

# 半導体人工量子系における電流ゆらぎ

大阪大学 大学院理学研究科  
物理学専攻

小林 研介

## 共同研究者

中村秀司、山内祥晃、橋坂昌幸、知田健作、荒川智紀、西原禎孝、田中崇大、千葉大地、関口康爾、小野輝男（京大）、内海裕洋（三重大）、齊藤圭司（東大理学部）、藤井達也（東大物性研）、阪野壘（東大工学部）、R. Leturcq（IEMN-CNRS）、K. Ensslin（スイス連邦工科大）、A. C. Gossard（Univ. California）

## 謝辞

Markus Büttiker, Peter Hänggi, Pierre Gaspard, 早川尚男、上田正仁、加藤岳生の各氏からのコメントに感謝します。科研費若手(S)および最先端・次世代研究開発支援プログラムから研究助成を頂いております。

# 概要

- メゾスコピック系とは？
- 雑音（電流ゆらぎ）とは？
- 量子系「ゆらぎの定理」の検証
- 近藤状態における電子の“バンディング（集群）”

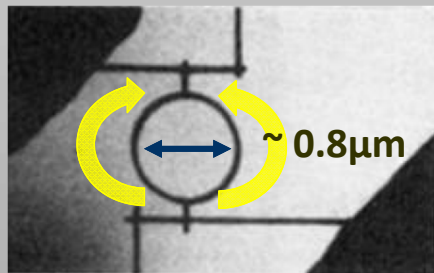
# 人工量子系 (メソスコピック系)

量子力学的効果が本質的な固体素子

## 基礎物理の実験場

1980年代初頭～

- ✓ 電子波干渉
  - ✓ 局在
  - ✓ 単電子効果
  - ✓ 量子ホール効果
  - ✓ 人工原子
  - ✓ 近藤効果
- etc.



Webb *et al.* PRL 54, 2696 (1985)

電荷  
スピン  
位相  
コヒーレンス  
多体効果

## 量子情報技術

量子コンピュータ、量子暗号...

## Exotic materials

ナノチューブ、グラフェン、有機分子...

## MEMS

micro-electro mechanical systems

## スピントロニクス

etc.

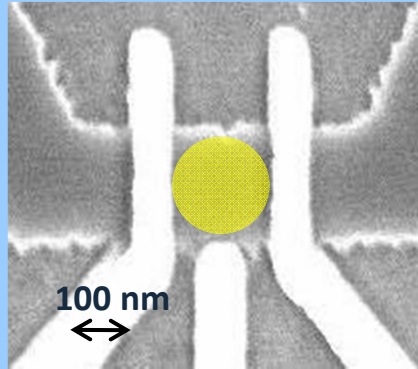
系を自在に設計

制御性

# 半導体人工量子系

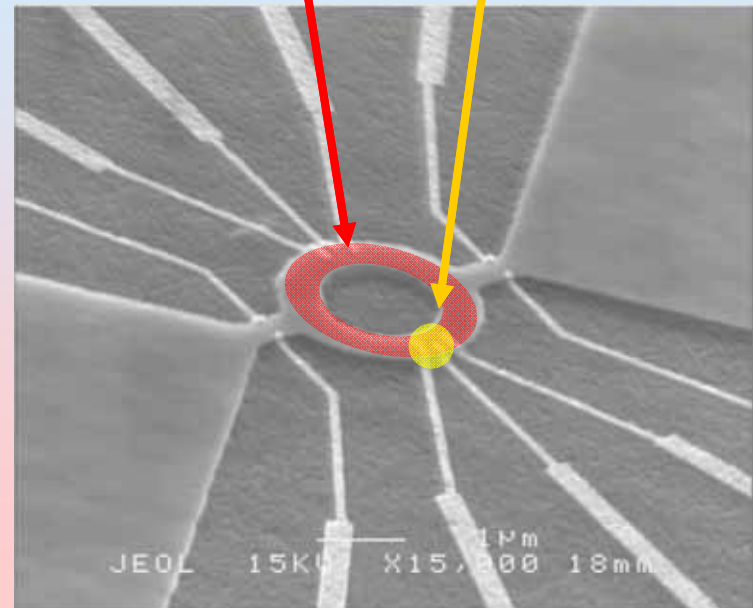
## 人工原子

電子の粒子性  
電子の個数制御  
単一スピンの制御



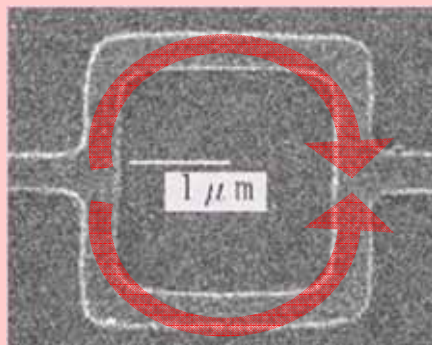
## 電子干渉計 + 人工原子

コヒーレンス・位相・スピンの制御



## 電子干渉計

電子の波動性  
電子波の位相制御



量子効果の実験場：スピン反転、近藤効果、ファノ効果、非平衡位相緩和 etc.

PRL **88**, 256806 (2002); PRL **92**, 176802 (2004); PRL **95**, 066801 (2005); PRB **68**, 235304 (2003); **73**, 195329 (2006); JPSJ **73**, L3235 (2004); PRB **70**, 035319 (2004); PRB **73**, 195329 (2006); PRB **79**, 161306(R) (2009); Physica E **42**, 1091 (2010).

# 電気伝導におけるランダウア公式 “Conductance is transmission.”

Imry & Landauer, Rev. Mod. Phys. 71, S306 (1999).



Rolf Landauer  
(1927–1999)



電気伝導度（抵抗の逆数） = 透過確率

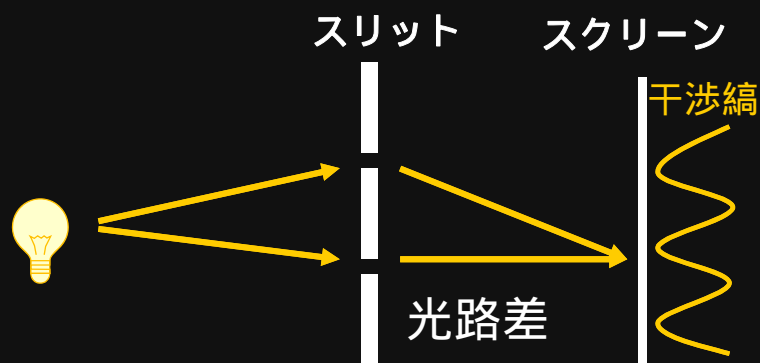
$$G = \frac{2e^2}{h} \sum_n T_n \quad \frac{2e^2}{h} \sim (12.9 \text{ k}\Omega)^{-1}$$

伝導度測定によって、単一の量子系に発現する物理現象（例えば、干渉効果、単一準位伝導、近藤効果 etc.）をプローブ可能。

# 電子干渉計 (ABリング)

## 光の干渉

ヤングの二重スリット

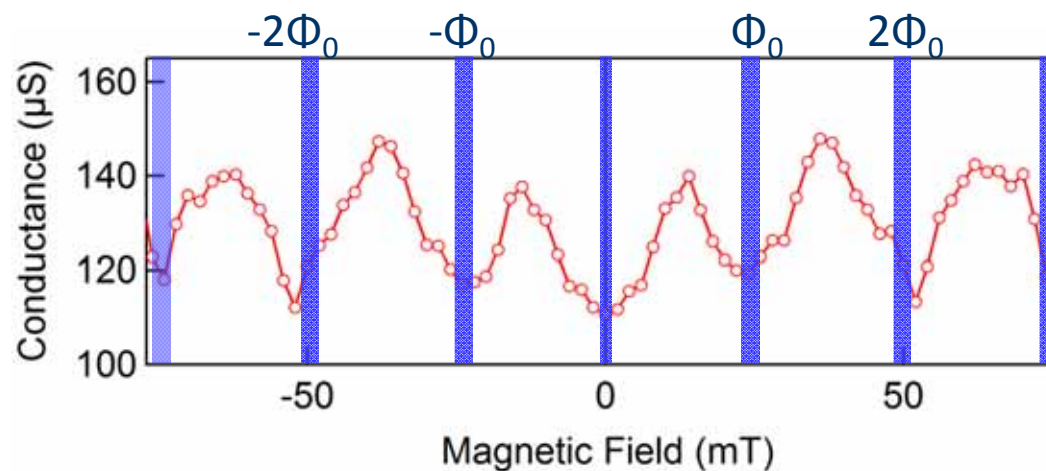
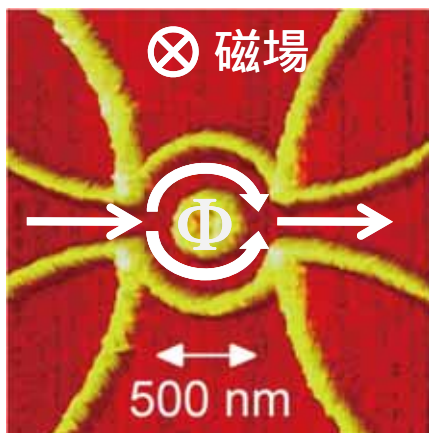
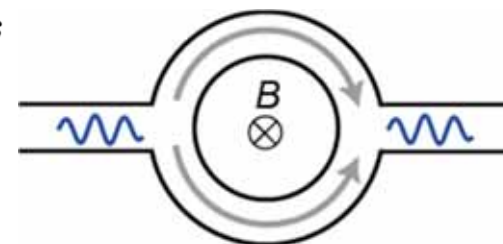


## 電子の干渉

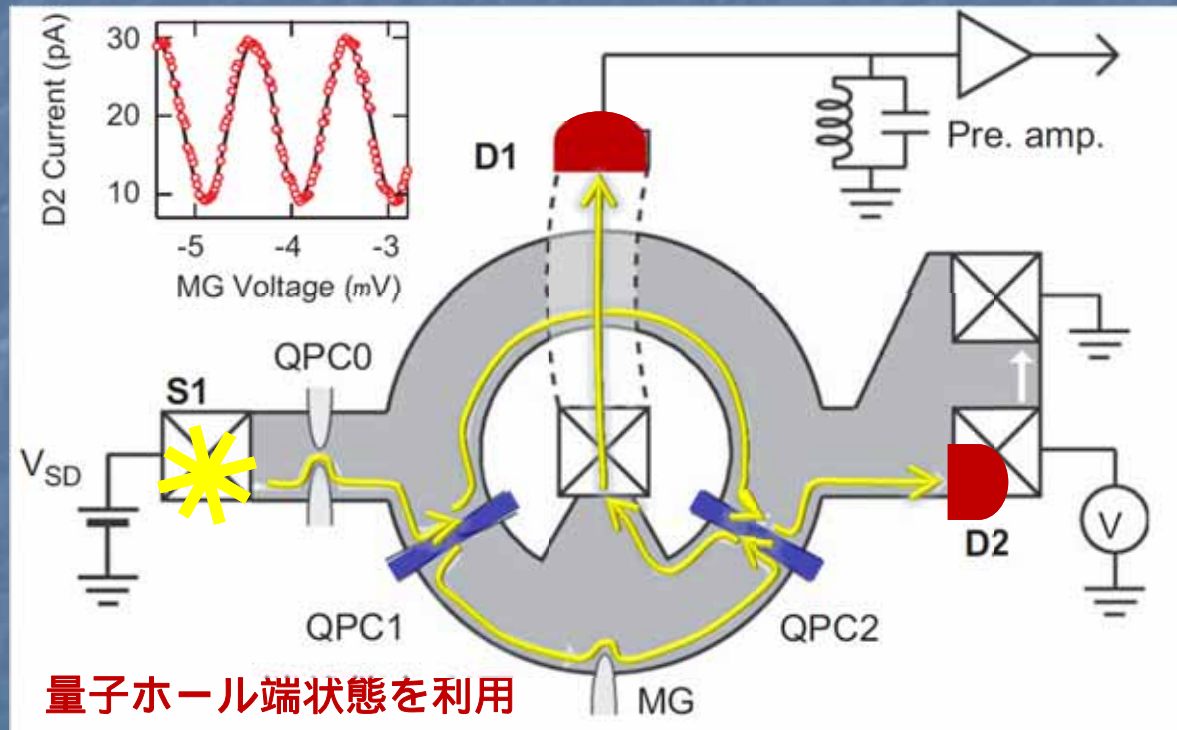
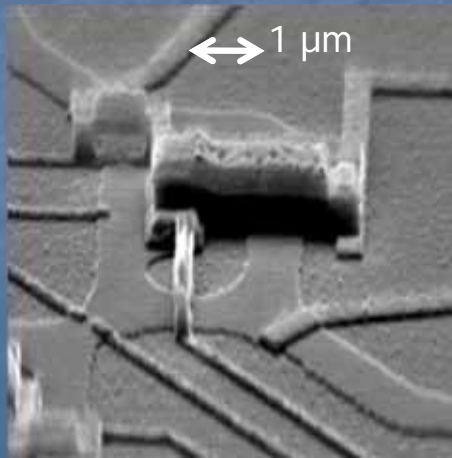
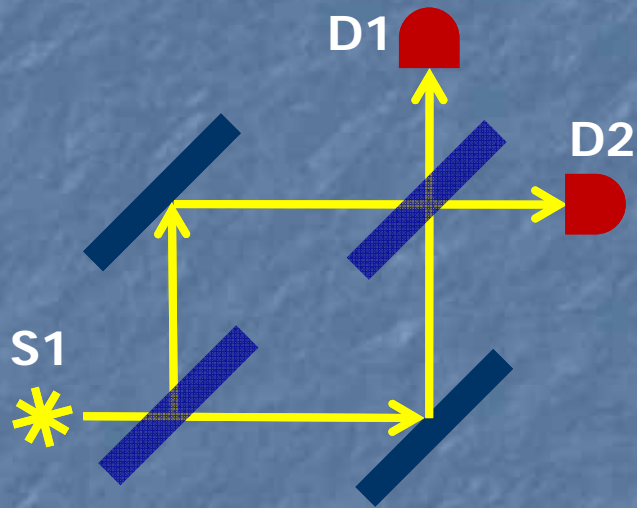
経路差 + 磁場 (ベクトルポテンシャル)

↳ アハラノフ・ボーム(AB)効果

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= \frac{e}{\hbar} \oint A \cdot ds \\ &= \int_S B \cdot dS \\ &= \frac{eBS}{\hbar} \end{aligned}$$



# Mach-Zehnder干渉計



Ji *et al.*, Nature **422**, 415 (2003).

Hashisaka, KK *et al.*, Physica E**42**, 1091 (2010).

# 透過と反射

Imry & Landauer, Rev. Mod. Phys. 71, S306 (1999).



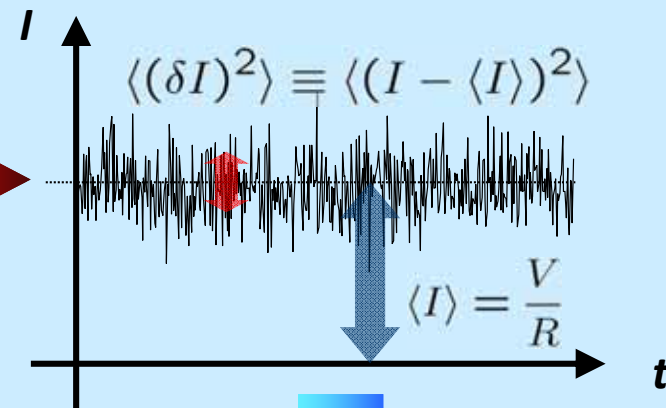
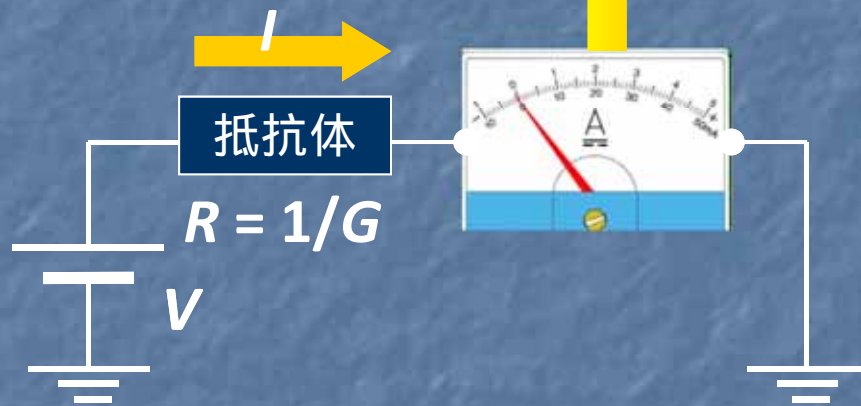
電気伝導度 (抵抗の逆数) = 透過確率

$$G = \frac{2e^2}{h} \sum_n T_n \quad \frac{2e^2}{h} \sim (12.9 \text{ k}\Omega)^{-1}$$



# 雜音

# 雑音（電流ゆらぎ）



FFT

雑音（電流ゆらぎ）スペクトル密度

$$S_I(f) = \int e^{i2\pi ft} (\delta I)^2 dt \quad (\text{A}^2/\text{Hz})$$

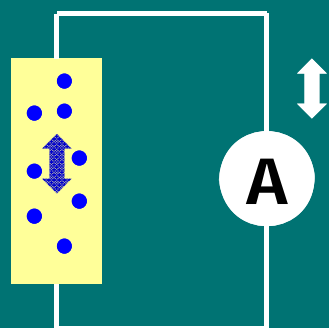
メゾスコピック系への展開（理論）1990年代初頭～

Review: Y. M. Blanter and M. Büttiker, *Phys. Rep.* **336**, 1 (2000).

清水 明、*固体物理* **28**, 771 (1993) ; 上田正仁、*日本物理学会誌* vol. **49**, 751 (1994).

# 熱雑音とショット雑音

熱雑音  $S_I = 4k_B T G$



$$\langle I \rangle = 0$$

$$\langle (\delta I)^2 \rangle \neq 0$$

Johnson-Nyquist (1928)、揺動散逸定理の原点



- ・熱力学第二法則
- ・シリンダ中に閉じ込めた温度Tの気体分子
- ・黒体輻射（低周波極限）

非平衡が先行

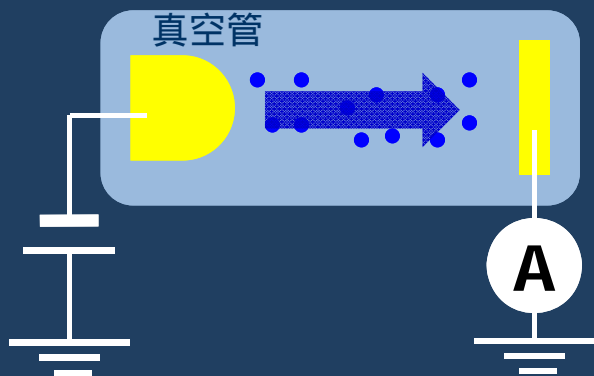
Nyquist, Phys. Rev. 32, 110 (1928).

質的に異なる

ショット雑音  
(非平衡電流雑音)

$$S_I = 2e \langle I \rangle$$

Schottky (1918)



ポアソン過程：各イベントが独立

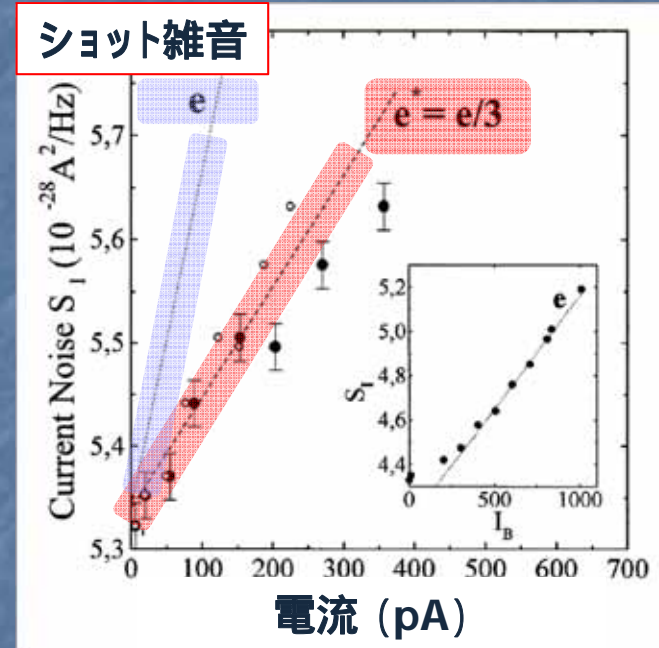
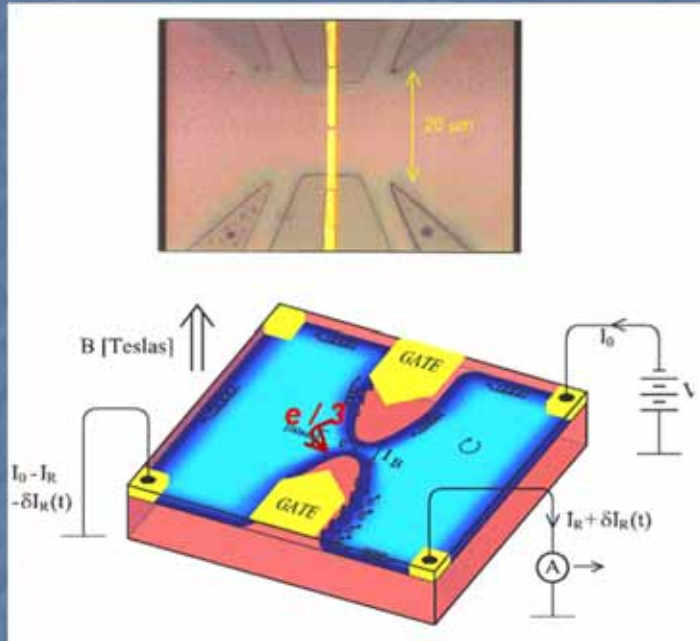
$$\langle I \rangle = e \langle N \rangle$$

$$\langle (\delta I)^2 \rangle = e^2 \langle (\delta N)^2 \rangle \sim e^2 \langle N \rangle = e \langle I \rangle$$

→  $S_I = 2e^* \langle I \rangle$

→ Fano 因子  $F \equiv \frac{S_I}{2e \langle I \rangle} = \frac{\langle (\delta N)^2 \rangle}{\langle N \rangle}$

# ショット雑音による分数電荷の実証



Saminadayar PRL (1997); dePicciotto Nature (1997)  
 iramis.cea.fr/Images/astImg/



ノーベル物理学賞 (1998)

"for their discovery of a new form of quantum fluid with fractionally charged excitations"  
 分数電荷の素励起を持つ新しい量子液体の発見に対して



R. B. Laughlin



H. L. Störmer



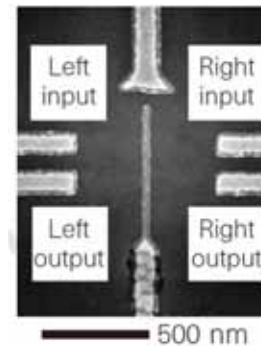
D. C. Tsui 12

# 電子衝突 & 強度相關

## Quantum interference in electron collision

R. C. Liu<sup>\*</sup>, B. Odom<sup>\*</sup>, Y. Yamamoto<sup>\*†</sup> & S. Tarucha<sup>†</sup>

NATURE | VOL 391 | 15 JANUARY 1998



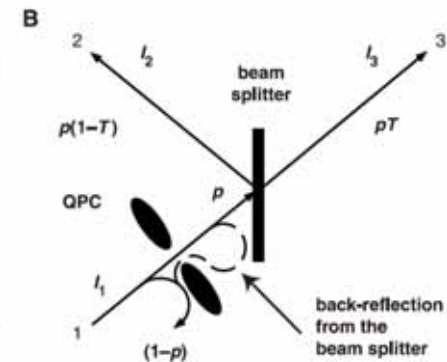
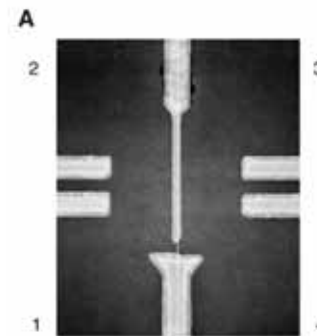
## Hanbury Brown and Twiss-Type Experiment with Electrons

William D. Oliver,<sup>1\*</sup> Jungsang Kim,<sup>1</sup> Robert C. Liu,<sup>1</sup>  
Yoshihisa Yamamoto<sup>1,2</sup>

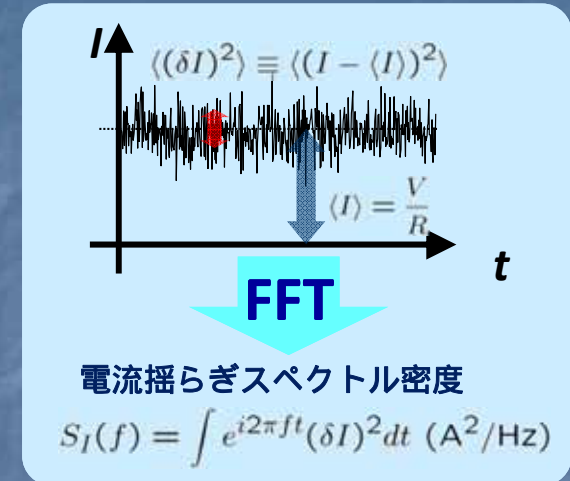
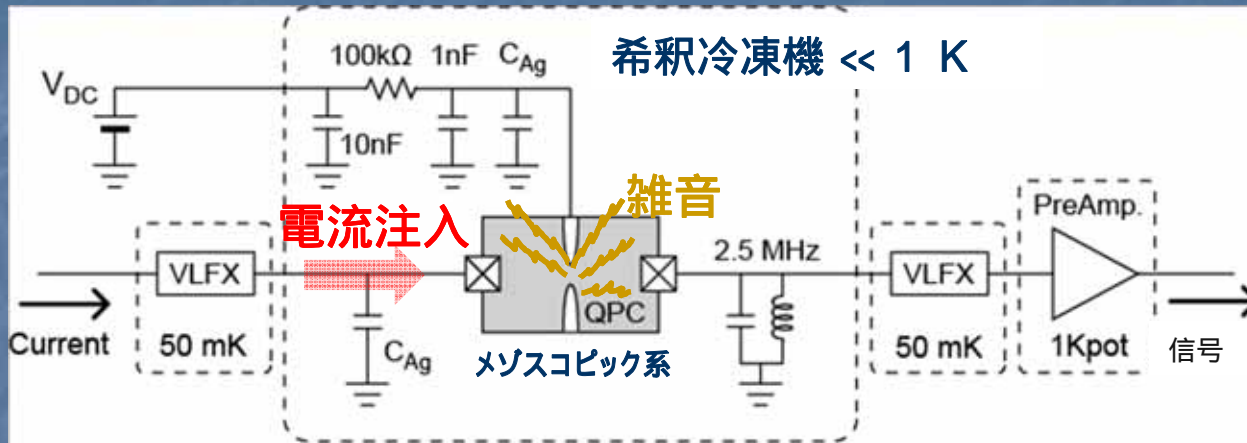
## The Fermionic Hanbury Brown and Twiss Experiment

M. Henny,<sup>1</sup> S. Oberholzer,<sup>1</sup> C. Strunk,<sup>1</sup> T. Heinzel,<sup>2</sup> K. Ensslin,<sup>2</sup>  
M. Holland,<sup>3</sup> C. Schönberger<sup>1\*</sup>

SCIENCE | VOL 284 | 9 APRIL 1999



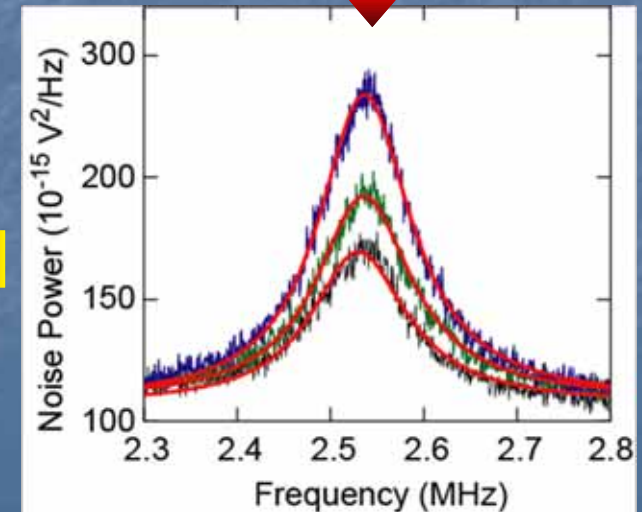
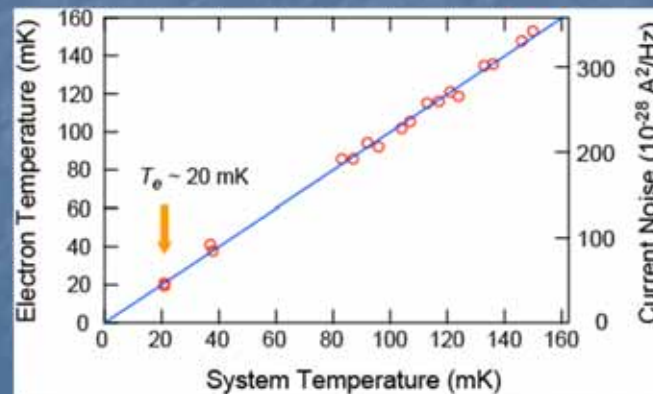
# 雑音測定



## 低温アンプ & 高周波フィルタ



感度  $\sim 10^{-29} \text{ A}^2/\text{Hz}$   
電子温度  $\sim 20 \text{ mK}$



# “The noise is the signal.” (雑音は信号である)

R. Landauer, Nature **392**, 658 (1998)



Rolf Landauer  
(1927–1999)

## ■ 伝導担体の単位電荷 ( $e$ , $e/3$ , $2e$ ... )

分数電荷の実証: Saminadayar PRL (1997); dePicciotto Nature (1997)

## ■ 電子スピン & 核スピン依存伝導

Nakamura, KK et al. PRB **79**, 201308 (R) (2009); Chida, KK et al. PRB **85**, 041309 (R) (2012); Arakawa, KK et al. APL **98**, 202103(2011)...

## ■ 多体効果のプローブ：近藤状態における電子のバンチング

Yamauchi, KK et al. PRL **106**, 176601 (2011).

## ■ メゾスコピック系の絶対温度

Hashisaka, KK, PRB **78**, 241303 (R) (2008); Yamauchi, KK PRB **79**, 161306 (R) (2009).

## ■ フェルミオン (電子) による量子 “光学” 例: HBT干渉計、MZ干渉計

## ■ 非平衡統計物理の舞台として

「ゆらぎの定理」の検証: Nakamura, KK et al. PRL **104**, 080602 (2010); *Phys. Rev. B* **83**, 155431 (2011)

# 量子コヒーレント系における 「ゆらぎの定理」

非平衡物理への展開

Nakamura, KK et al., *Phys. Rev. Lett.*, **104**, 080602 (2010);  
*Phys. Rev. B* **83**, 155431 (2011) [Editors' Suggestion] 



# ゆらぎの定理

Evans, Cohen and Morriss Phys. Rev. Lett. 71, 2401 (1993).

熱浴に接した微小系において、有限時間 $t$ におけるエントロピー変化 $\sigma_t$ を考える。  
エントロピーが $A$ 増大する確率  $p(\sigma_t = A)$  と、  
 $A$ 減少する確率  $p(\sigma_t = -A)$  との間以下  
の等式が成立（時間反転対称性による）。

$$\frac{p(\sigma_t = A)}{p(\sigma_t = -A)} = \exp(At)$$



- ◆熱力学の第二法則の定量的表現
- ◆多体効果があっても厳密に成立
- ◆既知の関係式（線形応答理論、オンサーガー相反定理、ジャルチンスキー等式など）を内包
- ◆古典系では実験的に検証\*されているが、量子系では未検証。

\*e.g. Wang et al., PRL 89, 050601 (2002).

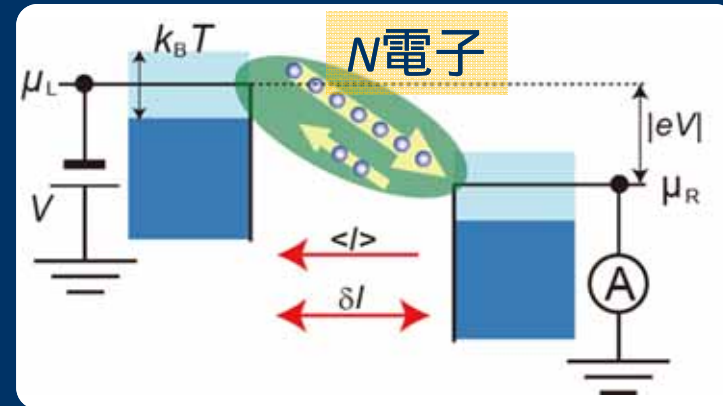
# 量子系におけるゆらぎの定理

Saito and Utsumi, PRB **78**, 115429 (2008); Nakamura, KK et al. PRB **83**, 155431 (2011)

## 電子伝導 = 二つの電子溜間での電子の交換

時間反転対称性、エネルギー保存則、粒子数保存則から、単位時間あたり  $N$  個の電子が交換される確率  $P(N)$  は次式を満たす。

$$\frac{P(N)}{P(-N)} = \exp\left(\frac{eV}{k_B T} N\right)$$

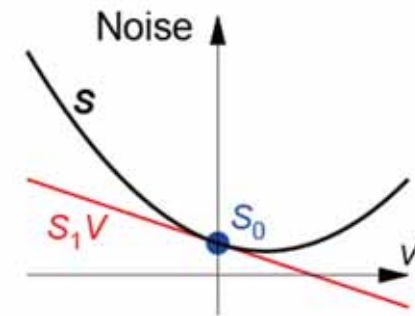
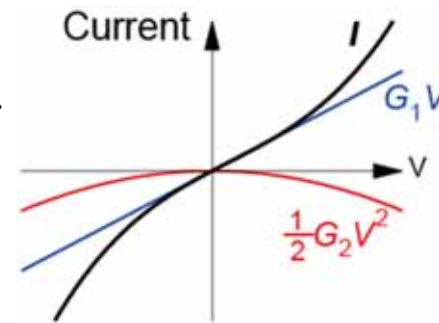


### 電流

$$I = G_1 V + \frac{1}{2!} G_2 V^2 + \frac{1}{3!} G_3 V^3 + \dots$$

### 電流ゆらぎ (雑音)

$$S = S_0 + S_1 V + \frac{1}{2} S_2 V^2 + \dots$$



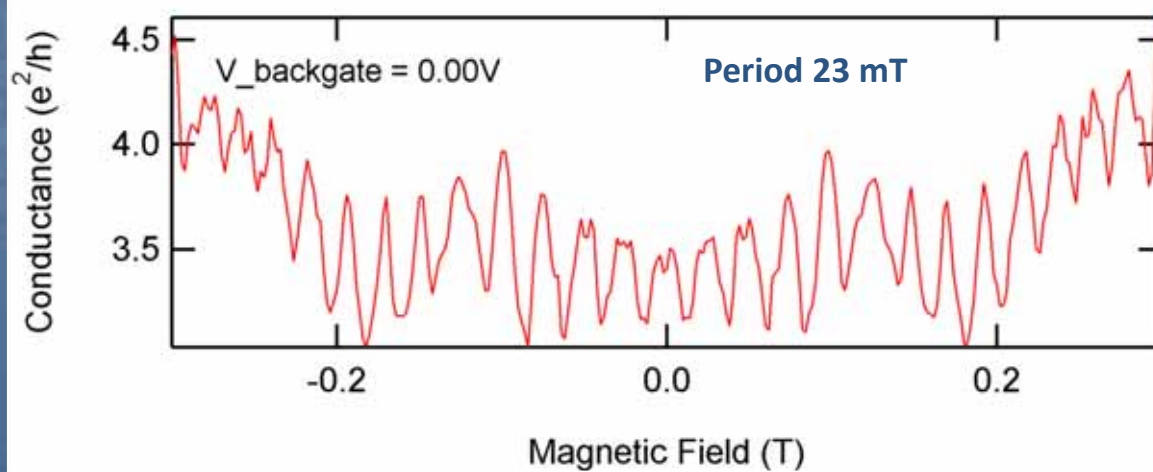
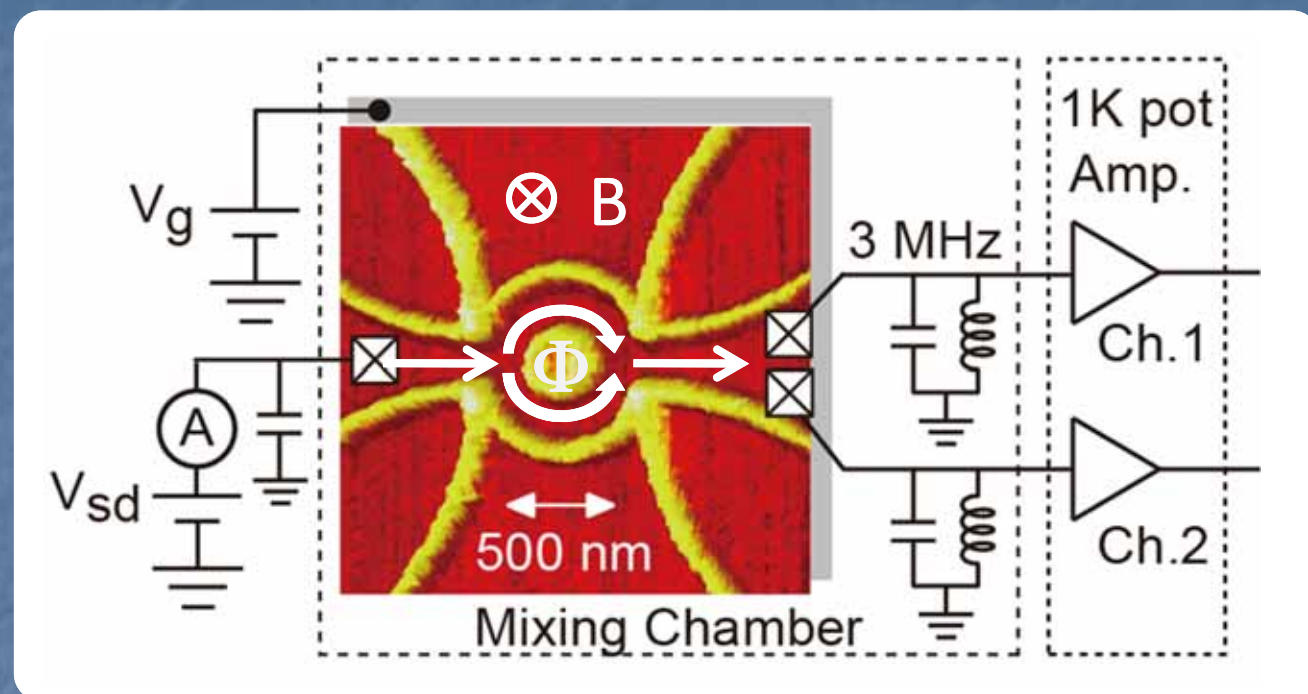
### 線形応答理論

$$S_0 = 4k_B T G_1$$

### 非平衡ゆらぎ関係式 (本研究)

$$S_1 \propto G_2$$

# 電子干渉計：アハラノフ・ボーム（AB）リング

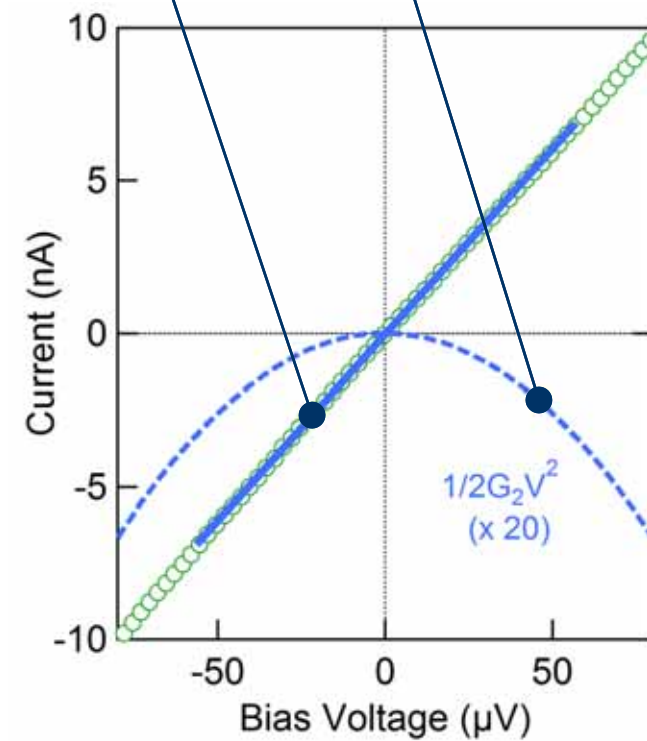


# 線形・非線形輸送係数の抽出



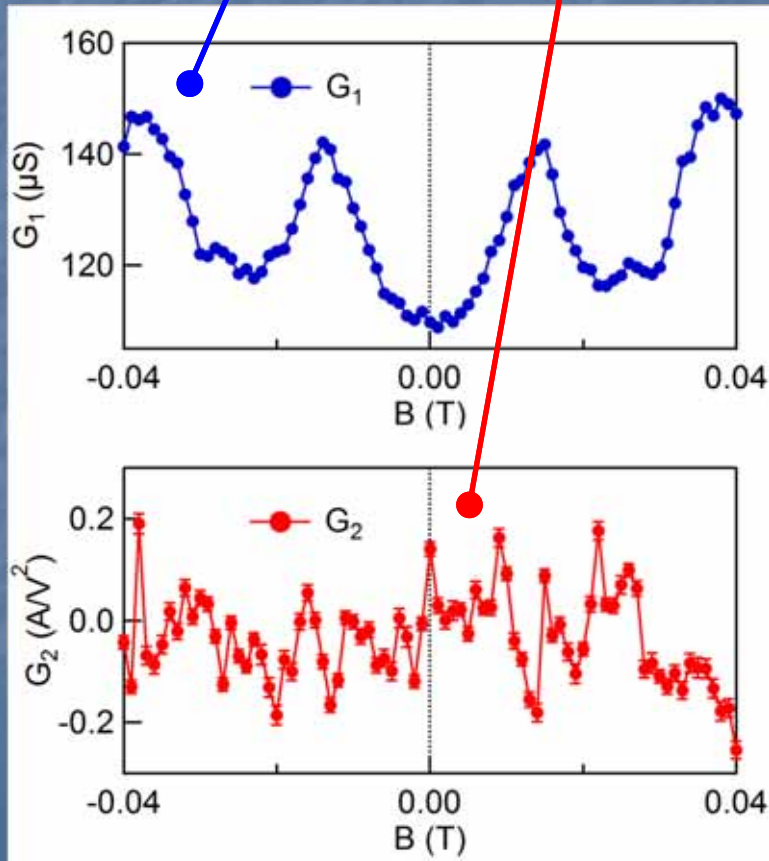
## 電流

$$I = G_1 V + \frac{1}{2} G_2 V^2 + \dots$$



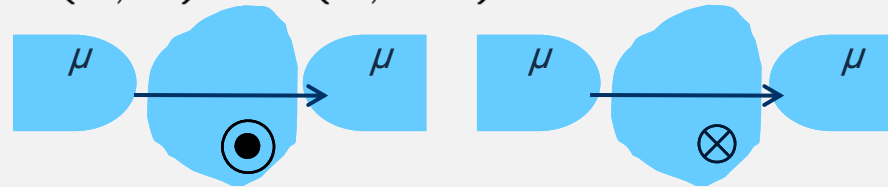
# 非平衡における相反性の破れ

$$I(B) = G_1(B)V + \frac{1}{2!}G_2(B)V^2 + \dots$$



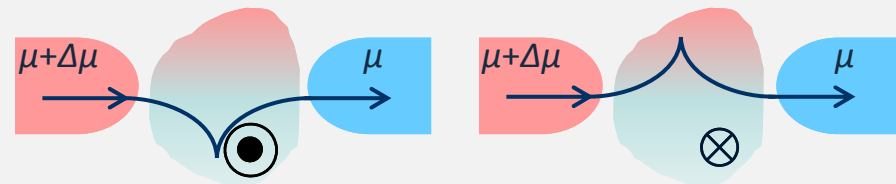
平衡：オンサーガー・カシミール相反性

$$I(V, B) = I(V, -B)$$



非平衡：誘起された電子間相互作用  
相反性の破れ

$$I(V, B) \neq I(V, -B)$$



理論：Sanchez, and Büttiker, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 106802 (2004); Polianski, and Buttiker, *Phys. Rev. B* **76**, 205308 (2007); Spivak, and Zyuzin, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 226801 (2004).

実験：Wei *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 256601 (2005); Zümbuhl *et al.*, *ibid.* **96**, 206802 (2006); Marlow *et al.*, *ibid.* **96**, 116801 (2006); Angers *et al.*, *Phys. Rev. B* **75**, 115309 (2007); Leturcq *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 126801 (2006).

# ゆらぎの定理の予言：非平衡ゆらぎ関係式

Saito and Utsumi, *Phys. Rev. B* **78**, 115429 (2008).

電流

$$I(B) = G_1(B)V + \frac{1}{2}G_2(B)V^2 + \frac{1}{3!}G_3(B)V^3 + \dots$$

電流雑音

$$S(B) = S_0(B) + S_1(B)V + \frac{1}{2}S_2(B)V^2 + \dots$$

Onsager-Casimir 関係式

$$G_1(B) = G_1(-B)$$

Johnson-Nyquist 関係式

$$S_0(B) = 4k_B T G_1(B)$$

(線形応答理論)

Onsager-Casimir 関係式は不成立

$$G_2^S(B) \equiv G_2(B) + G_2(-B) \quad G_2^A(B) \equiv G_2(B) - G_2(-B)$$

対称成分 反対称成分

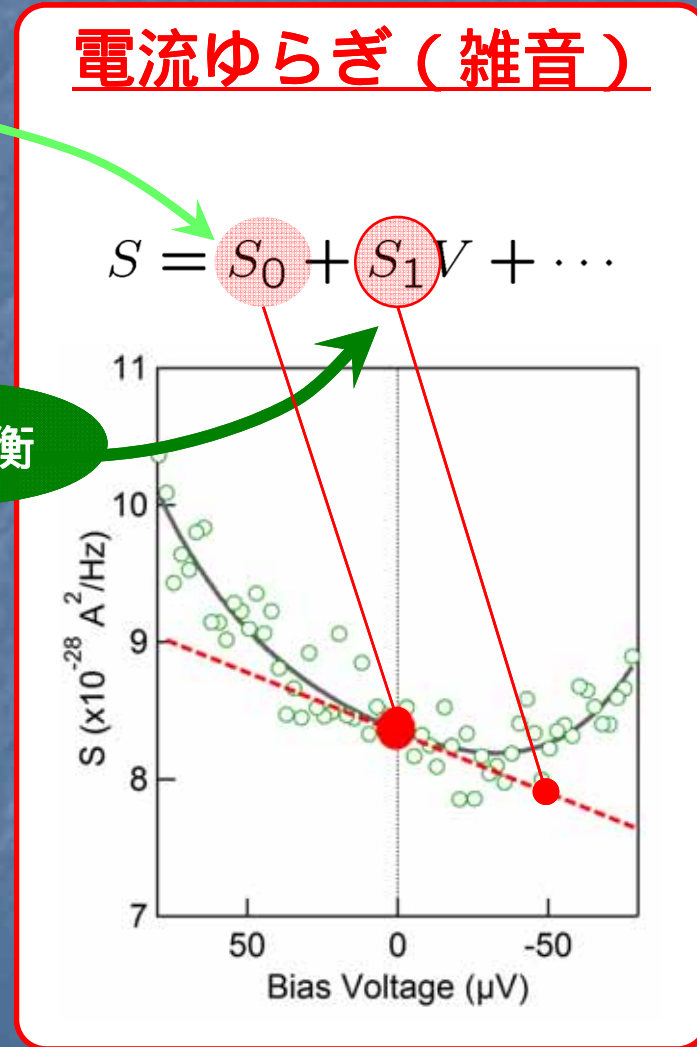
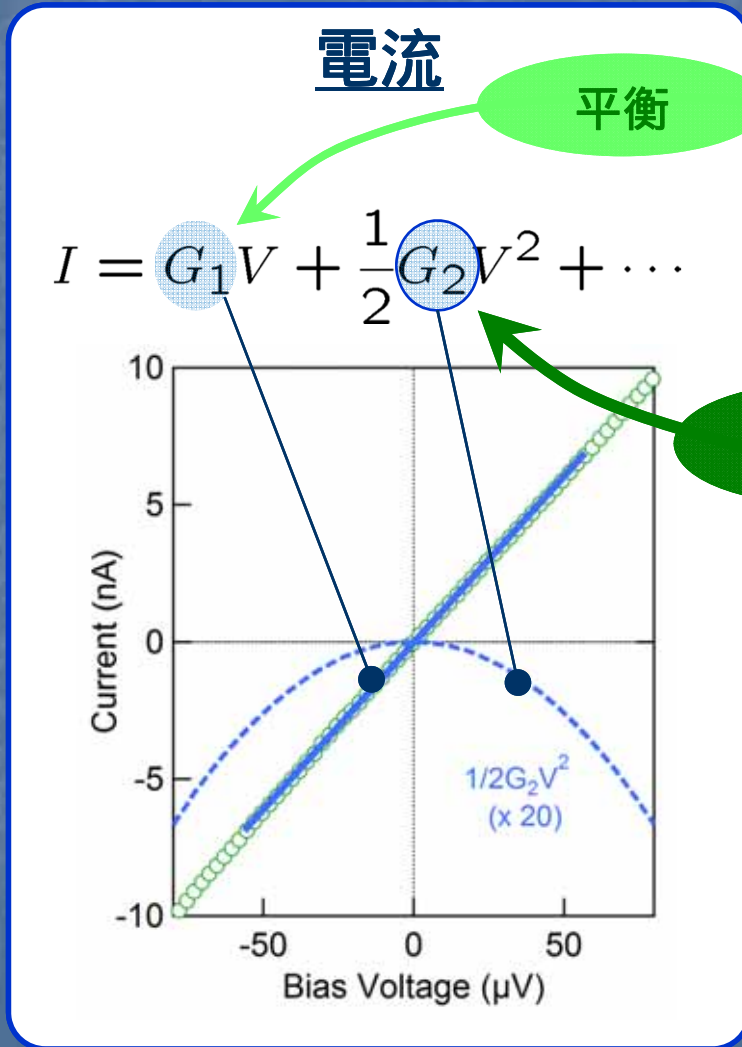
$$S_1^S(B) \equiv S_1(B) + S_1(-B) \quad S_1^A(B) \equiv S_1(B) - S_1(-B)$$

高次項にも比例関係が存在

対称成分  $S_1^S(B) = 2k_B T G_2^S(B)$

反対称成分  $S_1^A(B) = 6k_B T G_2^A(B)$

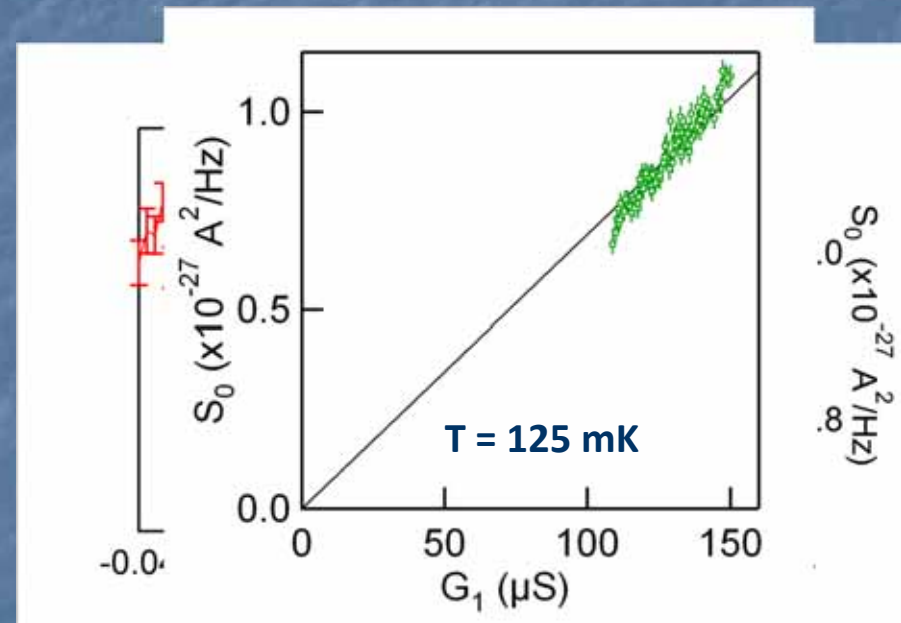
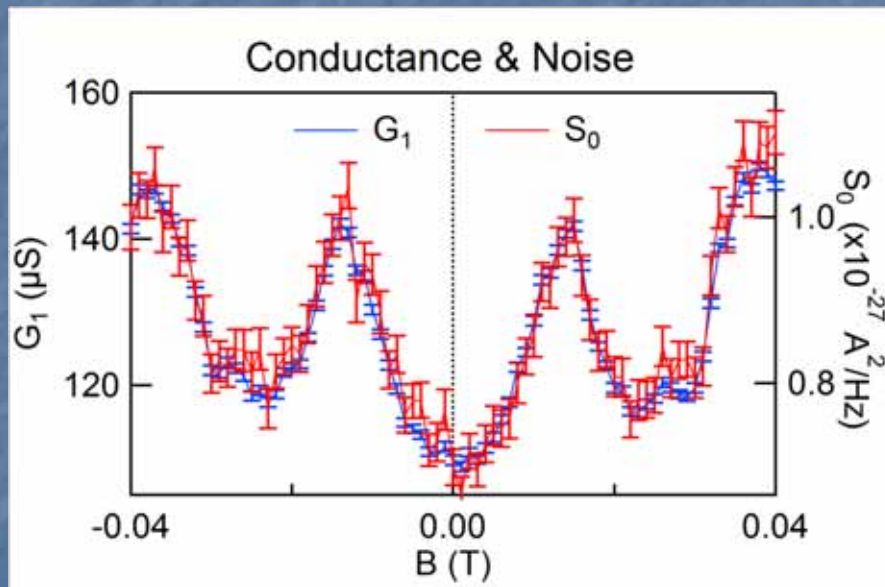
# 平衡・非平衡輸送係数の抽出



# 線形応答理論を確認

$$I(B) = G_1(B)V + \frac{1}{2}G_2(B)V^2 + \dots$$

$$S(B) = S_0(B) + S_1(B)V + \dots$$



相反性

$$G_1(B) = G_1(-B)$$

揺動散逸関係

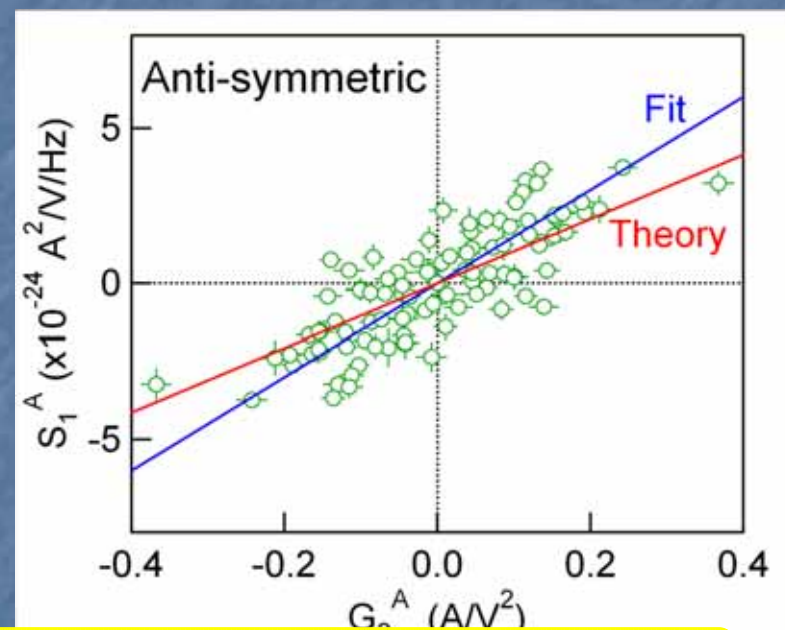
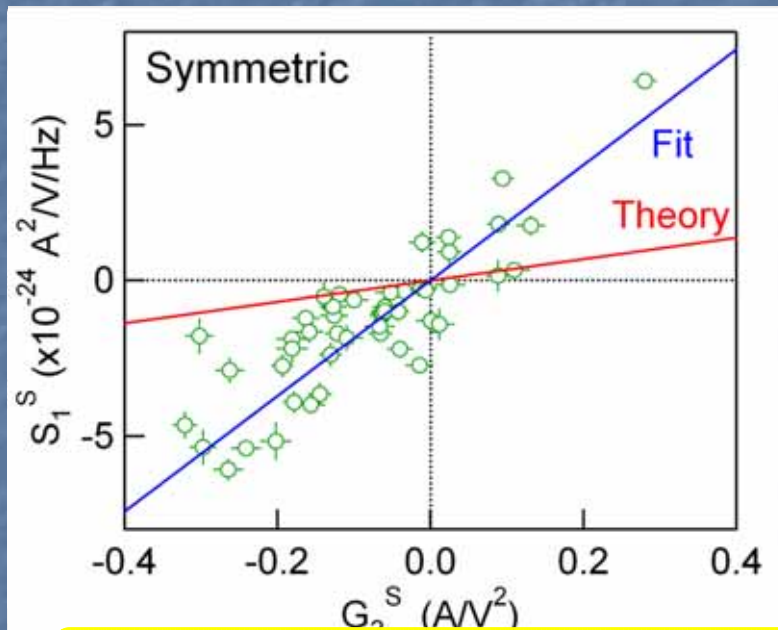
$$S_0(B) = 4k_B T G_1(B)$$



# 非平衡ゆらぎ関係式の実証

$$I(B) = G_1(B)V + \frac{1}{2}G_2(B)V^2 + \dots$$

$$S(B) = S_0(B) + S_1(B)V + \dots$$



ゆらぎの定理で予言された非自明な比例関係を実証

$$S_1^S(B) = 2k_B T G_2^S(B) \alpha^S$$

$$\alpha^S = 5.38^{+1.18}_{-0.70}$$

$$\alpha^S = 1 \quad (\text{theory})$$

$$S_1^A(B) = 6k_B T G_2^A(B) \alpha^A$$

$$\alpha^A = 1.45^{+0.21}_{-0.12}$$

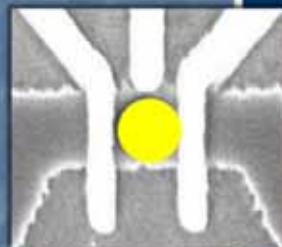
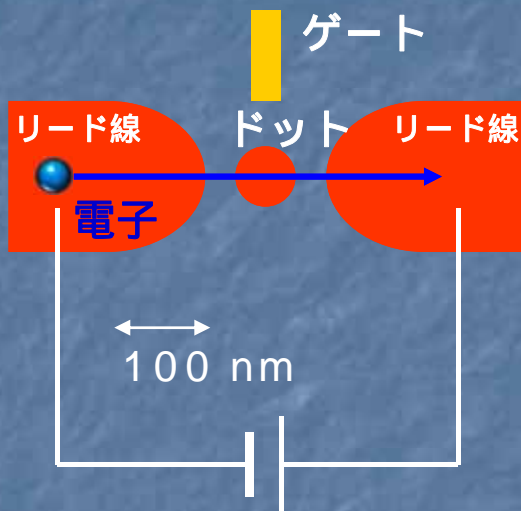
$$\alpha^A = 1 \quad (\text{theory})$$

# 近藤状態における 電子のバンディング

多体効果と非平衡雑音

Yamauchi, KK *et al.* *Phys. Rev. Lett.* **106**, 176601 (2011).

# 量子ドット (人工原子)

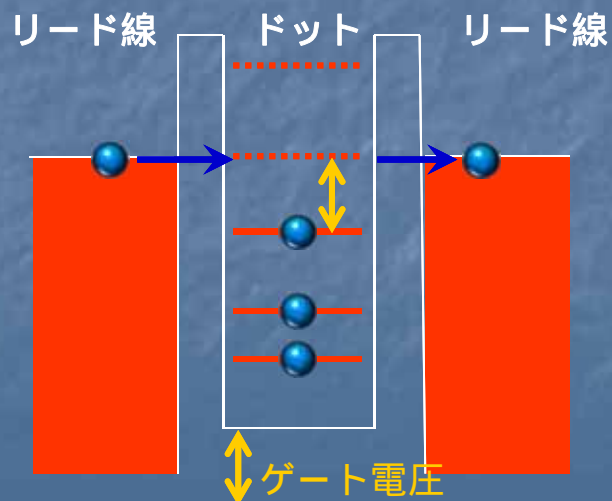


電子を 0 次元的に閉じ込める

帯電効果 + 量子閉じ込め効果

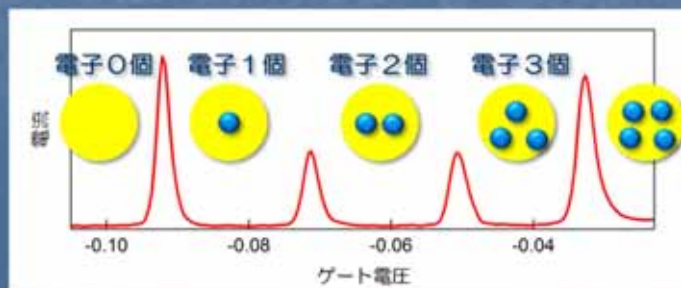
ドット内のエネルギー準位が離散化

ドット内の電子数が固定



エネルギー準位がリード線の化学ポテンシャルと合致した時のみ伝導する。

リード線につながれた人工原子



# 近藤効果

1964年

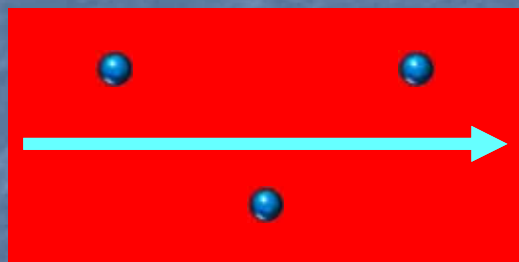


近藤淳 1930-

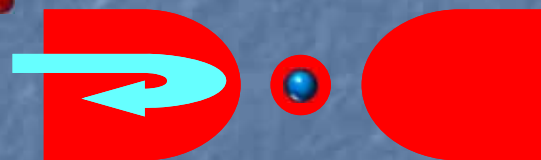
## 金属中の磁性不純物

## 量子ドット

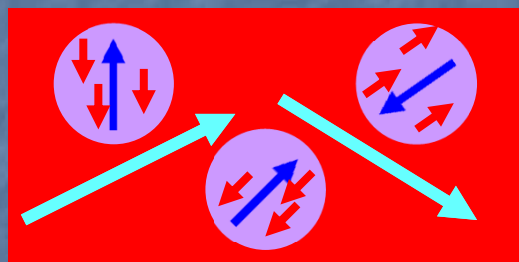
高温



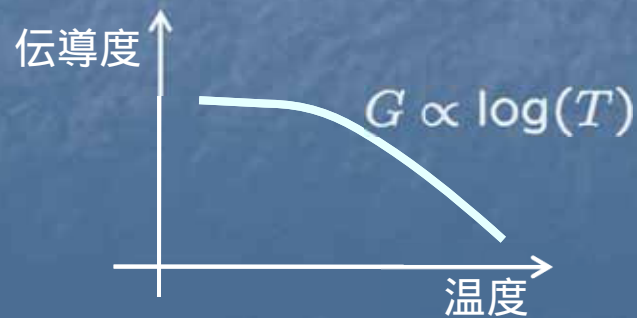
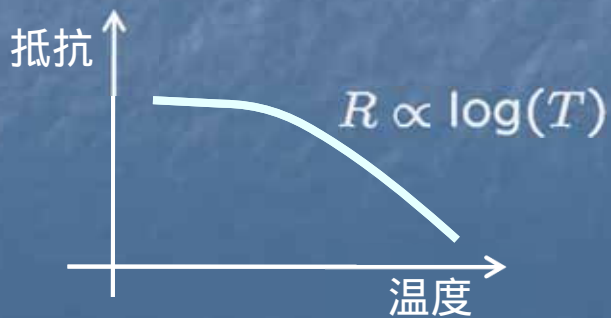
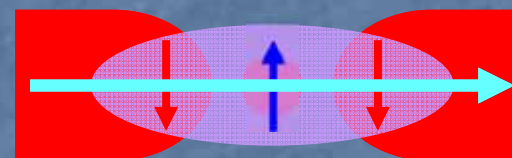
高温



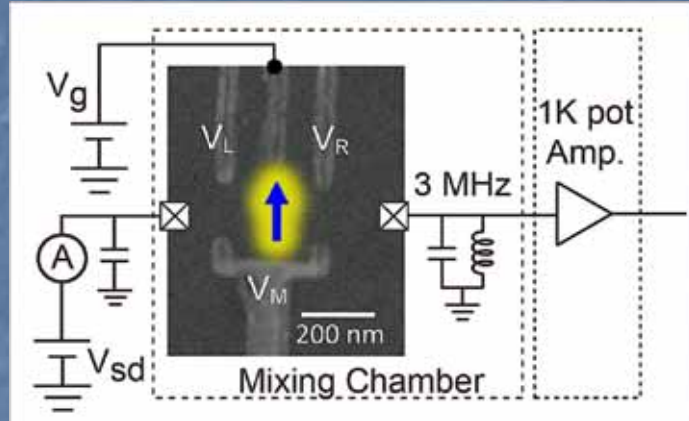
低温



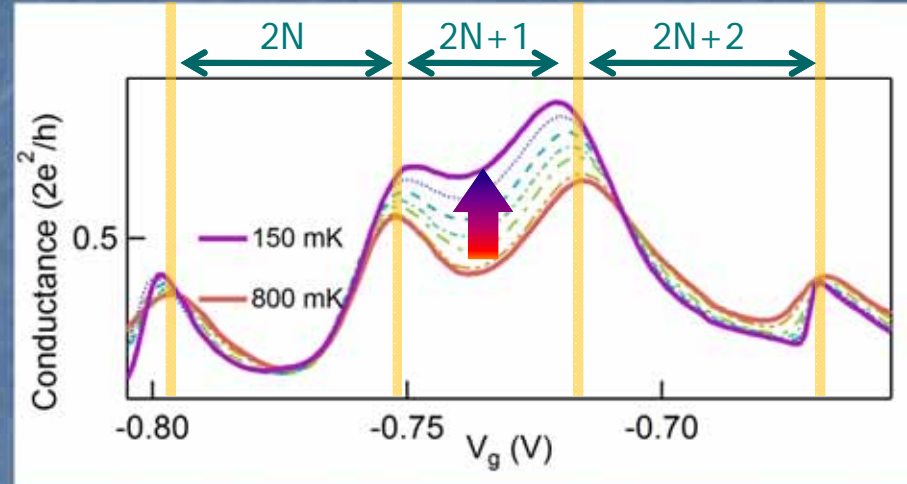
低温



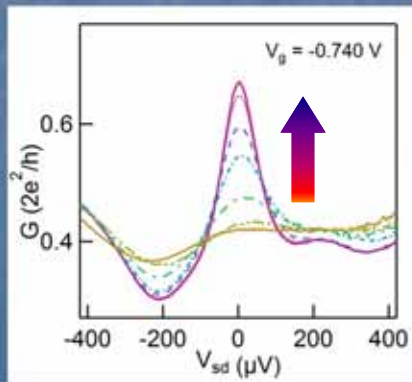
# 近藤状態の生成



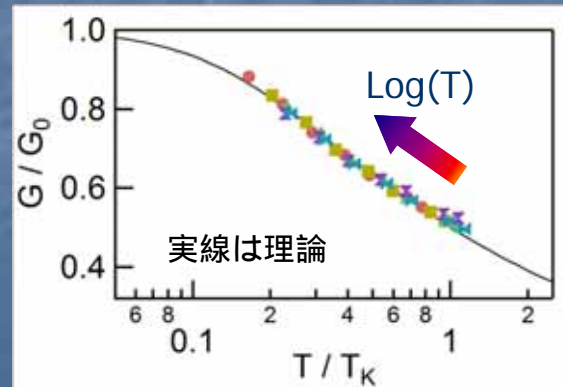
AlGaAs/GaAs 2DEG基板  
 移動度:  $2.7 \times 10^5$  (cm/Vs)  
 電子密度:  $2.4 \times 10^{11}$  (/cm<sup>2</sup>)



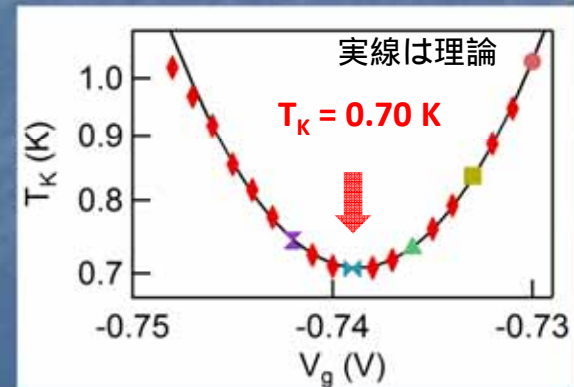
## 近藤共鳴の発達



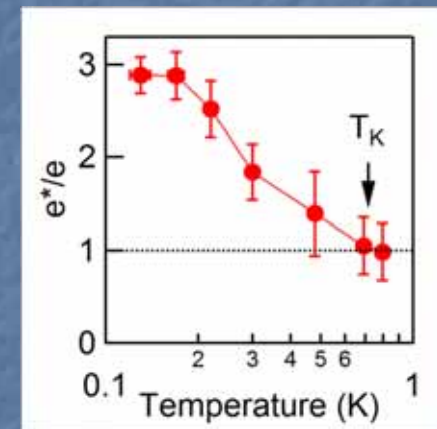
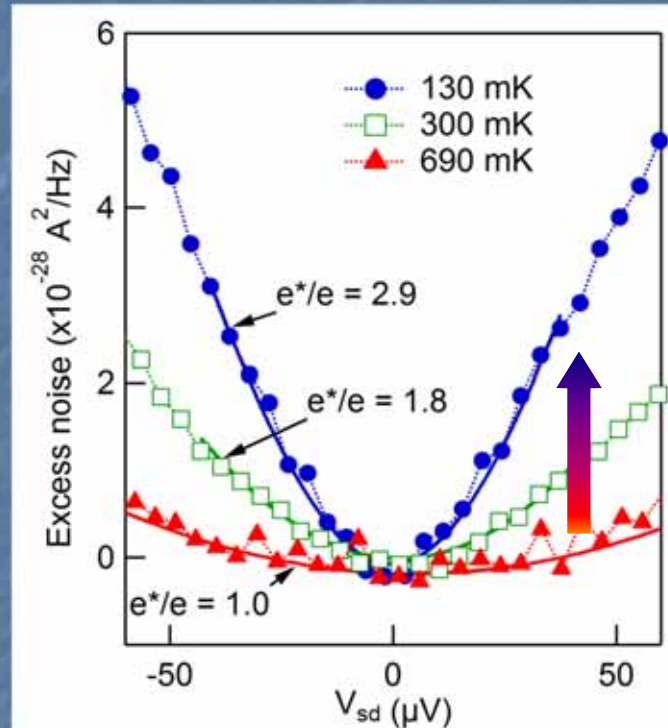
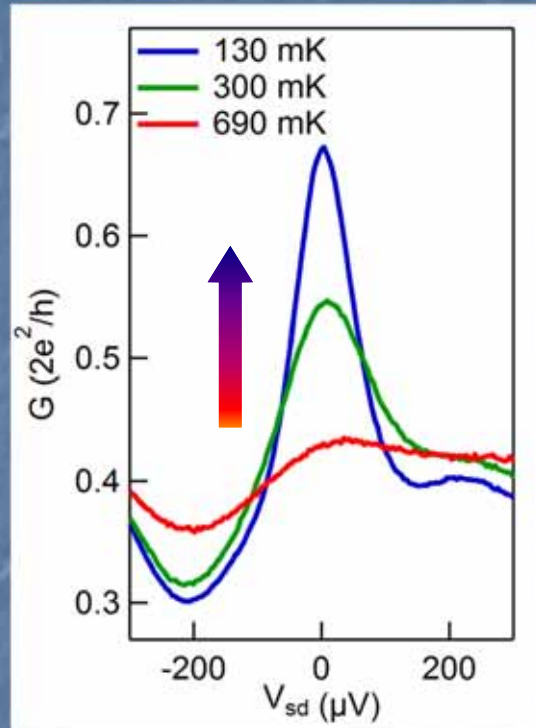
## 近藤スケーリング



## 近藤温度の制御



# ショット雑音の増大



雑音の増大を“有効電荷”  $e^*$  の増大と見なして解析： $S_I = 2e^*I$

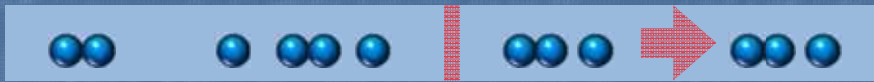
解析では伝導度・温度の変化も考慮

$$S_I = 4k_B T G + 2e^* V_{sd} G \left( 1 - \frac{G}{2e^2/h} \right) \left( \coth \left( \frac{eV_{sd}}{2k_B T} \right) - \frac{2k_B T}{eV_{sd}} \right)$$

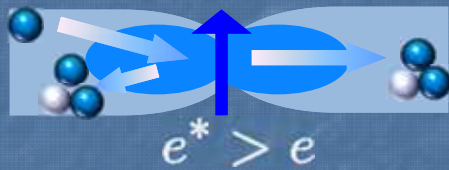
# 電子のバンチング

バンチング

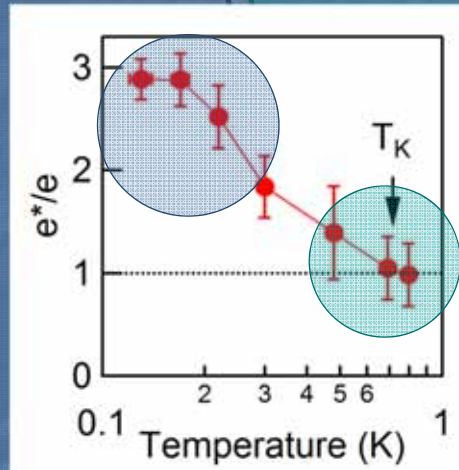
$$S_I > 2eI$$



近藤状態

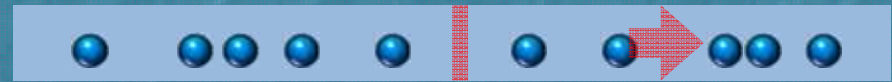


2 粒子後方散乱による  
ショットノイズ増大：  
理論では  $e^*/e = 5/3$

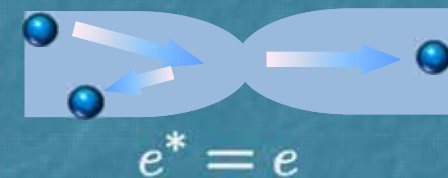


ポアソン過程

$$S_I = 2eI$$



自由電子的



近藤状態に対する “ 衝突実験 ”

理論: Meir and Golub, PRL **88**, 116802 (2002); Sela, Oreg, von Oppen, and Koch, PRL **97**, 086601 (2006); Golub, PRB **73**, 233310 (2006); Gogolin and Komnik, PRL **97**, 016602 (2006); Mora, Leyronas, and Regnault PRL **100**, 036604 (2008); Vitushinsky, Clerk, and Le Hur, PRL **100**, 036603 (2008). Fujii, JPSJ **79**, 044714 (2010); Sela and Malecki, PRB **80**, 233103 (2010); Sakano, Fujii, and Oguri, PRB **83**, 075440 (2011).

# まとめ

- 量子系「ゆらぎの定理」の実験的検証

単一の量子多体系で非平衡性を連続的に制御

Nakamura *et al.* *PRL* **104**, 080602 (2010); *PRB* **83**, 155431 (2011).



- 近藤状態への“衝突実験”

Yamauchi *et al.* *PRL* **106**, 176601 (2011).

小林研介、*固体物理* **46**, 519 (2011).

電流ゆらぎ測定



フェルミオン量子“光学”  
非平衡統計力学

展望

エキゾチック量子状態への展開

量子多体状態の生成過程の実時間観測