固体素子による量子技術: シリコン

阿部 英介

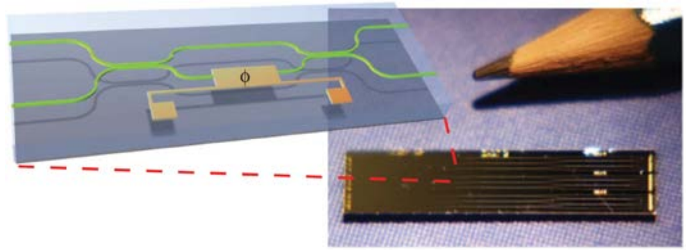
理化学研究所 創発物性科学研究センター

応用物理特別講義A

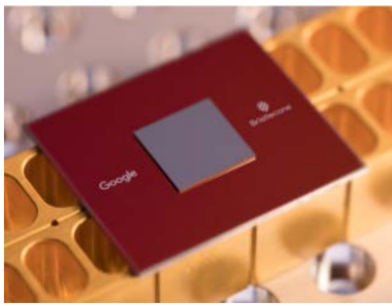
2020年度春学期後半 金曜4限@~~14-202~~オンライン講義

量子技術のプラットフォーム

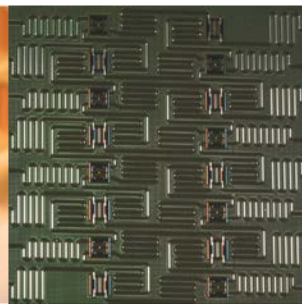
光回路



超伝導回路

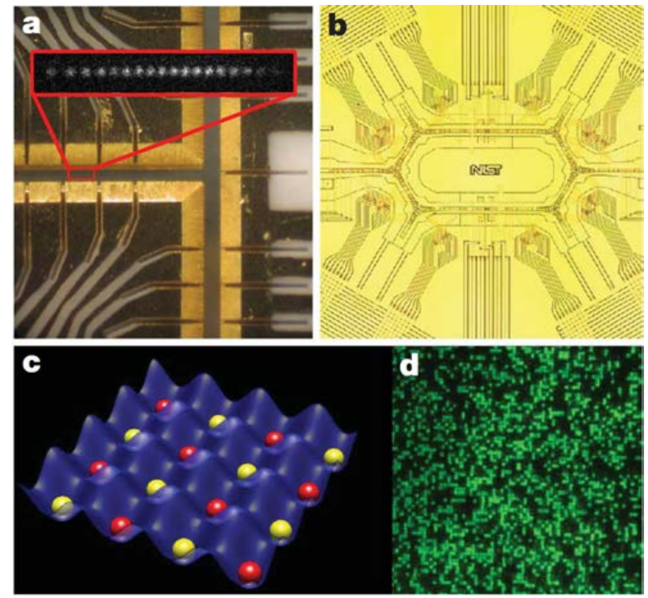


©Google



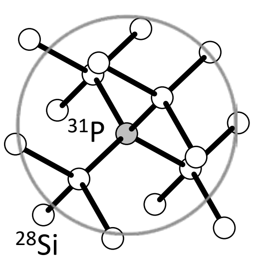
©IBM

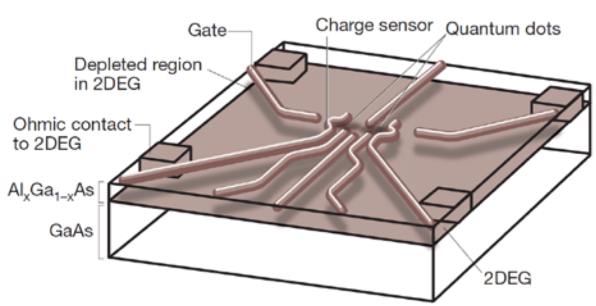
©Intel

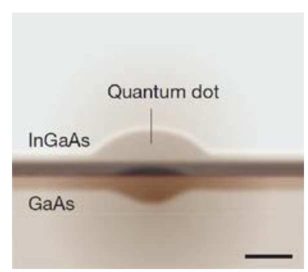


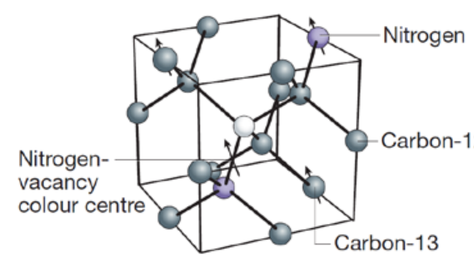
捕捉イオン/冷却原子

半導体スピン





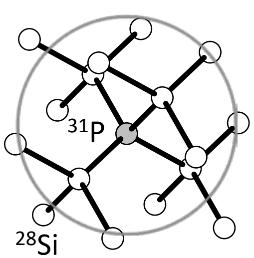


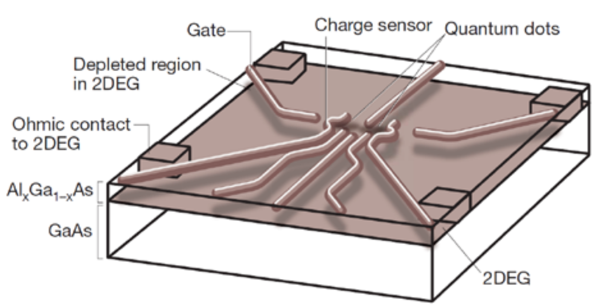


Nature **464**, 45 (2010) Ladd *et al.*

量子技術のプラットフォーム

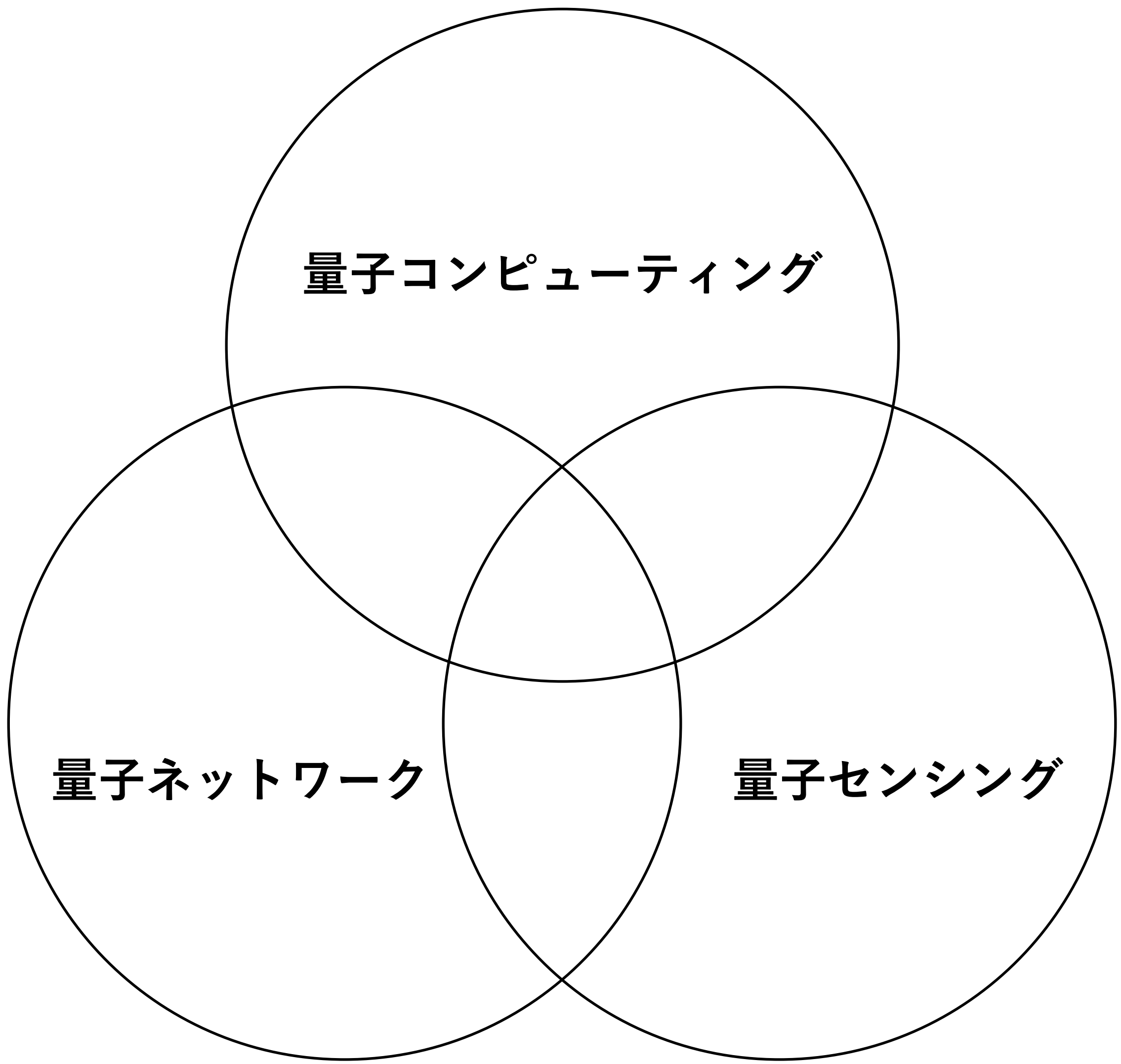
半導体スピン



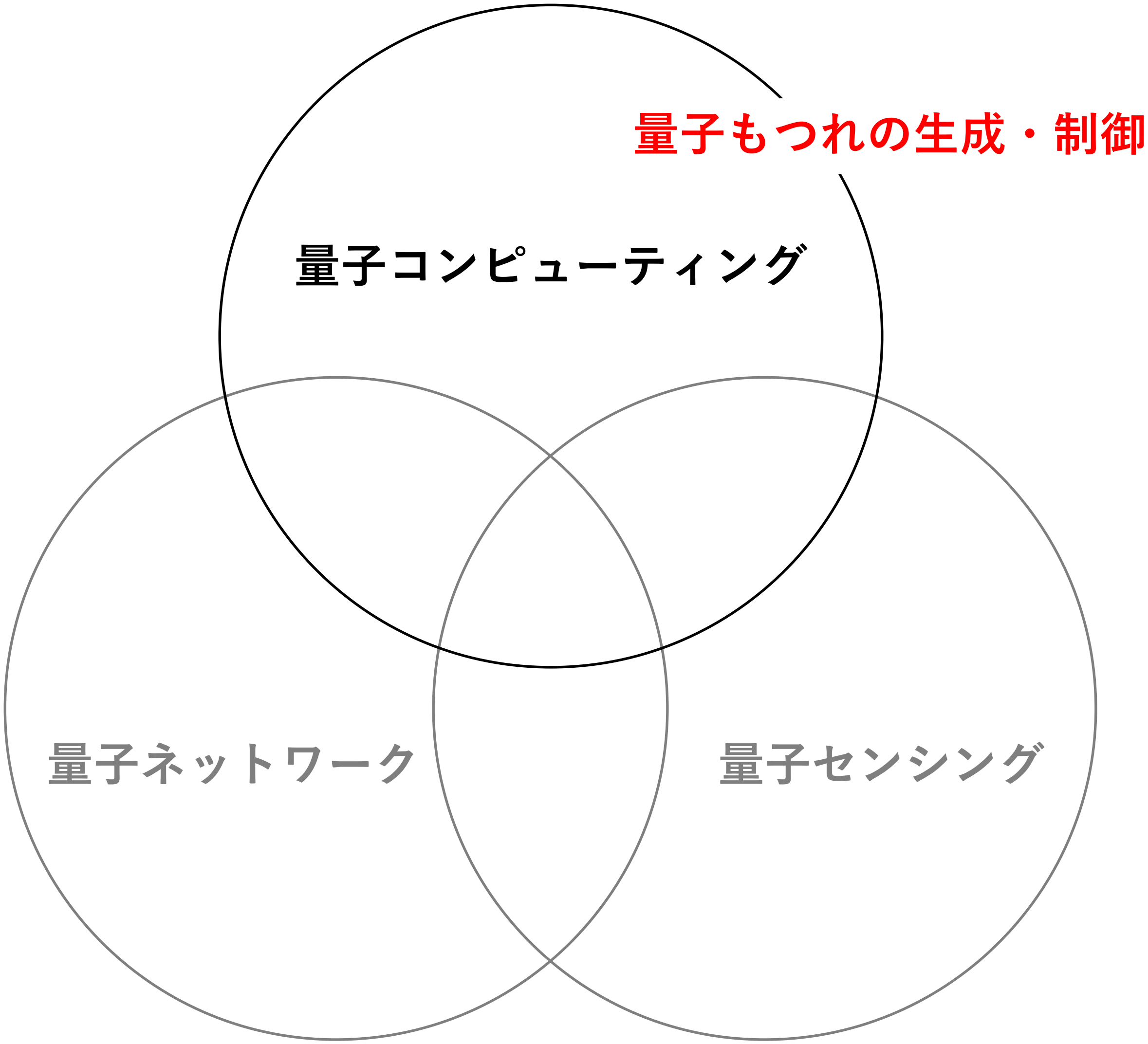


Nature **464**, 45 (2010) Ladd *et al.*

量子技術



量子技術



講義内容

- **ドナースピン**
  - アンサンブル
  - 単一ドナー
- **量子ドットスピン**
  - MOS量子ドット
  - Si/SiGe量子ドット

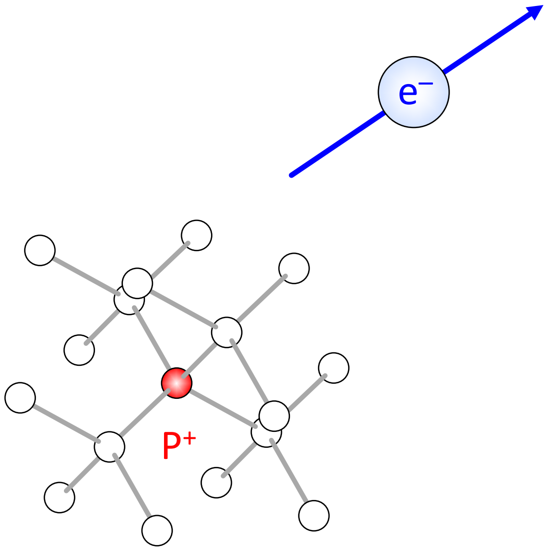
講義内容

- **ドナースピン**
  - アンサンブル
  - 単一ドナー

- **量子ドットスピン**
  - MOS量子ドット
  - Si/SiGe量子ドット

シリコン中のリンドナー

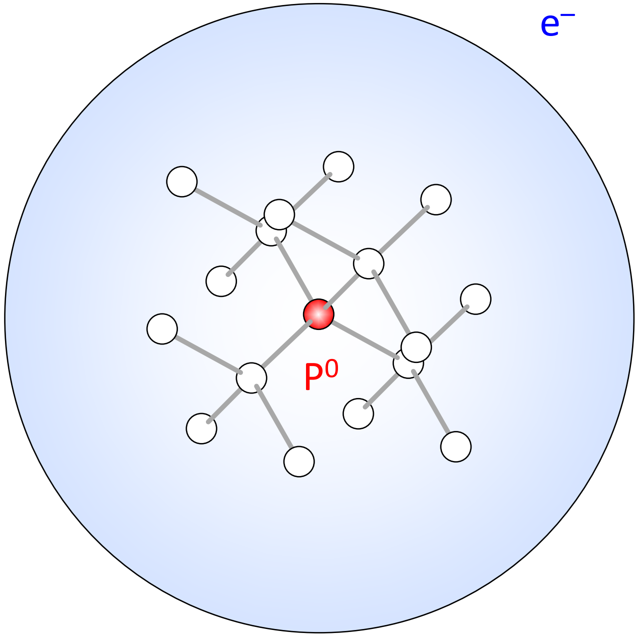
III (13)	IV (14)	V (15)
B	C	N
Al	**Si**	**P**
Ga	Ge	As



室温では100%イオン化
→ 自由電子として電気伝導に寄与

シリコン中のリンドナー

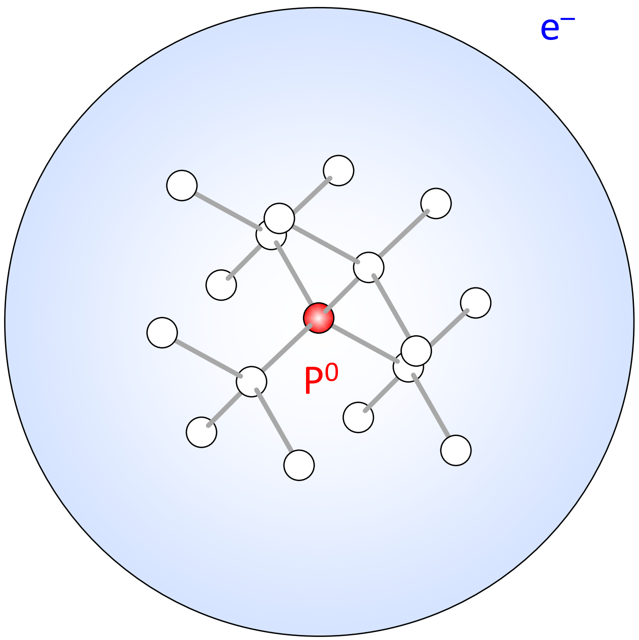
III (13)	IV (14)	V (15)
B	C	N
Al	**Si**	**P**
Ga	Ge	As



低温下(< 10 K): 電子はリンに束縛される
→ 水素原子様浅い不純物

シリコン中のリンドナー

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

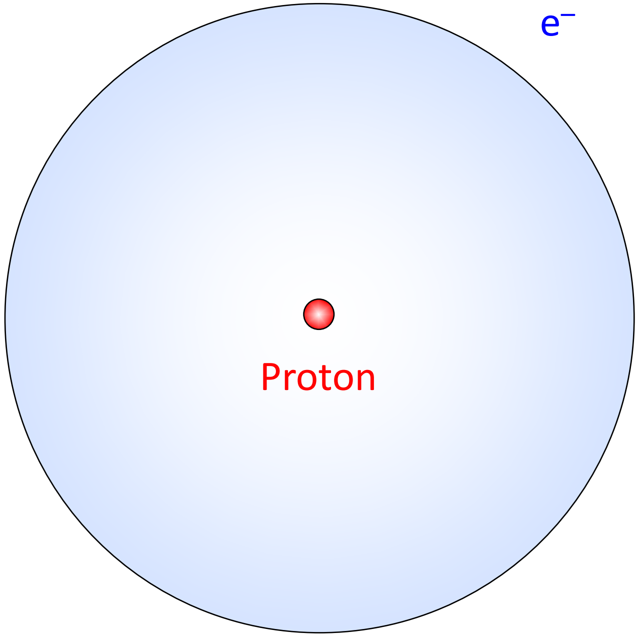


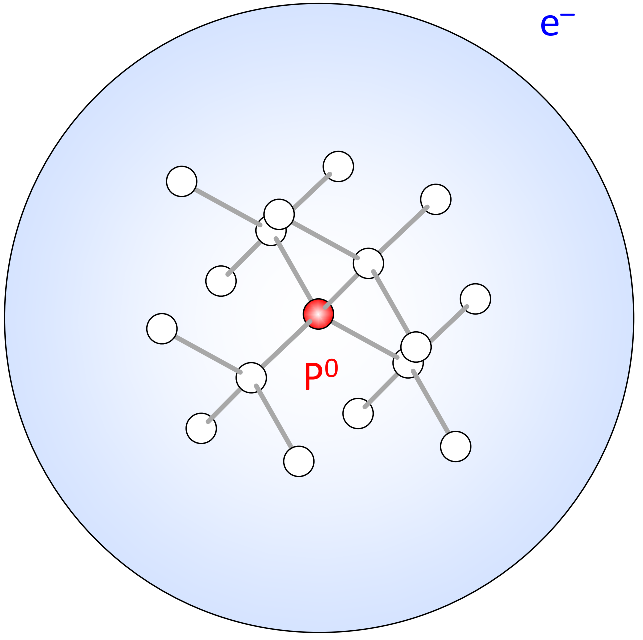
有効Bohr半径: $a_B^* = 3.2$ nm

格子定数: $a_{Si} = 0.54$ nm

シリコン中のリンドナー

水素原子



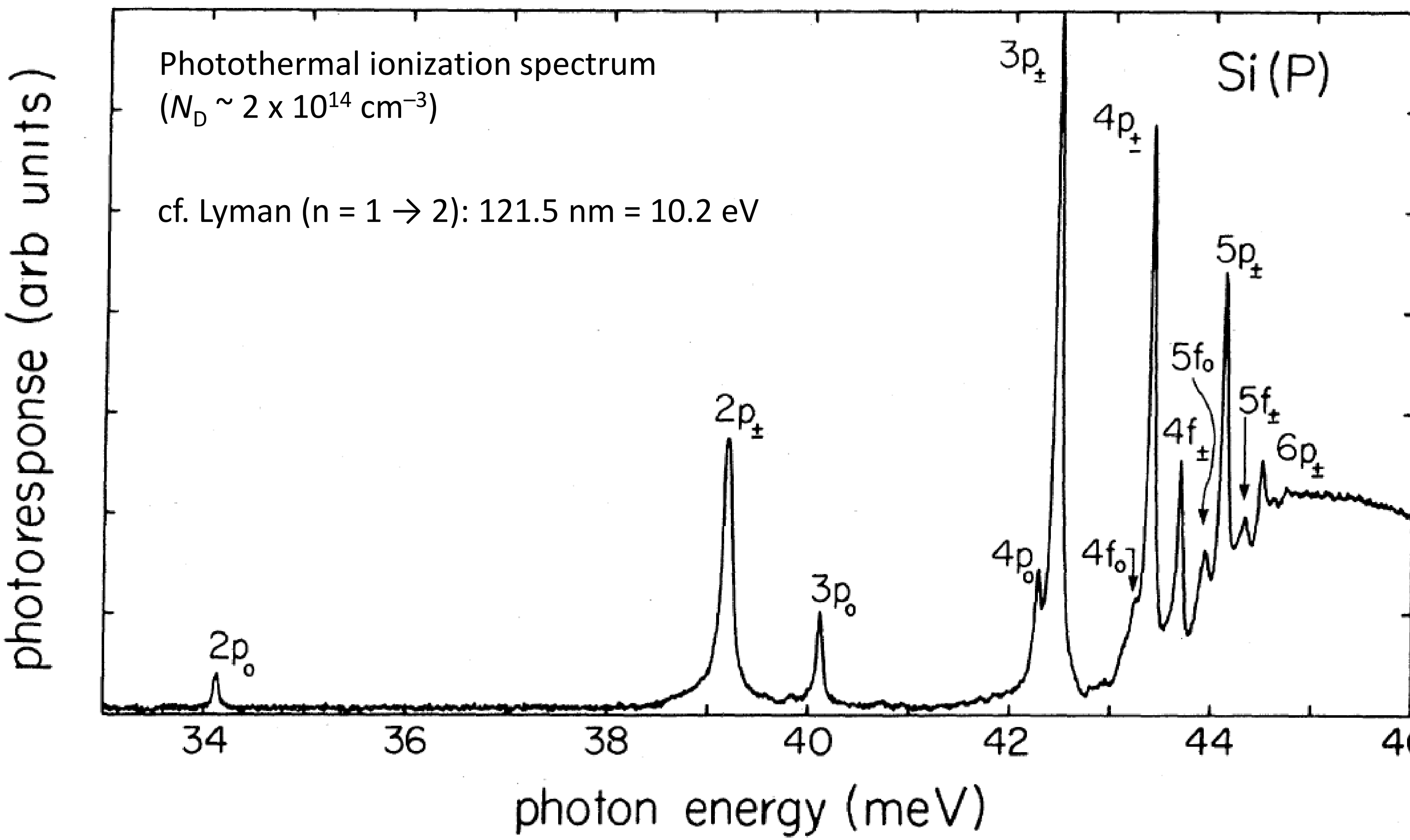


Bohr半径: $a_B = \varepsilon_0 h^2/\pi m e^2$ = 0.053 nm

有効Bohr半径: a_B^* = 3.2 nm

格子定数: a_{Si} = 0.54 nm

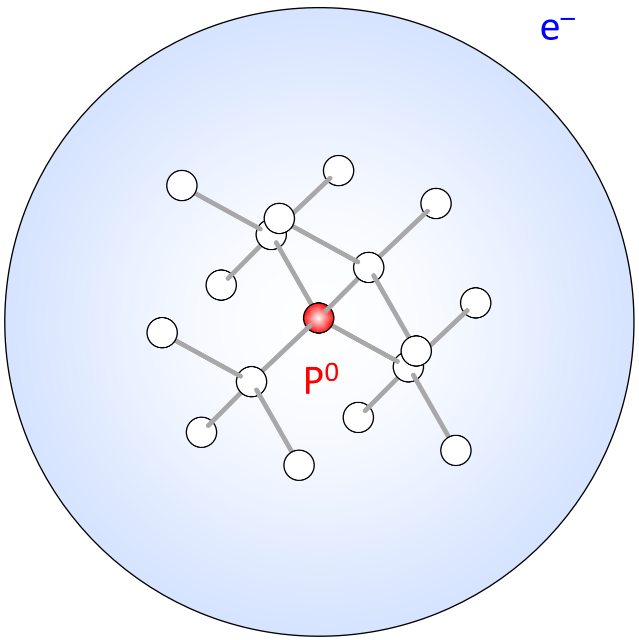
シリコン中のリンドナー



Phys. Rev. B **23**, 2082 (1981) Jagannath *et al.*

シリコン中のリンドナー

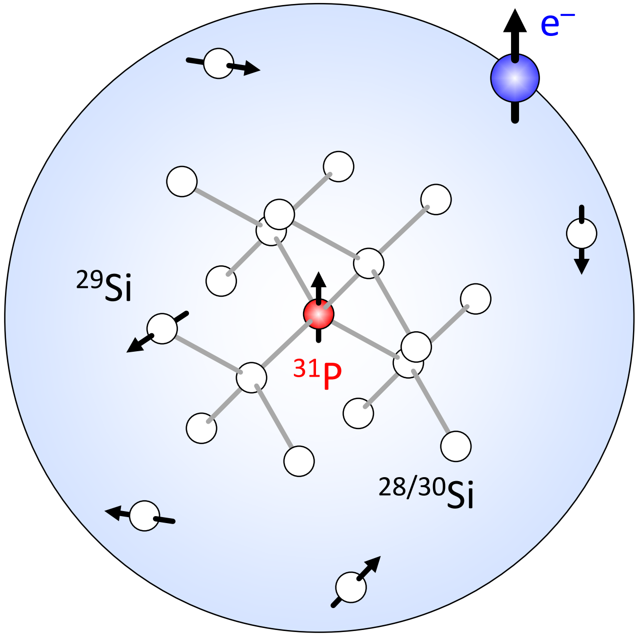
III (13)	IV (14)	V (15)
B	C	N
Al	**Si**	**P**
Ga	Ge	As



低温下(< 10 K): 電子はリンに束縛される
→ 水素原子様浅い不純物

シリコン中のリンドナー

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



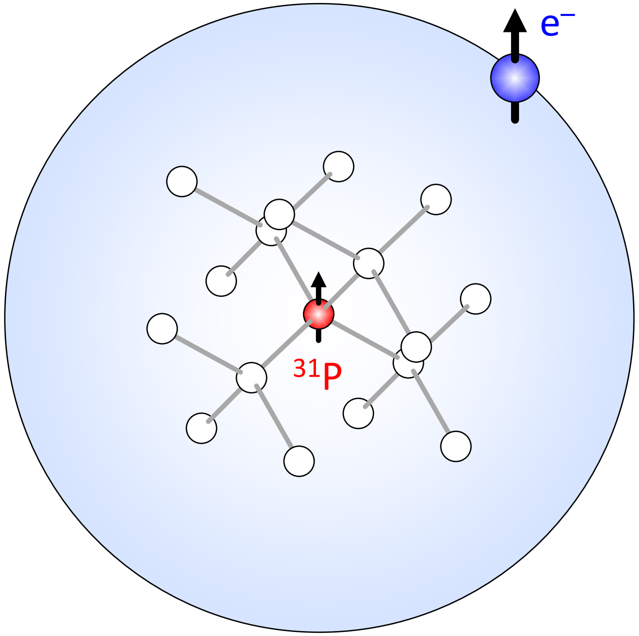
磁気環境

^{28}Si : ^{29}Si (I = ½) : ^{30}Si = 92.2% : 4.7% : 3.1%

^{31}P (I = ½) = 100%

シリコン中のリンドナー

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



磁気環境

同位体制御 ^{28}Si → 99.995%

^{31}P (I = ½) = 100%

シリコン中のリンドナー

スピンハミルトニアン

$$H_0 = \gamma_\mathrm{e} B_0 S_z - \gamma_\mathrm{P} B_0 I_z + a_0 S_z I_z$$

電子スピン ゼーマン

核スピン ゼーマン

電子–核(超微細) 相互作用

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

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

$B_0 \approx 350$ mT

$\gamma_\mathrm{e}/2\pi = 27.97$ GHz/T

$\gamma_\mathrm{P}/2\pi = 17.23$ MHz/T ($\gamma_\mathrm{H}/2\pi = 42.58$ MHz/T)

$a_0/2\pi = 117.53$ MHz ($a_\mathrm{H}/2\pi = 1420.4$ MHz, “21-cm line”)

シリコン中のリンドナー

スピンハミルトニアン

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

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

$$H_0 = \gamma_{\mathrm{e}} B_0 S_z - \gamma_{\mathrm{P}} B_0 I_z + a_0 S_z I_z$$

$$= \frac{\gamma_{\mathrm{e}} B_0}{2}(\sigma_z \otimes I) - \frac{\gamma_{\mathrm{P}} B_0}{2}(I \otimes \sigma_z) + \frac{a_0}{4}(\sigma_z \otimes \sigma_z)$$

$$= \frac{\gamma_{\mathrm{e}} B_0}{2}\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} - \frac{\gamma_{\mathrm{P}} B_0}{2}\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} + \frac{a_0}{4}\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \frac{\gamma_{\mathrm{e}} B_0}{2} - \frac{\gamma_{\mathrm{P}} B_0}{2} + \frac{a_0}{4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\gamma_{\mathrm{e}} B_0}{2} + \frac{\gamma_{\mathrm{P}} B_0}{2} - \frac{a_0}{4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\gamma_{\mathrm{e}} B_0}{2} - \frac{\gamma_{\mathrm{P}} B_0}{2} - \frac{a_0}{4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\gamma_{\mathrm{e}} B_0}{2} + \frac{\gamma_{\mathrm{P}} B_0}{2} + \frac{a_0}{4} \end{pmatrix}$$

$|\uparrow\Uparrow\rangle$　$|\uparrow\Downarrow\rangle$　$|\downarrow\Uparrow\rangle$　$|\downarrow\Downarrow\rangle$

シリコン中のリンドナー

スピンハミルトニアン

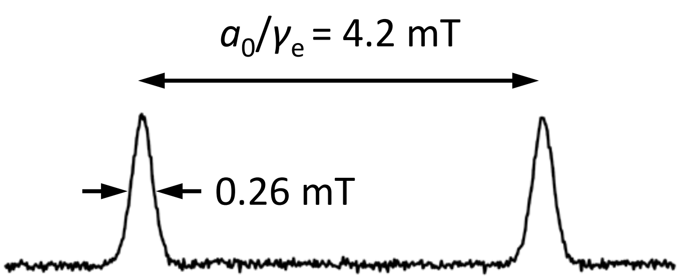
$$H_0 = \gamma_{\mathrm{e}} B_0 S_z - \gamma_{\mathrm{P}} B_0 I_z + a_0 S_z I_z$$

$B_0 \approx 350$ mT

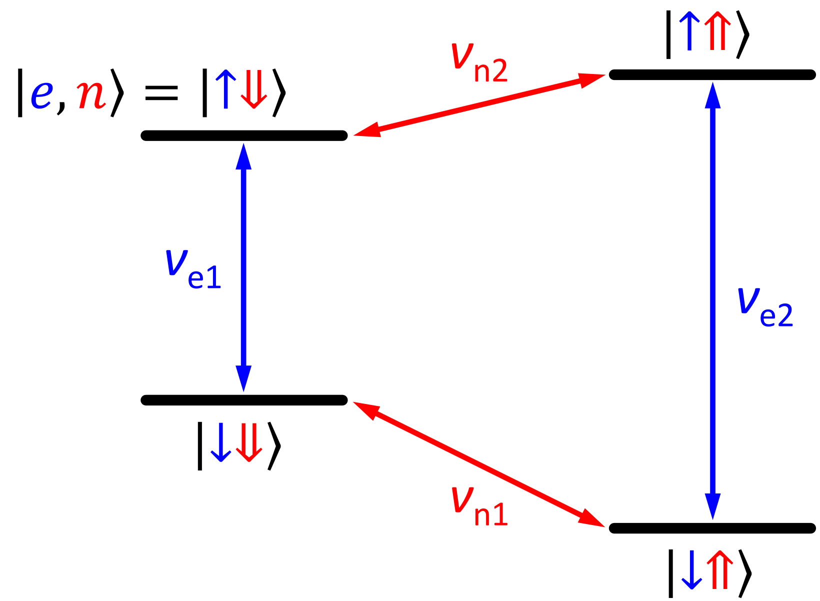
$\gamma_{\mathrm{e}}/2\pi = 27.97$ GHz/T

$\gamma_{\mathrm{P}}/2\pi = 17.23$ MHz/T

$a_0/2\pi = 117.53$ MHz



アンサンブル電子スピン共鳴(^{nat}Si、磁場掃引)



$\nu_{\mathrm{e1}} = \gamma_{\mathrm{e}} B_0 - a_0/2$ $\quad$ $\nu_{\mathrm{e2}} = \gamma_{\mathrm{e}} B_0 + a_0/2$

$\nu_{\mathrm{n1}} = a_0/2 + \gamma_{\mathrm{P}} B_0$ $\quad$ $\nu_{\mathrm{n2}} = a_0/2 - \gamma_{\mathrm{P}} B_0$

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**
2. **初期化**
3. **長いコヒーレンス時間**
4. **ユニバーサル量子ゲート**
5. **射影測定**

D. DiVincenzo

Fortschr. Phys. **48**, 771 (2000) DiVincenzo

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**

2. **初期化**

3. **長いコヒーレンス時間**
   → T_{2e} = 10 s (*1), T_{2n} = 180 min (*2)

4. **ユニバーサル量子ゲート**

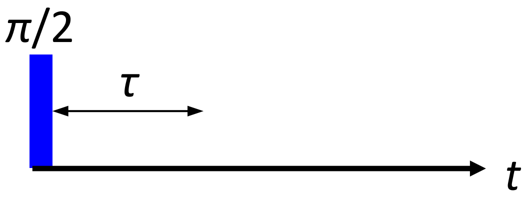
5. **射影測定**

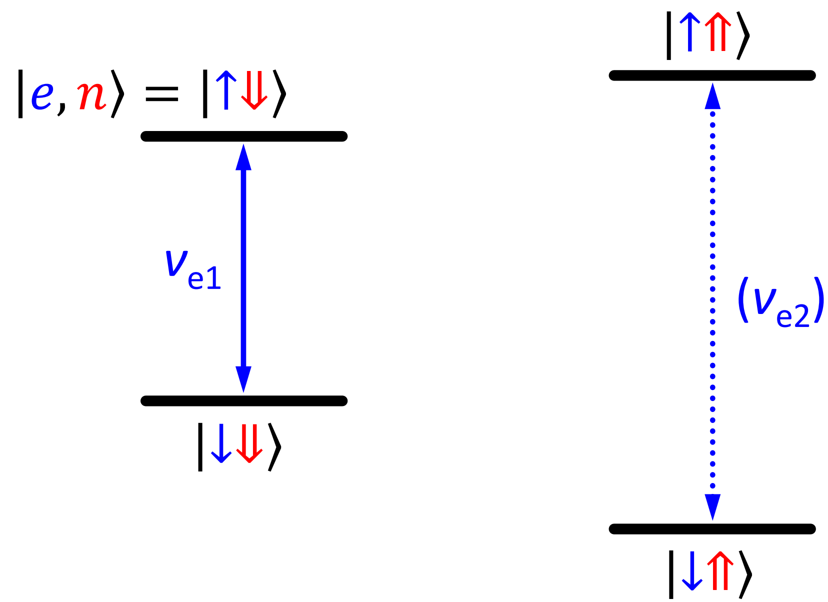
*1: Nature Mat. **11**, 143 (2012) Tyryshkin *et al.*

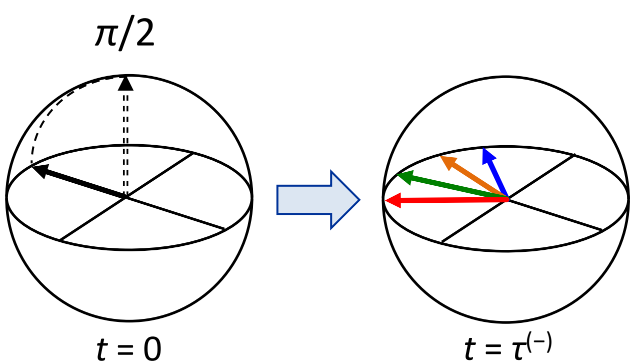
*2: Science **342**, 830 (2013) Saeedi *et al.*

Fortschr. Phys. **48**, 771 (2000) DiVincenzo

電子スピンコヒーレンス: T_{2e}



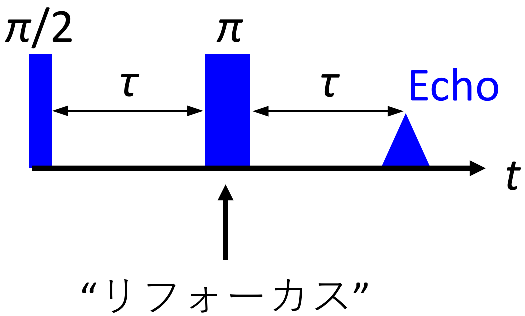


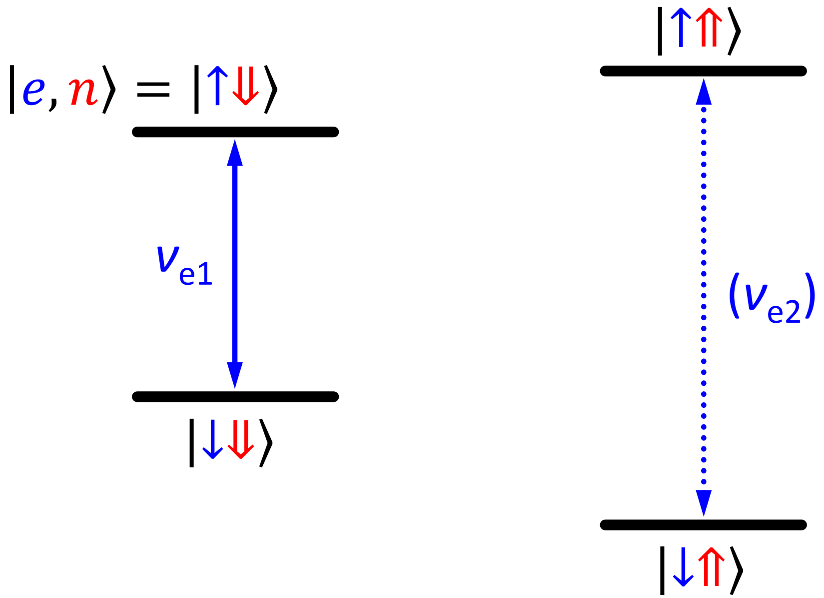


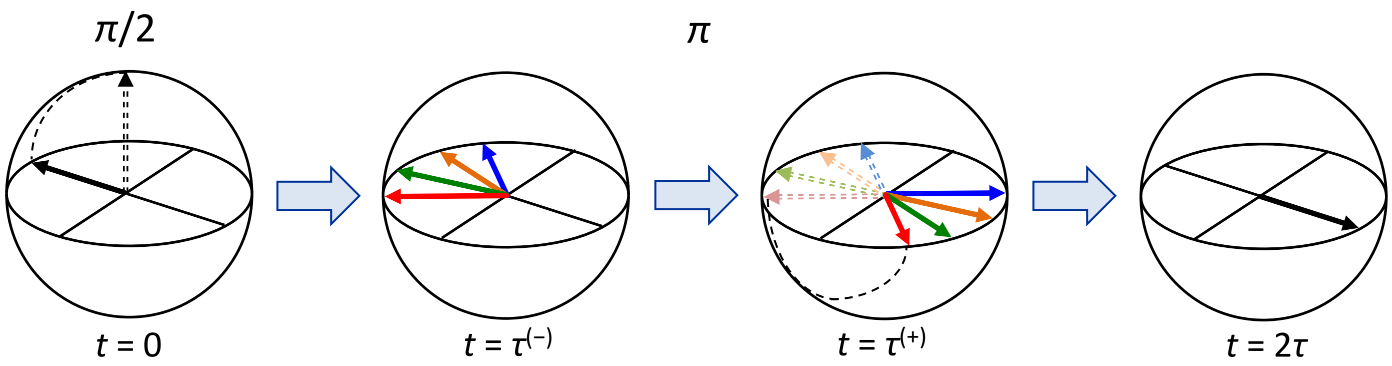
不均一性(^{29}Si由来)による見かけの減衰

$T_{2e}^{*} \approx (\gamma_e\ 0.26\ \mathrm{mT})^{-1} \approx 130\ \mathrm{ns} \ll T_{2e} \approx 500\ \mu\mathrm{s}$

電子スピンコヒーレンス: T_{2e}



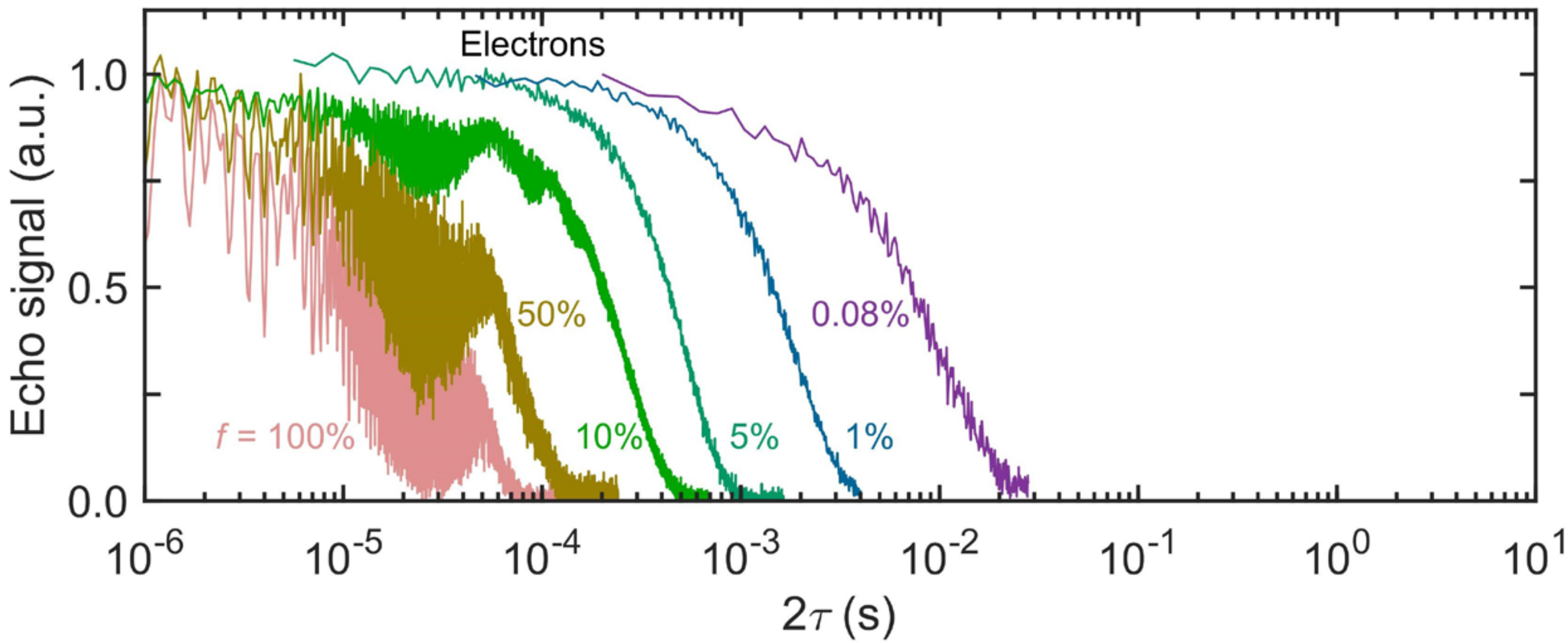




電子スピンコヒーレンス: T_{2e}

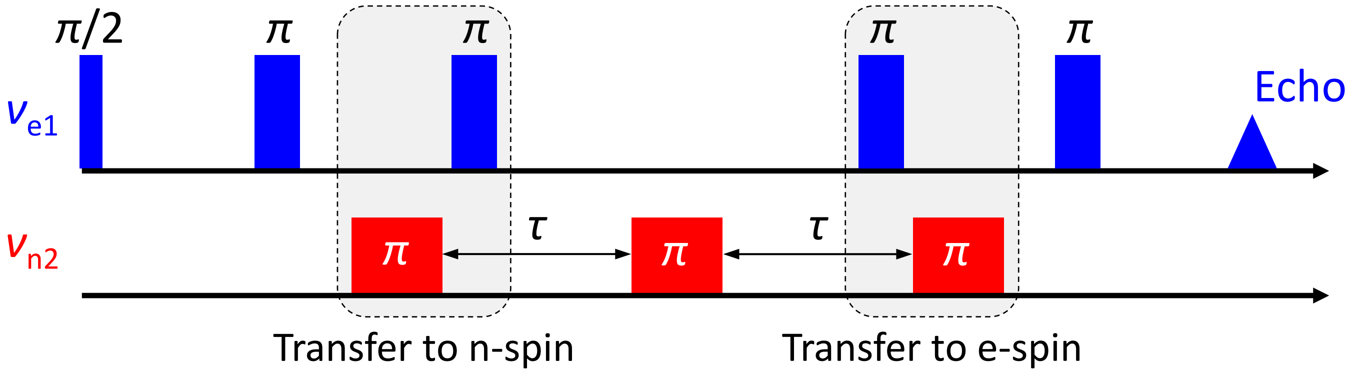
Electron spin coherence of phosphorus donors in silicon: Effect of environmental nuclei

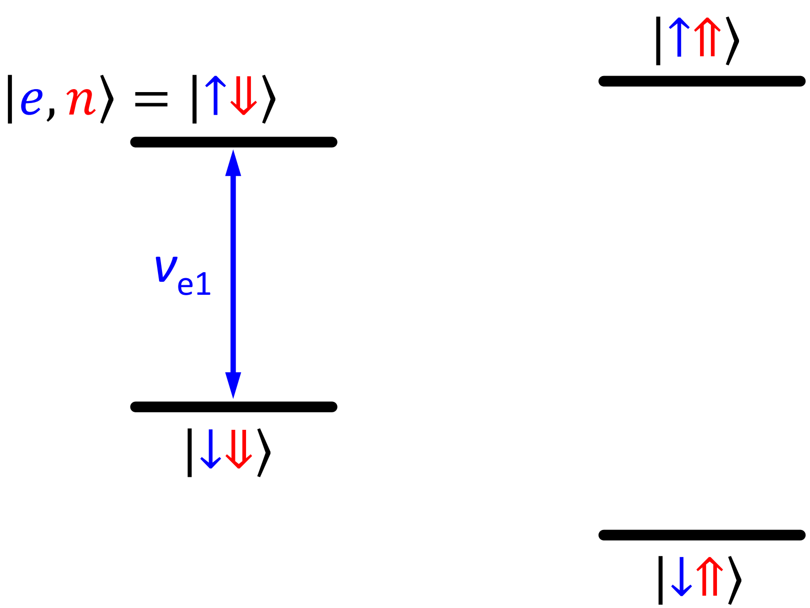
Eisuke Abe,[1,2,*] Alexei M. Tyryshkin,[3] Shinichi Tojo,[2] John J. L. Morton,[1,4] Wayne M. Witzel,[5] Akira Fujimoto,[2] Joel W. Ager,[6] Eugene E. Haller,[6,7] Junichi Isoya,[8] Stephen A. Lyon,[3] Mike L. W. Thewalt,[9] and Kohei M. Itoh[2]



Phys. Rev. B **82**, 121201 (2010) Abe *et al.*

核スピンコヒーレンス: T_{2n0}

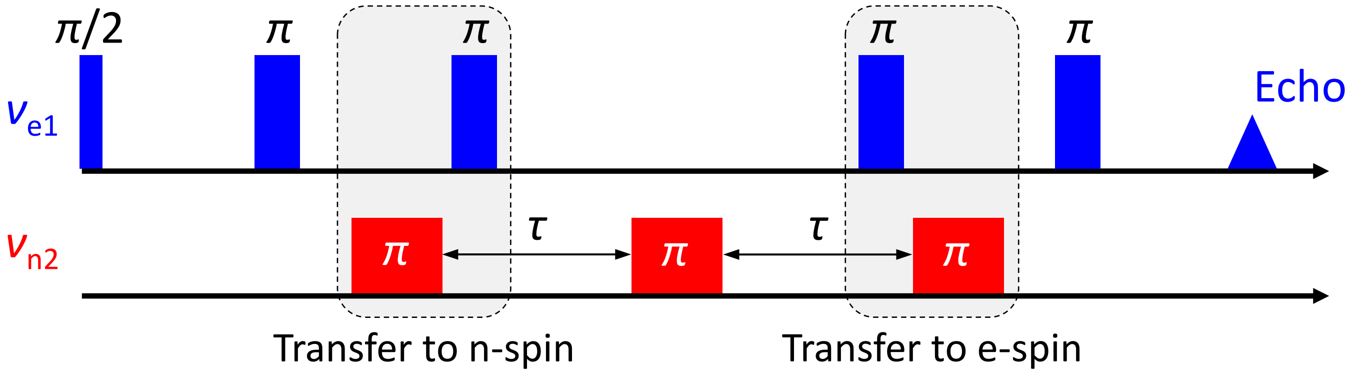


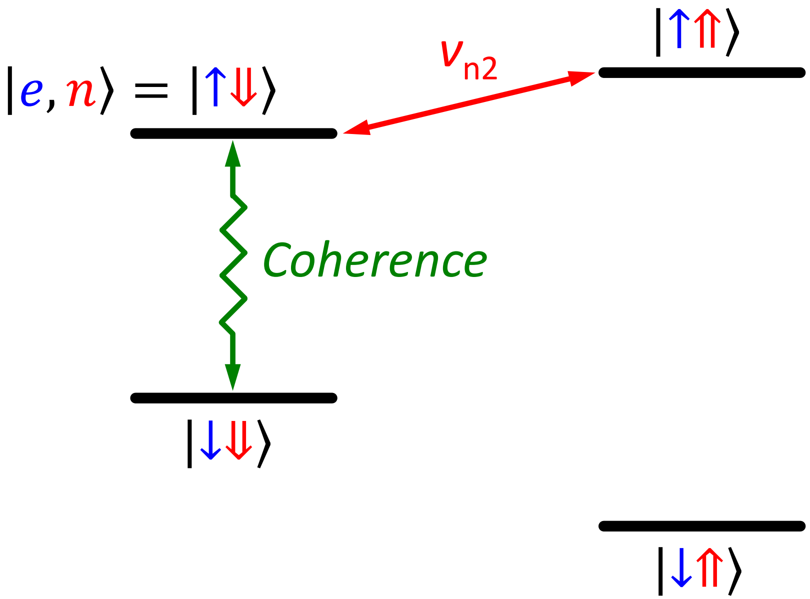


Electron Nuclear DOuble Resonance

Nature **455**, 1085 (2008) Morton *et al.*

核スピンコヒーレンス: T_{2n0}

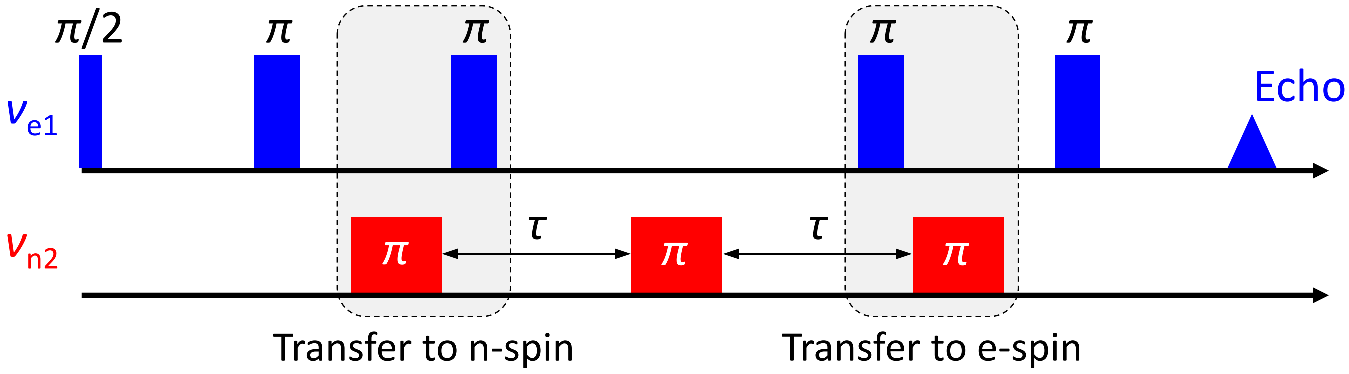


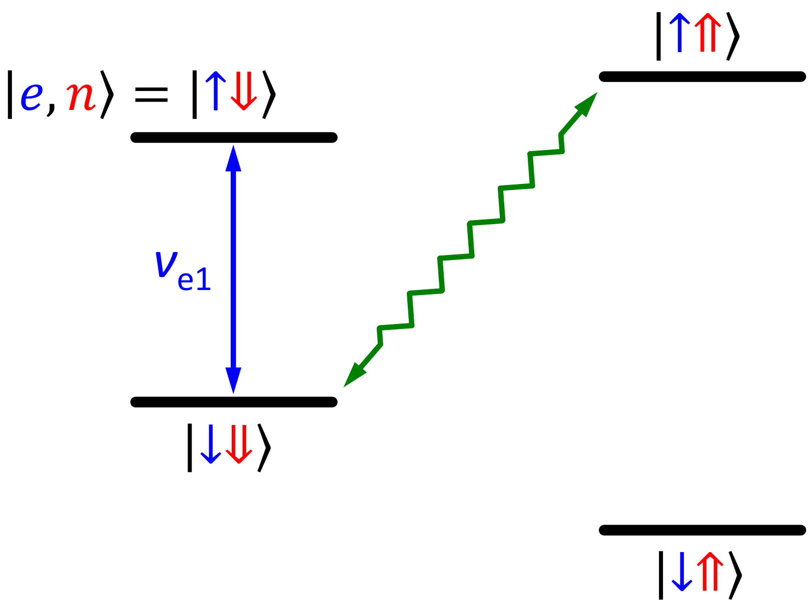


<u>E</u>lectron <u>N</u>uclear <u>DO</u>uble <u>R</u>esonance

Nature **455**, 1085 (2008) Morton *et al.*

核スピンコヒーレンス: T_{2n0}

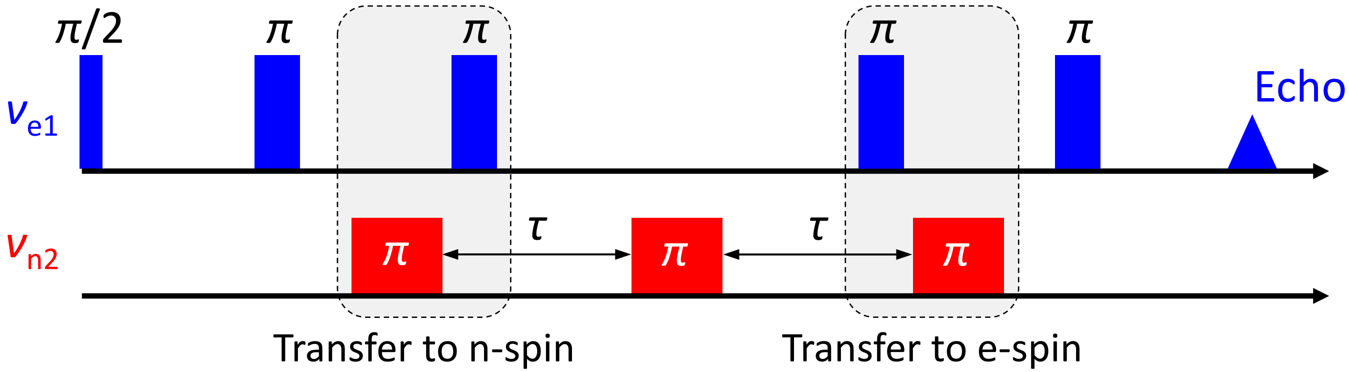


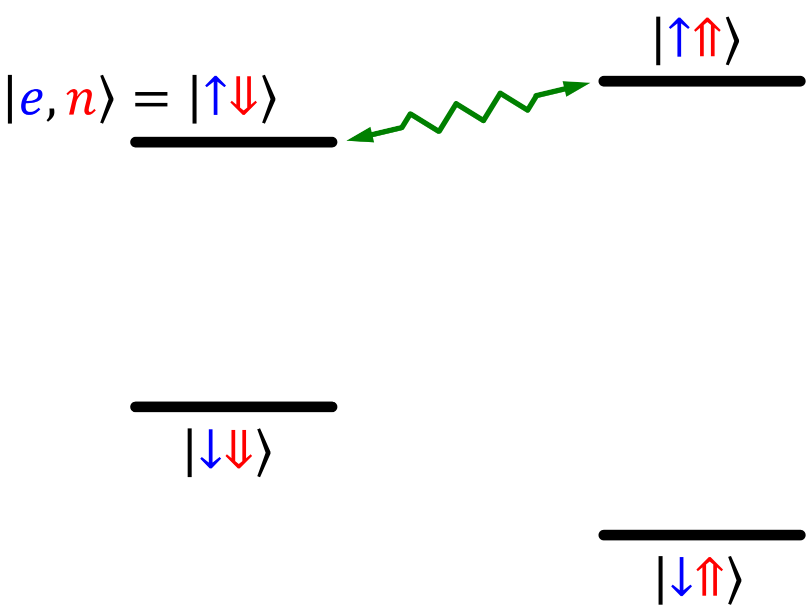


Electron Nuclear DOuble Resonance

Nature **455**, 1085 (2008) Morton *et al.*

核スピンコヒーレンス: T_{2n0}





Electron Nuclear DOuble Resonance

Nature **455**, 1085 (2008) Morton *et al.*

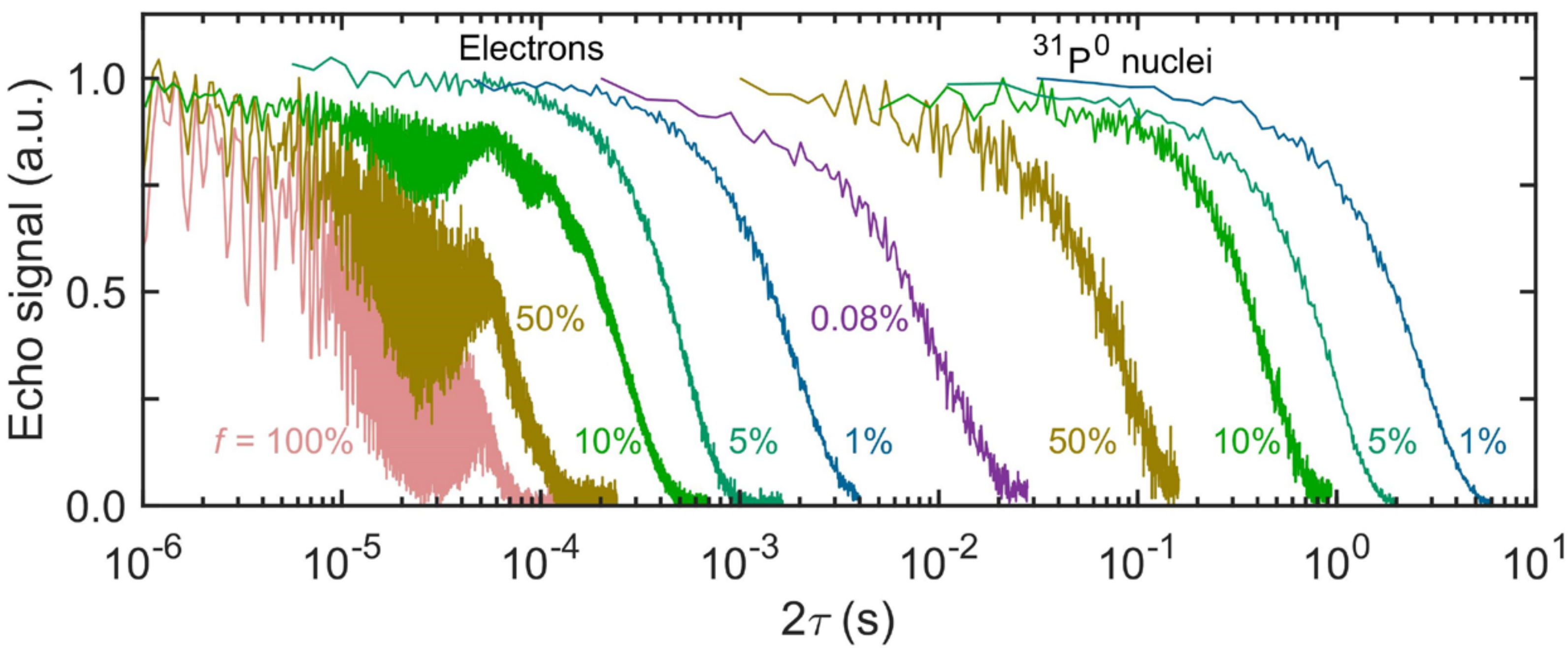
核スピンコヒーレンス: T_{2n0}

Electron spin coherence of phosphorus donors in silicon: Effect of environmental nuclei

Eisuke Abe,[1,2,*] Alexei M. Tyryshkin,[3] Shinichi Tojo,[2] John J. L. Morton,[1,4] Wayne M. Witzel,[5] Akira Fujimoto,[2] Joel W. Ager,[6] Eugene E. Haller,[6,7] Junichi Isoya,[8] Stephen A. Lyon,[3] Mike L. W. Thewalt,[9] and Kohei M. Itoh[2]

Nuclear spin decoherence of neutral ^{31}P donors in silicon: Effect of environmental ^{29}Si nuclei

Evan S. Petersen,[1] A. M. Tyryshkin,[1] J. J. L. Morton,[2] E. Abe,[3] S. Tojo,[3] K. M. Itoh,[3] M. L. W. Thewalt,[4] and S. A. Lyon[1]



Phys. Rev. B **93**, 161202 (2016) Petersen *et al.*

Method of Polarizing Nuclei in Paramagnetic Substances

G. FEHER
Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, New Jersey
(Received May 31, 1956)

OVERHAUSER[1] has shown that a saturation of the electron spin resonance leads to a large enhancement of the nuclear polarization. A necessary condition for this enhancement is that the nuclei relax via the electrons whose resonance is being saturated.

Polarization of Phosphorus Nuclei in Silicon

G. FEHER AND E. A. GERE
Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, New Jersey
(Received May 31, 1956)

IN the preceding Letter a scheme for polarizing nuclei was described. This Letter deals with the experimental verification of the scheme.

Wolf Prize in Chemistry (2006)

1950年台に固体物理で業績を挙げたのち
生物物理(主に光合成)に転向

"…delighted to hear that EPR in Si is sill alive and doing well and has branched out into new and exciting areas" (email to E.A. Dec. 2016)

G. Feher
(1924–2017)

Phys. Rev. **103**, 500 (1956) Feher

Phys. Rev. **103**, 501 (1956) Feher & Gere

Quantum Computation

David P. DiVincenzo

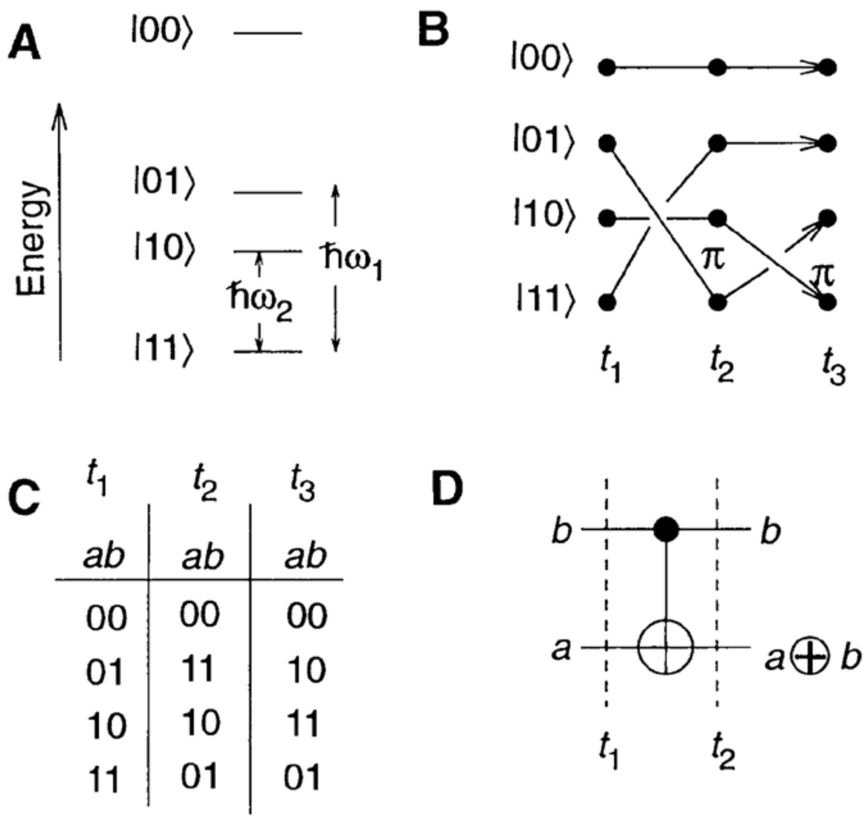


Fig. 2. The action of the two-qubit XOR gate.

The XOR protocol is very closely related to procedures invented long ago in the field of resonance spectroscopies (*13*). In 1956, Feher introduced a procedure for polarization transfer in electron-nucleus double resonance (ENDOR), which contains the XOR protocol just discussed.

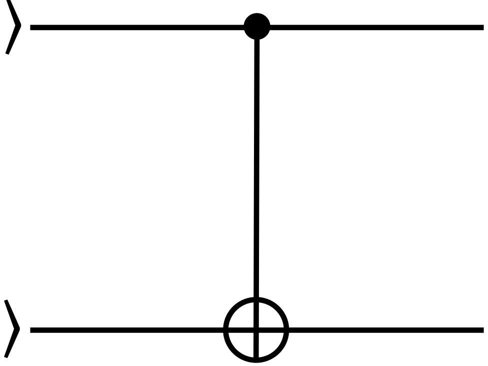
for many purposes in physics, chemistry, and biology, it is highly desirable to move the spin state of an electron onto a nearby nucleus. The fact that this procedure also performs an interesting logical function, XOR, was not previously noted by ENDOR spectroscopists.

Science **270**, 255 (1995) DiVincenzo

制御NOTゲート

制御ビットが1のとき標的ビットを反転

制御ビット $|a\rangle$ → $|a\rangle$

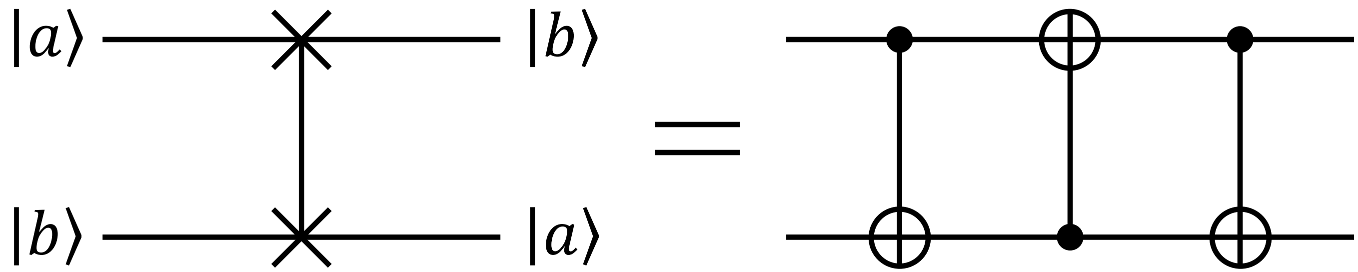


標的ビット $|b\rangle$ → $X^a|b\rangle = |b \oplus a\rangle$

$$X = \sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

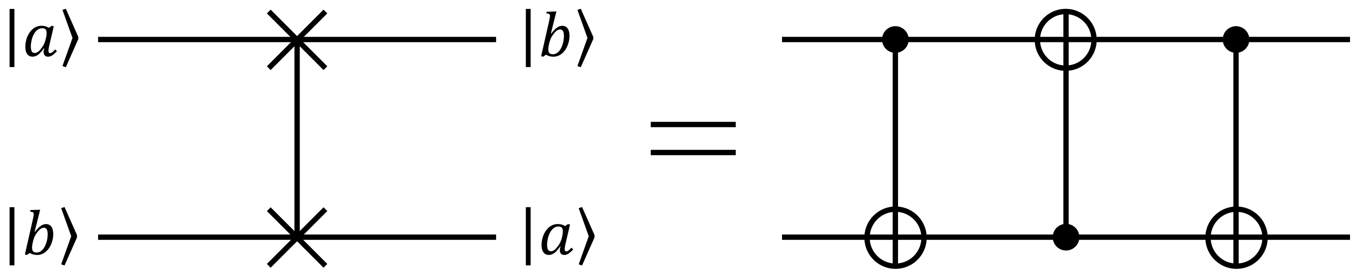
$$\begin{aligned} \mathrm{CNOT}|00\rangle &= |00\rangle \\ \mathrm{CNOT}|01\rangle &= |01\rangle \\ \mathrm{CNOT}|10\rangle &= |11\rangle \\ \mathrm{CNOT}|11\rangle &= |10\rangle \end{aligned} \quad \Leftrightarrow \quad \mathrm{CNOT} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

SWAPゲート



$$
\begin{aligned}
\mathrm{SWAP}|00\rangle &= |00\rangle \\
\mathrm{SWAP}|01\rangle &= |10\rangle \\
\mathrm{SWAP}|10\rangle &= |01\rangle \\
\mathrm{SWAP}|11\rangle &= |11\rangle
\end{aligned}
\quad \Leftrightarrow \quad
\mathrm{SWAP} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
$$

SWAPゲート



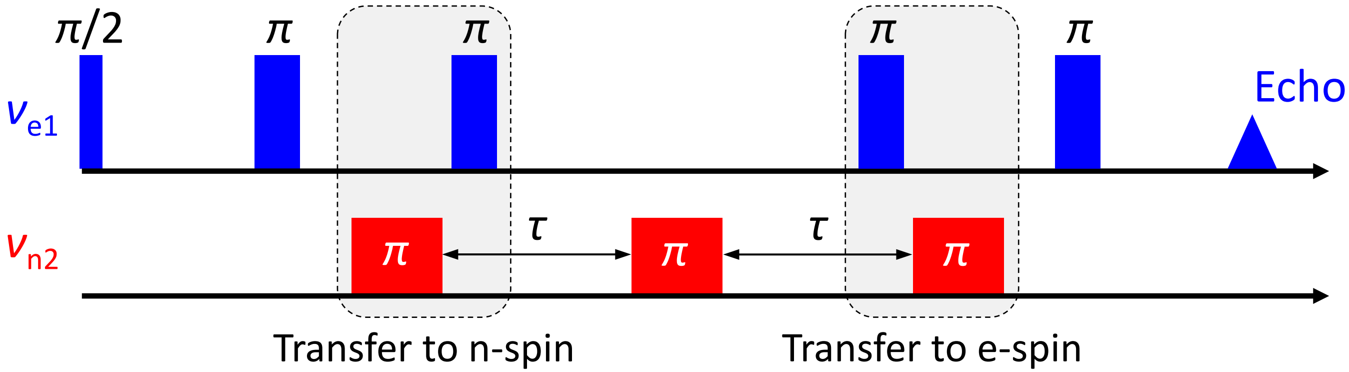
SWAP に必要な手続き
- 第1ビットの情報を第2ビットへ書き込む
- 第2ビットの情報を第1ビットへ書き込む
- 第1ビットの情報を第1ビットから消去する
- 第2ビットの情報を第2ビットから消去する

$$|a\rangle|b\rangle \xrightarrow{C_{12}} |a\rangle|b \oplus a\rangle$$

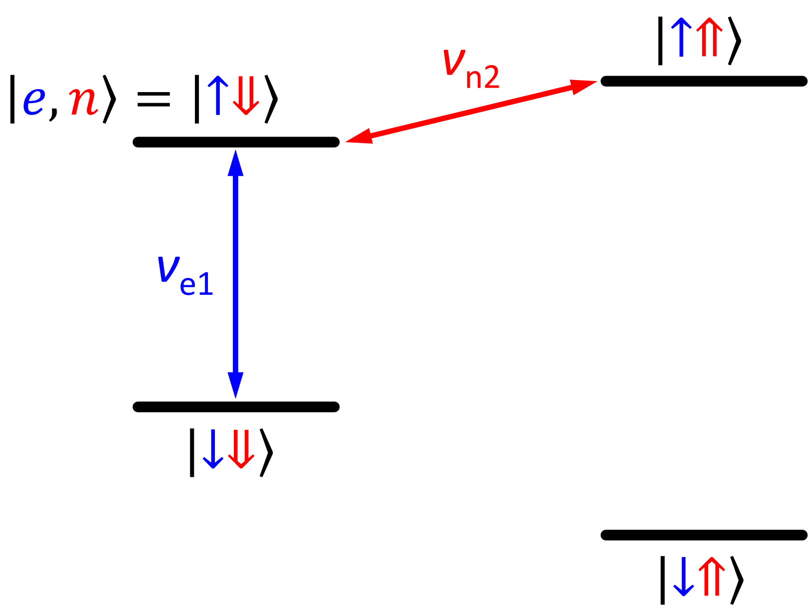
$$\xrightarrow{C_{21}} |a \oplus (b \oplus a)\rangle|b \oplus a\rangle = |b\rangle|b \oplus a\rangle$$

$$\xrightarrow{C_{12}} |b\rangle|(b \oplus a) \oplus b\rangle = |b\rangle|a\rangle$$

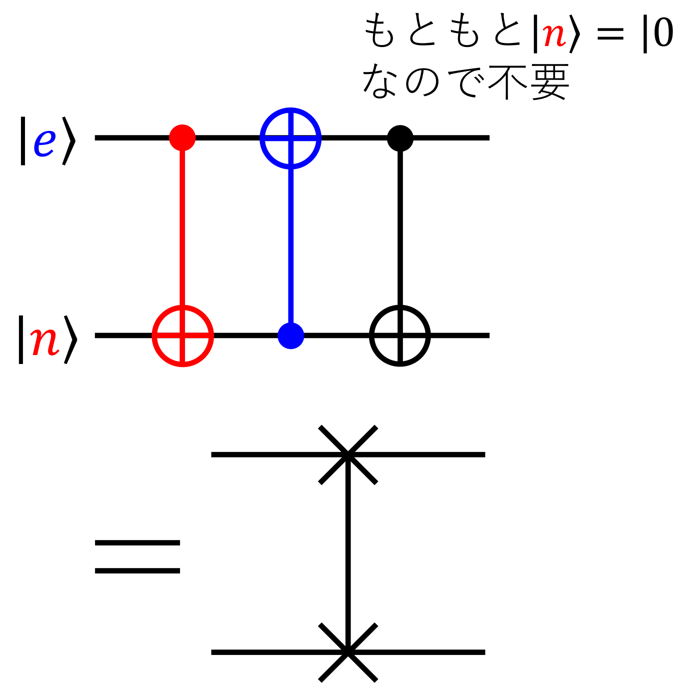
ENDORとSWAP



$\pi/2$
π
π
π
π
Echo
ν_{e1}
ν_{n2}
π
τ
π
τ
π
Transfer to n-spin
Transfer to e-spin



$|e, n\rangle = |\uparrow\Downarrow\rangle$
ν_{n2}
$|\uparrow\Uparrow\rangle$
ν_{e1}
$|\downarrow\Downarrow\rangle$
$|\downarrow\Uparrow\rangle$



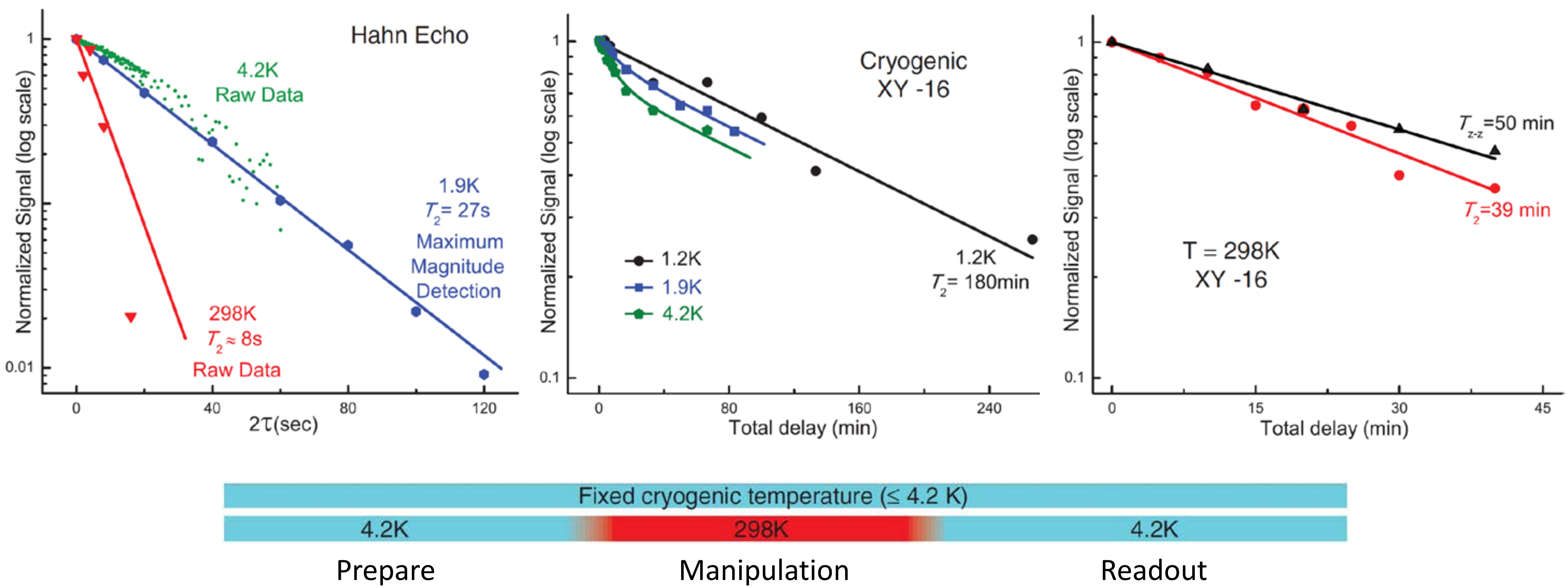
もともと$|n\rangle = |0\rangle$
なので不要
$|e\rangle$
$|n\rangle$
=

核スピンコヒーレンス: T_{2n+}

Room-Temperature Quantum Bit Storage Exceeding 39 Minutes Using Ionized Donors in Silicon-28

Kamyar Saeedi,[1] Stephanie Simmons,[2] Jeff Z. Salvail,[1] Phillip Dluhy,[1] Helge Riemann,[3] Nikolai V. Abrosimov,[3] Peter Becker,[4] Hans-Joachim Pohl,[5] John J. L. Morton,[6] Mike L. W. Thewalt[1*]

Auger-electron-detected NMR



Science **342**, 830 (2013) Saeedi *et al.*

レポート課題 2 (20点)

低磁場におけるSi:Pのスピンハミルトニアンは

$$H_1 = \gamma_{\mathrm{e}} B_0 S_z - \gamma_{\mathrm{P}} B_0 I_z + a_0 \boldsymbol{S} \cdot \boldsymbol{I}$$

と書かれる。ただし

$$\boldsymbol{S} \cdot \boldsymbol{I} = \frac{1}{2}\begin{pmatrix}\sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z\end{pmatrix} \cdot \frac{1}{2}\begin{pmatrix}\sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z\end{pmatrix} = \frac{1}{4}\left(\sigma_x \otimes \sigma_x + \sigma_y \otimes \sigma_y + \sigma_z \otimes \sigma_z\right)$$

である。

(1) H_1を4x4行列で表せ。基底は$|\uparrow\Uparrow\rangle$, $|\uparrow\Downarrow\rangle$, $|\downarrow\Uparrow\rangle$, $|\downarrow\Downarrow\rangle$の順とする。

(2) H_1を対角化し、4つ固有値をB_0の関数として求めよ。

ヒント: (1)より$|\uparrow\Uparrow\rangle$,$|\downarrow\Downarrow\rangle$は対角的であることが示されるので、$|\uparrow\Downarrow\rangle$, $|\downarrow\Uparrow\rangle$に対する2x2行列Aについて永年方程式$|\mathrm{A} - \lambda I| = 0$を解けばよい。

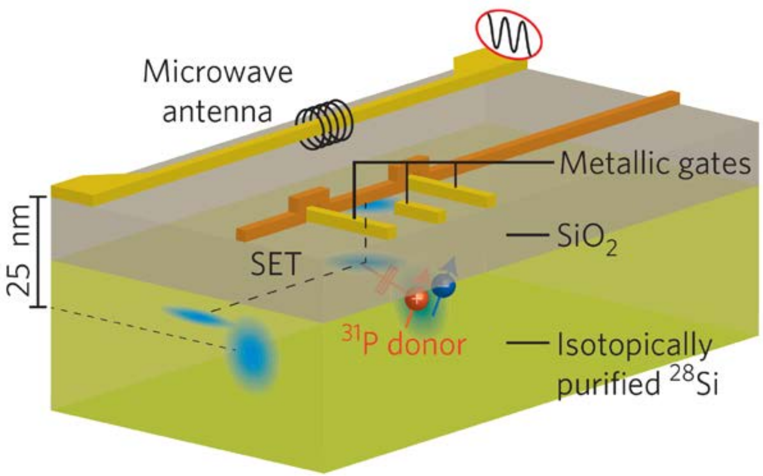
(3) 十分大きな磁場($B_0 \gg a_0/\gamma_{\mathrm{e}}$)では、$H_1$と$H_0$の固有値は一致することを確認せよ。

講義内容

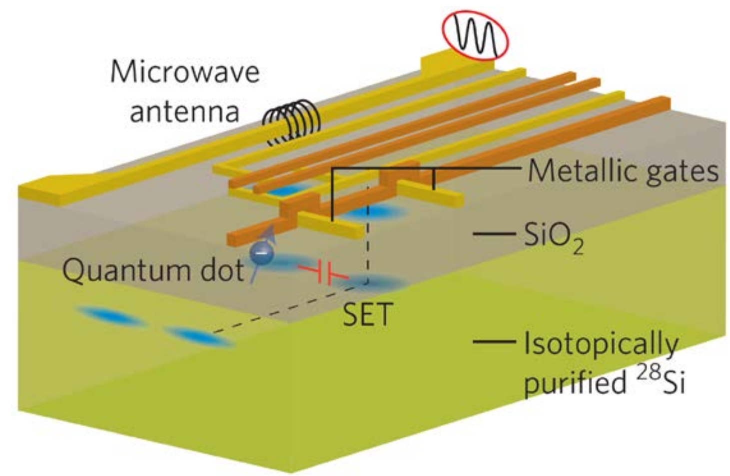
- **ドナースピン**
  - アンサンブル
  - 単一ドナー

- **量子ドットスピン**
  - MOS量子ドット
  - Si/SiGe量子ドット

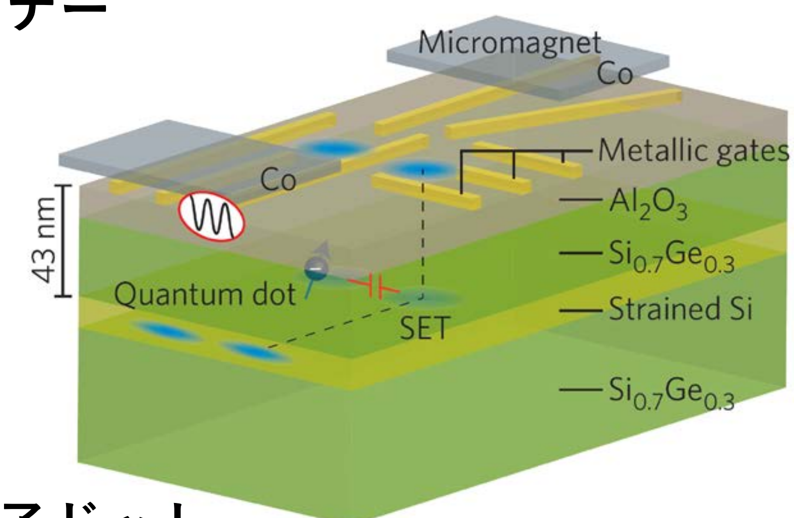
Si単一スピン量子ビット



単一リンドナー



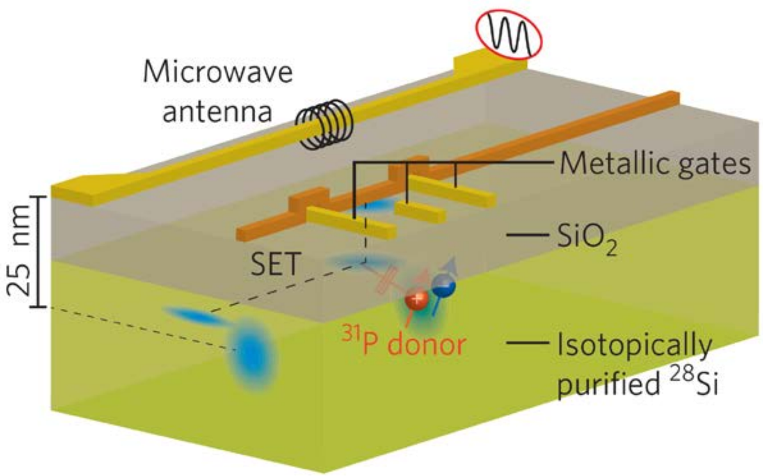
MOS量子ドット



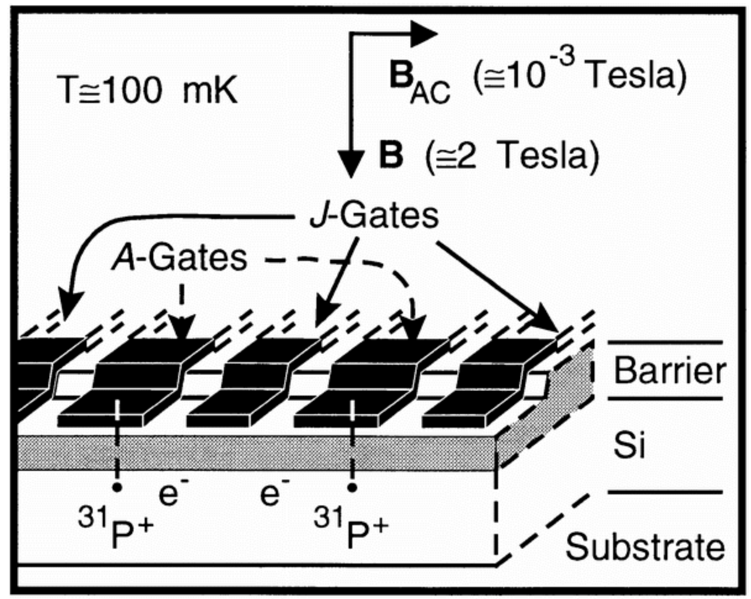
Si/SiGe量子ドット

Nature Nano. **9**, 966 (2014) Schreiber & Bluhm

Si単一スピン量子ビット



単一リンドナー



98年の提案から10年以上を掛けて実験が進展@豪国

Nature **393**, 133 (1998) Kane

Nature Nano. **9**, 966 (2014) Schreiber & Bluhm

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**
2. **初期化**
3. **長いコヒーレンス時間**
4. **ユニバーサル量子ゲート**
5. **射影測定**

Fortschr. Phys. **48**, 771 (2000) DiVincenzo

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**
   → スピン系における最大の課題

2. **初期化**
   → スピン緩和(T_1), スピン依存トンネル etc

3. **長いコヒーレンス時間**
   → T_{2e} = 10 s, T_{2n} = 180 min

4. **ユニバーサル量子ゲート**
   → 1量子ビット制御 + CNOT

5. **射影測定**
   → スピン–電荷変換

Fortschr. Phys. **48**, 771 (2000) DiVincenzo

ディビンチェンゾの要請

フィデリティ(忠実度, 精度) > 99%

1. **スケーラブルな量子ビット列**
   → スピン系における最大の課題

2. **初期化**
   → スピン緩和(T_1), スピン依存トンネル etc

3. **長いコヒーレンス時間**
   → **量子誤り訂正(T_2→∞)**

4. **ユニバーサル量子ゲート**
   → 1量子ビット制御 + CNOT

5. **射影測定**
   → スピン–電荷変換

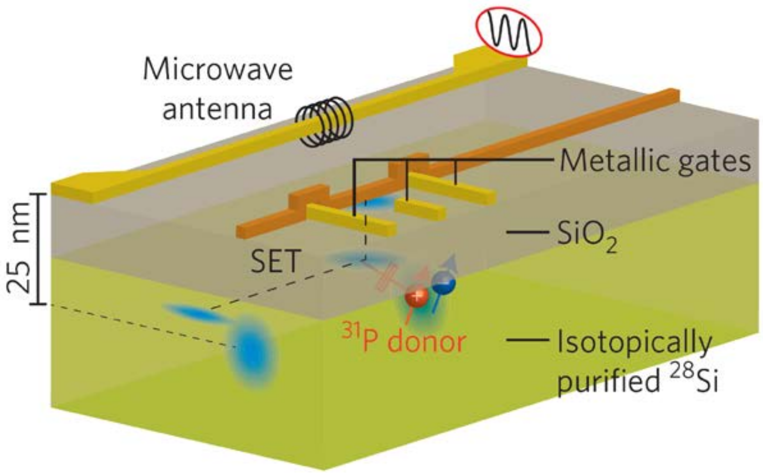
Fortschr. Phys. **48**, 771 (2000) DiVincenzo

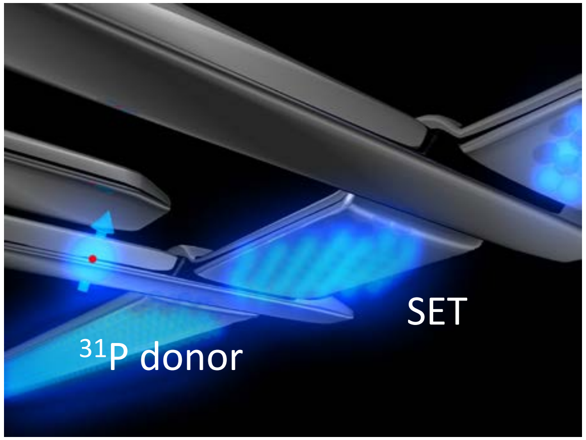
LETTER

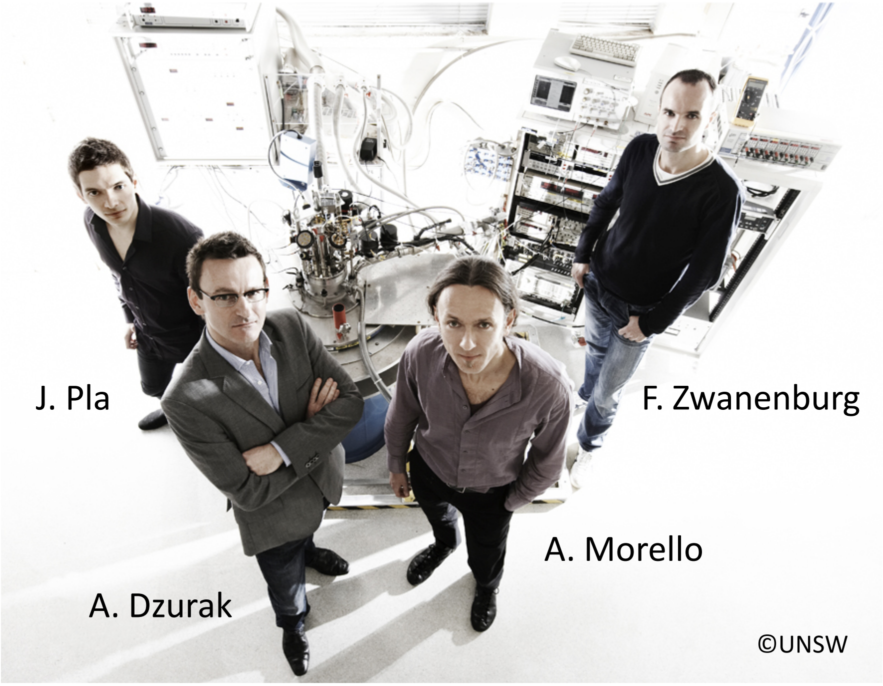
doi:10.1038/nature09392

Single-shot readout of an electron spin in silicon

Andrea Morello[1], Jarryd J. Pla[1], Floris A. Zwanenburg[1], Kok W. Chan[1], Kuan Y. Tan[1], Hans Huebl[1]†, Mikko Möttönen[1,3,4], Christopher D. Nugroho[1]†, Changyi Yang[2], Jessica A. van Donkelaar[2], Andrew D. C. Alves[2], David N. Jamieson[2], Christopher C. Escott[1], Lloyd C. L. Hollenberg[2], Robert G. Clark[1]† & Andrew S. Dzurak[1]



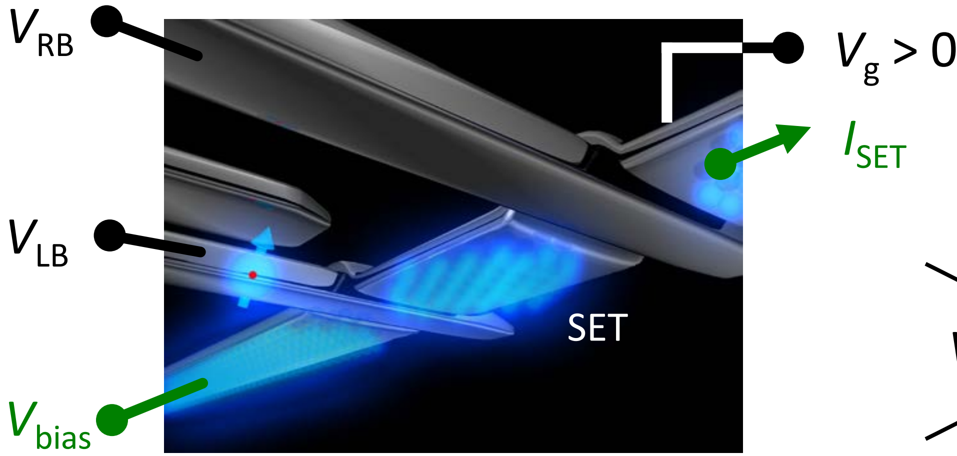


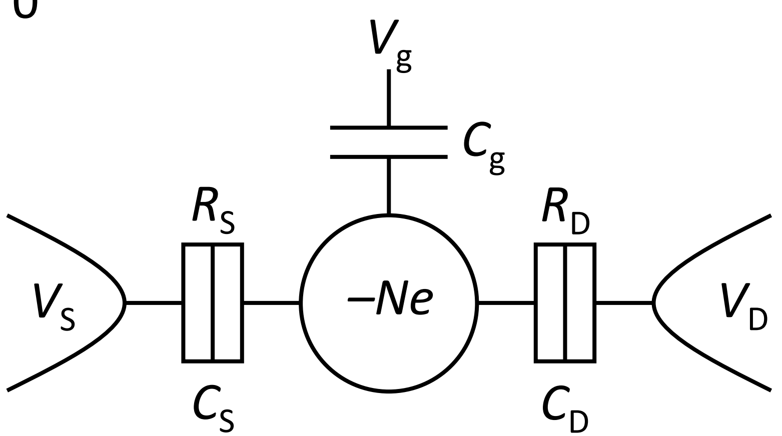


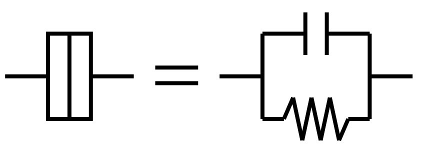
Nature **467**, 687 (2010) Morello *et al.*

単電子トランジスタ

(aka 量子ドット)







定相互作用モデル(Constant interaction model)

- SETをキャパシタ回路でモデル化
- SET内にはN個の電子
- $V_{RB,LB}$はドットが形成されたら固定($C_{S/D}$, $R_{S/D}$に寄与)
- V_gはQD準位の操作のみで電流は流れない

定相互作用モデル

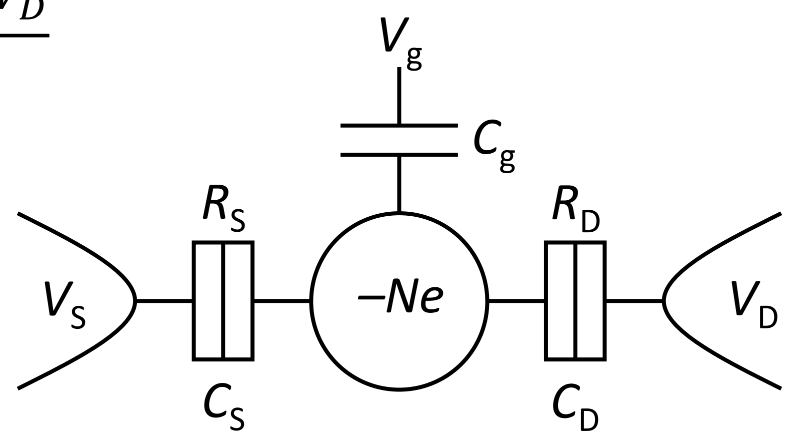
SETの電荷*Q*と電圧*V*

$$Q = -(N - N_0)e = C_S(V - V_S) + C_g\left(V - V_g\right) + C_D(V - V_D)$$

$$\Rightarrow \quad V = \frac{-(N - N_0)e + C_S V_S + C_g V_g + C_D V_D}{C_\Sigma}$$

$C_\Sigma = C_S + C_g + C_D$

N_0: 背景正電荷の補償分



全エネルギー

$$U(N) = \frac{1}{2C_\Sigma}\left[-(N - N_0)e + C_S V_S + C_g V_g + C_D V_D\right]^2 + \sum_{n=1}^{N} E_n$$

$$= \frac{e^2}{2C_\Sigma}N^2 - \frac{e^2}{C_\Sigma}NN_0 - \frac{e}{C_\Sigma}N\left(C_S V_S + C_g V_g + C_D V_D\right) + E_N + \cdots$$

定相互作用モデル

電気化学ポテンシャル

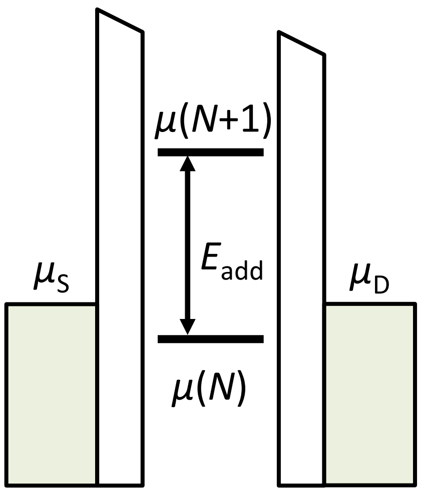
$$\mu(N) \equiv U(N) - U(N-1)$$

$$= \frac{e^2}{C_\Sigma}\left(N - N_0 - \frac{1}{2}\right) - \frac{e}{C_\Sigma}(C_S V_S + C_g V_g + C_D V_D) + E_N$$

付加(addition)エネルギー

$$E_{\mathrm{add}}(N) = \mu(N+1) - \mu(N) = E_C + \Delta E$$

$$E_C = \frac{e^2}{C_\Sigma}$$: 帯電エネルギー

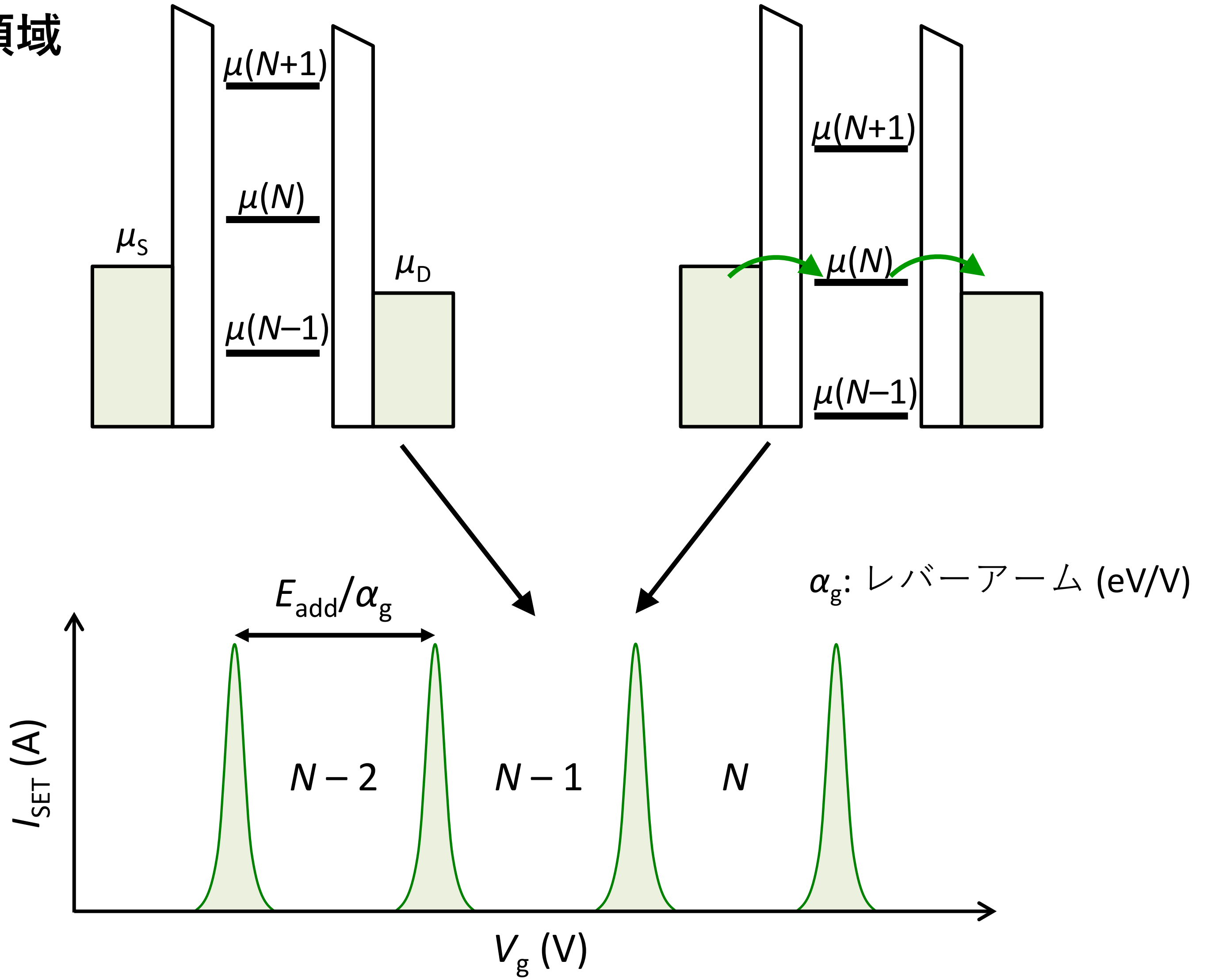


SET準位、ソース、ドレインのμの相対位置で伝導を理解する

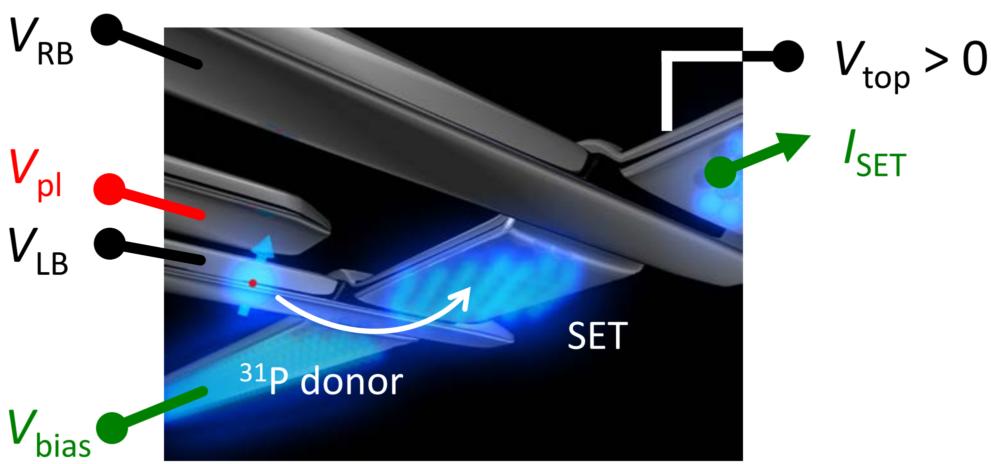
クーロン振動

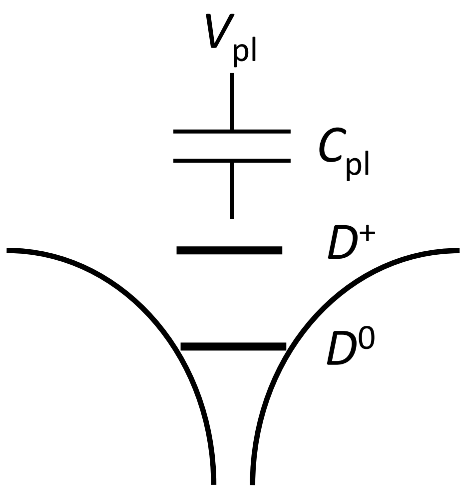
低バイアス領域

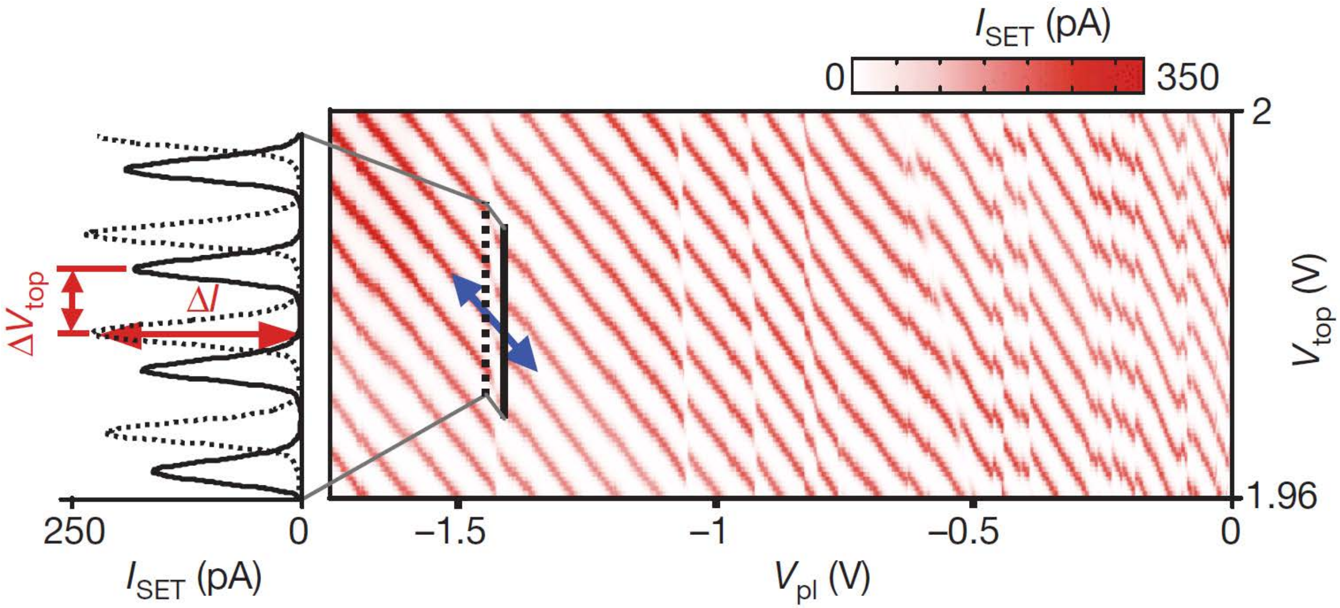
$|\mu_S - \mu_D| \approx 0$



ドナー–SETハイブリッド

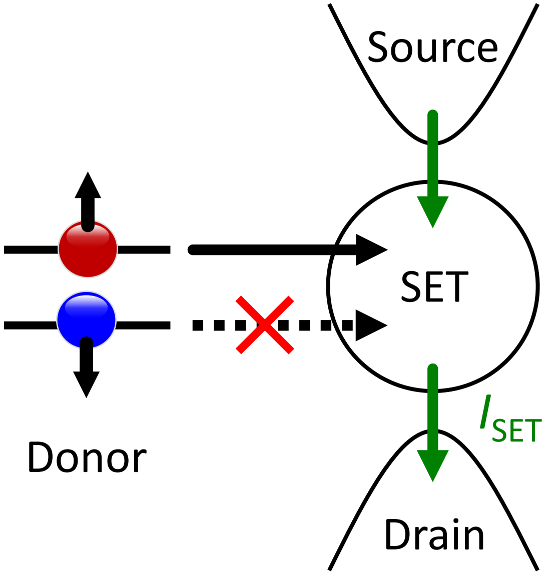






Nature **467**, 687 (2010) Morello *et al.*

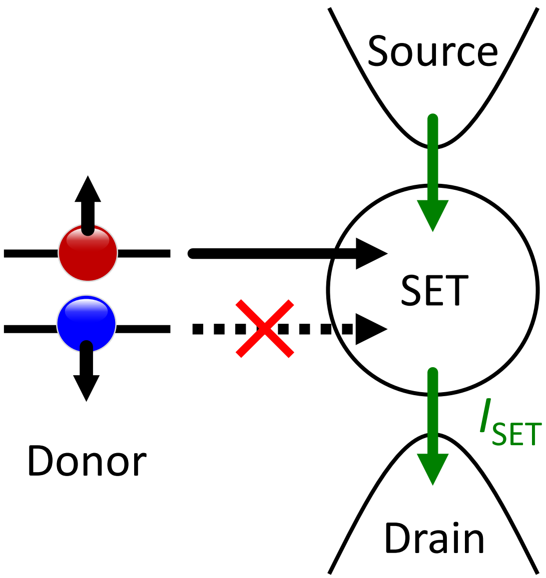
スピン–電荷変換

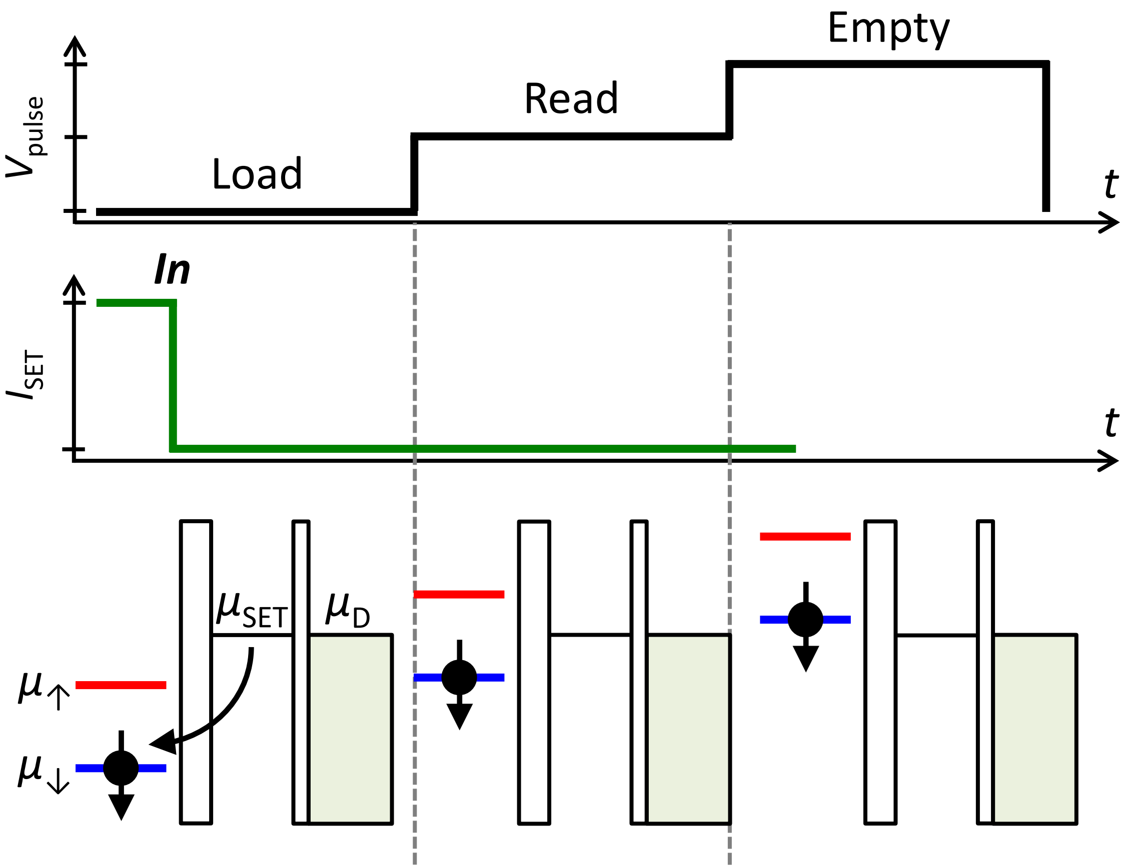


$E(D^+) - E(D^0)$ = 45 meV
E_C = 1.5 meV
E_z = 28 GHz = 116 μeV @B_0 = 1 T
T_{elec} = 200 mK = 17 μeV

Nature **467**, 687 (2010) Morello *et al.*

スピン測定(↓)





$E(D^+) - E(D^0) = 45$ meV

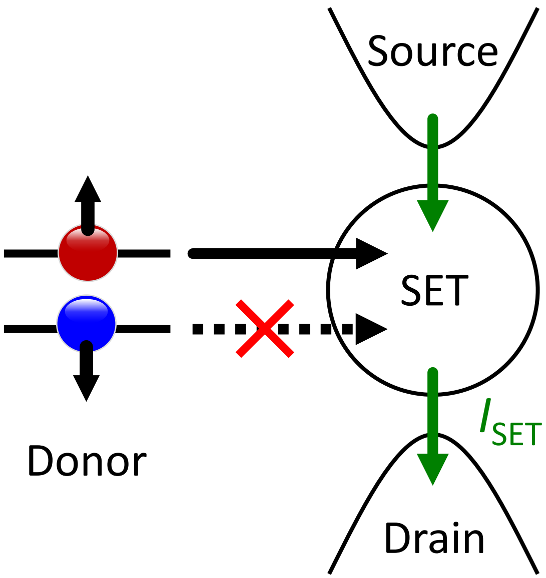
$E_C = 1.5$ meV

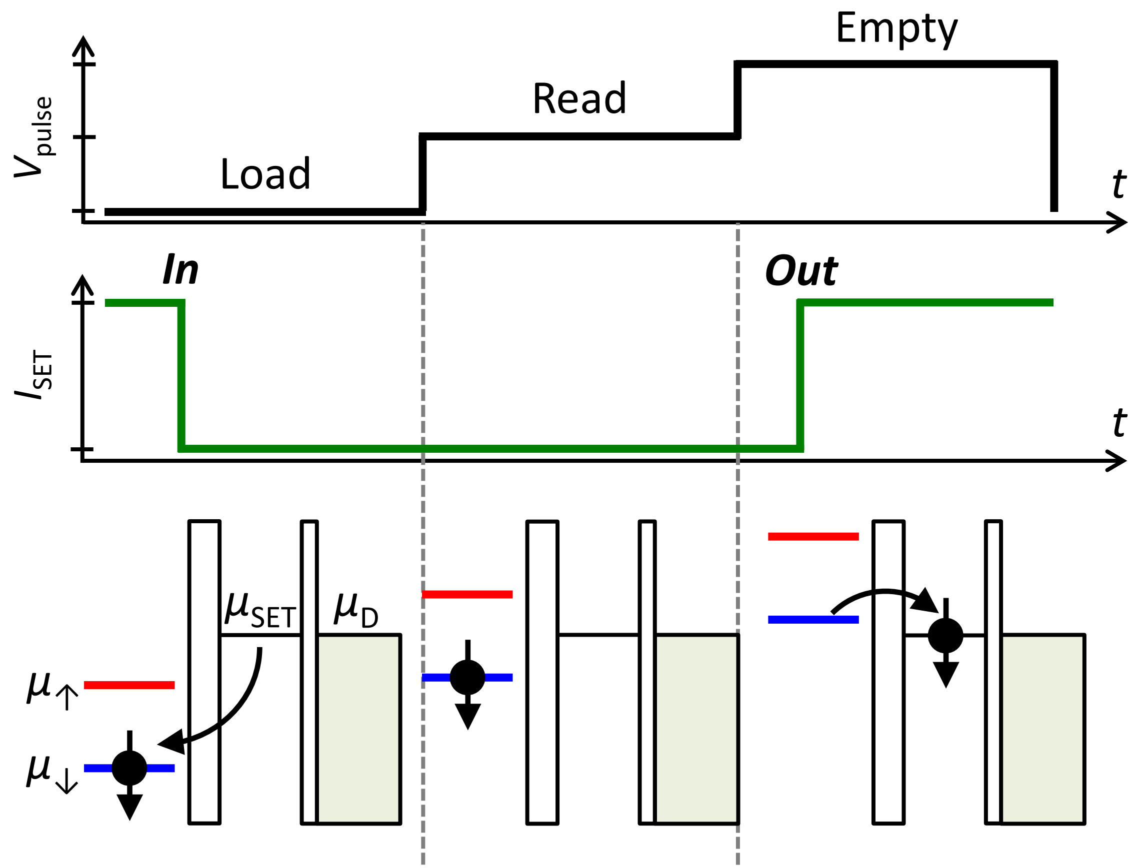
$E_z = 28$ GHz $= 116$ μeV @$B_0 = 1$ T

$T_{elec} = 200$ mK $= 17$ μeV

(GaAs QD) Nature **430**, 431 (2004) Elzerman *et al.*

スピン測定(↓)





$E(D^+) - E(D^0) = 45$ meV

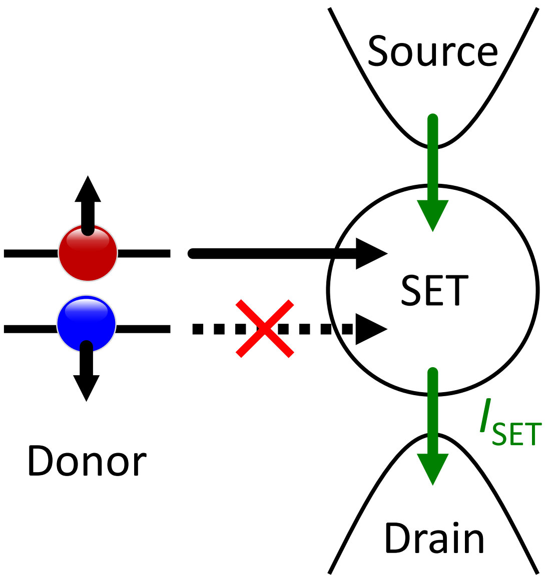
$E_C = 1.5$ meV

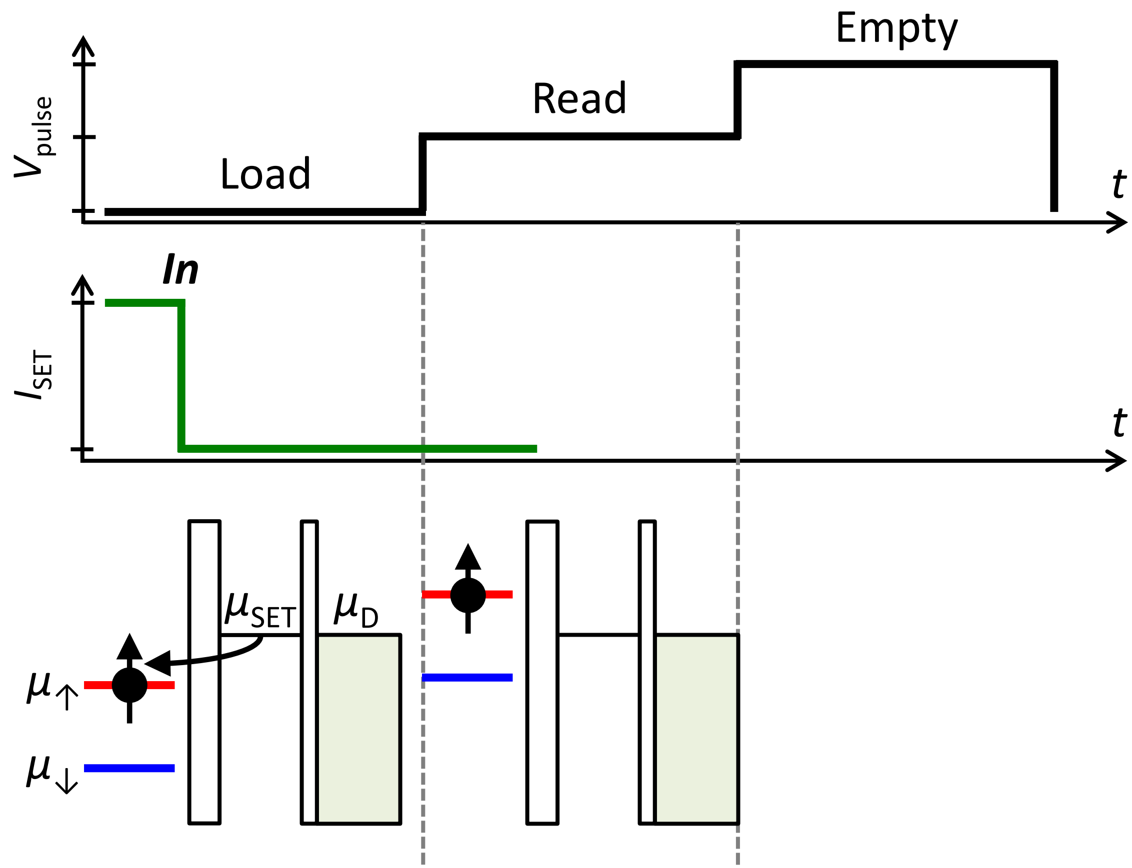
$E_z = 28$ GHz $= 116$ μeV @$B_0 = 1$ T

$T_{elec} = 200$ mK $= 17$ μeV

(GaAs QD) Nature **430**, 431 (2004) Elzerman *et al.*

スピン測定(↑)





$E(D^+) - E(D^0) = 45$ meV

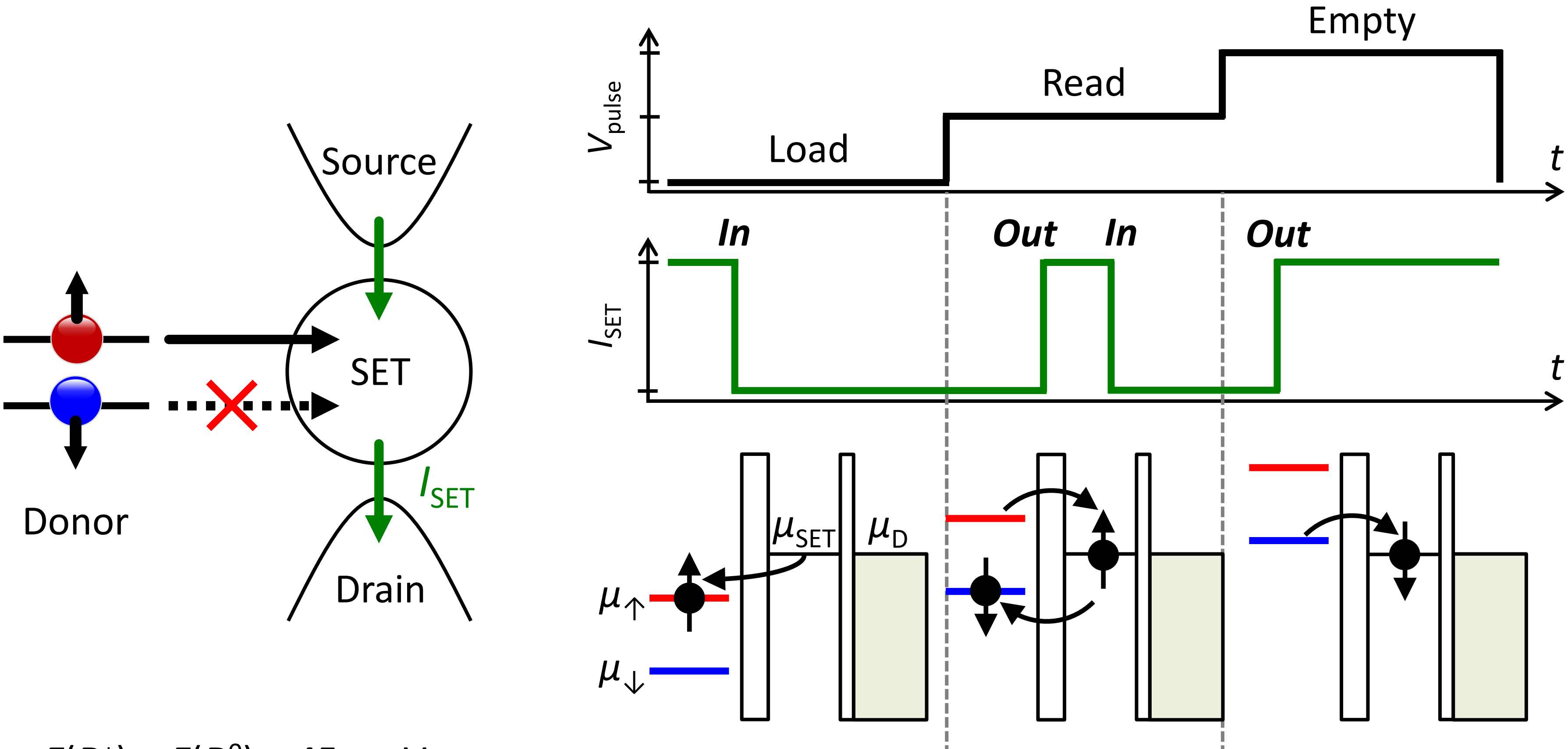
$E_C = 1.5$ meV

$E_z = 28$ GHz $= 116$ μeV $@B_0 = 1$ T

$T_{elec} = 200$ mK $= 17$ μeV

(GaAs QD) Nature **430**, 431 (2004) Elzerman *et al.*

スピン測定(↑)



$E(D^+) - E(D^0) = 45$ meV

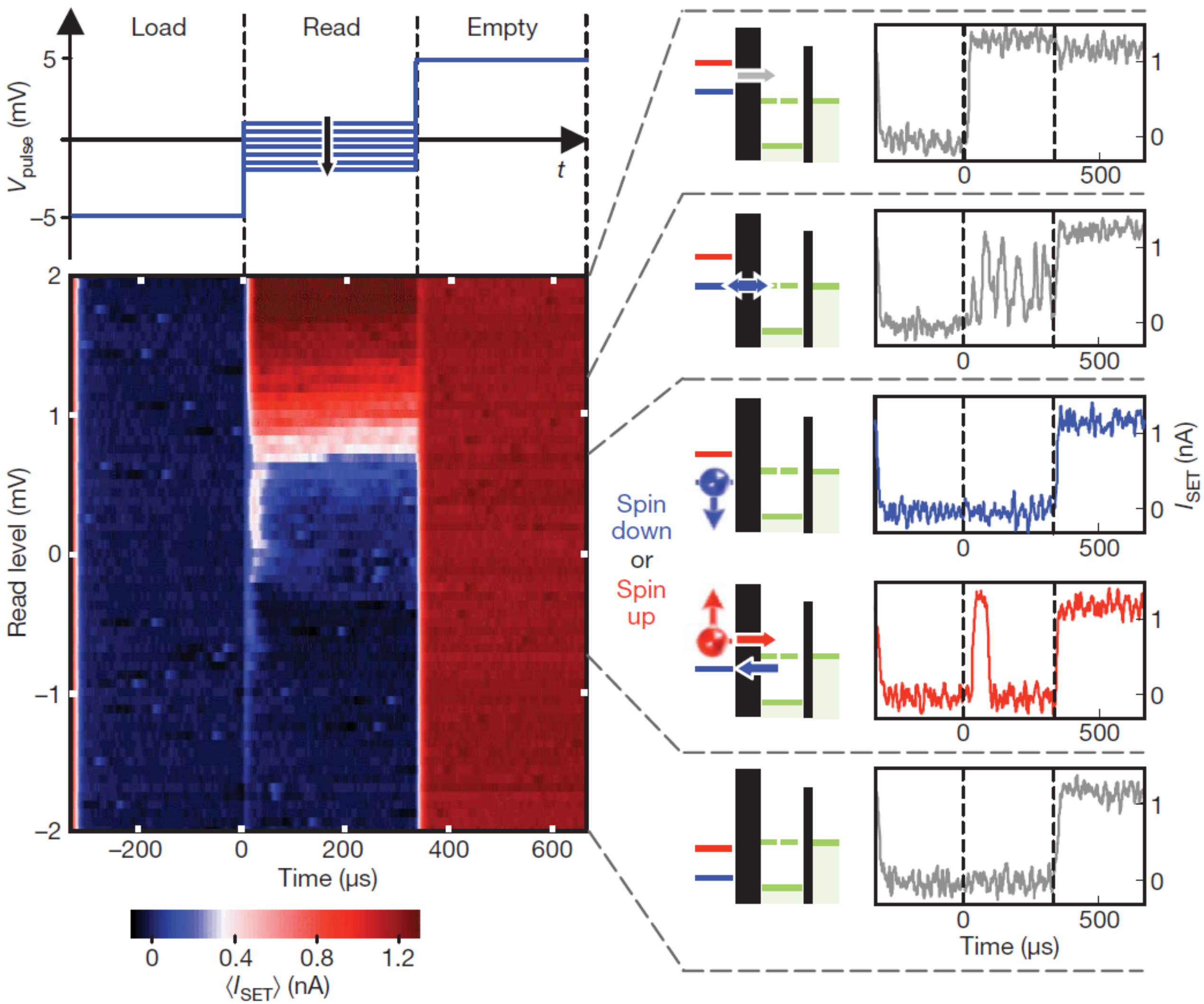
$E_C = 1.5$ meV

$E_z = 28$ GHz $= 116$ μeV @$B_0 = 1$ T

$T_{elec} = 200$ mK $= 17$ μeV

(GaAs QD) Nature **430**, 431 (2004) Elzerman *et al.*

電子スピン単発読み出し



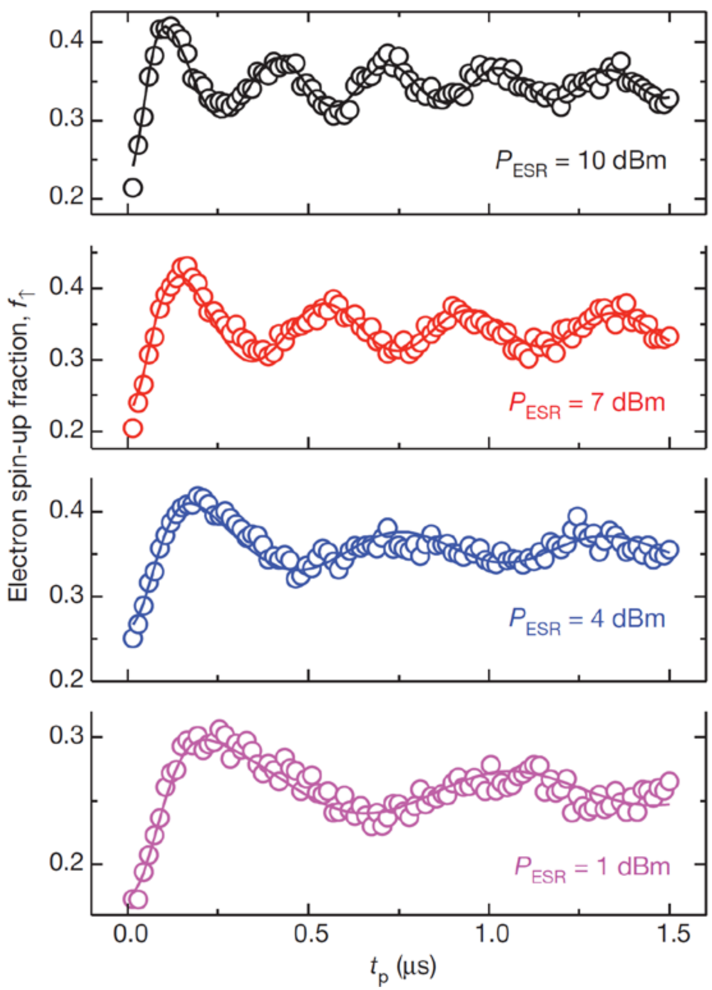
Nature **467**, 687 (2010) Morello *et al.*

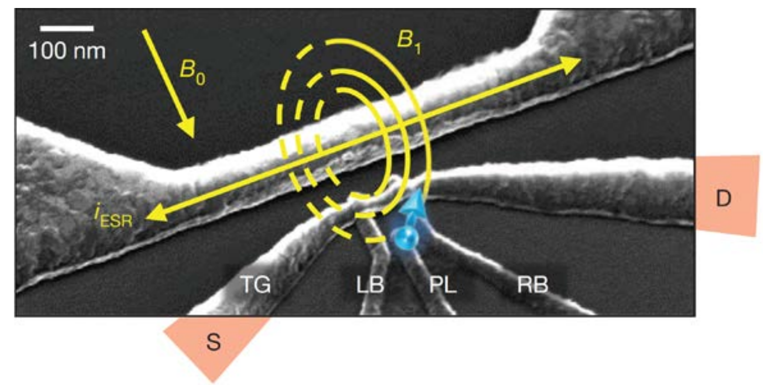
LETTER

doi:10.1038/nature11449

A single-atom electron spin qubit in silicon

Jarryd J. Pla[1], Kuan Y. Tan[1]†, Juan P. Dehollain[1], Wee H. Lim[1], John J. L. Morton[2]†, David N. Jamieson[3], Andrew S. Dzurak[1] & Andrea Morello[1]





Isidor Rabi
(1898–1988)

ラビ振動: ^{nat}Siデバイス

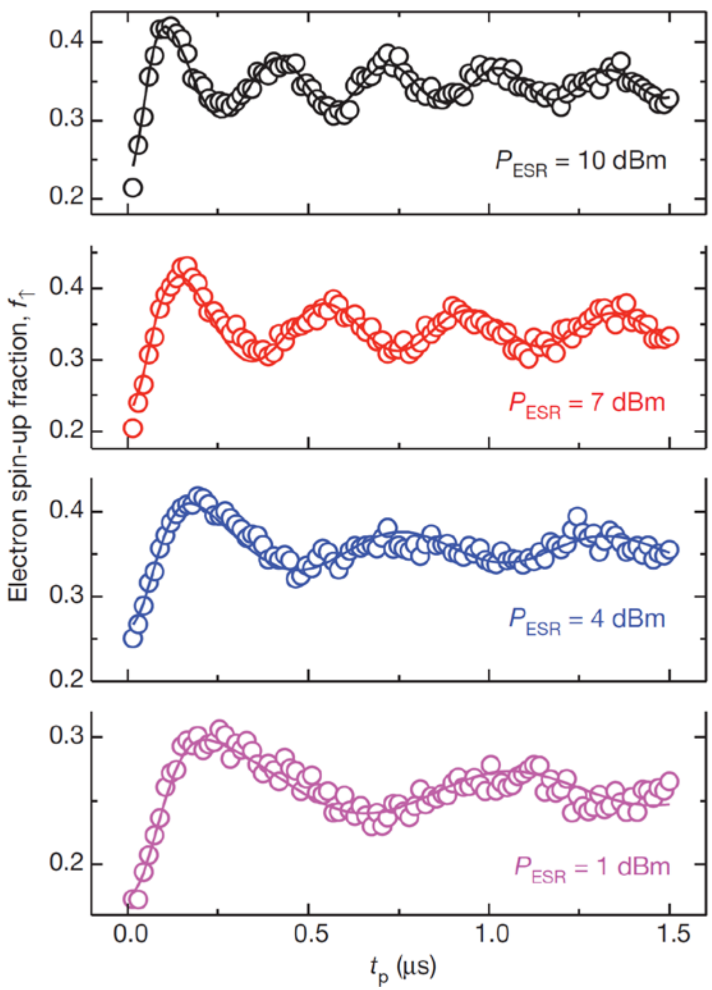
Nature **489**, 541 (2012) Pla *et al.*

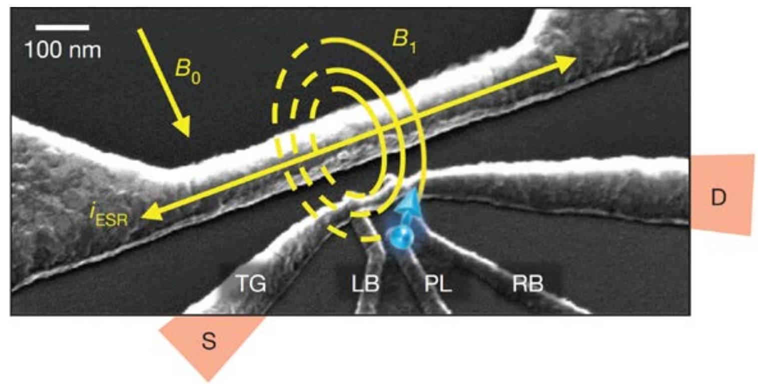
LETTER

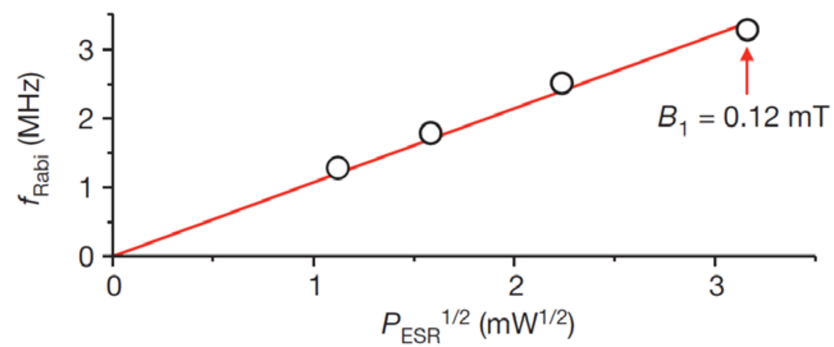
doi:10.1038/nature11449

A single-atom electron spin qubit in silicon

Jarryd J. Pla[1], Kuan Y. Tan[1]†, Juan P. Dehollain[1], Wee H. Lim[1], John J. L. Morton[2]†, David N. Jamieson[3], Andrew S. Dzurak[1] & Andrea Morello[1]







ラビ振動: ^{nat}Siデバイス

Nature **489**, 541 (2012) Pla *et al.*

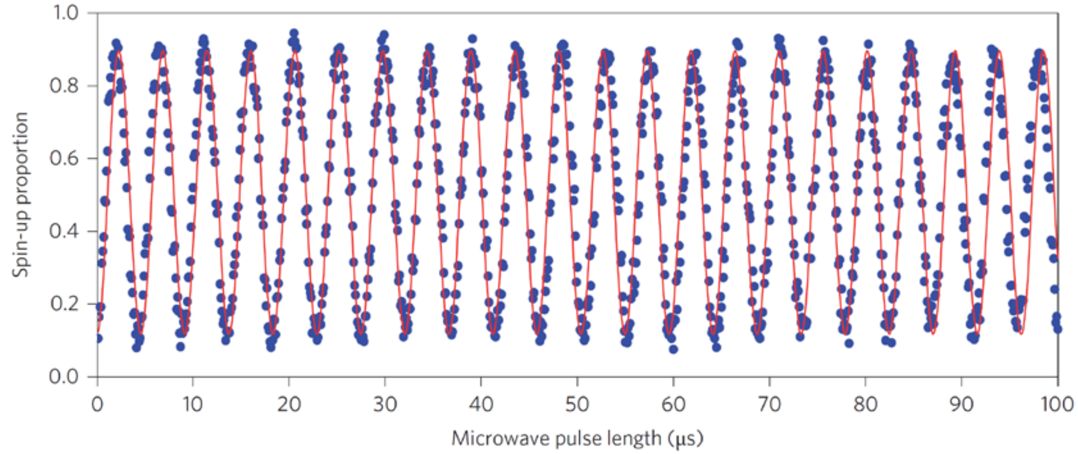
LETTER

doi:10.1038/nature11449

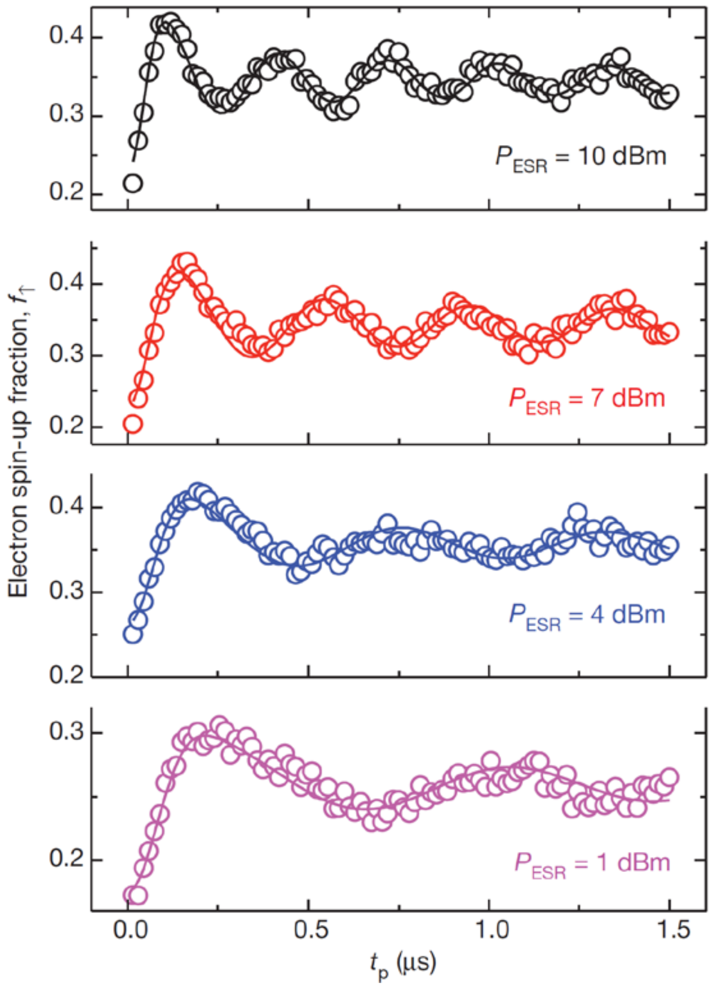
A single-atom electron spin qubit in silicon

Jarryd J. Pla[1], Kuan Y. Tan[1]†, Juan P. Dehollain[1], Wee H. Lim[1], John J. L. Morton[2]†, David N. Jamieson[3], Andrew S. Dzurak[1] & Andrea Morello[1]

同位体^{28}Si(99.92%)デバイス



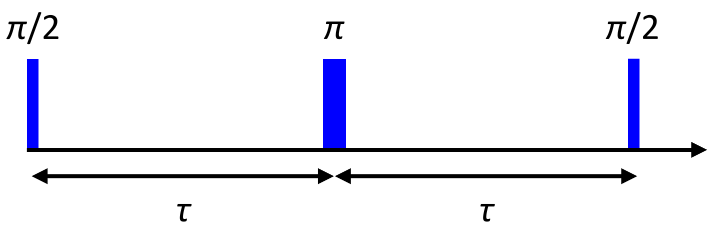
Nature Nano. **9**, 986 (2014) Muhonen *et al.*

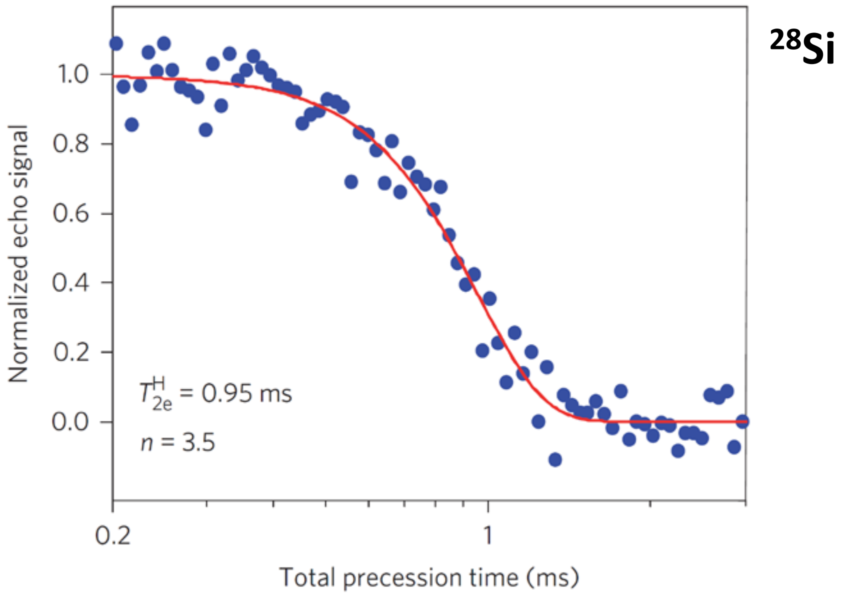


ラビ振動: ^{nat}Siデバイス

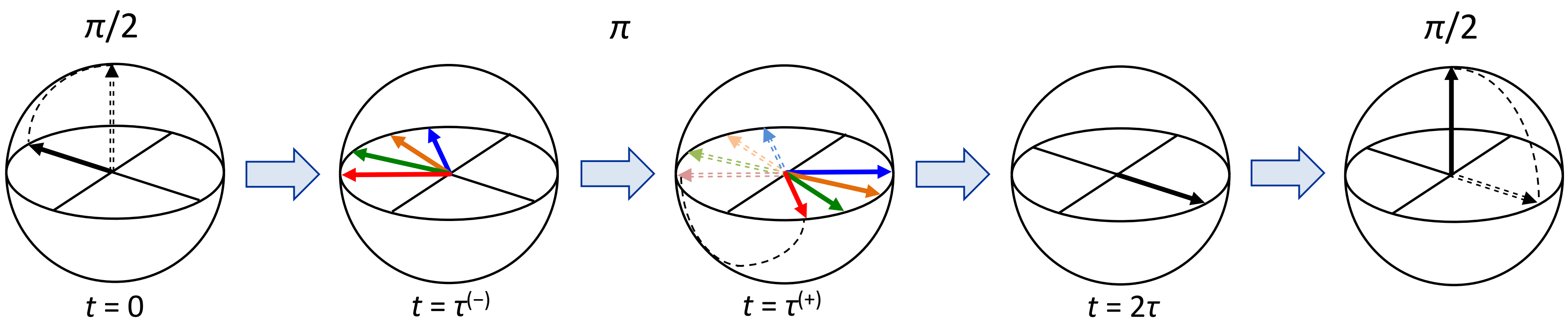
Nature **489**, 541 (2012) Pla *et al.*

スピンエコー: T_{2e}



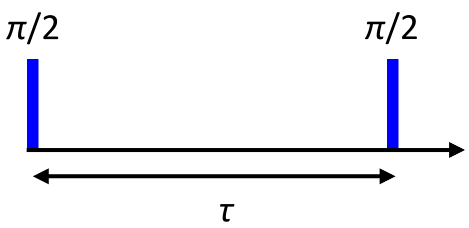


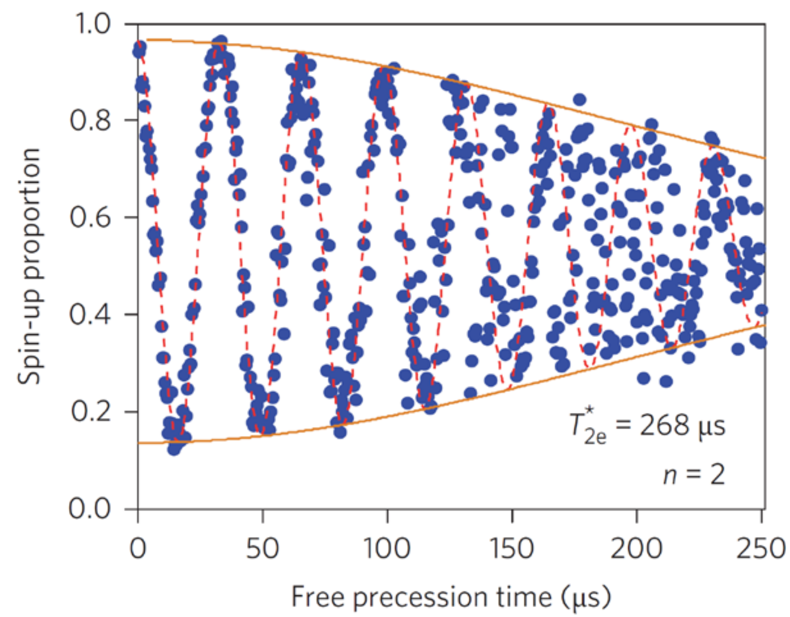
(共鳴周波数の回転系)



Nature Nano. **9**, 986 (2014) Muhonen *et al.*

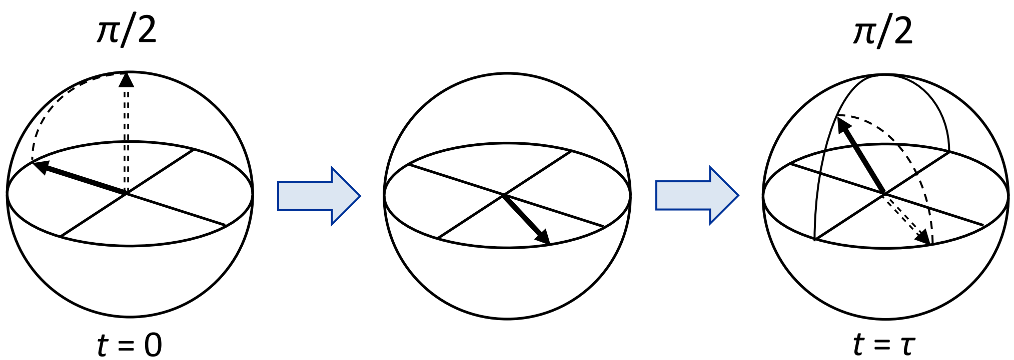
ラムゼー干渉: T_{2e}^*





^{28}Si

(共鳴から少し外れた回転系)



Norman Ramsey
(1915–2011)

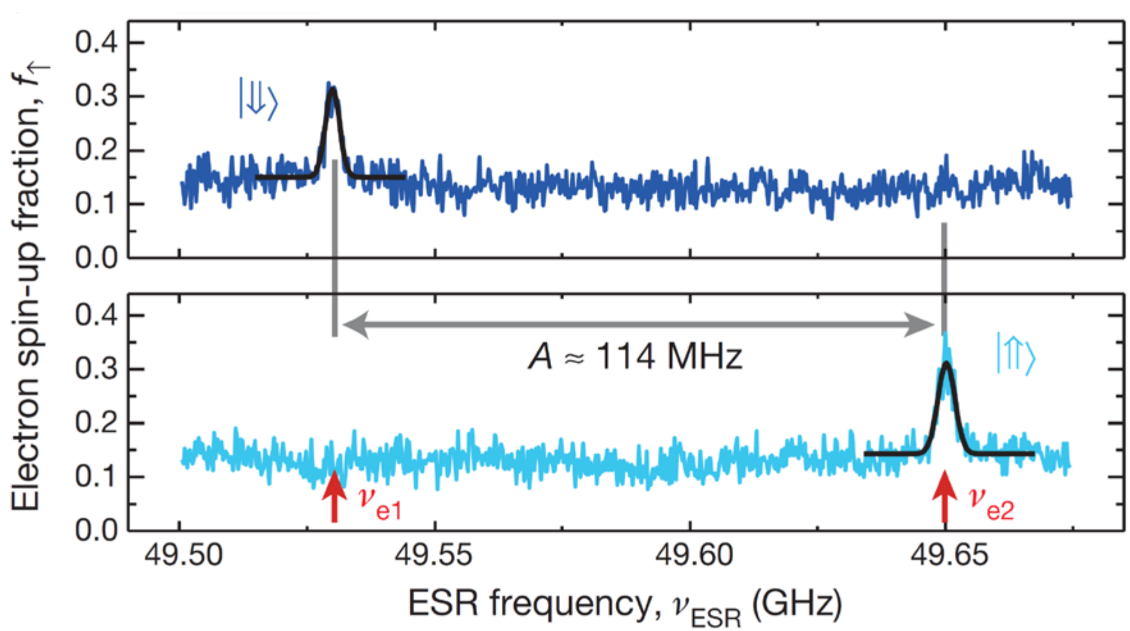
Nature Nano. **9**, 986 (2014) Muhonen *et al.*

LETTER

doi:10.1038/nature12011

High-fidelity readout and control of a nuclear spin qubit in silicon

Jarryd J. Pla[1], Kuan Y. Tan[1]†, Juan P. Dehollain[1], Wee H. Lim[1]†, John J. L. Morton[2], Floris A. Zwanenburg[1]†, David N. Jamieson[3], Andrew S. Dzurak[1] & Andrea Morello[1]



- 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する
- 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(QND)測定**

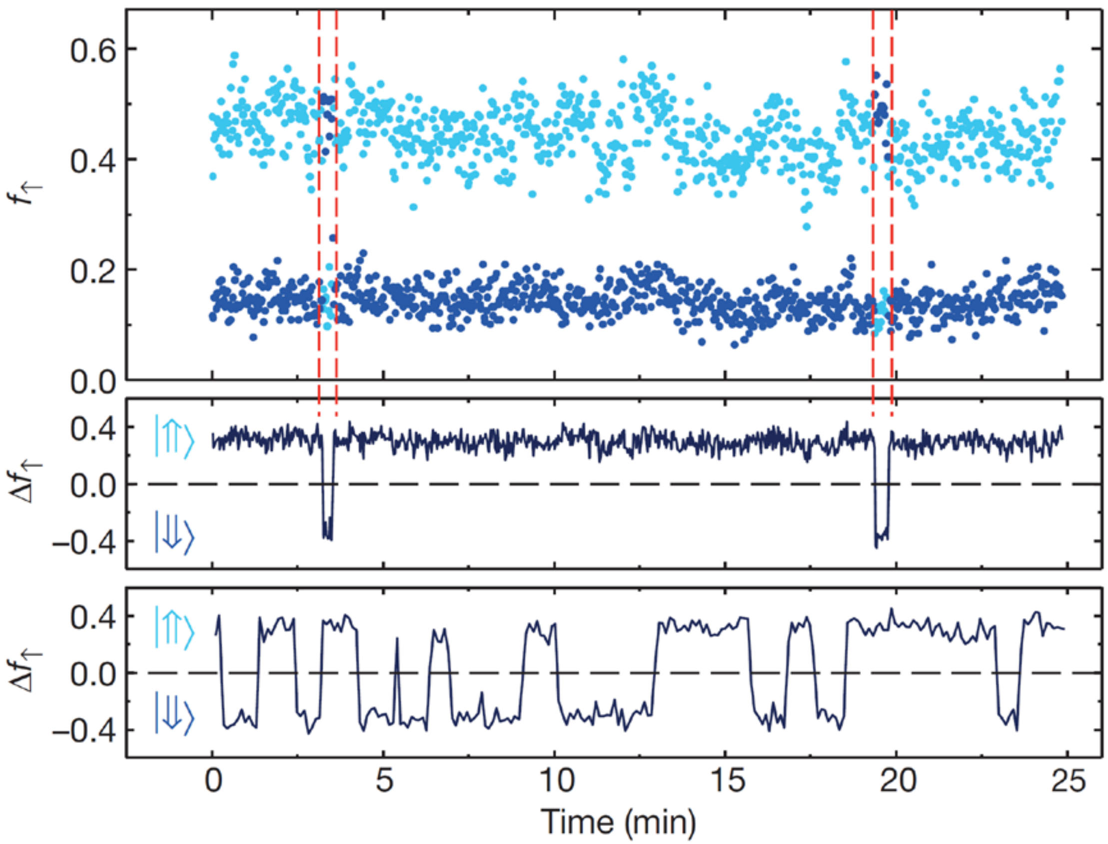
Nature **496**, 334 (2013) Pla *et al.*

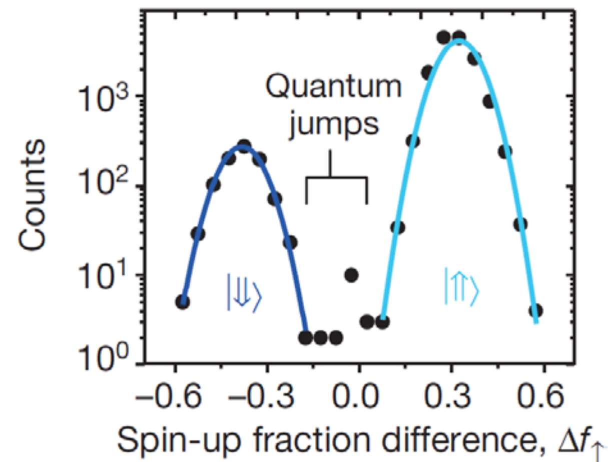
LETTER

doi:10.1038/nature12011

High-fidelity readout and control of a nuclear spin qubit in silicon

Jarryd J. Pla[1], Kuan Y. Tan[1]†, Juan P. Dehollain[1], Wee H. Lim[1]†, John J. L. Morton[2], Floris A. Zwanenburg[1]†, David N. Jamieson[3], Andrew S. Dzurak[1] & Andrea Morello[1]

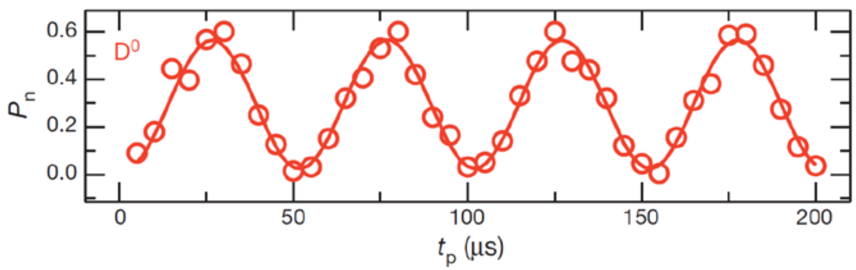




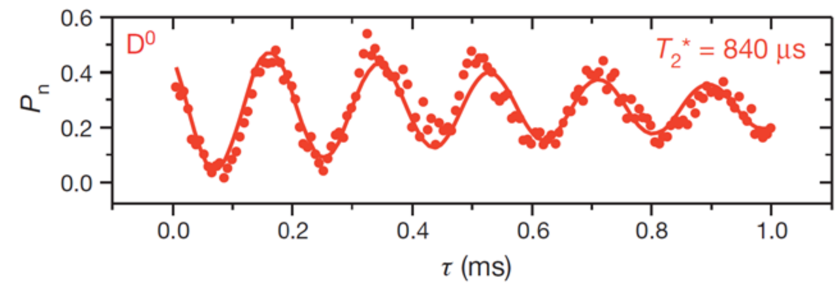
Nature **496**, 334 (2013) Pla *et al.*

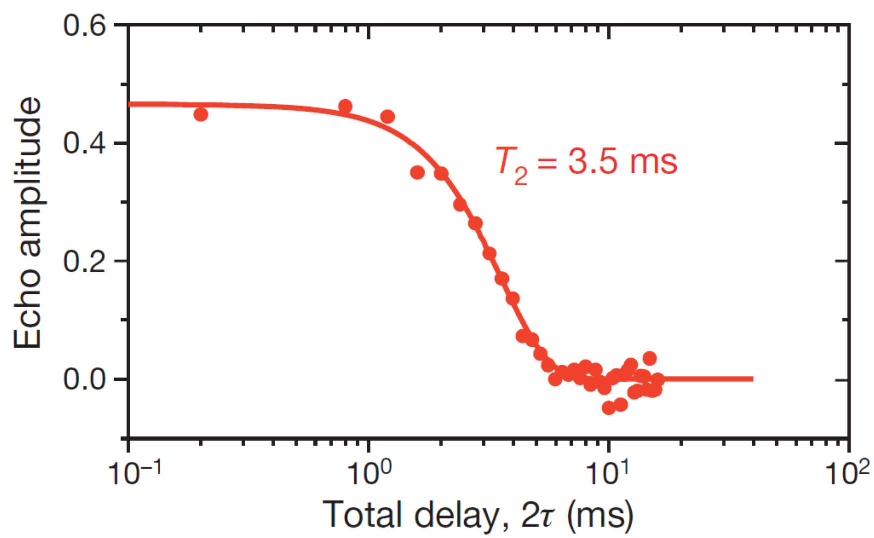
単一核スピンコヒーレント制御

ラビ振動(^{nat}Si)



ラムゼー干渉(^{nat}Si)



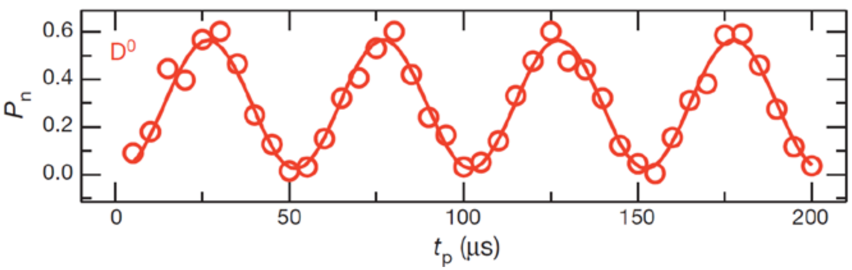


エコー(^{nat}Si)

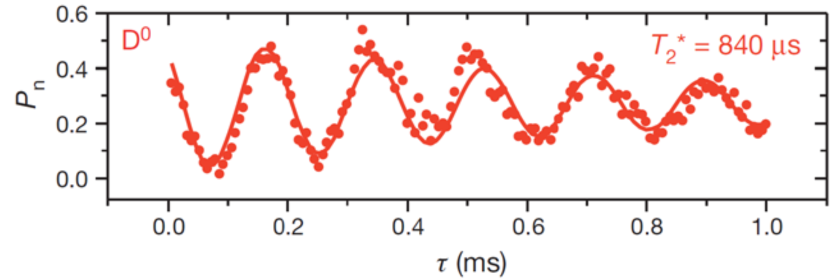
Nature **496**, 334 (2013) Pla *et al.*

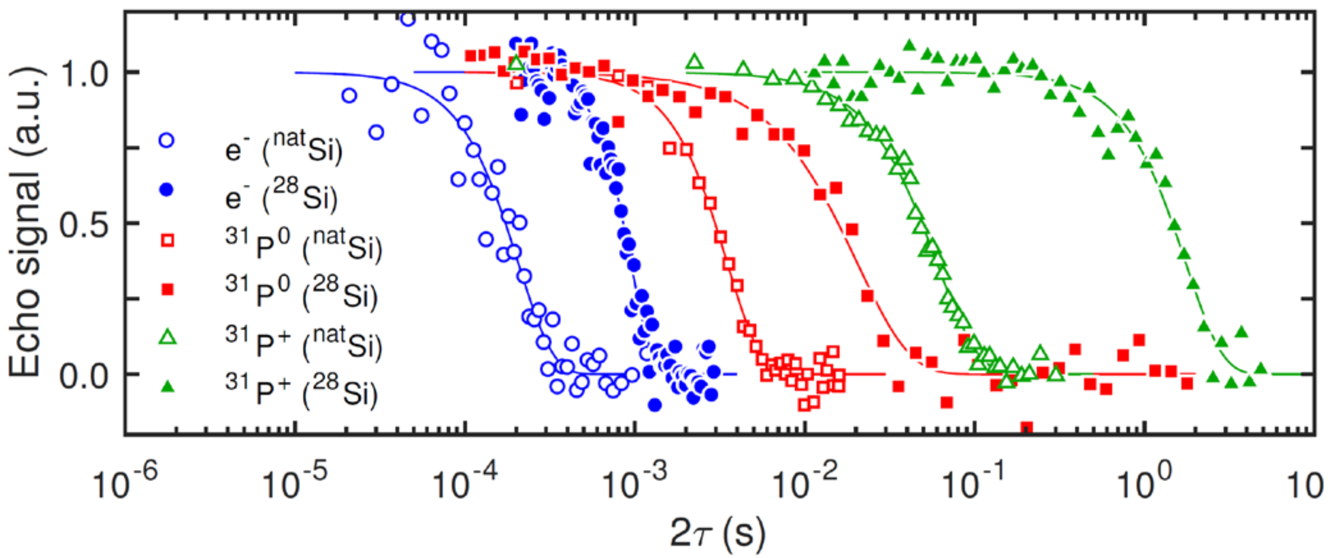
単一核スピンコヒーレント制御

ラビ振動(^{nat}Si)



ラムゼー干渉(^{nat}Si)





Nature **489**, 541 (2012) Pla *et al.*

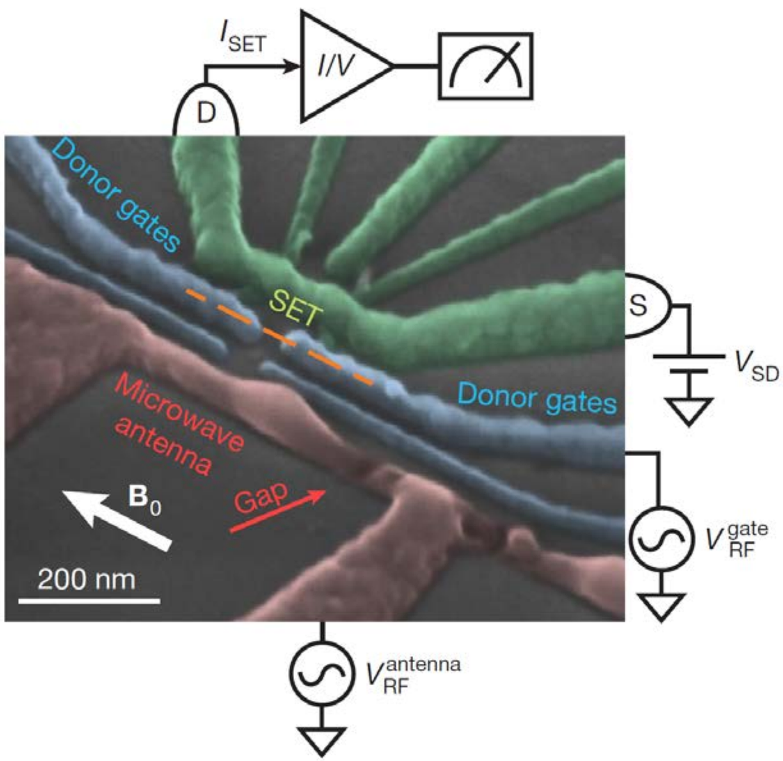
Nature **496**, 334 (2013) Pla *et al.*

Nature Nano. **9**, 986 (2014) Muhonen *et al.*

Coherent electrical control of a single high-spin nucleus in silicon

https://doi.org/10.1038/s41586-020-2057-7
Received: 10 June 2019
Accepted: 30 January 2020
Published online: 11 March 2020

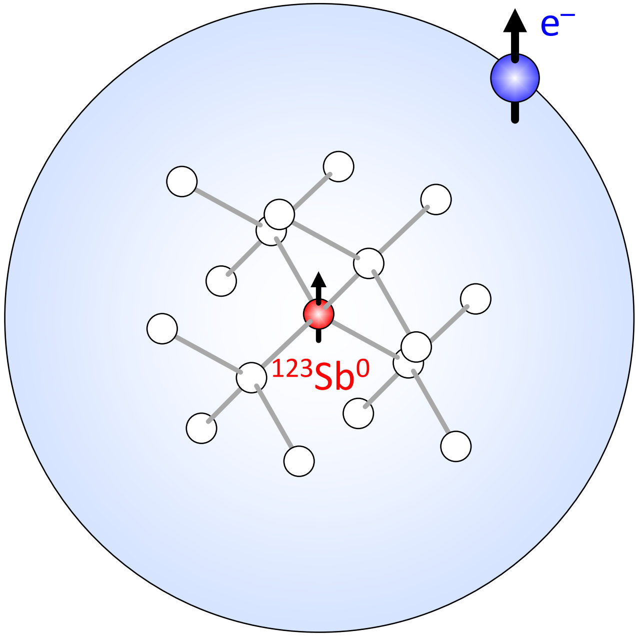
Serwan Asaad[1,6], Vincent Mourik[1,6], Benjamin Joecker[1], Mark A. I. Johnson[1], Andrew D. Baczewski[2], Hannes R. Firgau[1], Mateusz T. Mądzik[1], Vivien Schmitt[1], Jarryd J. Pla[3], Fay E. Hudson[1], Kohei M. Itoh[4], Jeffrey C. McCallum[5], Andrew S. Dzurak[1], Arne Laucht[1] & Andrea Morello[1]✉



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

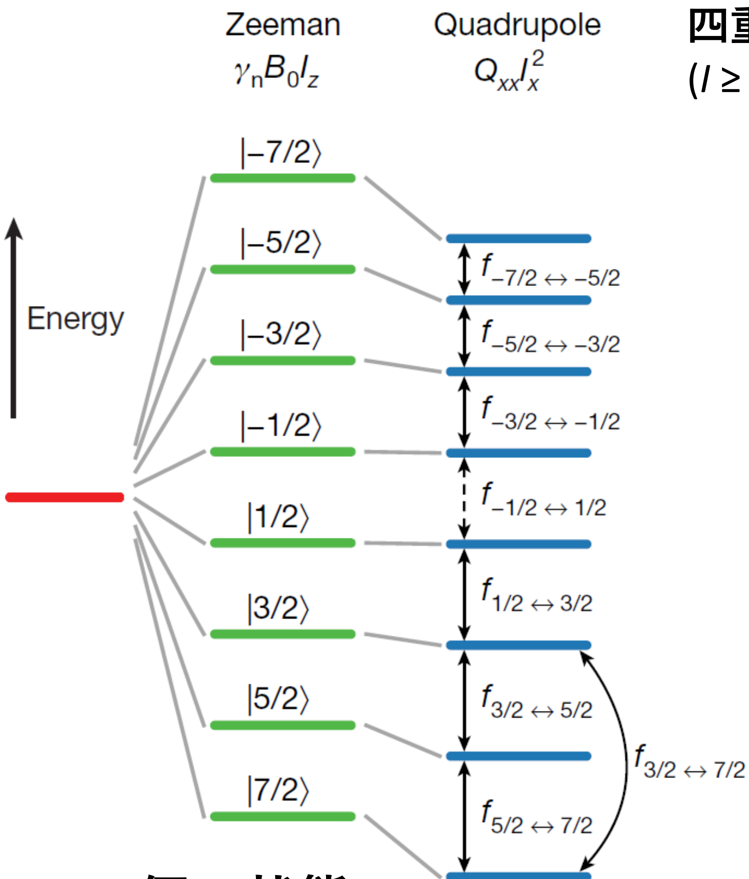
シリコン中のアンチモンドナー

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

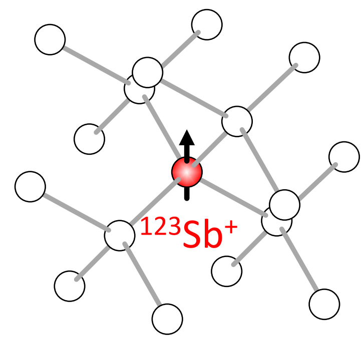


^{121}Sb (I = 5/2) : ^{123}Sb (I = 7/2) = 57.36% : 42.64%

シリコン中のアンチモンドナー



四重極子相互作用: 原子核位置の電場勾配に起因
($I \geq 1$の原子核では電荷分布が球対象でない)



2*I*+1個の状態

^{121}Sb (I = 5/2) : ^{123}Sb (I = 7/2) = 57.36% : 42.64%

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

Article

Coherent electrical control of a single high-spin nucleus in silicon

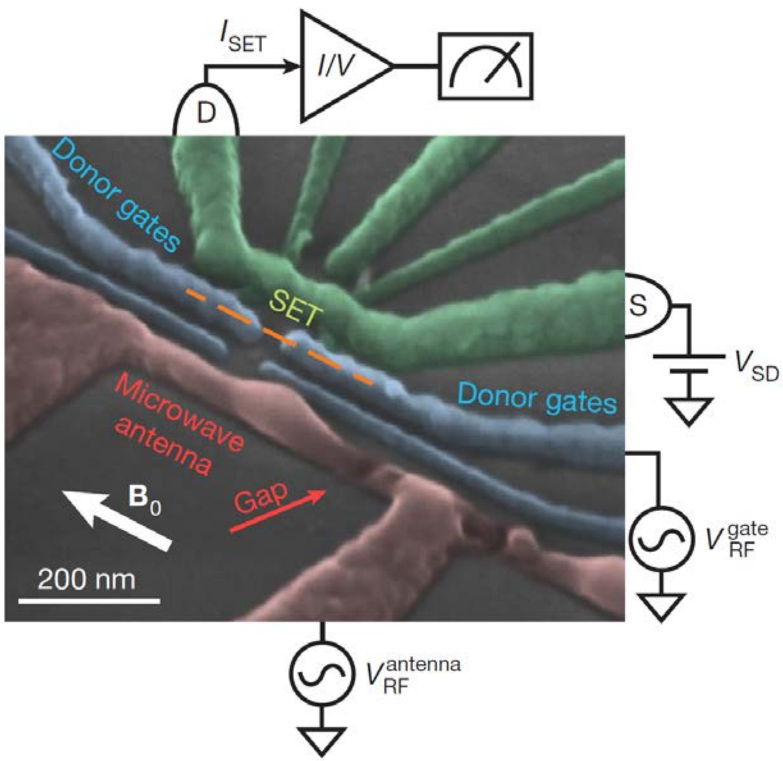
https://doi.org/10.1038/s41586-020-2057-7

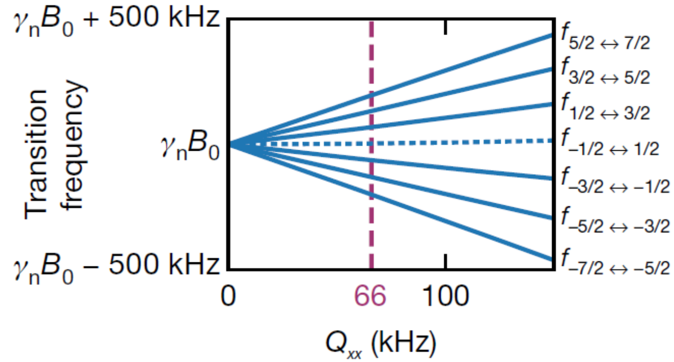
Received: 10 June 2019

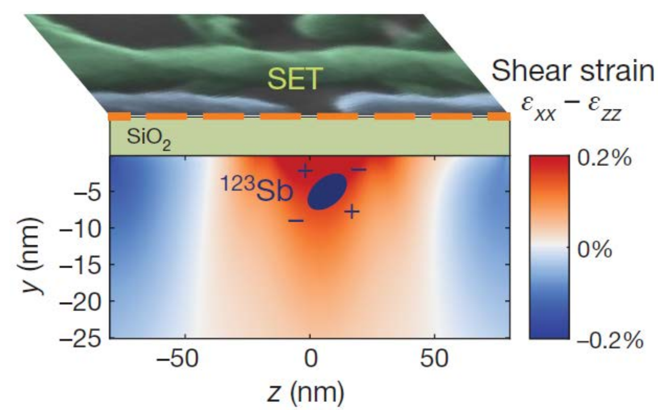
Accepted: 30 January 2020

Published online: 11 March 2020

Serwan Asaad[1,6], Vincent Mourik[1,6], Benjamin Joecker[1], Mark A. I. Johnson[1], Andrew D. Baczewski[2], Hannes R. Firgau[1], Mateusz T. Mądzik[1], Vivien Schmitt[1], Jarryd J. Pla[3], Fay E. Hudson[1], Kohei M. Itoh[4], Jeffrey C. McCallum[5], Andrew S. Dzurak[1], Arne Laucht[1] & Andrea Morello[1]✉



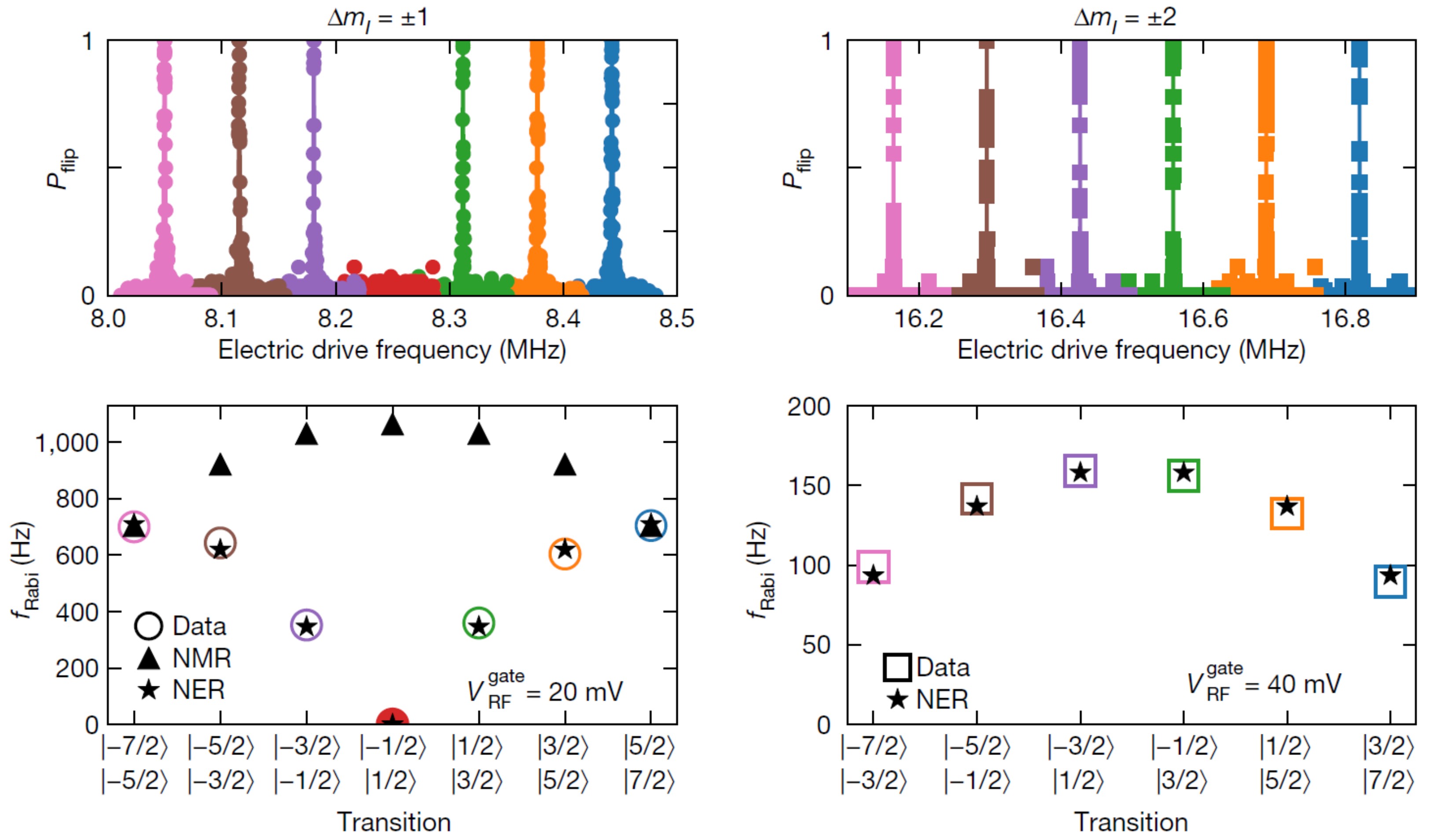




Nature **579**, 205 (2020) Asaad *et al.*

Article

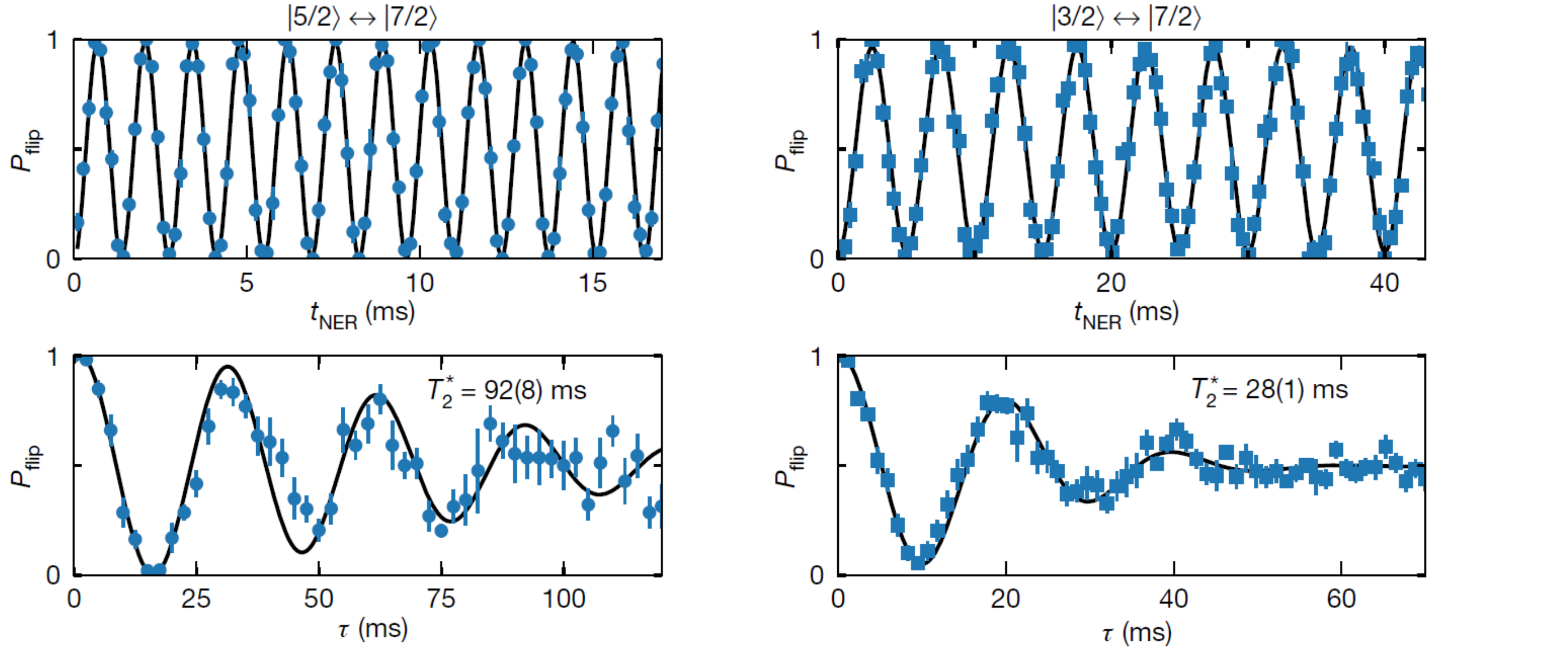
Coherent electrical control of a single high-spin nucleus in silicon



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

Article

Coherent electrical control of a single high-spin nucleus in silicon

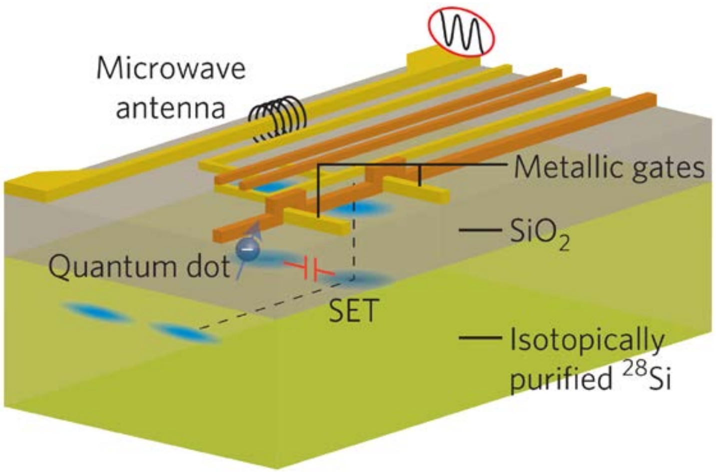


Nature **579**, 205 (2020) Asaad *et al.*

講義内容

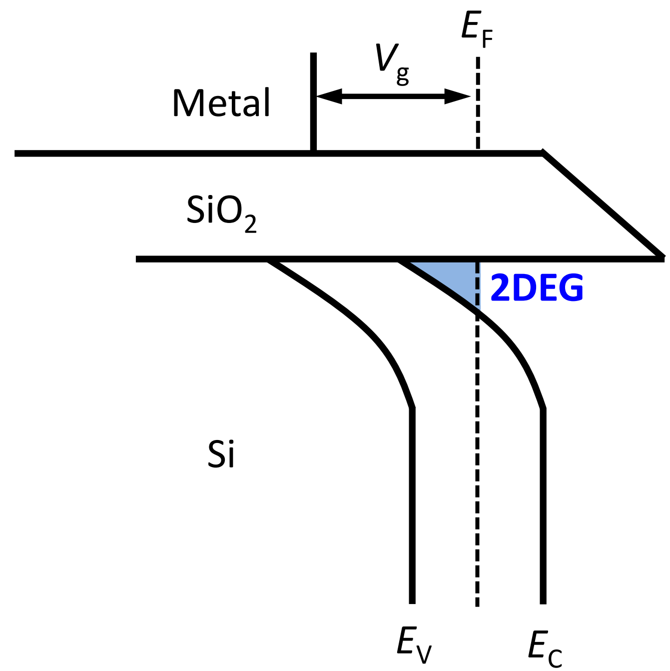
- **ドナースピン**
  - アンサンブル
  - 単一ドナー
- **量子ドットスピン**
  - MOS量子ドット
  - Si/SiGe量子ドット

界面MOS構造



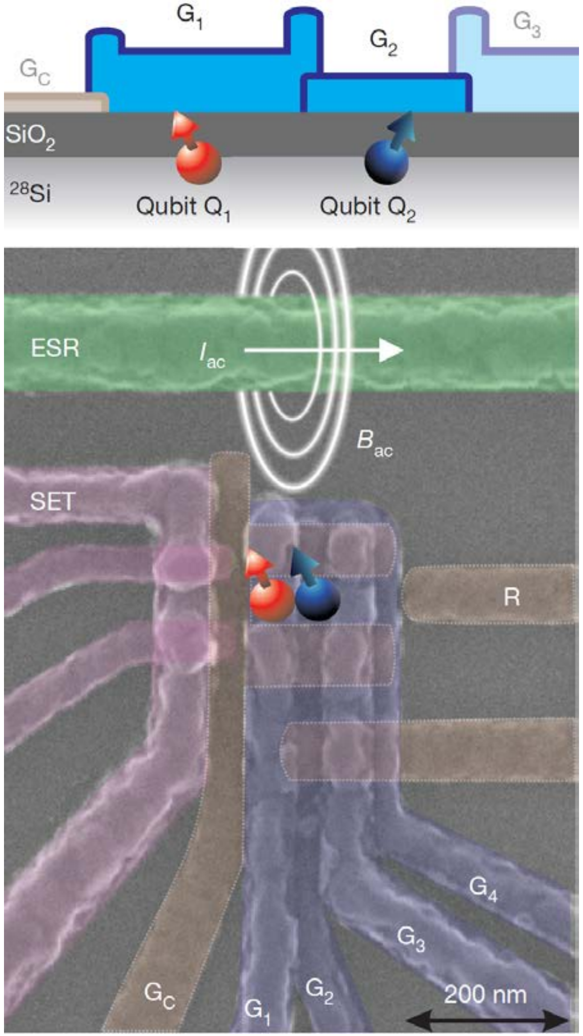
(L to R) J. Muhonen, A. Morello, M. Veldhorst, A. Dzurak

反転層の形成

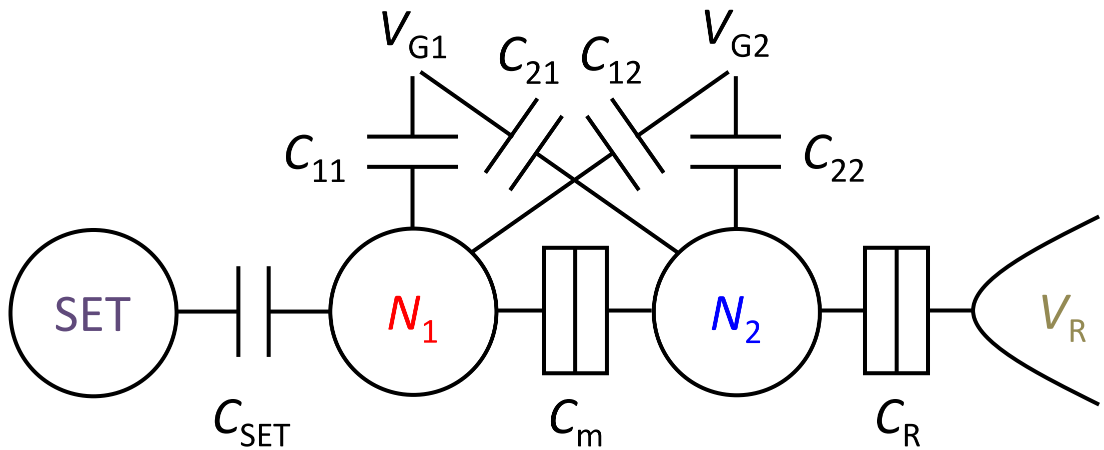


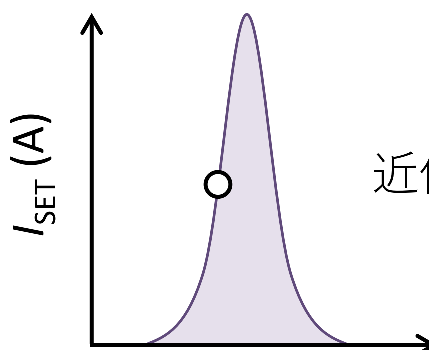
^{28}Si : ^{29}Si (I = ½) : ^{30}Si = 92.2% : 4.7% : 3.1%
→ ^{28}Si = 99.2%

MOS型2重量子ドット



クロストーク



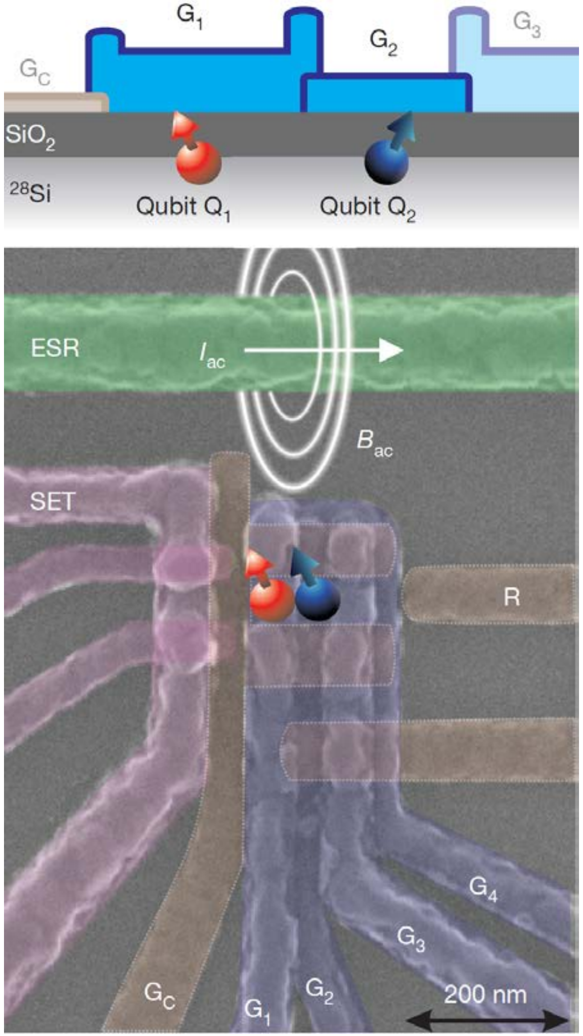


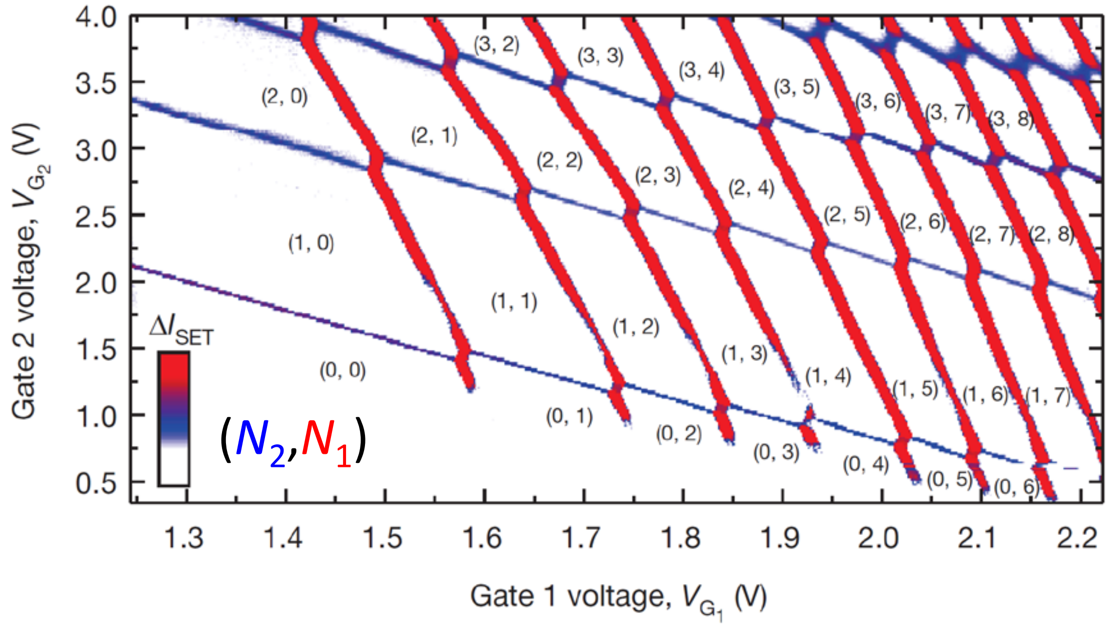
SET電荷センサ

近傍のQDsの電子数変化に
鋭敏に応答

Nature **526**, 410 (2015) Veldhorst *et al.*

MOS型2重量子ドット





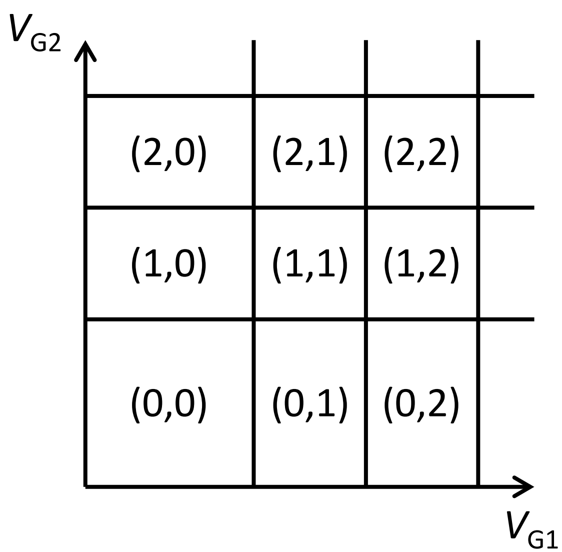
*Q_1, Q_2の並び方とN_2, N_1の順番が逆なので見づらい…

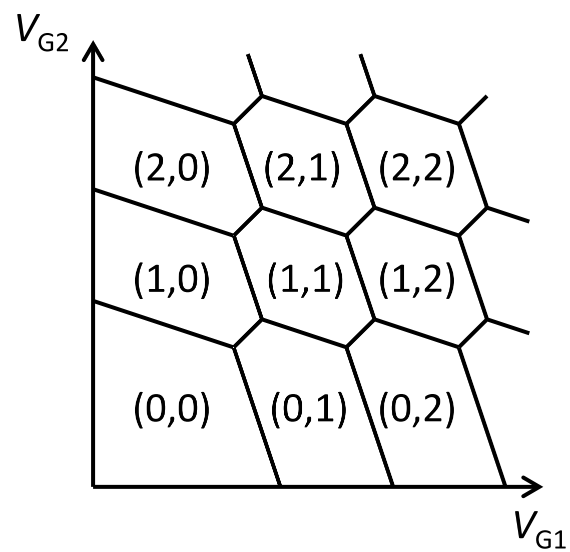
Nature **526**, 410 (2015) Veldhorst *et al.*

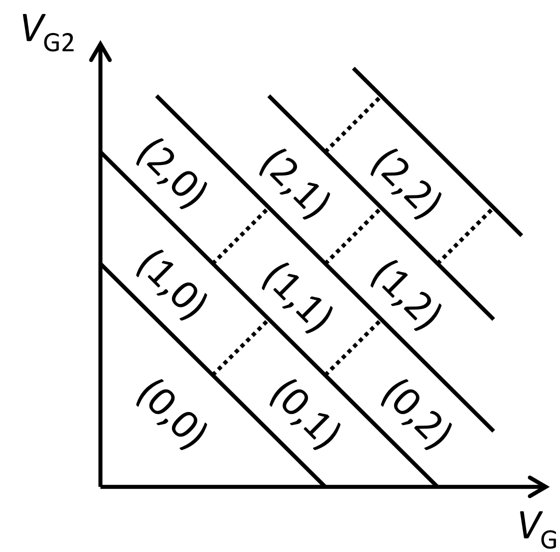
スタビリティダイアグラム

$C_{\mathrm{m}} \to 0$

$C_{\mathrm{m}} \gg C_{\mathrm{R,11,22,12,21,SET}}$







弱結合

独立のドットとして
振る舞う

ハニカム構造

相互に影響しあう

強結合

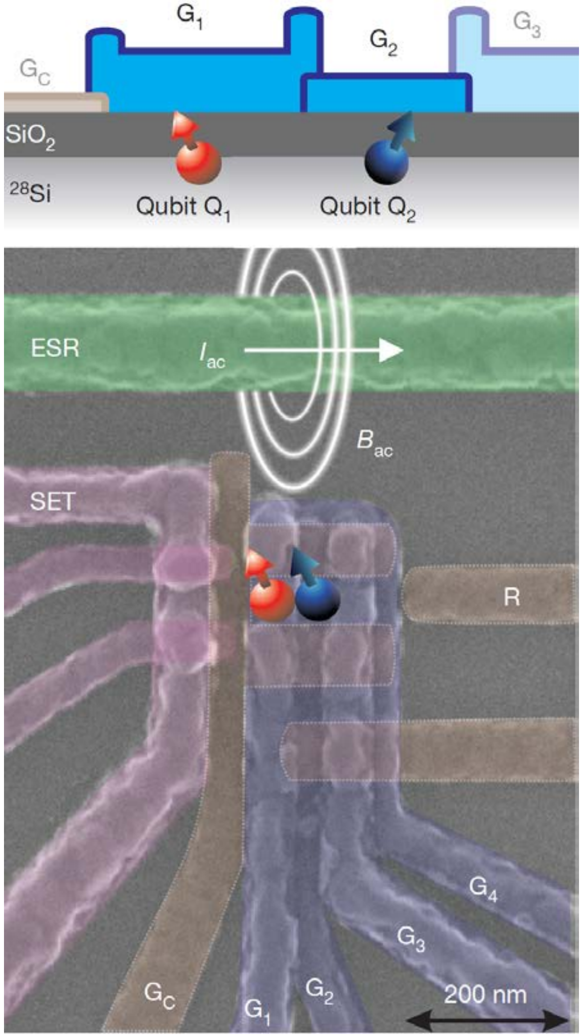
1つのドットとして
振る舞う

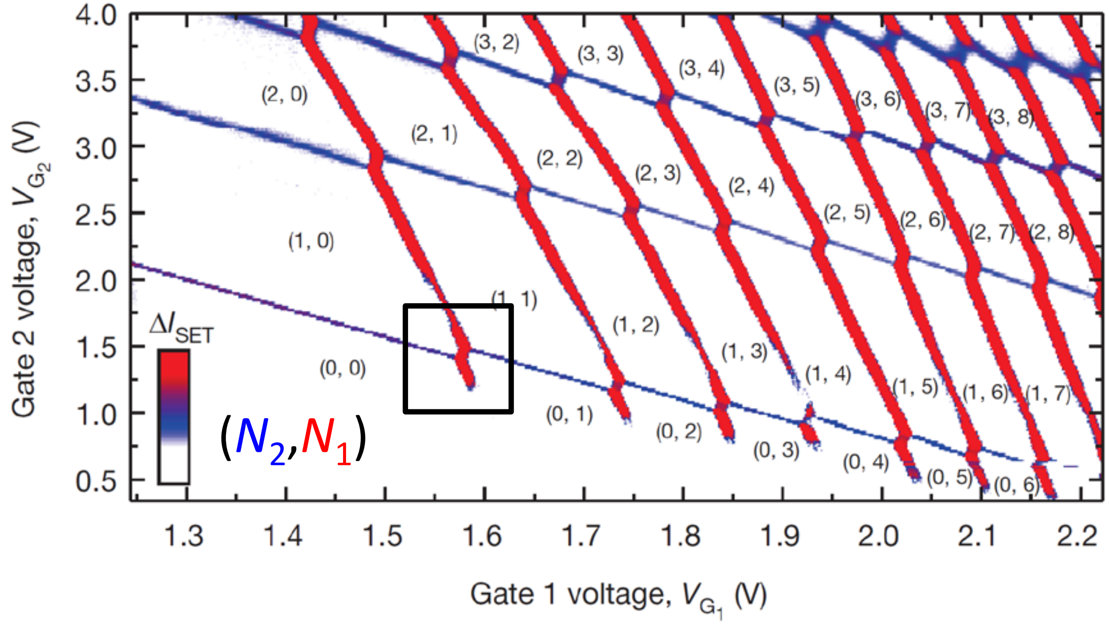
定相互作用モデルで理解できるがここでは省略 →

Rev. Mod. Phys. **75**, 1 (2003) van der Wiel *et al.*

Rev. Mod. Phys. **79**, 1217 (2007) Hanson *et al.*

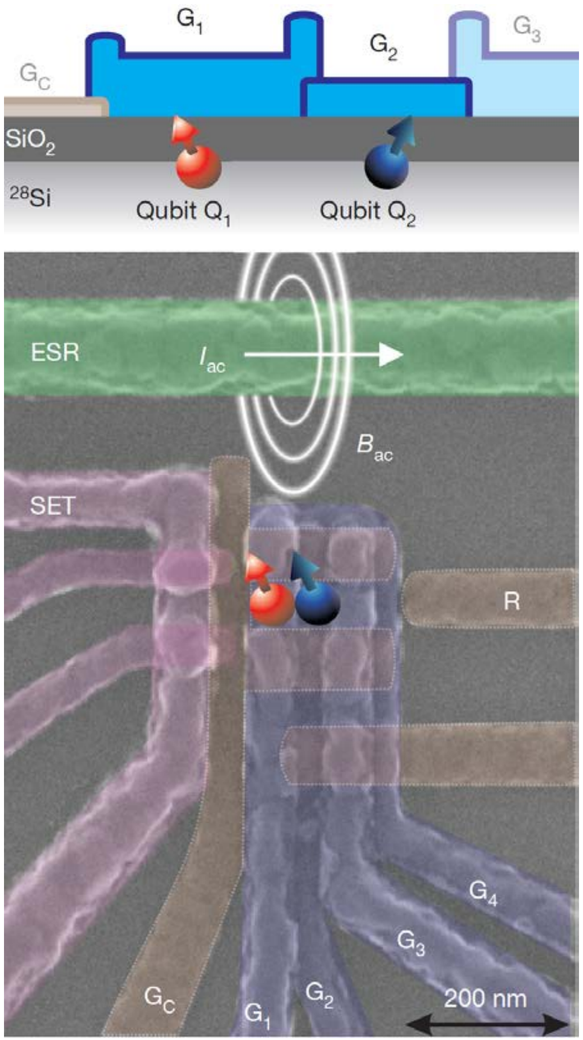
MOS型2重量子ドット

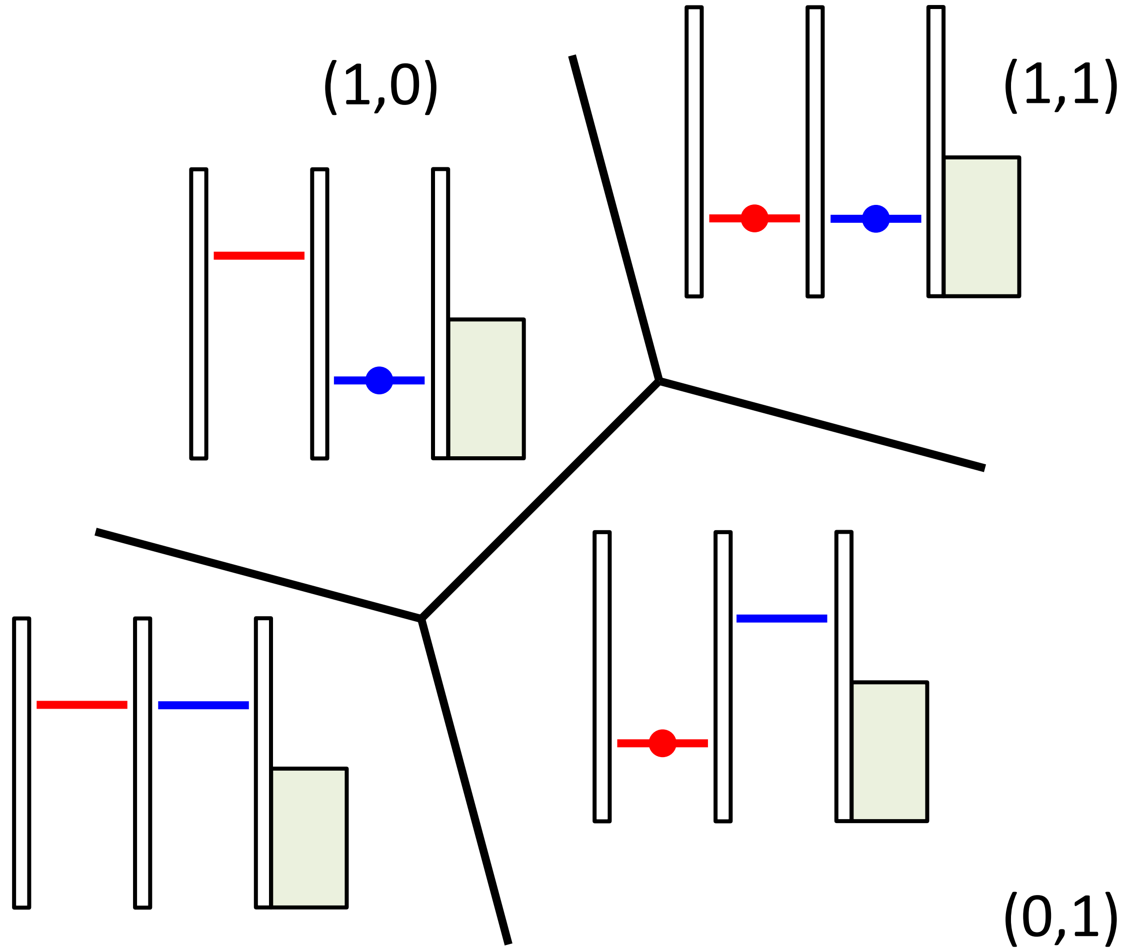




Nature **526**, 410 (2015) Veldhorst *et al.*

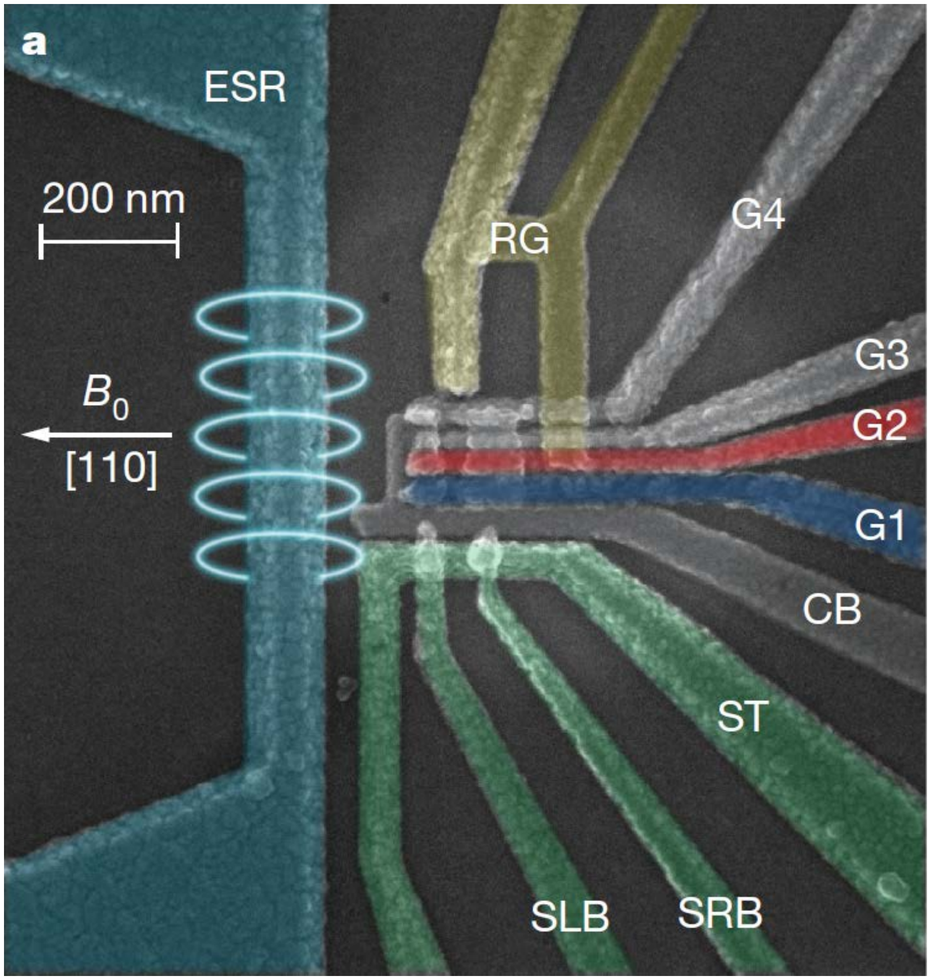
MOS型2重量子ドット



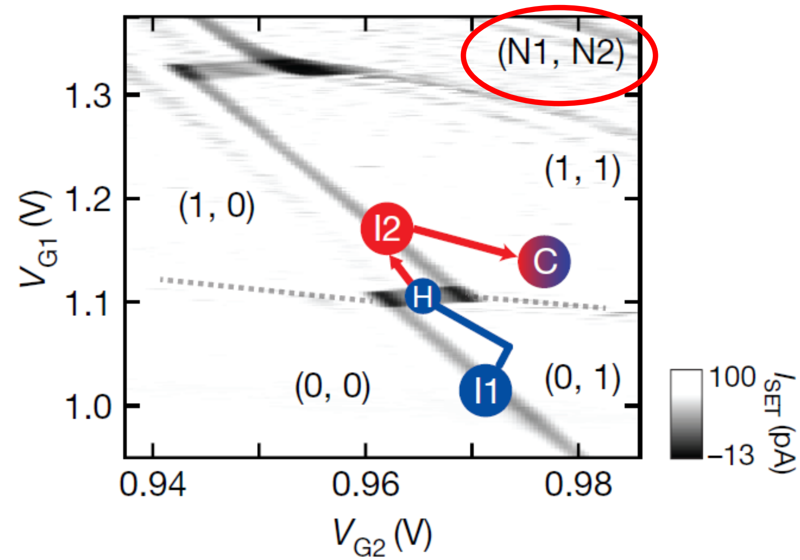


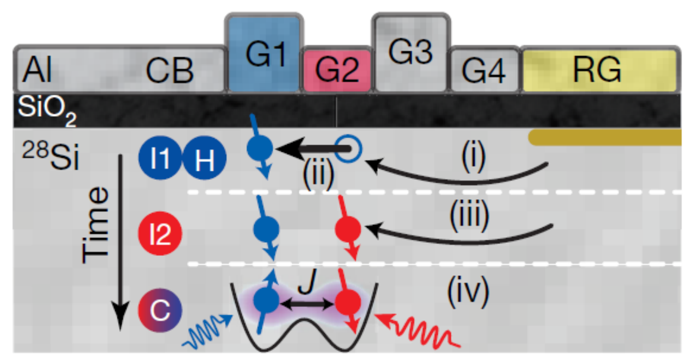
Nature **526**, 410 (2015) Veldhorst *et al.*

量子ビット操作



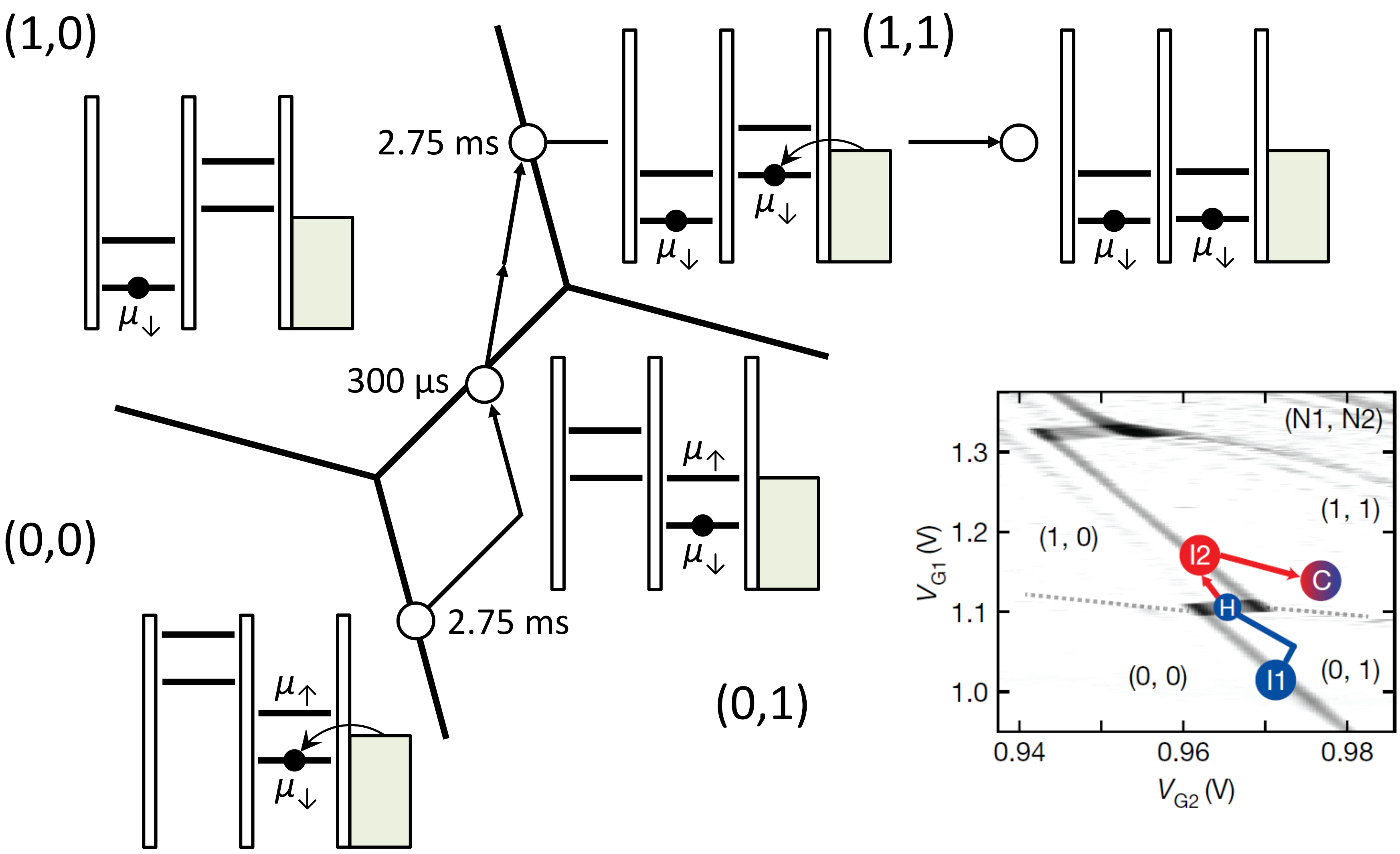
*Q_1, Q_2の同じ並び方





Nature **569**, 532 (2019) Huang *et al.*

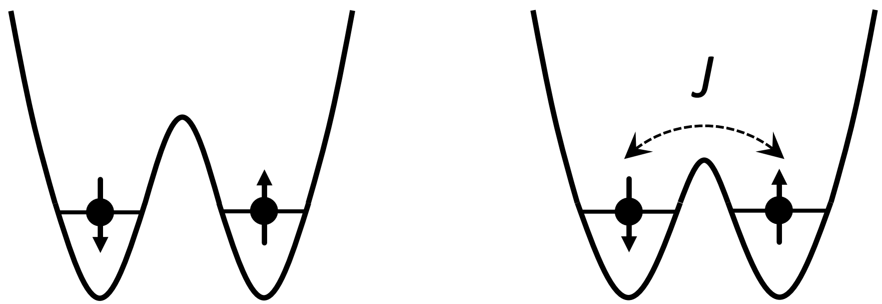
スピン初期化



Nature **569**, 532 (2019) Huang *et al.*

2スピン状態

量子ドット閉じ込めポテンシャル



$|\uparrow\uparrow\rangle, |\uparrow\downarrow\rangle, |\downarrow\uparrow\rangle, |\downarrow\downarrow\rangle$

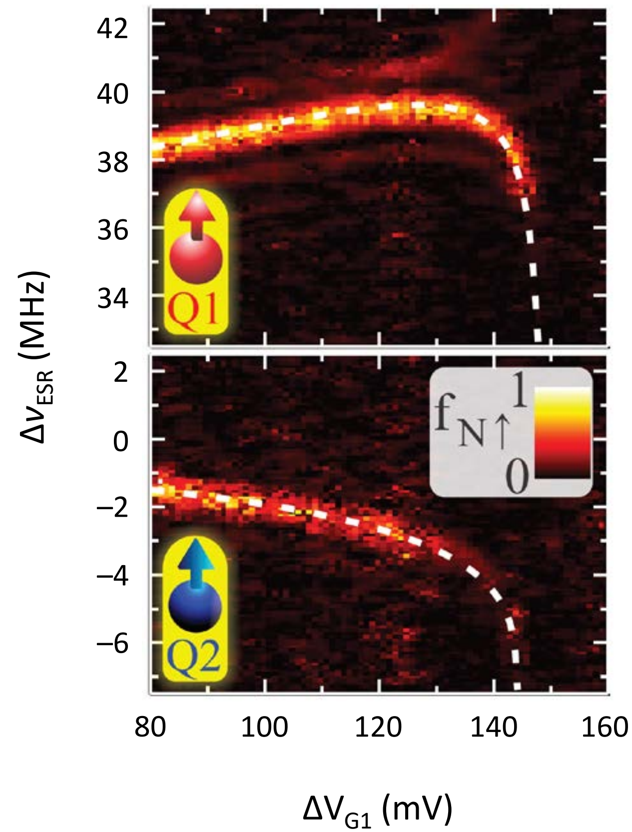
$+J\boldsymbol{S}_1 \cdot \boldsymbol{S}_2$

$$H = \gamma_{e,1} B_0 (S_{z,1} \otimes I) + \gamma_{e,2} B_0 (I \otimes S_{z,2})$$

*低磁場におけるSi:Pのスピンハミルトニアンと形式上同じ形(なので、ここで解きません)

$$H = \gamma_e B_0 S_z - \gamma_P B_0 I_z + a_0 \boldsymbol{S} \cdot \boldsymbol{I}$$

電場によるESR周波数制御



Nature **526**, 410 (2015) Veldhorst *et al.*

2スピン状態

$$(f_{1\uparrow}, f_{1\downarrow}, f_{2\uparrow}, f_{2\downarrow}) = (\bar{E}_z, 0, 0, -\bar{E}_z) \longrightarrow \left(\bar{E}_z, \frac{\delta E_z}{2}, -\frac{\delta E_z}{2}, -\bar{E}_z\right) \longrightarrow \left(\bar{E}_z, \frac{\delta \tilde{E}_z - J}{2}, -\frac{\delta \tilde{E}_z + J}{2}, -\bar{E}_z\right)$$

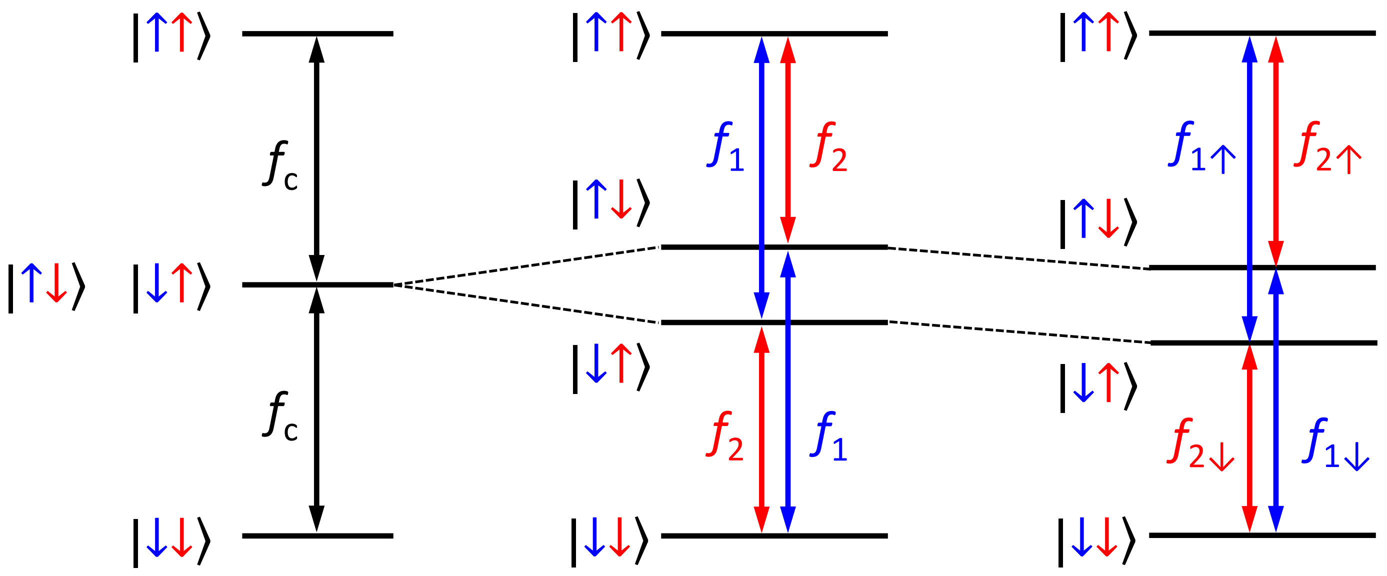
$\bar{E}_z/h = f_c = 39.33$ GHz

$@B_0 = 1.42$ T

$\delta E_z/h = 13.26$ MHz

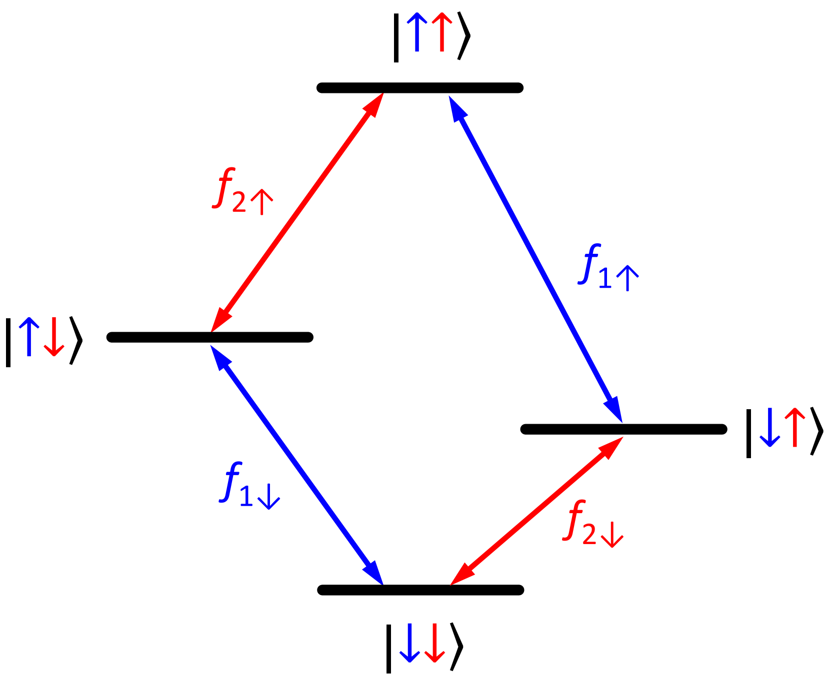
$\delta\tilde{E}_z = (\delta E_z{}^2 + J^2)^{1/2}$

$J/h = 1.59$ MHz



CROTゲート

- 全ての遷移が異なる周波数を持つ



$$f_{1\uparrow} = \bar{E}_z + \frac{\delta\tilde{E}_z + J}{2}$$

$$f_{1\downarrow} = \bar{E}_z + \frac{\delta\tilde{E}_z + J}{2}$$

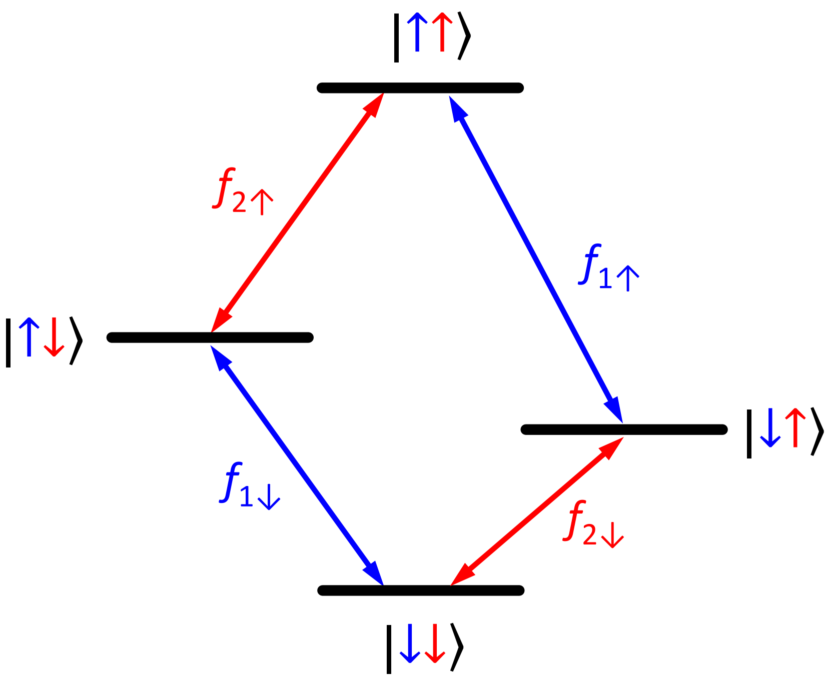
$$f_{2\uparrow} = \bar{E}_z + \frac{-\delta\tilde{E}_z + J}{2}$$

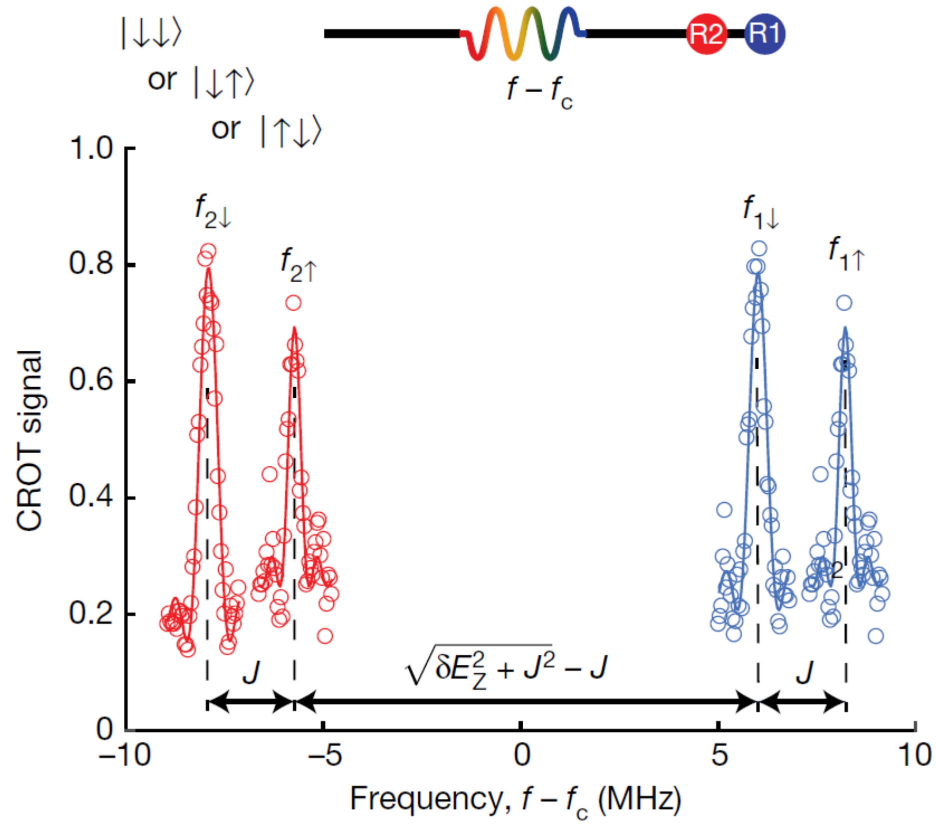
$$f_{2\downarrow} = \bar{E}_z + \frac{-\delta\tilde{E}_z - J}{2}$$

Nature **569**, 532 (2019) Huang *et al.*

CROTゲート

- 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

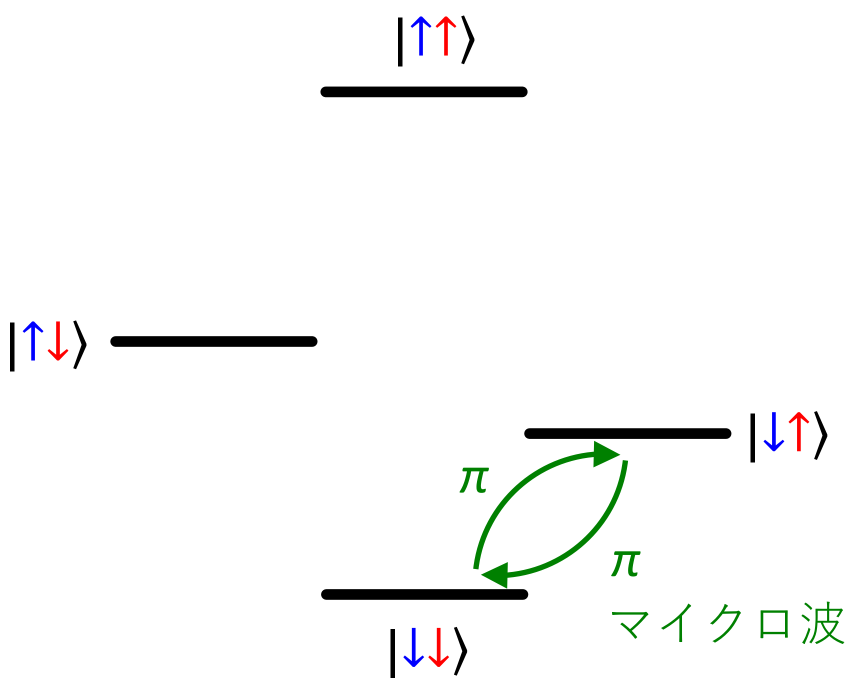


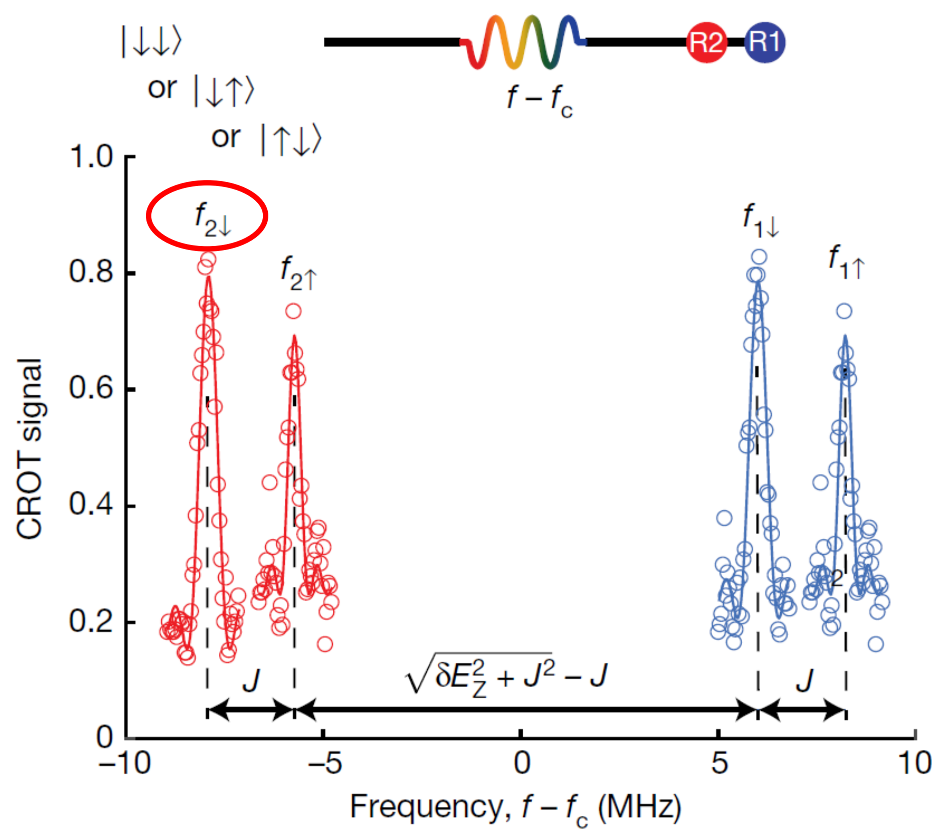


Nature **569**, 532 (2019) Huang *et al.*

CROTゲート

- 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

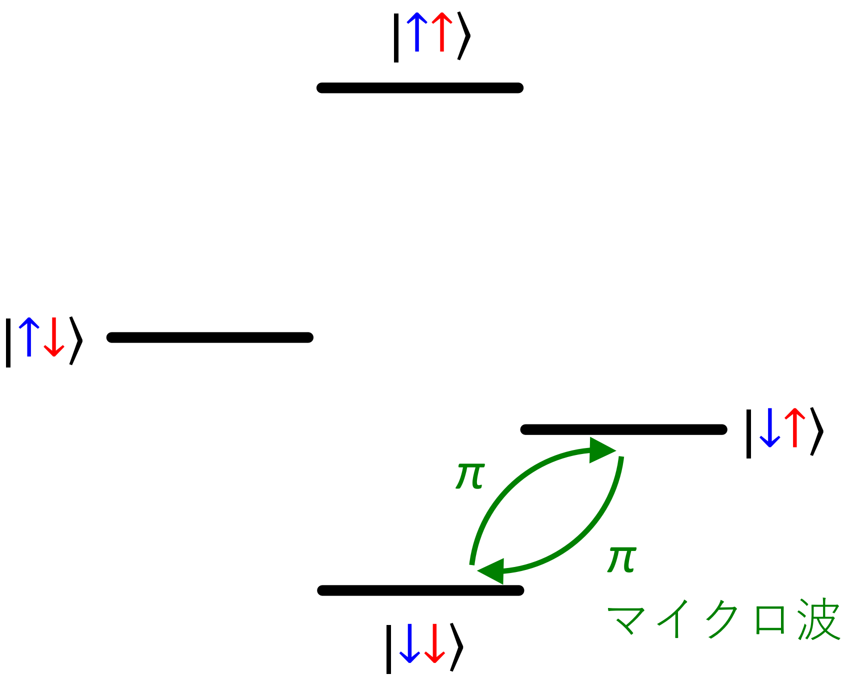




Nature **569**, 532 (2019) Huang *et al.*

CROTゲート

- 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



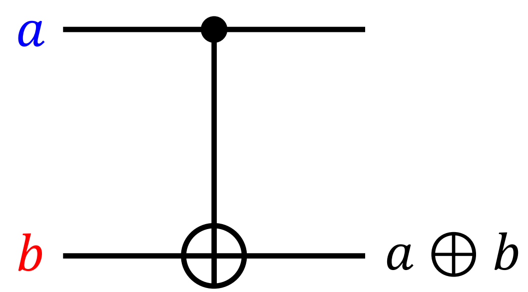
e.g. CNOTゲート

$|\uparrow\uparrow\rangle = |00\rangle \longrightarrow |00\rangle$

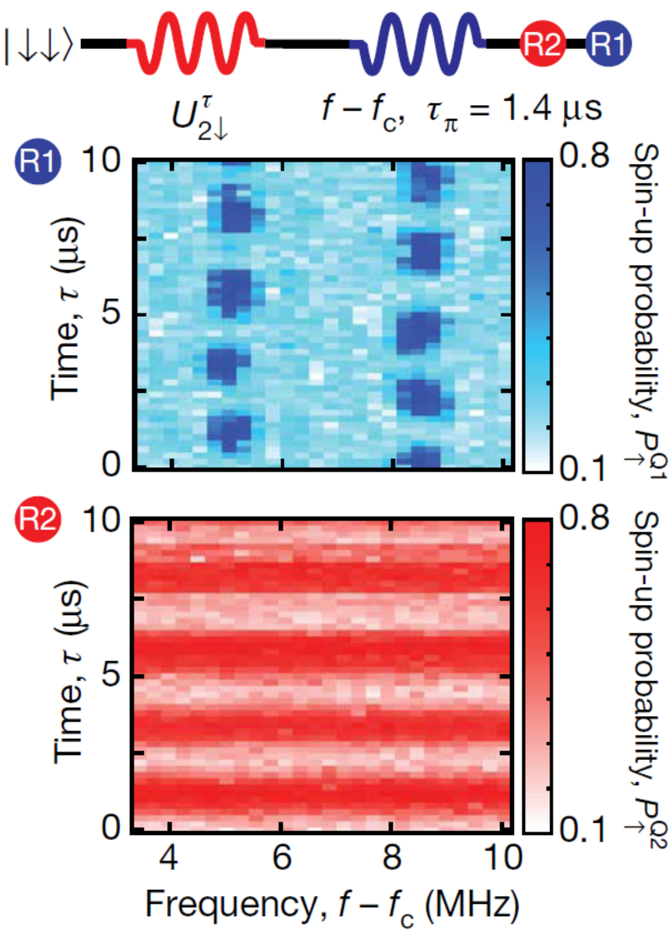
$|\uparrow\downarrow\rangle = |01\rangle \longrightarrow |01\rangle$

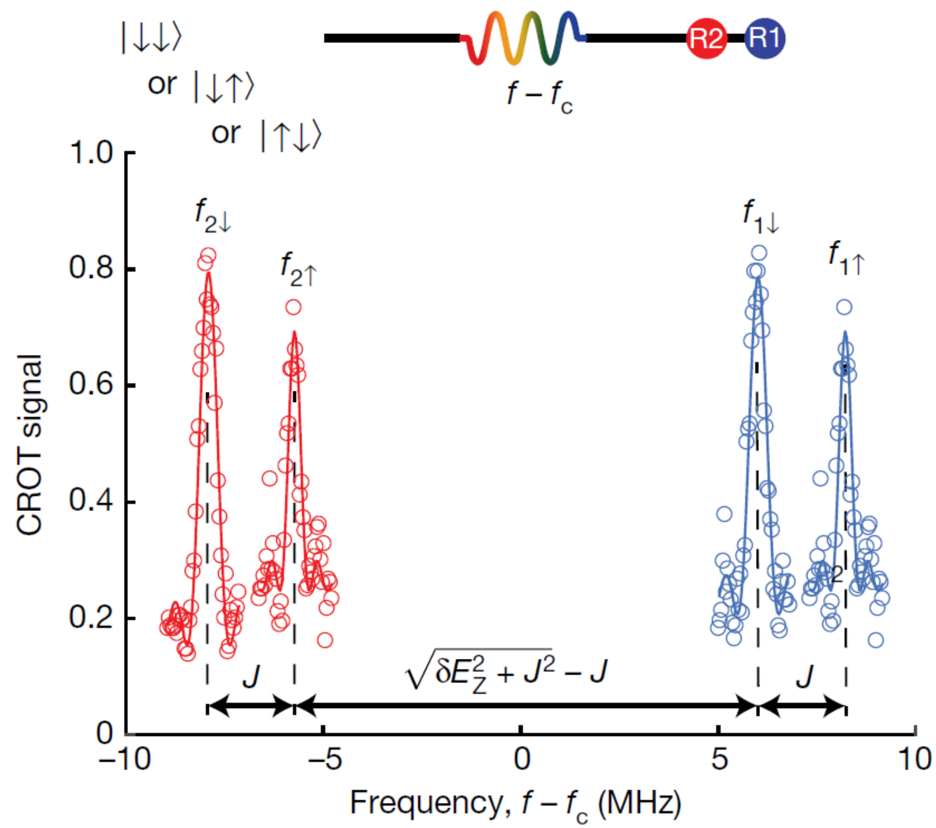
$|\downarrow\uparrow\rangle = |10\rangle \longrightarrow |11\rangle$

$|\downarrow\downarrow\rangle = |11\rangle \longrightarrow |10\rangle$



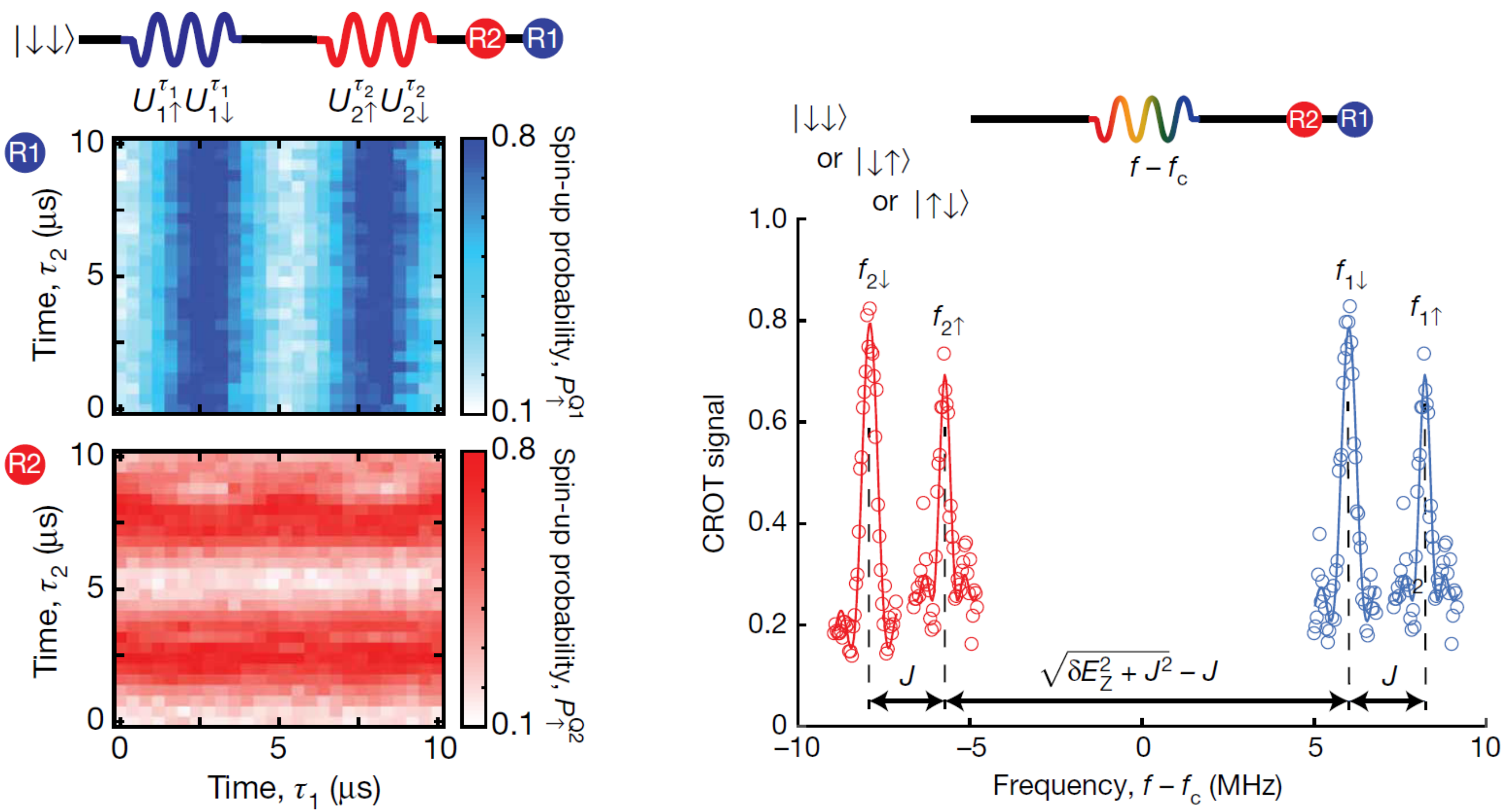
CROTゲート





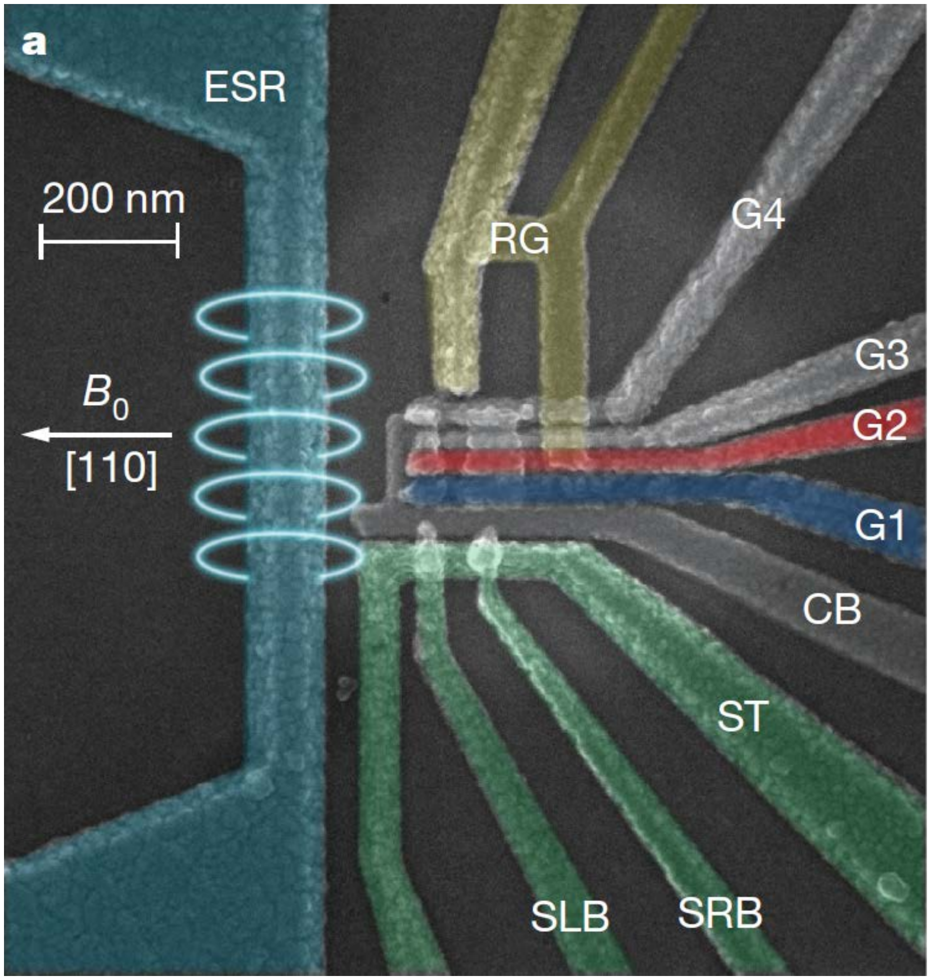
Nature **569**, 532 (2019) Huang *et al.*

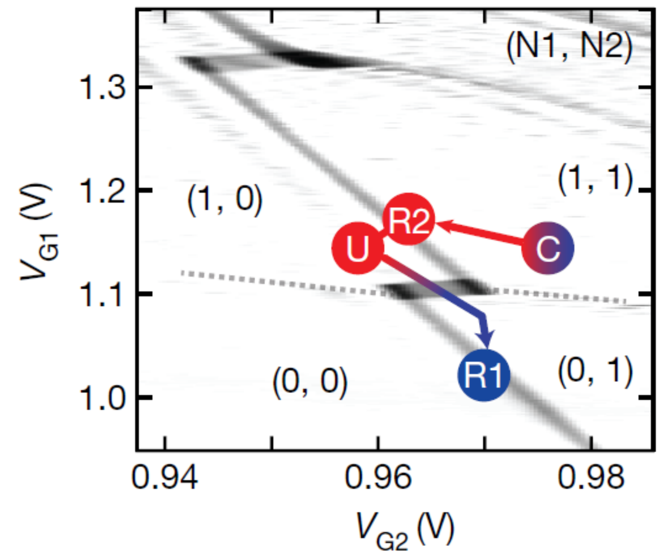
1量子ビットゲート

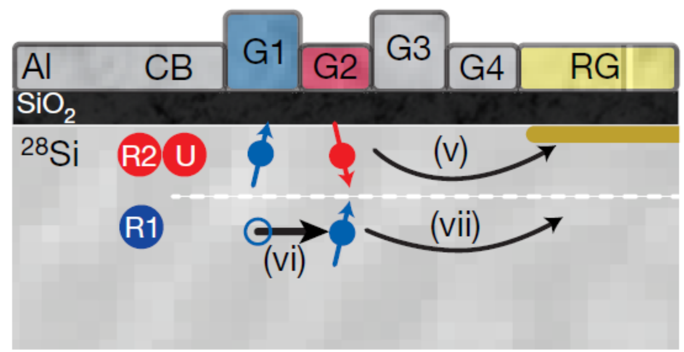


Nature **569**, 532 (2019) Huang *et al.*

スピン読み出し







Nature **569**, 532 (2019) Huang *et al.*

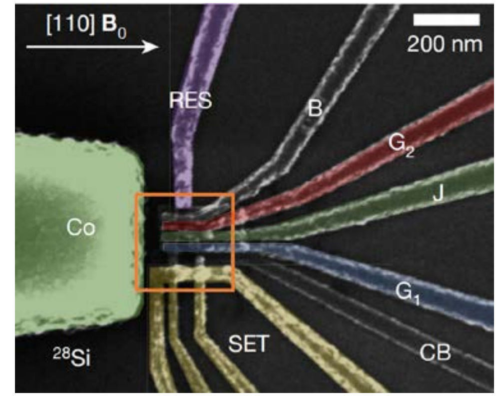
“高温”動作

Article

Operation of a silicon quantum processor unit cell above one kelvin

https://doi.org/10.1038/s41586-020-2171-6
Received: 19 June 2019
Accepted: 22 January 2020
Published online: 15 April 2020

C. H. Yang[1]✉, R. C. C. Leon[1], J. C. C. Hwang[1,6], A. Saraiva[1], T. Tanttu[1], W. Huang[1], J. Camirand Lemyre[2], K. W. Chan[1], K. Y. Tan[3,7], F. E. Hudson[1], K. M. Itoh[4], A. Morello[1], M. Pioro-Ladrière[2,5], A. Laucht[1] & A. S. Dzurak[1]✉

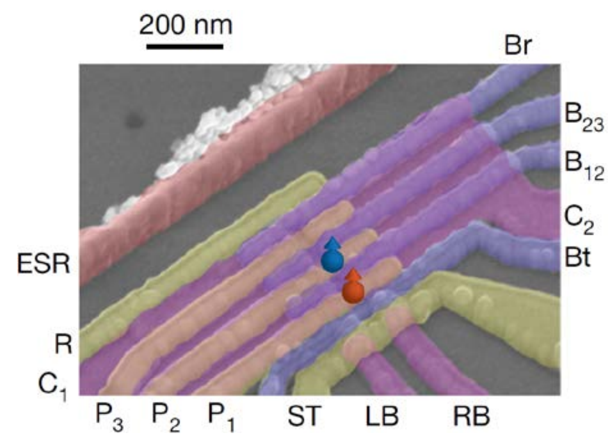


Article

Universal quantum logic in hot silicon qubits

https://doi.org/10.1038/s41586-020-2170-7
Received: 22 October 2019
Accepted: 22 January 2020
Published online: 15 April 2020

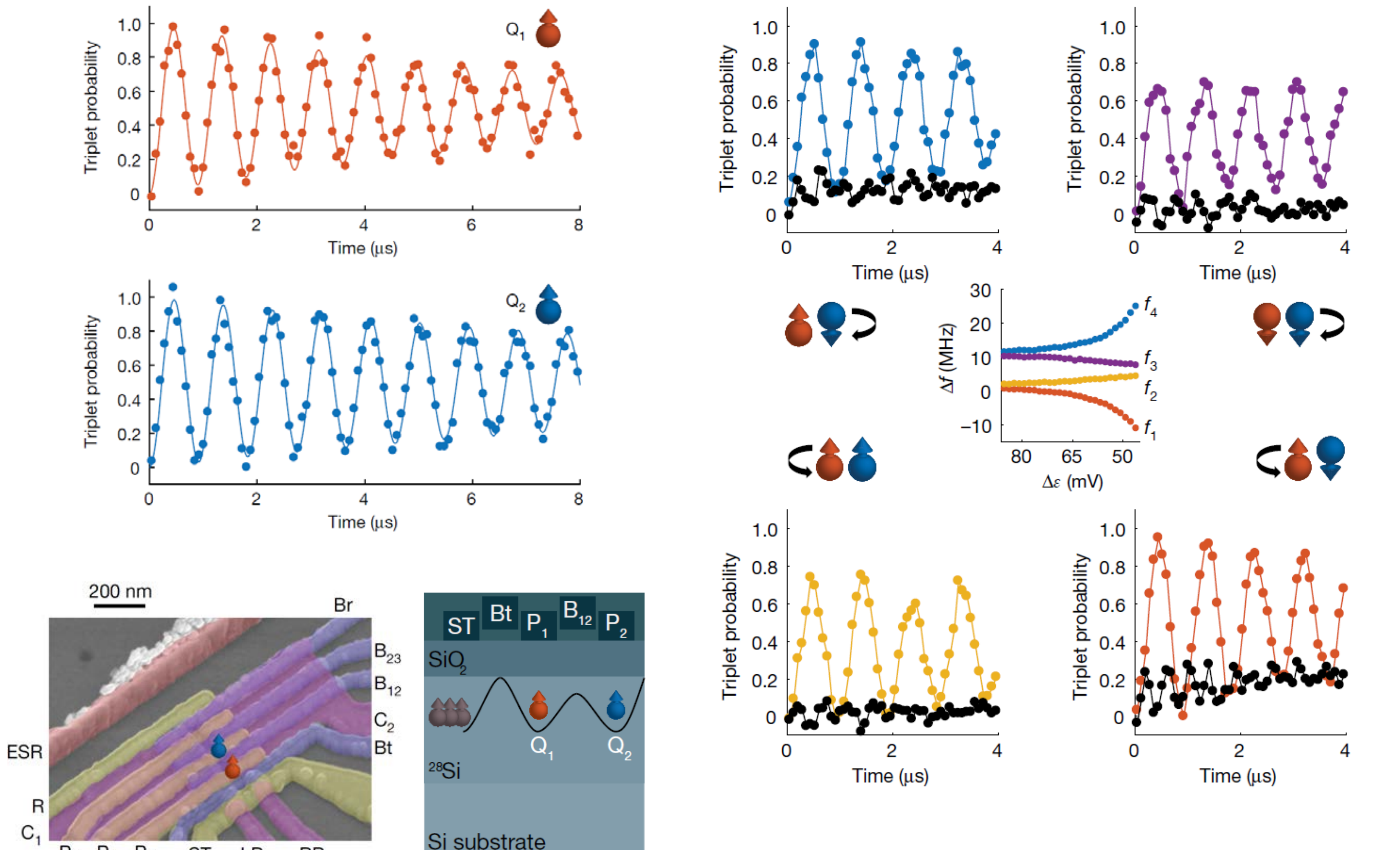
L. Petit[1], H. G. J. Eenink[1], M. Russ[1], W. I. L. Lawrie[1], N. W. Hendrickx[1], S. G. J. Philips[1], J. S. Clarke[2], L. M. K. Vandersypen[1] & M. Veldhorst[1]✉



Nature **580**, 350 (2020) Yang *et al.*

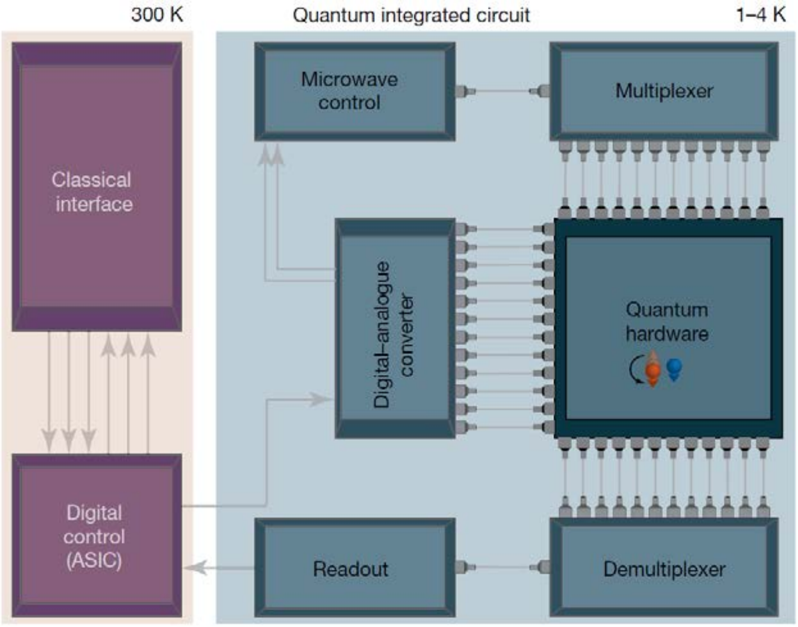
Nature **580**, 355 (2020) Petit *et al.*

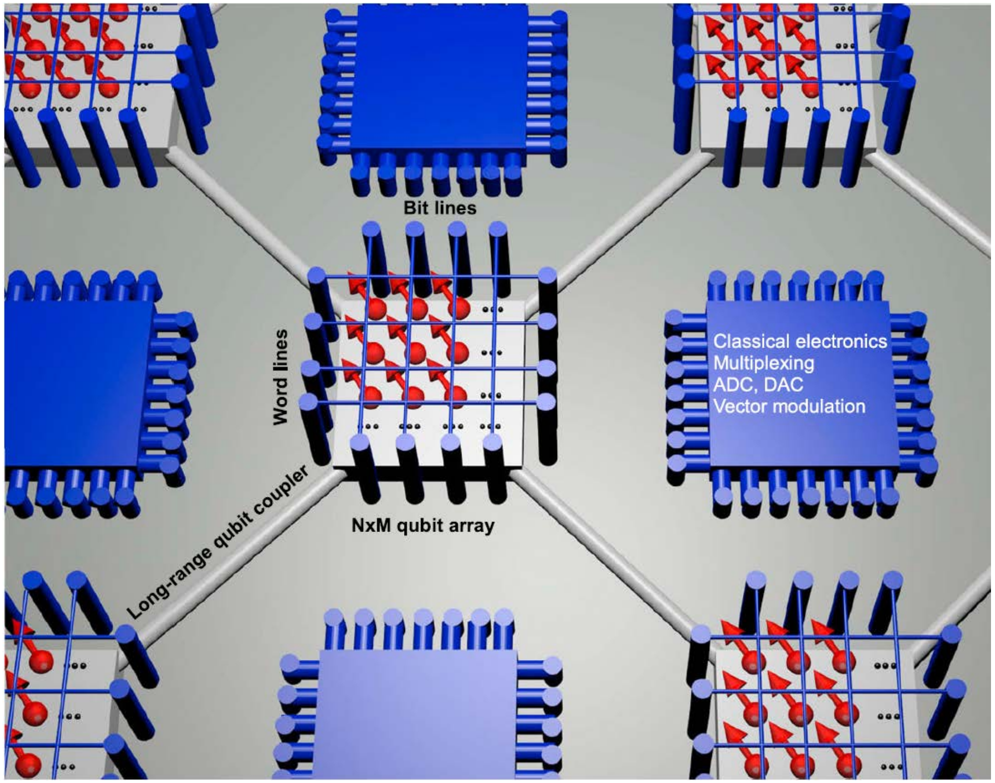
“高温”動作



Nature **580**, 355 (2020) Petit *et al.*

“高温”動作





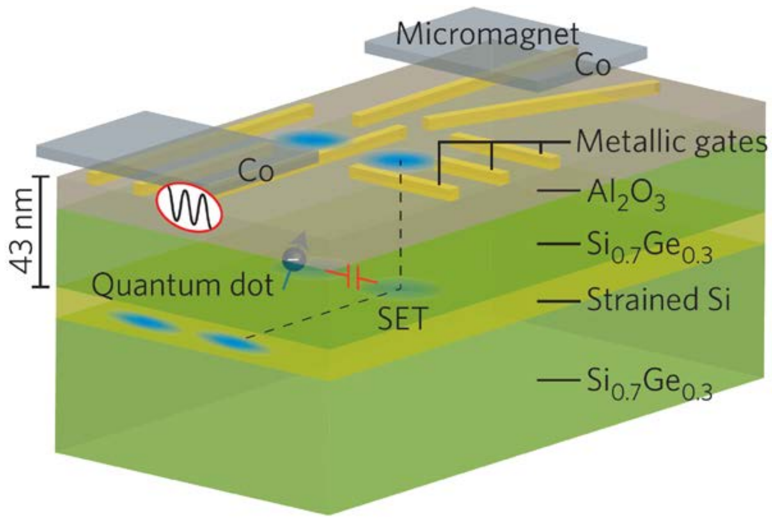
npj Quant. Info. **3**, 34 (2017) Vandersypen *et al.*

Nature **580**, 355 (2020) Petit *et al.*

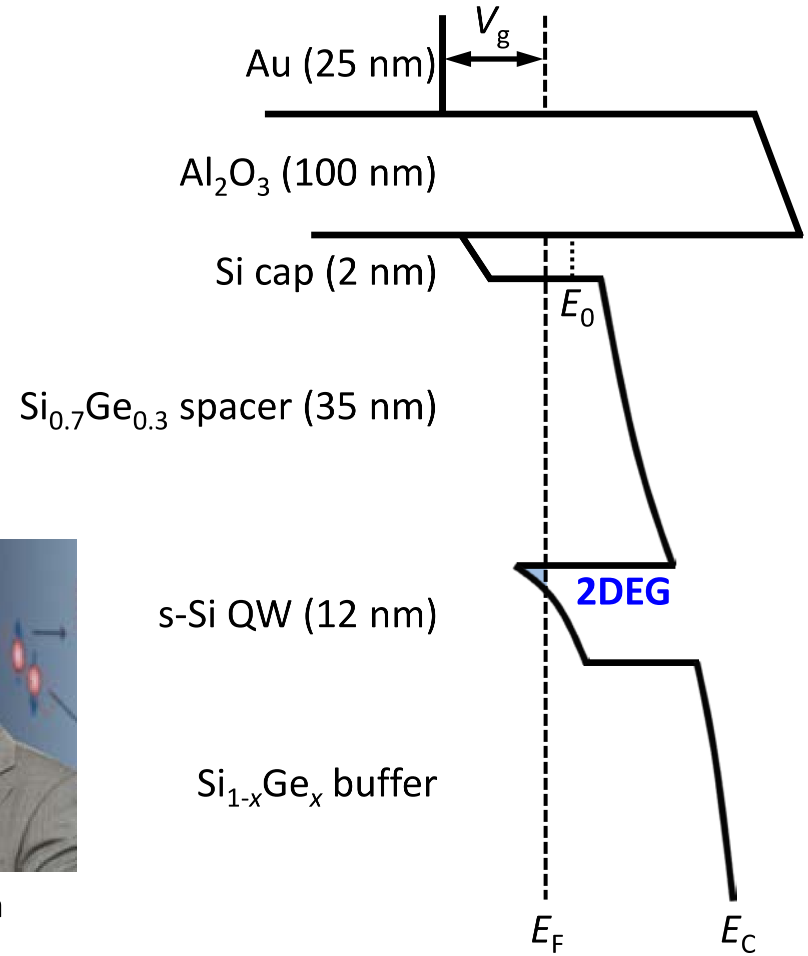
講義内容

- **ドナースピン**
  - アンサンブル
  - 単一ドナー
- **量子ドットスピン**
  - MOS量子ドット
  - Si/SiGe量子ドット

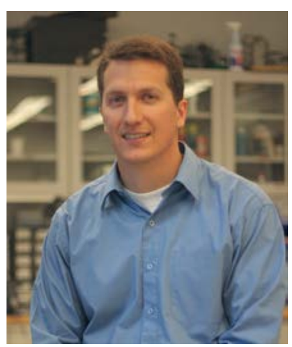
Si/SiGeヘテロ構造



ノンドープ構造による蓄積型QD



L. Vandersypen

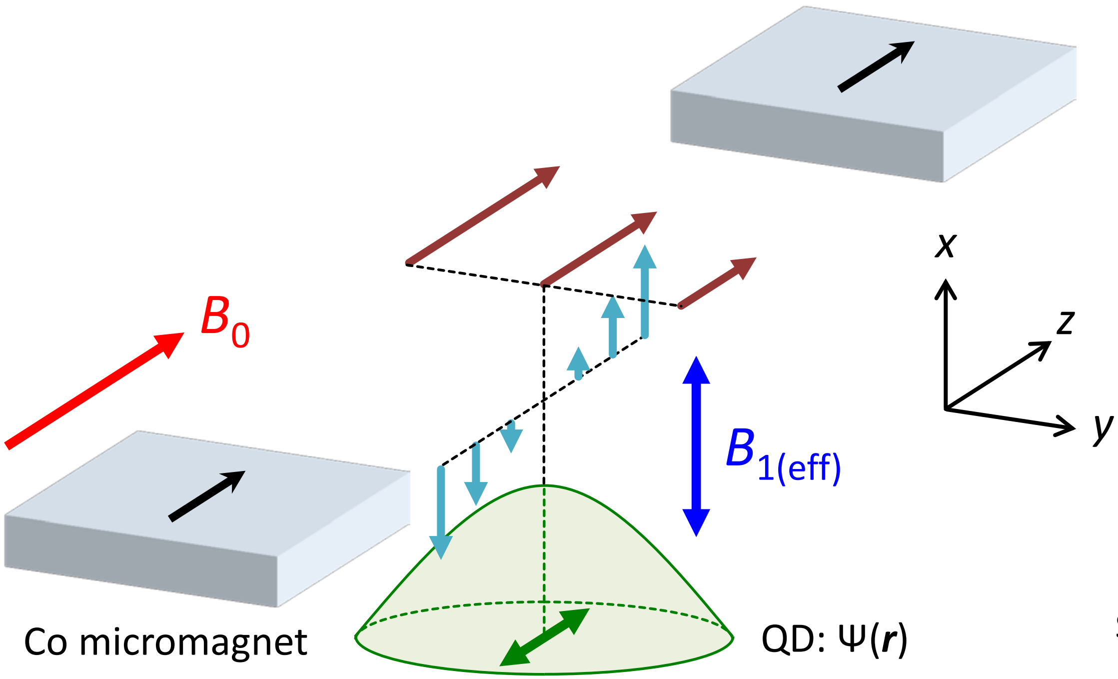


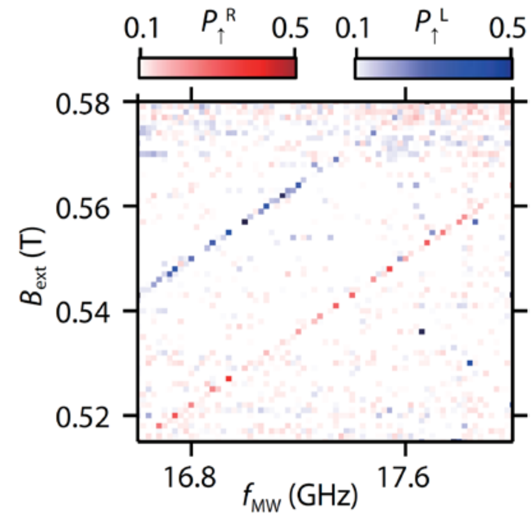
J. Petta

S. Tarucha

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





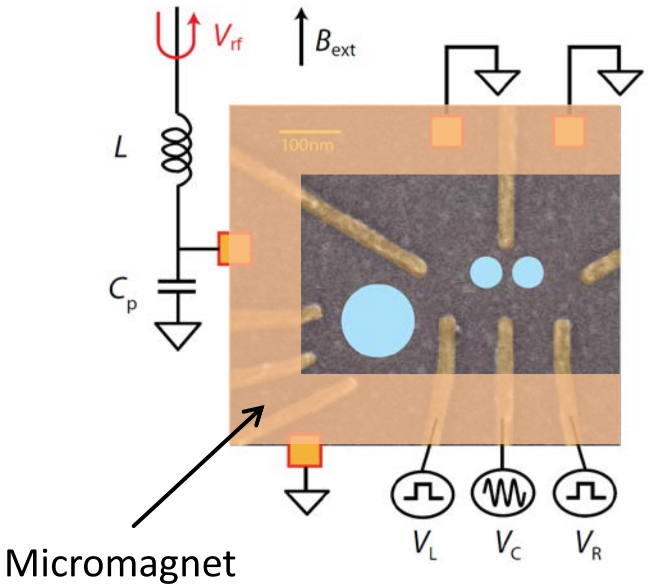
Sci. Adv. **2**, e1600694 (2016) Takeda *et al.*

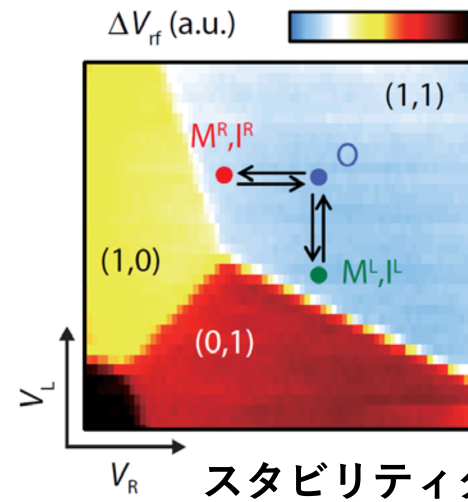
(Theory) Phys. Rev. Lett. 96, 047202 (2006) Tokura *et al.*

(GaAs QD) Nature Phys. **4**, 776 (2008) Pioro-Ladrière *et al.*

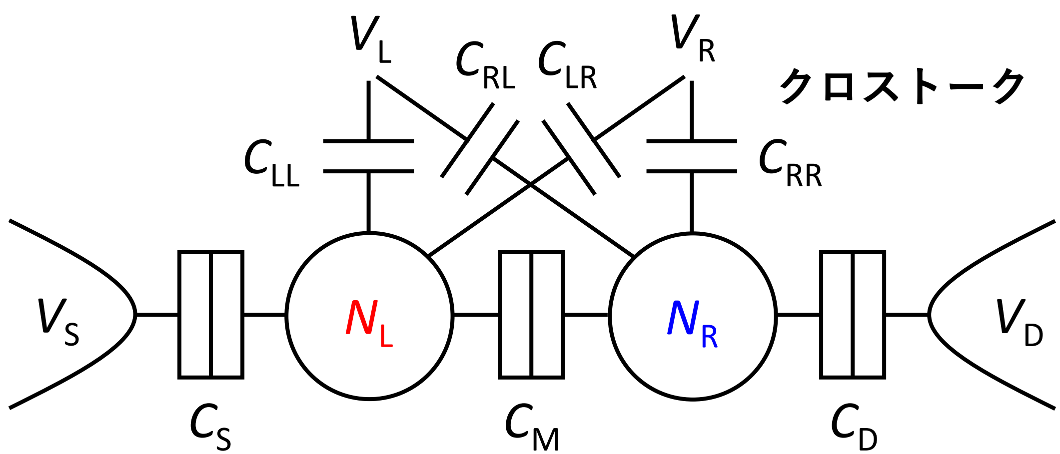
(Magnet design) Appl. Phys. Express **8**, 084401 (2015) Yoneda *et al.*

2重量子ドット



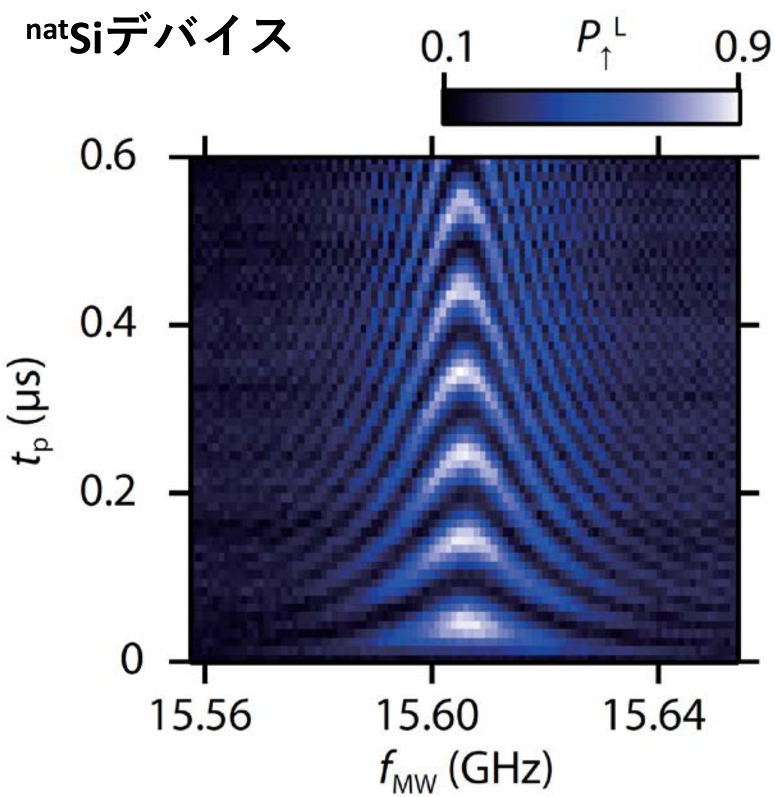


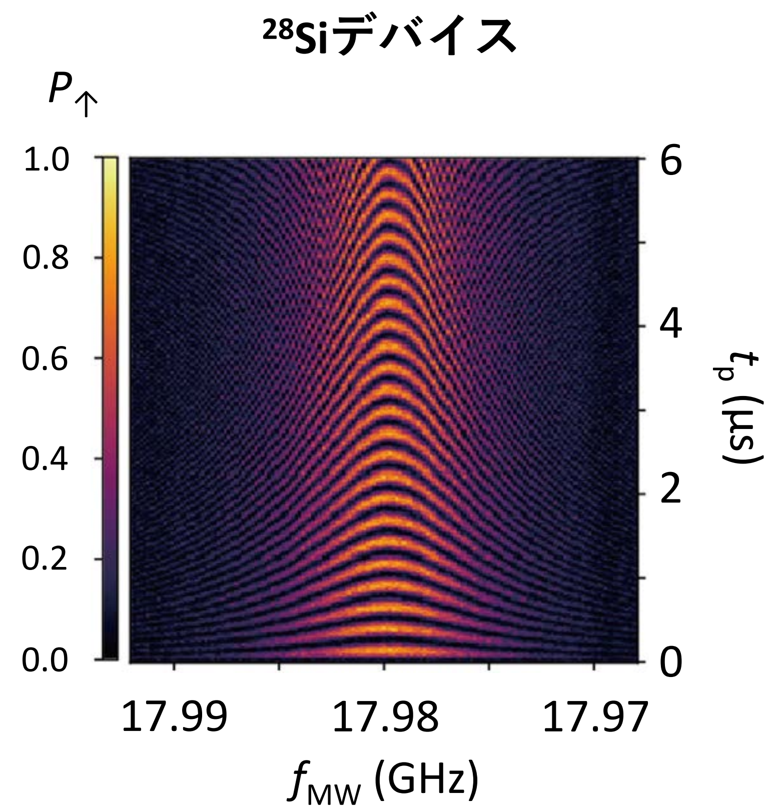
スタビリティダイアグラム



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

電気双極子スピン共鳴



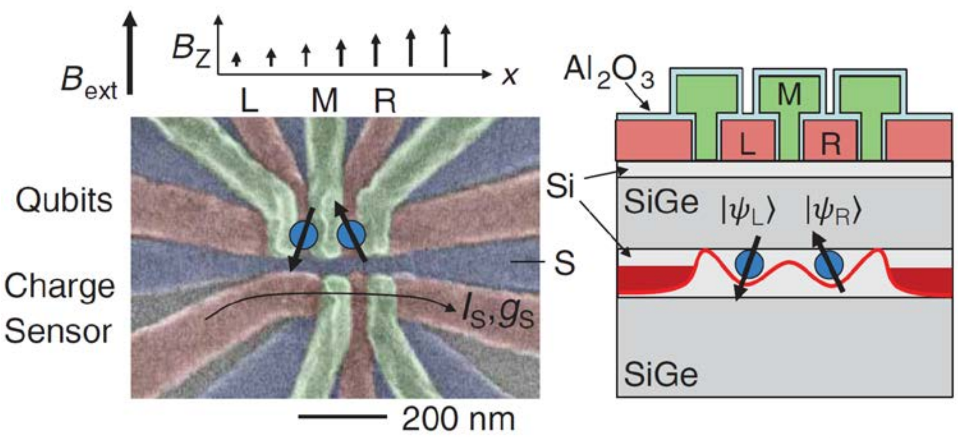


- ラビ周波数 $f_R \approx 30$ MHz
- フィディリティ F^{RB} = 99.6% → **> 99.9%**
- T_2^* = 2 μs → 20 μs, T_2^{CPMG} = 3.1 ms

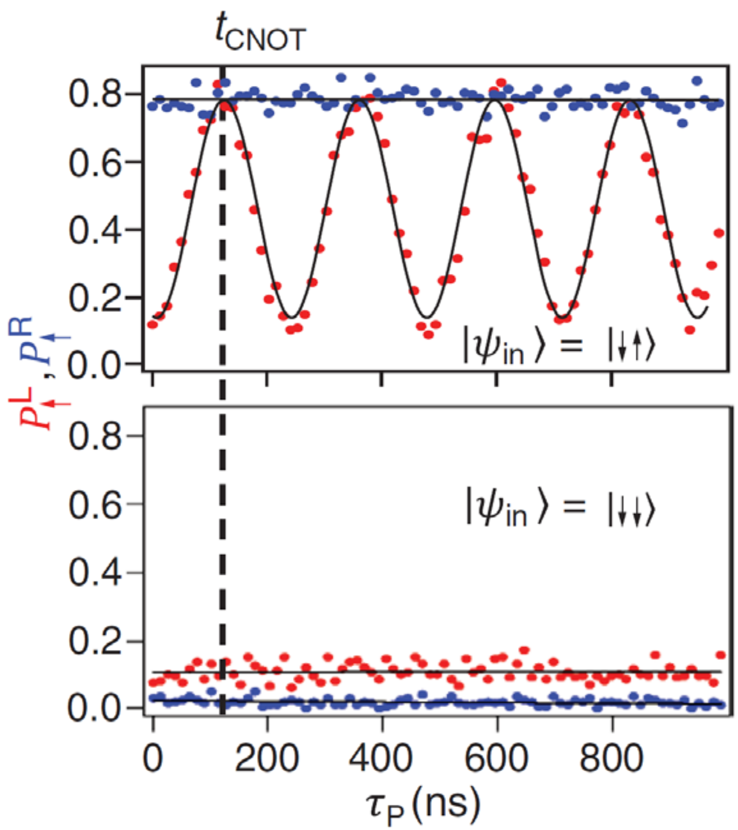
Sci. Adv. **2**, e1600694 (2016) Takeda *et al.*

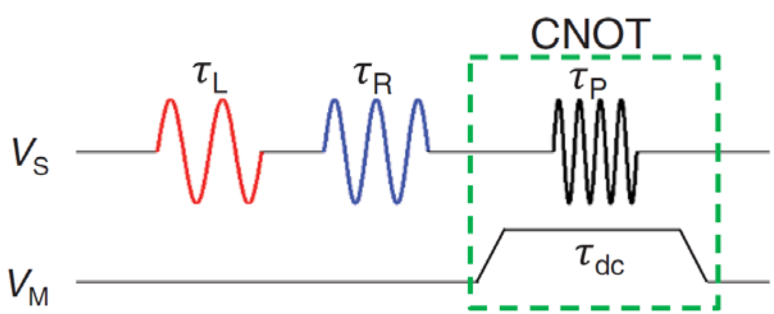
Nature Nano. **13**, 102 (2018) Yoneda *et al.*

CNOTゲート



J: 可変

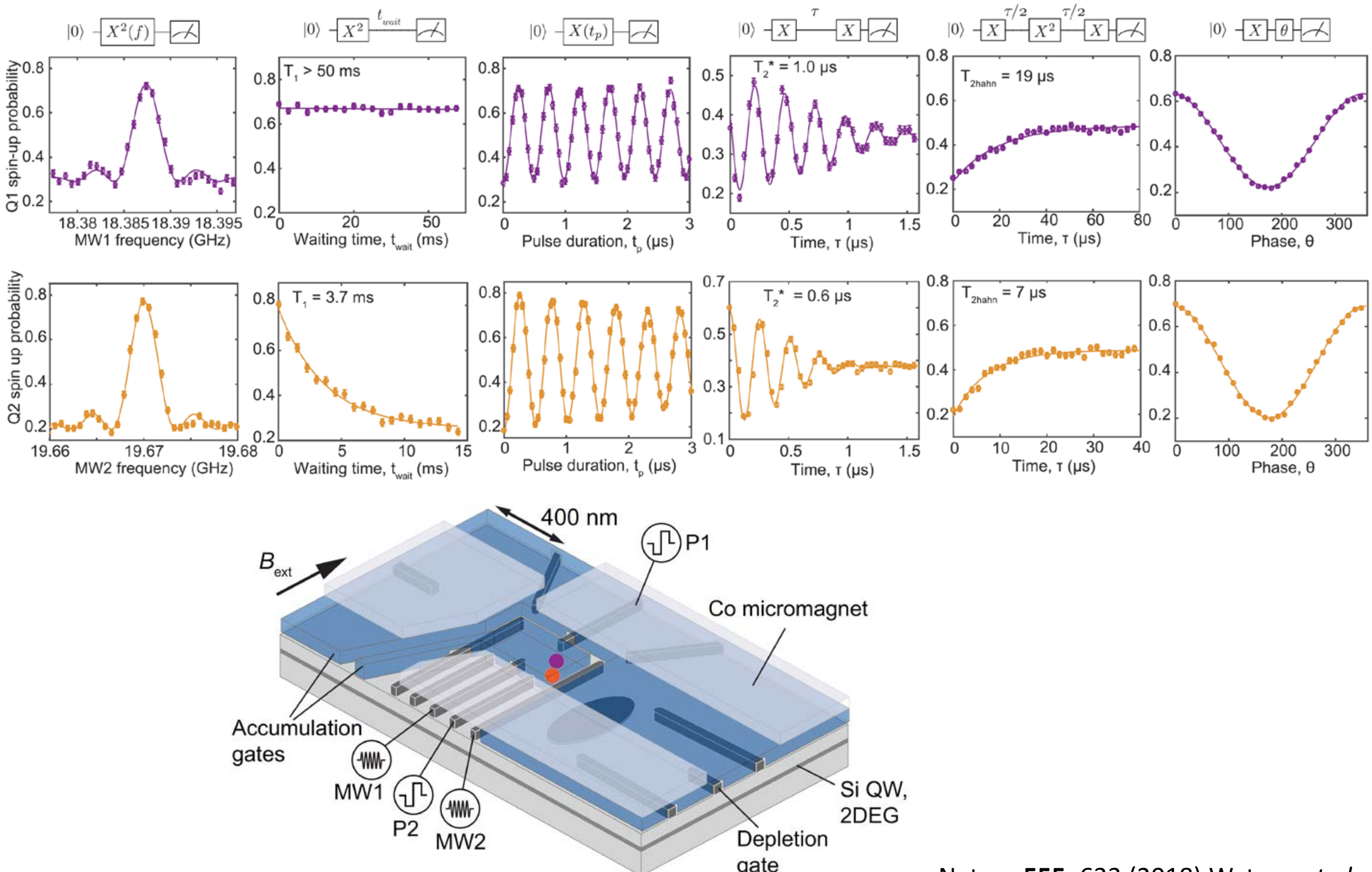




$F^{\text{Bell}} = 78\%$

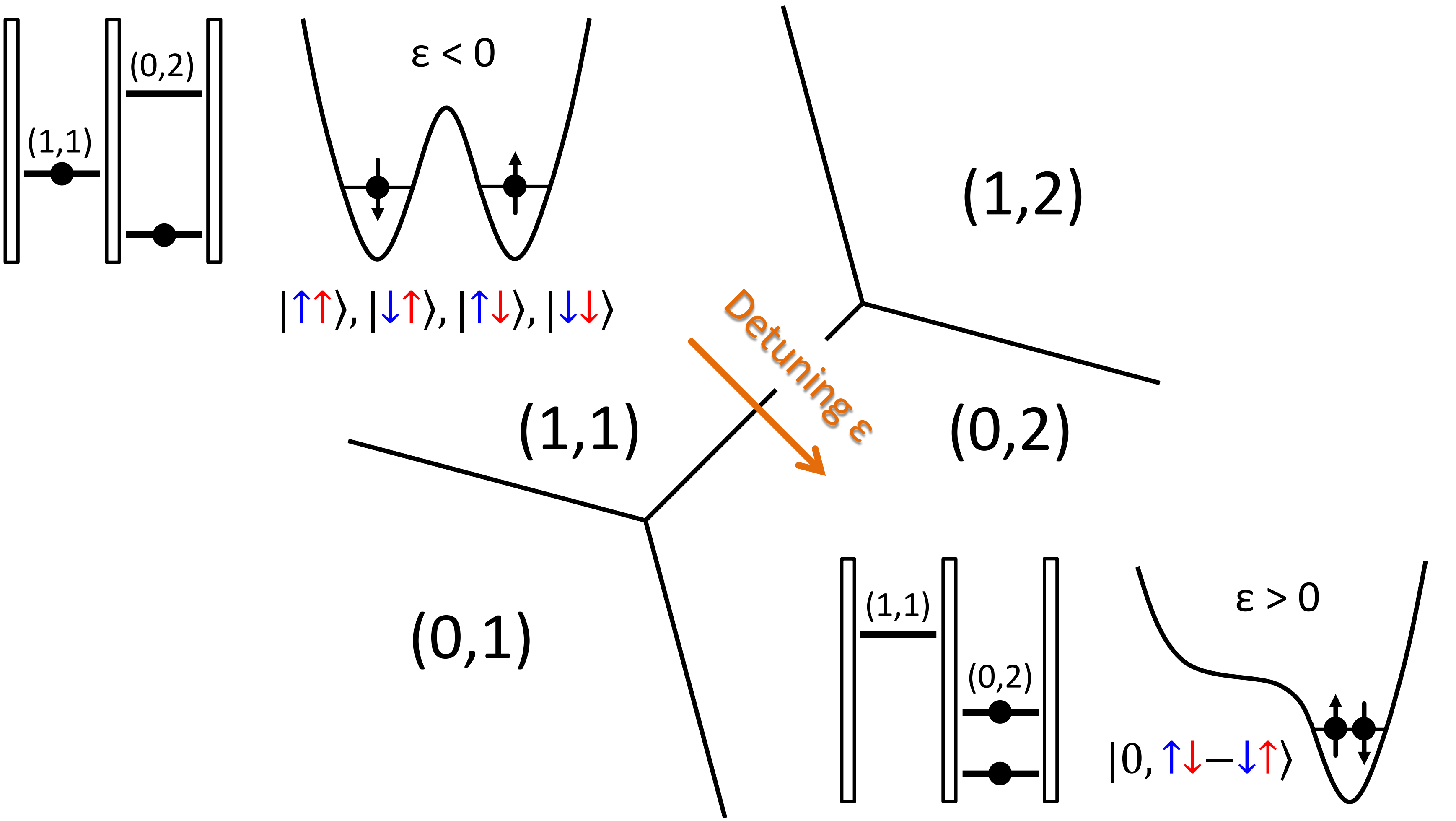
Science **359**, 439 (2018) Zajac *et al.*

2量子ビットプロセッサ

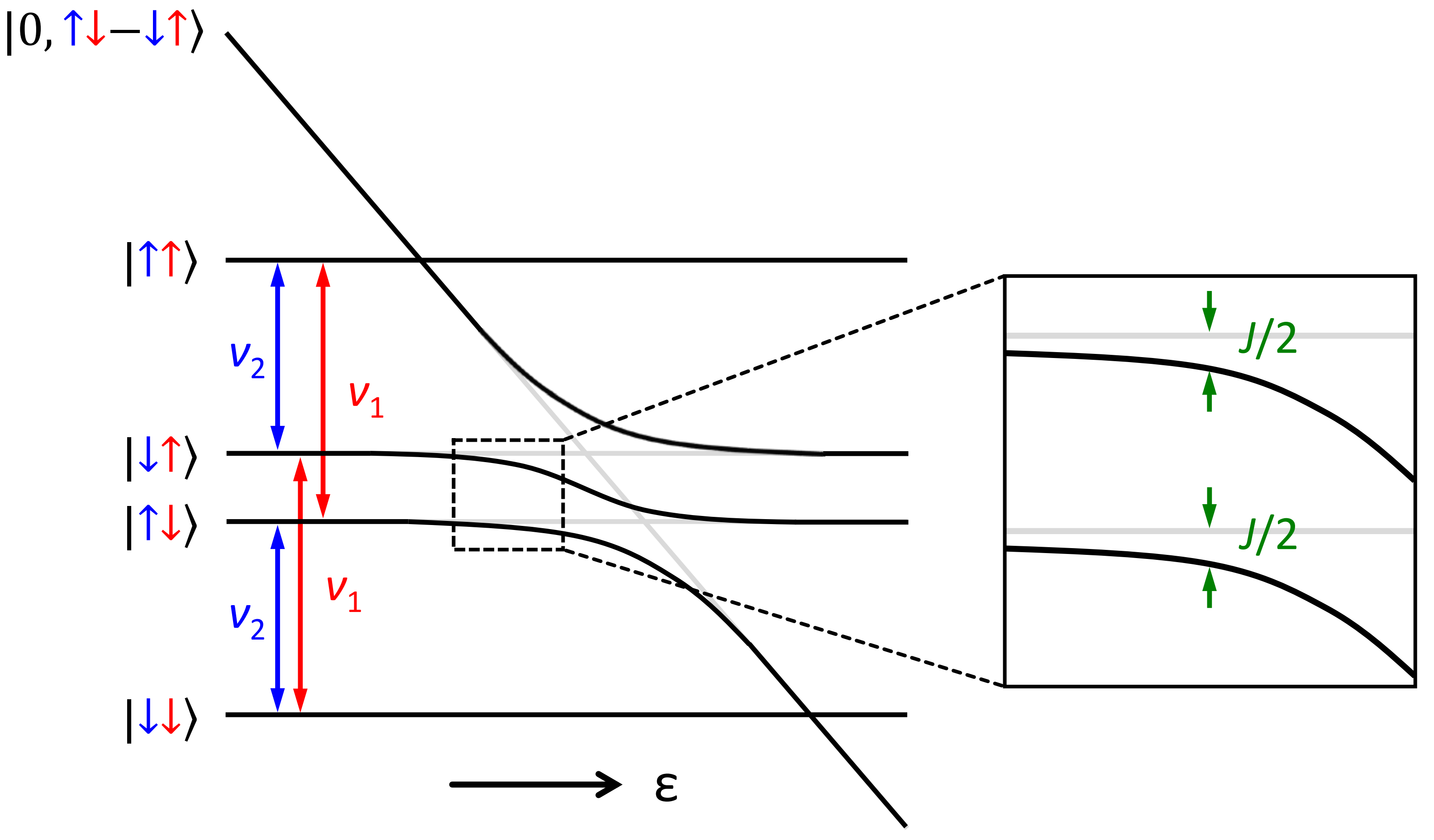


Nature **555**, 633 (2018) Watson *et al.*

2電子状態

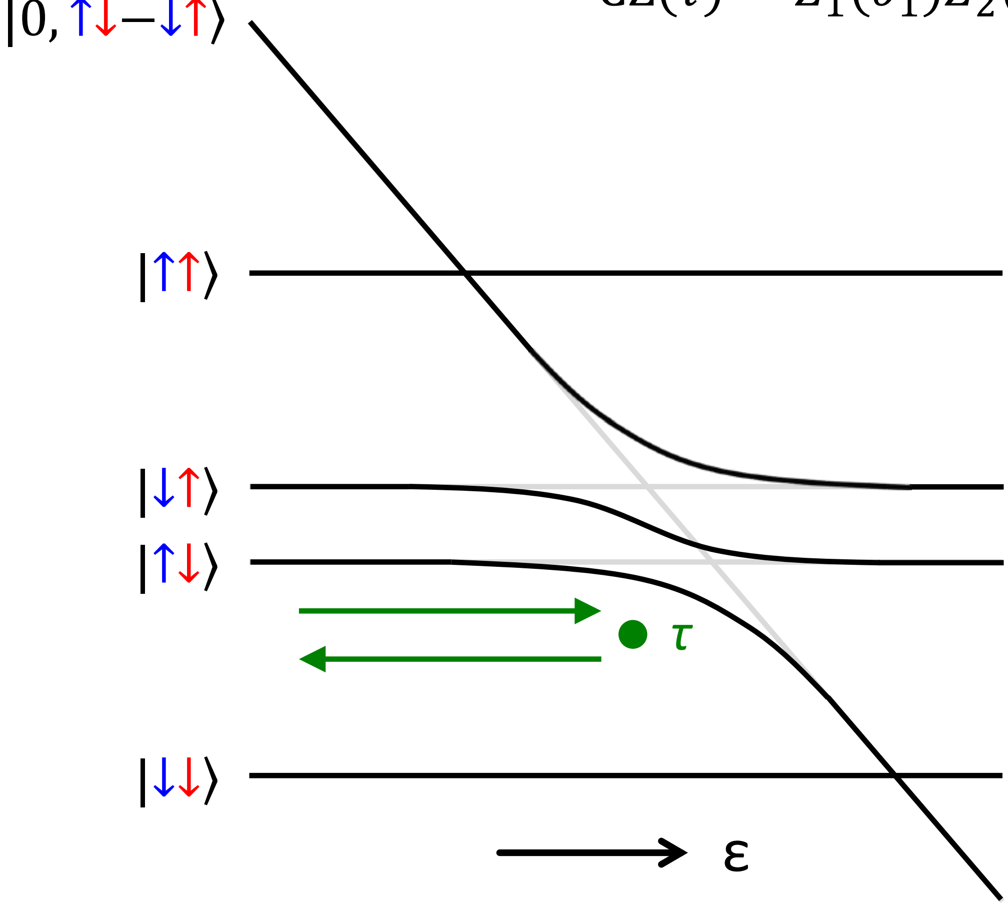


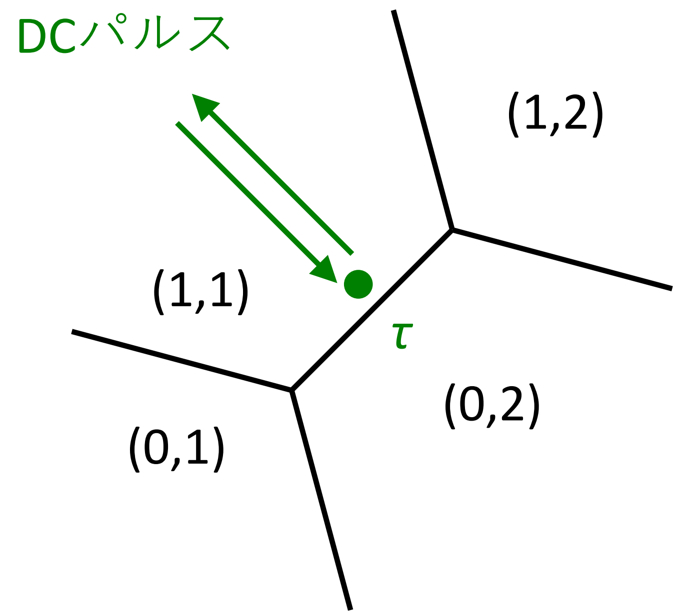
2電子状態



CZゲート

$$\mathrm{CZ}(\tau) = Z_1(\theta_1)Z_2(\theta_2)\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{iJ(\epsilon)\tau/2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{iJ(\epsilon)\tau/2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$





CZゲート

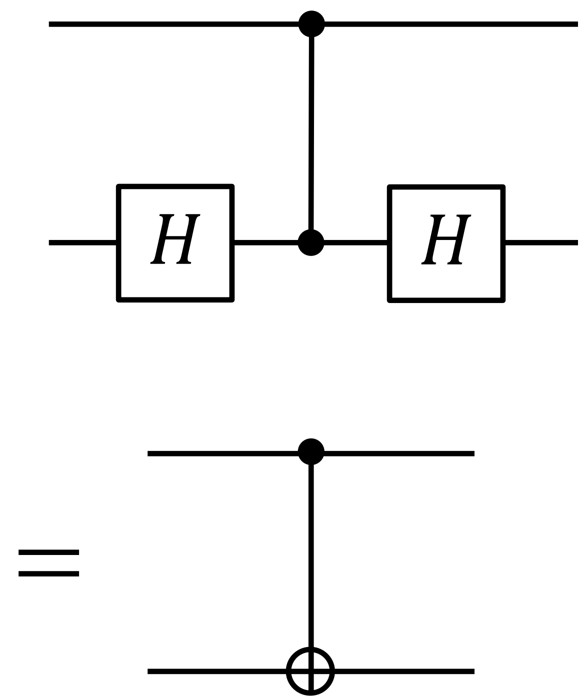
$$\mathrm{CZ}_{00} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\mathrm{CZ}_{01} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\mathrm{CZ}_{10} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\mathrm{CZ}_{11} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

CZ_{11}



$$\mathrm{CNOT} = H_2 \mathrm{CZ}_{11} H_2$$

CZゲート

$$\mathrm{CZ}_{00} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \approx Z_1\left(\frac{\pi}{2}\right) Z_2\left(\frac{\pi}{2}\right) \mathrm{CZ}_J$$

$$\mathrm{CZ}(\tau = 1/J) = Z_1(\theta_1) Z_2(\theta_2) \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\mathrm{CZ}_J} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$Z(\theta) = \begin{pmatrix} e^{-i\theta/2} & 0 \\ 0 & e^{i\theta/2} \end{pmatrix} \longrightarrow Z\left(\frac{\pi}{2}\right) = \begin{pmatrix} e^{-i\pi/4} & 0 \\ 0 & e^{i\pi/4} \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix}$$

$$Z_1\left(\frac{\pi}{2}\right) \otimes Z_2\left(\frac{\pi}{2}\right) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

CZゲート

$$\mathrm{CZ}_{00}=\begin{pmatrix}-1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{pmatrix}\approx Z_1\left(\frac{\pi}{2}\right)Z_2\left(\frac{\pi}{2}\right)\mathrm{CZ}_J$$

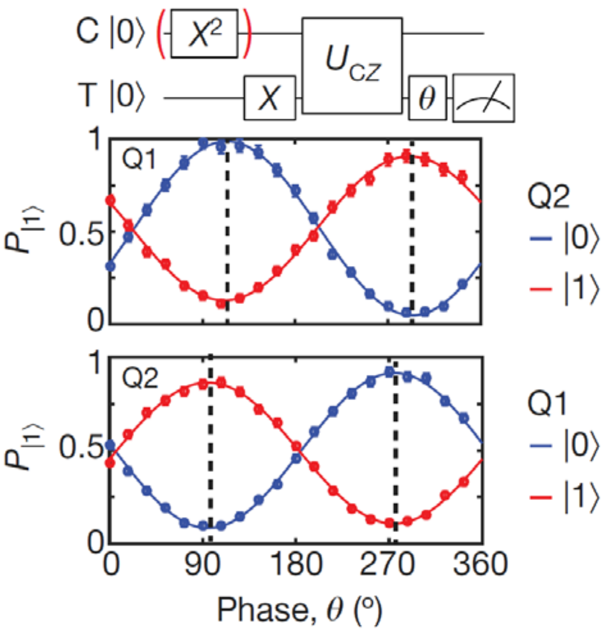
$$Z\left(-\frac{\pi}{2}\right)\approx\begin{pmatrix}i&0\\0&1\end{pmatrix}$$

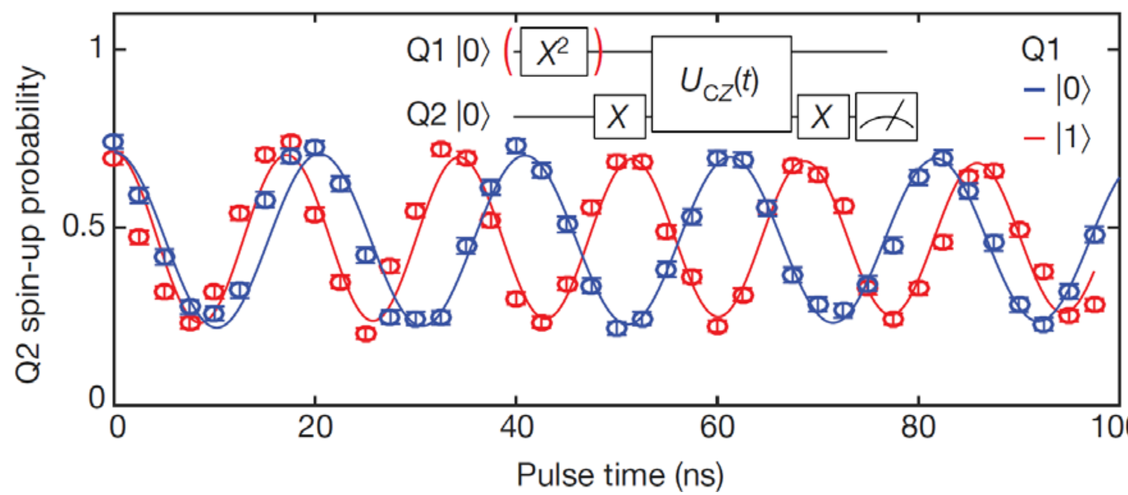
$$\mathrm{CZ}_{01}=\begin{pmatrix}1&0&0&0\\0&-1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{pmatrix}\approx Z_1\left(-\frac{\pi}{2}\right)Z_2\left(\frac{\pi}{2}\right)\mathrm{CZ}_J$$

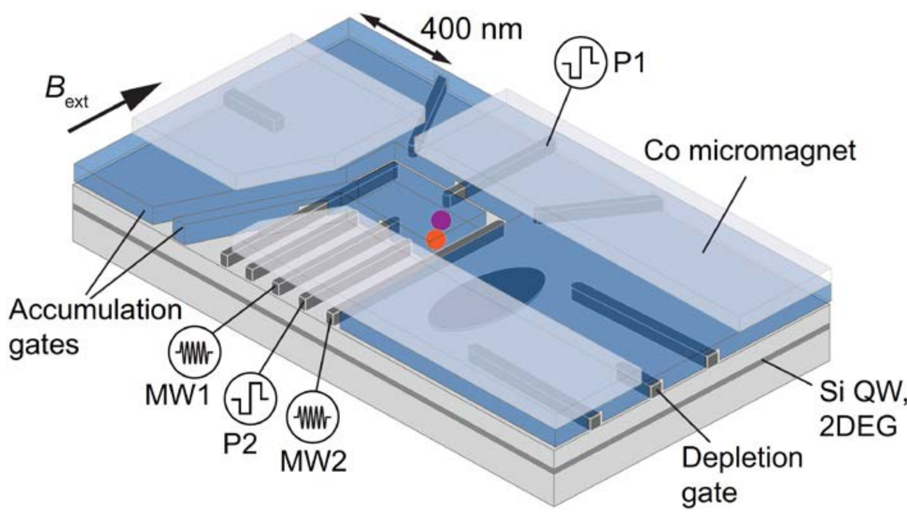
$$\mathrm{CZ}_{10}=\begin{pmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&-1&0\\0&0&0&1\end{pmatrix}\approx Z_1\left(\frac{\pi}{2}\right)Z_2\left(-\frac{\pi}{2}\right)\mathrm{CZ}_J$$

$$\mathrm{CZ}_{11}=\begin{pmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&-1\end{pmatrix}\approx Z_1\left(-\frac{\pi}{2}\right)Z_2\left(-\frac{\pi}{2}\right)\mathrm{CZ}_J$$

2量子ビットプロセッサ

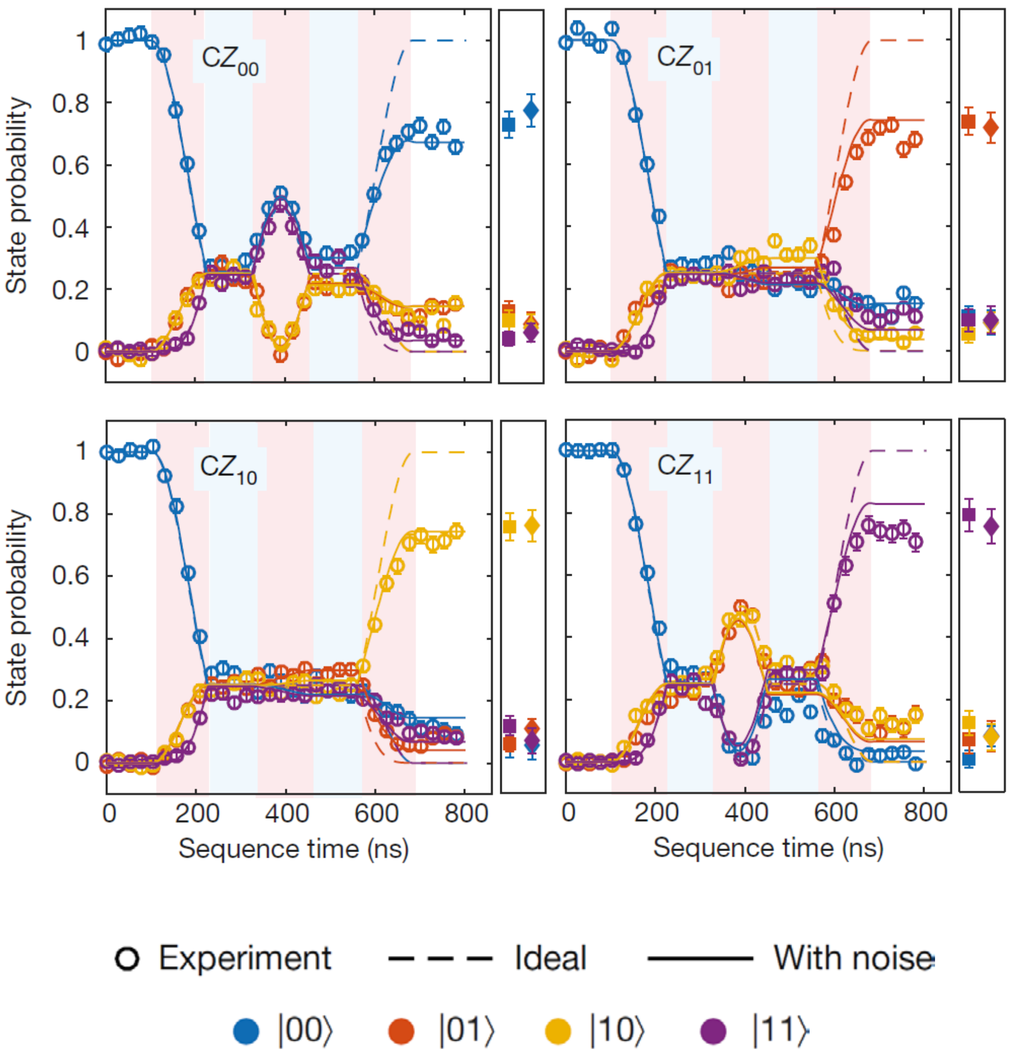


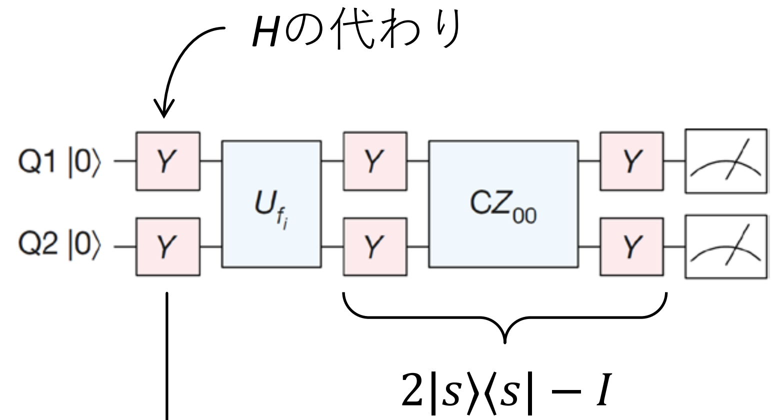




Nature **555**, 633 (2018) Watson *et al.*

グローバーのアルゴリズムの実行





$$|s\rangle = \frac{1}{2}\sum_{i,j=0,1} |ij\rangle$$

Nature **555**, 633 (2018) Watson *et al.*

シリコンスピンの実験の現状

方式	1量子ビット	2量子ビット	多量子ビット化
単一リンドナー	T_{2e}^{CPMG} = 559 ms T_{2n+}^{CPMG} = 35.6 s F_{2n+} = 99.99% (*1)	cf. $F_{zz,\sqrt{S}}$ = 90% (*4) cf. $F^{Bell(e-n)}$ = 97% (*5)	“フリップフロップ” 量子ビット(*8)
MOS量子ドット	T_2^{CPMG} = 28 ms F^{RB} = 99.6% (*2)	F^{Bell} = 89% F^{RB} = 98% (*6)	CMOS/DRAM技術 との融合, 高温動作 (*9,10)
Si/SiGe量子ドット	T_2^{CPMG} = 3.1 ms F^{RB} > 99.9% (*3)	F^{Bell} = 89% (*7)	スピン–MW光子結合 による回路QED(*11,12)

*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.*

レポート課題 3 (10点)

CZ_{00}の例にならって、以下を示せ。

$$\mathrm{CZ}_{01}=\begin{pmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & -1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{pmatrix}\approx Z_1\left(-\frac{\pi}{2}\right)Z_2\left(\frac{\pi}{2}\right)\mathrm{CZ}_J$$

$$\mathrm{CZ}_{10}=\begin{pmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & -1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{pmatrix}\approx Z_1\left(\frac{\pi}{2}\right)Z_2\left(-\frac{\pi}{2}\right)\mathrm{CZ}_J$$

$$\mathrm{CZ}_{11}=\begin{pmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & -1\end{pmatrix}\approx Z_1\left(-\frac{\pi}{2}\right)Z_2\left(-\frac{\pi}{2}\right)\mathrm{CZ}_J$$