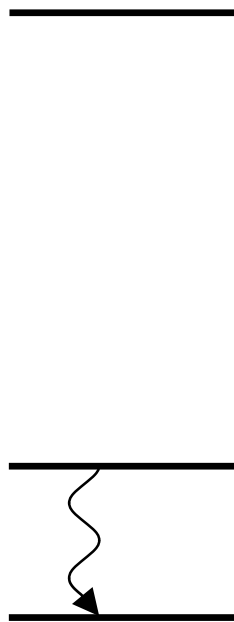
T_1 機構

ラマン過程

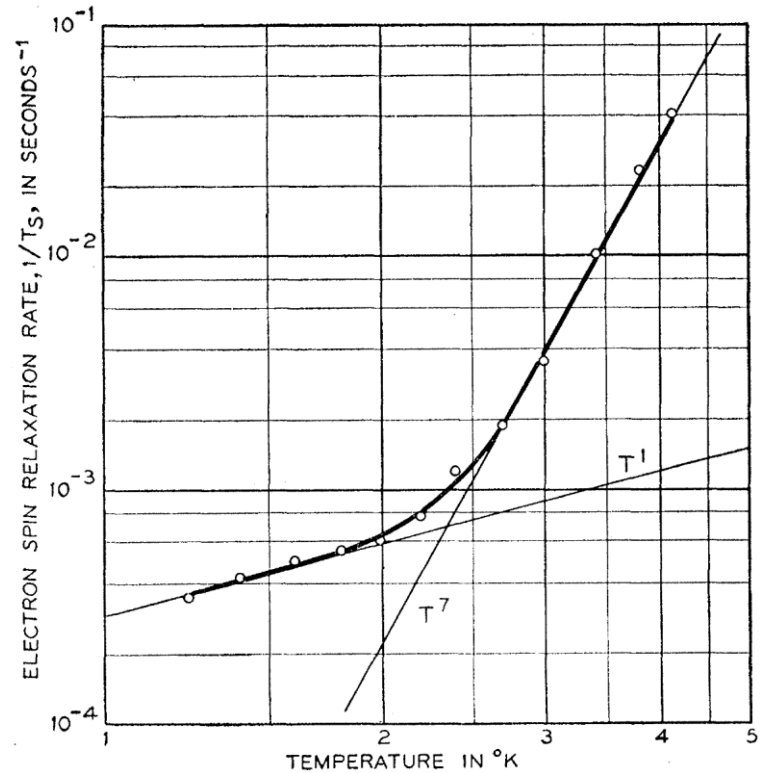


$$\frac{1}{T_1} \propto T^7$$

直接過程

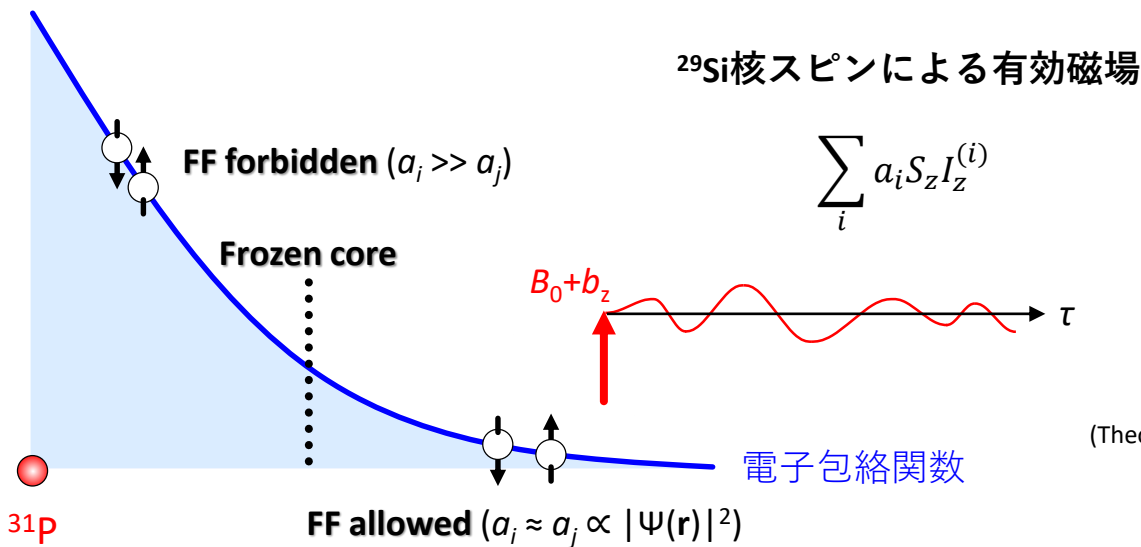
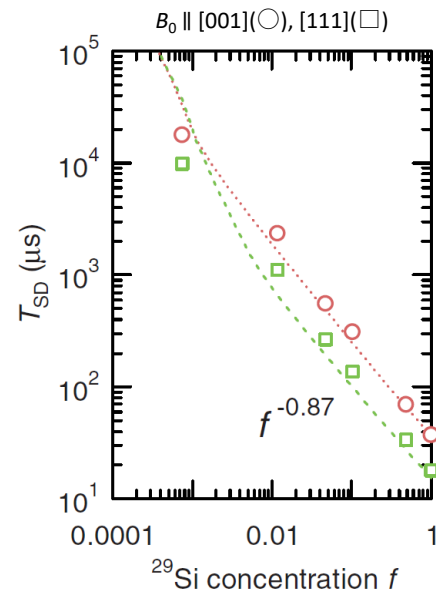
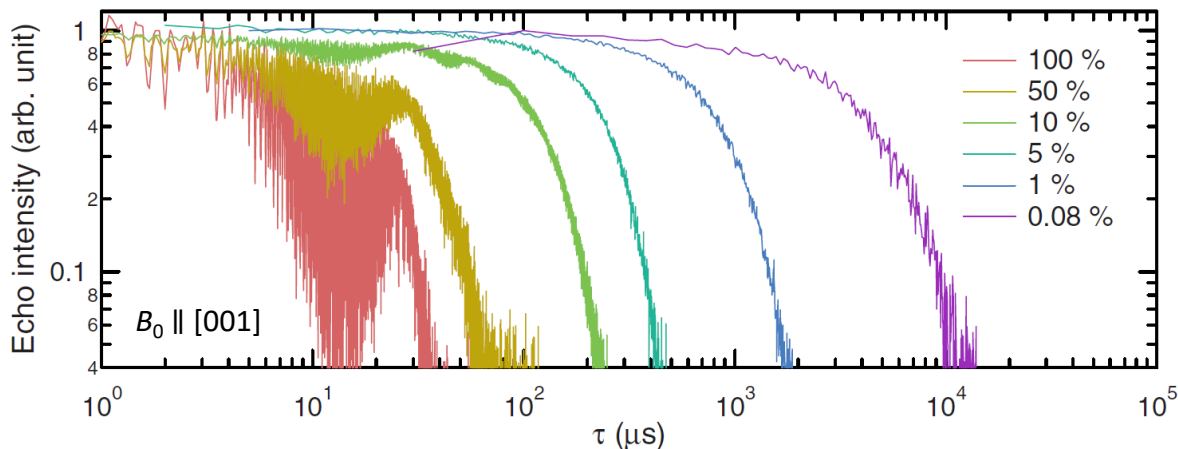


$$\frac{1}{T_1} \propto T$$

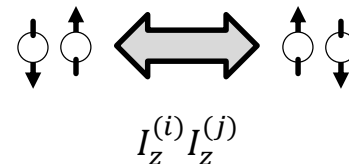


- 温度依存性はスピン(整数, 半整数)にも依存
- 詳細な理解は第一原理計算を用いる必要あり

T_2 機構



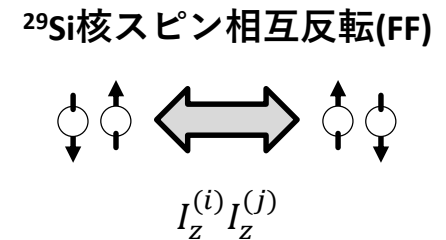
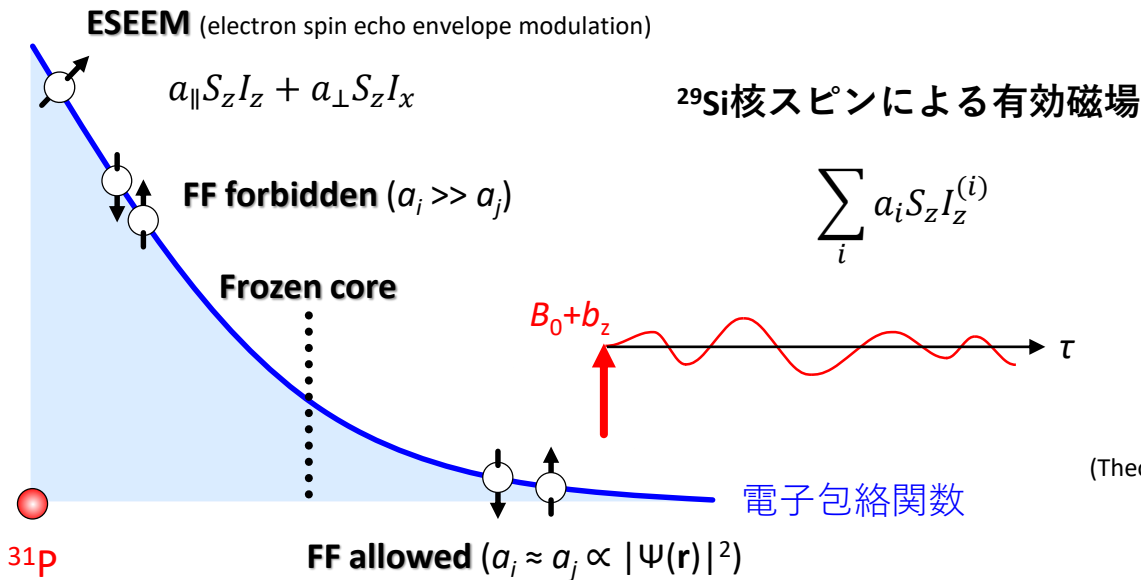
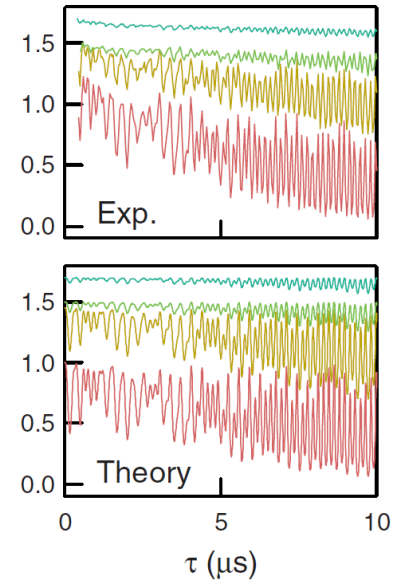
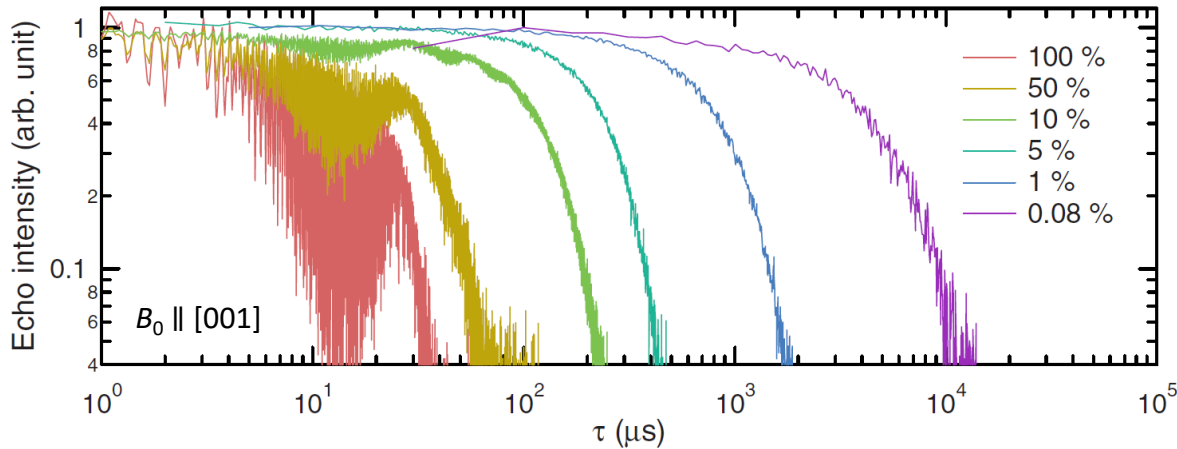
^{29}Si 核スピン相互反転(FF)



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

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

T_2 機構



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

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

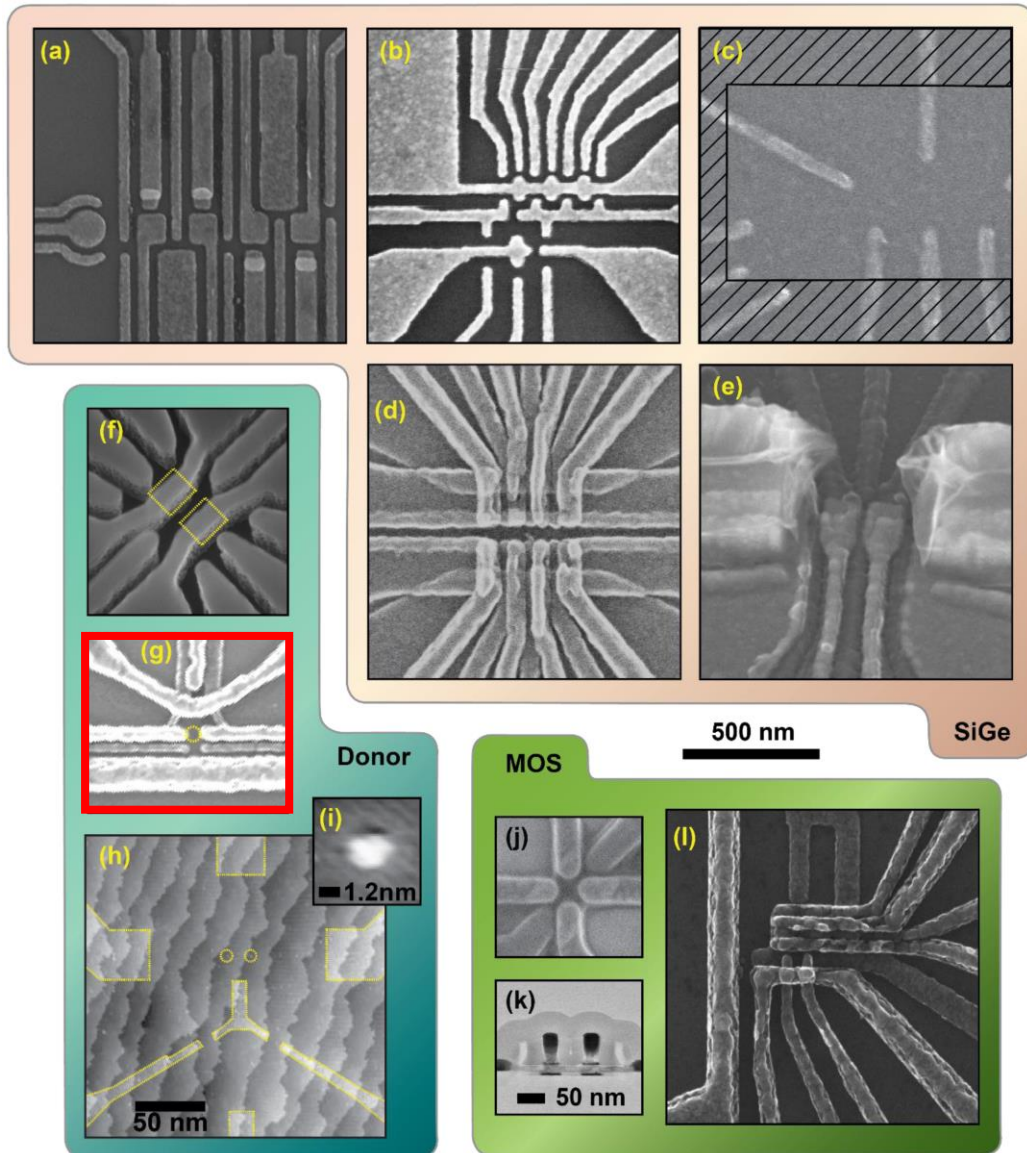
(ESEEM) [Phys. Rev. B **70**, 033204 \(2004\) Abe et al.](#)

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

講義内容

- **イントロダクション**
- **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)
- **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

リンドナー



[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.](#)

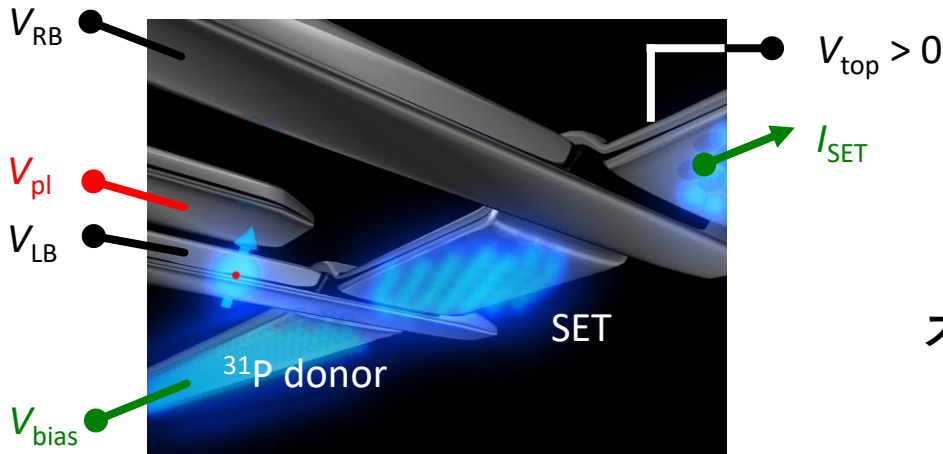
(j) By courtesy of Fernando Gonzalez-Zalba (Hitachi Cambridge)
[Appl. Phys. Lett. 108, 203108 \(2016\) Betz et al.](#)

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

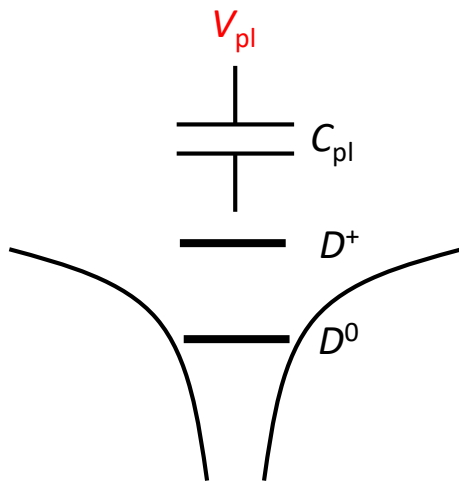
(l) By courtesy of Andrew Dzurak (UNSW)
[Nature 526, 410 \(2015\) Veldhorst et al.](#)

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



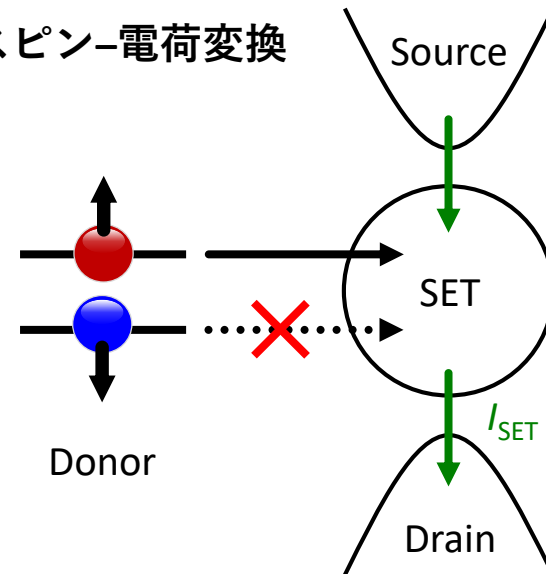
$$E(D^+) - E(D^0) = 45 \text{ meV}$$

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

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

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

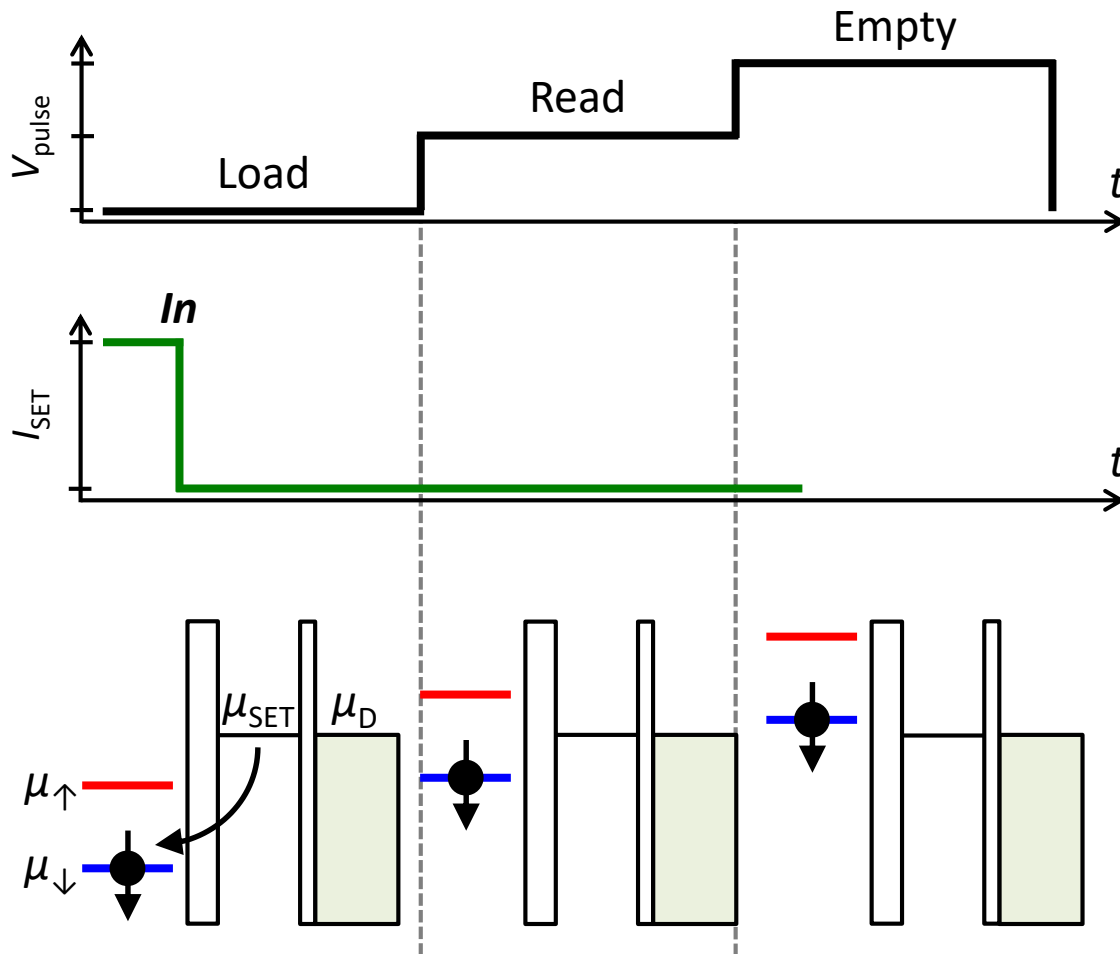
スピン-電荷変換



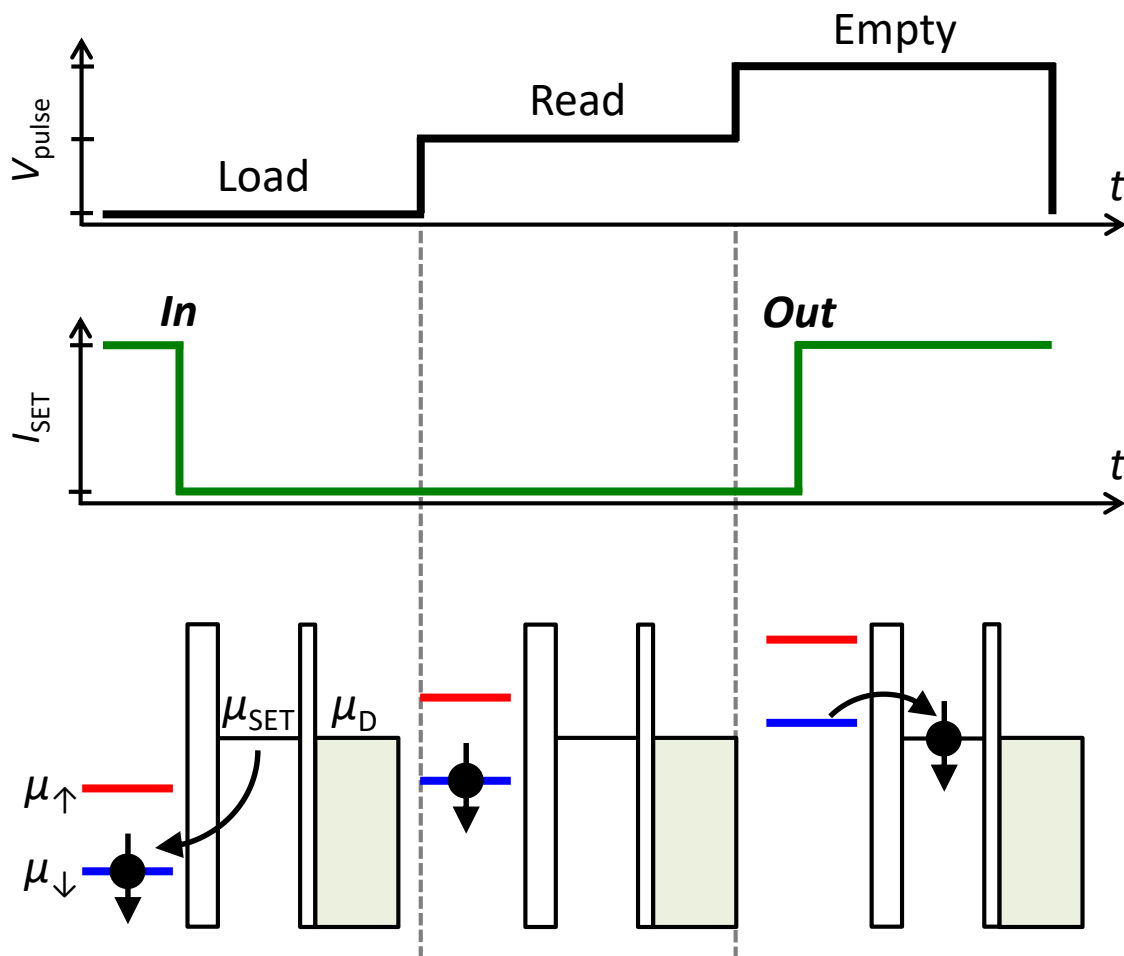
(Review) [Adv. Quant. Technol. 3, 2000005 \(2020\) Morello et al.](#)

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

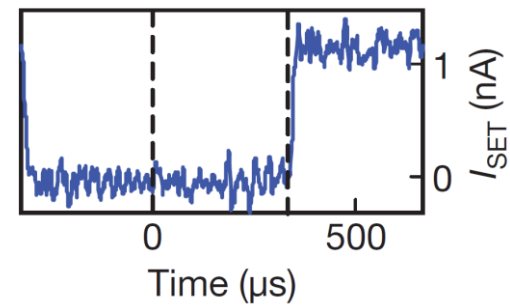
スピン測定(↓)



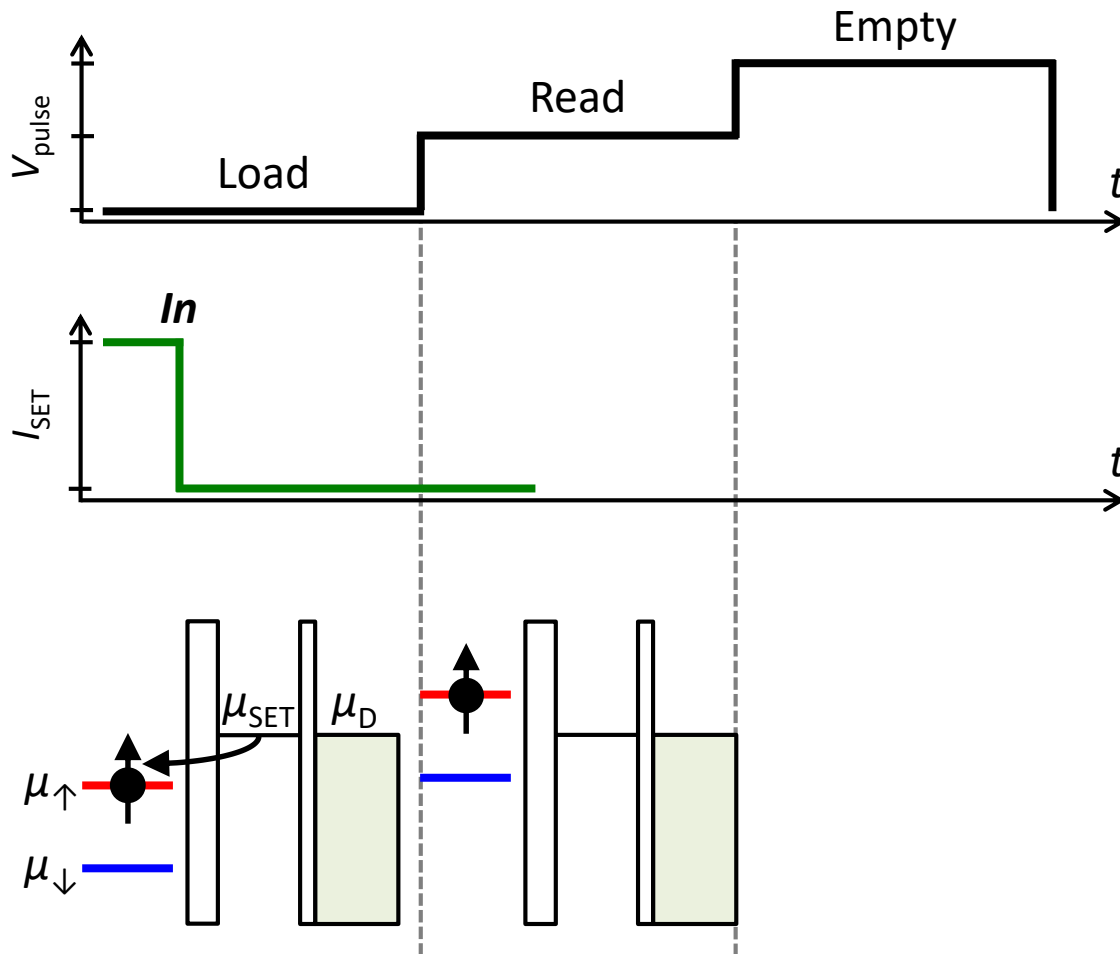
スピン測定(↓)



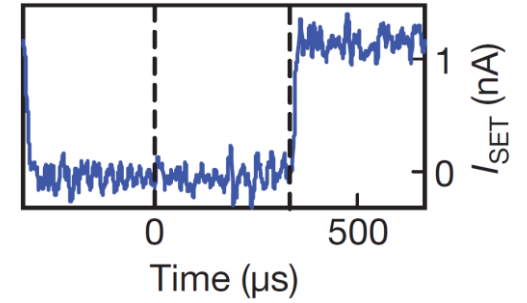
単発単一スピン測定



スピン測定(↑)



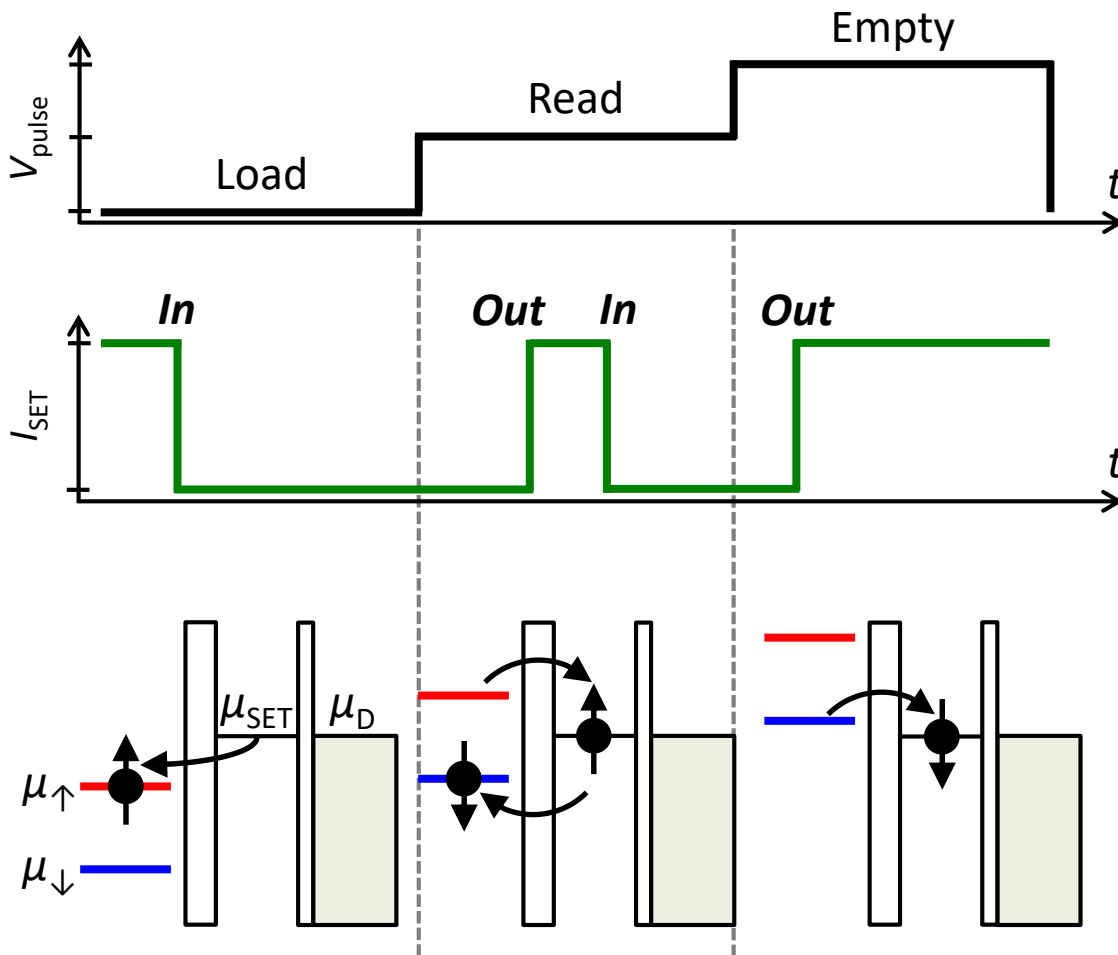
単発単一スピン測定



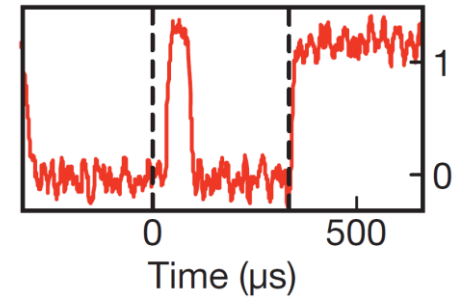
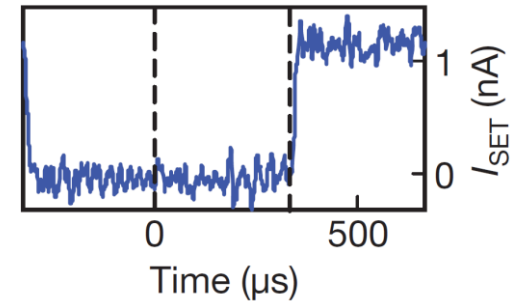
[Nature 467, 687 \(2010\) Morello et al.](#)

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

スピン測定(↑)



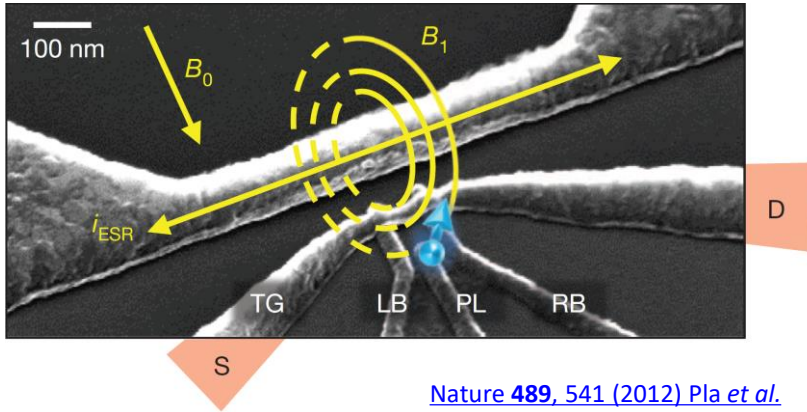
単発単一スピン測定



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

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

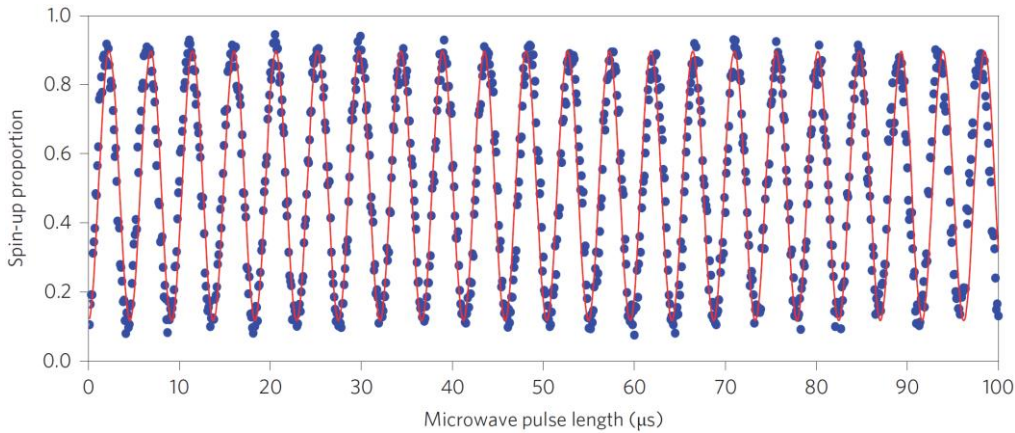
コヒーレント制御: ラビ振動



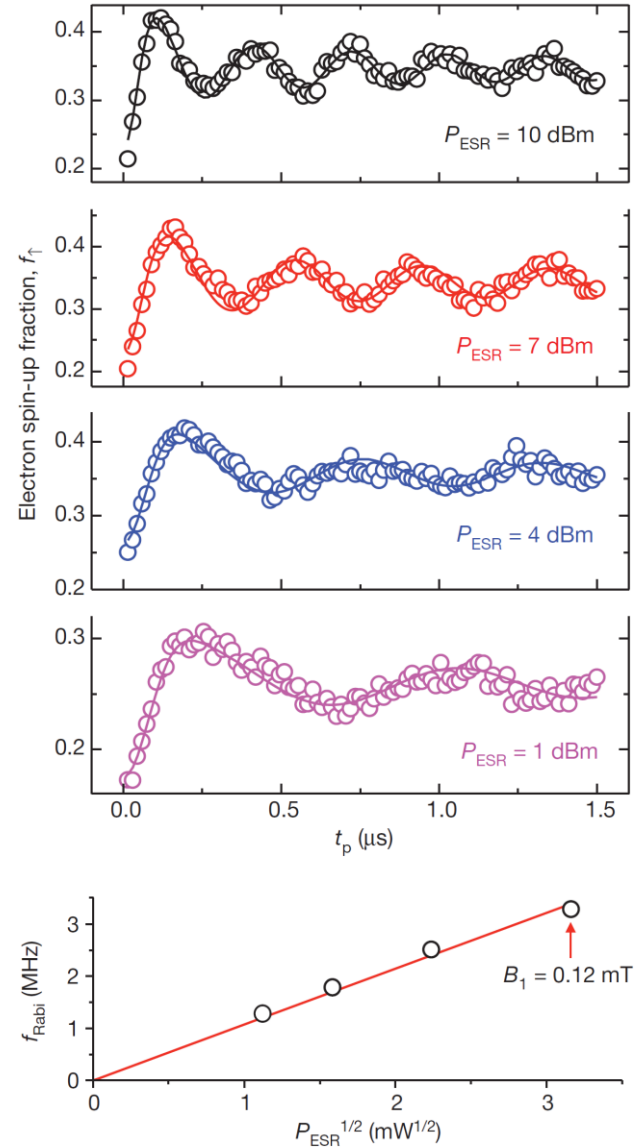
natSiデバイス

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

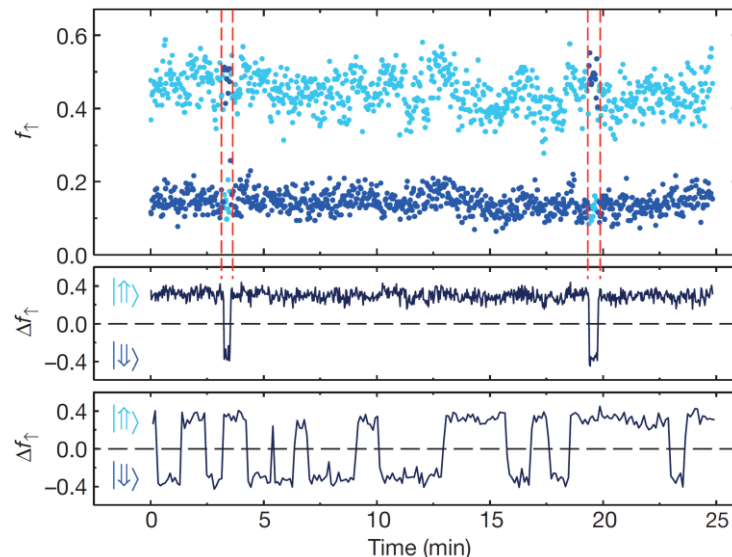
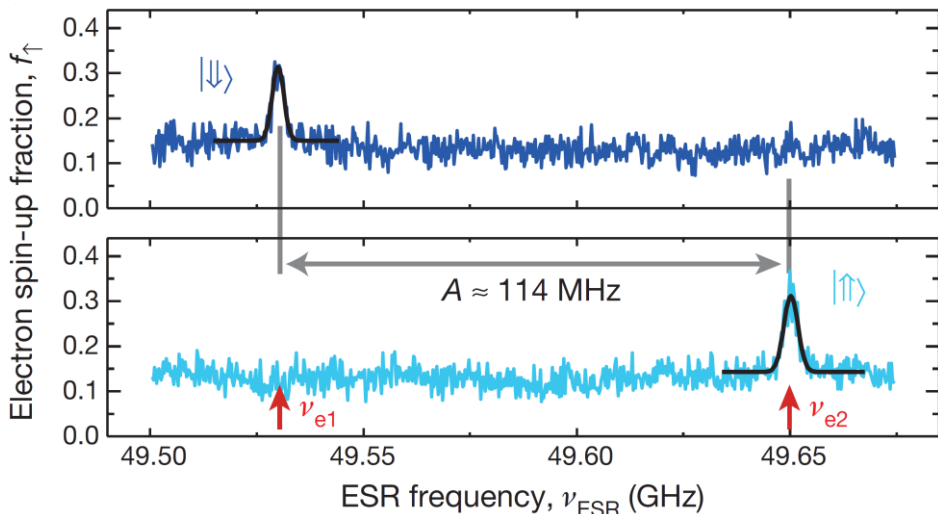
^{28}Si (99.92%)デバイス



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



単一核スピン測定



- 電子スピン遷移周波数 $\nu_{e1,2} = \gamma_e B_0 \mp a_0/2$ は核スピン状態に依存
- 電子スピン遷移によって核スピン状態は変わらない

→ 量子非破壊(quantum nondemolition, QND)測定

QND条件

$$H_{B_0 \gg a_0} = \gamma_e B_0 S_z - \gamma_P B_0 \underline{I_z} + a_0 \underline{S_z I_z} \quad \Rightarrow \quad [H_{\text{obs}}, H_{\text{int}}] = [I_z, S_z I_z] = 0$$

観測量 (Observable) 検出系との相互作用 (Interaction)

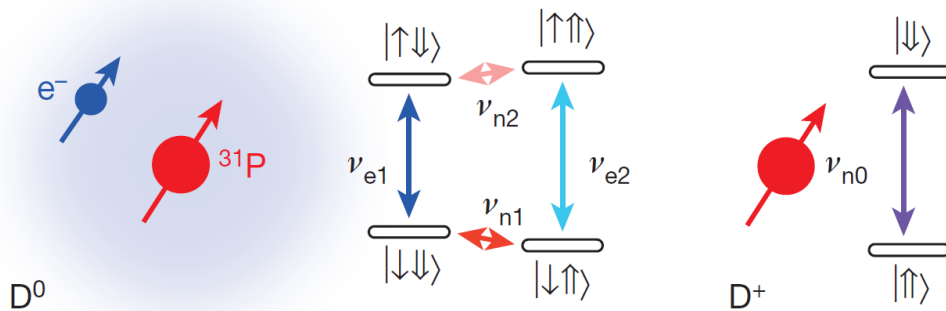
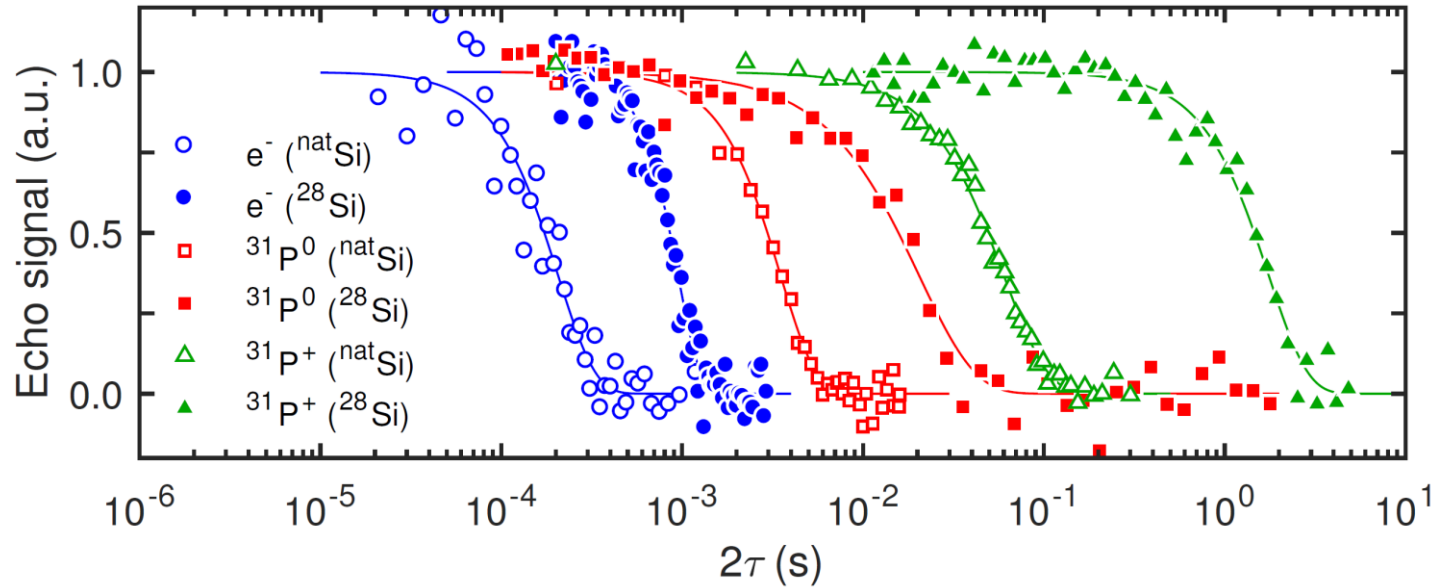
[Nature 496, 334 \(2013\) Pla et al.](#)

(NV center) [Science 329, 542 \(2010\) Neumann et al.](#)

[Rev. Mod. Phys. 90, 040503 \(2018\) Thorne "Nobel Lecture: LIGO and gravitational waves III"](#)

[Rev. Mod. Phys. 68, 1 \(1996\) Braginsky & Khalili "Quantum nondemolition measurements: the route from toys to tools"](#)

コヒーレンス



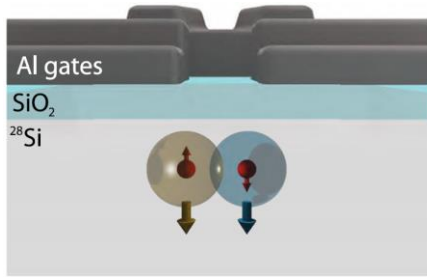
[Nature 489, 541 \(2012\) Pla et al.](#)

[Nature 496, 334 \(2013\) Pla et al.](#)

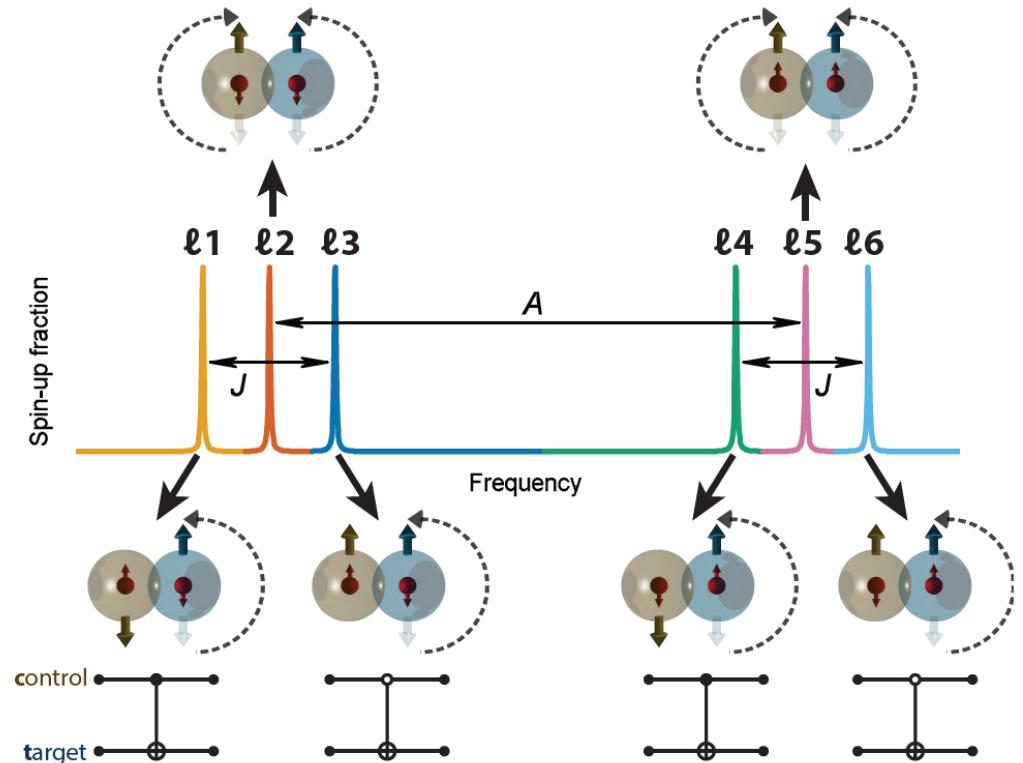
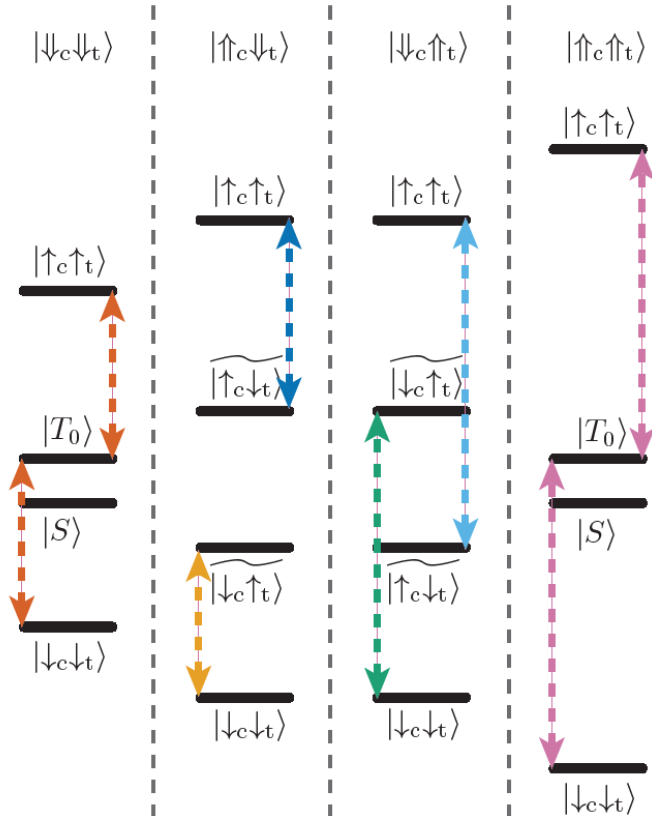
[Nature Nano. 9, 986 \(2014\) Muhonen et al.](#)

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

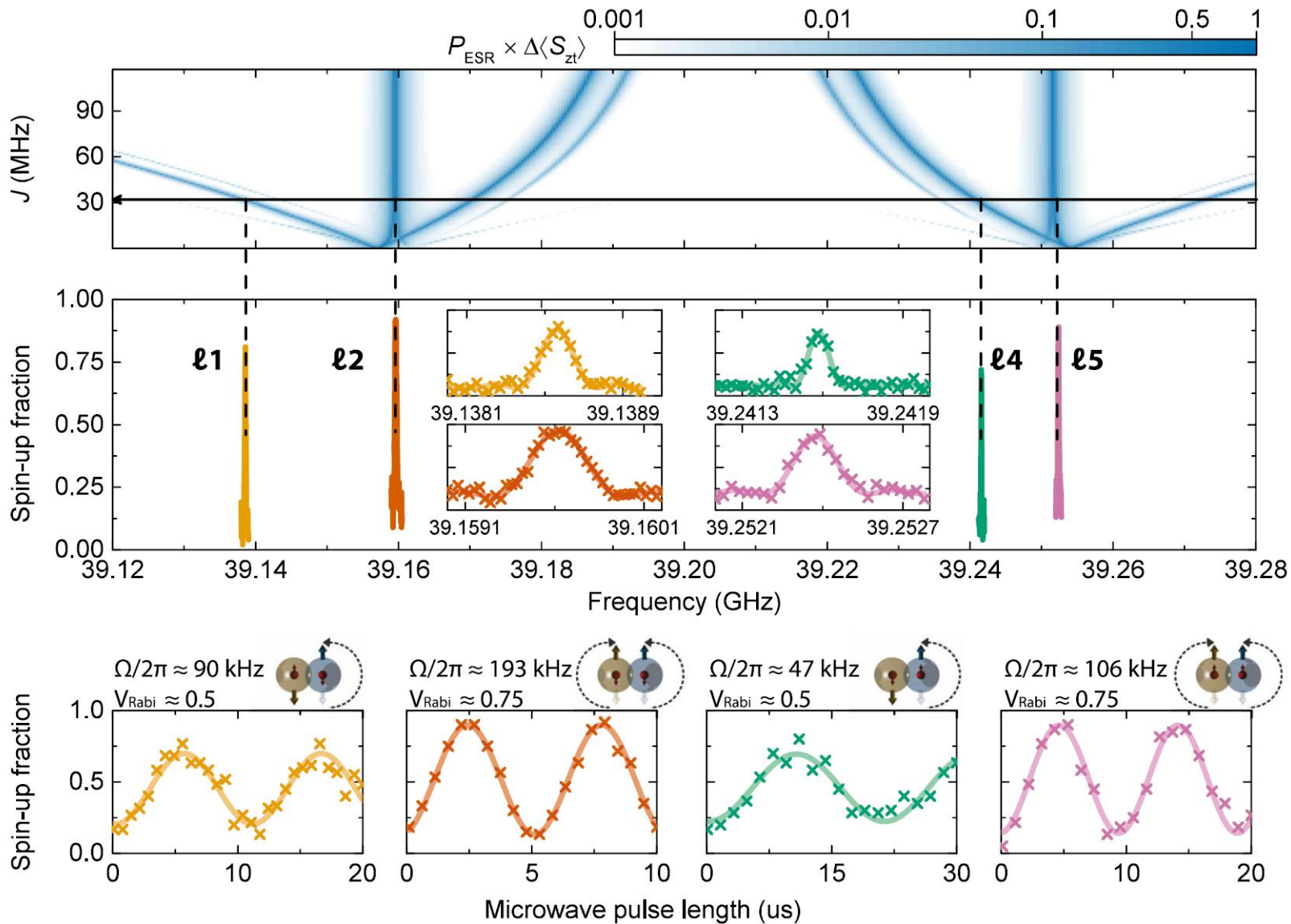
2ドナー系制御ゲート



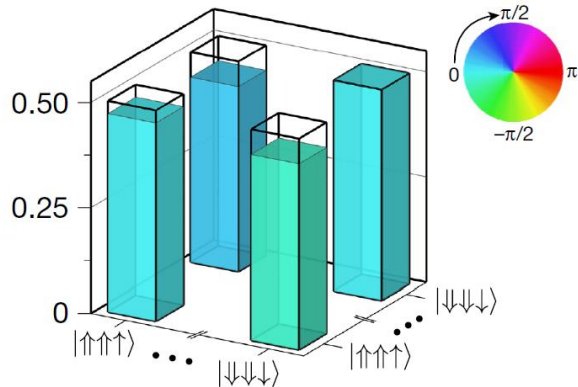
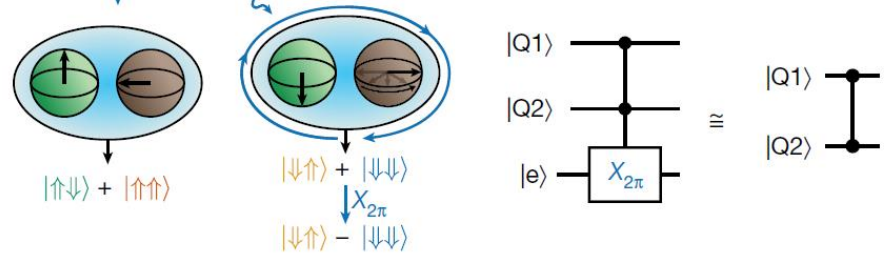
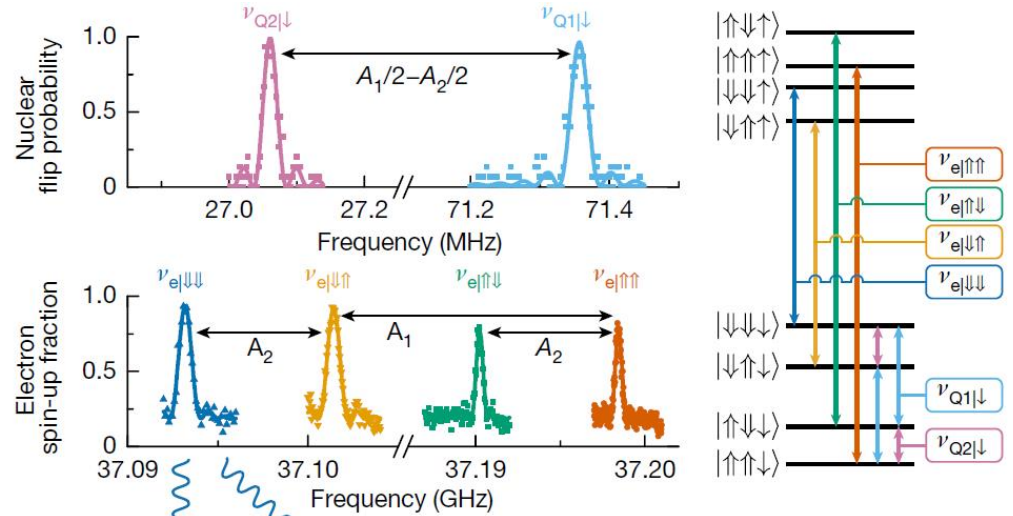
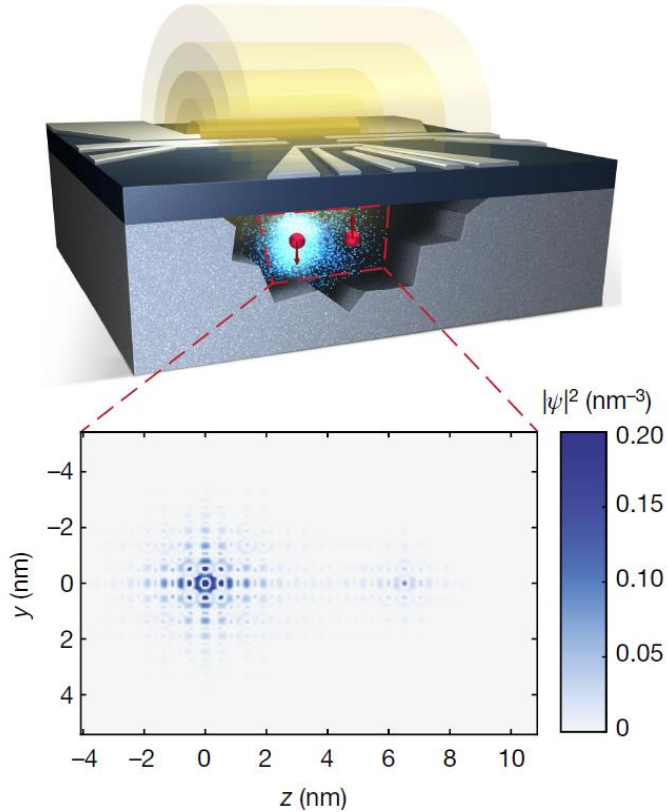
$$H = B_0(\gamma_{e,t}S_{z,t} + \gamma_{e,c}S_{z,c}) - \gamma_n B_0(I_{z,t} + I_{z,c}) + a_{0,t}\mathbf{S}_t \cdot \mathbf{I}_t + a_{0,c}\mathbf{S}_c \cdot \mathbf{I}_c + J\mathbf{S}_t \cdot \mathbf{S}_c$$



2ドナー系制御ゲート



1電子スピン-2核スピン系

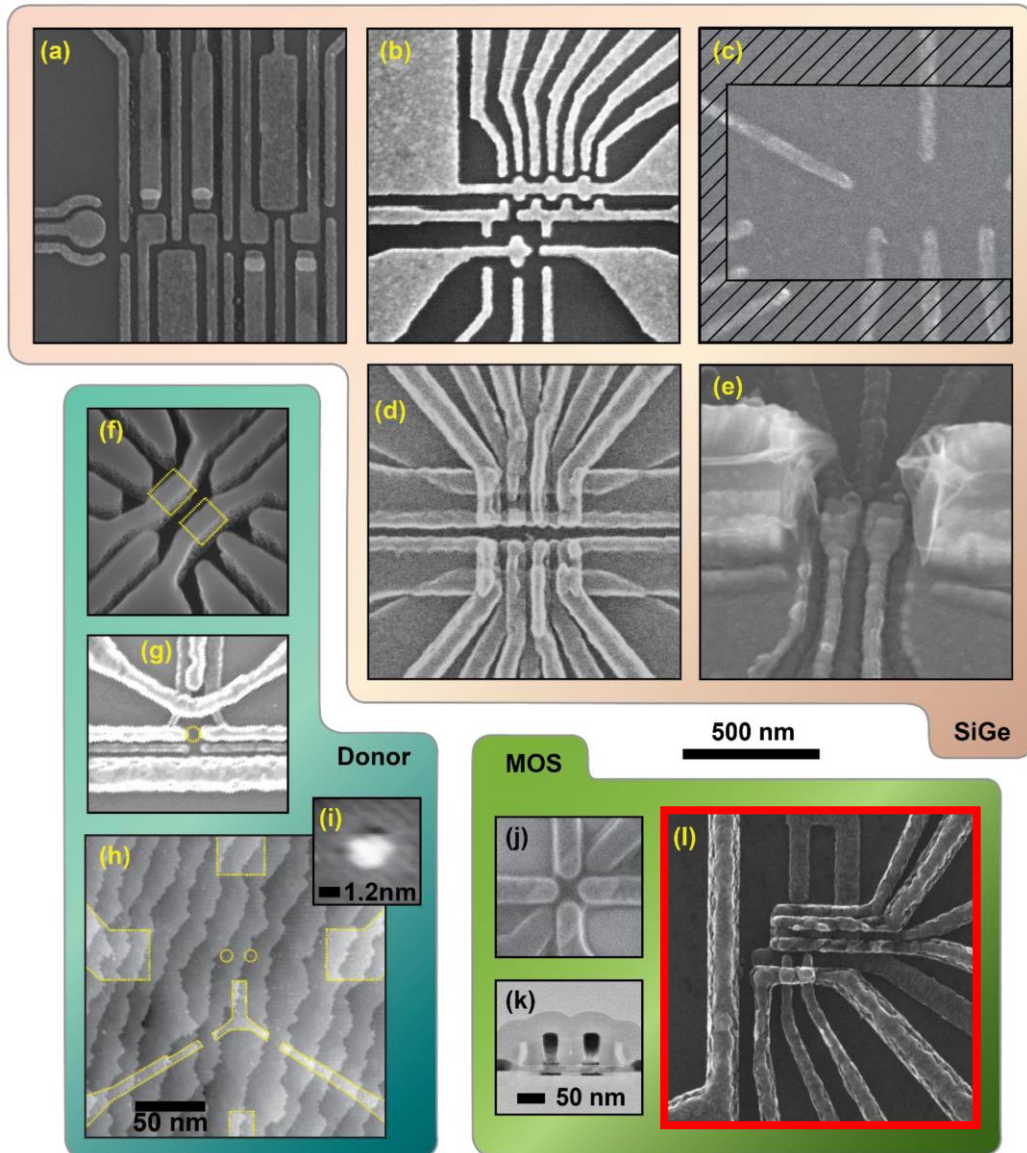


Greenberger-Horn-Zeilinger (GHZ) 状態

[Bell's Theorem, Quantum Theory and Conceptions of the Universe P.69 \(1986\) GHZ](#)

$$|\psi_{\text{GHZ}}\rangle = \frac{|\uparrow\uparrow\uparrow\rangle + |\downarrow\downarrow\downarrow\rangle}{\sqrt{2}}$$

界面MOS構造



[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.](#)

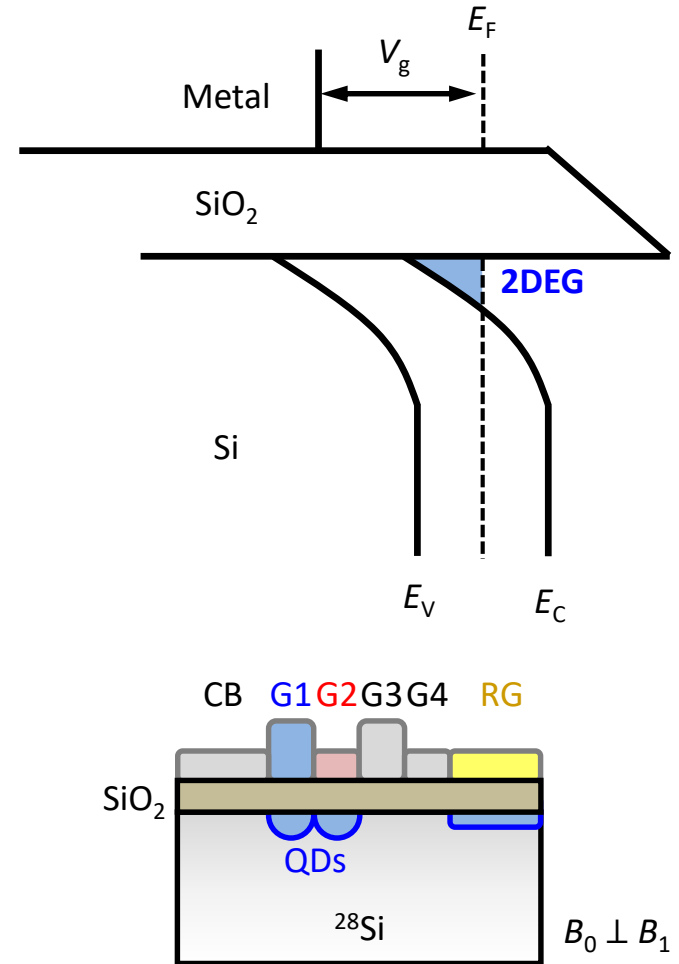
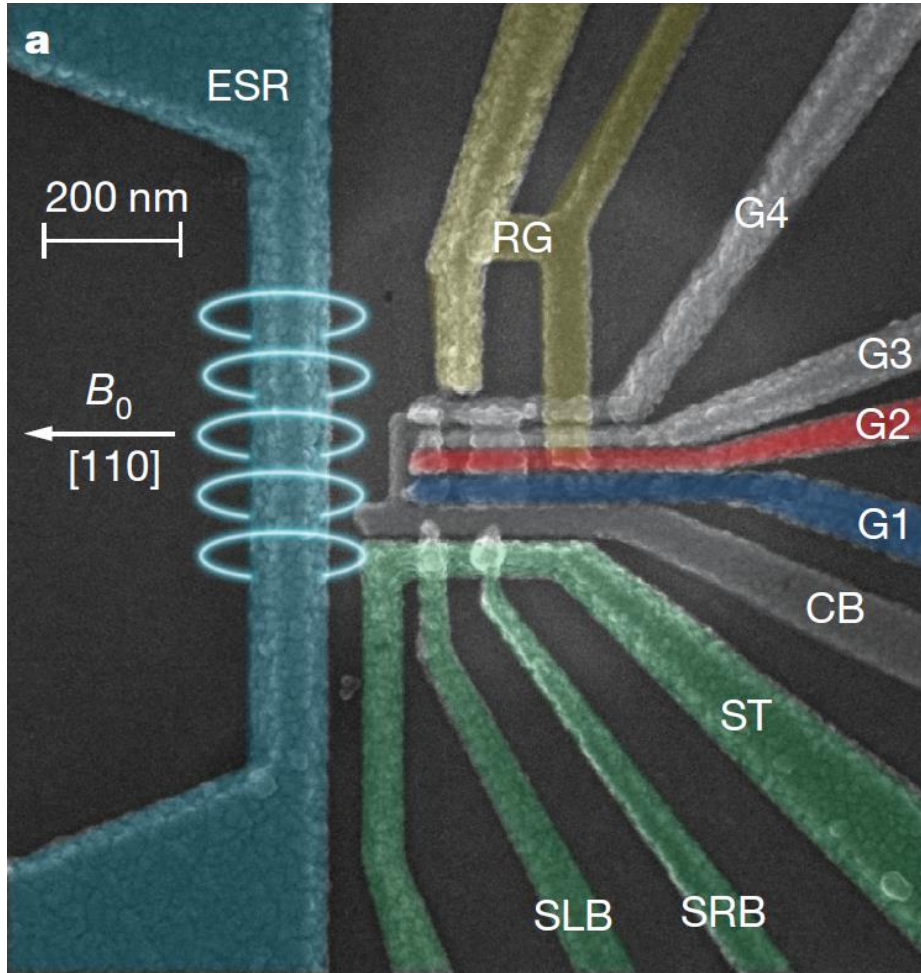
(h,i) By courtesy of T. F. Watson (CQC2T, UNSW)
[Phys. Rev. Lett. 115, 166806 \(2015\) Watson et al.](#)

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

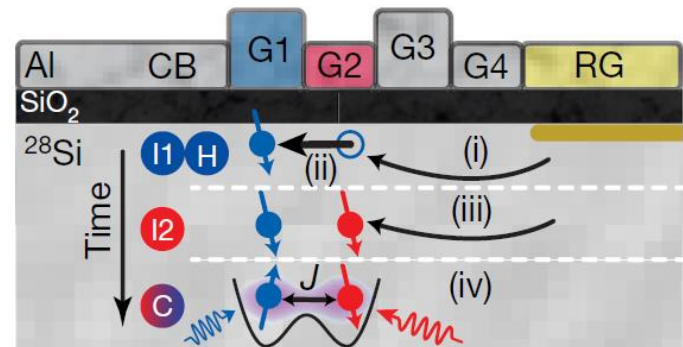
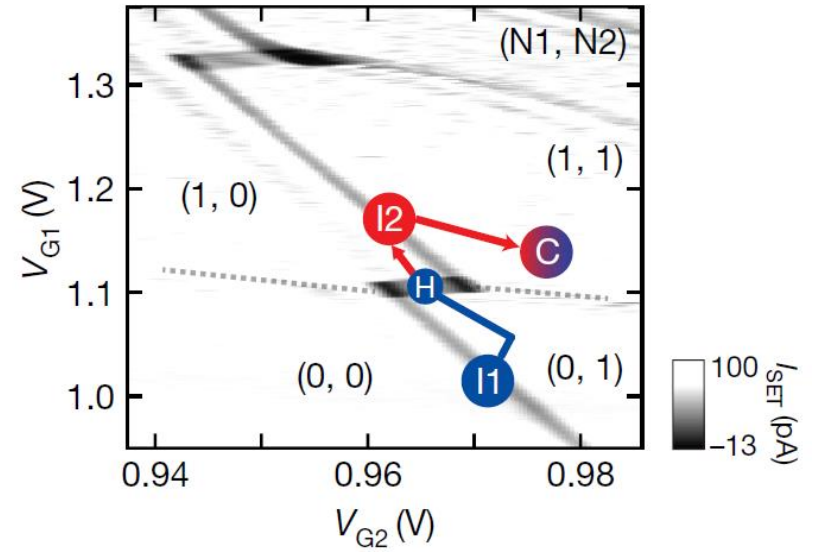
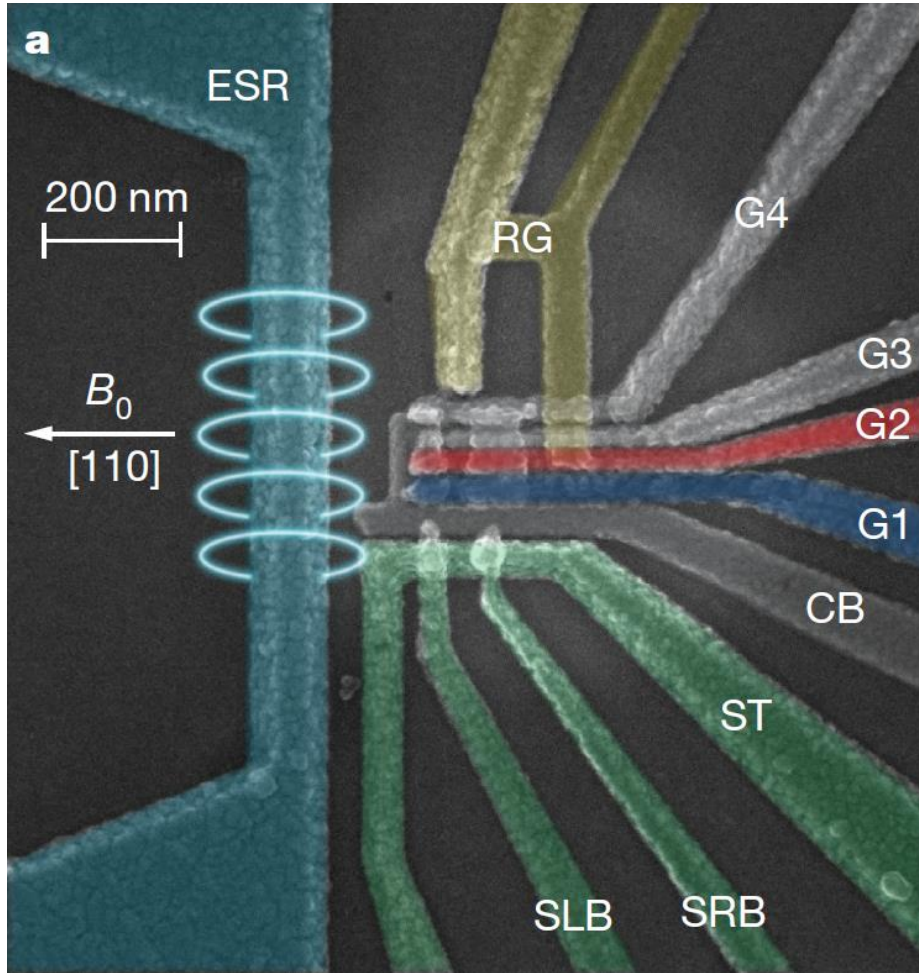
(k) By courtesy of Maud Vinet (LETI)
[Nature Commun. 7, 13575 \(2016\) Maurand et al.](#)

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

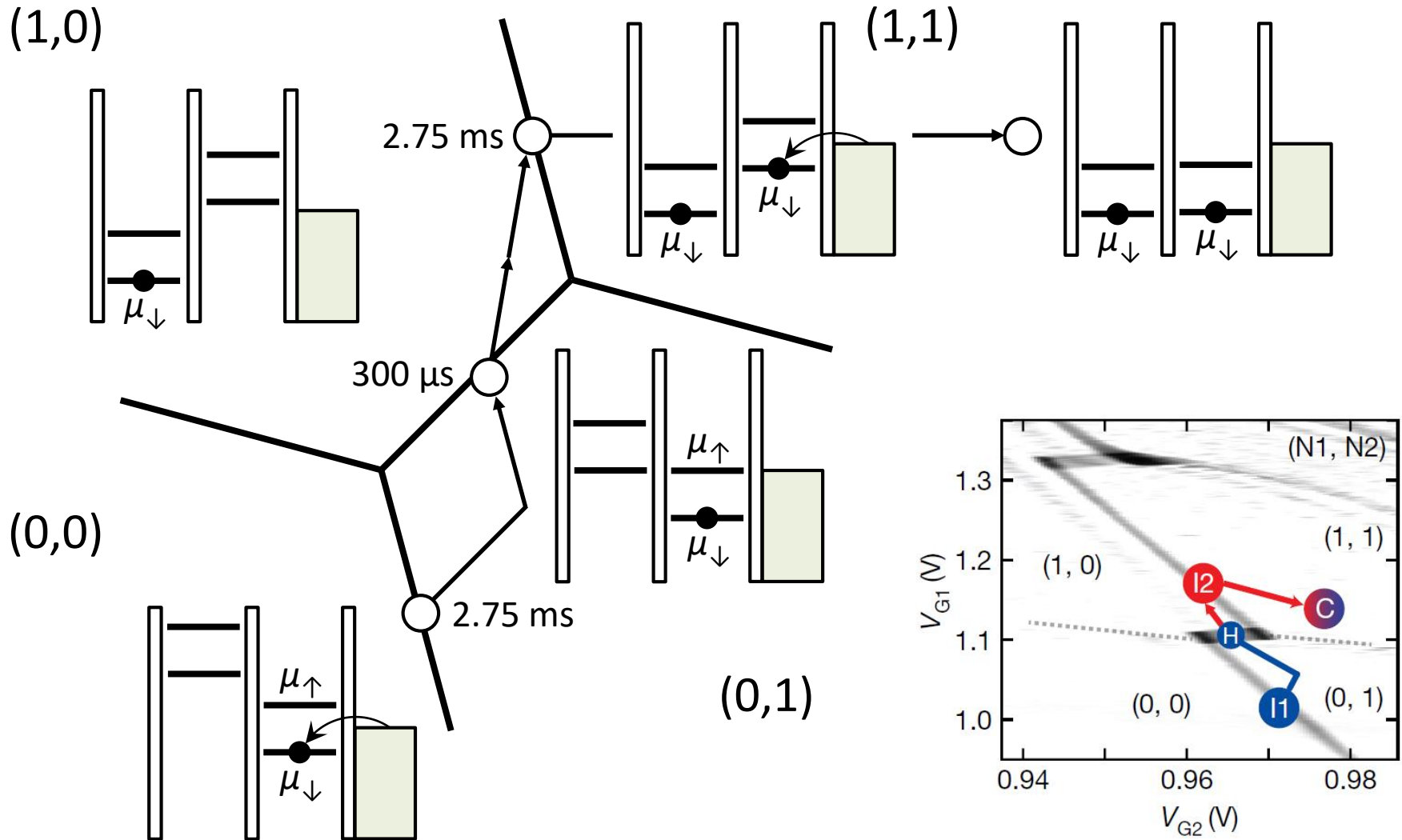
界面MOS構造



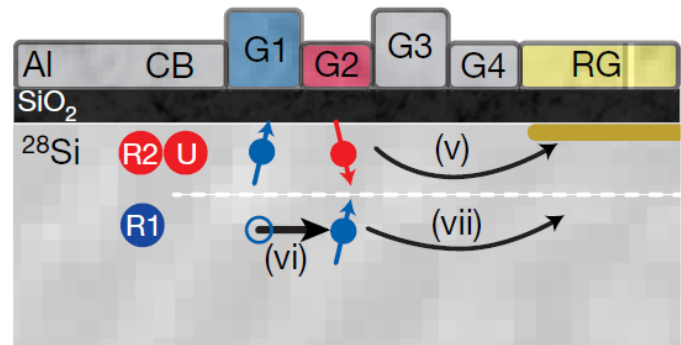
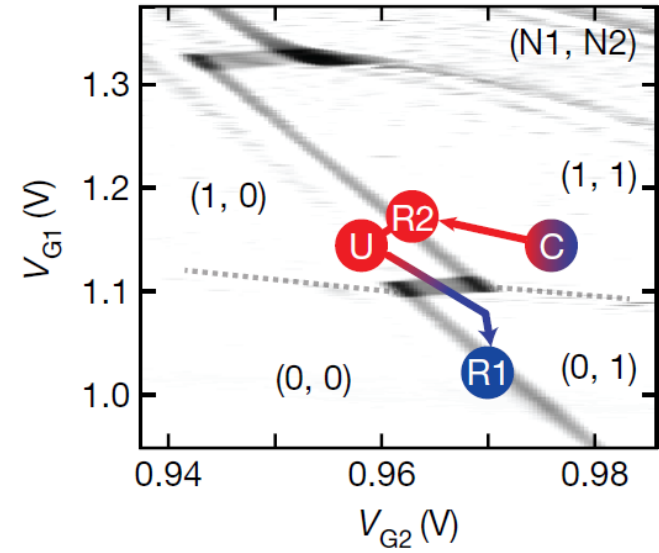
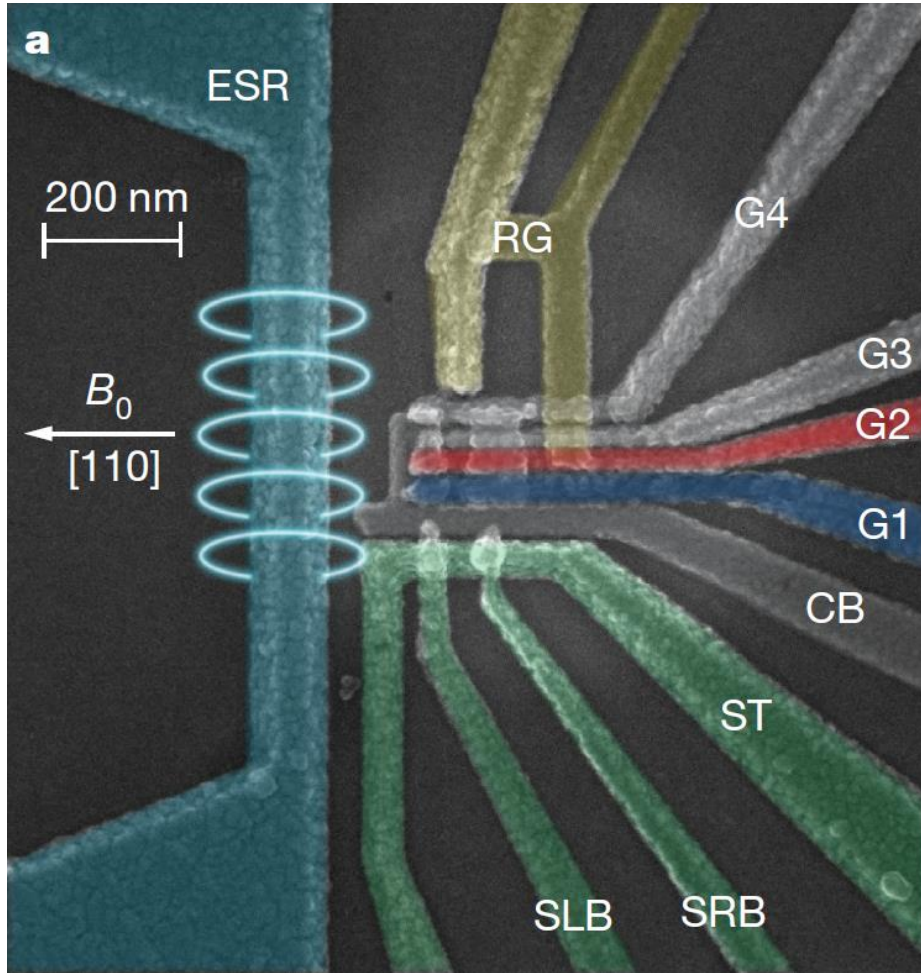
量子ビット操作



初期化

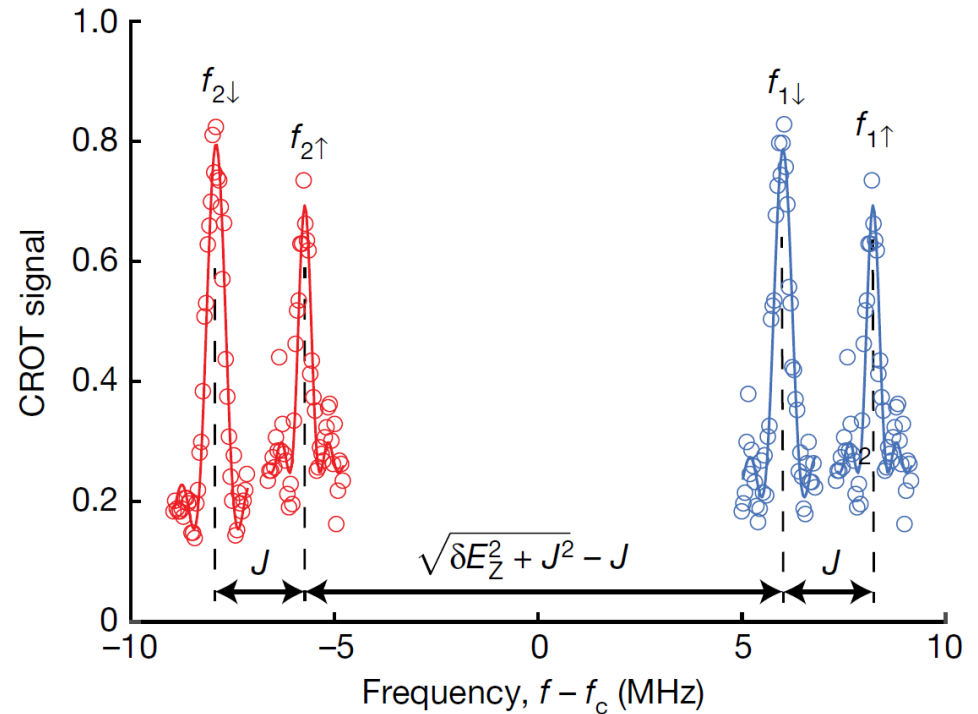
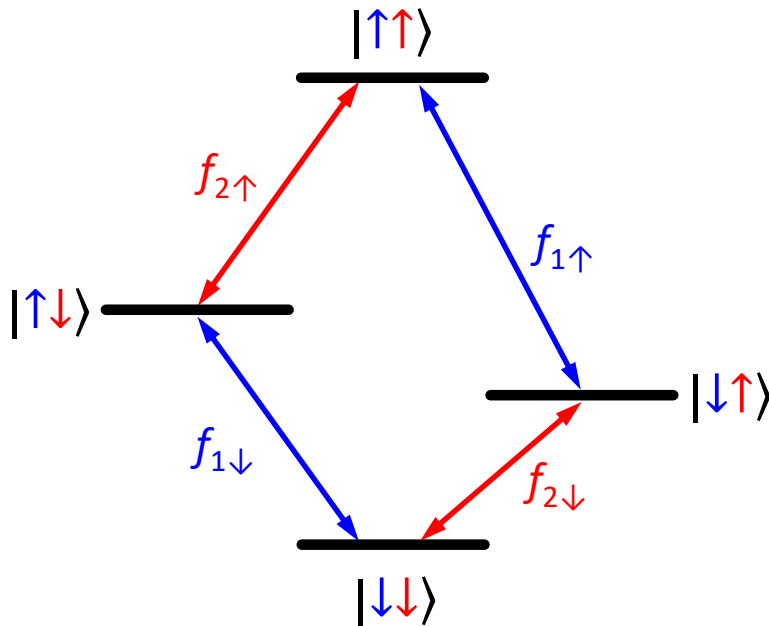


測定



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)

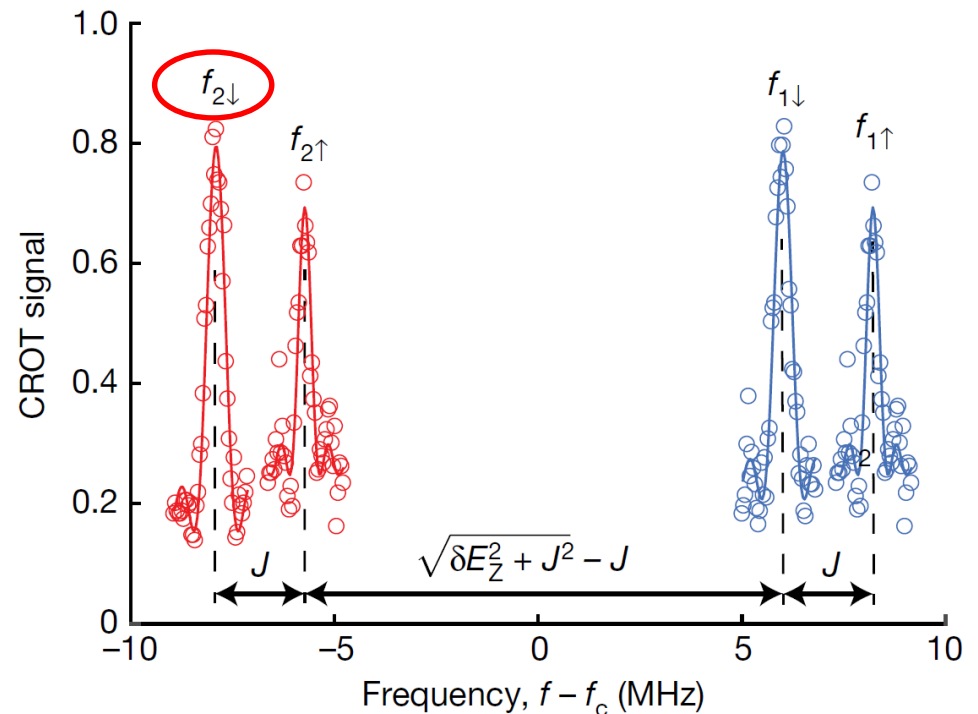
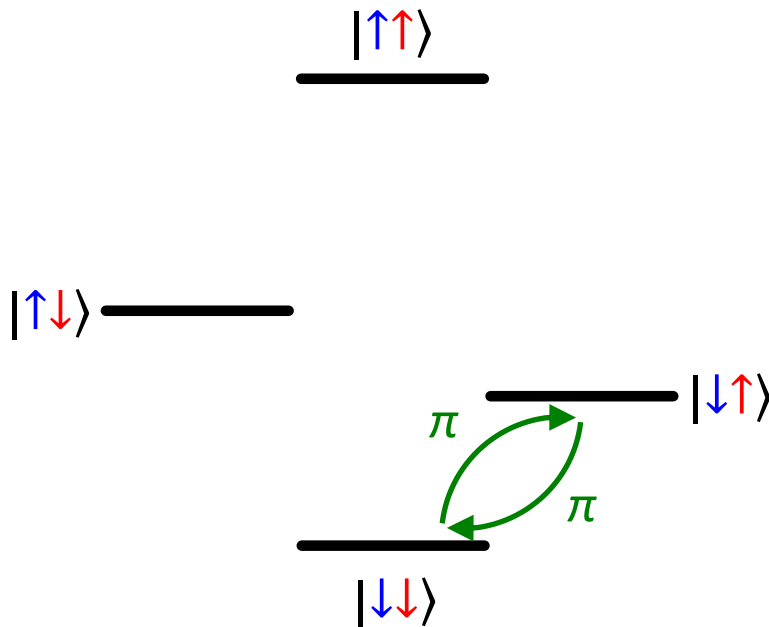


$$\bar{E}_z/h = f_c = 39.33 \text{ GHz @ } B_0 = 1.42 \text{ T}$$

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

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)

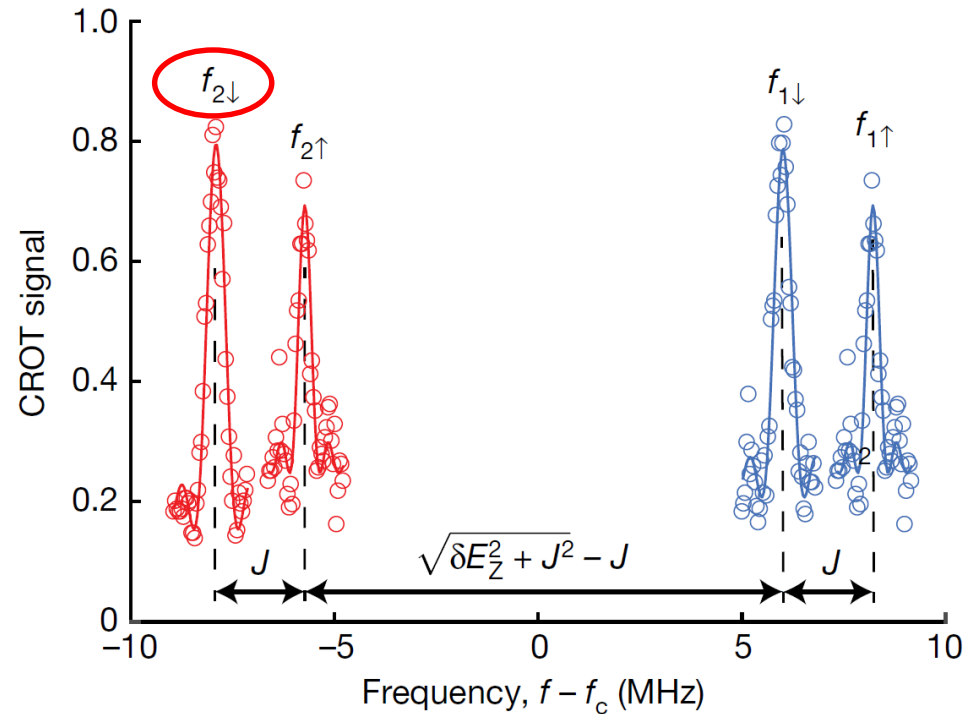
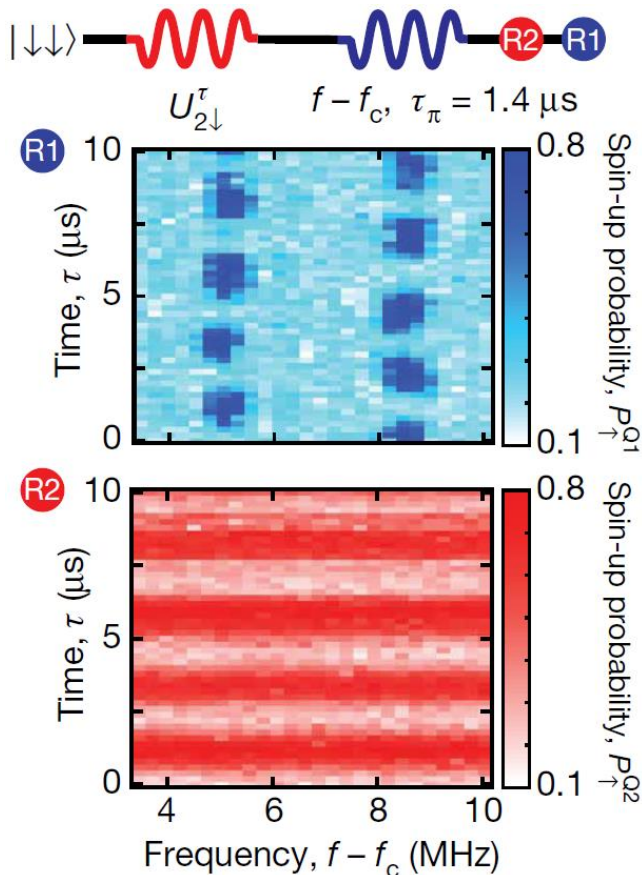


$$\bar{E}_z/h = f_c = 39.33 \text{ GHz} @ B_0 = 1.42 \text{ T}$$

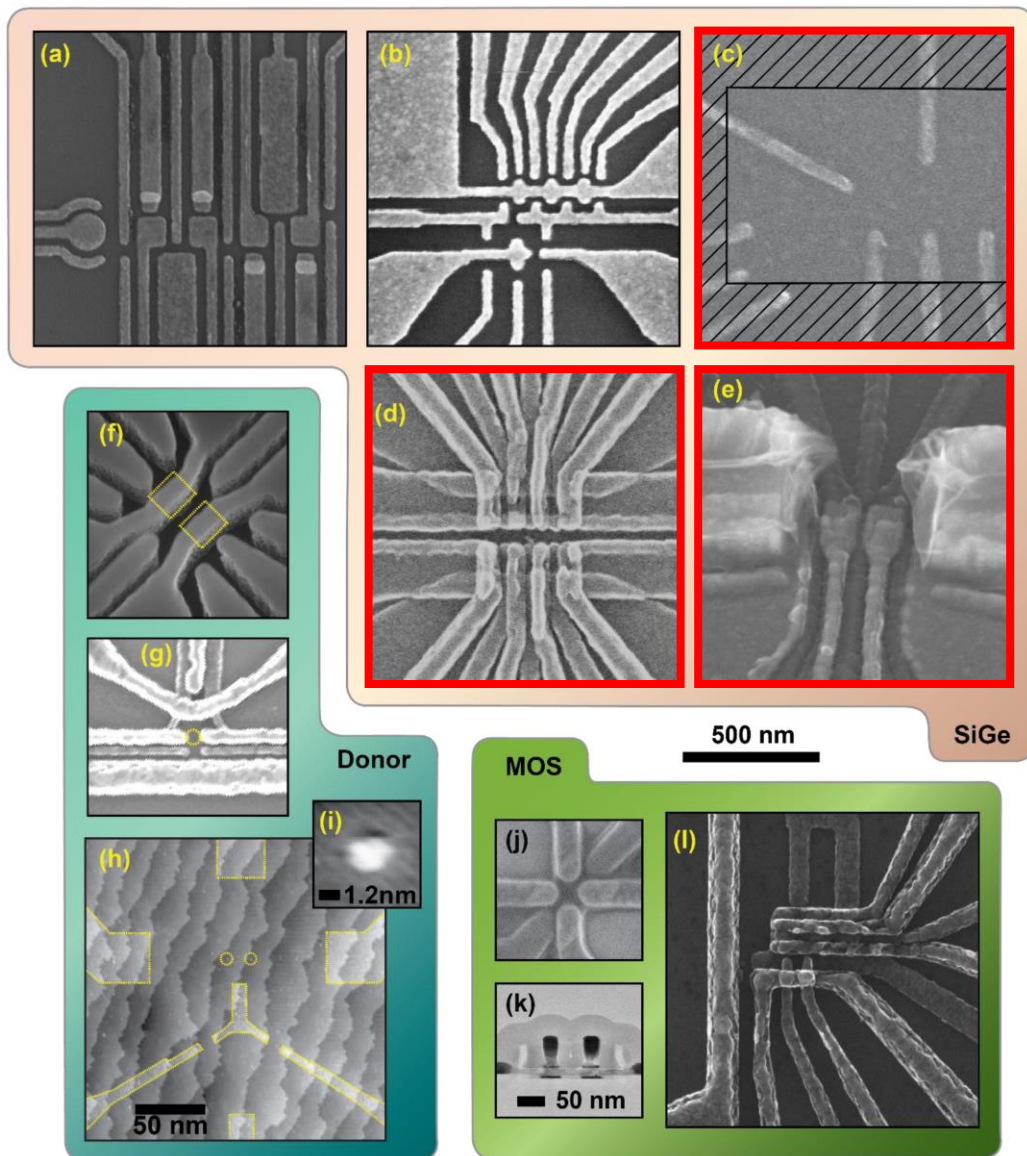
$$\delta E_z/h = 13.26 \text{ MHz} \quad J/h = 1.59 \text{ MHz}$$

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



[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.](#)

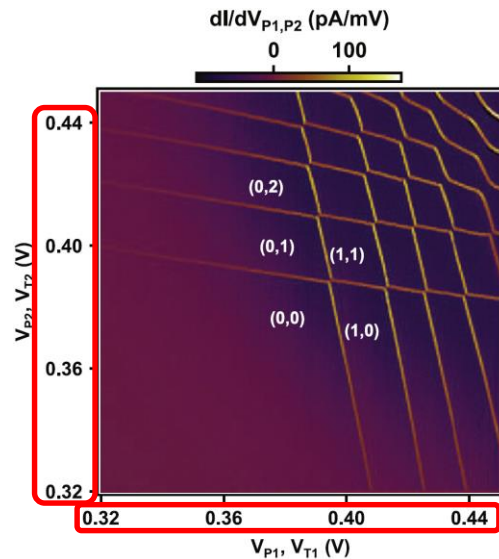
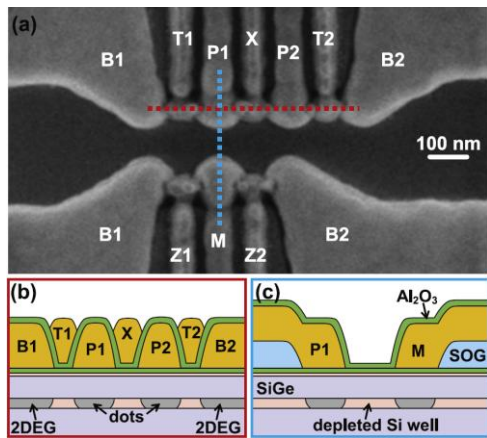
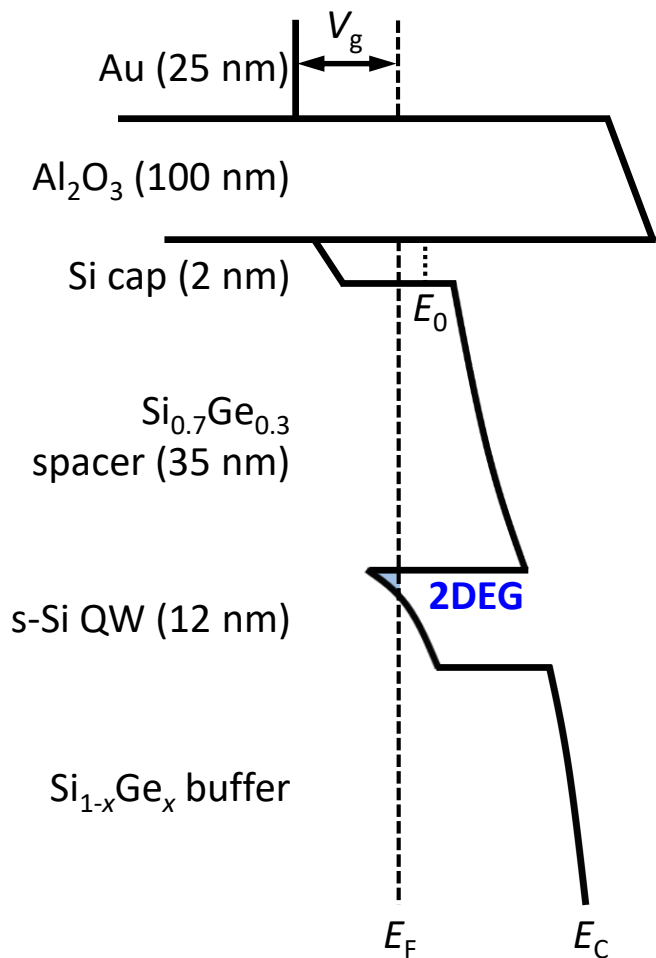
(j) By courtesy of Fernando Gonzalez-Zalba (Hitachi Cambridge)
[Appl. Phys. Lett. 108, 203108 \(2016\) Betz et al.](#)

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

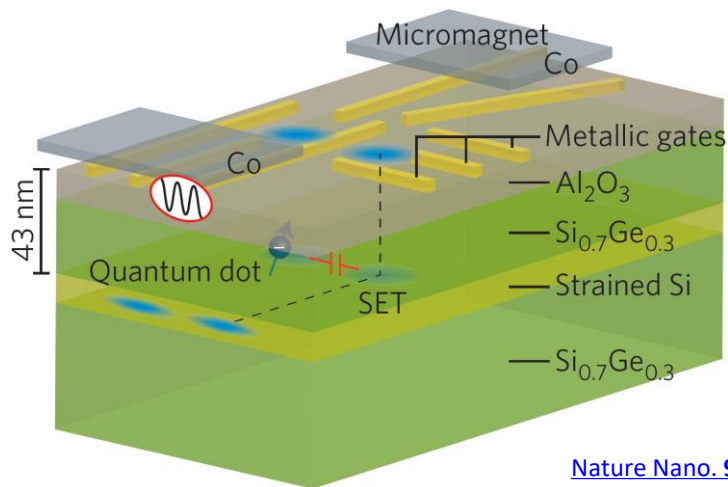
(l) By courtesy of Andrew Dzurak (UNSW)
[Nature 526, 410 \(2015\) Veldhorst et al.](#)

Si/SiGeへテラ構造

ノンドープ構造による蓄積型QD



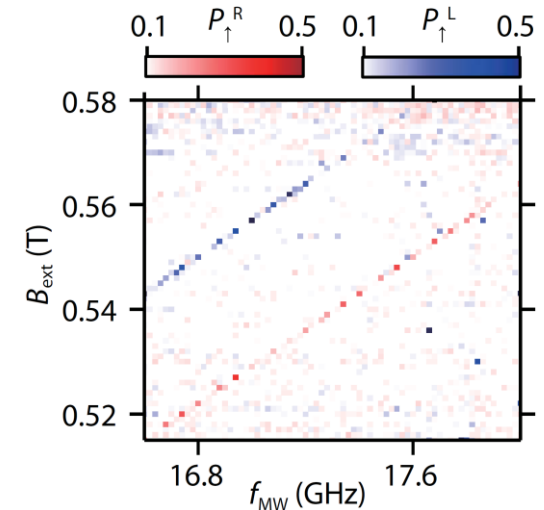
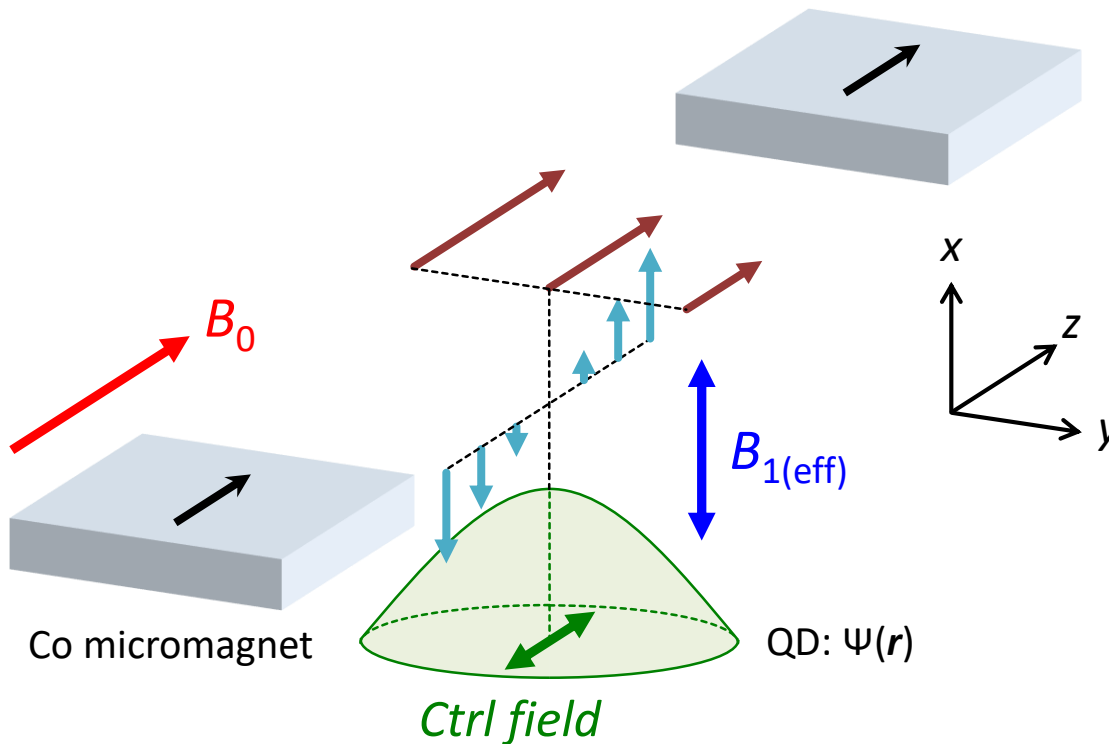
[Nanotechnology 26, 375202 \(2015\) Borselli et al.](#)



[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



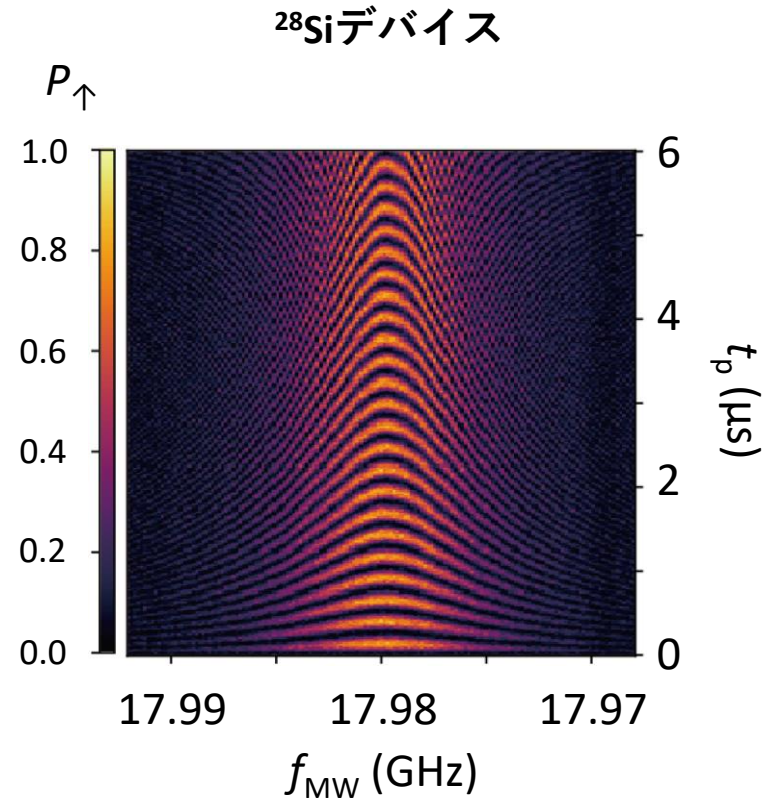
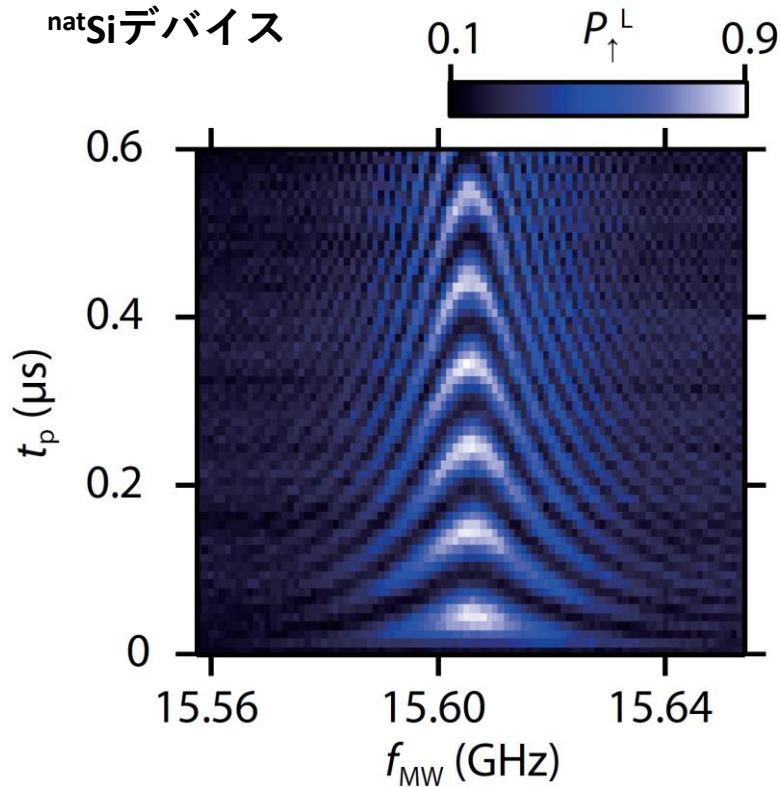
[Sci. Adv. 2, e1600694 \(2016\) Takeda et al.](#)

(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
- ファイデリティ $F = 99.6\% \rightarrow > 99.9\%$
- $T_2^* = 2 \mu\text{s} \rightarrow 20 \mu\text{s}$, $T_2^{\text{CPMG}} = 3.1$ 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.*

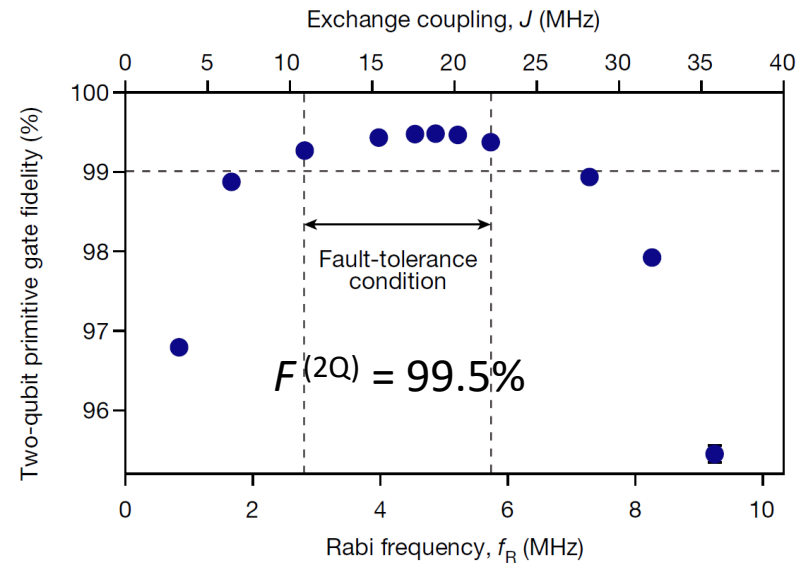
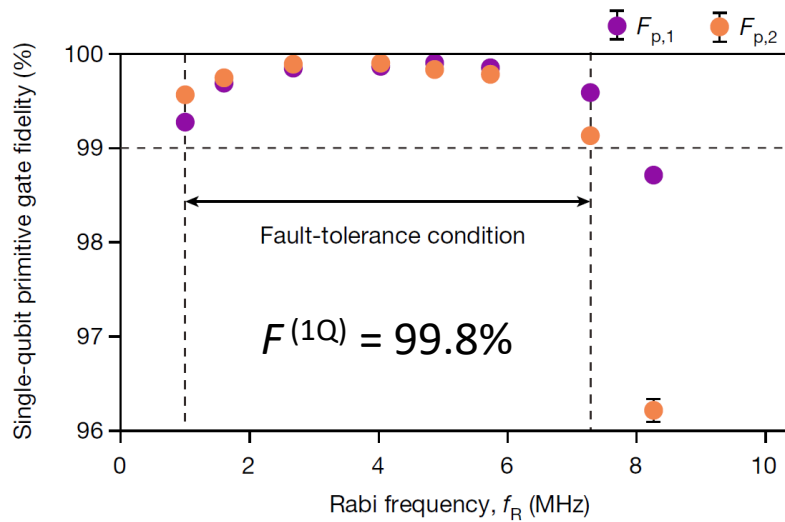
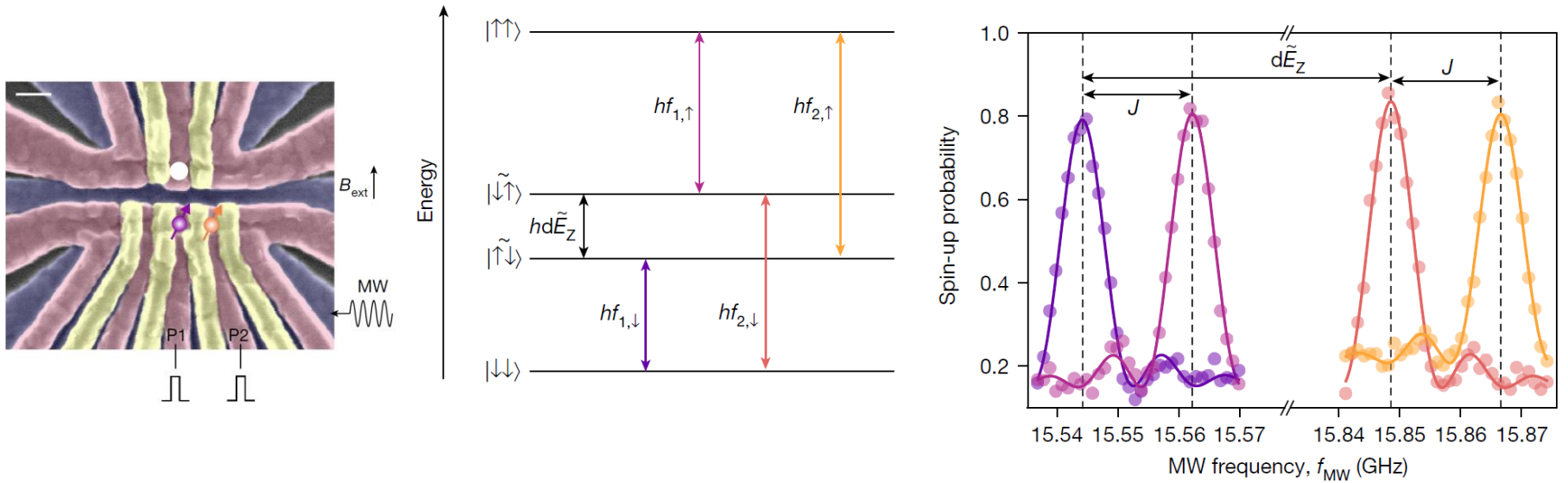
See also [Nature Nano.](#) **9**, 666 (2014) Kawakami *et al.* [PNAS](#) **113**, 11738 (2016) Kawakami *et al.*

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

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

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

高フィデリティゲート



高フィデリティゲート

Fast universal quantum gate above the fault-tolerance threshold in silicon

<https://doi.org/10.1038/s41586-021-04182-y>

Received: 4 August 2021

Accepted: 26 October 2021

Published online: 19 January 2022

Akito Noiri¹, Kenta Takeda¹, Takashi Nakajima¹, Takashi Kobayashi², Amir Sammak^{3,4},
Giordano Scappucci^{3,5} & Seigo Tarucha^{1,2}

[Nature 601, 338 \(2022\) Noiri et al.](#)

Quantum logic with spin qubits crossing the surface code threshold

<https://doi.org/10.1038/s41586-021-04273-w>

Received: 1 July 2021

Accepted: 22 November 2021

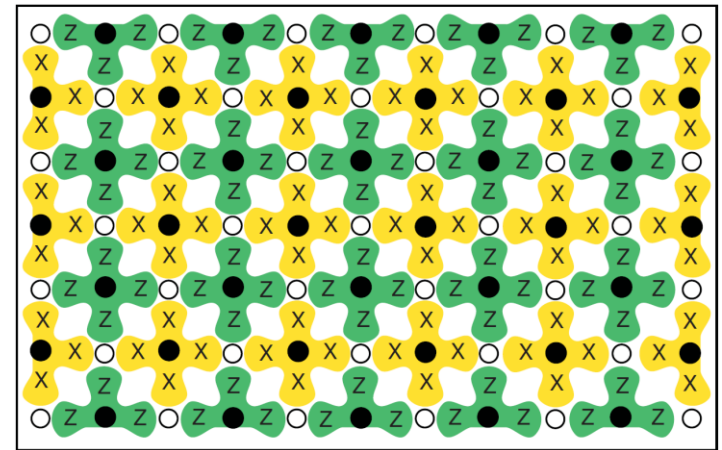
Published online: 19 January 2022

Xiao Xue^{1,2}, Maximilian Russ^{1,2}, Nodar Samkharadze^{1,3}, Brennan Undseth^{1,2}, Amir Sammak^{1,3},
Giordano Scappucci^{1,2} & Lieven M. K. Vandersypen^{1,2}

[Nature 601, 343 \(2022\) Xue et al.](#)

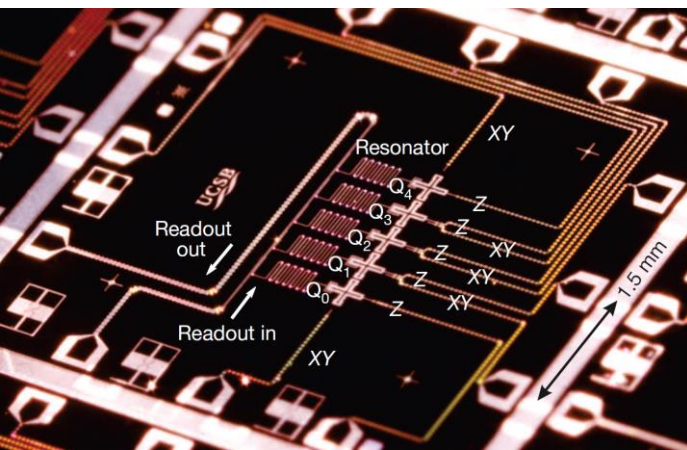
表面符号(Surface code)

- 2次元配列
- 高いエラー許容度(~1%)



[J. Math. Phys. 43, 4452 \(2002\) Dennis et al.](#)

[Phys. Rev. A 86, 032324 \(2012\) Fowler et al.](#)

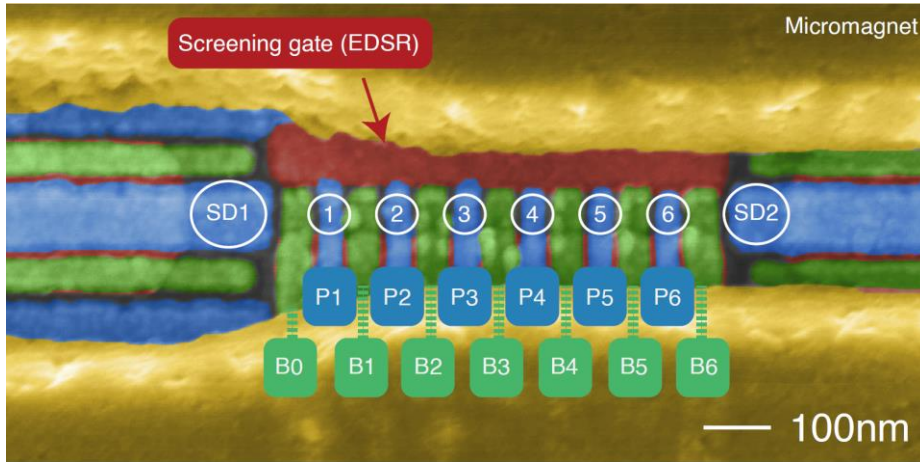


Superconducting quantum circuits at the surface code threshold for fault tolerance

R. Barends^{1*}, J. Kelly^{1*}, A. Megrant¹, A. Veitia², D. Sank¹, E. Jeffrey¹, T. C. White¹, J. Mutus¹, A. G. Fowler^{1,3}, B. Campbell¹, Y. Chen¹,
Z. Chen¹, B. Chiaro¹, A. Dunsworth¹, C. Neill¹, P. O'Malley¹, P. Roushan¹, A. Vainsencher¹, J. Wenner¹, A. N. Korotkov²,
A. N. Cleland¹ & John M. Martinis¹

[Nature 508, 500 \(2014\) Barends et al.](#)

6量子ドット系



大変なのは初期化・測定

- Q3,4は直接測れない
- 電子の出し入れをしない
- パウリ閉塞によるQ1,2(Q5,6)の
パリティ測定
- Q3(4)のQND測定

$$J\mathcal{S}_A \cdot \mathcal{S}_B \approx J\mathcal{S}_{A,z}\mathcal{S}_{B,z}$$

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

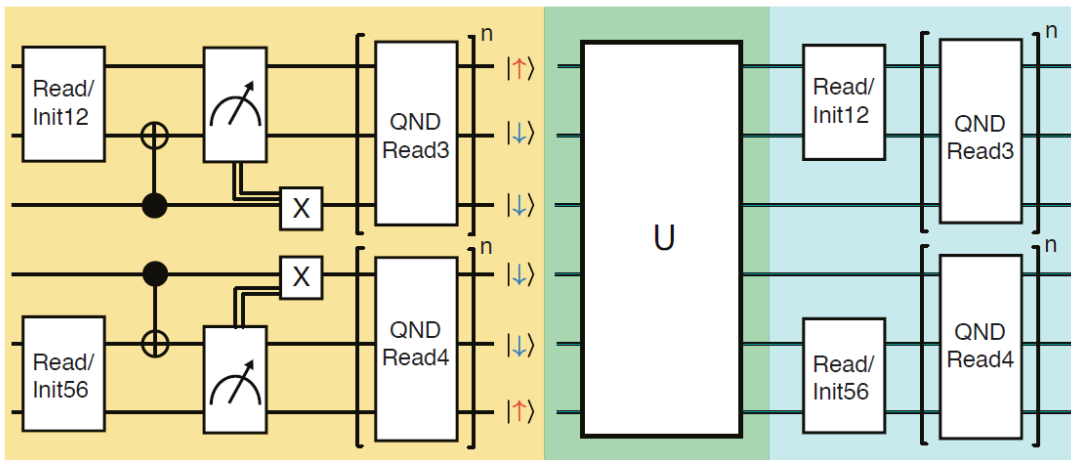
(QND in SiGe) [Nature Commun. 11, 1144 \(2020\) Yoneda et al.](#)

(QND in GaAs) [Nature Nano. 14, 555 \(2019\) Nakajima et al.](#)

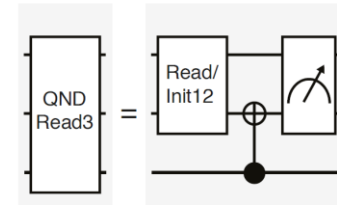
Initialization

Manipulation

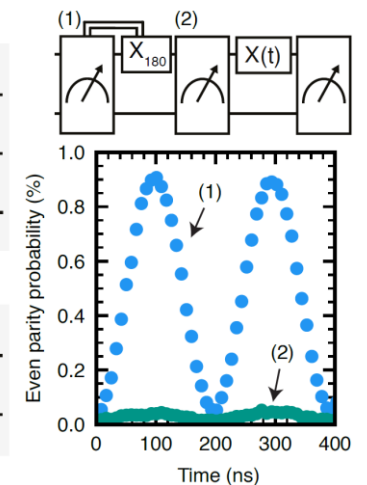
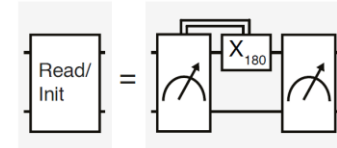
Readout



QND measurement qubit 3



Real-time feedback initialization



[arXiv:2202.09252 Philips 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(3)量子ビット	多量子ビット化
単一リンドナー	$F^{(n+)} = 99.99\%$ (*1) $F^{(n, 2Q)} = 99.95\%$ (*2)	$F^{(n-n, CZ)} = 99.37\%$ (*2) $F^{(e-n-n, GHZ)} = 92.5\%$ (*2)	“フリップフロップ” 量子ビット (*3,4)
MOS量子ドット	$F^{(1Q \text{ only})} = 99.6\%$ (*5)	$F^{(CROT)} = 98\%$ (*6)	CMOS/DRAM技術 との融合 (*7,8,9)
Si/SiGe量子ドット	$F^{(1Q \text{ only})} > 99.9\%$ (*10) $F^{(2Q)} = 99.16\%$ (*11) $F^{(2Q)} = 99.4\%$ (*12)	$F^{(CROT)} = 99.5\%$ (*13) $F^{(CZ)} = 99.65\%$ (*11) $F^{(CZ)} = 99.81\%$ (*12) $F^{(GHZ)} = 88.0\%$ (*14)	6量子ビット系 (*15) 誤り訂正符号化 (*16)

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

*2: [Nature 601, 348 \(2022\) Mądzik et al.](#)

*3: [Nature Commun. 8, 450 \(2017\) Tosi et al.](#)

*4: [arXiv:2202.04438 Savvitsky et al.](#)

*5: [Nature Nano. 9, 981 \(2014\) Veldhorst et al.](#)

*6: [Nature 569, 532 \(2019\) Huang et al.](#)

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

*8: [Sci. Adv. 4, eaar3960 \(2018\) Li et al.](#)

*9: [Nature Electron. 5, 184 \(2022\) Zwerver et al.](#)

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

*11: [Nature 601, 343 \(2022\) Xue et al.](#)

*12: [arXiv:2111.11937 Mills et al.](#)

*13: [Nature 601, 338 \(2022\) Noiri et al.](#)

*14: [Nature Nano. 16, 965 \(2021\) Takeda et al.](#)

*15: [arXiv:2202.09252 Philips et al.](#)

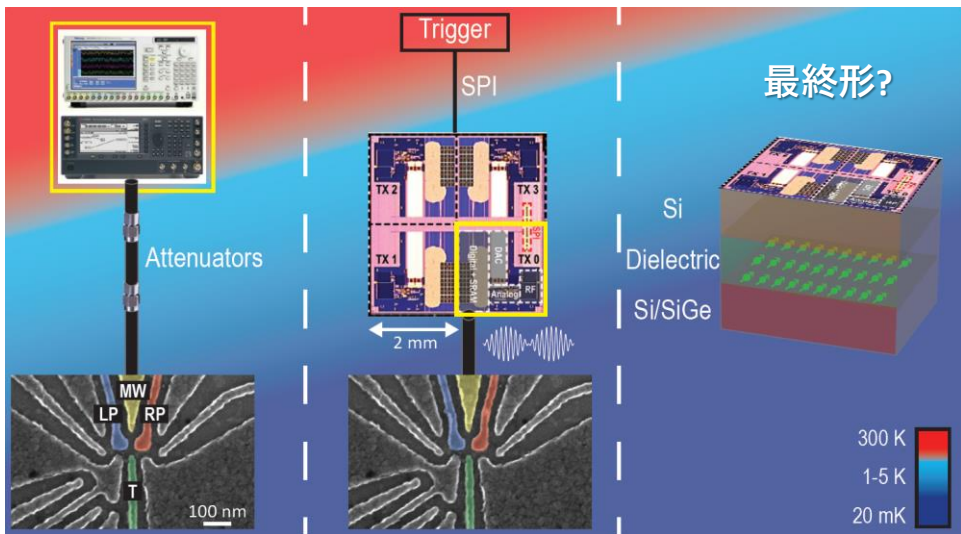
*16: [arXiv:2201.08581 Takeda et al.](#)

[arXiv:2107.06485 Stano & Loss](#)

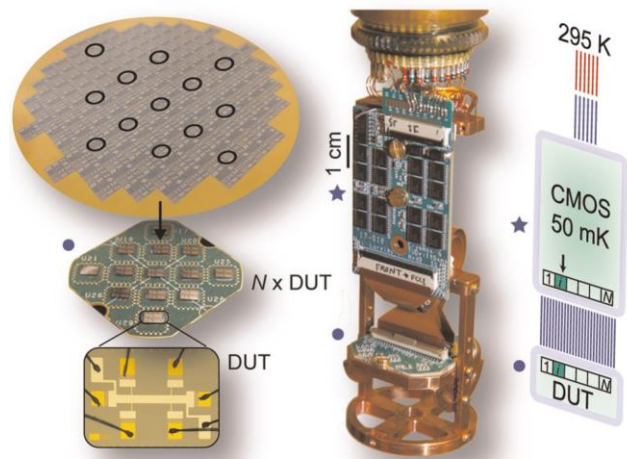
“Review of performance metrics of spin qubits in gated semiconducting nanostructures”

[arXiv:2112.08863 Burkard et al.](#) “Semiconductor Spin Qubits”

集積化に向けた取り組み: 低温回路技術



(Cryogenic-CMOS-based qubit control) [Nature 593, 205 \(2021\) Xue et al.](#)



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



[Cryogenic Wafer Prober \(Bluefors\)](#)

Up to 300-mm wafers, down to 1 K

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

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

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

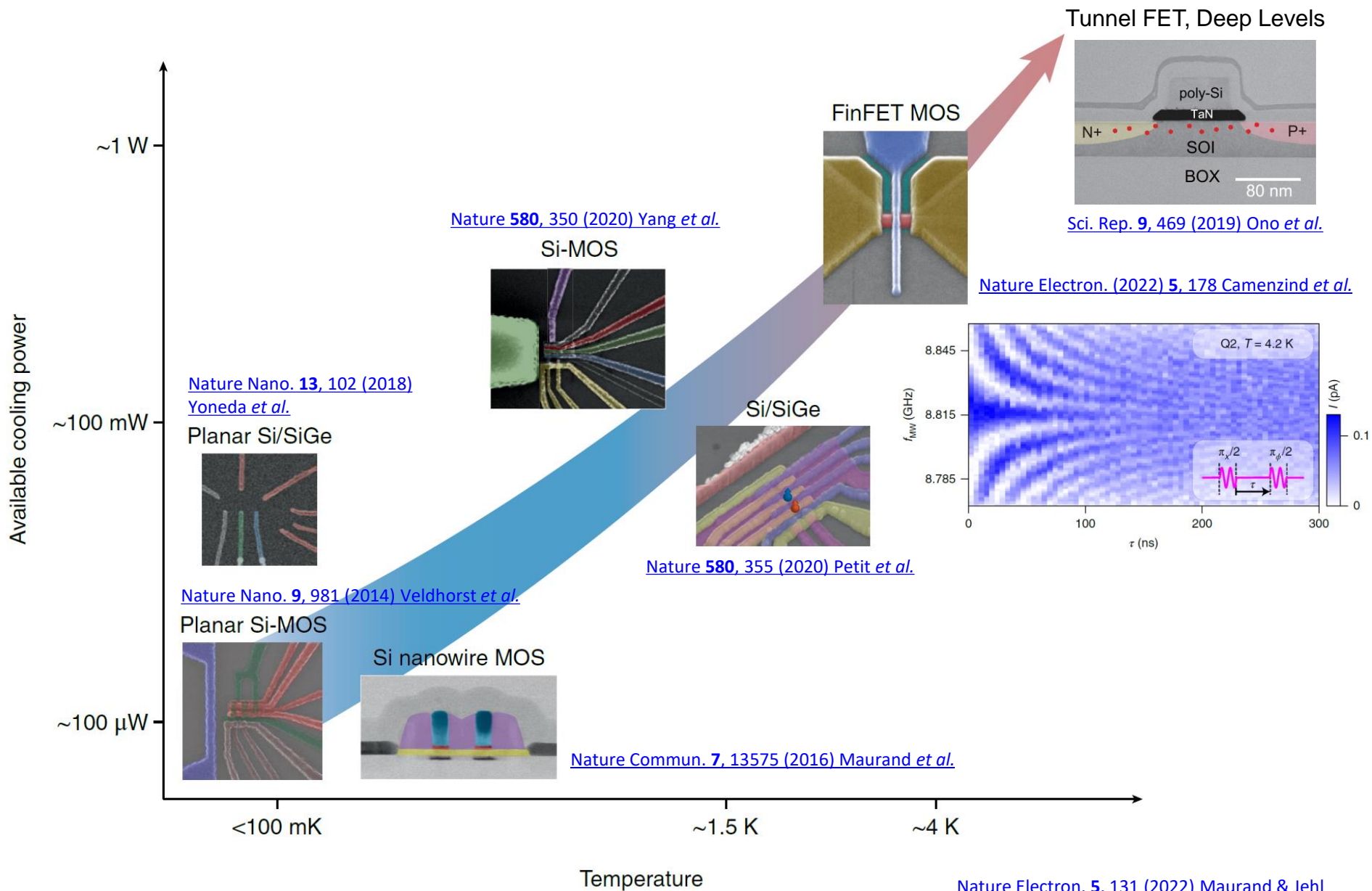
(CMOS, Review) [Nature Electron. 4, 872 \(2021\) Gonzalez-Zalba et al.](#)

(Microwave, Review) [IEEE J. Microwave 1, 403 \(2021\) Bardin et al.](#)

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

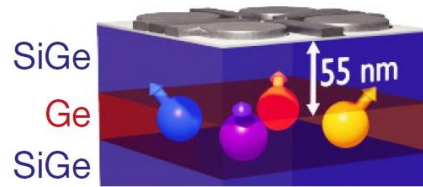
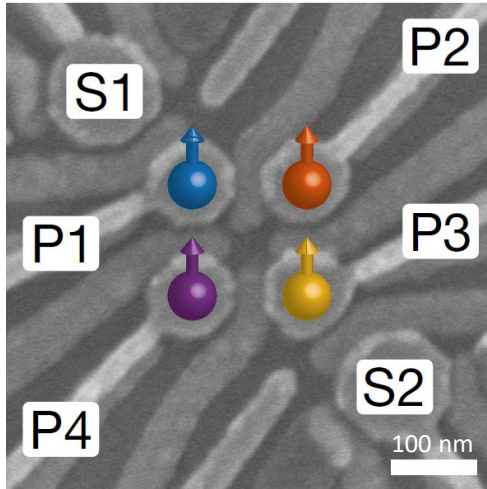
(Quantum-classical interface, Review) [npj Quant. Info. 1, 15011 \(2015\) Reilly](#)

集積化に向けた取り組み: 高温動作



今後の展開が期待される系

ゲルマニウム量子ドット



[arXiv:2202.11530](https://arxiv.org/abs/2202.11530) van Riggelen *et al.* "Phase flip code with semiconductor spin qubits"

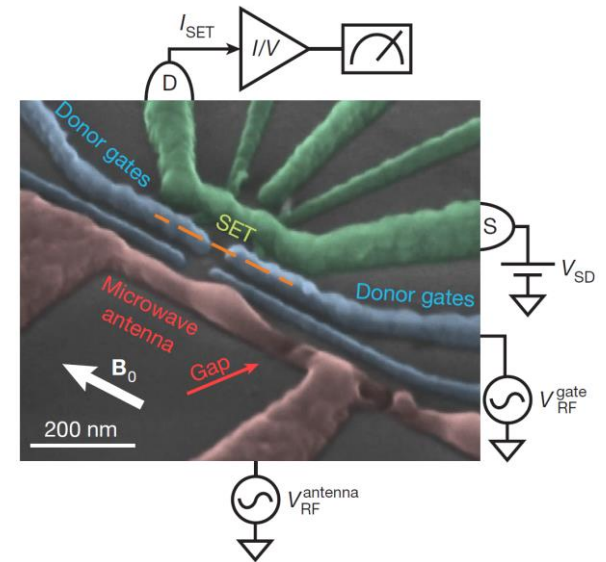
[arXiv:2109.07837](https://arxiv.org/abs/2109.07837) Lawrie *et al.* "Simultaneous driving of semiconductor spin qubits at the fault-tolerant threshold"

Nature **591**, 585 (2021) Hendrickx *et al.* "A four-qubit germanium quantum processor"

Nature Rev. Mater. **6**, 926 (2021) Scappucci *et al.* "The germanium quantum information route"

Nature Commun. **11**, 3478 (2020) Hendrickx *et al.* "A single-hole spin qubit"

Nature **577**, 487 (2020) Hendrickx *et al.* "Fast two-qubit logic with holes in germanium"



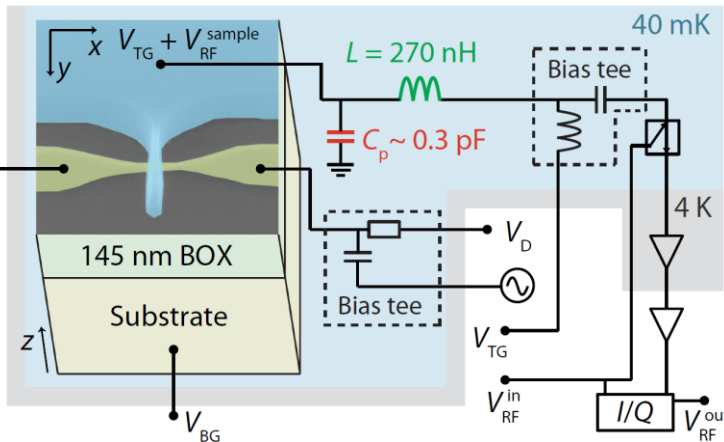
アクセプター

Nature Mater. **20**, 38 (2021) Kobayashi *et al.*

Sci. Adv. **4**, eaat9199 (2018) van der Heijden *et al.*

¹²¹Sb ドナー核スピン

Nature **579**, 205 (2020) Asaad *et al.*



まとめ

シリコンスピン量子ビットにおけるディビンチェンゾの要請

1. スケーラブルな量子ビット列

- Si/SiGe QD系で1x6量子ビット列制御
- Ge/SiGe QD系で2x2量子ビットマトリックス制御
- 低温回路技術の研究・開発加速

2. & 5. 初期化 & 射影測定

- SPAMエラーはまだそれなりにある

3. & 4. 長い T_2 & ユニバーサル量子ゲート

- フィデリティで勝負する時代に
- 3量子ビットの符号化

Building a Quantum Computer

Prof. **John Martinis**

UC Santa Barbara

April 20, 2022 (Wed) **9:00–10:00** (JST)

This talk will be recorded and made available for 10 days after the event.



The colloquium will be held **ONLINE**.

To receive the Zoom meeting ID and the announcements of future events, please **register in advance at** <https://forms.gle/bpG2etS1Qkyn796H9>

Note: RQC, iTHEMS, R-CCS members do **NOT** have to register.

Nature allows the storage and manipulation of data in new and powerful ways using quantum mechanics. I will explain the basic concepts behind the exponential power of this technology and how to build a quantum computer using superconductors. I will show recent experimental data on a “quantum supremacy” experiment with 53 qubits: the Sycamore processor takes about 200 seconds to run a quantum circuit a million times – the equivalent task for a state-of-the-art classical supercomputer would take approximately 10,000 years. Finally, I will explain some of the future uses of quantum algorithms and what may be in store for the field in the next 10 years.

コロキウム情報

https://rqc.riken.jp/events/20220420_1st-rqc-colloquium.html

メーリングリスト登録

<https://forms.gle/bpG2etS1Qkyn796H9>

今後の予定

第2回 5月18日(水) 16:00–17:00
Prof. Andrew Dzurak (UNSW)

第3回 6月15日(水) 9:00–10:00
Prof. Adam Kaufman (JILA)