

ゲート制御型量子ドットを用いた 量子情報処理

阿部 英介

慶應義塾大学 スピントロニクス研究センター

応用物理情報特別講義A

2017年度春学期後半 金曜4限@14-202

量子情報に関する参考書

- M. A. Nielsen & I. L. Chuang (2000)
 - **“Quantum Computation and Quantum Information”** (邦訳あり)
- **量子コンピュータ授業**
 - <https://www.youtube.com/playlist?list=PLB1324F2305C028F7>
 - http://www.appi.keio.ac.jp/Itoh_group/abe/
- 阿部英介, 伊藤公平
 - **“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”**
応用物理 **86**, (6) 453 (2017)

ディビンチェンゾの要請

- **量子計算の要素技術**

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

- **量子通信の要素技術**

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

ディビンチェンゾの要請

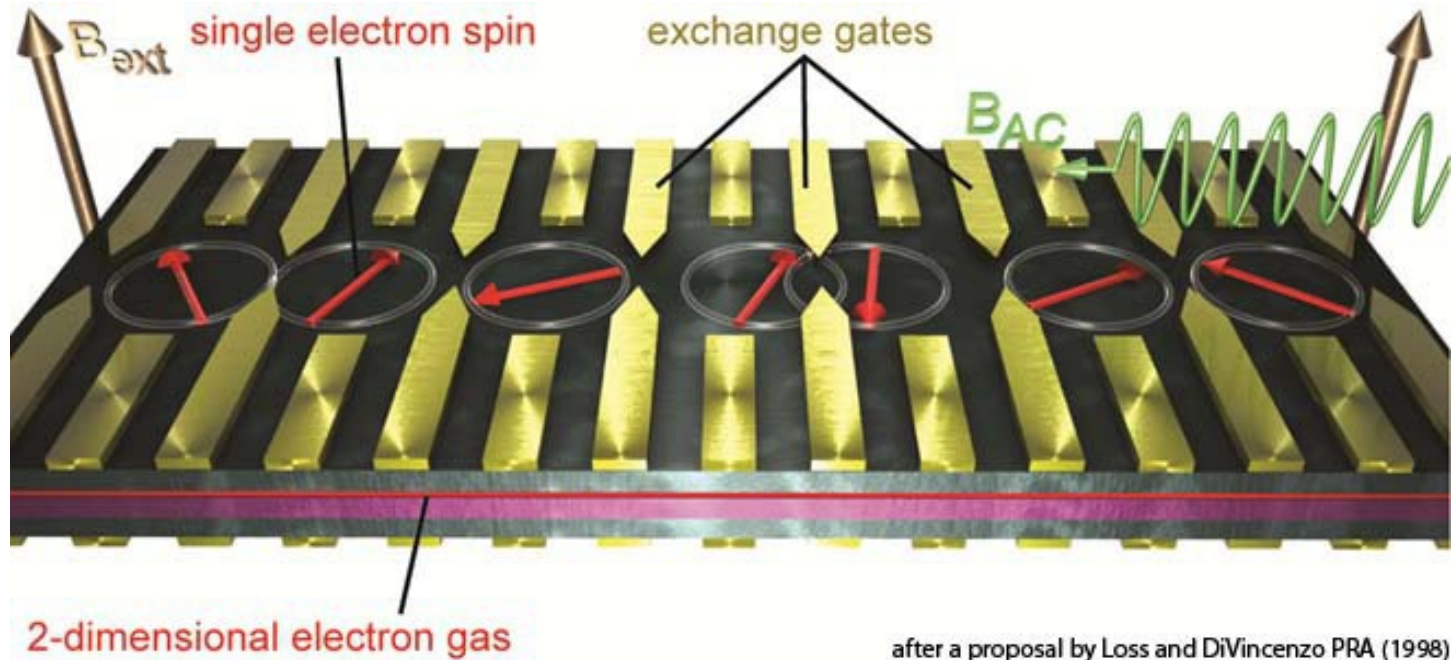
- **量子計算の要素技術**

1. 単一スピン列・格子
2. スピンの向きを揃える
3. スピン回転とスピン間相互作用
4. スピン歳差の持続(T_2)
5. スピンの向きの測定

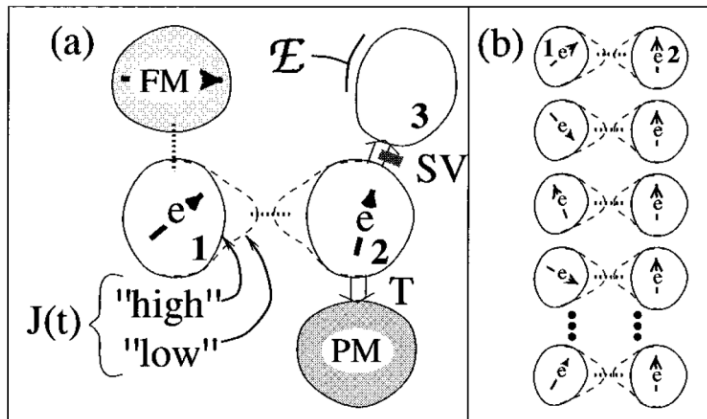
- **量子通信の要素技術**

6. スピン-光子量子もつれ
7. スピン-スピン量子もつれ

量子ドット量子コンピュータ



after a proposal by Loss and DiVincenzo PRA (1998)



© Lars Schreiber (<http://www.quantuminfo.physik.rwth-aachen.de/cms/Quantuminfo/Forschung/Institut-fuer-Quantentechnologie/~eyea/Bluhm-SiGe/?lidz=1>)

Phys. Rev. A **57**, 120 (1998) Loss & DiVincenzo

講義内容

- **単一量子ドットの伝導とスピン**
 - クーロンダイヤモンド
 - 単一スピン単発読み出し
- **直列二重量子ドットの伝導とスピン**
 - スタビリティダイヤグラム
 - 二電子スピン状態の制御

参考書

- W. G. van der Wiel *et al.*
 - **“Electron transport through double quantum dots”**
Rev. Mod. Phys. **75**, 1 (2003)
- R. Hanson *et al.*
 - **“Spins in few-electron quantum dots”**
Rev. Mod. Phys. **79**, 1217 (2007)
- F. Zwanenburg *et al.*
 - **“Silicon quantum electronics”**
Rev. Mod. Phys. **85**, 961 (2013)

講義内容

- **単一量子ドットの伝導とスピン**
 - クーロンダイヤモンド
 - 単一スピン単発読み出し
- 直列二重量子ドットの伝導とスピン
 - スタビリティダイヤグラム
 - 二電子スピン状態の制御

金属超微粒子の理論

JOURNAL OF THE PHYSICAL SOCIETY OF JAPAN, Vol. 17, No. 6, JUNE, 1962

Electronic Properties of Metallic Fine Particles. I.

Ryogo KUBO

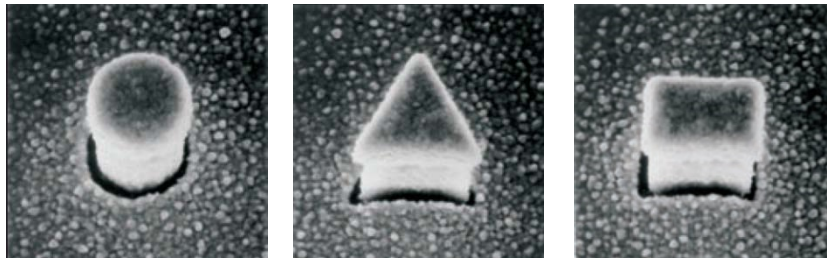
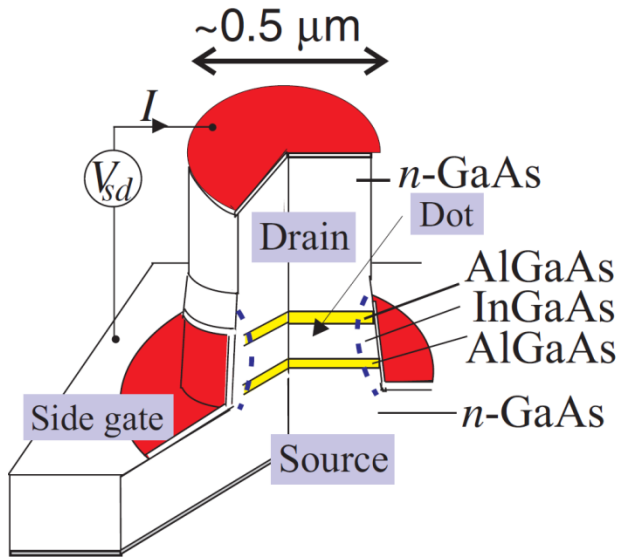
Department of Physics University of Tokyo, Tokyo

(Received February 28, 1962)

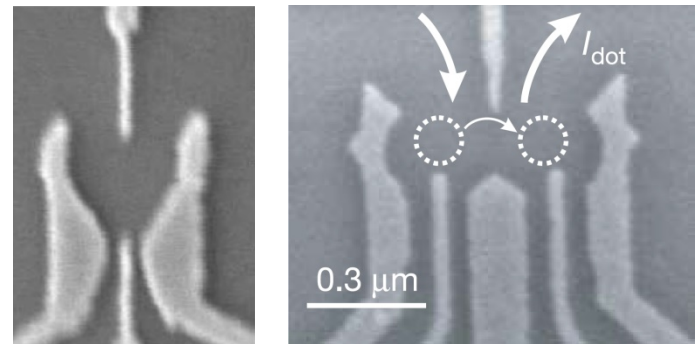
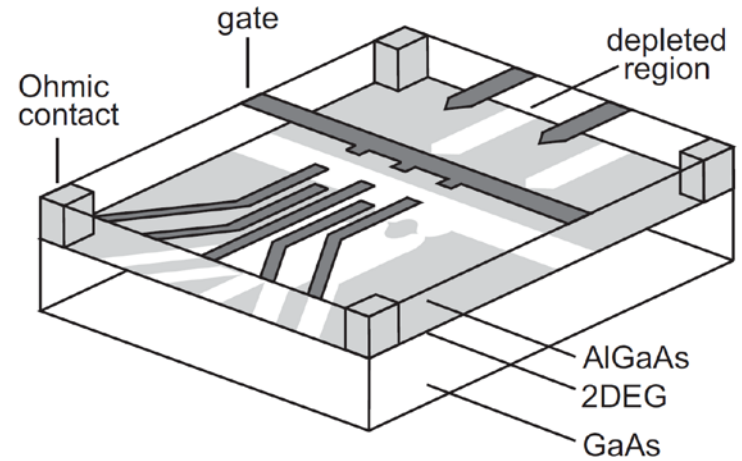
The level spacing of quantized electronic states becomes fairly large in very fine particles. For instance, it will be comparable to kT at $T=1^\circ\text{K}$ if the linear dimension of a particle is 50 \AA or so. Thermal properties may show considerable deviations from the normal bulk values for such fine particles. The heat capacity will be reduced to about two-thirds and the paramagnetic susceptibility may be enhanced. Even more important effects are expected for relaxation processes. They are discussed briefly, but more detailed treatments will be given in a forthcoming paper.

半導体量子ドット

縦型(vertical)



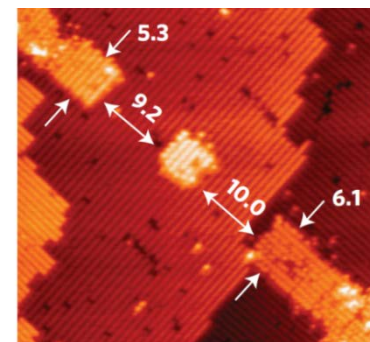
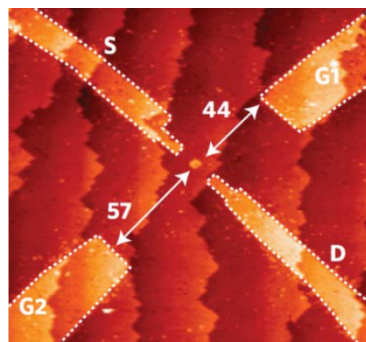
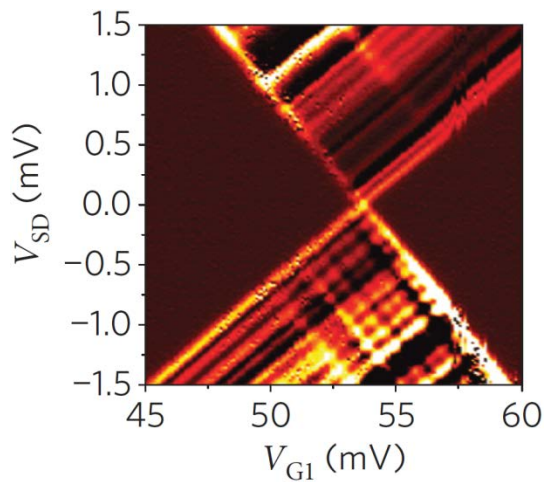
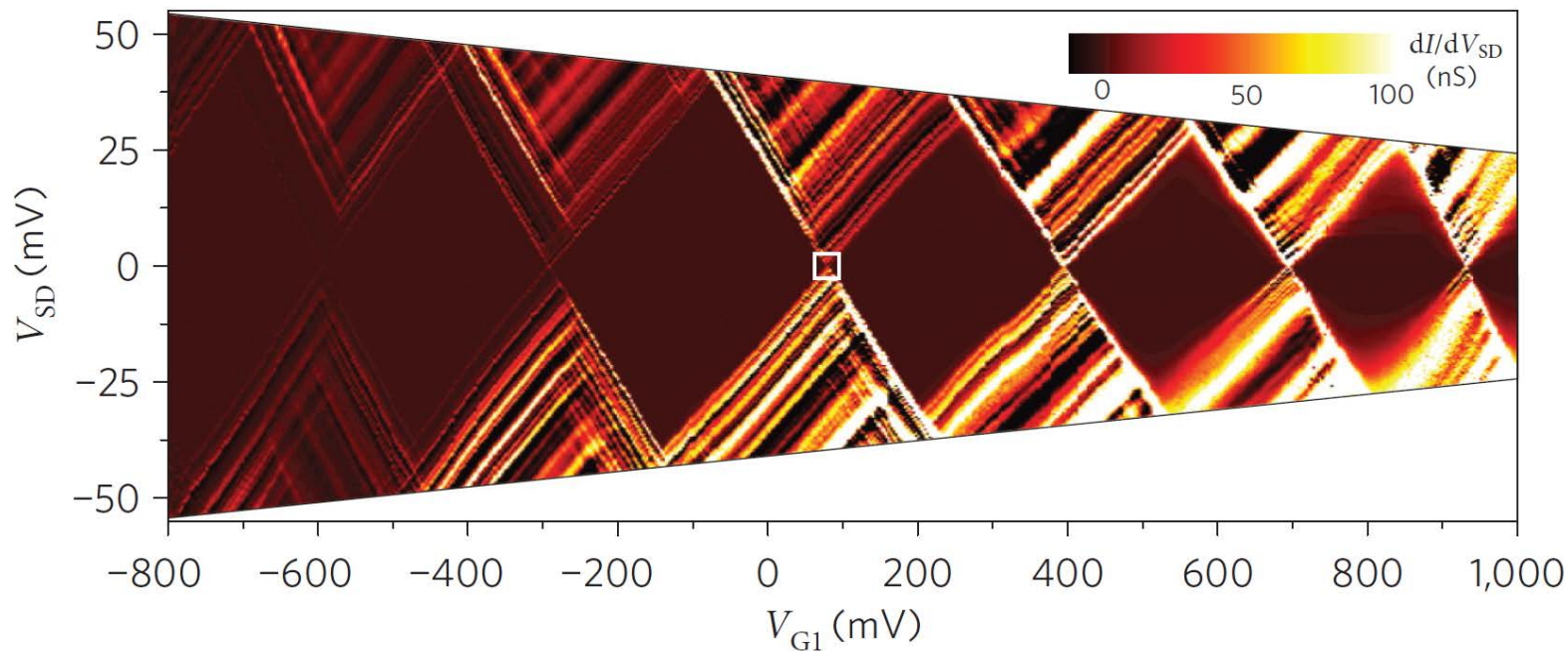
横型(lateral)



Rep. Prog. Phys. **64**, 701 (2001) Kouwenhoven *et al.*

Rev. Mod. Phys. **79**, 1217 (2007) Hanson *et al.*
 Phys. Rev. B **61**, 16315 (2000) Ciorga *et al.*

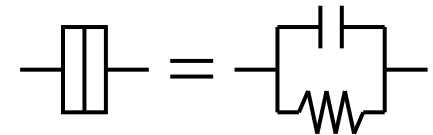
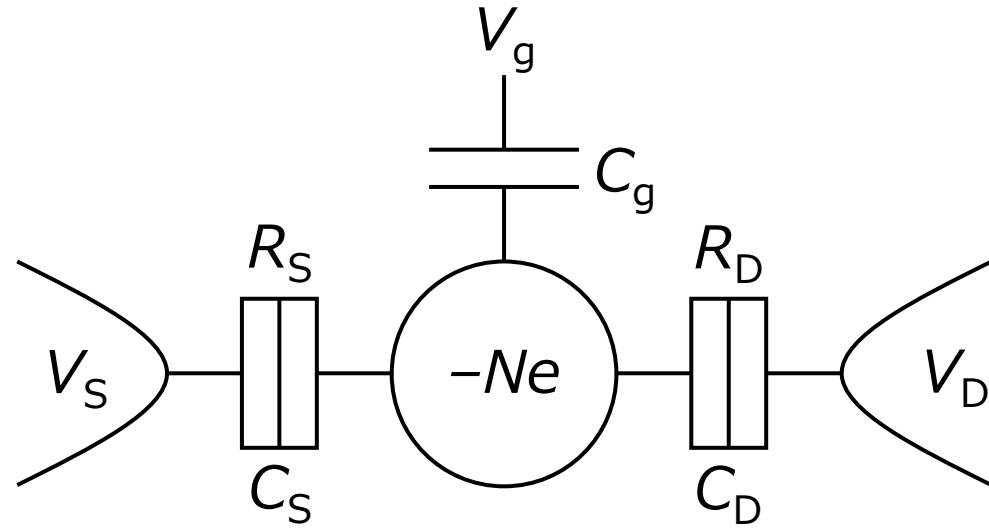
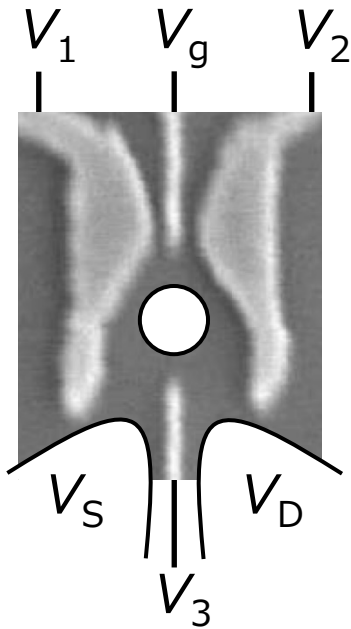
単一QDのクーロンダイヤモンド



Nature Nano. **5**, 502 (2010) Fuechsle *et al.*

定相互作用モデル

(Constant interaction)



- QDをキャパシタ回路でモデル化
- QD内には N 個の電子
- $V_{1,2,3}$ 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(プランジヤージェート)

定相互作用モデル

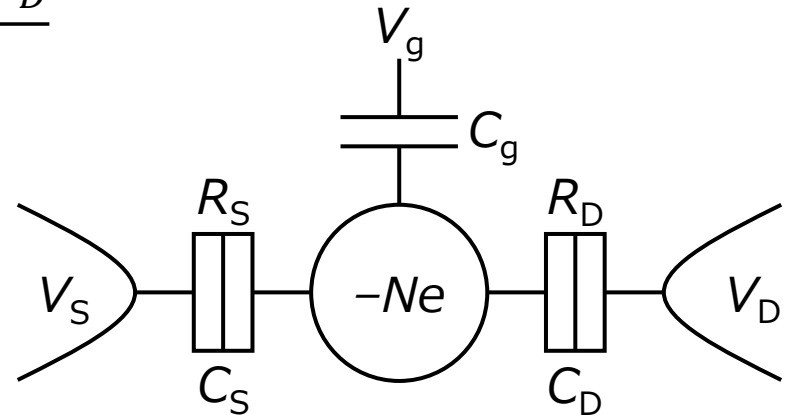
QDの電荷 Q と電圧 V

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

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

$$C_\Sigma = C_S + C_g + C_D$$

N_0 : 背景正電荷の補償分



全エネルギー

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

定相互作用モデル

電気化学ポテンシャル

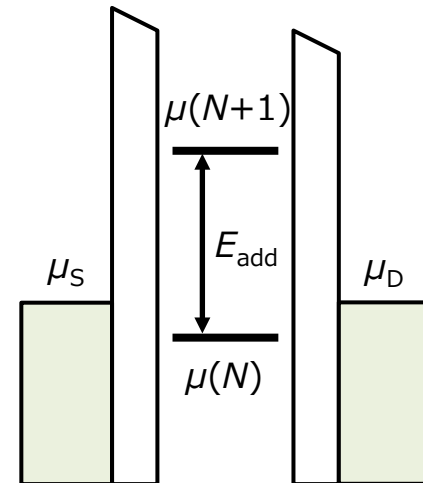
$$\mu(N) \equiv U(N) - U(N - 1)$$

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

付加(addition)エネルギー

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

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

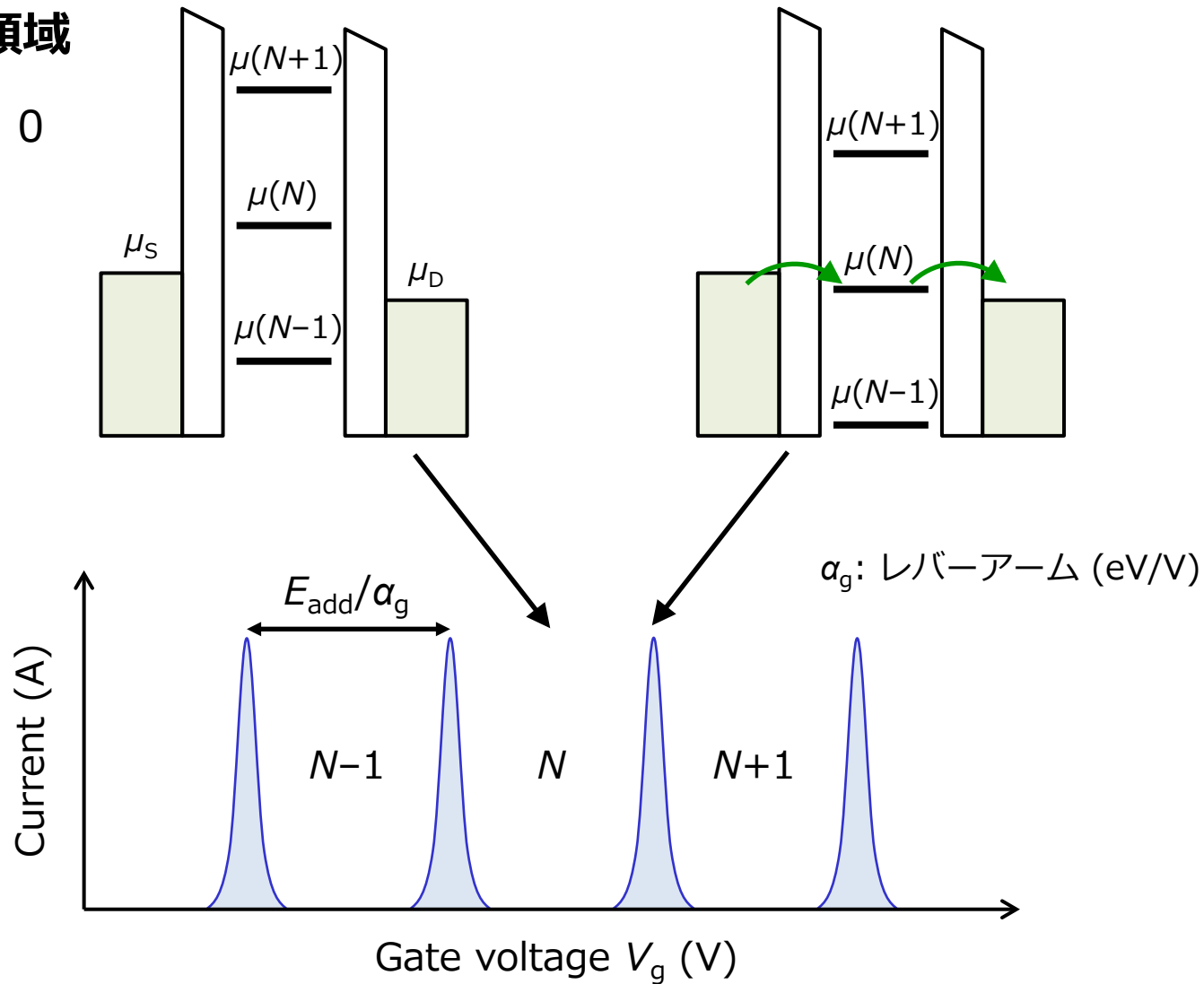


QD準位、ソース、ドレインの μ の相対位置で伝導を理解する

クーロン振動

低バイアス領域

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



励起状態

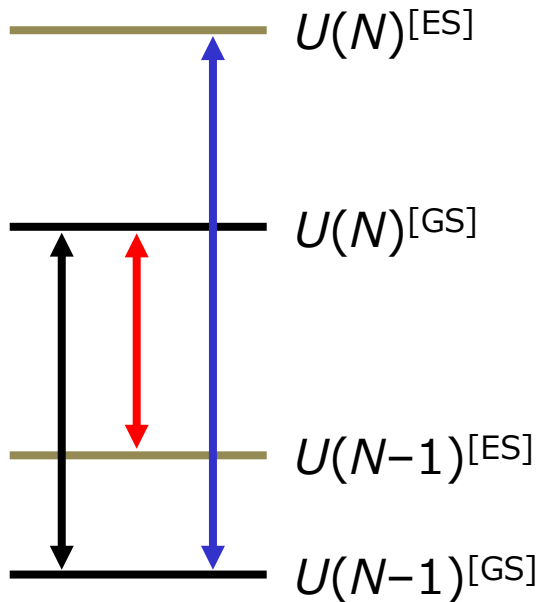
電子数 N に対して許される状態(軌道・スピン)は1つとは限らない

エネルギー

$$U(N)^{[i]} = \frac{e^2}{2C_{\Sigma}} N^2 + E_N^{[i]} + \dots$$

電気化学ポテンシャル

$$\mu(N)^{[i \rightarrow j]} = U(N)^{[j]} - U(N-1)^{[i]}$$



— $\mu(N)^{[GS \rightarrow ES]}$

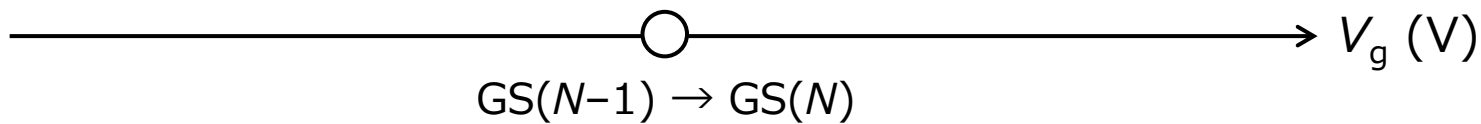
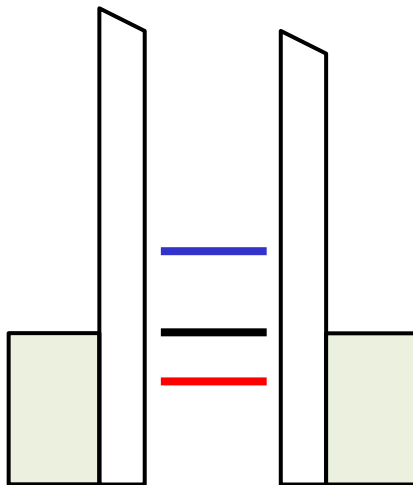
— $\mu(N)^{[GS \rightarrow GS]}$

— $\mu(N)^{[ES \rightarrow GS]}$

クーロンダイヤモンド

低バイアス領域

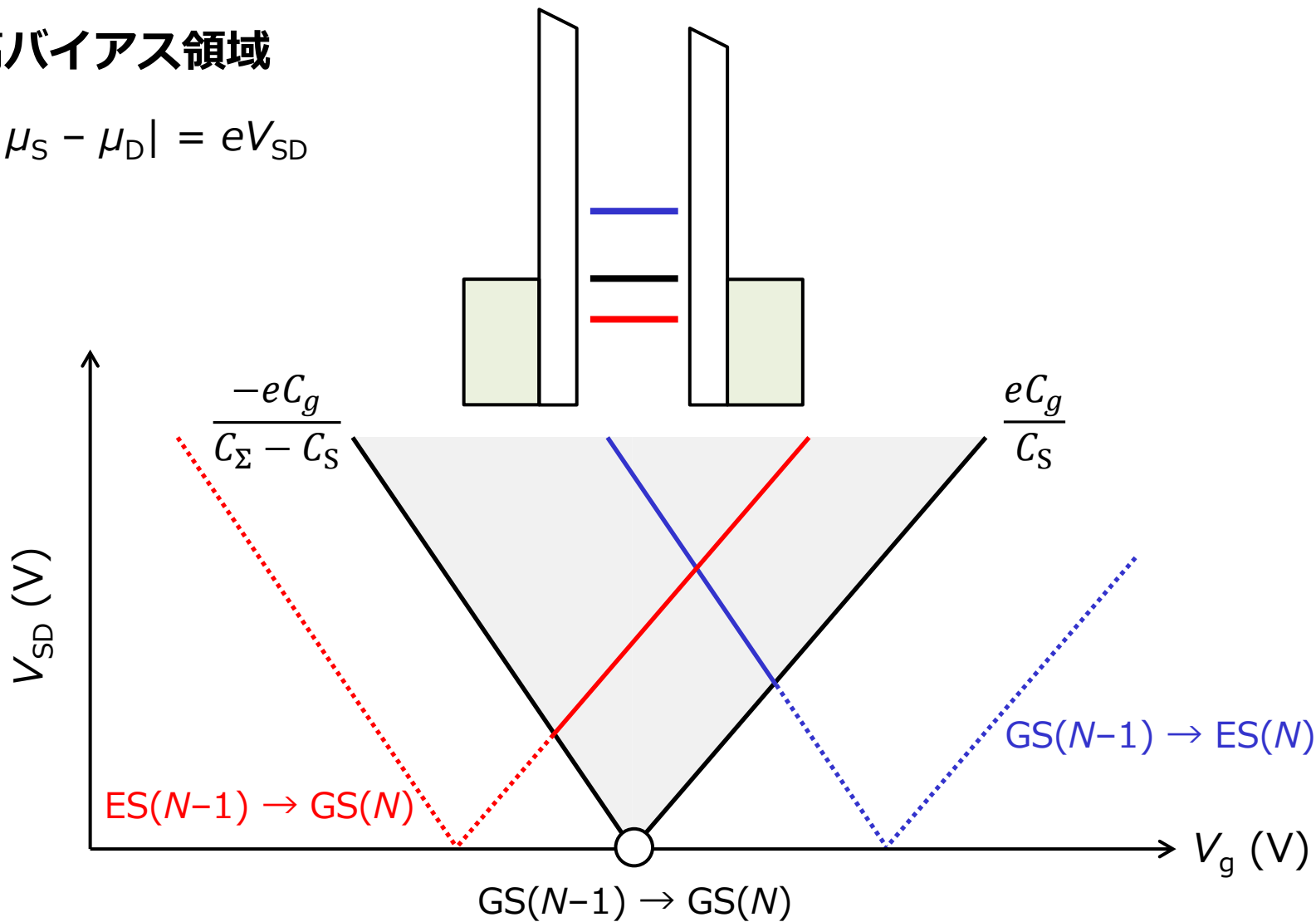
$$|\mu_S - \mu_D| \approx 0$$



クーロンダイヤモンド

高バイアス領域

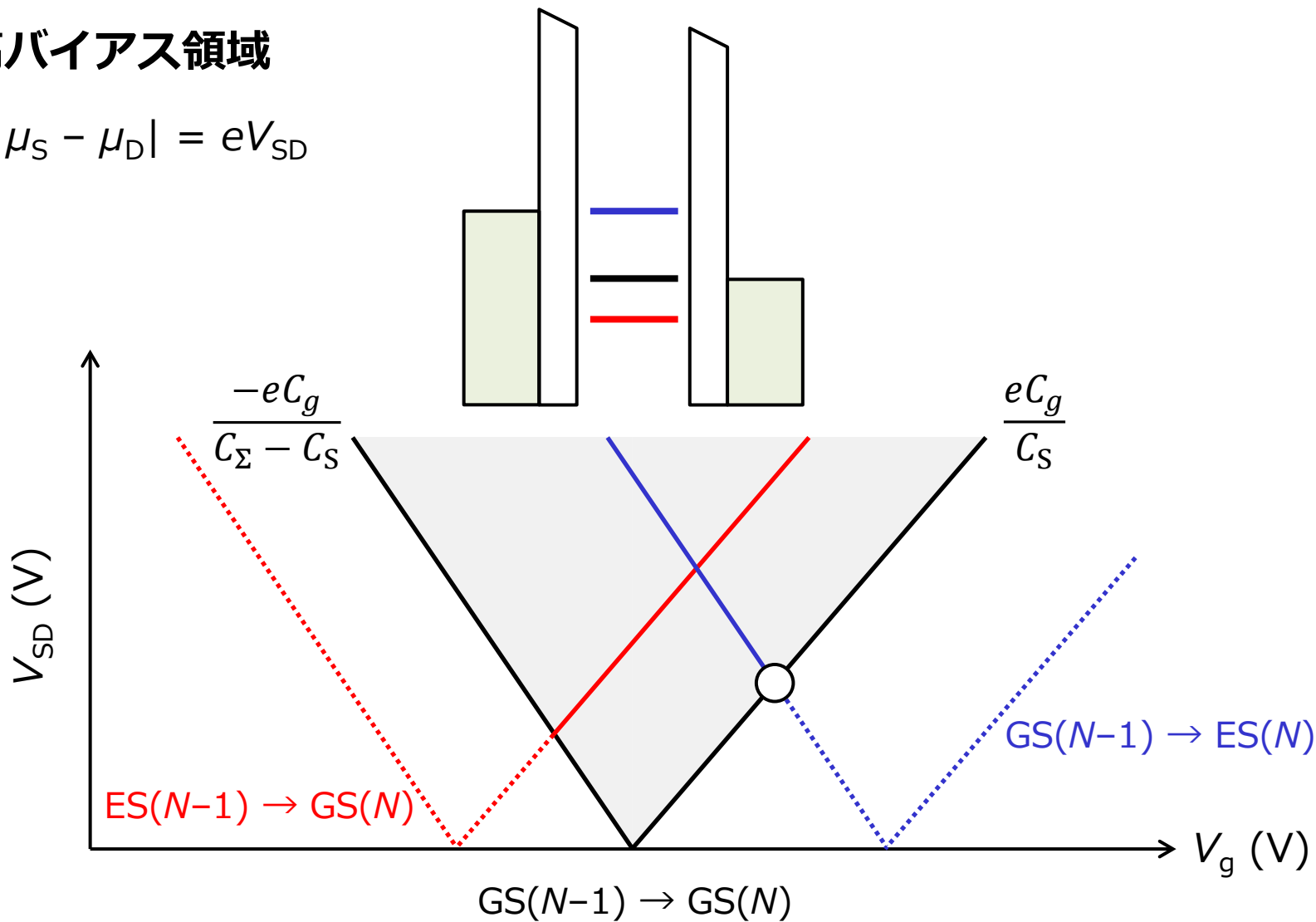
$$|\mu_S - \mu_D| = eV_{SD}$$



クーロンダイヤモンド

高バイアス領域

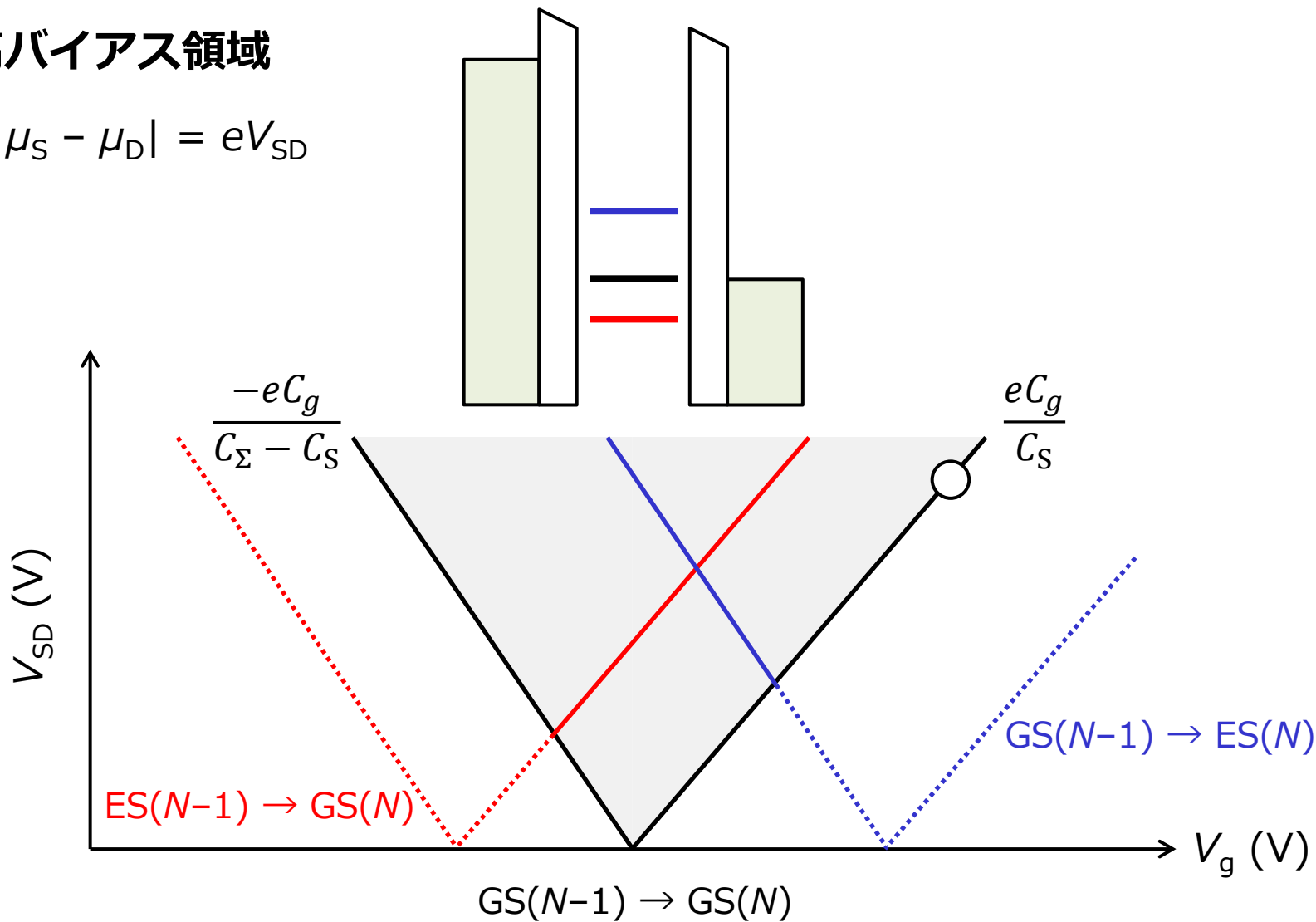
$$|\mu_S - \mu_D| = eV_{SD}$$



クーロンダイヤモンド

高バイアス領域

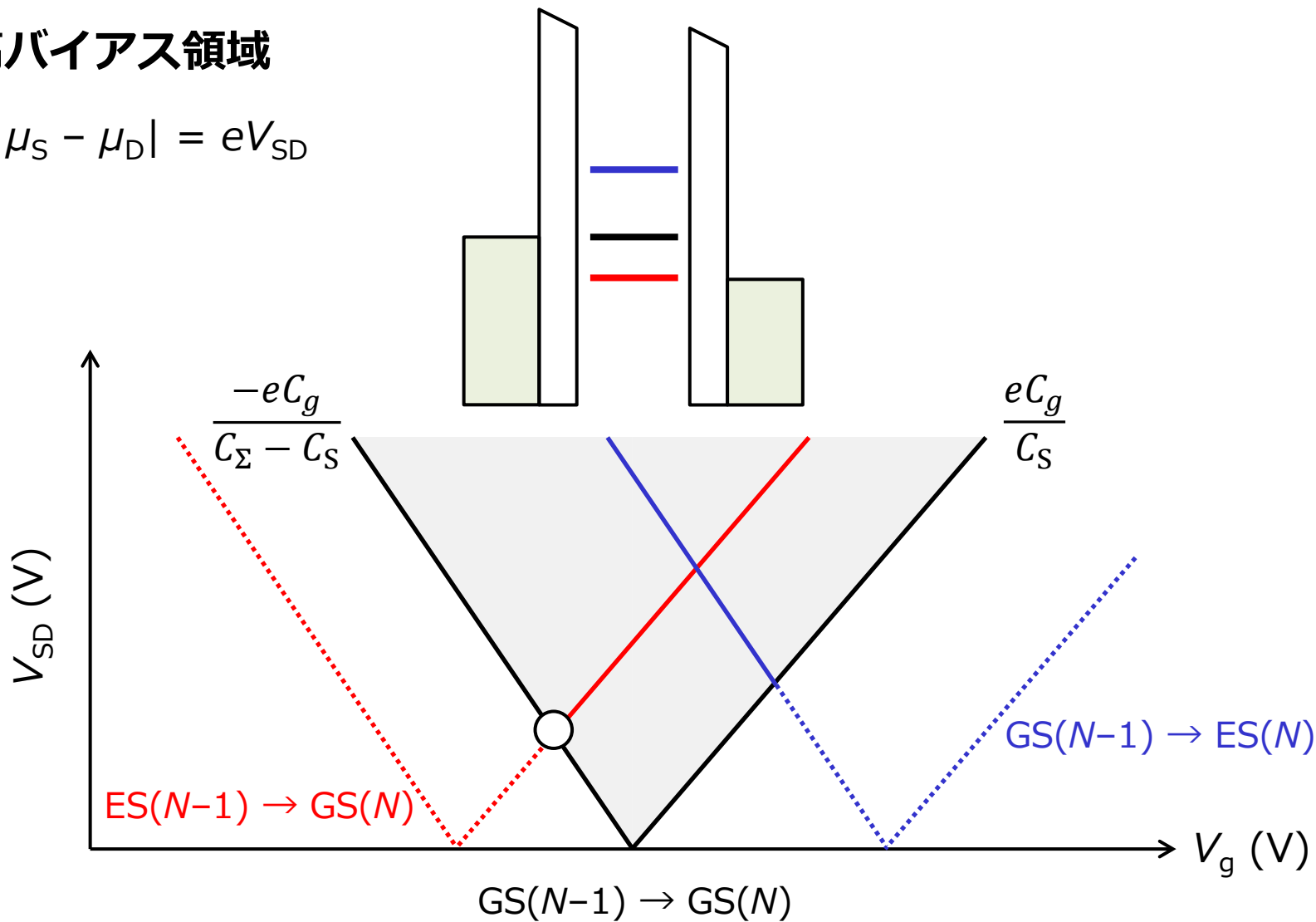
$$|\mu_S - \mu_D| = eV_{SD}$$



クーロンダイヤモンド

高バイアス領域

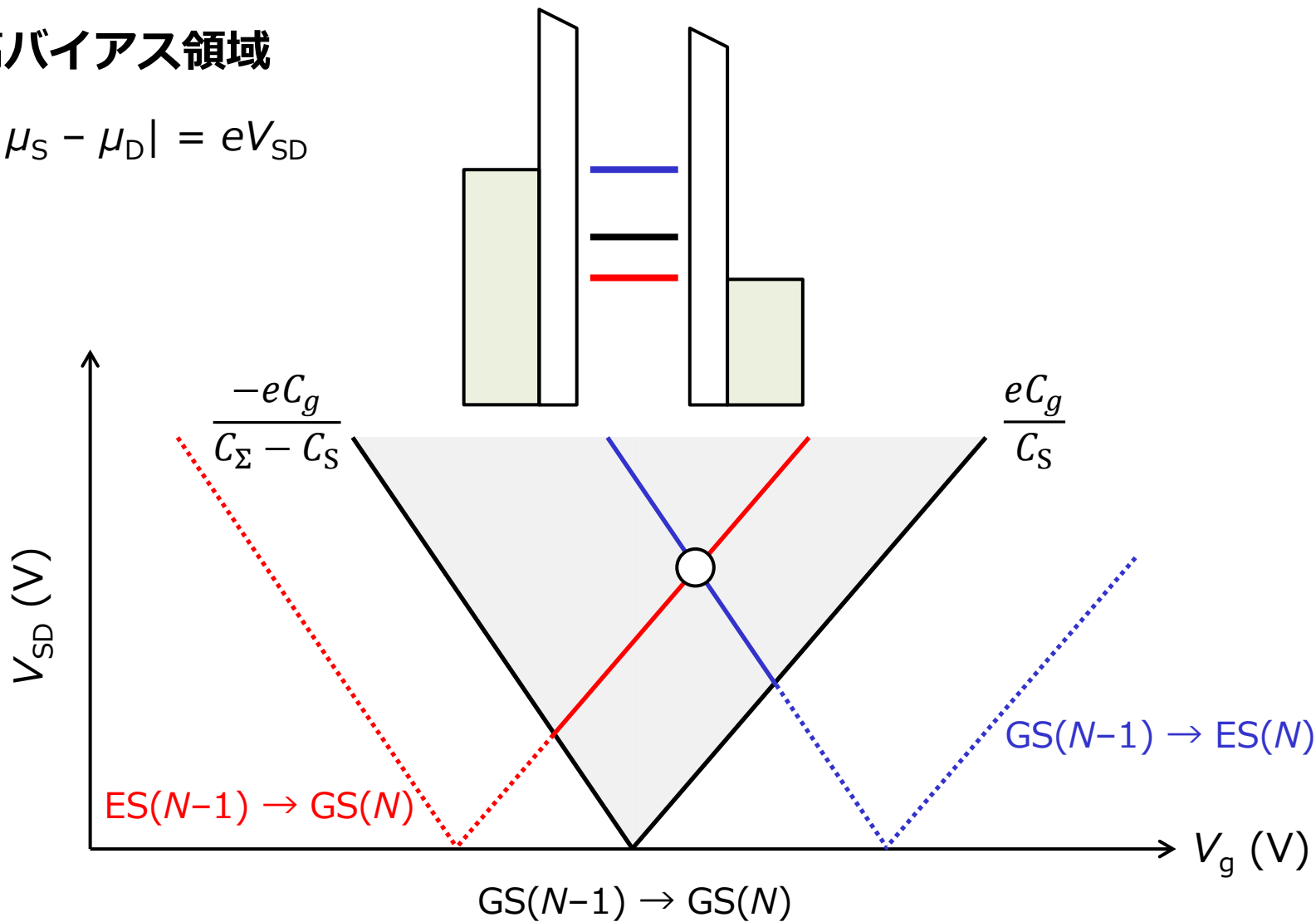
$$|\mu_S - \mu_D| = eV_{SD}$$



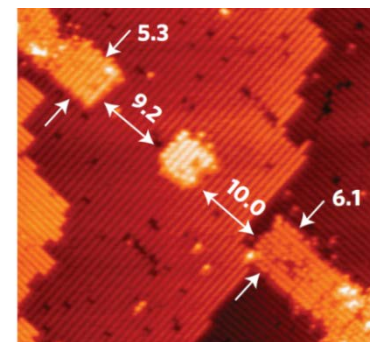
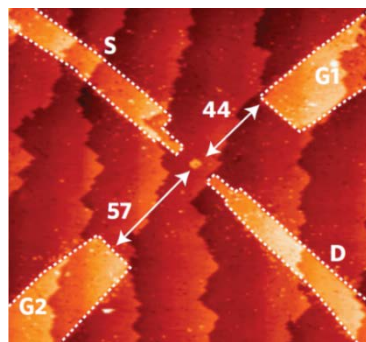
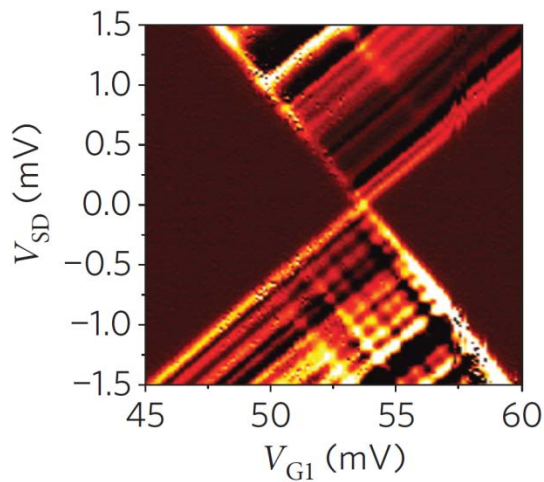
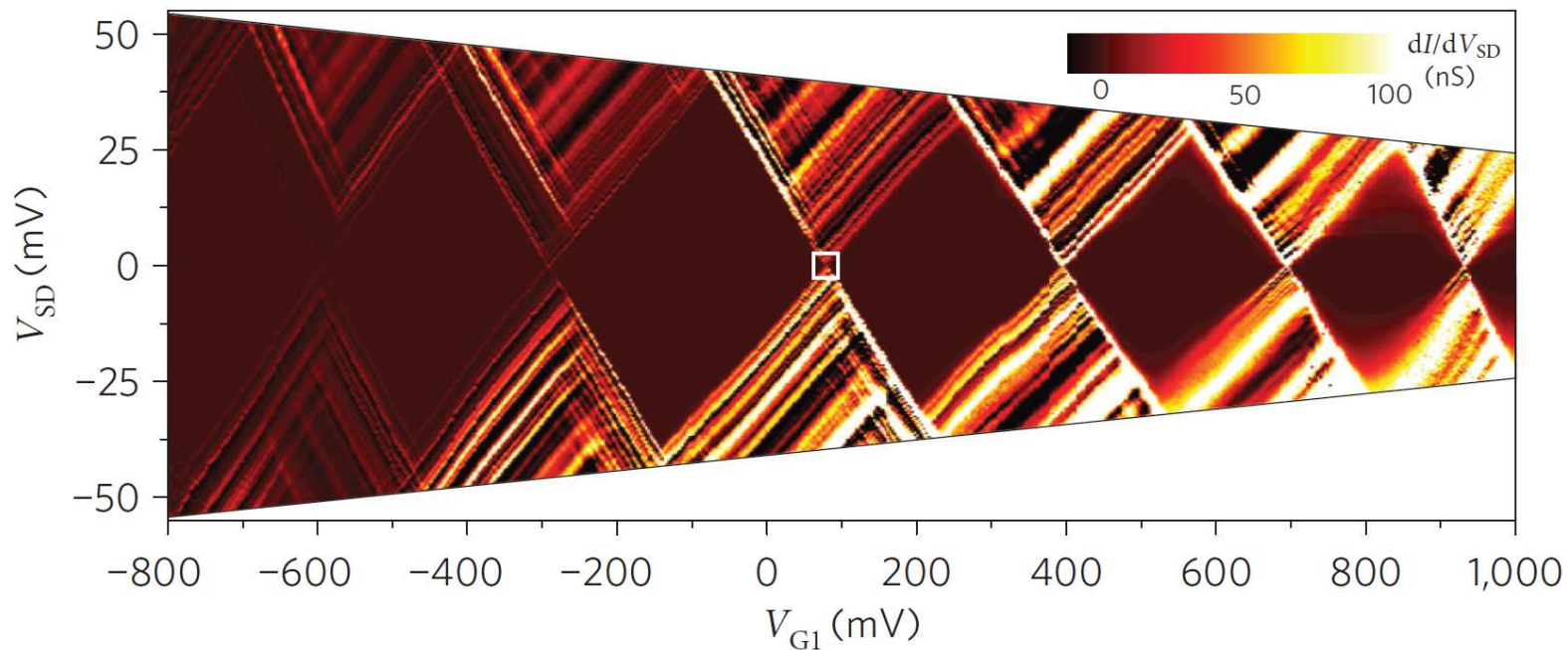
クーロンダイヤモンド

高バイアス領域

$$|\mu_S - \mu_D| = eV_{SD}$$



クーロンダイヤモンド

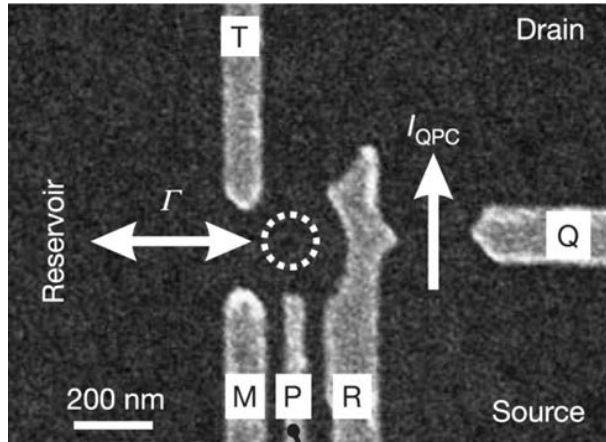


Nature Nano. **5**, 502 (2010) Fuechsle *et al.*

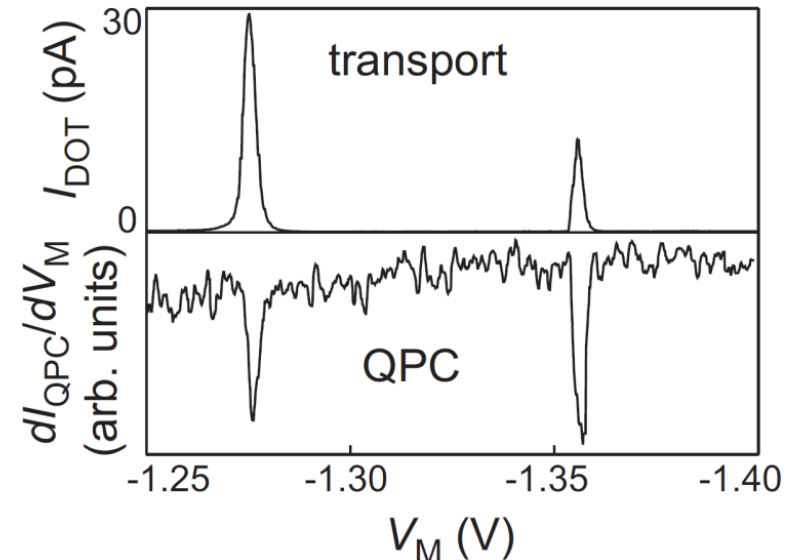
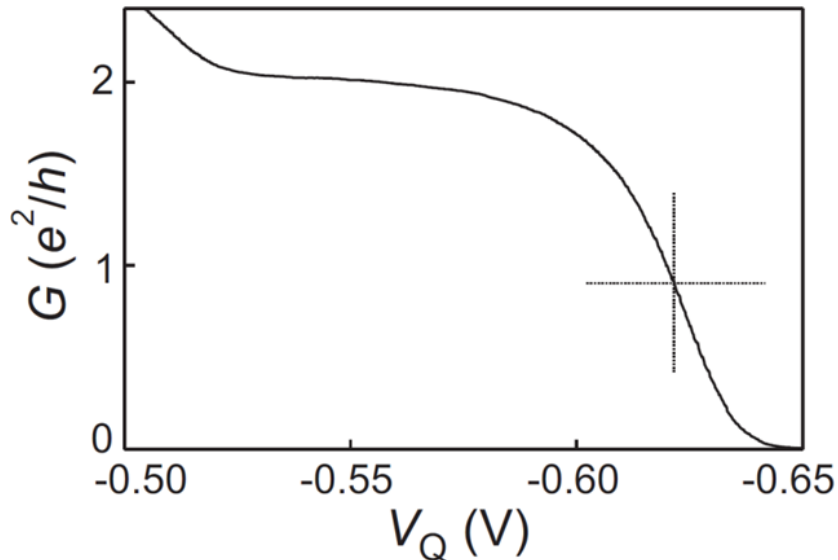
講義内容

- **単一量子ドットの伝導とスピン**
 - クーロンダイヤモンド
 - **単一スピン単発読み出し**
- 直列二重量子ドットの伝導とスピン
 - スタビリティダイヤグラム
 - 二電子スピン状態の制御

QPC電荷計

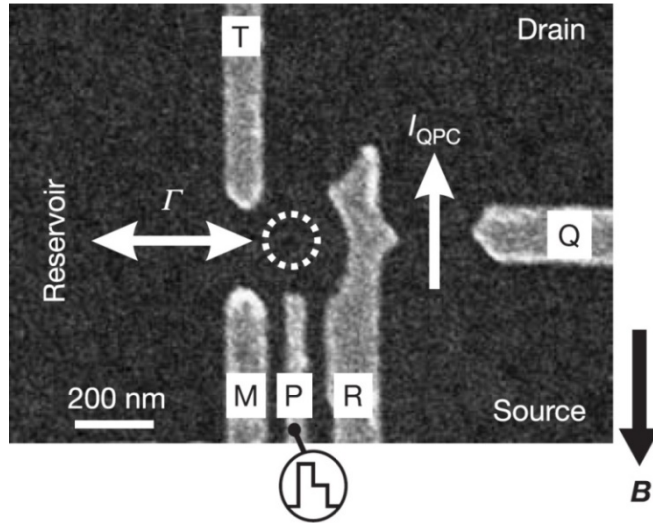


- QPCの伝導が、(静電結合した)近傍のQDに状態変化に応じて変化することを利用
- 非破壊、実時間観測
- QDの伝導測定が困難な領域でも感度を有する



単一スピンの単発読み出し

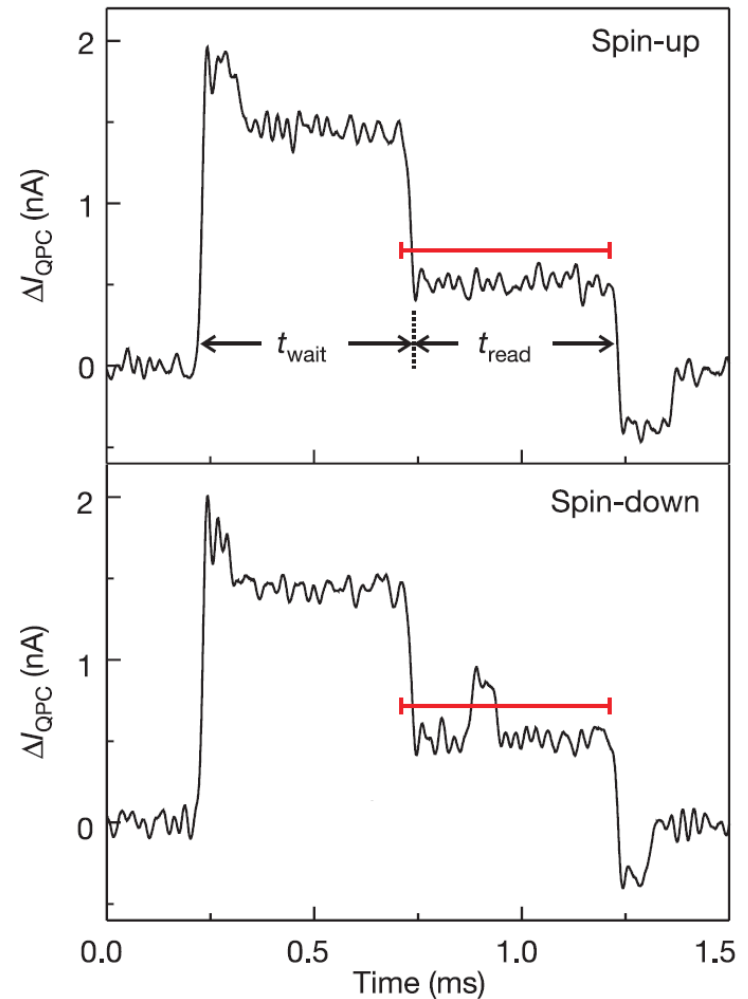
(Single-shot readout)



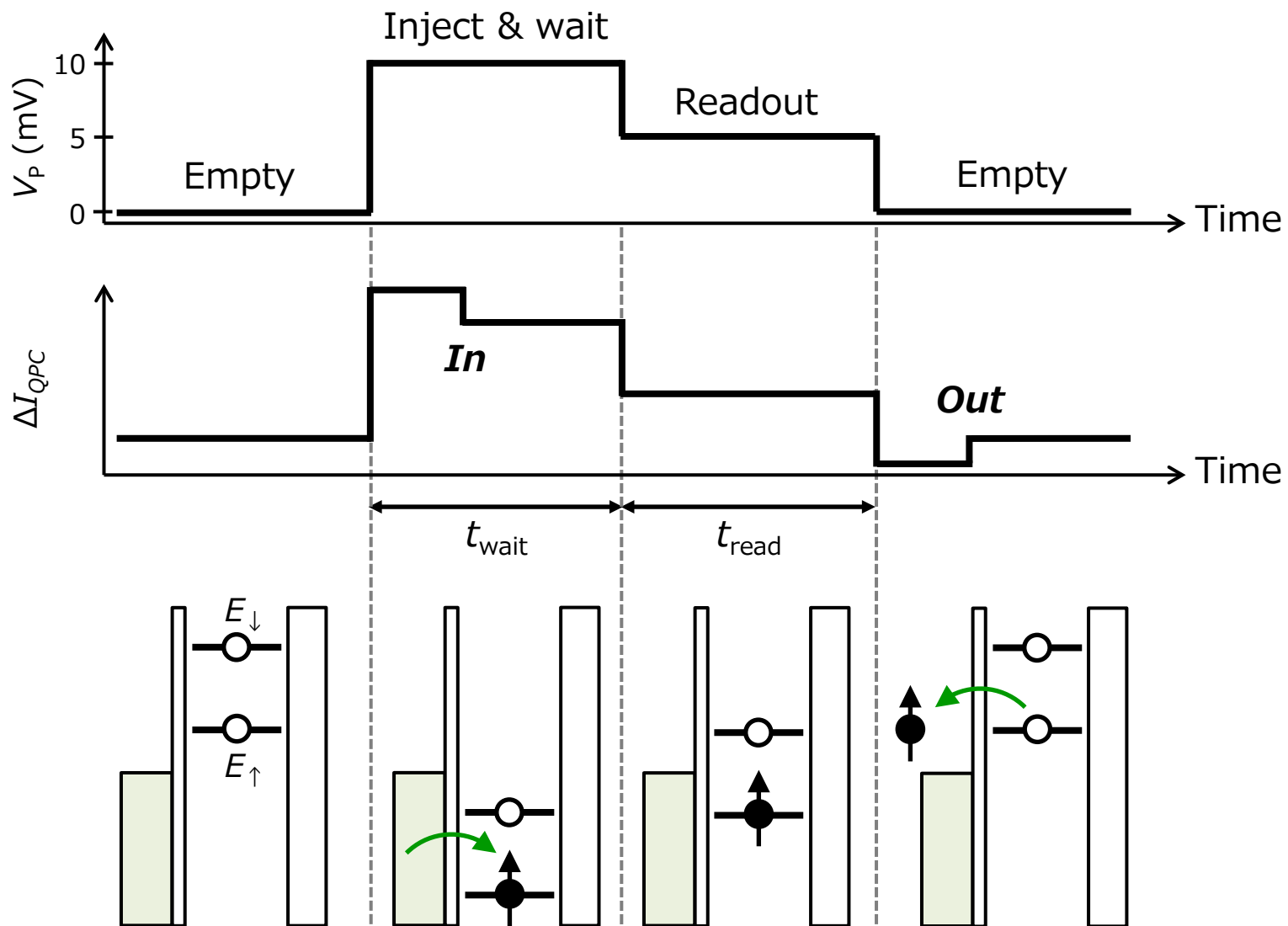
$$E_Z \approx 200 \mu\text{eV} @ B = 10 \text{ T}$$
$$k_B T_e \approx 25 \mu\text{eV} @ T_e = 300 \text{ mK}$$
$$\Delta E_{\text{orb}} \approx 1 \text{ meV}$$

スピン-電荷変換

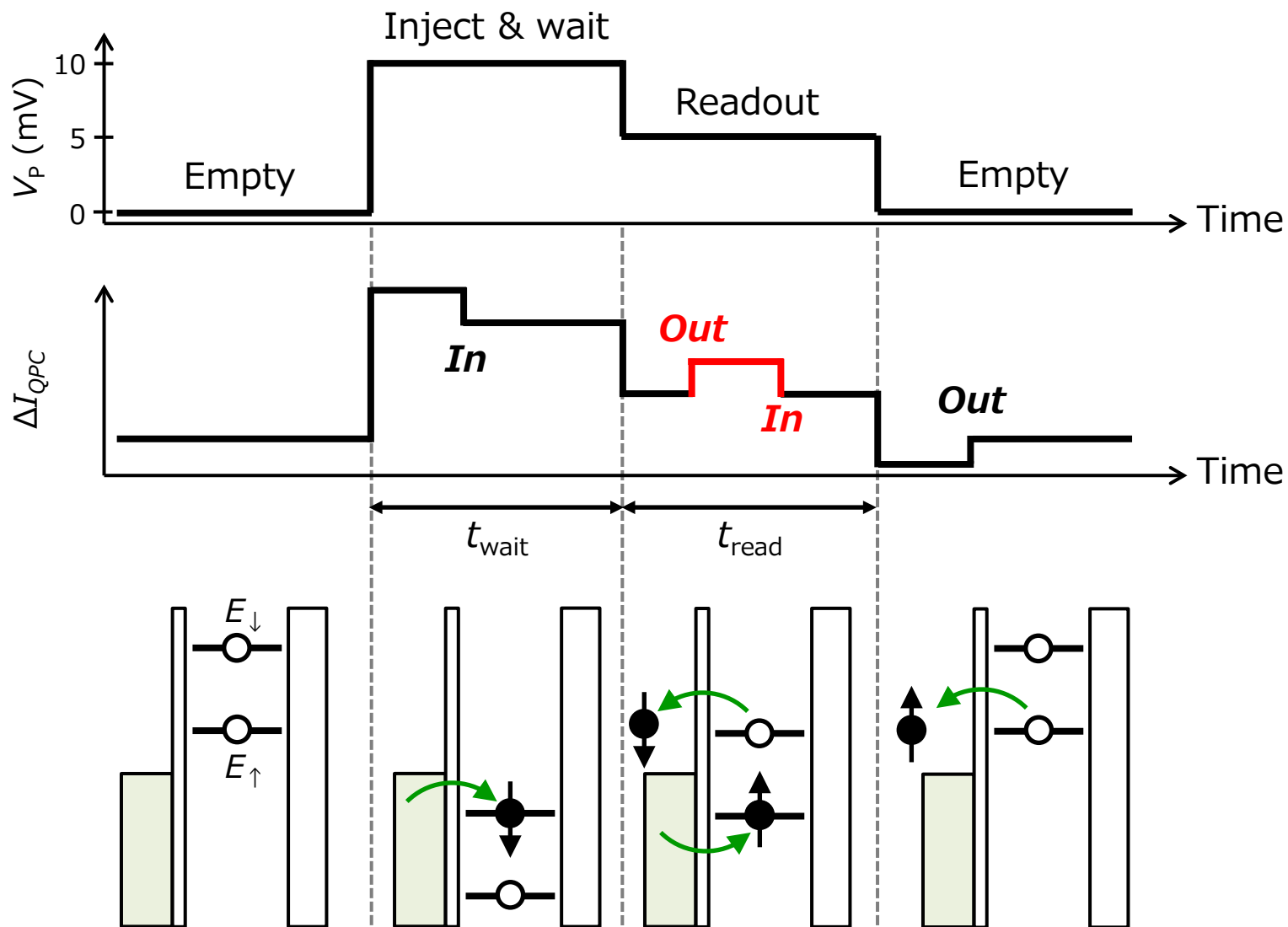
磁気モーメントそのものではなくスピ
ンに依存した量(エネルギー、トンネルレ
ート etc)を電流/電荷の変化として読み出す



実験プロトコル(スピン↑)

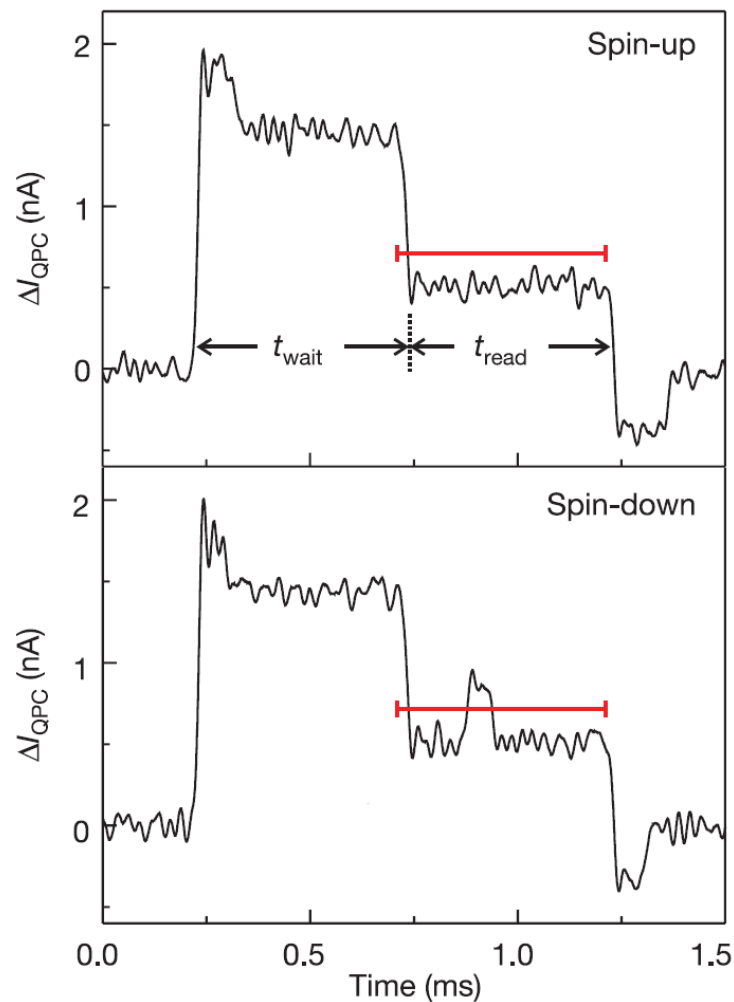
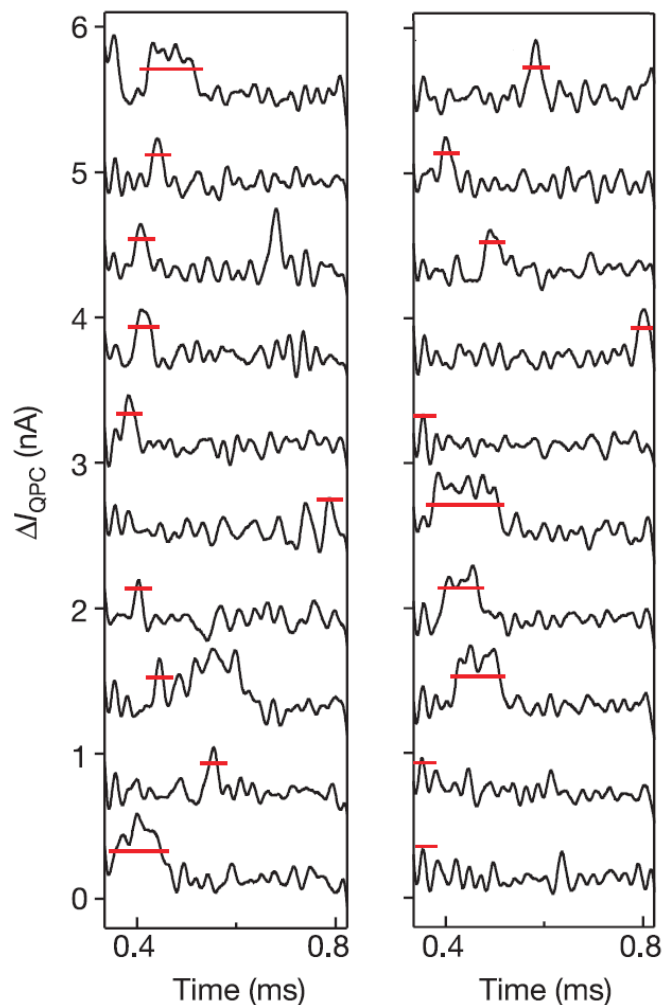


実験プロトコル(スピン↓)

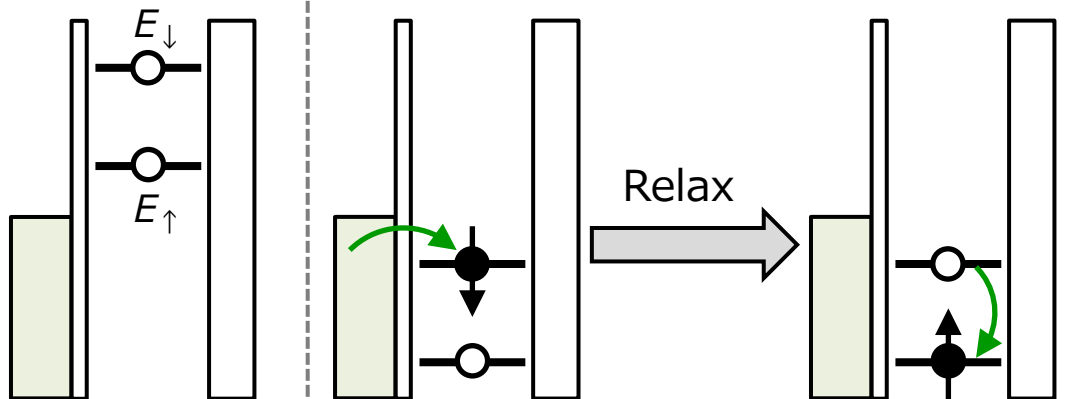
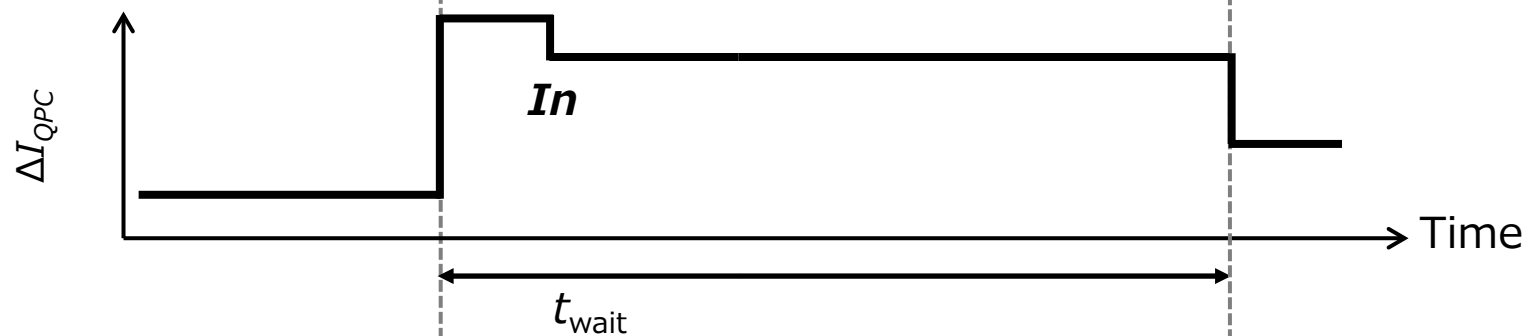
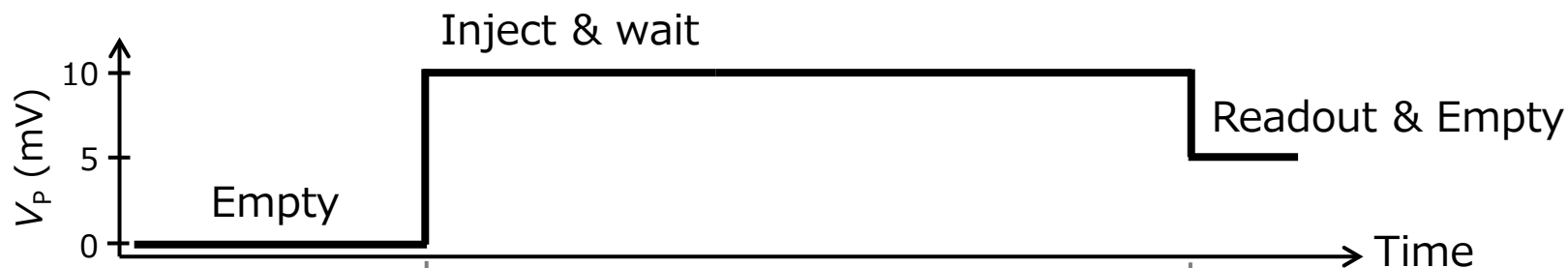


単一スピンの単発読み出し

“spin-down”と判定された例 ($t_{\text{wait}} = 0.1$ ms)

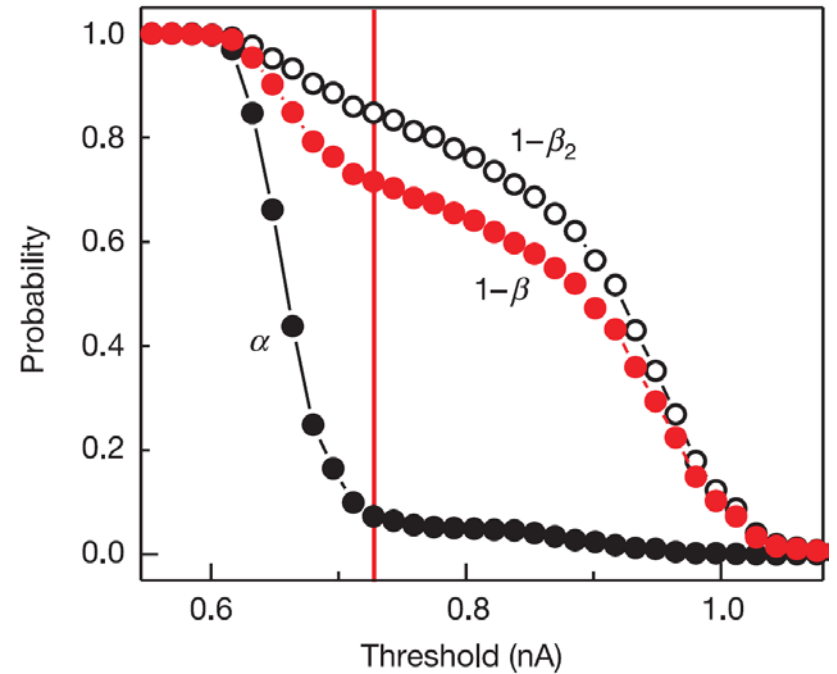
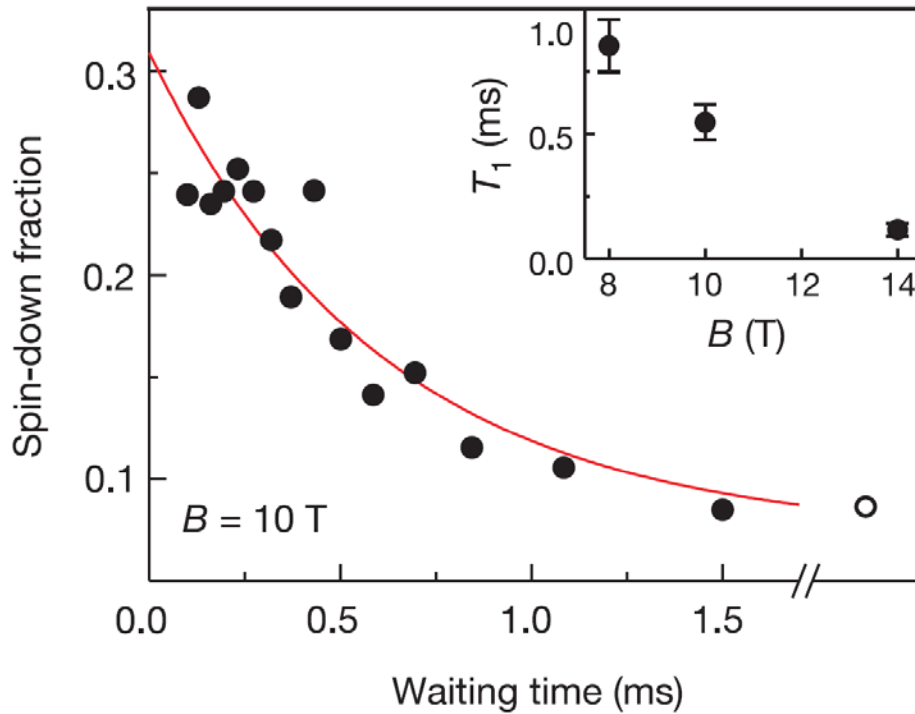


T_1 測定



スピン↑と読み出される頻度が増す

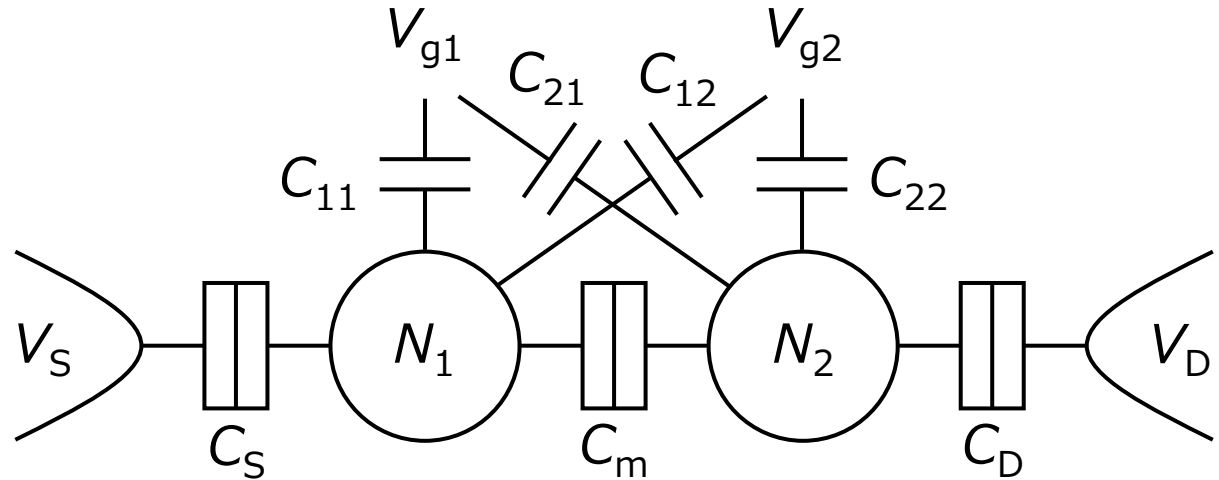
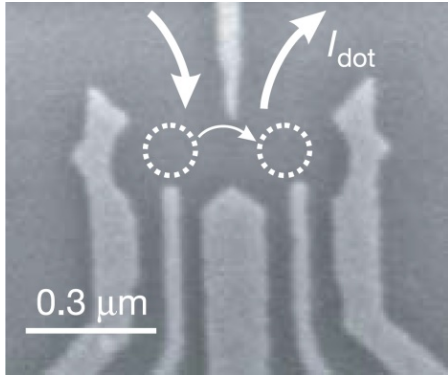
T_1 測定と読み出し精度



講義内容

- 単一量子ドットの伝導とスピン
 - クーロンダイヤモンド
 - 単一スピン単発読み出し
- **直列二重量子ドットの伝導とスピン**
 - **スタビリティダイヤグラム**
 - 二電子スピン状態の制御

直列二重量子ドット



ゲートのクロストーク大

各QDの電荷のつり合い

$$-eN_1 = C_S(V_1 - V_S) + C_{11}(V_1 - V_{g1}) + C_m(V_1 - V_2) + C_{12}(V_1 - V_{g2})$$

$$-eN_2 = C_D(V_2 - V_D) + C_{22}(V_2 - V_{g2}) + C_m(V_2 - V_1) + C_{21}(V_2 - V_{g1})$$

直列二重量子ドット

各QDの電荷のつり合い

$$-eN_1 = C_S(V_1 - V_S) + C_{11}(V_1 - V_{g1}) + C_m(V_1 - V_2) + C_{12}(V_1 - V_{g2})$$

$$-eN_2 = C_D(V_2 - V_D) + C_{22}(V_2 - V_{g2}) + C_m(V_2 - V_1) + C_{21}(V_2 - V_{g1})$$

行列表示

$$\begin{pmatrix} -eN_1 + \rho_1 \\ -eN_2 + \rho_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_1 & -C_m \\ -C_m & C_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix}$$

\mathbf{q}

\mathbf{c}

\mathbf{v}

全エネルギー

$$U = \frac{1}{2} \mathbf{v} \cdot \mathbf{c} \mathbf{v} = \frac{1}{2} \mathbf{c}^{-1} \mathbf{q} \cdot \mathbf{q}$$

$$\rho_1 = C_S V_S + C_{11} V_{g1} + C_{12} V_{g2}$$

$$\rho_2 = C_D V_D + C_{22} V_{g2} + C_{21} V_{g1}$$

$$C_1 = C_S + C_{11} + C_m + C_{12}$$

$$C_2 = C_D + C_{22} + C_m + C_{21}$$

直列二重量子ドット

全エネルギー

$$U = \frac{1}{2} \mathbf{c}^{-1} \mathbf{q} \cdot \mathbf{q} = \frac{1}{2(C_1 C_2 - C_m^2)} \begin{pmatrix} C_2 & C_m \\ C_m & C_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -eN_1 + \rho_1 \\ -eN_2 + \rho_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -eN_1 + \rho_1 \\ -eN_2 + \rho_2 \end{pmatrix}$$
$$= \frac{C_2(-eN_1 + \rho_1)^2 + 2C_m(-eN_1 + \rho_1)(-eN_2 + \rho_2) + C_1(-eN_2 + \rho_2)^2}{2(C_1 C_2 - C_m^2)}$$

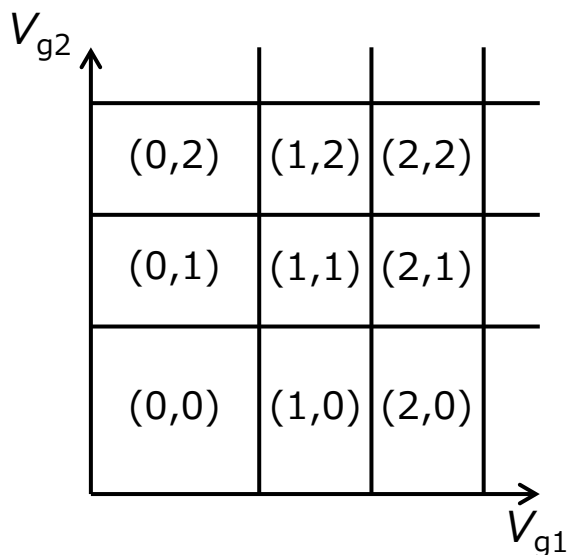
ドット1の電気化学ポテンシャル(ドット2も同様)

$$\mu_1(N_1, N_2) \equiv U(N_1, N_2) - U(N_1 - 1, N_2)$$
$$= \left(N_1 - \frac{1}{2} \right) E_{C1} + N_2 E_{Cm} - \frac{\rho_1}{e} E_{C1} - \frac{\rho_2}{e} E_{Cm}$$

$$E_{C1} = \frac{e^2 C_2}{C_1 C_2 - C_m^2} \quad E_{Cm} = \frac{e^2 C_m}{C_1 C_2 - C_m^2} \quad E_{C2} = \frac{e^2 C_1}{C_1 C_2 - C_m^2}$$

スタビリティダイアグラム

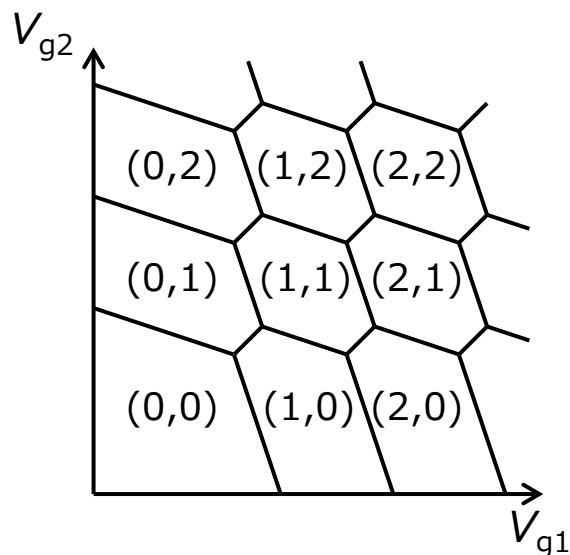
$$C_m \rightarrow 0$$



弱結合

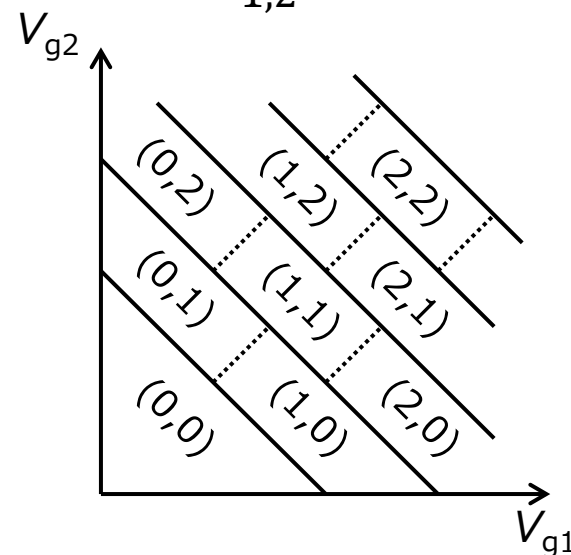
独立のドットとして振る舞う

$$\frac{C_m}{C_{1,2}} \rightarrow 1$$



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

八二カム構造

(0,1)

(1,1)

$$\mu_1(1,1) = 0$$

$$\mu_2(0,1) = 0$$

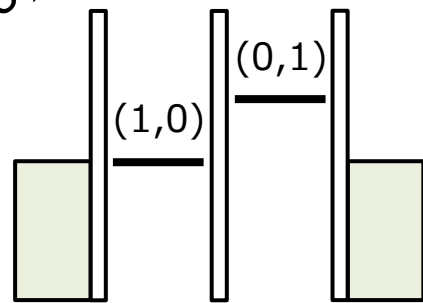
$$\mu_2(1,1) = 0$$

$$\mu_1(1,0) = \mu_2(0,1)$$

(0,0)

(1,0)

$$\mu_1(1,0) = 0$$



八二カム構造

(0,1)

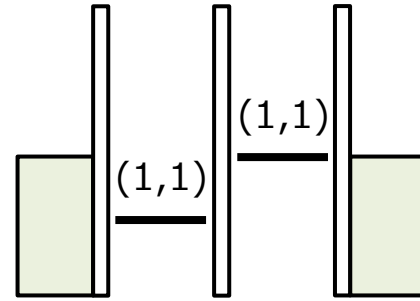
(1,1)

$$\mu_1(1,1) = 0$$

$$\mu_2(0,1) = 0$$

$$\mu_2(1,1) = 0$$

$$\mu_1(1,0) = \mu_2(0,1)$$



(0,0)

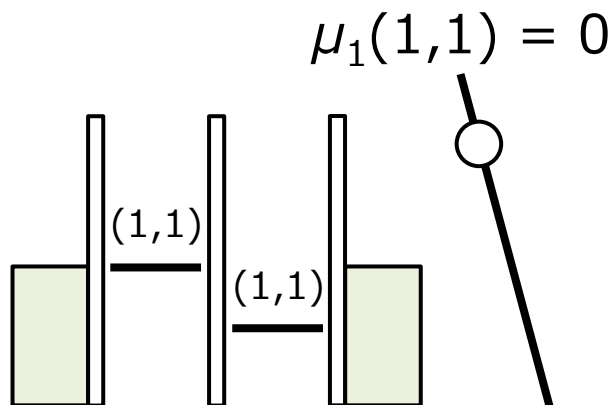
(1,0)

$$\mu_1(1,0) = 0$$

八二カム構造

(0,1)

(1,1)



$\mu_2(0,1) = 0$

$\mu_2(1,1) = 0$

$\mu_1(1,0) = \mu_2(0,1)$

(0,0)

(1,0)

$\mu_1(1,0) = 0$

八二カム構造

(0,1)

(1,1)

$$\mu_1(1,1) = 0$$

$$\mu_2(0,1) = 0$$

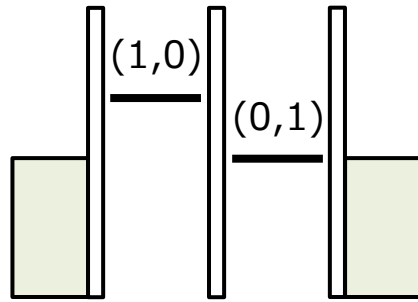
$$\mu_2(1,1) = 0$$

$$\mu_1(1,0) = \mu_2(0,1)$$

(0,0)

(1,0)

$$\mu_1(1,0) = 0$$

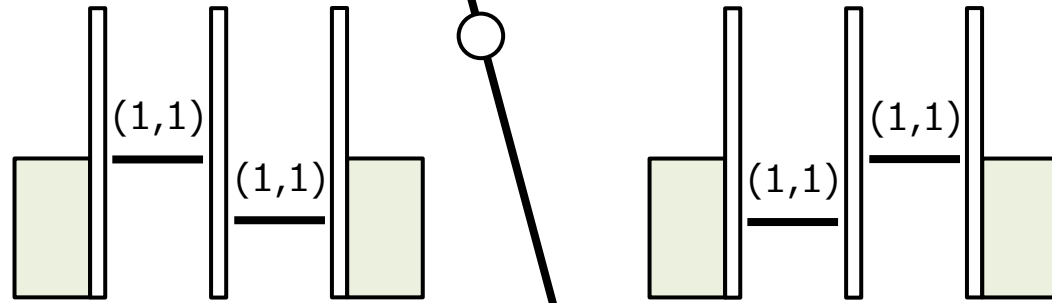


八二カム構造

(0,1)

(1,1)

$$\mu_1(1,1) = 0$$



$$\mu_2(0,1) = 0$$

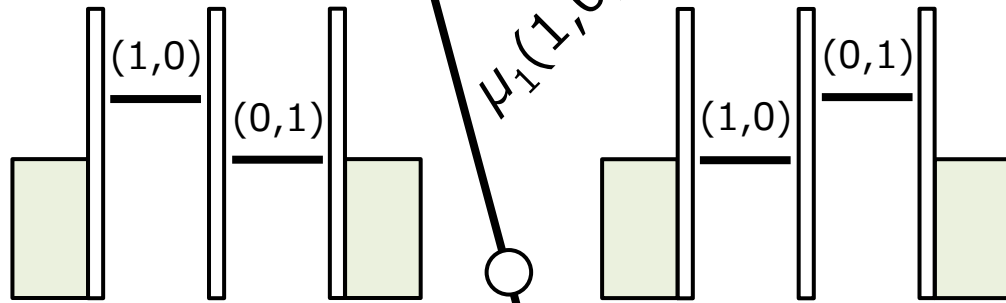
$$\mu_2(1,1) = 0$$

$$\mu_1(1,0) = \mu_2(0,1)$$

(0,0)

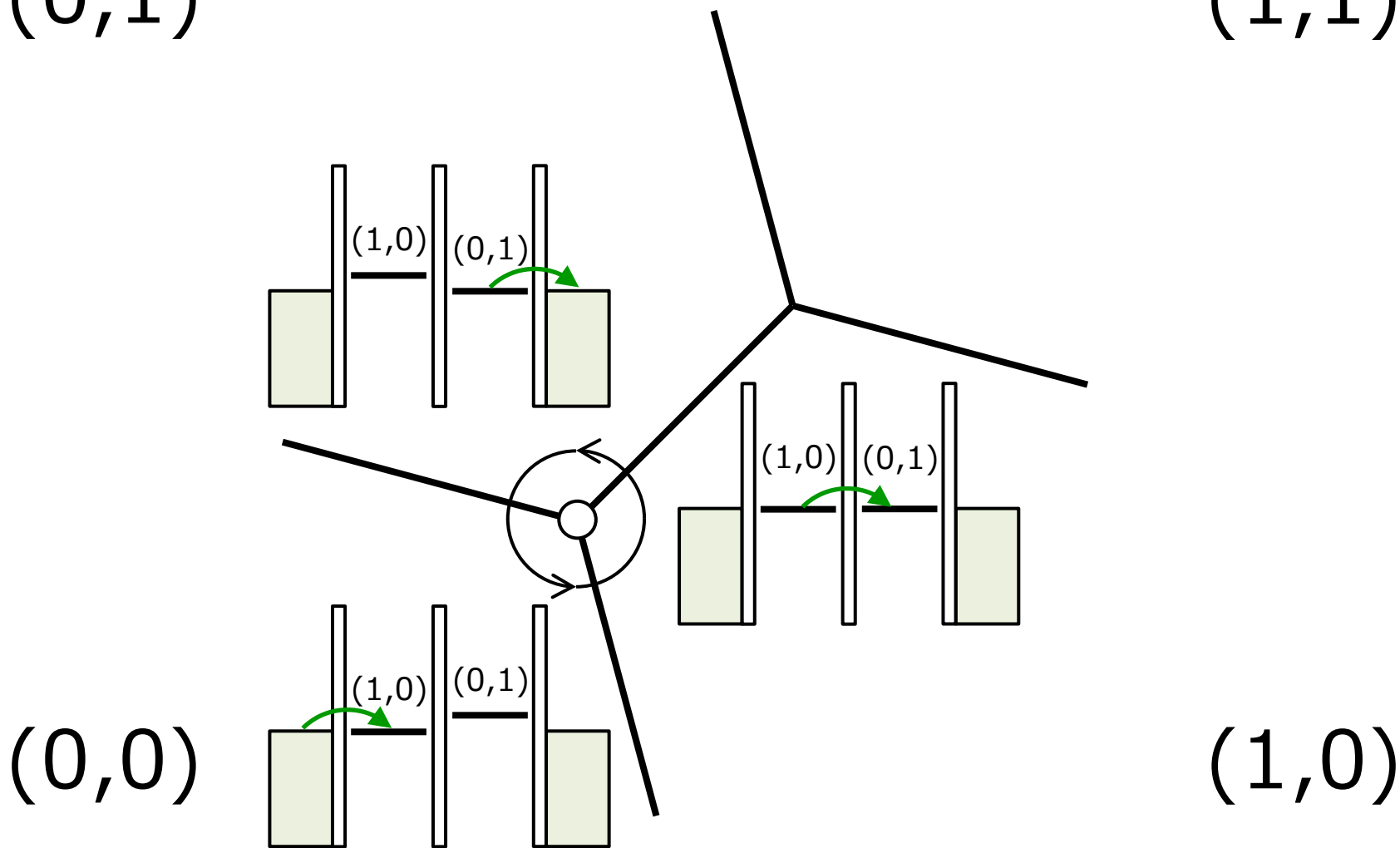
(1,0)

$$\mu_1(1,0) = 0$$



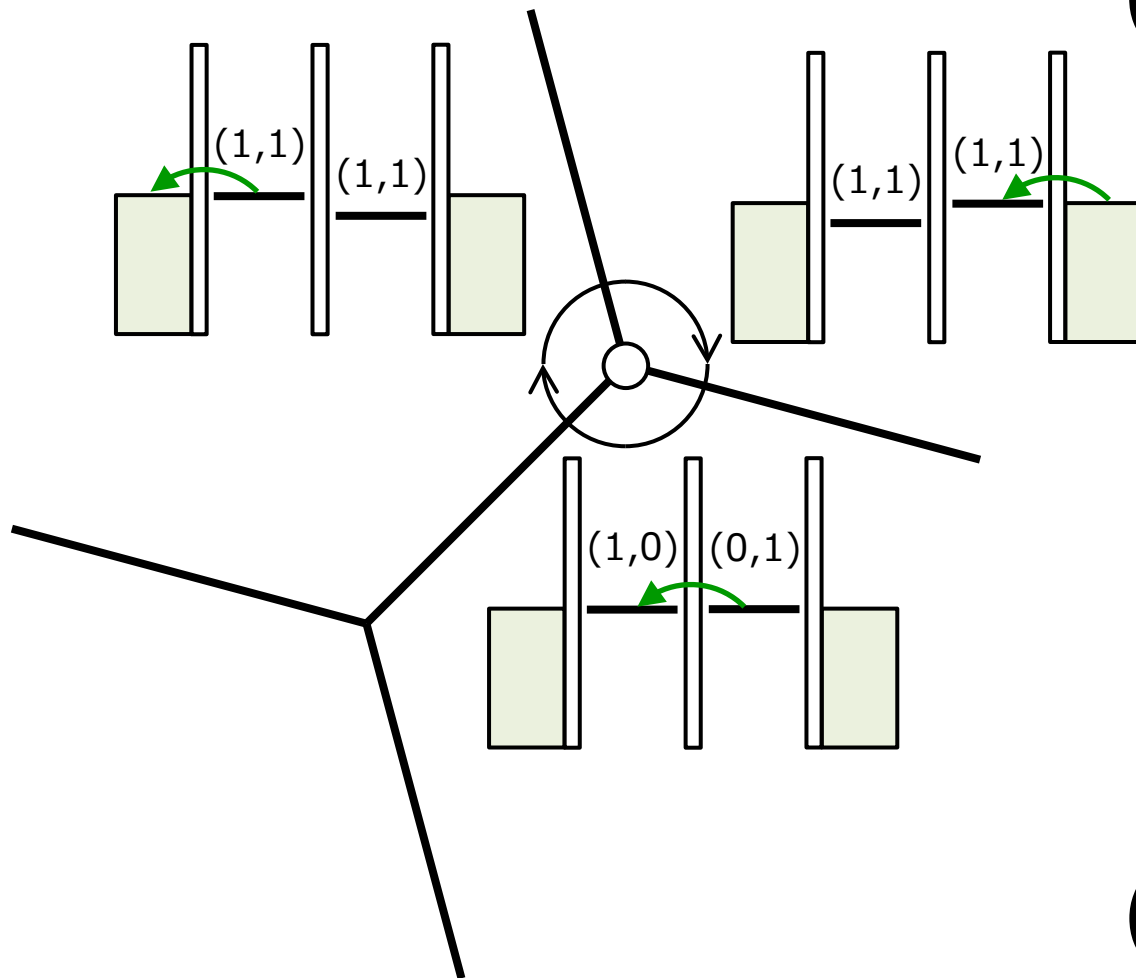
三重点(電子サイクル)

(0,1) 低バイアス領域で電流が流れるのは三重点のみ (1,1)



三重点(正孔サイクル)

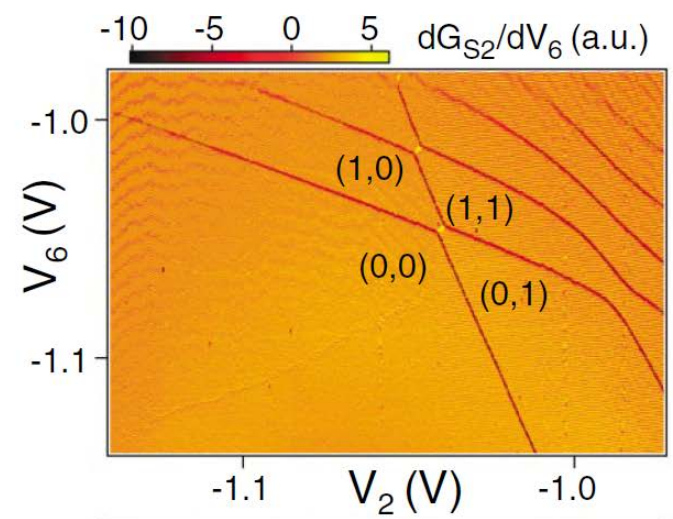
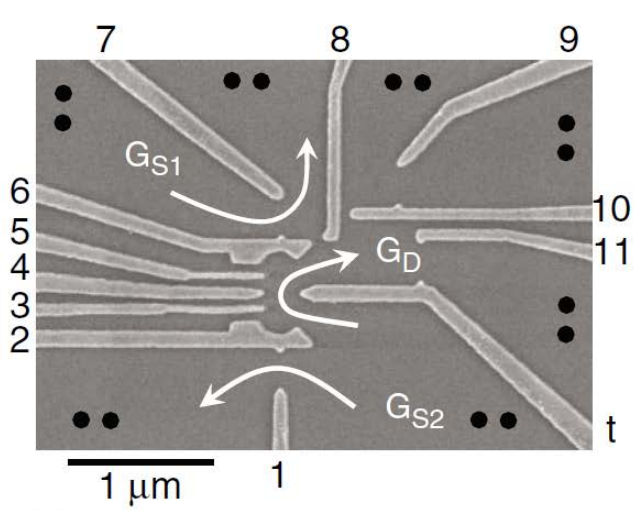
(0,1) 低バイアス領域で電流が流れるのは三重点のみ (1,1)



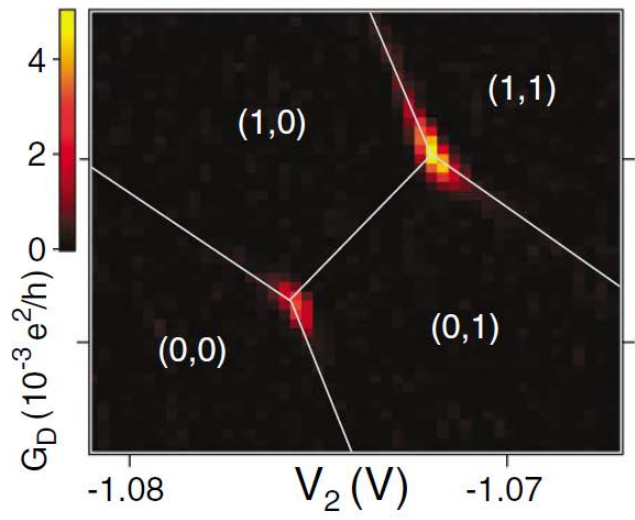
(0,0)

(1,0)

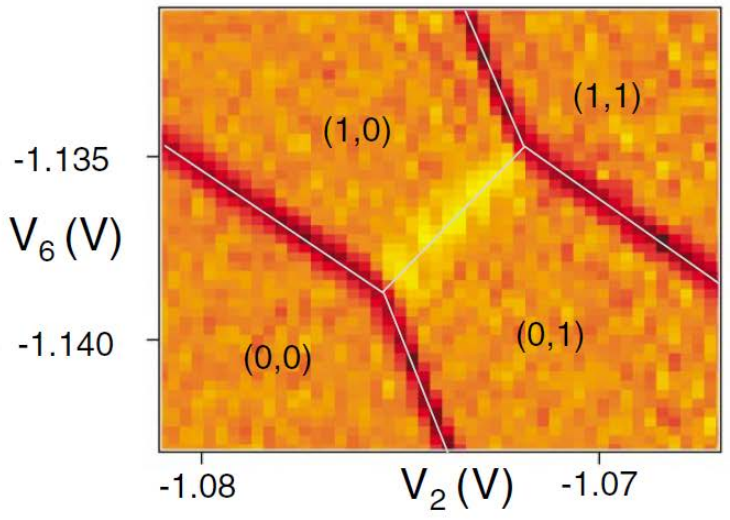
GaAs 2DEG



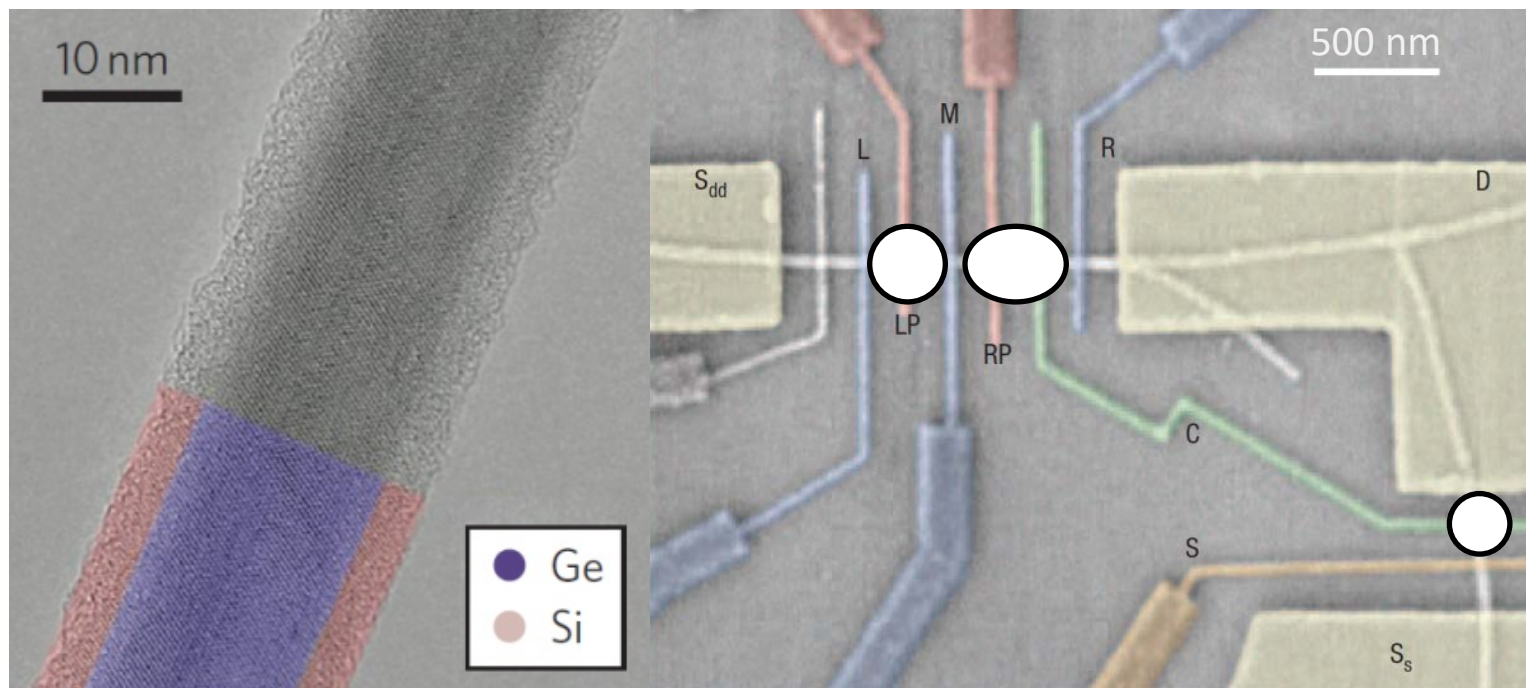
伝導



電荷計



Ge/Siコア/シェルナノチューブ

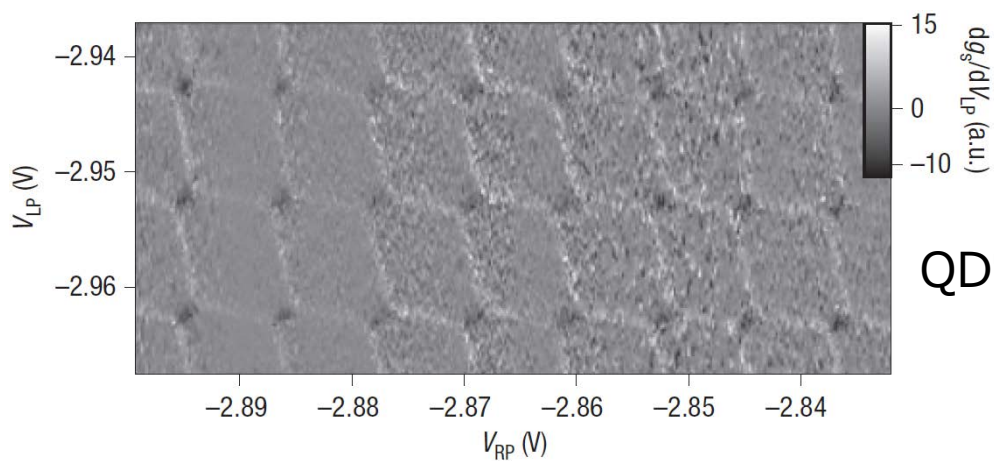
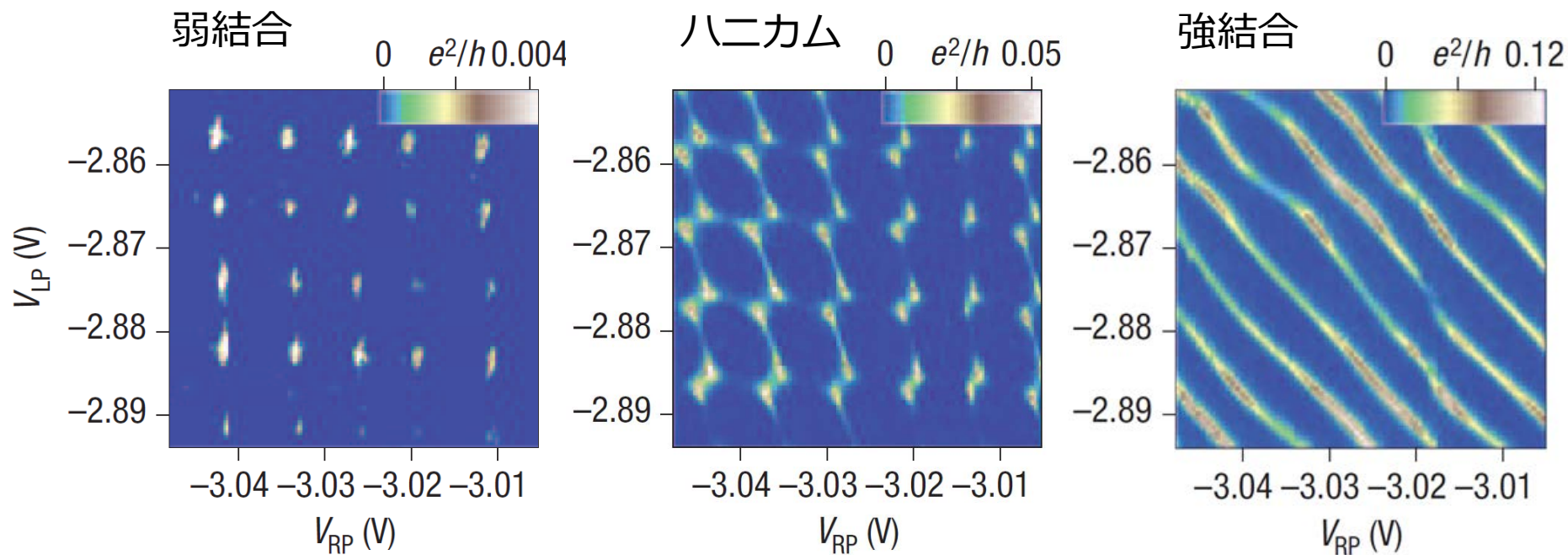


- Geコア内に正孔ガスが蓄積
- QD電荷計(クーロンピークのスロープを利用)とカプラCで静電結合

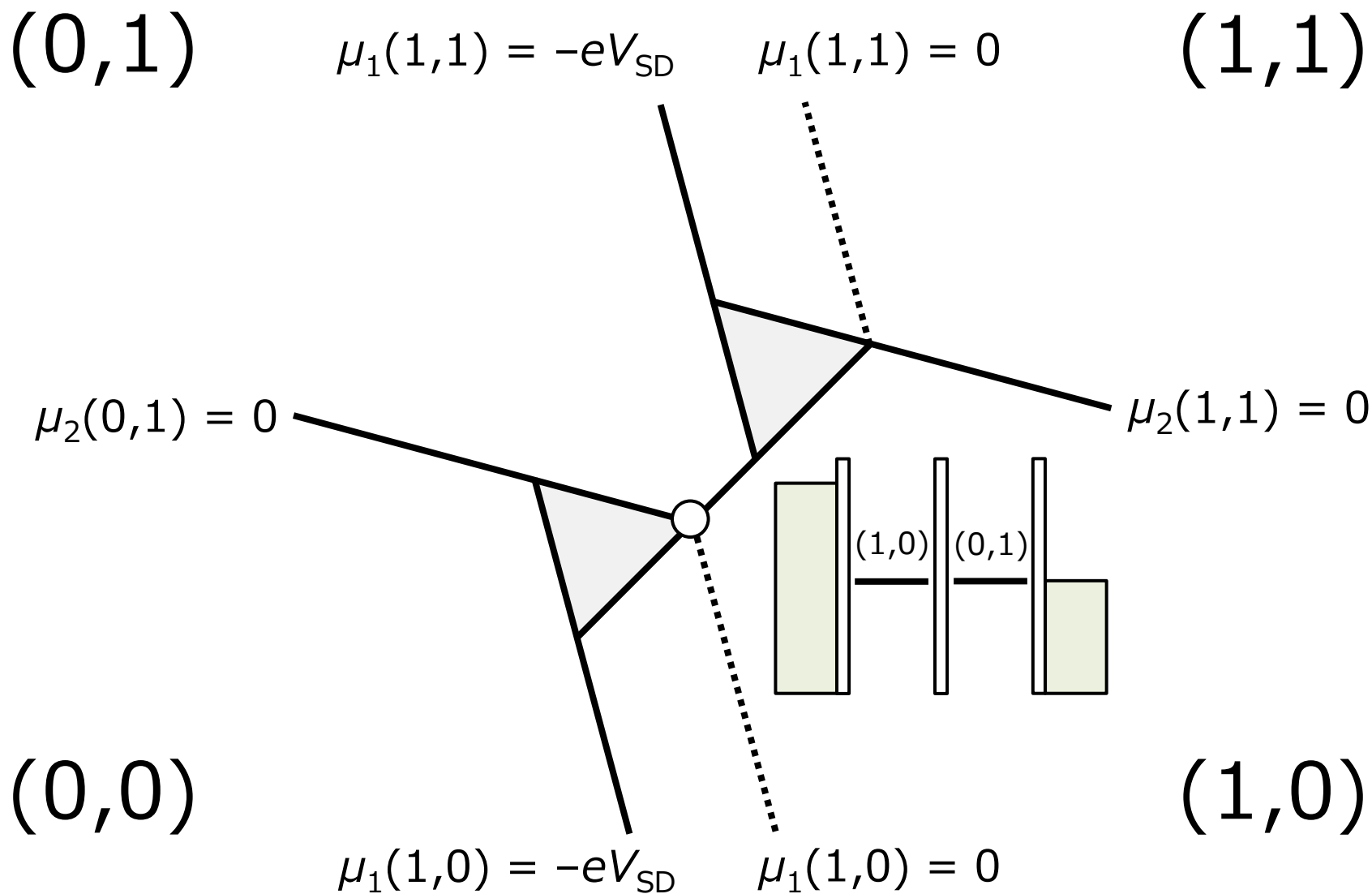
Nature Nano. **2**, 622 (2007) Hu *et al.*

Nature Nano. **7**, 47 (2012) Hu *et al.*

Ge/Siコア/シェルナノチューブ

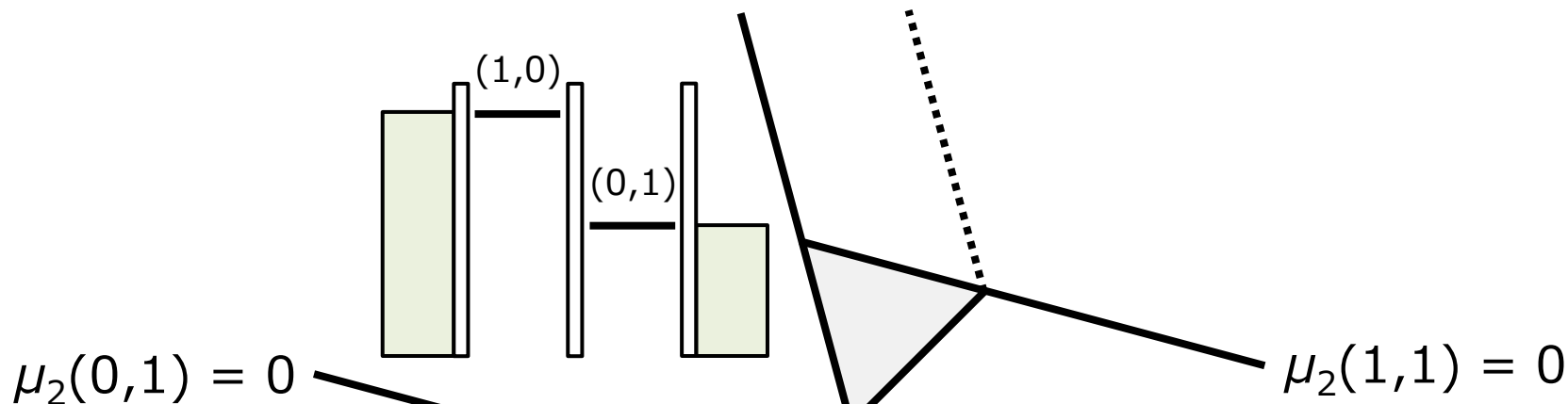


バイアストライアングル



バイアストライアングル

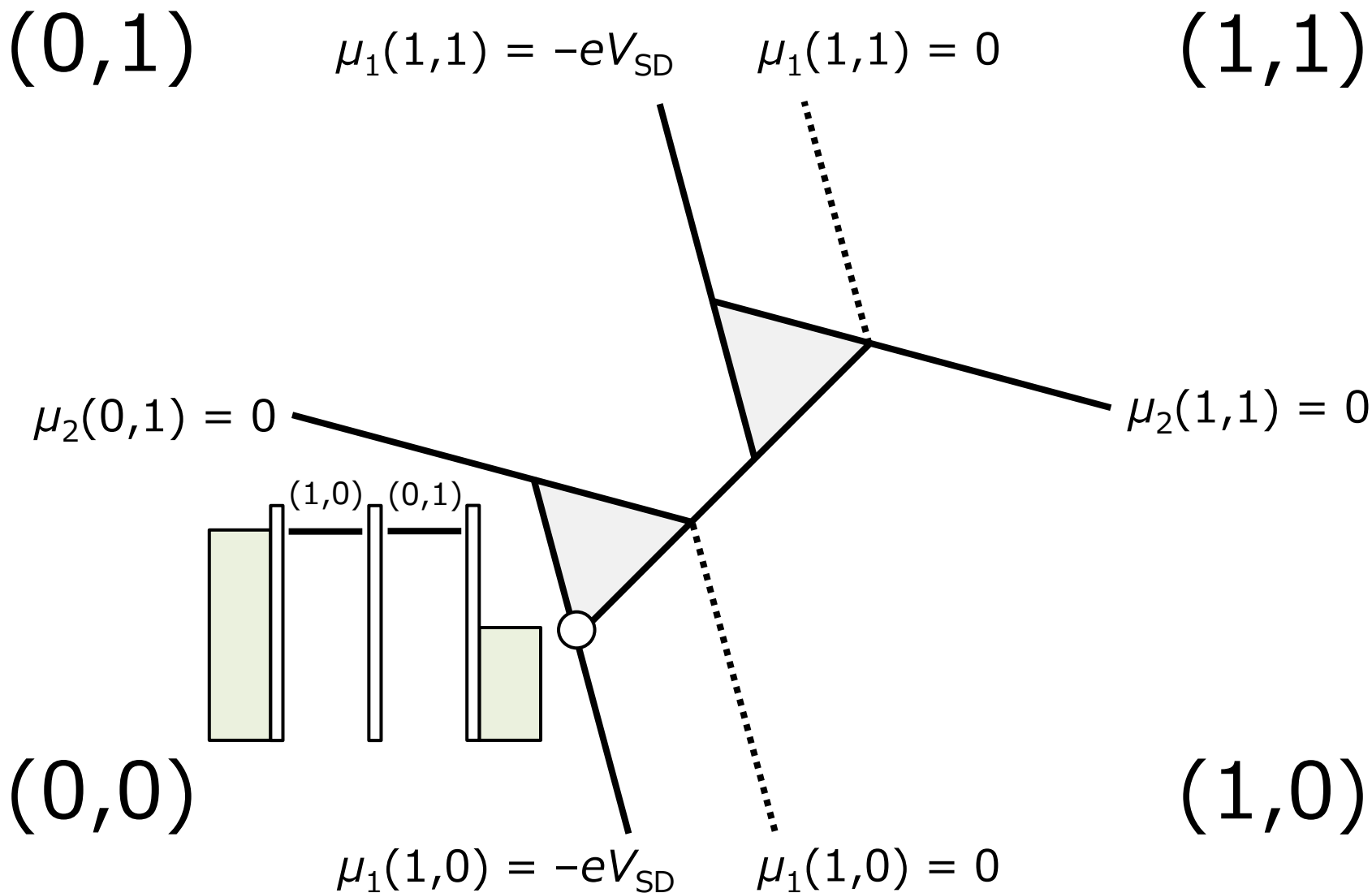
$(0,1)$ $\mu_1(1,1) = -eV_{SD}$ $\mu_1(1,1) = 0$ $(1,1)$



$(0,0)$ $\mu_1(1,0) = -eV_{SD}$ $\mu_1(1,0) = 0$ $(1,0)$

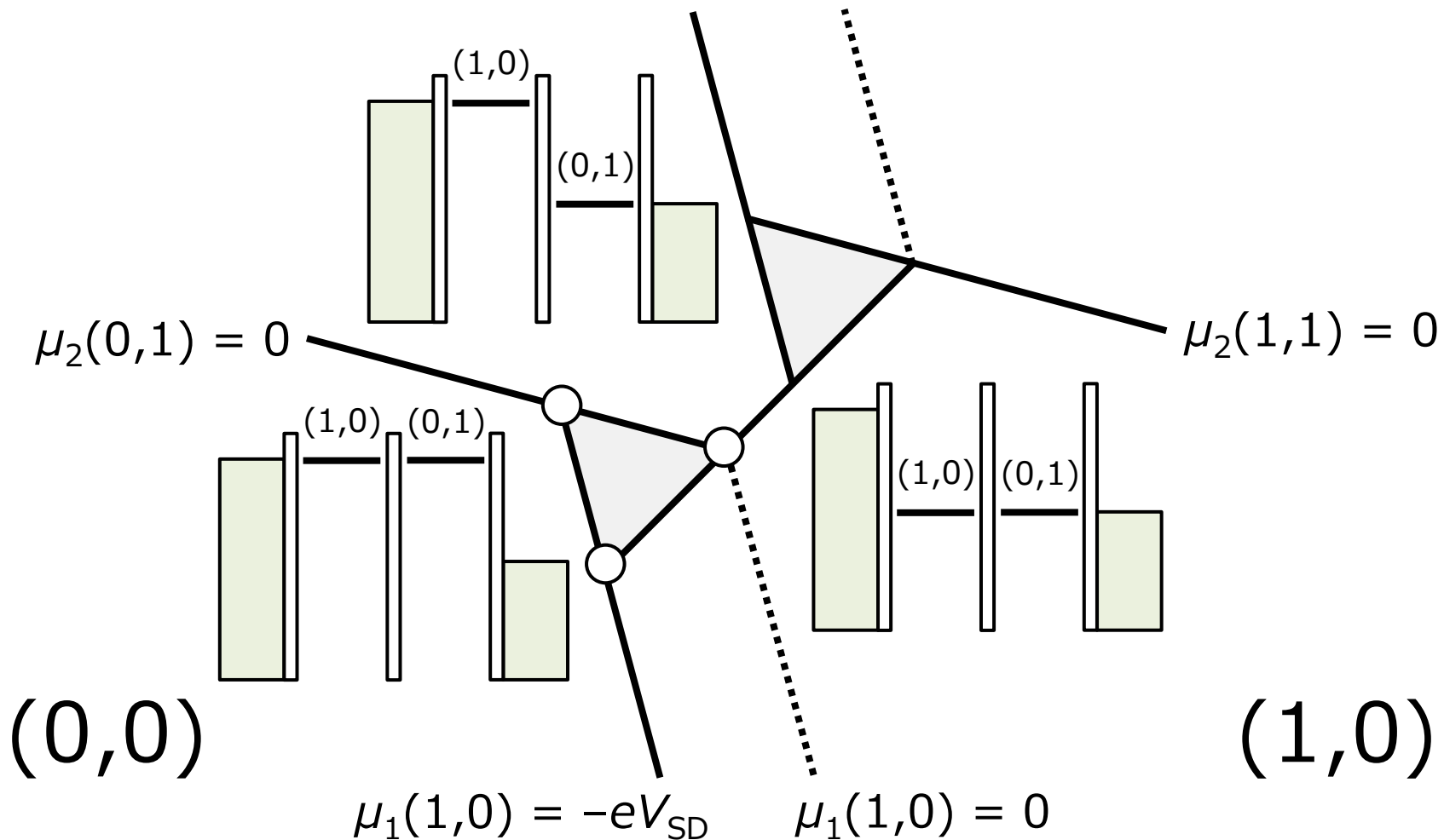
$\mu_1(1,0) = -eV_{SD}$ $\mu_1(1,0) = 0$

バイアストライアングル

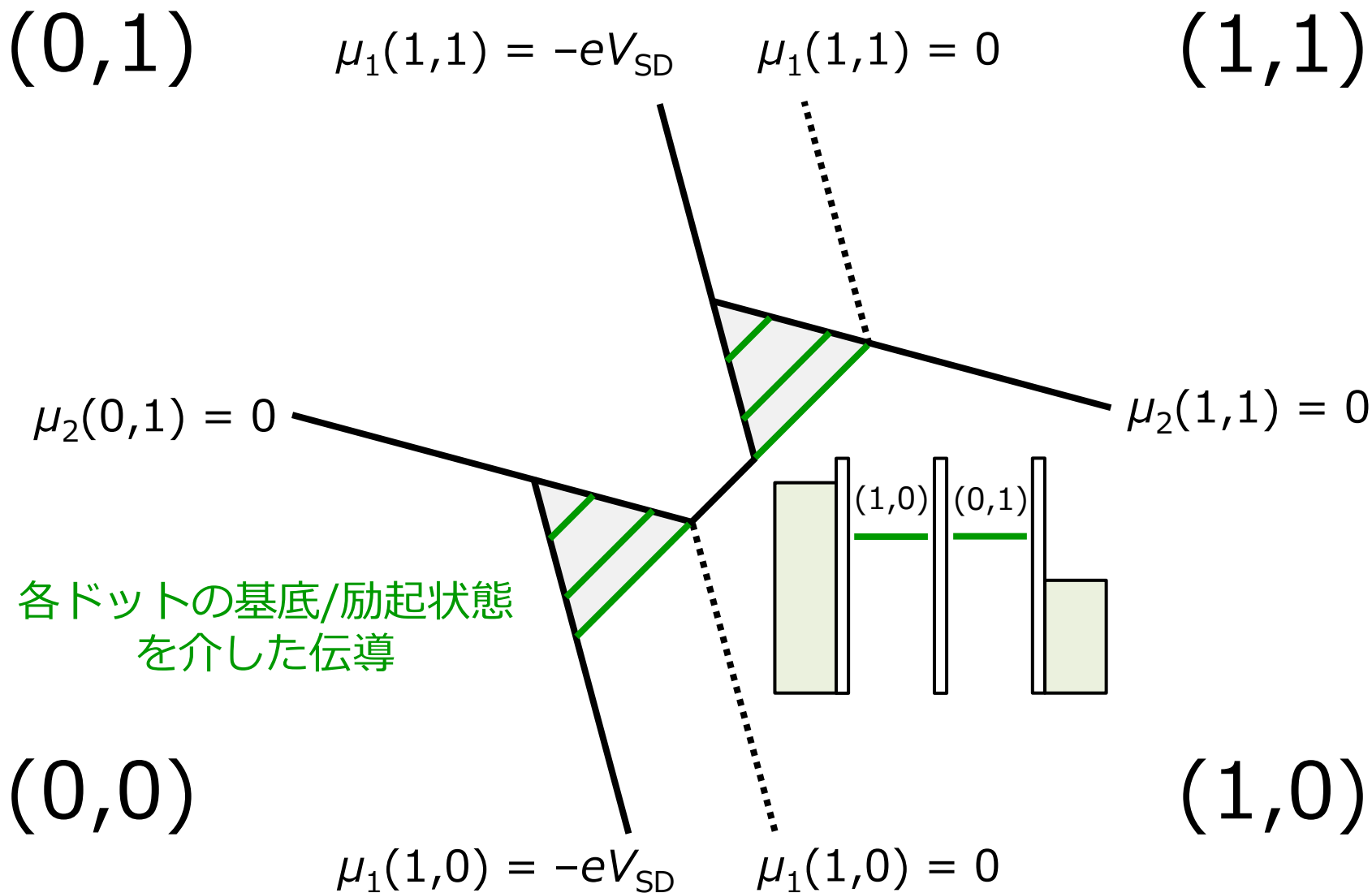


バイアストライアングル

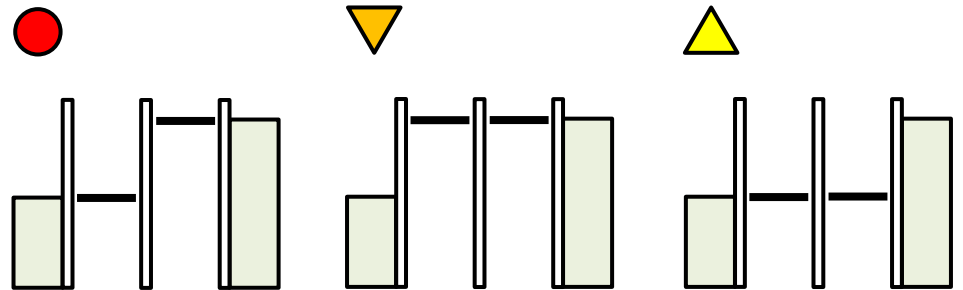
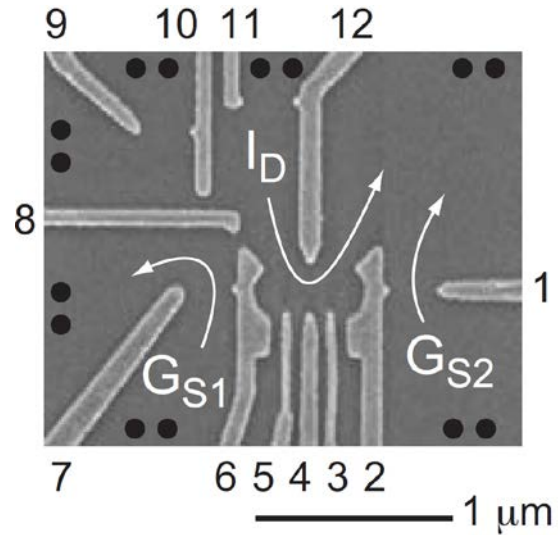
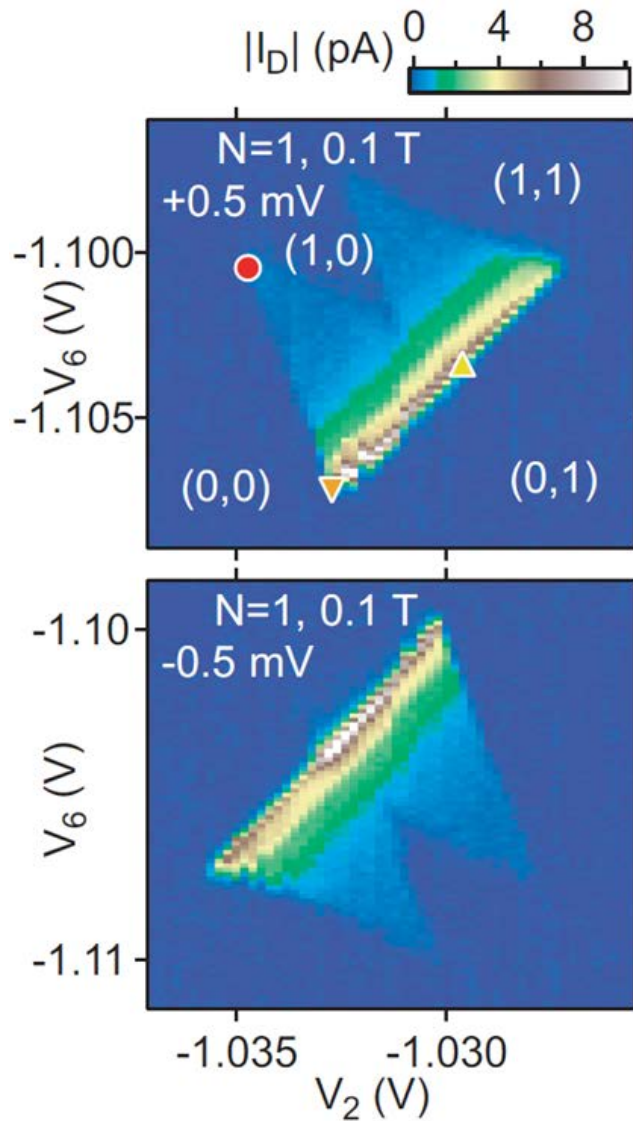
$(0,1)$ $\mu_1(1,1) = -eV_{SD}$ $\mu_1(1,1) = 0$ $(1,1)$



量子化準位

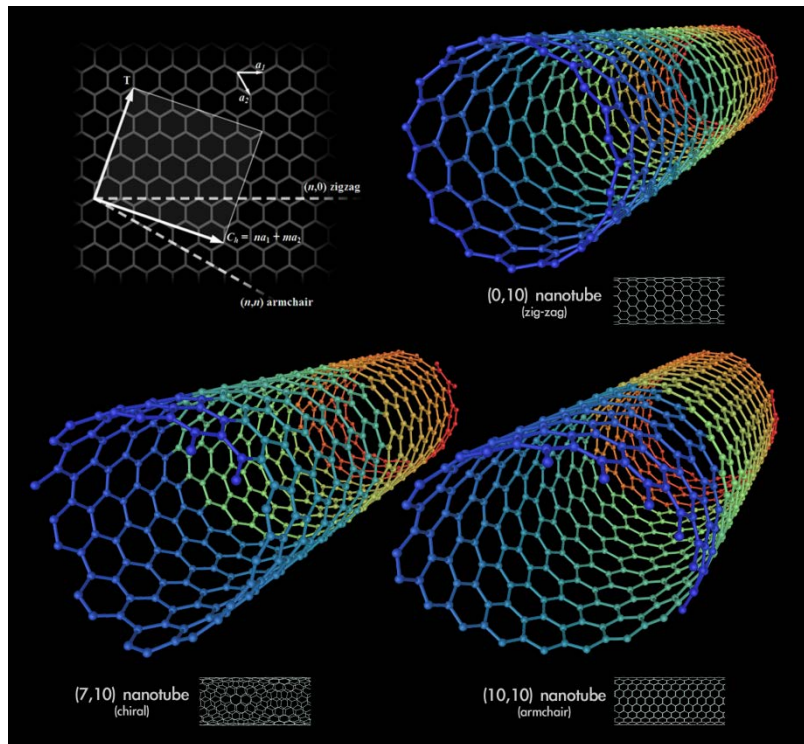


GaAs 2DEG

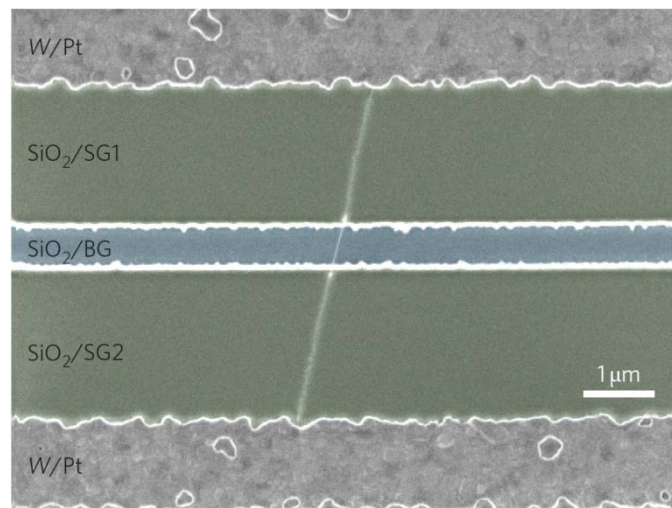
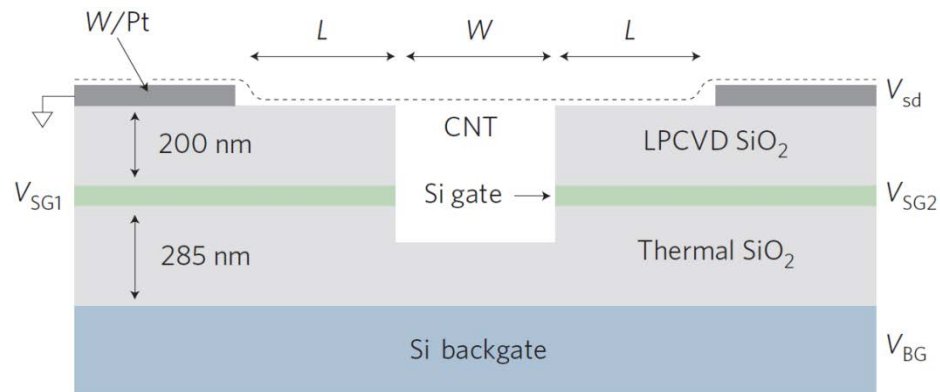


(注)ゲートとバイアスの定義が前ページと逆

カーボンナノチューブ

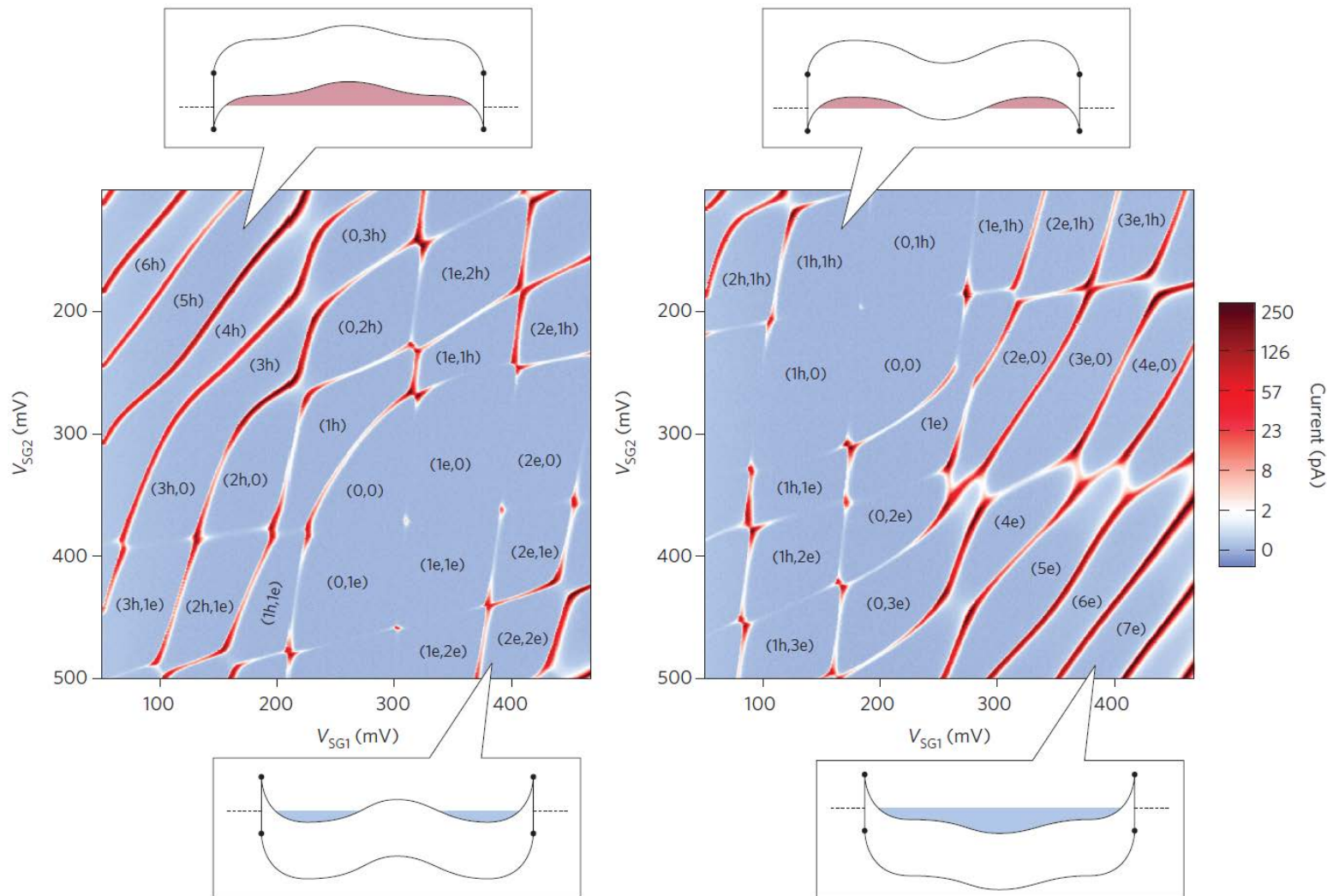


from Wikipedia

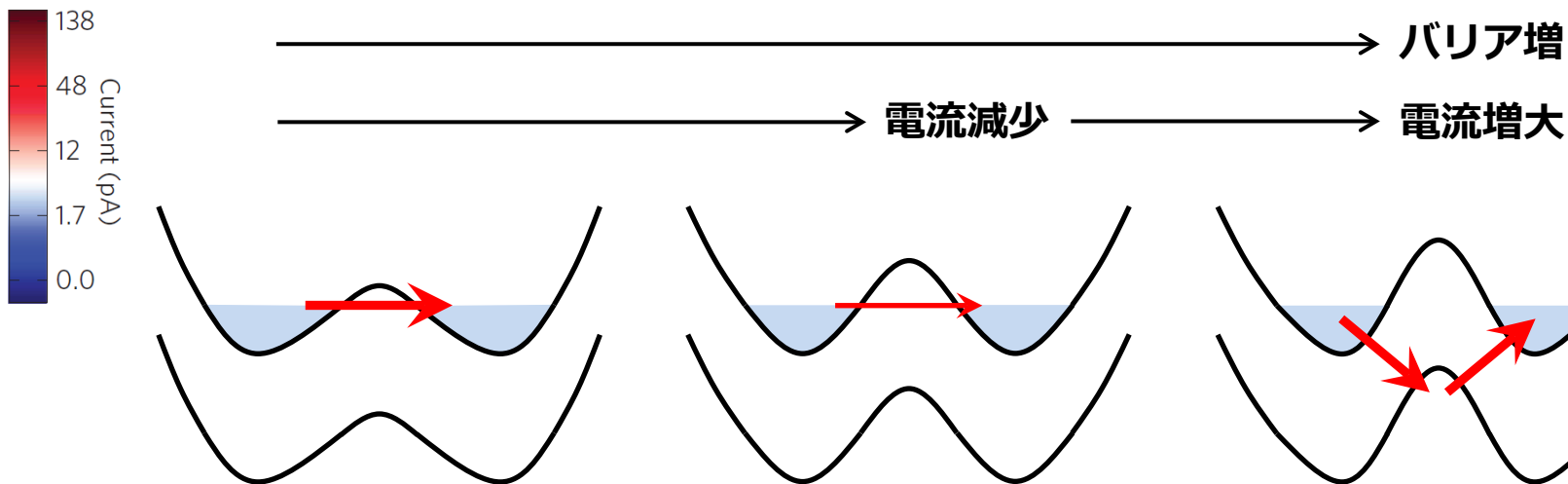
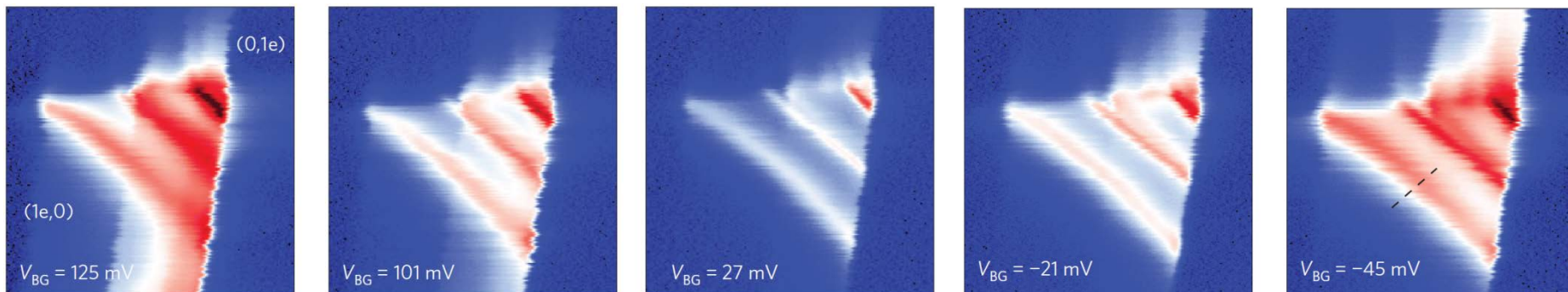


Nature Nano. **4**, 363 (2009) Steele *et al.*

カーボンナノチューブ



クライントンネリング

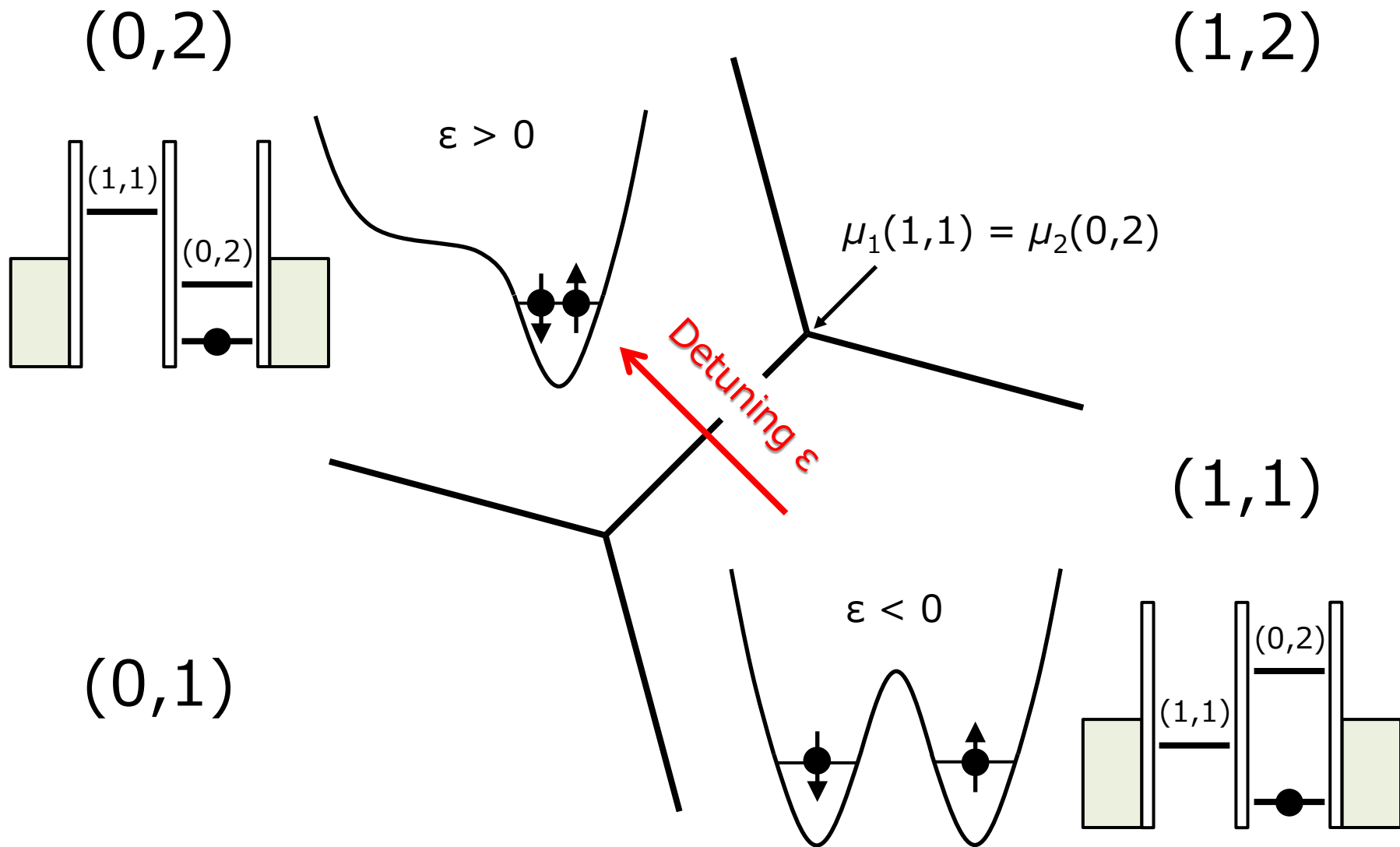


電子→陽電子→電子による障壁透過(クライントンネル)に類似
半導体ではバンド間トンネルに相当

講義内容

- 単一量子ドットの伝導とスピン
 - クーロンダイヤモンド
 - 単一スピン単発読み出し
- **直列二重量子ドットの伝導とスピン**
 - スタビリティダイヤグラム
 - **二電子スピン状態の制御**

二電子狀態



二電子スピン状態

$$B = 0$$

(0,2)状態

(1,1)状態

通常無視できる

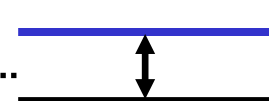
$|T(0,2)\rangle$



$$E_{ST} \approx 1 \text{ meV}$$

位置関係は ϵ で決まる

$|T(1,1)\rangle$



$$\approx 4t_C^2/E_C$$

$|S(0,2)\rangle$

$|S(1,1)\rangle$

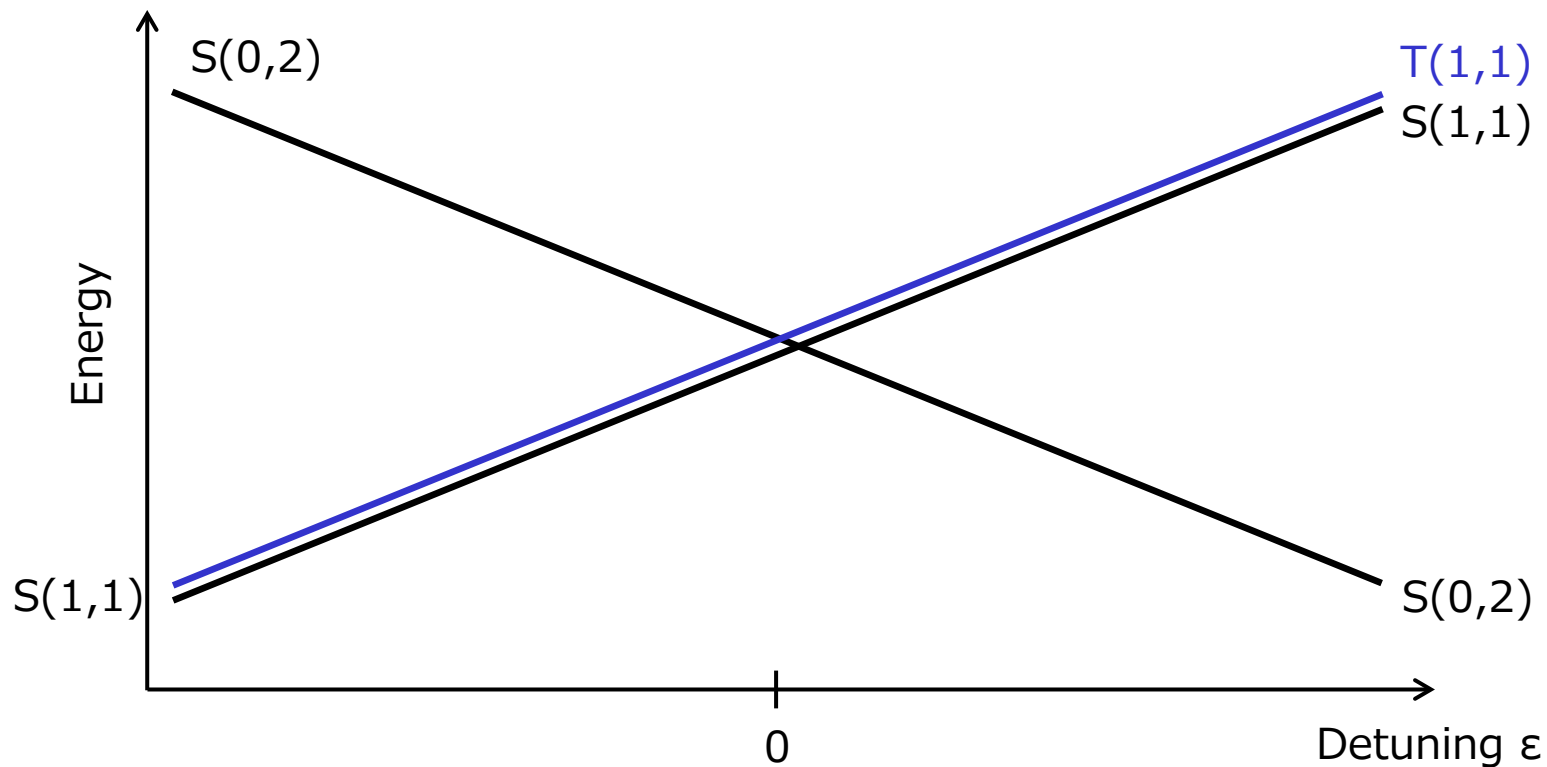
$\epsilon \approx 0$ でハイブリダイズ

二電子スピン状態

$B = 0$

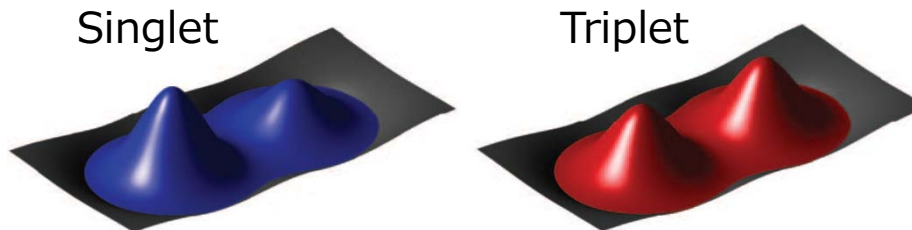
S(0,2)とS(1,1)のhybridization

$$\begin{pmatrix} 0 & t_c \\ t_c & 0 \end{pmatrix}$$

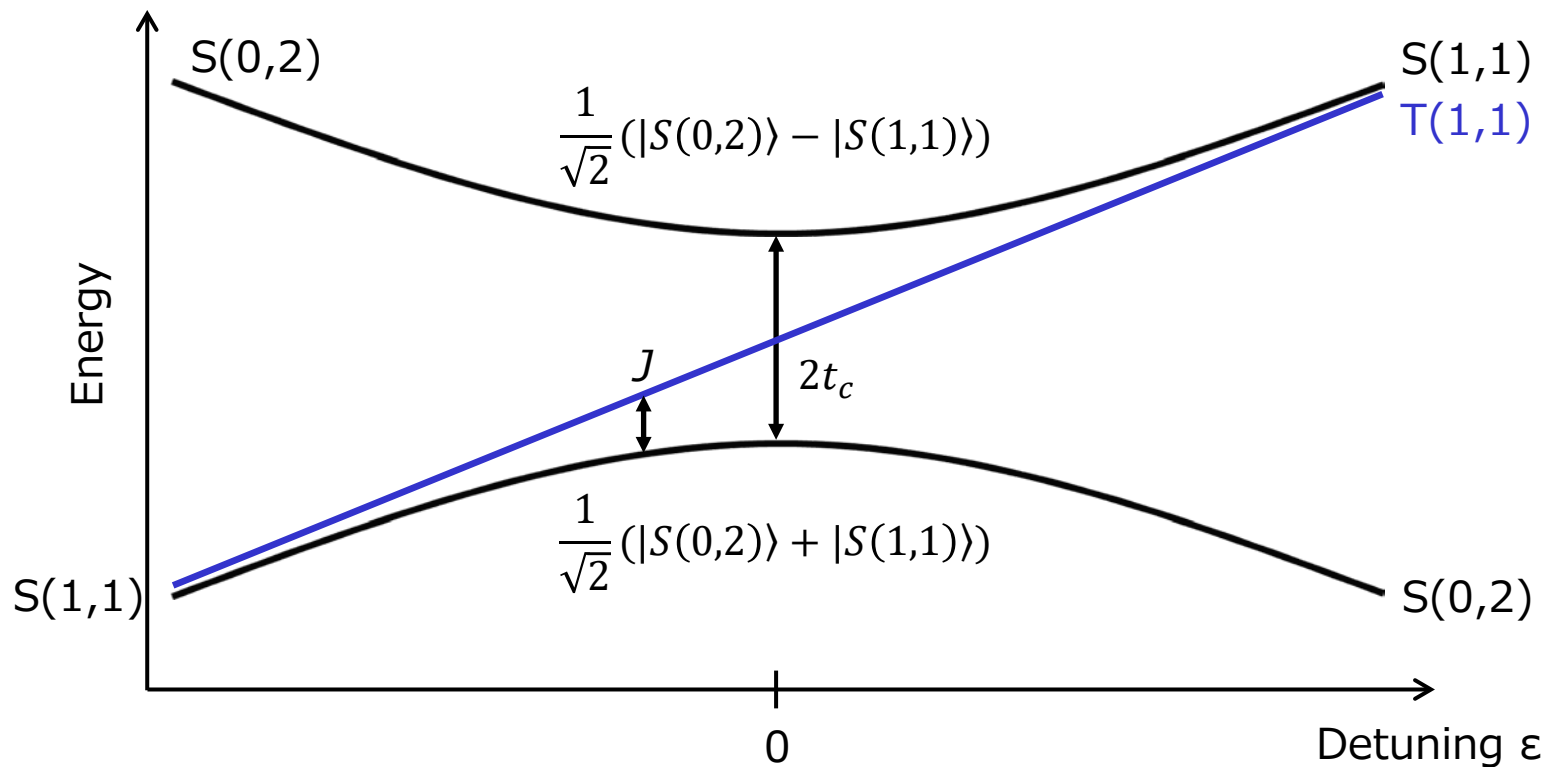


二電子スピン状態

$B = 0$



Science **336**, 202 (2012) Shulman *et al.*

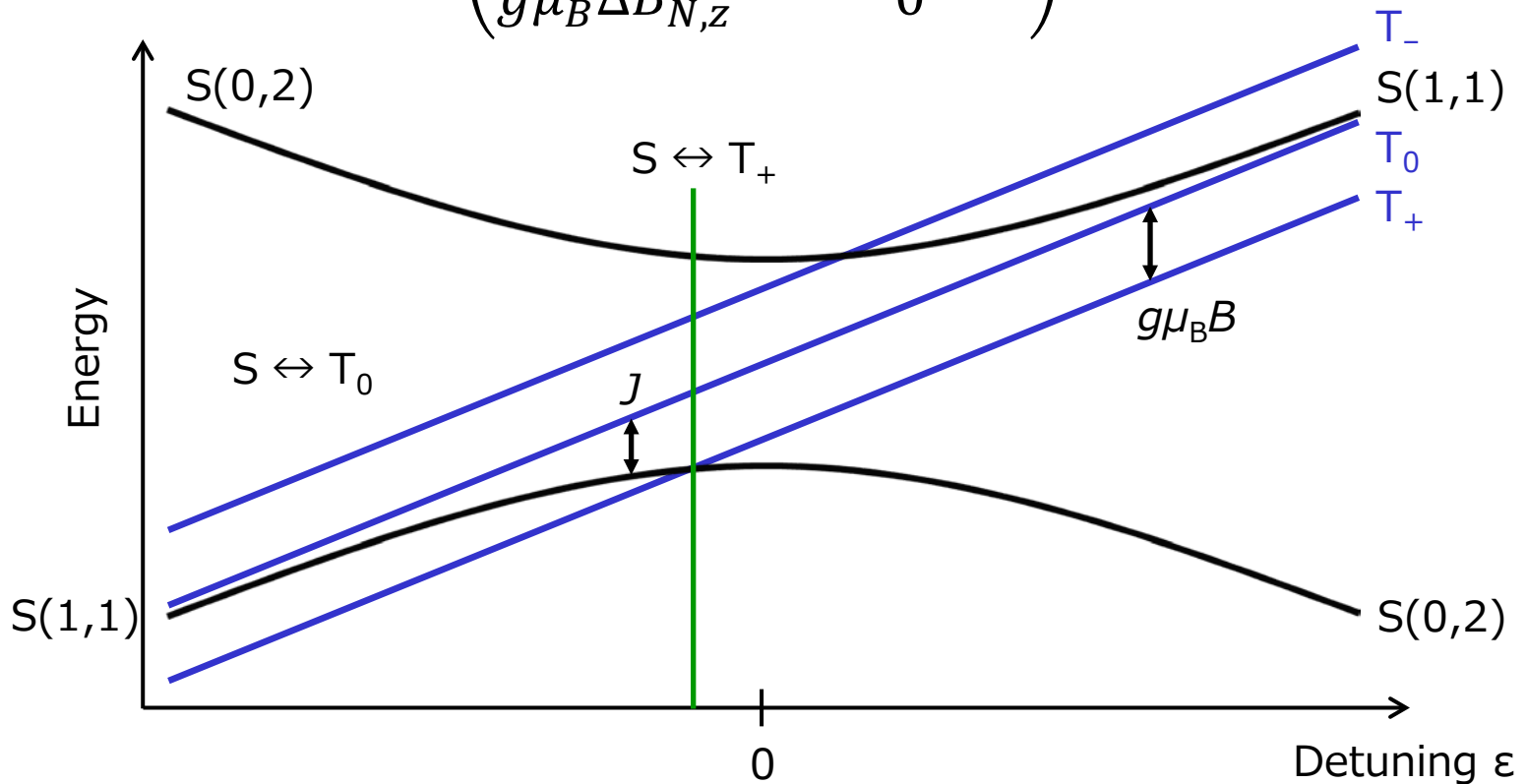


二電子スピン状態

$B \neq 0$

S- T_0 基底での J と核磁場の効果

$$\begin{pmatrix} -J(\varepsilon) & g\mu_B\Delta B_{N,z} \\ g\mu_B\Delta B_{N,z} & 0 \end{pmatrix}$$



二電子スピン状態

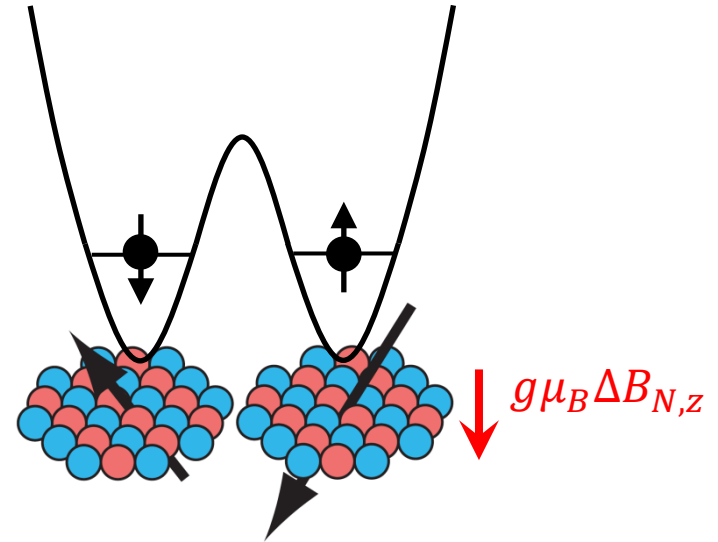
$\varepsilon \ll 0$ のとき

$$\begin{pmatrix} 0 & g\mu_B \Delta B_{N,z} \\ g\mu_B \Delta B_{N,z} & 0 \end{pmatrix}$$

S- T_0 状態

$$|S\rangle \approx |S(1,1)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle)$$

$$|T_0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle)$$



ドットごとにランダムな核磁場

Nature **435**, 925 (2005) Johnson et al.

核磁場下での固有状態 ($\varepsilon > 0$ から断熱的に ε を下げると実現)

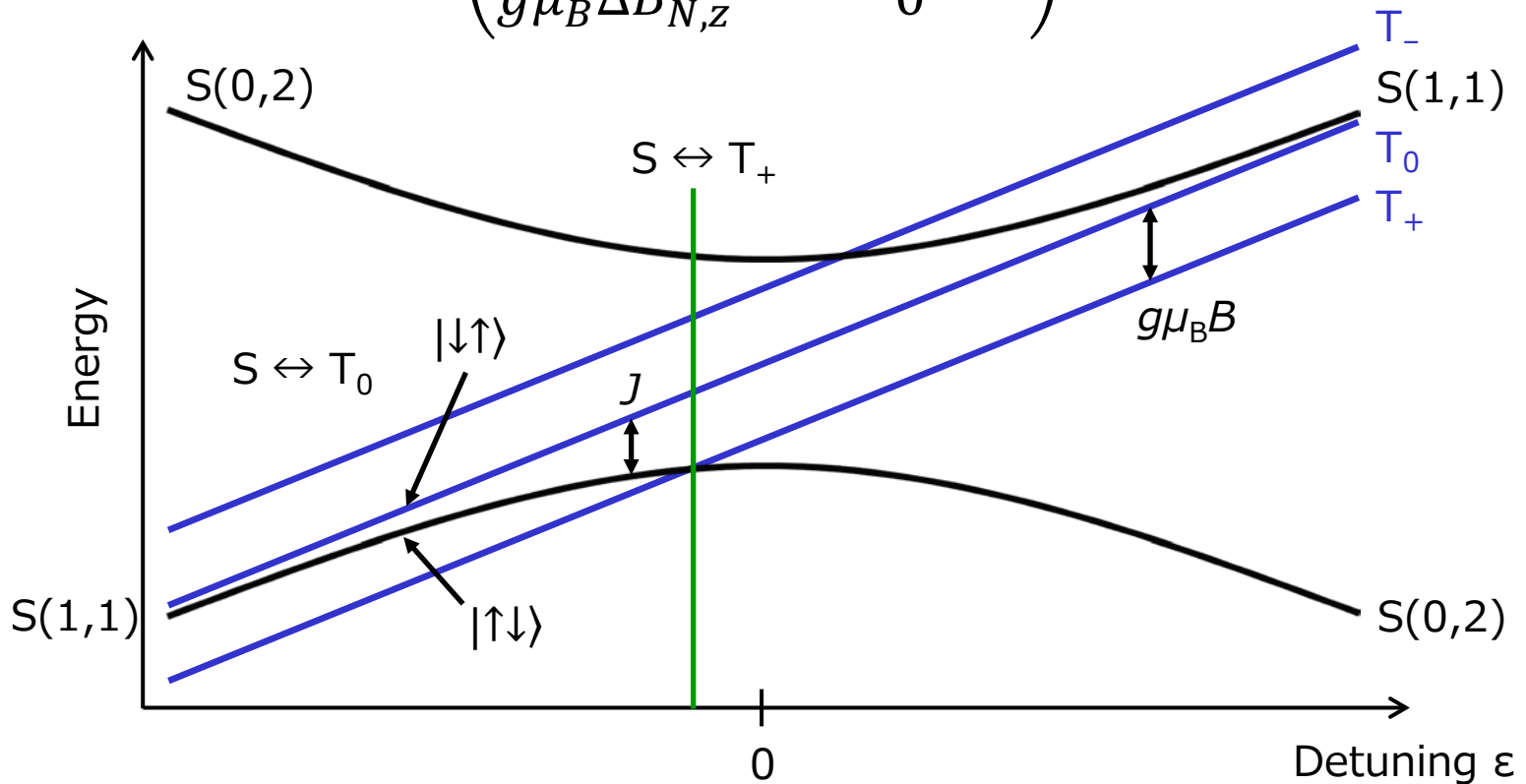
$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|T_0\rangle + |S\rangle) = |\uparrow\downarrow\rangle \quad \frac{1}{\sqrt{2}} (|T_0\rangle - |S\rangle) = |\downarrow\uparrow\rangle$$

二電子スピン状態

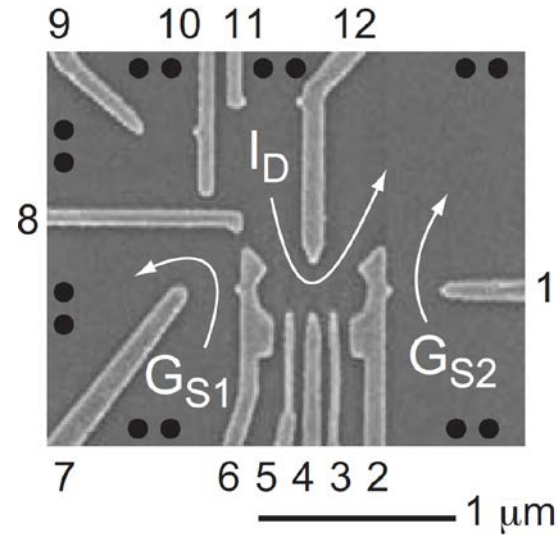
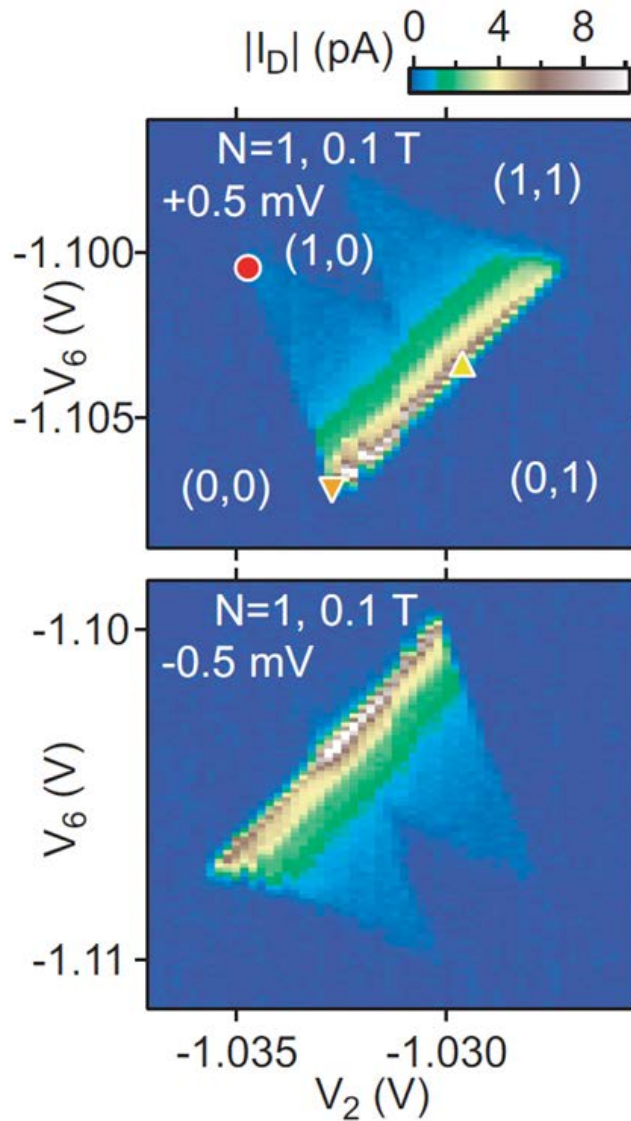
$B \neq 0$

S- T_0 基底での J と核磁場の効果

$$\begin{pmatrix} -J(\varepsilon) & g\mu_B\Delta B_{N,z} \\ g\mu_B\Delta B_{N,z} & 0 \end{pmatrix}$$



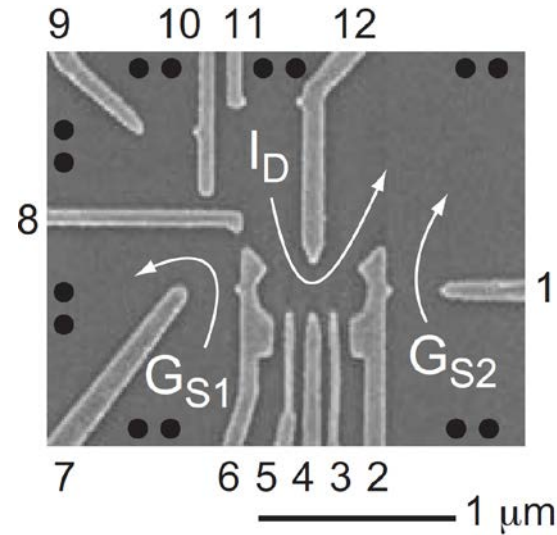
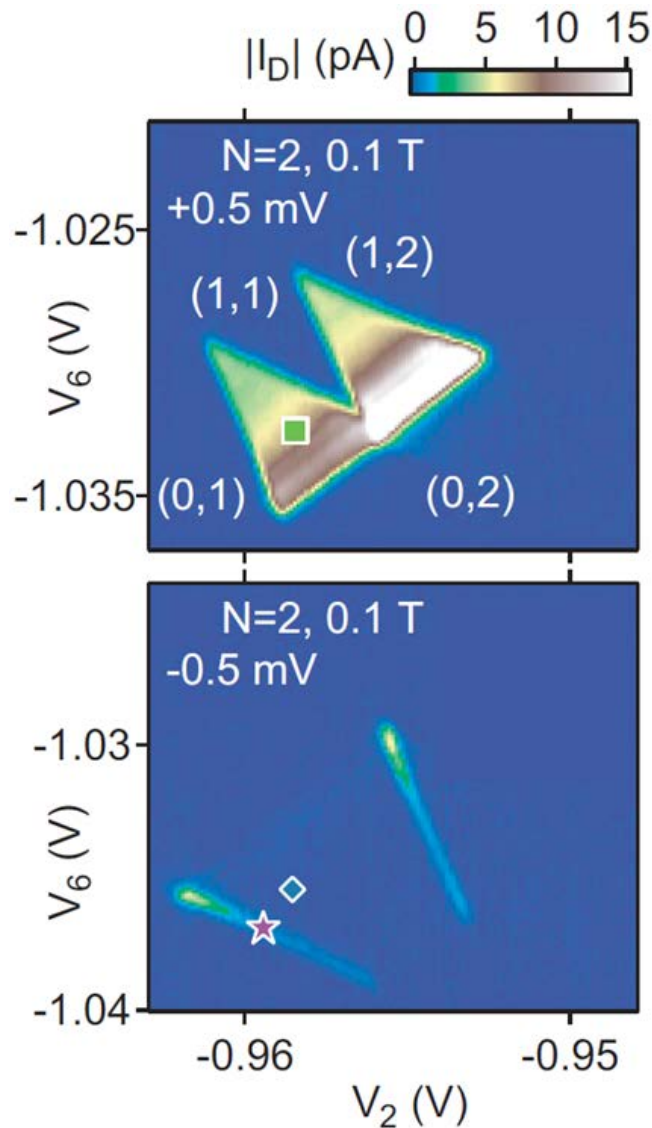
スピントロニクス



一電子領域ではバイアス方向に対して**対称**

Phys. Rev. B **72**, 165308 (2005) Johnson *et al.*
(cf. Science **297**, 1313 (2002) Ono *et al.*)

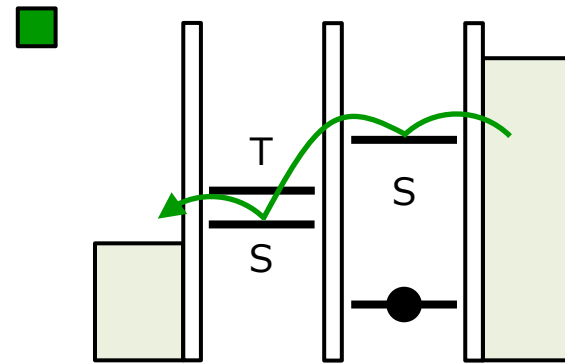
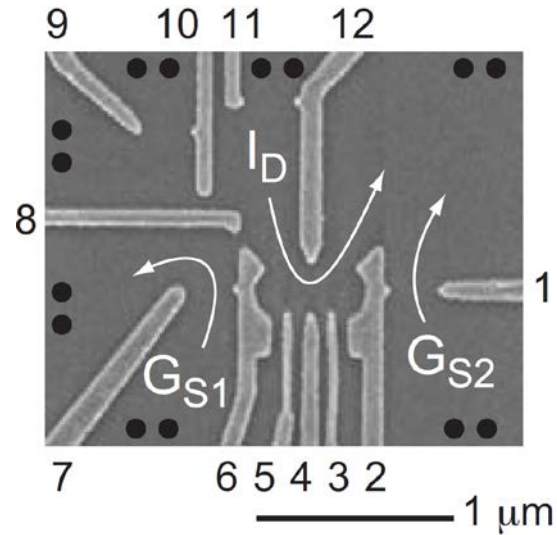
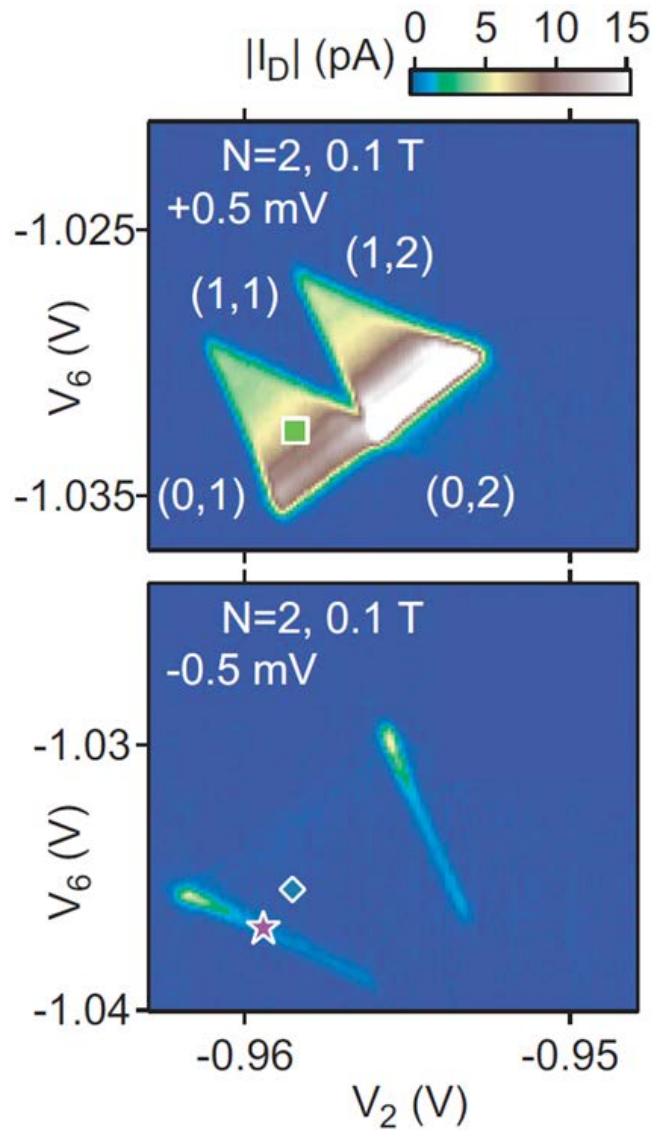
スピントロニクス



二電子領域ではバイアス方向に対して**非対称**
(伝導の抑制)

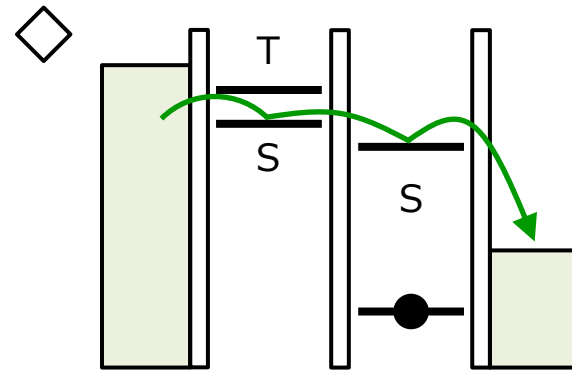
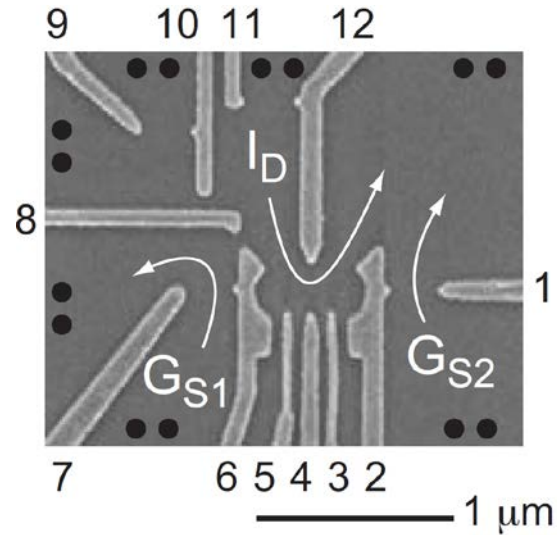
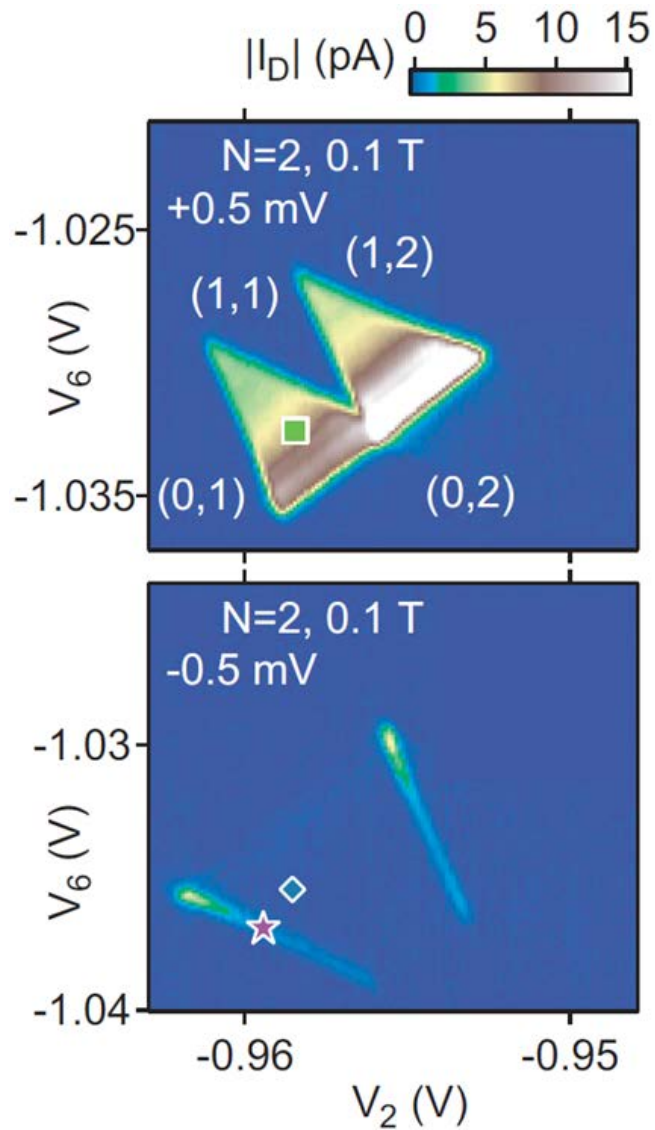
Phys. Rev. B **72**, 165308 (2005) Johnson *et al.*
(cf. Science **297**, 1313 (2002) Ono *et al.*)

スピントロニクス



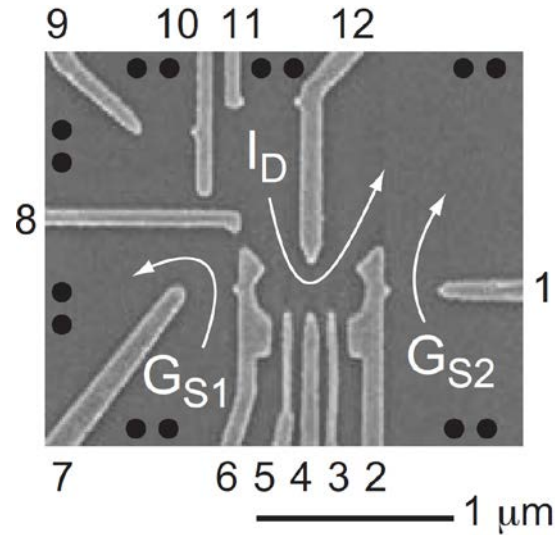
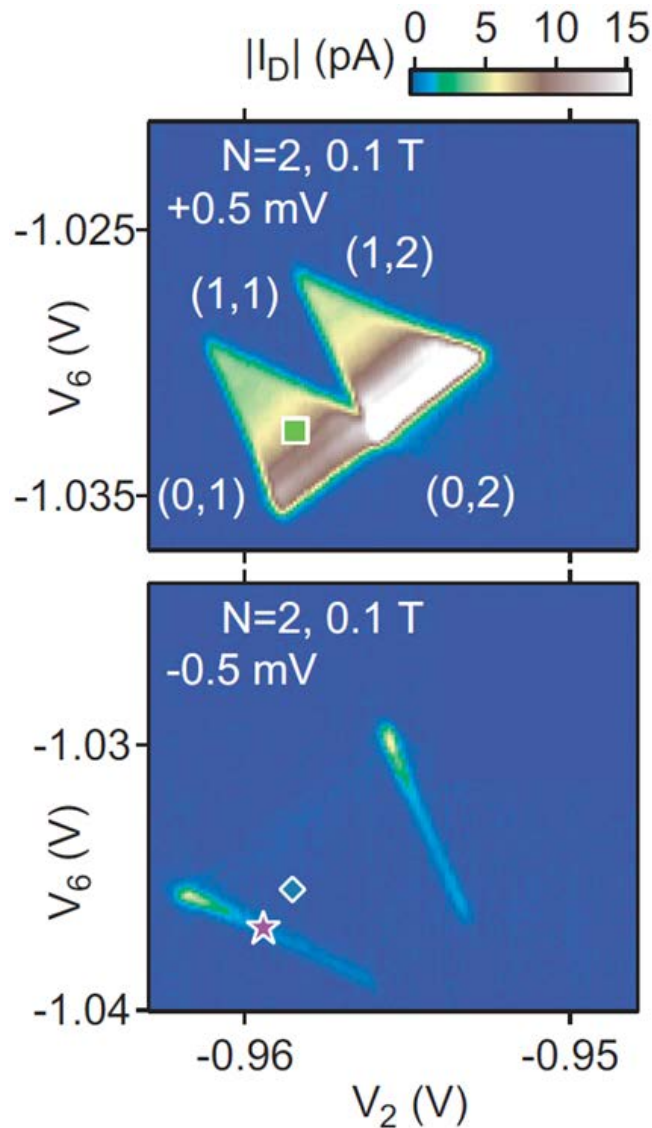
Phys. Rev. B **72**, 165308 (2005) Johnson *et al.*
 (cf. Science **297**, 1313 (2002) Ono *et al.*)

スピントロニクス

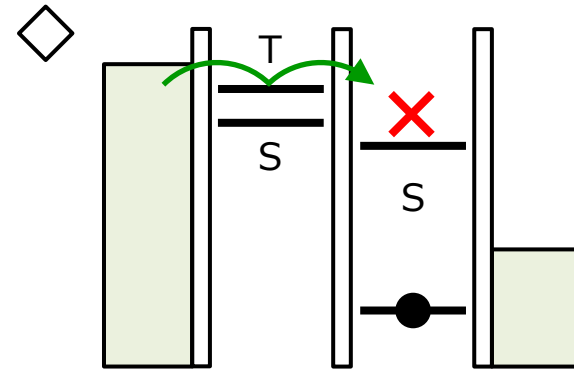


Phys. Rev. B **72**, 165308 (2005) Johnson *et al.*
 (cf. Science **297**, 1313 (2002) Ono *et al.*)

スピントロニクス

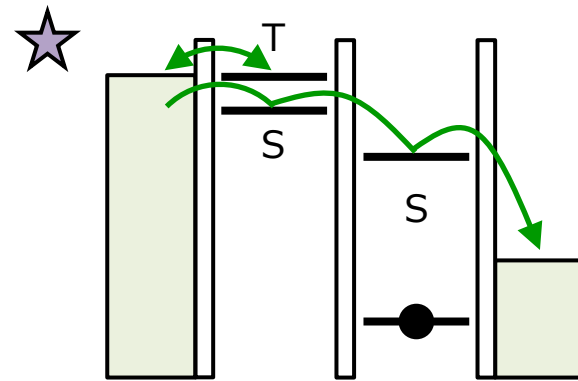
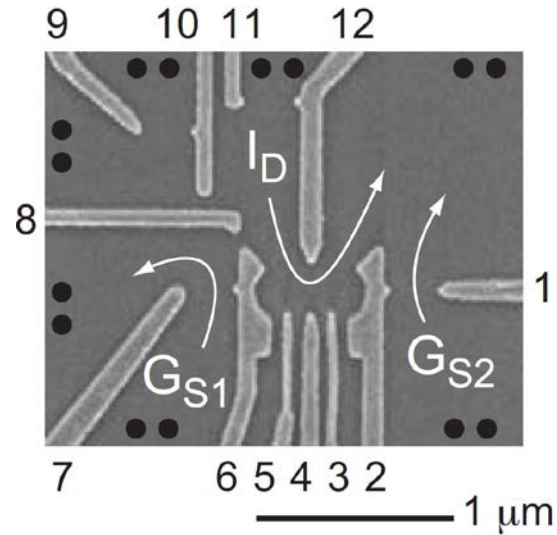
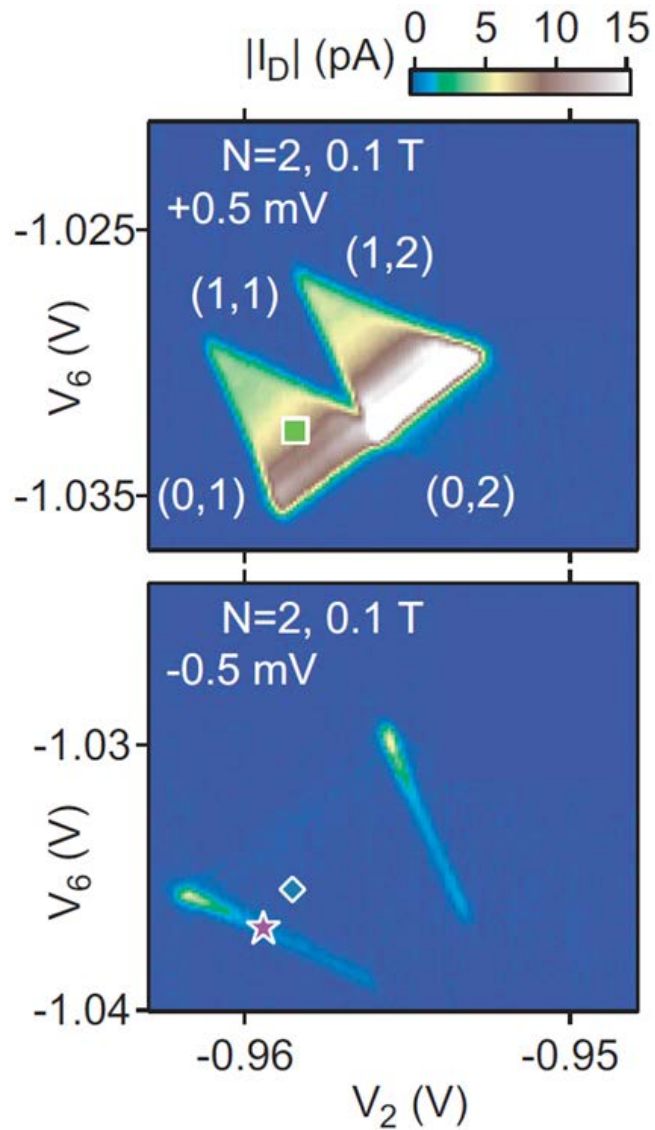


T→Sのトンネル禁止 "Sooner or later"



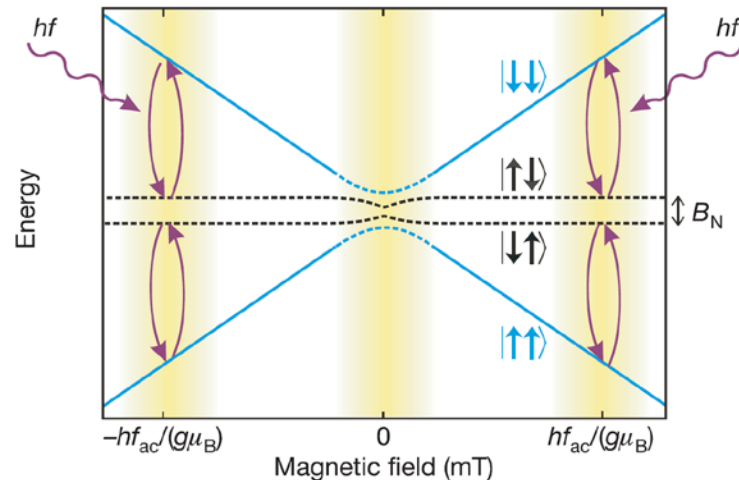
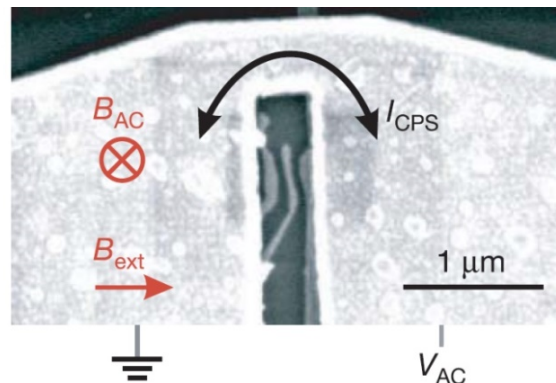
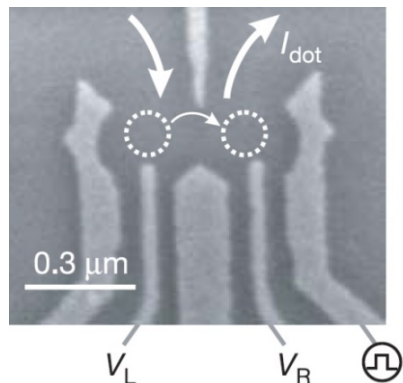
Phys. Rev. B **72**, 165308 (2005) Johnson *et al.*
 (cf. Science **297**, 1313 (2002) Ono *et al.*)

スピントロニクス

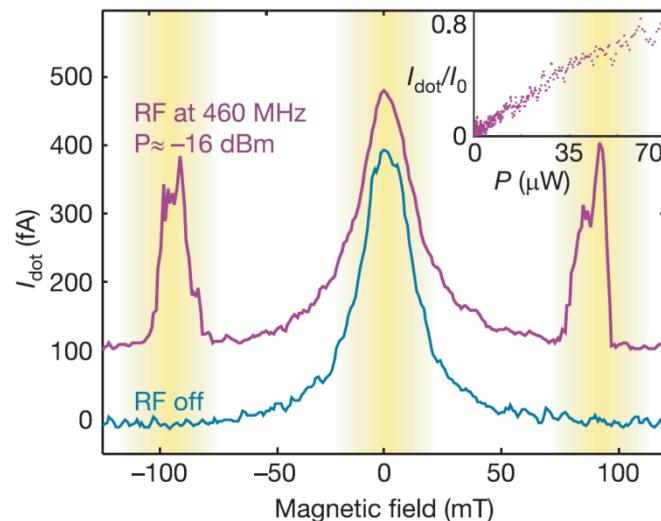


Phys. Rev. B **72**, 165308 (2005) Johnson *et al.*
 (cf. Science **297**, 1313 (2002) Ono *et al.*)

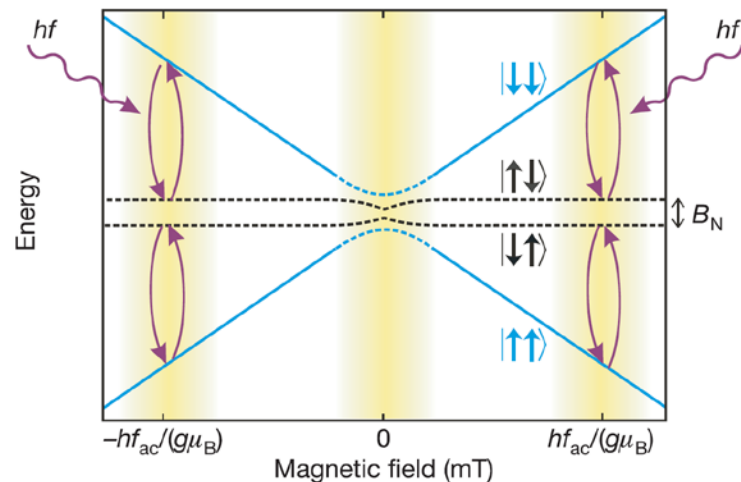
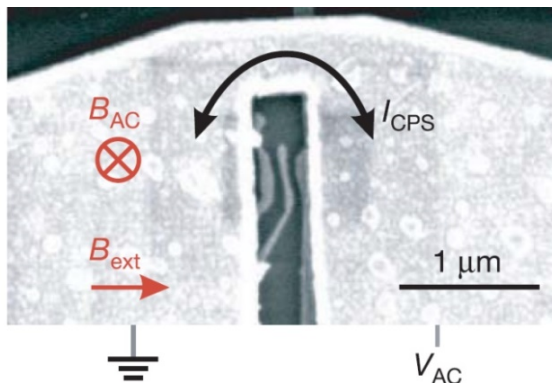
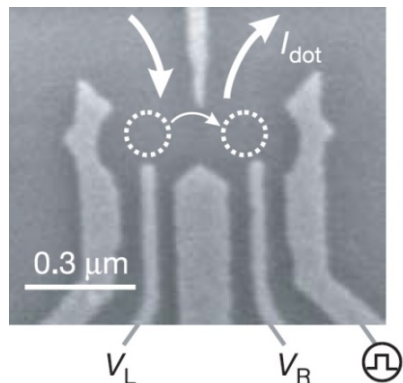
単一スピンの磁気共鳴



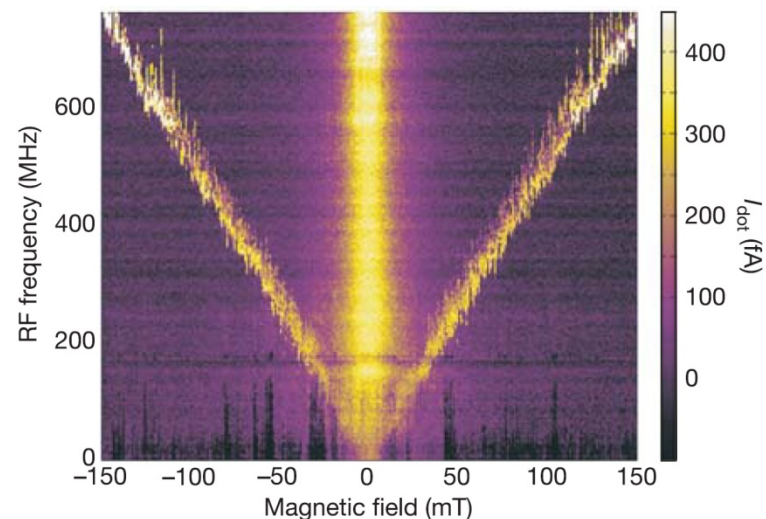
- 絶縁膜を挟んでドット上にストリップライン構造を作成
- 読み出しにスピントロニクスを利用 (低周波数での動作)
- ゼロ磁場付近では核磁場によるスピントロニクス解除



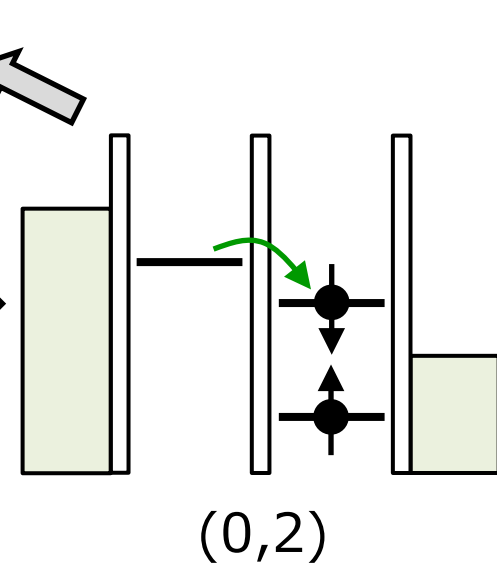
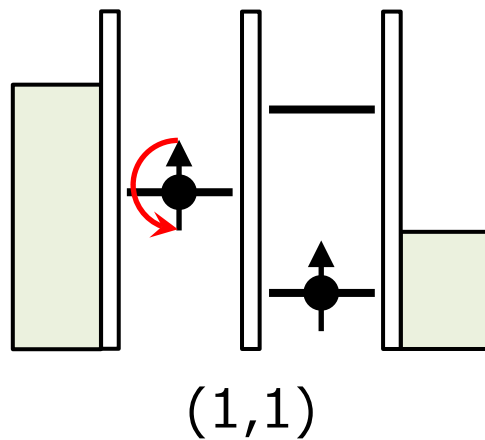
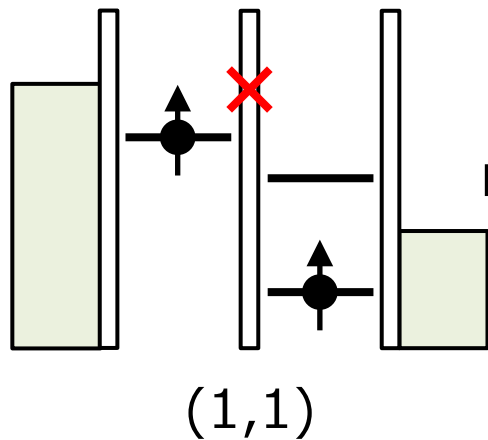
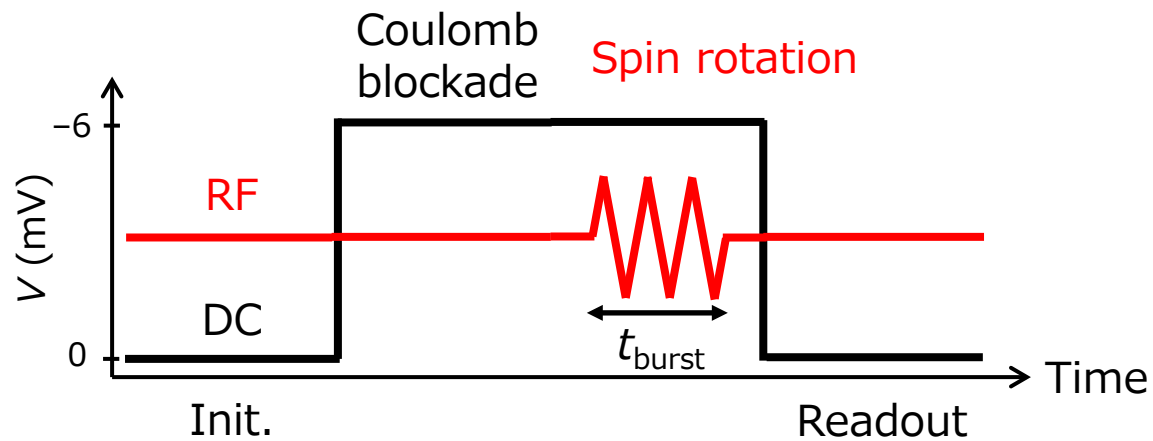
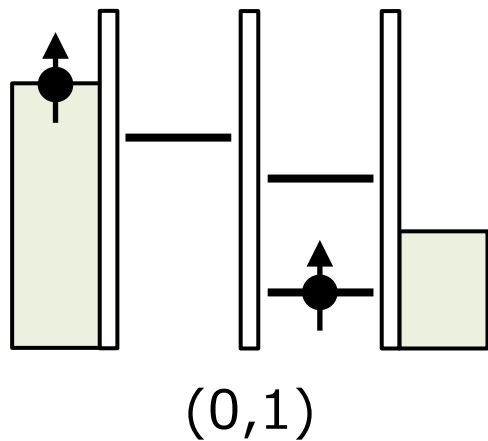
単一スピンの磁気共鳴



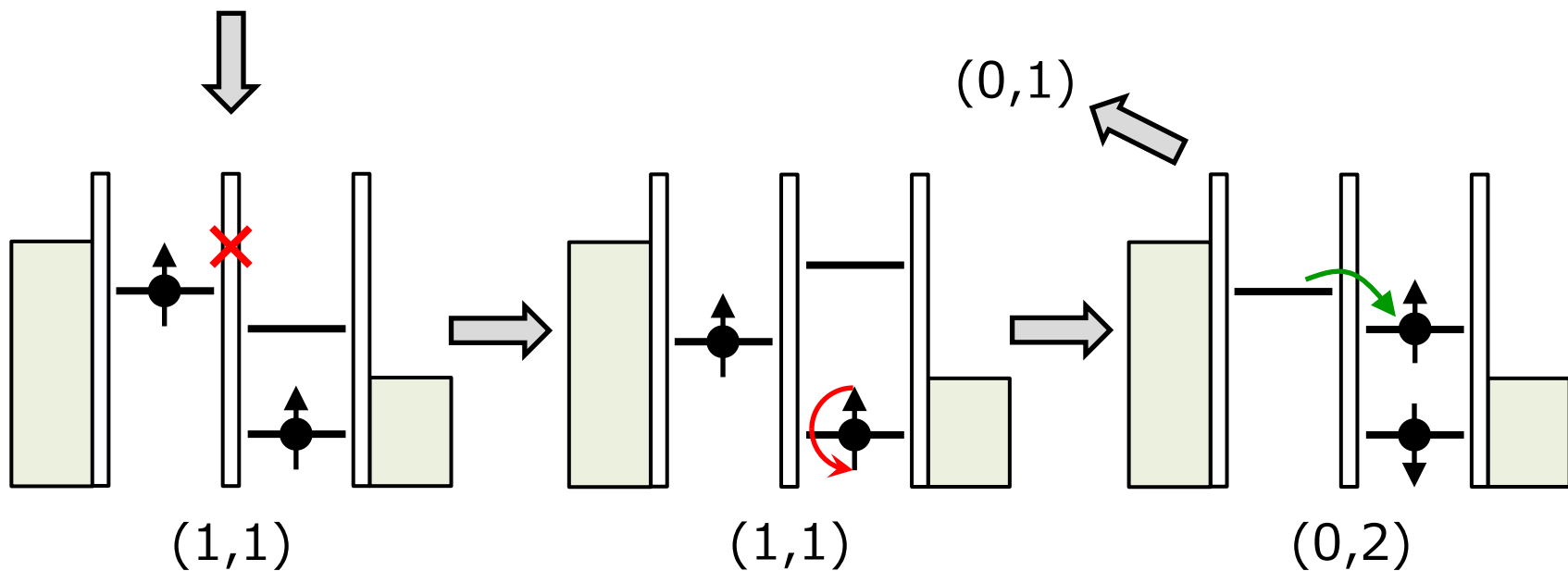
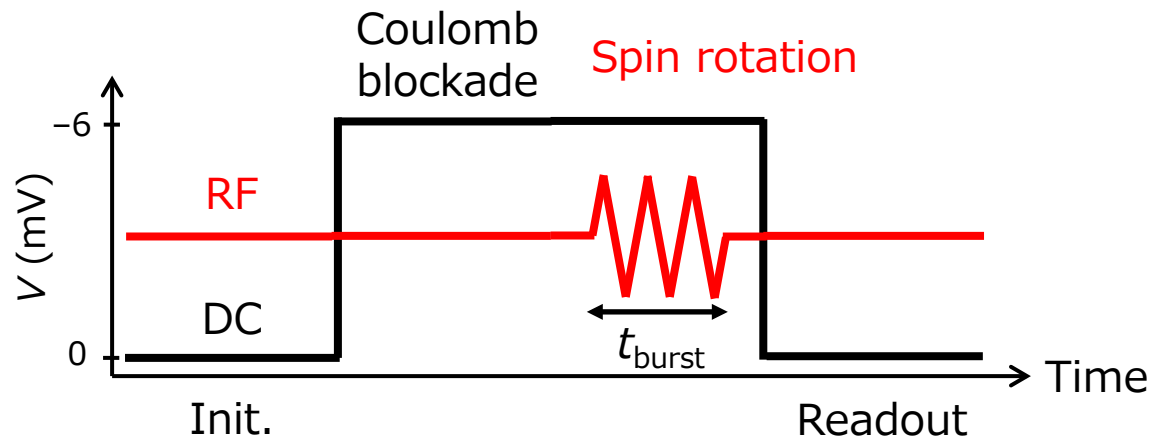
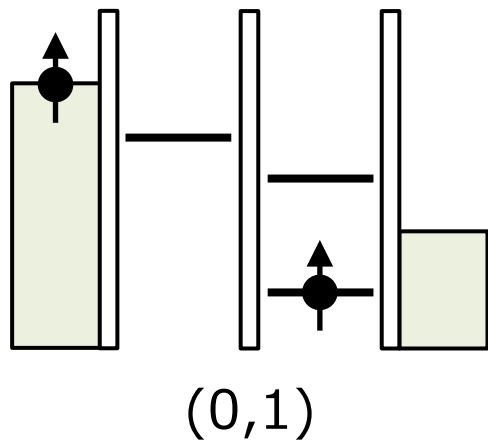
- 絶縁膜を挟んでドット上にストリップライン構造を作成
- 読み出しにスピントロケイドを利用 (低周波数での動作)
- ゼロ磁場付近では核磁場によるスピントロケイド解除



実験プロトコル

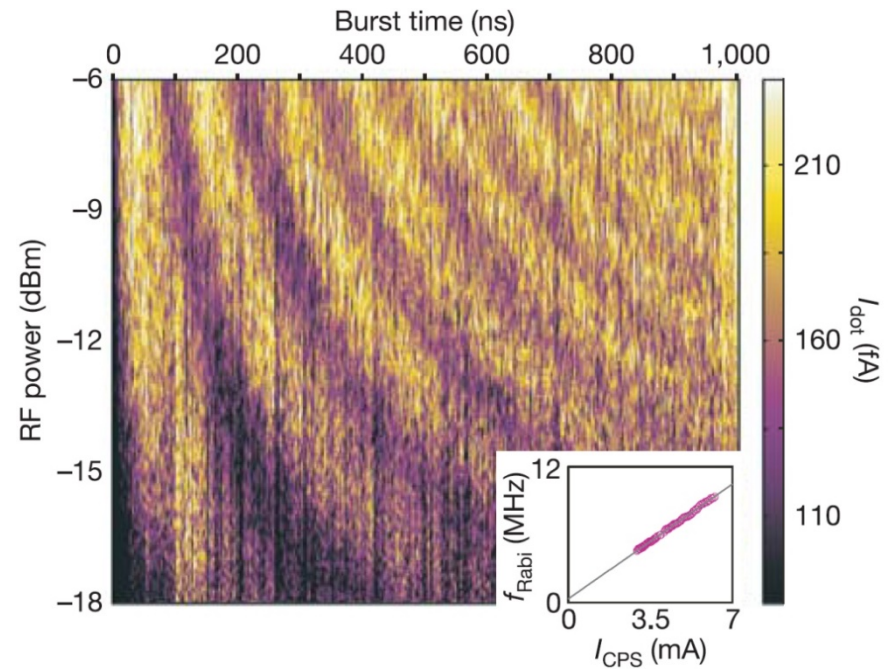
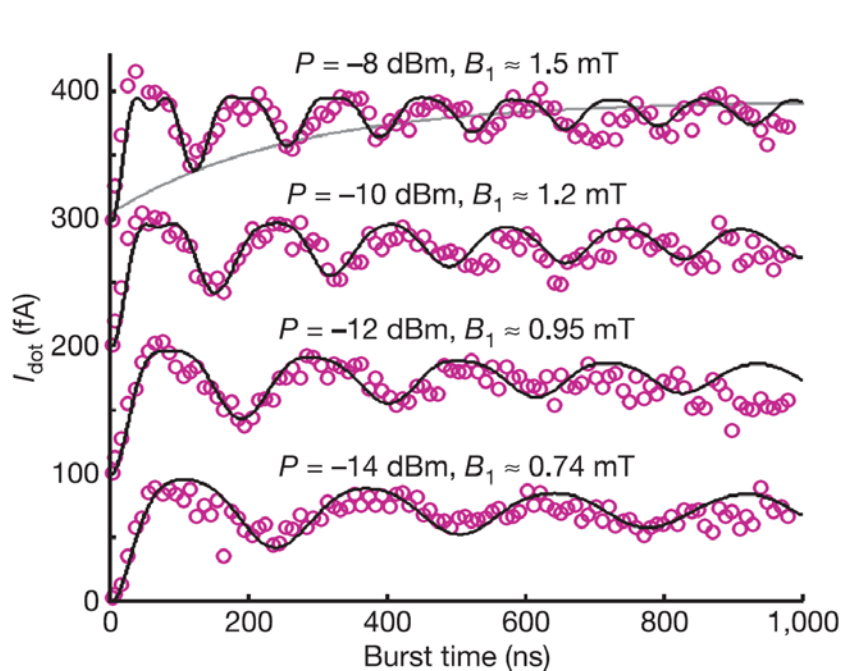
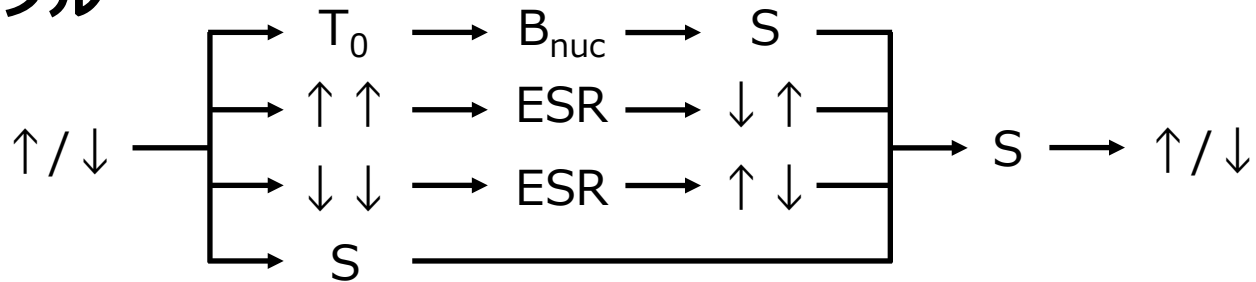


元のスピンの回転する場合



ラビ振動

可能なサイクル



J結合の制御

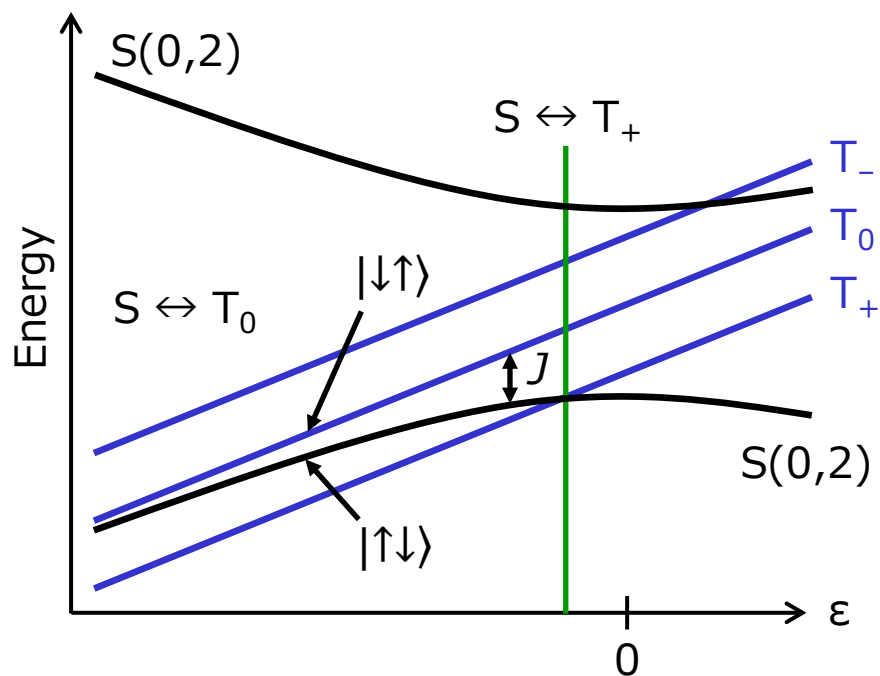
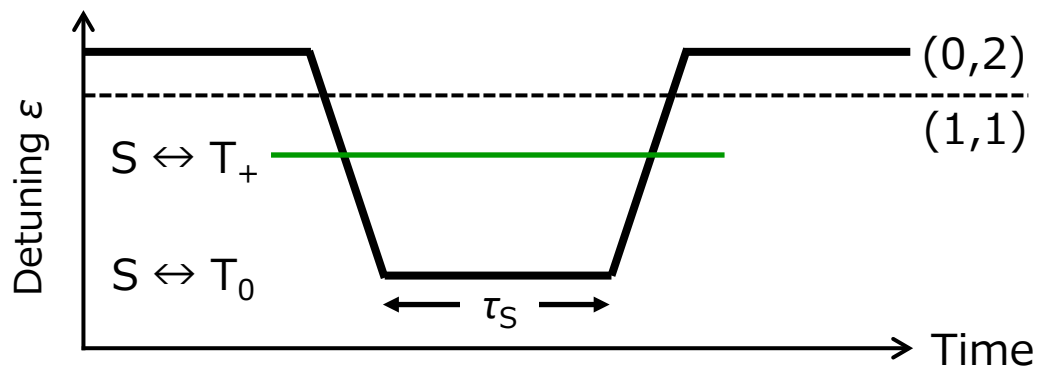
RESEARCH ARTICLES

Coherent Manipulation of Coupled Electron Spins in Semiconductor Quantum Dots

J. R. Petta,¹ A. C. Johnson,¹ J. M. Taylor,¹ E. A. Laird,¹ A. Yacoby,²
M. D. Lukin,¹ C. M. Marcus,¹ M. P. Hanson,³ A. C. Gossard³

We demonstrated coherent control of a quantum two-level system based on two-electron spin states in a double quantum dot, allowing state preparation, coherent manipulation, and projective readout. These techniques are based on rapid electrical control of the exchange interaction. Separating and later recombining a singlet spin state provided a measurement of the spin dephasing time, T_2^* , of ~ 10 nanoseconds, limited by hyperfine interactions with the gallium arsenide host nuclei. Rabi oscillations of two-electron spin states were demonstrated, and spin-echo pulse sequences were used to suppress hyperfine-induced dephasing. Using these quantum control techniques, a coherence time for two-electron spin states exceeding 1 microsecond was observed.

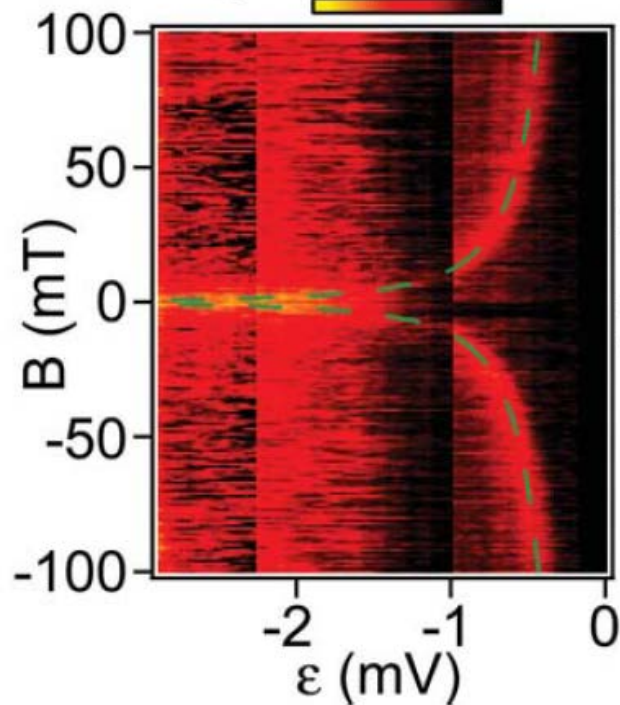
J結合の制御



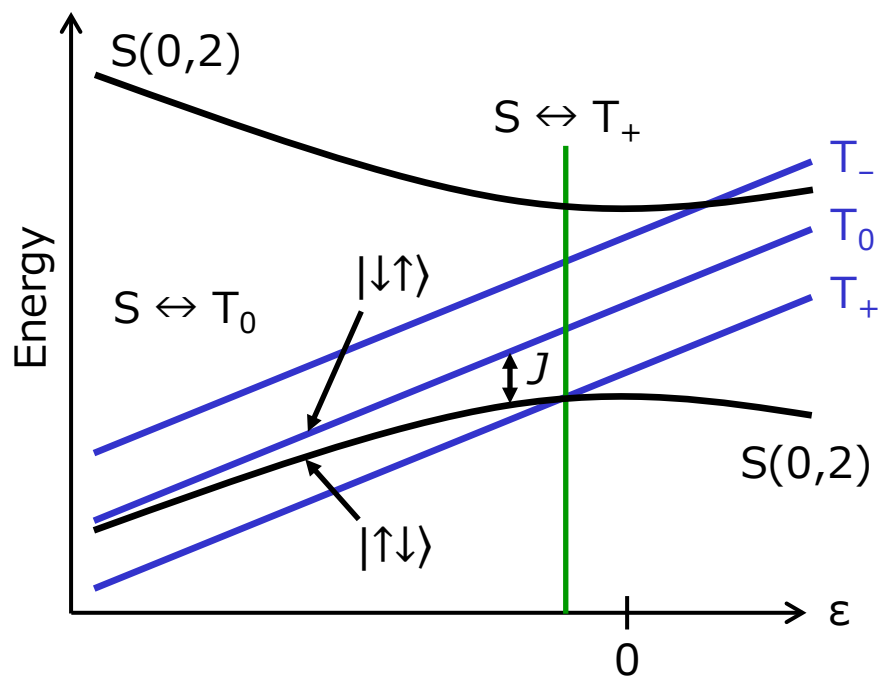
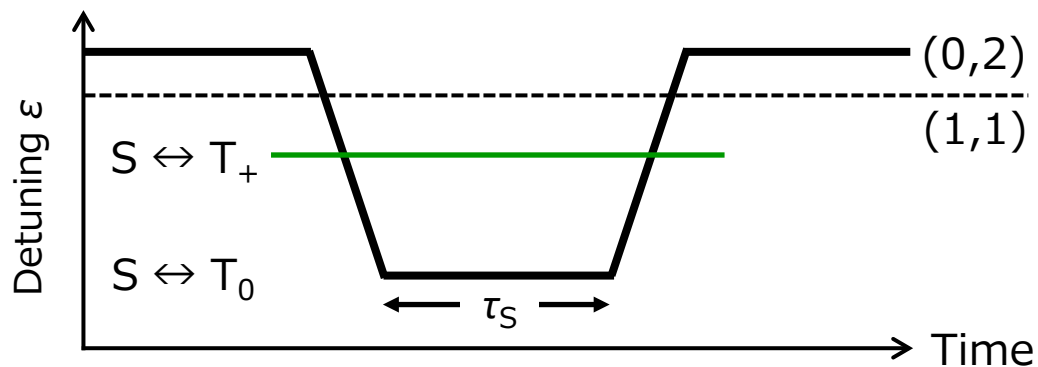
"Spin funnel"

$\tau_s = 200$ ns

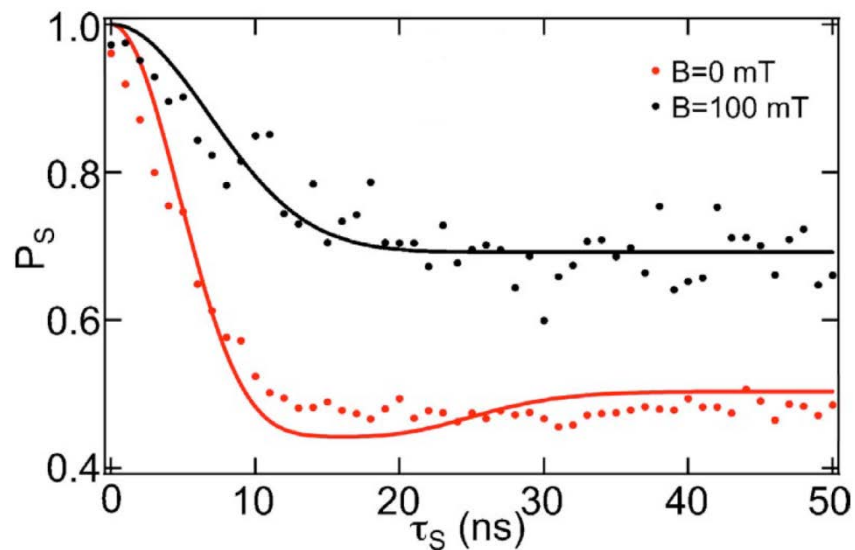
P_s 0.3 1.0



J結合の制御

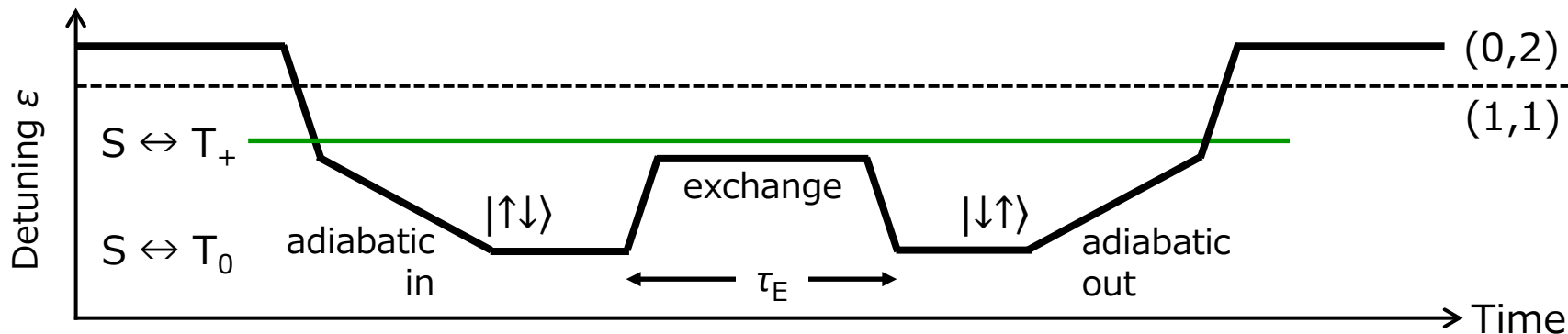


Singlet probability



Science **309**, 2180 (2005) Petta *et al.*

J結合の制御

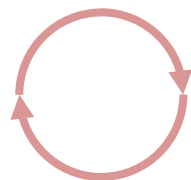


$\varepsilon \approx 0$ のとき

$$\begin{pmatrix} -J(\varepsilon) & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

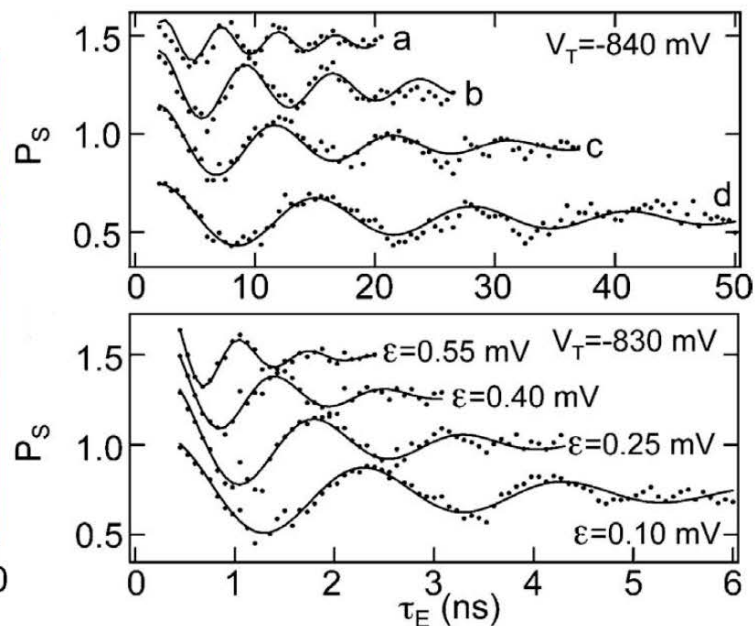
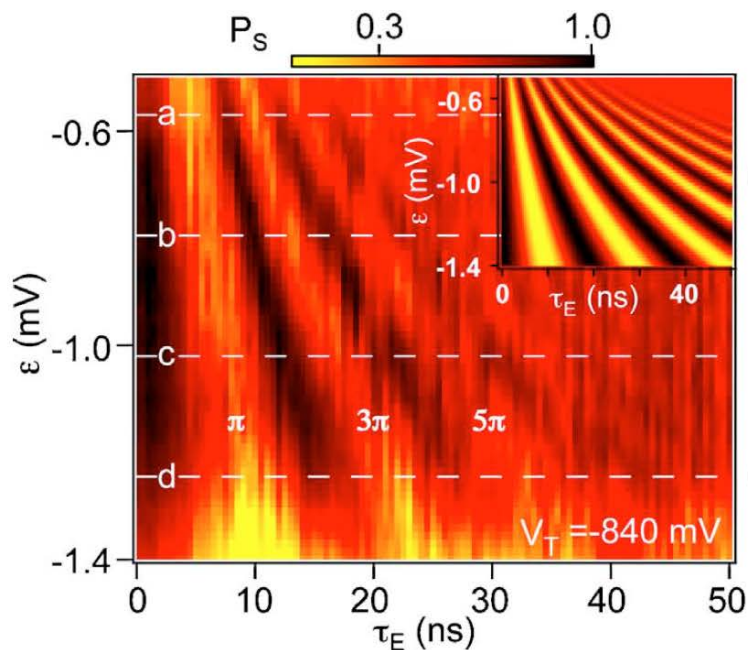
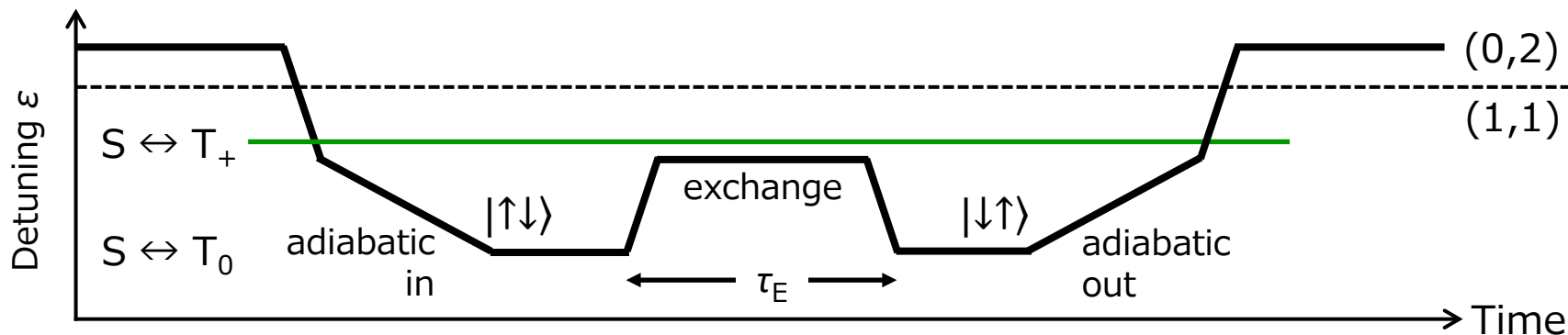
$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|T_0\rangle + e^{i\omega\tau_E} |S\rangle)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|T_0\rangle + |S\rangle) = |\uparrow\downarrow\rangle$$

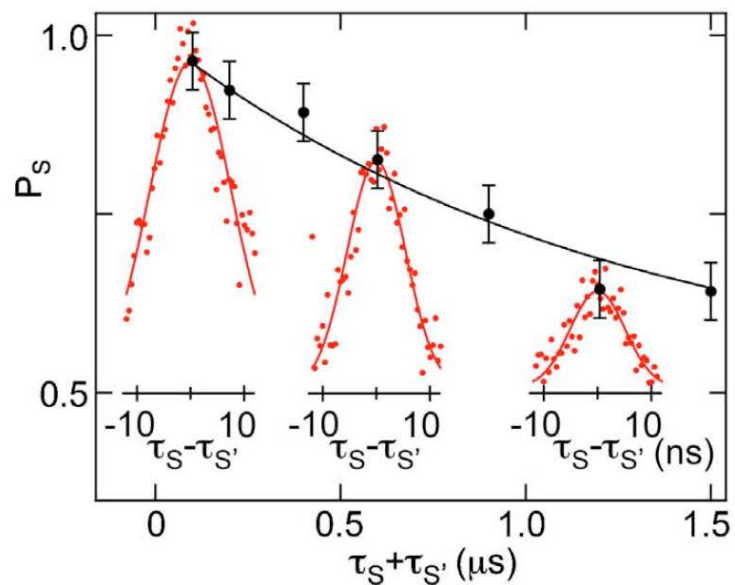
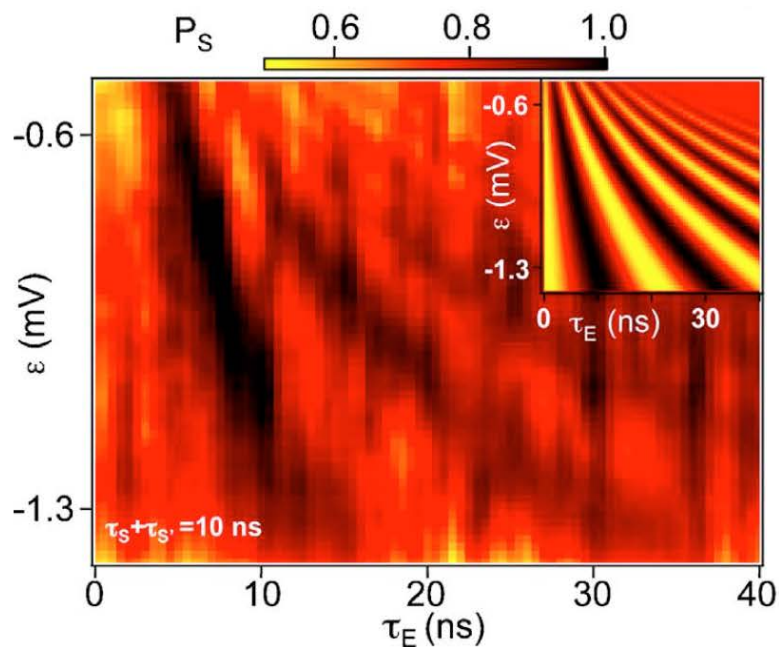
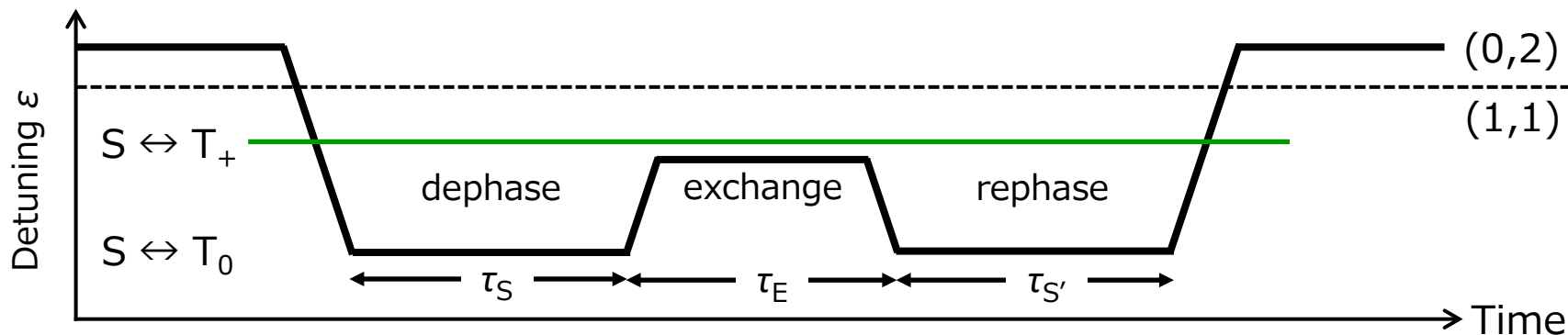


$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|T_0\rangle - |S\rangle) = |\downarrow\uparrow\rangle$$

J結合の制御



J結合の制御



GaAs系での進展

Coherent Control of a Single Electron Spin with Electric Fields

K. C. Nowack,^{*†} F. H. L. Koppens,[†] Yu. V. Nazarov, L. M. K. Vandersypen^{*}

Science **318**, 1430 (2007) Nowack *et al.*

Single-Shot Correlations and Two-Qubit Gate of Solid-State Spins

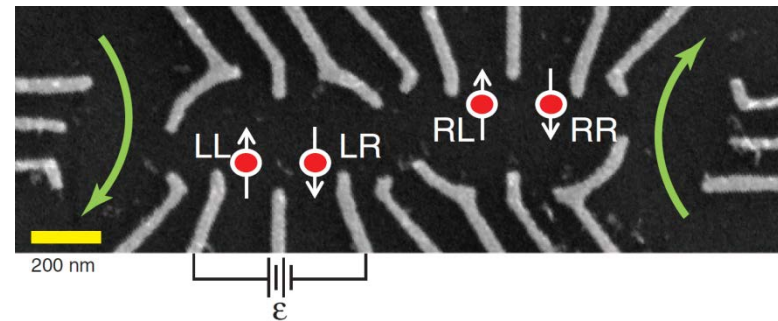
K. C. Nowack,^{1*} M. Shafiei,¹ M. Laforest,^{1†} G. E. D. K. Prawiroatmodjo,¹ L. R. Schreiber,¹ C. Reichl,² W. Wegscheider,² L. M. K. Vandersypen^{1*}

Science **333**, 1269 (2011) Nowack *et al.*

Demonstration of Entanglement of Electrostatically Coupled Singlet-Triplet Qubits

M. D. Shulman,^{1*} O. E. Dial,^{1*} S. P. Harvey,¹ H. Bluhm,^{1†} V. Umansky,² A. Yacoby^{1†}

Science **336**, 202 (2012) Shulman *et al.*



Self-consistent measurement and state tomography of an exchange-only spin qubit

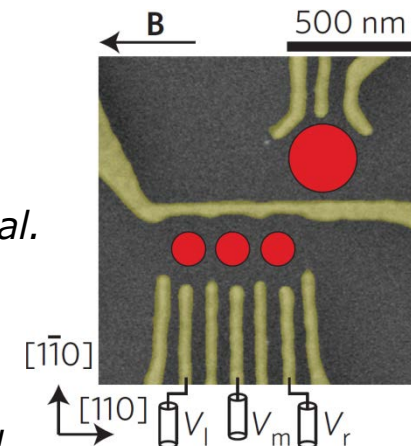
J. Medford¹, J. Beil^{1,2}, J. M. Taylor³, S. D. Bartlett⁴, A. C. Doherty⁴, E. I. Rashba¹, D. P. DiVincenzo^{5,6}, H. Lu⁷, A. C. Gossard⁷ and C. M. Marcus^{1,2*}

Nature Nano. **8**, 654 (2013) Medford *et al.*

Single-spin CCD

T. A. Baart^{††}, M. Shafiei^{††}, T. Fujita¹, C. Reichl², W. Wegscheider² and L. M. K. Vandersypen^{1*}

Nature Nano. **11**, 330 (2016) Baart *et al.*



SiGe, MOS系での進展

Coherent singlet-triplet oscillations in a silicon-based double quantum dot

B. M. Maune¹, M. G. Borselli¹, B. Huang¹, T. D. Ladd¹, P. W. Deelman¹, K. S. Holabird¹, A. A. Kiselev¹, I. Alvarado-Rodriguez¹, R. S. Ross¹, A. E. Schmitz¹, M. Sokolich¹, C. A. Watson¹, M. F. Gyure¹ & A. T. Hunter¹

Nature **481**, 344 (2012) Maune *et al.*

Electrical control of a long-lived spin qubit in a Si/SiGe quantum dot

E. Kawakami^{1‡}, P. Scarlino^{1‡}, D. R. Ward², F. R. Braakman^{1†}, D. E. Savage², M. G. Lagally², Mark Friesen², S. N. Coppersmith², M. A. Eriksson² and L. M. K. Vandersypen^{1*}

Nature Nano. **9**, 666 (2014) Kawakami *et al.*

An addressable quantum dot qubit with fault-tolerant control-fidelity

M. Veldhorst^{1*}, J. C. C. Hwang¹, C. H. Yang¹, A. W. Leenstra², B. de Ronde², J. P. Dehollain¹, J. T. Muhonen¹, F. E. Hudson¹, K. M. Itoh³, A. Morello¹ and A. S. Dzurak^{1*}

Nature Nano. **9**, 981 (2014) Veldhorst *et al.*

A two-qubit logic gate in silicon

M. Veldhorst¹, C. H. Yang¹, J. C. C. Hwang¹, W. Huang¹, J. P. Dehollain¹, J. T. Muhonen¹, S. Simmons¹, A. Laucht¹, F. E. Hudson¹, K. M. Itoh², A. Morello¹ & A. S. Dzurak¹

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

単一ドナー(Si:P)での進展

Single-shot readout of an electron spin in silicon

Andrea Morello¹, Jarryd J. Pla¹, Floris A. Zwanenburg¹, Kok W. Chan¹, Kuan Y. Tan¹, Hans Huebl^{1†}, Mikko Möttönen^{1,3,4}, Christopher D. Nugroho^{1†}, Changyi Yang², Jessica A. van Donkelaar², Andrew D. C. Alves², David N. Jamieson², Christopher C. Escott¹, Lloyd C. L. Hollenberg², Robert G. Clark^{1†} & Andrew S. Dzurak¹

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

A single-atom electron spin qubit in silicon

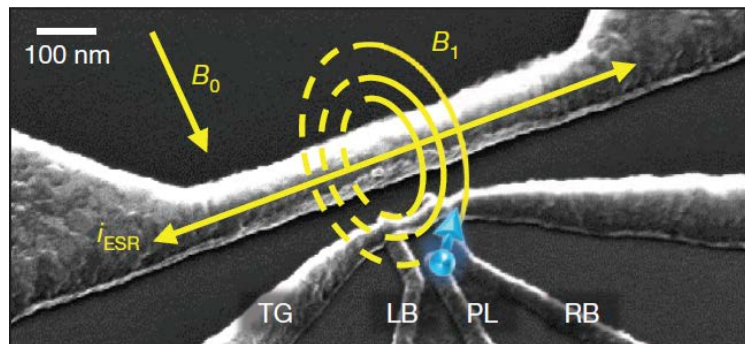
Jarryd J. Pla¹, Kuan Y. Tan^{1†}, Juan P. Dehollain¹, Wee H. Lim¹, John J. L. Morton^{2†}, David N. Jamieson³, Andrew S. Dzurak¹ & Andrea Morello¹

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

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

Jarryd J. Pla¹, Kuan Y. Tan^{1†}, Juan P. Dehollain¹, Wee H. Lim^{1†}, John J. L. Morton², Floris A. Zwanenburg^{1†}, David N. Jamieson³, Andrew S. Dzurak¹ & Andrea Morello¹

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



ディビンチェンゾの要請

- **量子計算の要素技術**

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

- **量子通信の要素技術**

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

参考書

- W. G. van der Wiel *et al.*
 - **“Electron transport through double quantum dots”**
Rev. Mod. Phys. **75**, 1 (2003)
- R. Hanson *et al.*
 - **“Spins in few-electron quantum dots”**
Rev. Mod. Phys. **79**, 1217 (2007)
- F. Zwanenburg *et al.*
 - **“Silicon quantum electronics”**
Rev. Mod. Phys. **85**, 961 (2013)