SCOPE成果発表会
2010.6.11

総務省「戦略的情報通信研究開発推進制度（SCOPE）」

半導体ナノ構造による
量子情報インターフェースの研究

東京工業大学・極低温物性研究センター

藤澤　利正

研究分担者：佐々木　智　（ＮＴＴ物性基礎研）
林　稔晶　（ＮＴＴ物性基礎研）
太田　剛　（ＮＴＴ物性基礎研）
江藤　幹雄　（慶應義塾大学）

量子情報技術への期待

量子コンピュータ

重ね合わせ状態を利用した量子並列計算

量子暗号

量子力学の原理に基づく秘匿性

要素技術:

- 初期化
- 量子演算
- 測定(観測)
- 集積化
- 十分なコヒーレンス時間
- 伝送

物理系

核スピン

原子状態

磁束量子

電荷状態

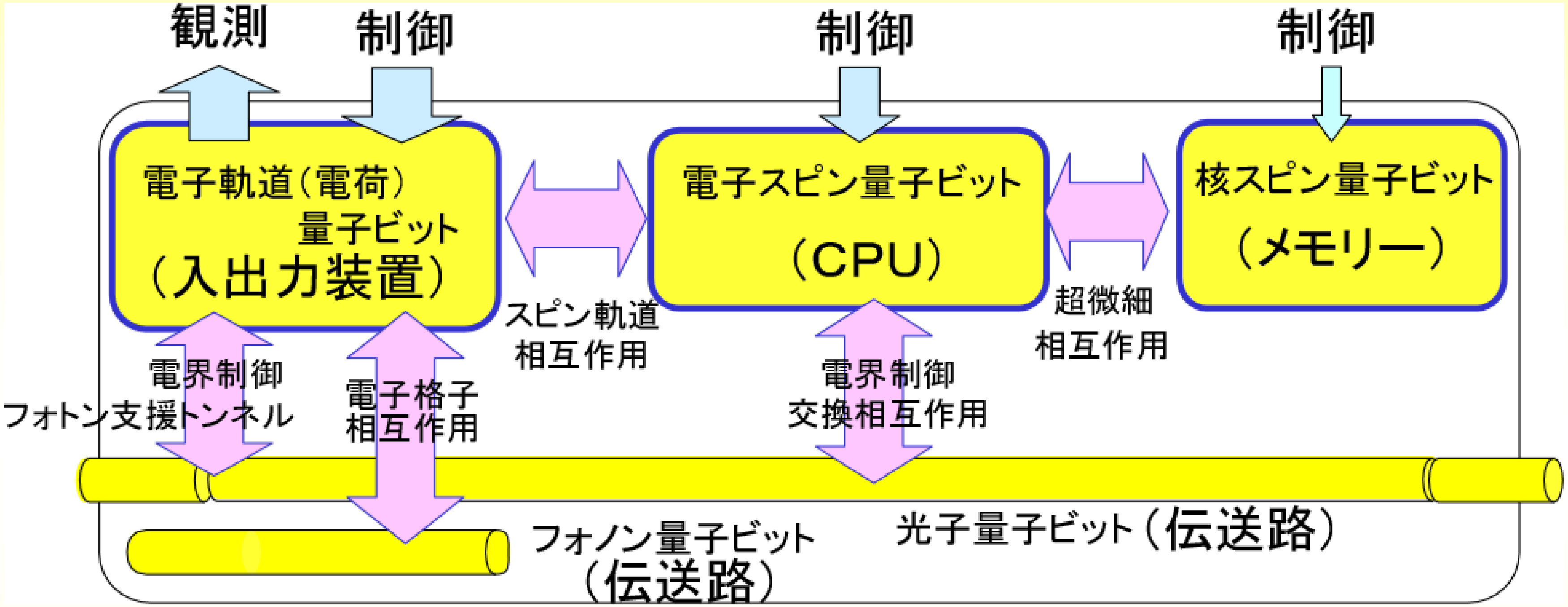
電子スピン

励起子

光子

量子情報インターフェース

半導体ナノ構造による量子情報インターフェースの研究



基礎実験(物性)&理論

半導体ナノ構造で現れる様々な相互作用に関する基礎物性(実験と理論)を研究し、量子情報インターフェースへの可能性を探る。

代表的な研究成果(2005~2009年度)

双方向単一電子電流計
Science 312, 1634 (2006)

広帯域キャパシタンス測定
APL 96, 032104 (2010)

スピン緩和選択則
スピン相関の形成手法
PRL 95, 056803 (2005)

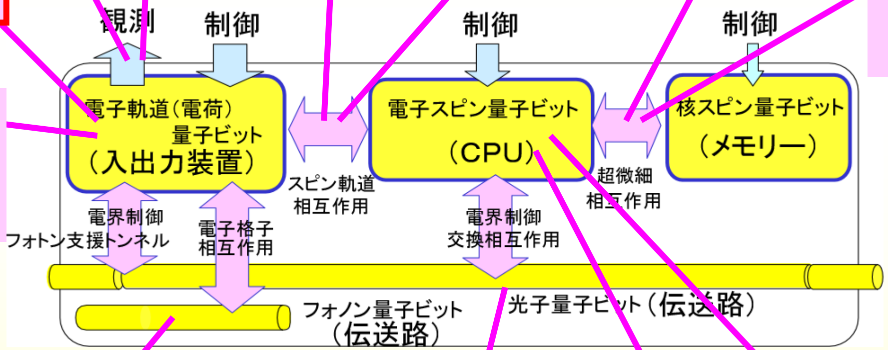
スピン流の生成方法
JPSJ 74, 1934 (2005)

電子スピンと核スピンのベル状態
PRB 80, 205206 (2009)

電荷量子ビットによる
多機能二量子ビット操作
PRL 103, 056802 (2009)

核スピン偏極下での
スピン閉塞漏れ電流の解析解
Physica E 40, 1149 (2008)

カーボンナノチューブ
三重量子ドット
Nano Lett. 8, 1055 (2008)



表面弾性波フォノンによる分光測定
PRL 96, 136807 (2006)

近藤効果とファノ効果の競合
Phys. Rev. Lett. 103, 266806 (2009)

少数電子系のスピン状態
Phys. Rev. B 76, 041302, (2007)

エッジマグネトプラズモンの
時間分解測定
PRB 81, 085329(2010)

総計(2005~2009年度)

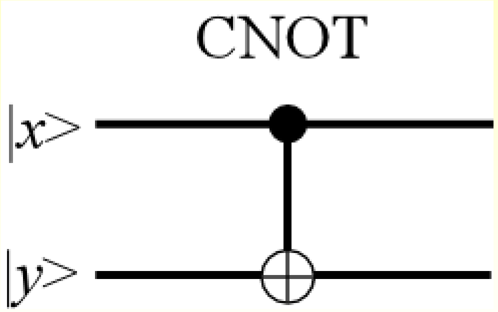
査読付き論文数	54 件
口頭発表数	142 件
申請特許数	3 件
報道発表	2 件

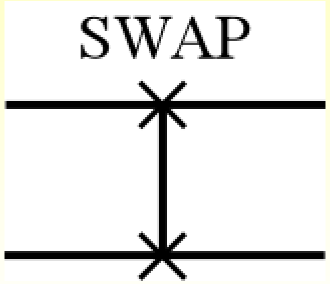
多機能二量子ビット操作

G. Shinkai, T. Hayashi, T. Ota, and T. Fujisawa,
"Correlated coherent oscillations in coupled semiconductor charge qubits",
Phys. Rev. Lett. 103, 056802 (2009).

T. Fujisawa, G. Shinkai, T. Hayashi, and T. Ota,
'Multiple Two-qubit Operations for a Coupled Semiconductor Charge Qubit'.
to be published (2010).

Two-qubit unitary operators





量子計算アルゴリズムの実現に重要

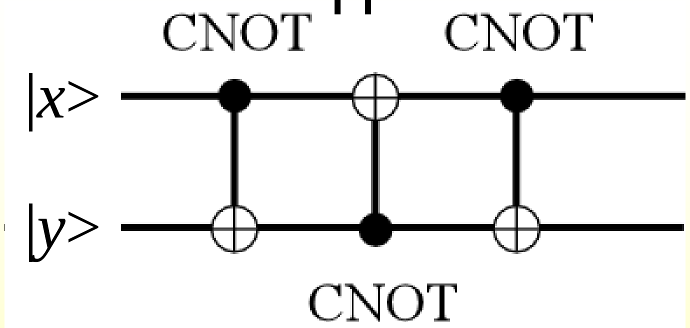
量子情報の交換(量子情報インターフェース)
エンタングルメント生成(√SWAP)に便利

通常、どちらか一方が実現されている

||

$$U_{CNOT} = R_{1y}\left(-\tfrac{\pi}{2}\right)R_{1z}\left(\tfrac{\pi}{2}\right)R_{2z}\left(-\tfrac{\pi}{2}\right)\sqrt{\mathrm{SWAP}}\,R_{1z}\left(\tfrac{\pi}{2}\right)\sqrt{\mathrm{SWAP}}\,R_{1y}\left(\tfrac{\pi}{2}\right)$$

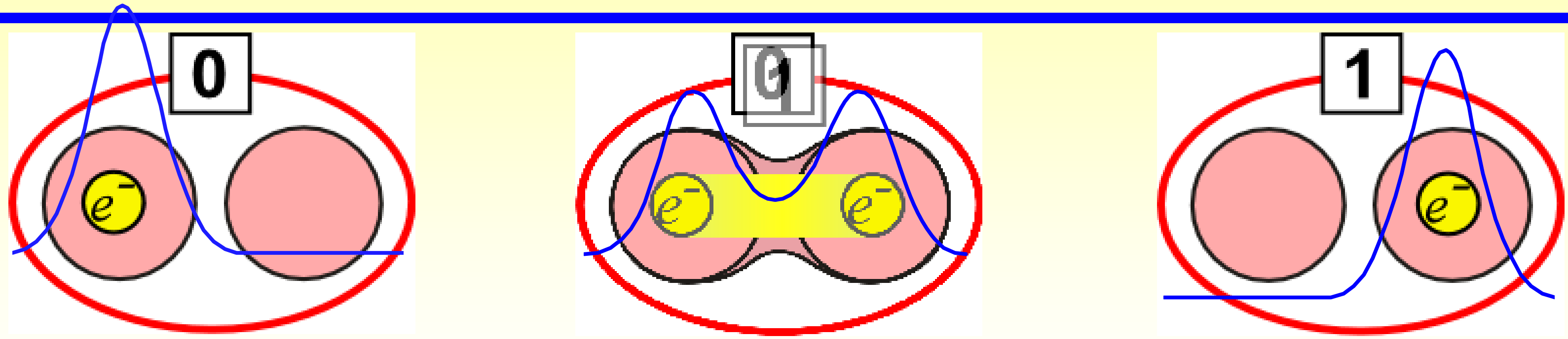
||



1量子ビットとの組み合わせによって、相互に実現可能であるが、少数ステップが望まれる。

半導体電荷量子ビットにより、
重要な2量子ビットを各々1ステップで実現する。

Semiconductor charge qubit



Advantages:

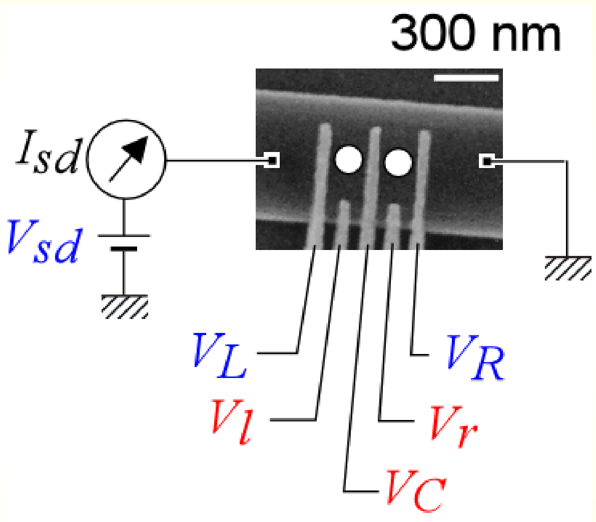
- **Potentially scalable with nanofabrication techniques**
  EB lithography, etc.
- **Electrically tunable qubit parameters**
- **Mature nanoelectronics**
  Single electron circuits, Charge detector (QPC), etc.
- **Materials**
  Semiconductors (GaAs, Si, …), molecules, etc.
- **Insensitive to nuclear spins!**

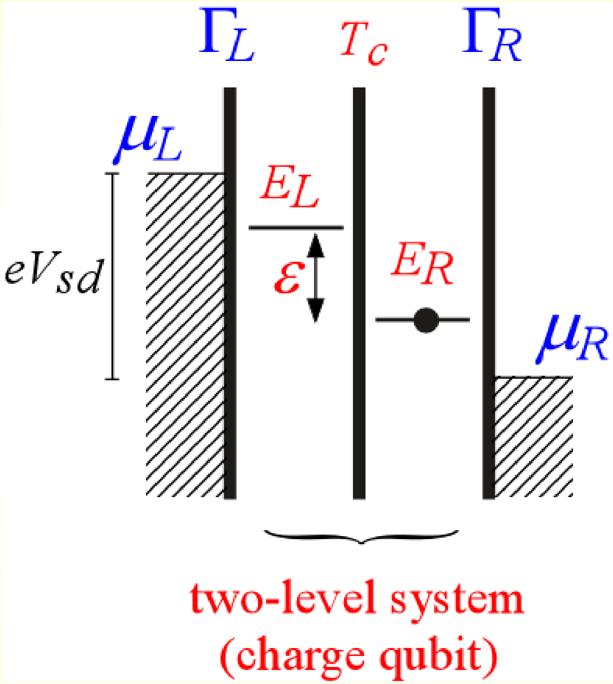
Disadvantages:

- **Short coherence time**
  Electron-phonon coupling
  Background charge fluctuation

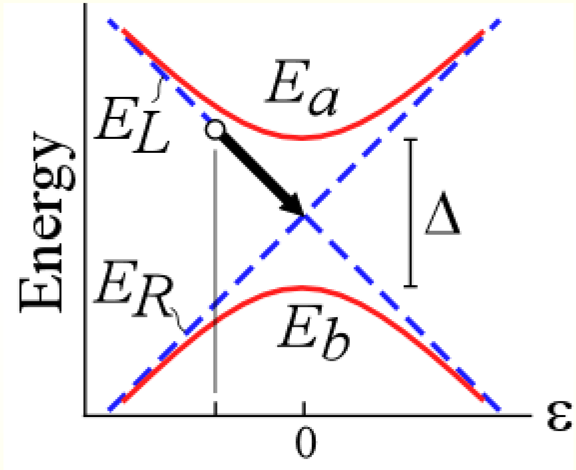
Semiconductor charge qubit

A double quantum dot
fabricated in AlGaAs/GaAs 2DEG
(schematically shown by circles)





$$H = \frac{1}{2}\varepsilon\sigma_z + T_c\sigma_x$$



Approximate number of electrons: 10 ~ 30

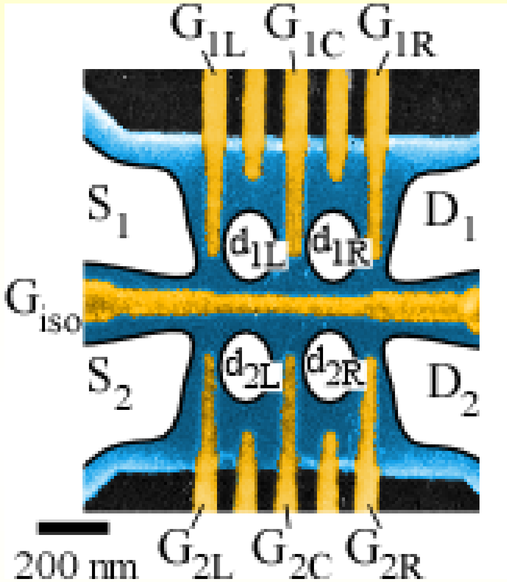
Lattice temp. ~ 20 mK (2 ueV)
Electron temp. ~ 100 mK (9 ueV)

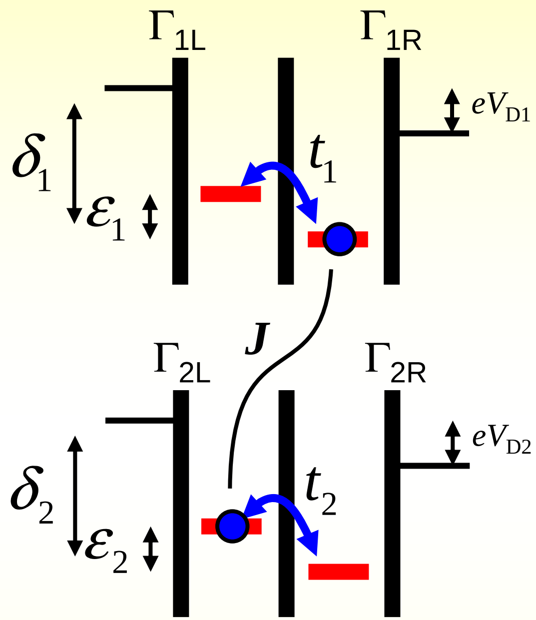
<

Charging energy of each dot: ~ 1 meV
Typical energy spacing in each dot: ~200 ueV
Electrostatic coupling energy: ~200 ueV

Experimental parameters in the device

SEM image of the device





Qubit Hamiltonian

$$H_{\mathrm{DQD1}} = \tfrac{1}{2}\varepsilon_1\sigma_{1z} + t_1\sigma_{1x}$$

$$H_{\mathrm{DQD2}} = \tfrac{1}{2}\varepsilon_2\sigma_{2z} + t_2\sigma_{2x}$$

$$H_{\mathrm{int}} = \tfrac{1}{4}J\sigma_{1z}\sigma_{2z}$$

$\varepsilon_1,\varepsilon_2$: Detuning of Qubit 1 and 2

t_1,t_2: Tunneling coupling of Qubit 1 and 2

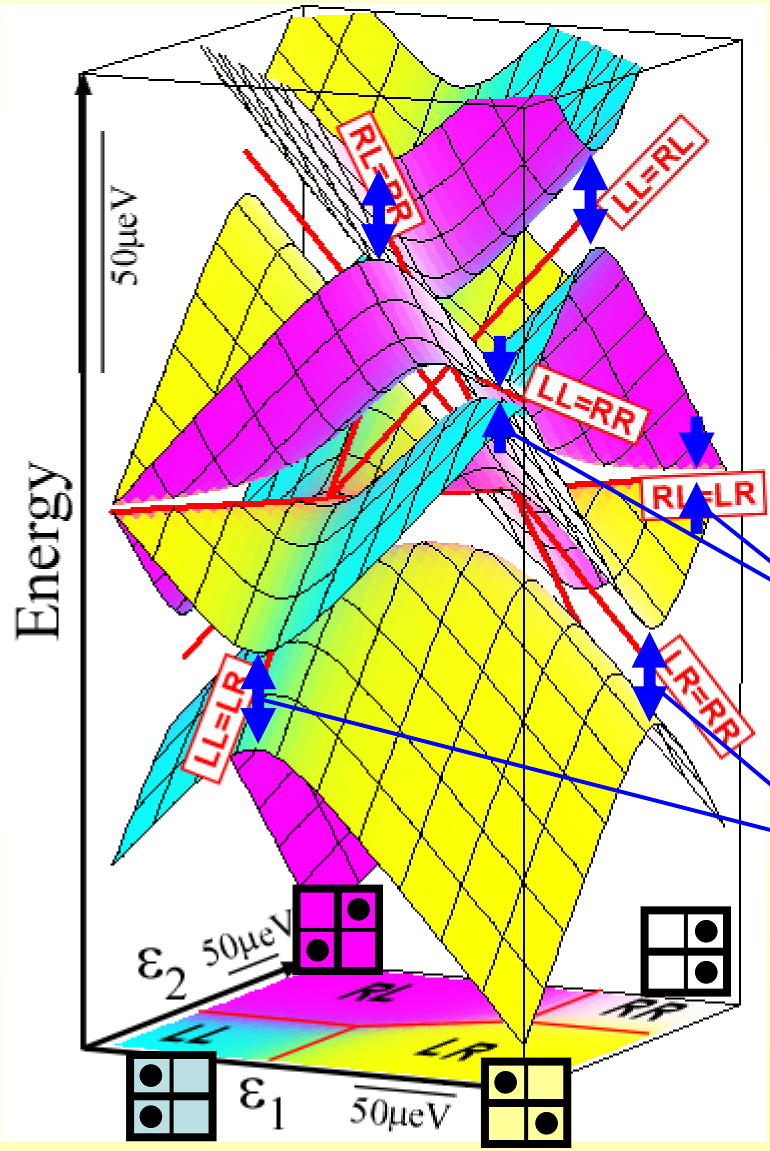
J: Electrostatic coupling between the two qubits

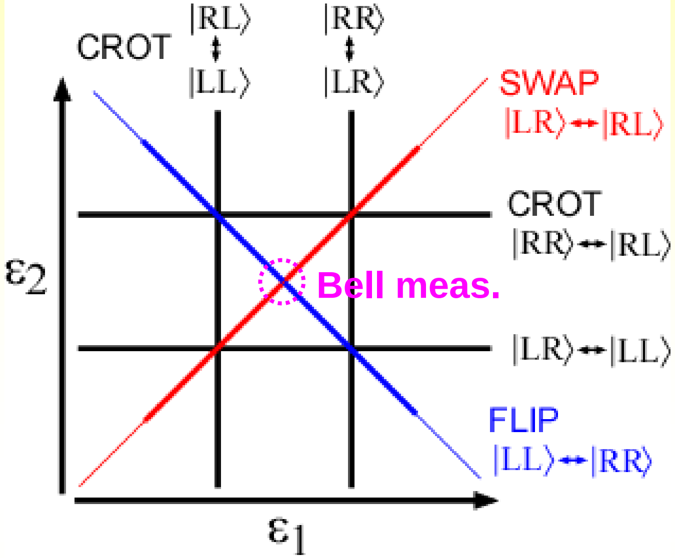
δ_1,δ_2: Average electrochemical potentials of Qubit 1 and 2

$\Gamma_{1L},\Gamma_{1R},\Gamma_{2L},\Gamma_{2R}$: Tunnel rates to the leads

eV_{1D}, eV_{2D} : Bias voltages of Qubit 1 and 2

Eigenenergies of the two-qubit system





2nd order coupling $\sim \dfrac{J t_1 t_2}{|\varepsilon|^2 - J^2/4}$

Correlated coherent oscillations

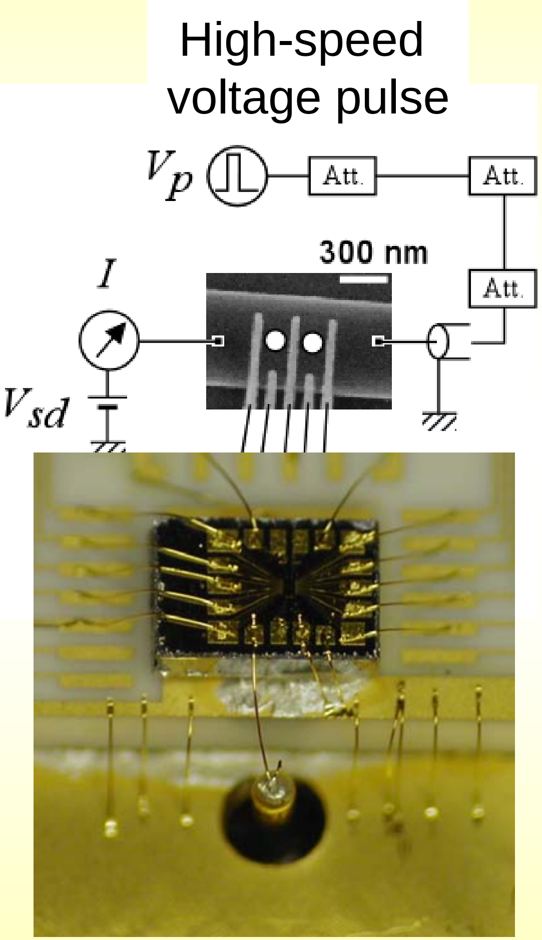
(SWAP,FLIP,BELL)

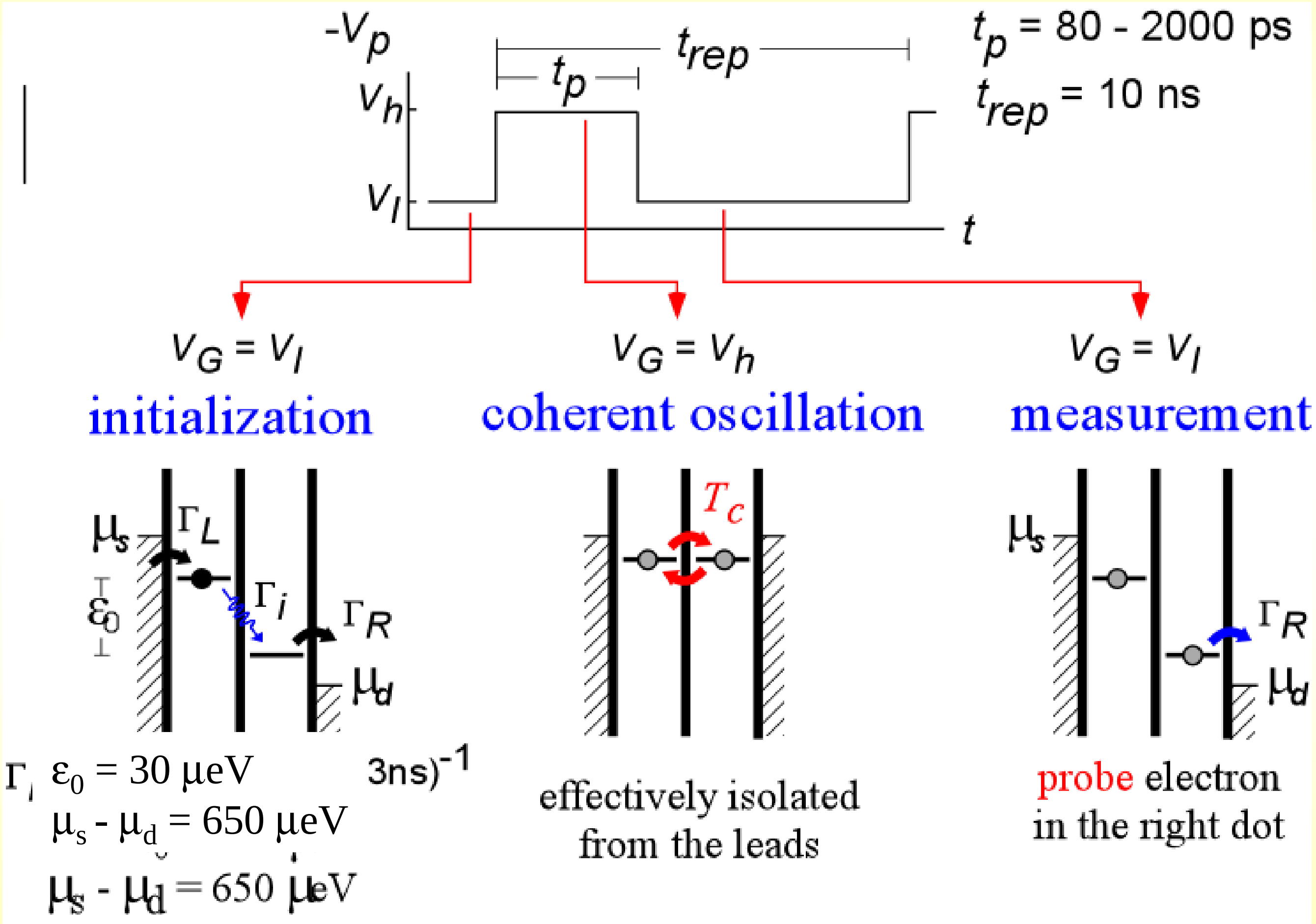
1st order coupling $t_1,\ t_2$

Controlled coherent oscillations

(CROT)

High-speed pulse measurement

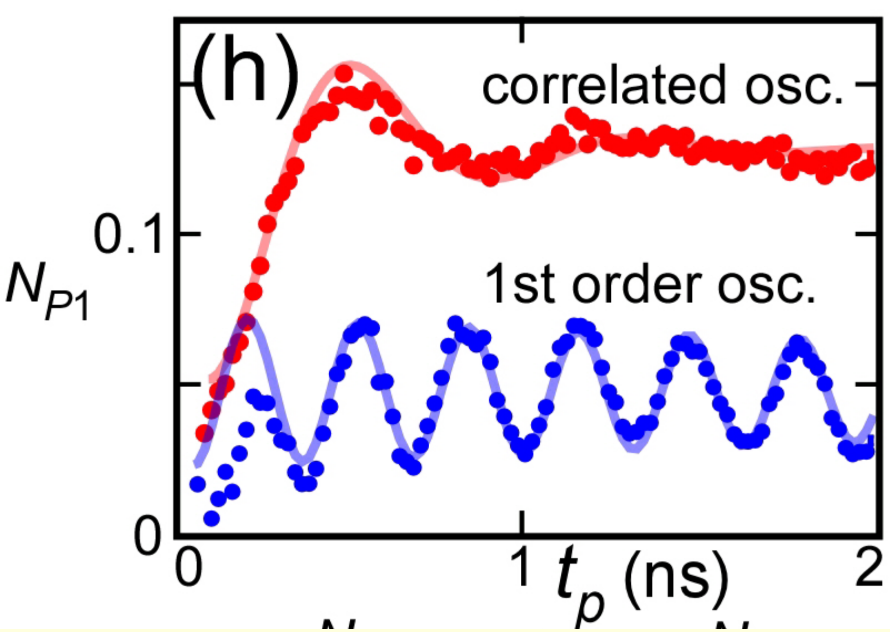




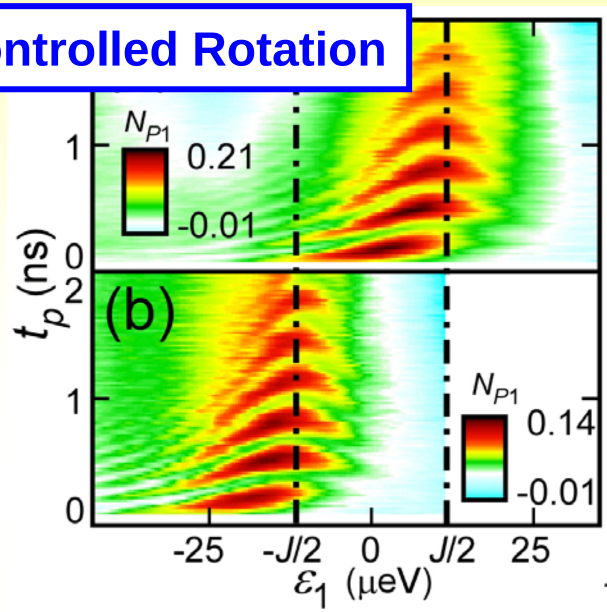
$$I_{mod} = I(t_p) - I(t_p = 0)$$

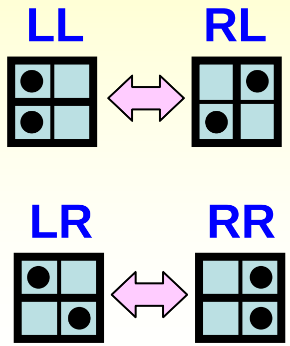
= (coherent pumping current) + (reduction of inelastic current)

Experiments

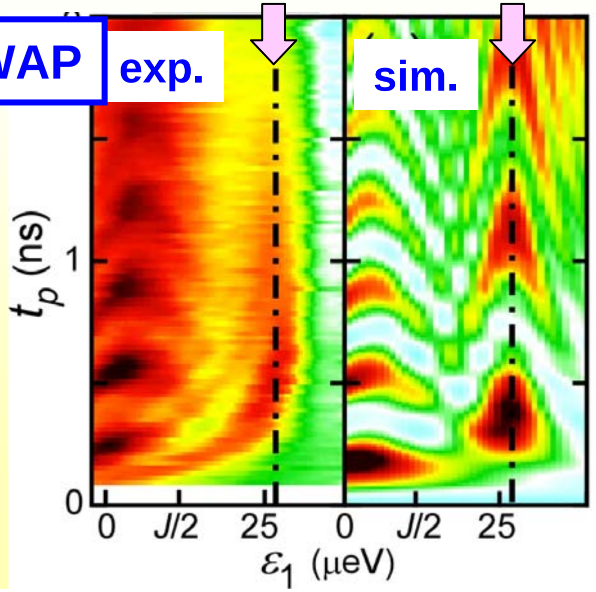


Controlled Rotation



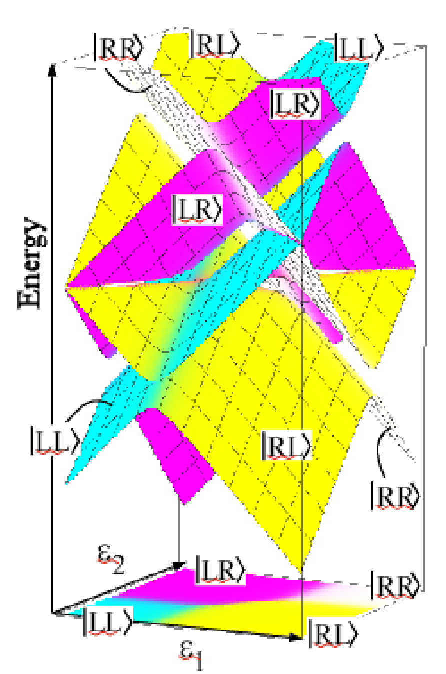


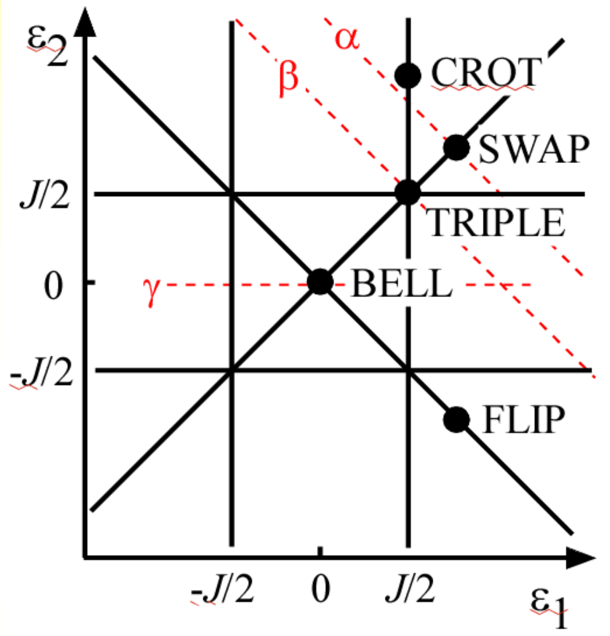
~SWAP

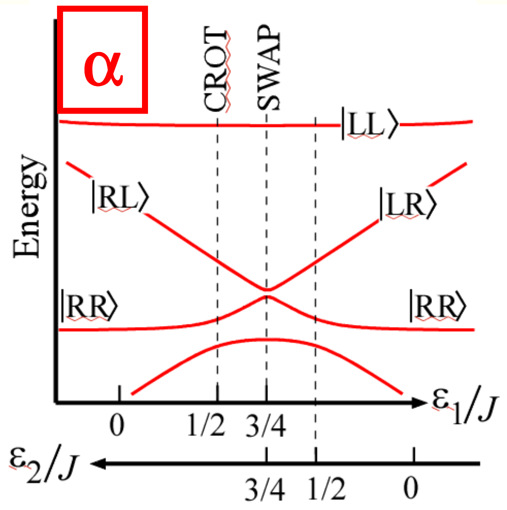


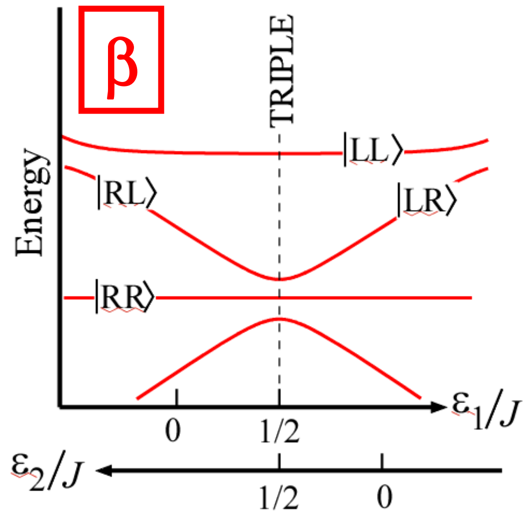
G. Shinkai et al., Phys. Rev. Lett. 103, 056802 (2009).

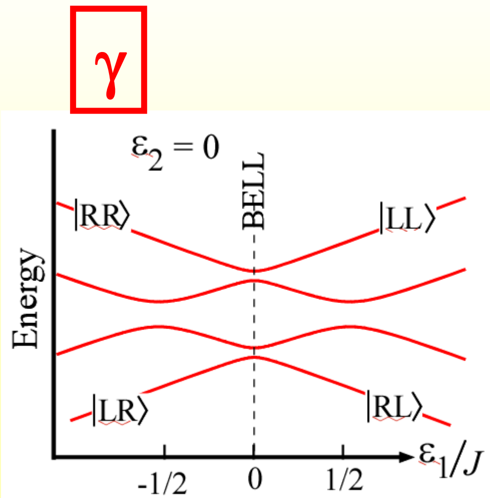
Multiple quantum operations







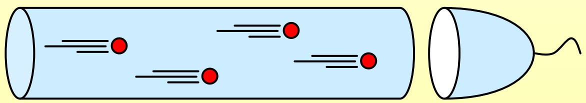
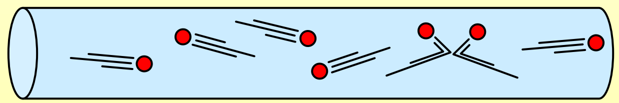




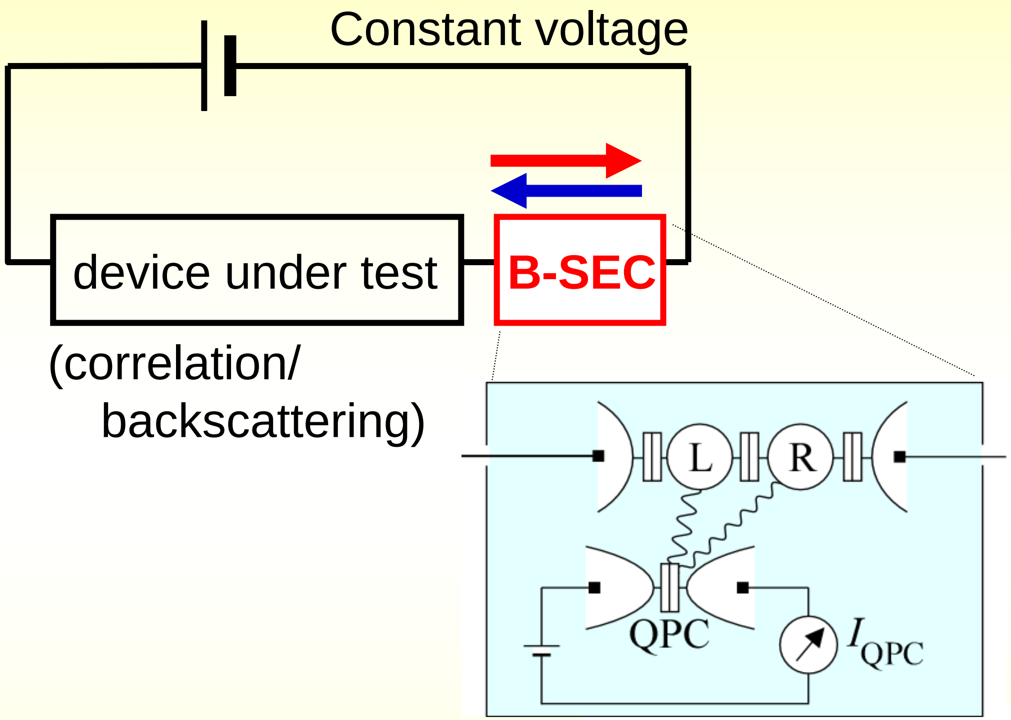
単一電子電流計

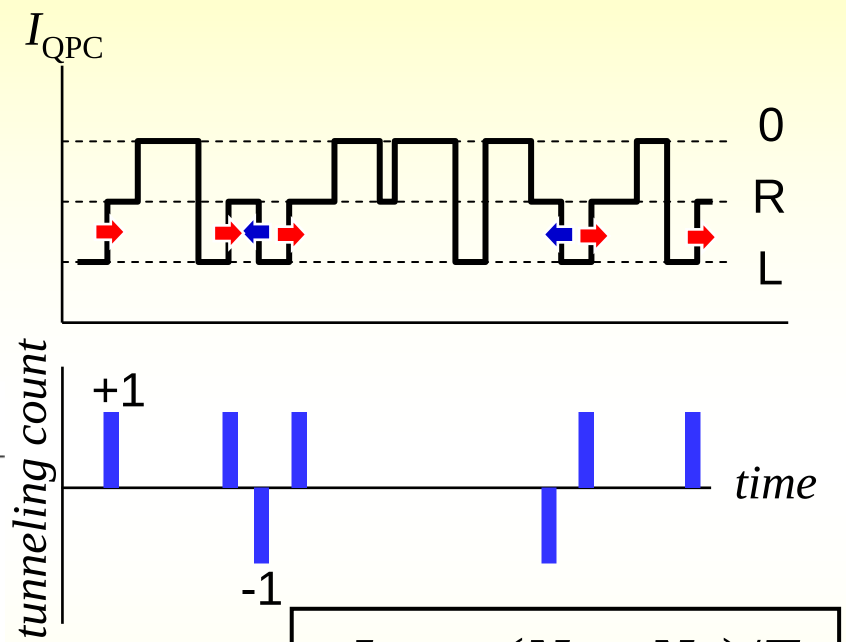
T. Fujisawa, R. Tomita, T. Hayashi, and Y. Hirayama,
"Bidirectional counting of single electrons",
Science 312, 1634 (2006).

Photon counting vs. Electron counting

	Photon counting (optical light)	Electron counting (Electrical current)
Interests	photon statistics coherent/squeezed state entanglement	electron statistics unexplored cf. low-freq. shot noise sub-Poissonian fractional charge higher-order moment
Interaction	non-interacting (in vacuum and fiber) (usually) unidirectional  Photon counter	interacting electron-electron (-environment) backscattering/correlation Bidirectional counting is essential 

Bidirectional single-electron counter (B-SEC)





$$\langle I \rangle = \mathrm{e}\,(N_+ - N_-)/T_p$$

Ideal electron counter

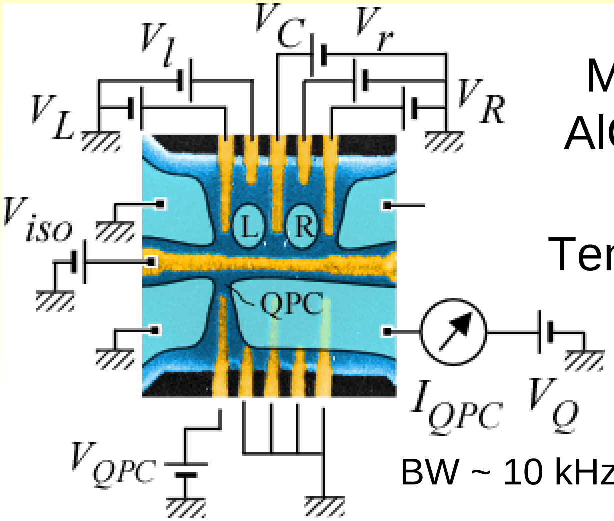
[sensitivity] counting single-electron transport (phase will be lost)

[speed] high bandwidth for detecting individual electron transport

[bidirectional] counting forward and backward transport

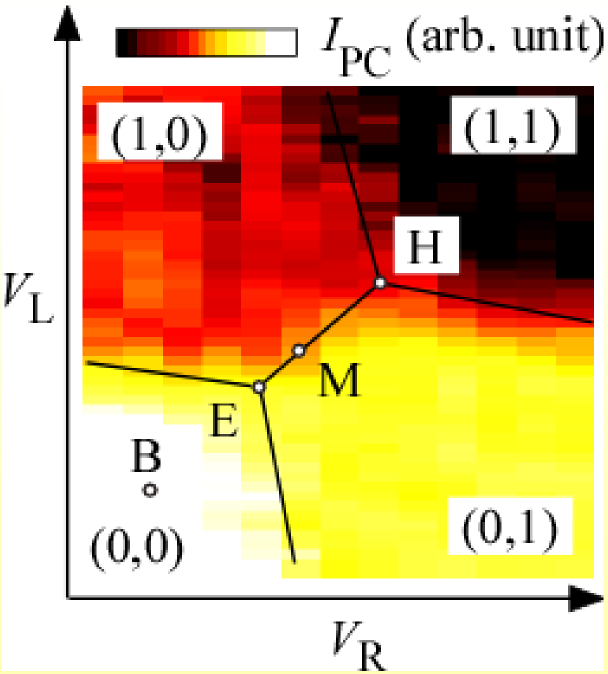
[zero impedance] no scattering in SEC (ballistic)

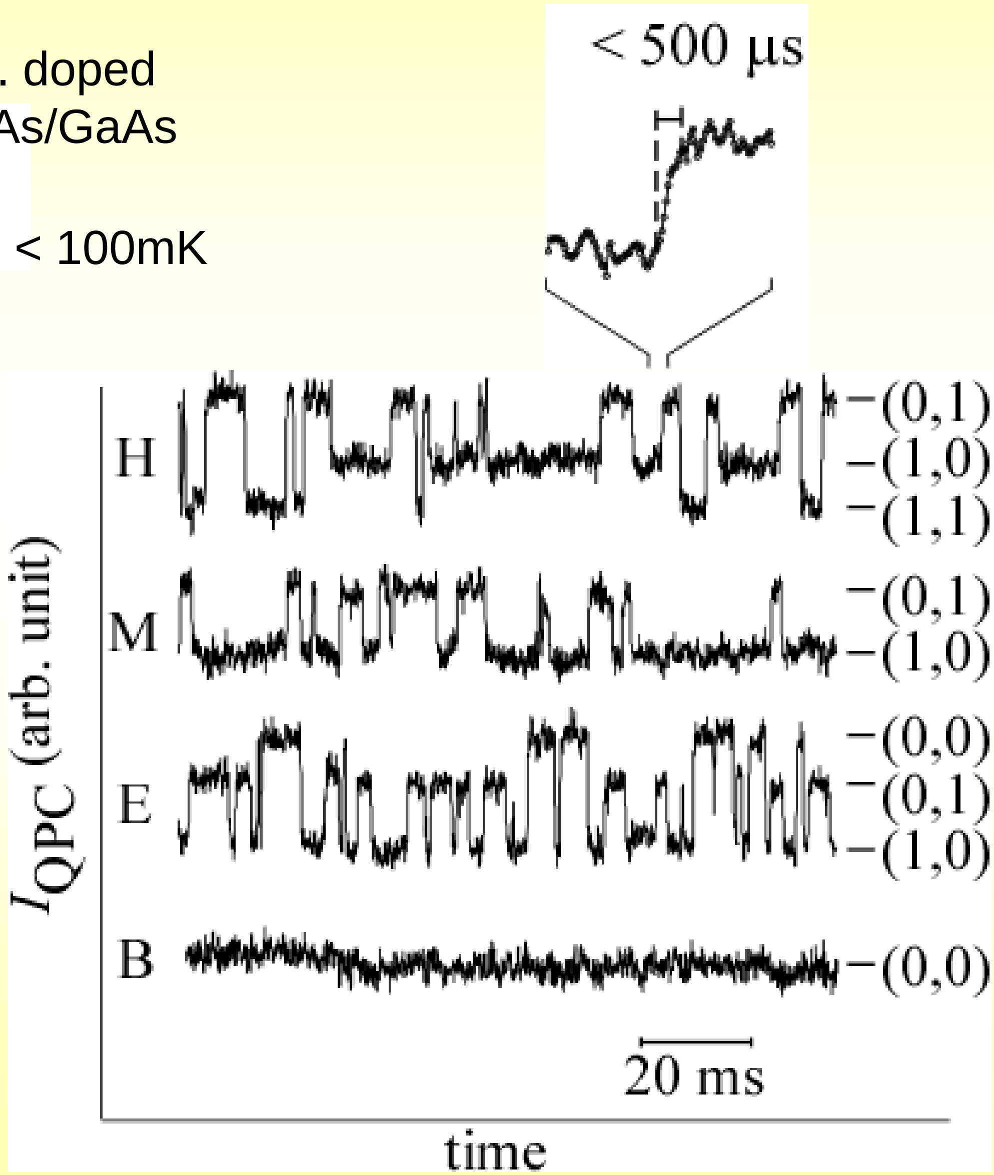
Single electron hopping between the dots



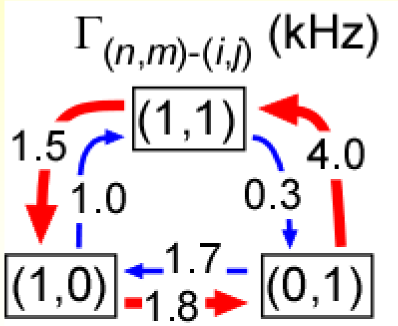
Mod. doped AlGaAs/GaAs

Temp. < 100mK





Rate equation for single-electron transport



The transport is governed by the rate equation.

Probability ρ_i for charge state i (L, R, 2)

$$\rho(t) = \begin{pmatrix} \rho_L \\ \rho_R \\ \rho_2 \end{pmatrix}$$

$$\boxed{\frac{d}{dt}\rho(t) = M\rho(t)}$$

$$M = \begin{pmatrix} -\Gamma_{L\to 0} - \Gamma_{L\to R} - \Gamma_{L\to 2} & \Gamma_{R\to L} & \Gamma_{2\to L} \\ \Gamma_{L\to R} & -\Gamma_{R\to 0} - \Gamma_{R\to L} - \Gamma_{R\to 2} & \Gamma_{2\to R} \\ \Gamma_{L\to 2} & \Gamma_{R\to 2} & -\Gamma_{2\to L} - \Gamma_{2\to R} \end{pmatrix}$$

Current through barrier k (L, C, R): $I_k(t) = \sum v_k \rho(t)$

v_k: Velocity matrix for k=c (central barrier): $v_C = \begin{pmatrix} \Gamma_{L\to R} & 0 & 0 \\ 0 & -\Gamma_{R\to L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$

Average current: $I_0 = \langle I_k(t) \rangle$

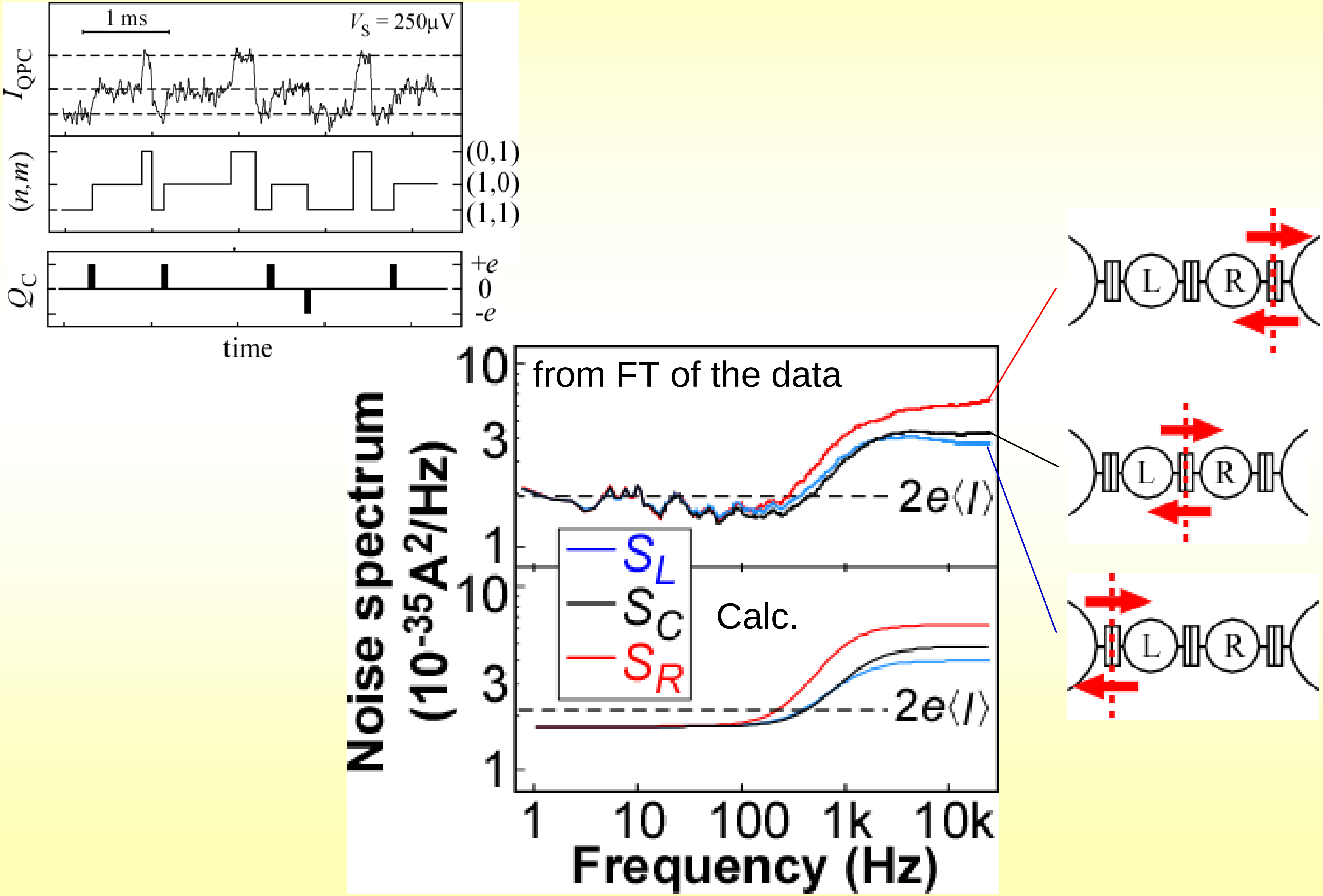
Current correlation: $C_{kk}(t) = \frac{1}{2}\left\langle \left\{ \Delta I_k(t), \Delta I_k(0) \right\} \right\rangle$

Noise of the cureent: $S_{kk}(\omega) = 2\int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} C_{kk}(t)\, dt$

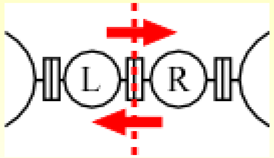
Higher-order moment: $M_n = \langle\langle I^n \rangle\rangle$

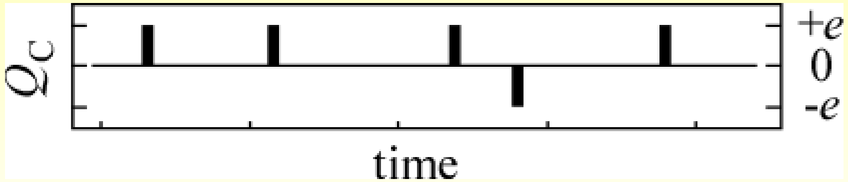
S. Hershfield et al., Phys Rev. B 47, 1967 (1993).
D. A. Bagrets and Yu. V. Nazarov, Phys. Rev. B 67, 085316(2003).

Noise spectrum of tunneling current

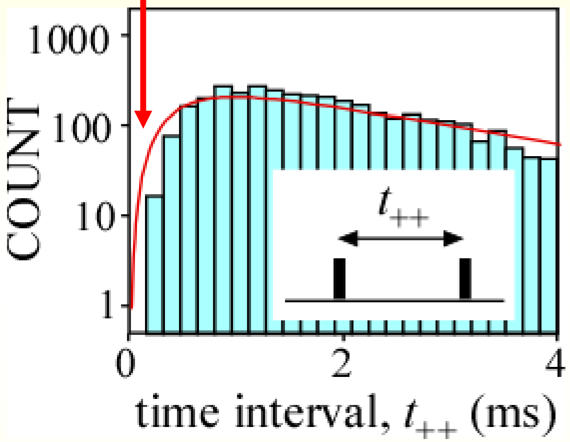


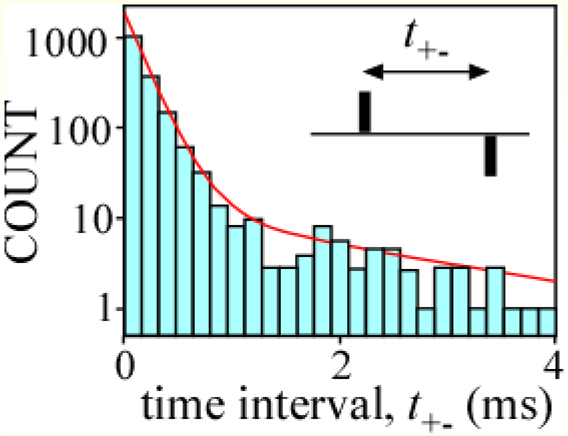
Forward (reverse) recurrence time





Anti-bunching correlation





V_s = 400 - 500 μV

Response time :
100 μs for t_{++}
40 μs for t_{+-}

—— solution of the rate equations

$$P_{++}(t) = \Gamma_{L\to R}\rho_L(t)$$
$$P_{+-}(t) = \Gamma_{R\to L}\rho_R(t)$$

$$\frac{d}{dt}\rho(t) = M_{\text{int}}\rho(t)$$

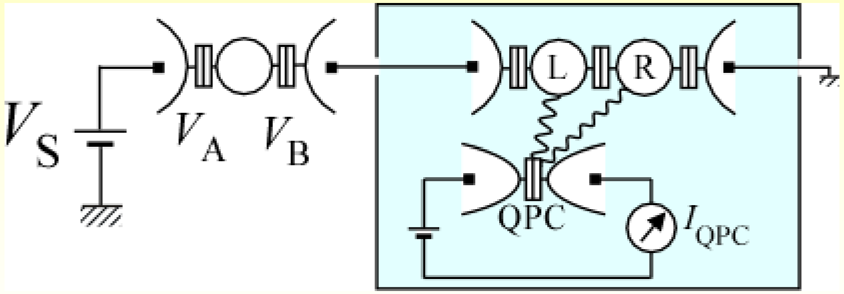
initial condition

$$\rho_R(t=0) = 1$$

$$M_{\text{int}} = \begin{pmatrix} -\Gamma_{L\to 0} - \Gamma_{L\to R} - \Gamma_{L\to 2} & 0 & \Gamma_{2\to L} \\ 0 & -\Gamma_{R\to 0} - \Gamma_{R\to L} - \Gamma_{R\to 2} & \Gamma_{2\to R} \\ \Gamma_{L\to 2} & \Gamma_{R\to 2} & -\Gamma_{2\to L} - \Gamma_{2\to R} \end{pmatrix}$$

$\Gamma_{R\to L} = 38.1,\ \Gamma_{L\to R} = 11.8$
$\Gamma_{R\to 2} = 85.1,\ \Gamma_{2\to R} = 2.5$
$\Gamma_{L\to 2} = 11.1,\ \Gamma_{2\to L} = 39.3$

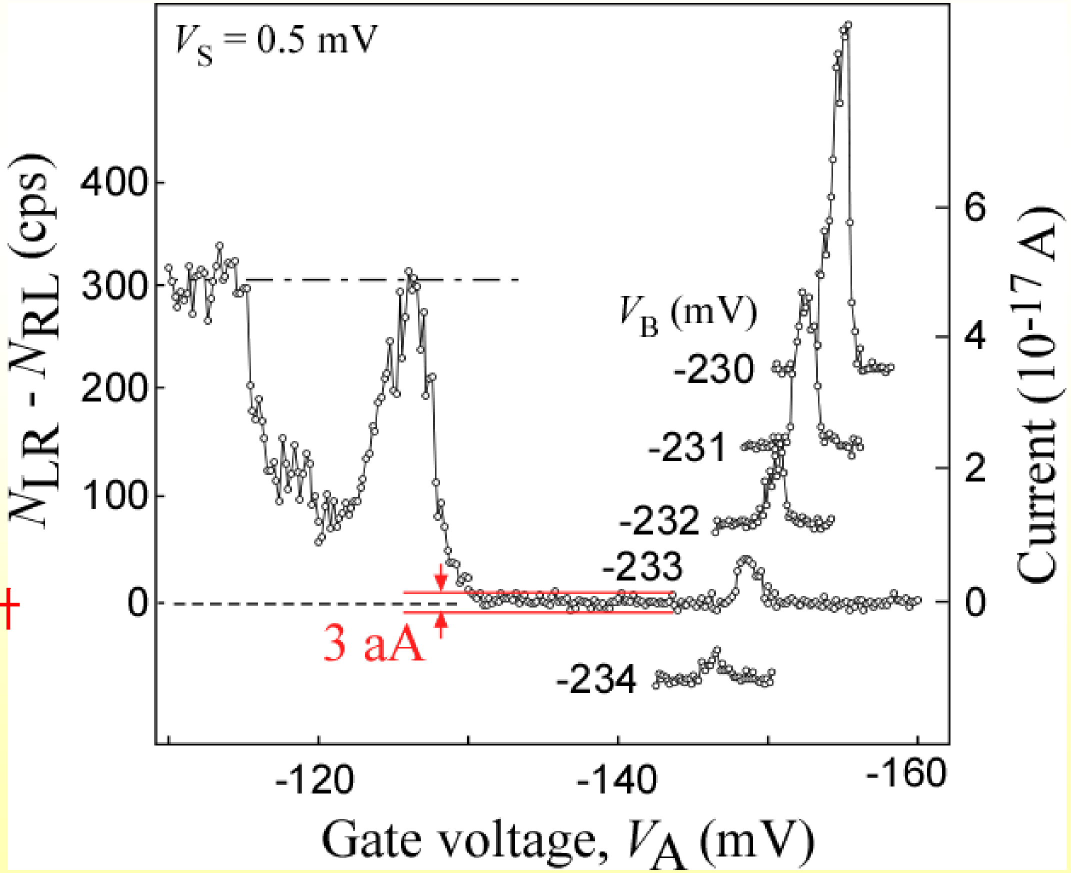
SEC of tunneling current through a QD



Single electron ammeter

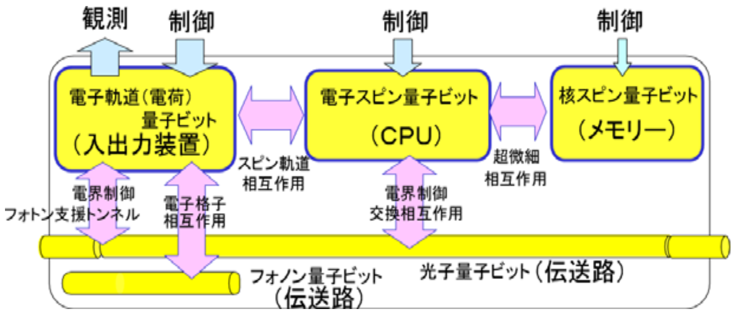
超高感度な電流計

単一電子電流計:究極的な電流計



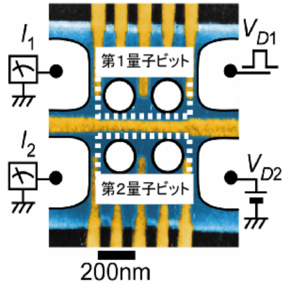
まとめ

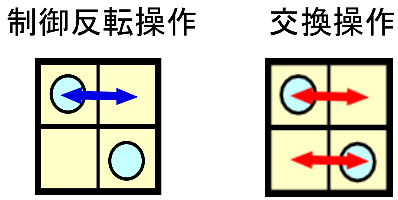
計画：集積化量子情報処理システム（構想）



半導体中の様々な自由度を積極的に活用し、機能的な情報処理システムを目指します。

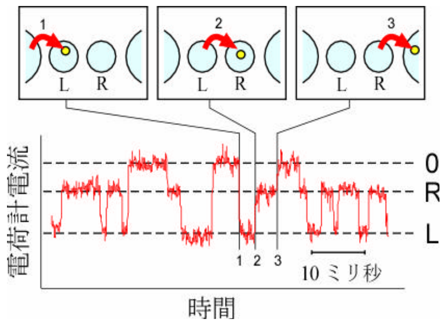
成果1：多機能二量子ビット操作





複数の二量子ビット操作をそれぞれ1ステップで実現することのできる「多機能二量子ビット素子」を実現しました。

成果2：単一電子電流計



量子ドットの電荷状態を正確に測定することにより、電流を運ぶ電子一個一個が、いつ、どちらの方向に動いたかが分かる、究極の電流計を実現しました。

波及効果

半導体量子コンピュータ

電荷状態・電子スピン・核スピンなどの量子状態を用いて、機能的な量子情報処理デバイスの実現を目指します。

シングル・エレクトロニクス

たった1個の電子・電子スピン・核スピンによって動作するエレクトロニクスを創造し、高感度測定技術や低消費電力素子への応用を目指します。