

冷却フェルミ原子気体における メゾスコピック伝導

内野 瞬

早稲田大学 高等研究所

WIAS



科研費
KAKENHI

共同研究者

Tilman Esslingerグループ (ETH)



Thierry Giamarchi (ジュネーブ大)



Jean-Philippe Brantut (EPFL)

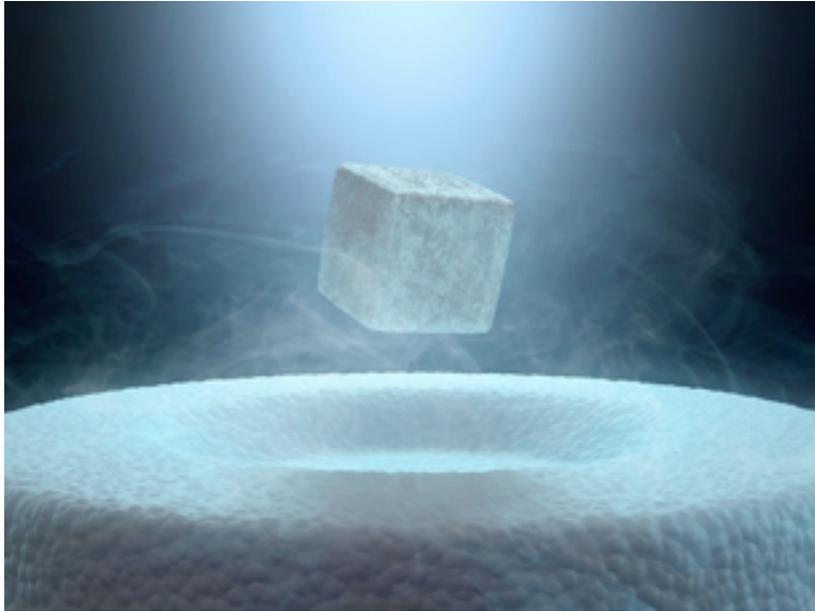


上田正仁 (東大・理研)

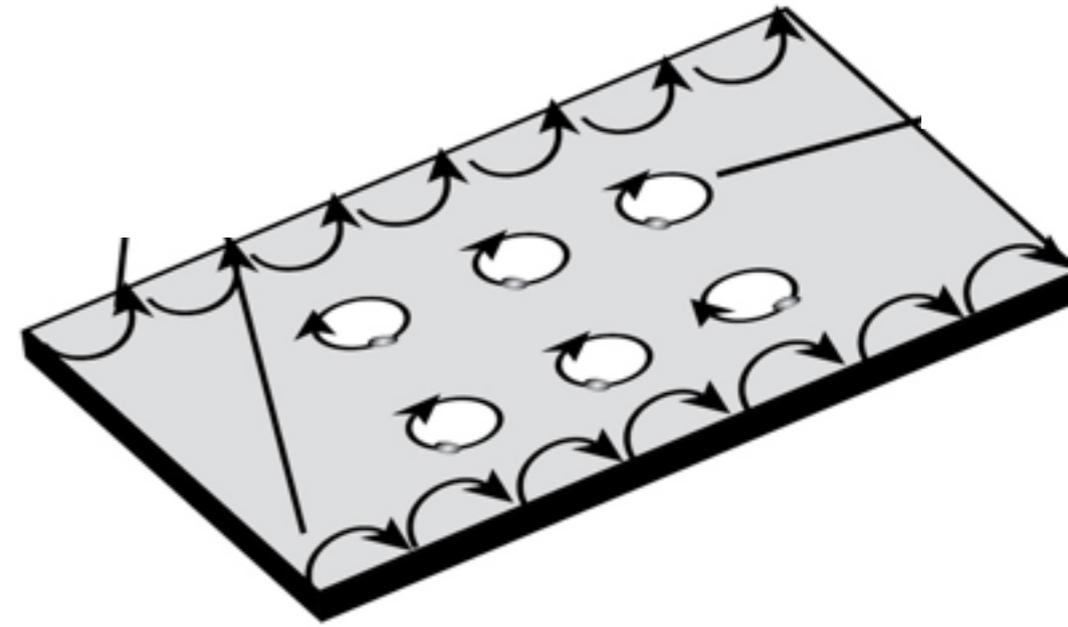


量子多体现象

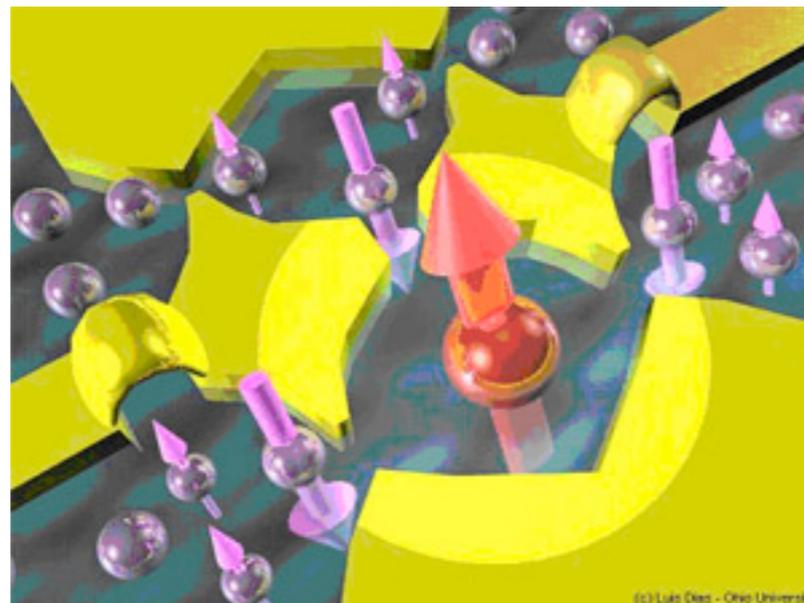
超伝導



量子Hall効果

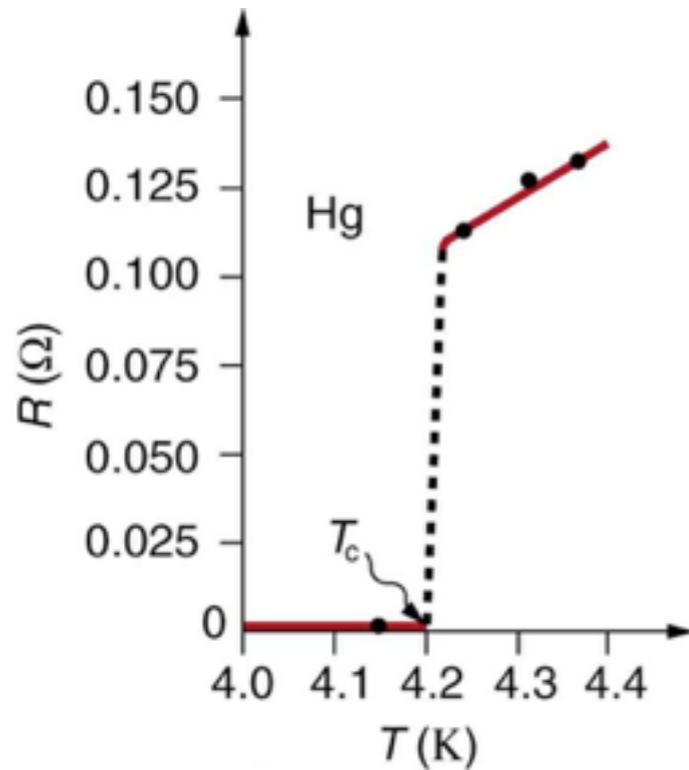


近藤効果

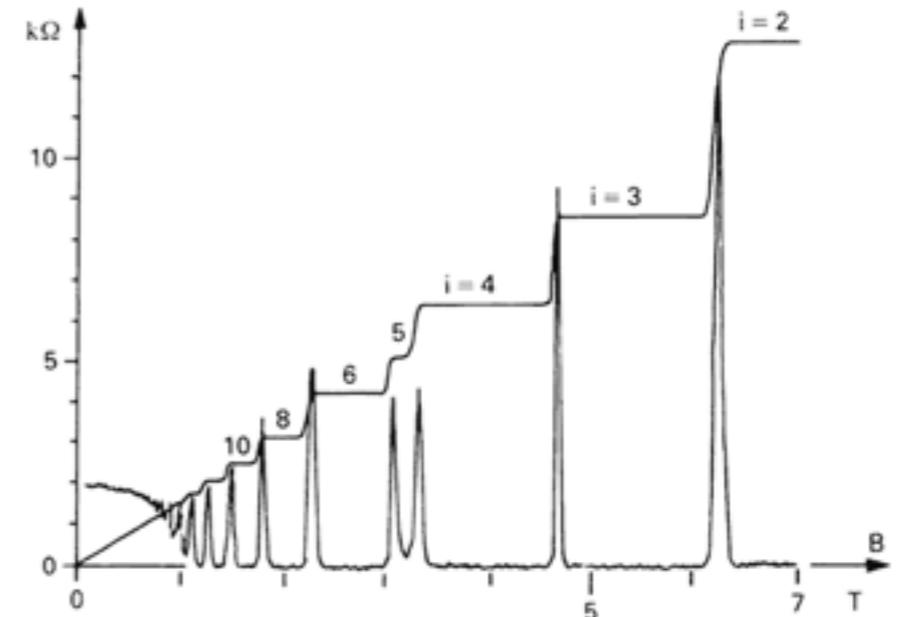


バルク系での輸送特性

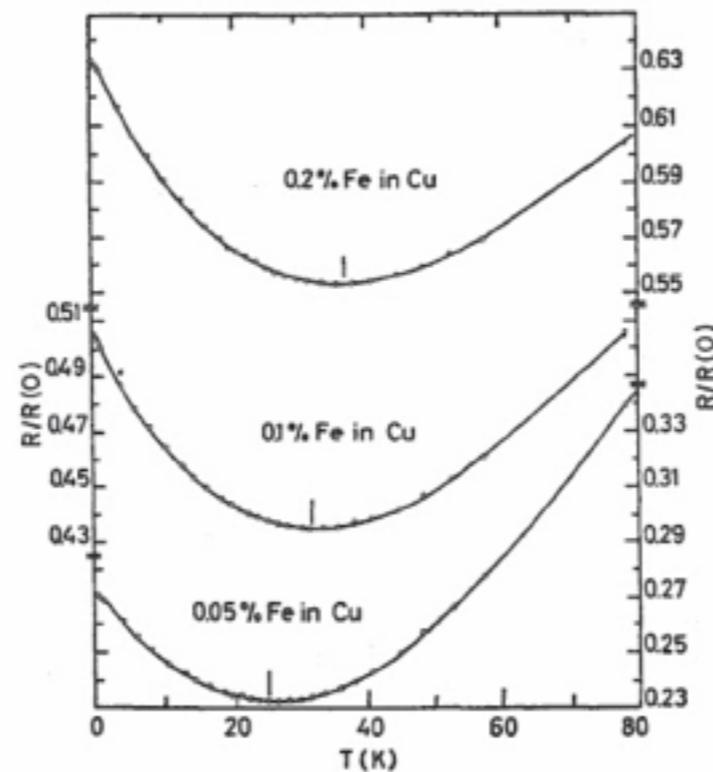
超伝導



量子Hall効果

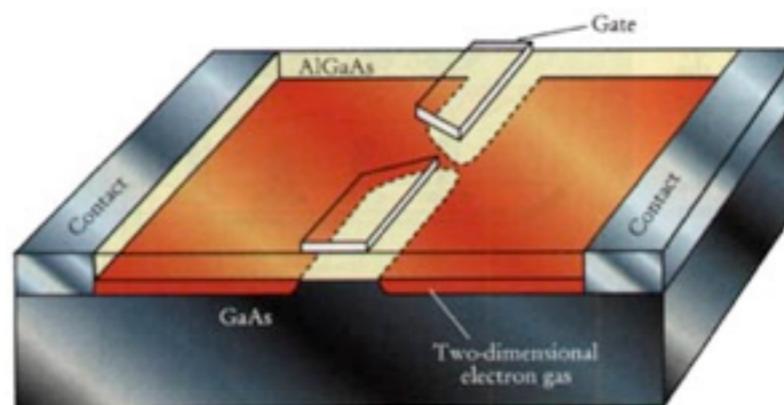
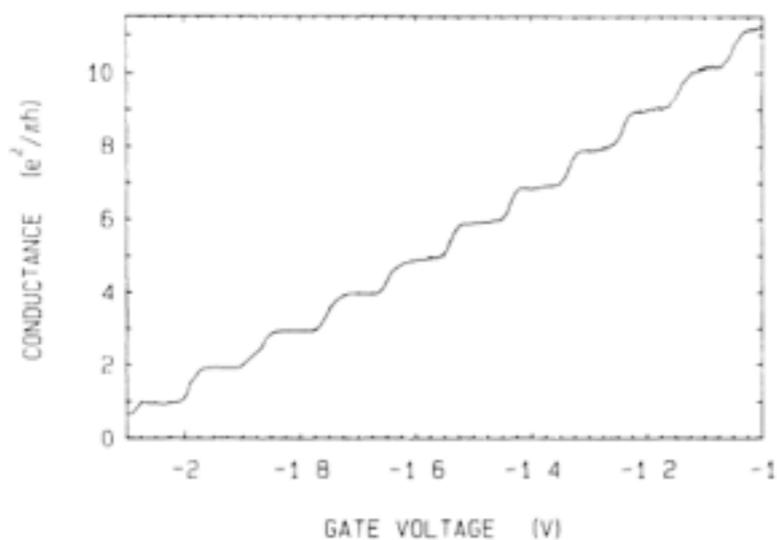


近藤効果



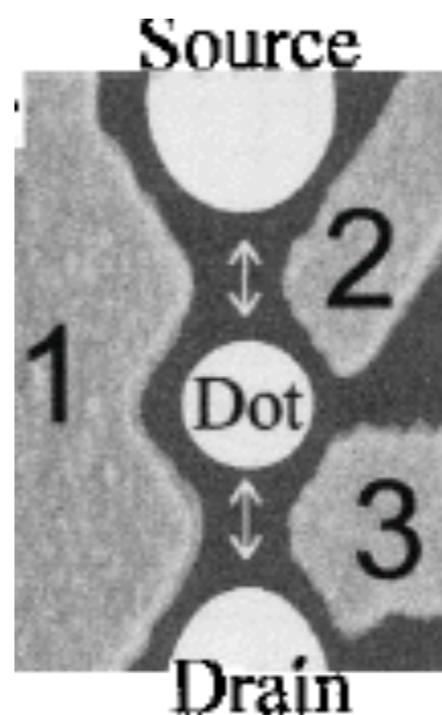
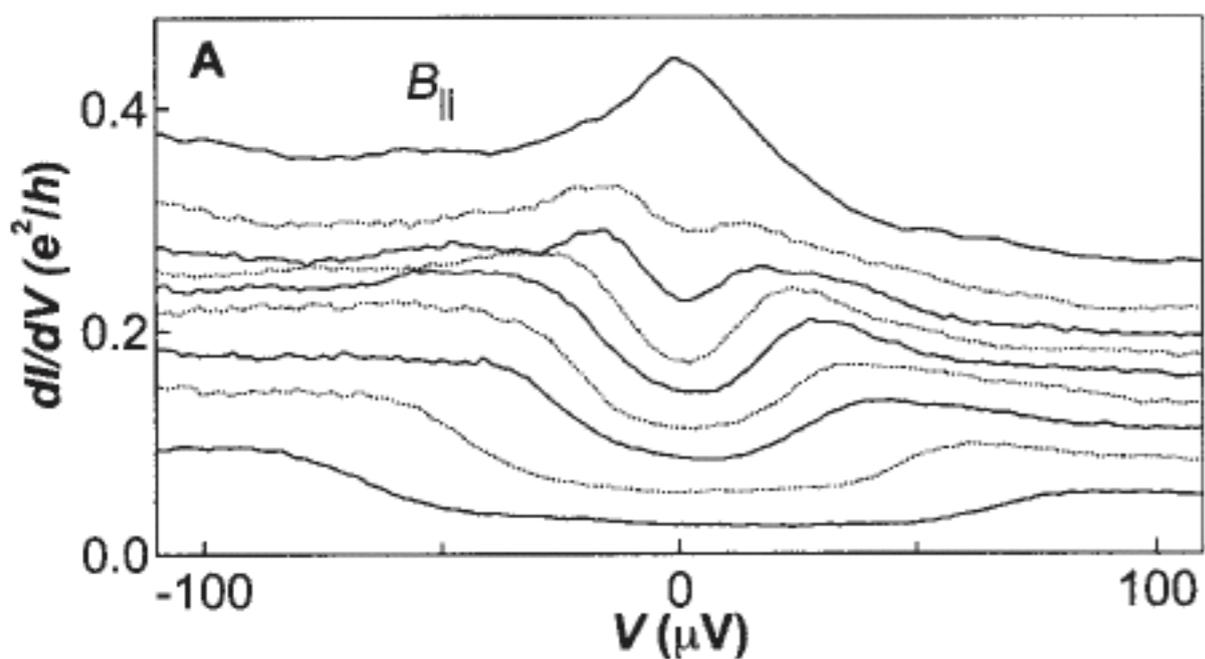
メゾスコピック系の輸送現象

- 量子ポイントコンタクト系でのコンダクタンス量子化



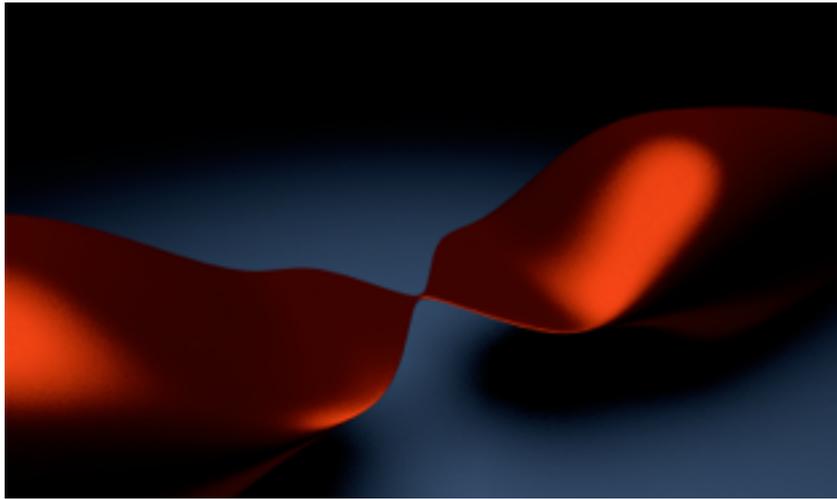
Wees et al., PRL **60**, 848 (1988)

- 量子ドット系での近藤効果



Cronenwett et al., Science **281**, 540 (1998)

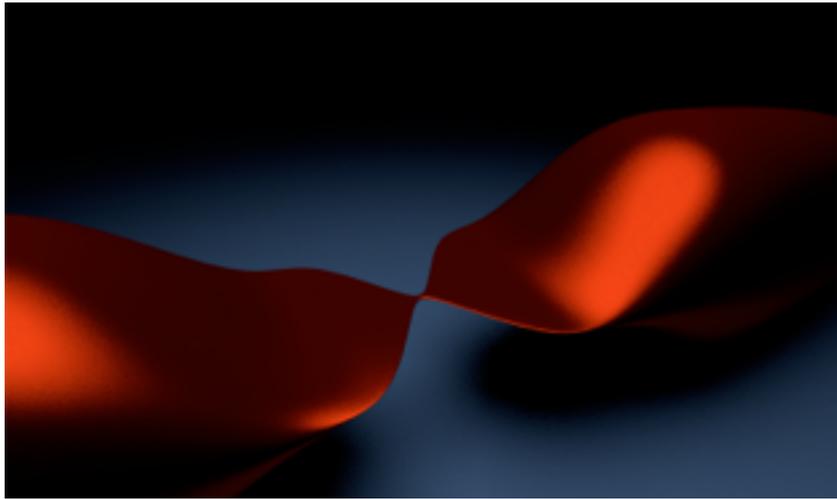
冷却原子気体での量子輸送



S. Krinner (Ph.D thesis, ETH, 2015)

	Cold fermionic atoms (${}^6\text{Li}$)		Electrons in solids	
			Metals [Ash76]	GaAs 2DEG [Fer97, Wee91, Rös11]
Density	10^{12} cm^{-3}	10^{23} cm^{-3}	10^{23} cm^{-3}	10^{11} cm^{-2}
Mass	10^{-28} kg	10^{-30} kg	10^{-30} kg	10^{-32} kg^1
Fermi wavelength	$1 \mu\text{m}$	0.5 nm	0.5 nm	40 nm
Fermi velocity	cm/s	10^8 cm/s	10^8 cm/s	10^7 cm/s
Fermi temperature T_F	μK	10^5 K	10^5 K	100 K
Temperature T	nK			mK
T/T_F	0.1		$T[\text{K}]/10^5$	10^{-3}
Interactions	van der Waals effectively contact-like ² tunable			Coulomb long-range ³ material dependent

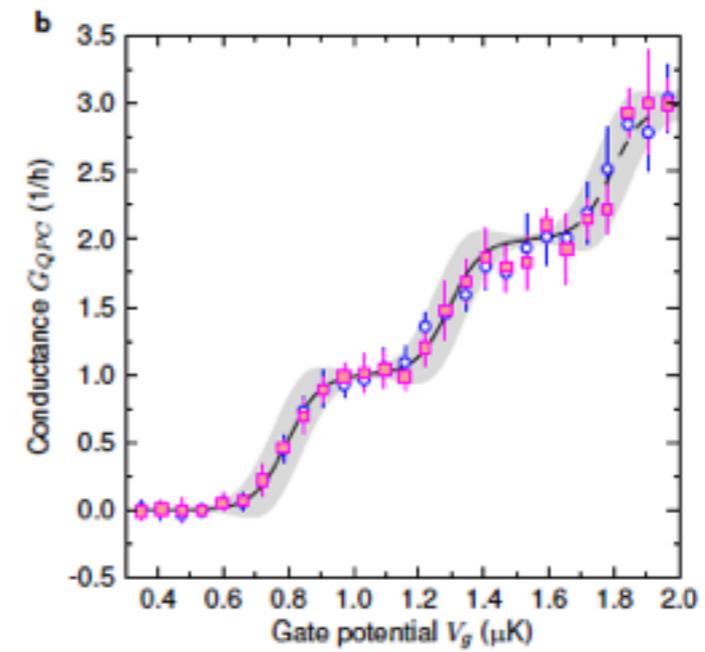
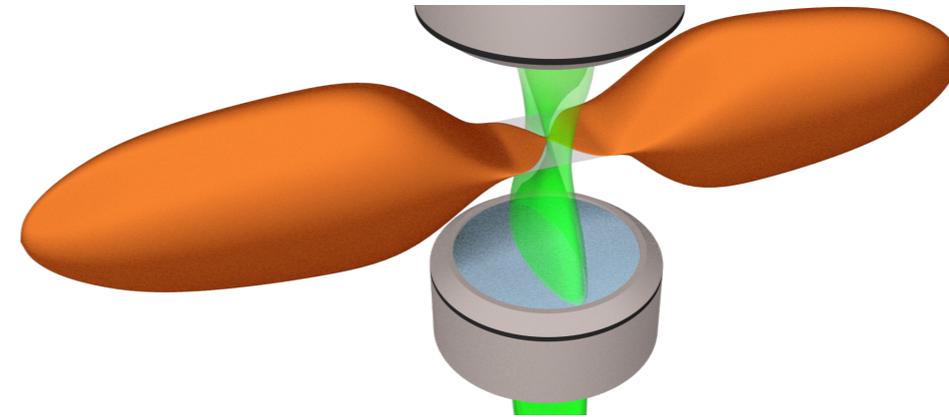
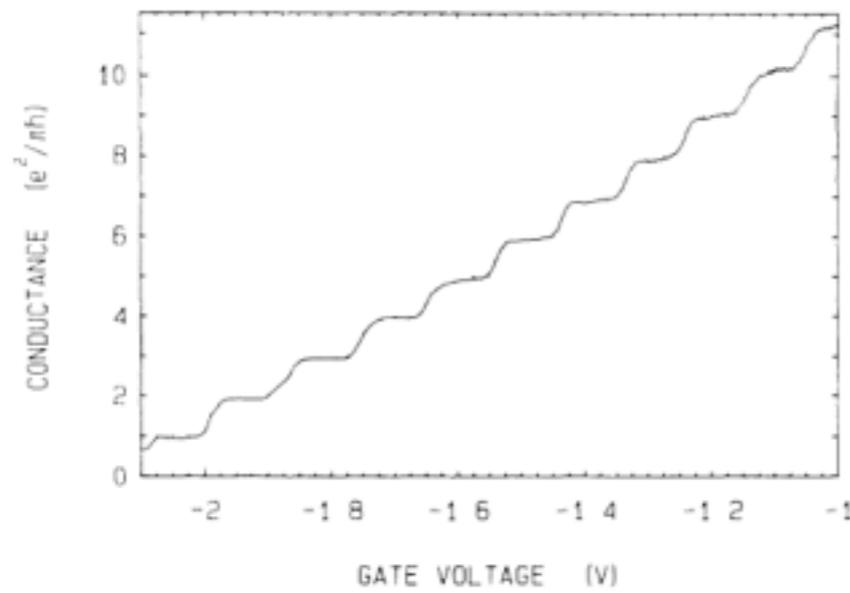
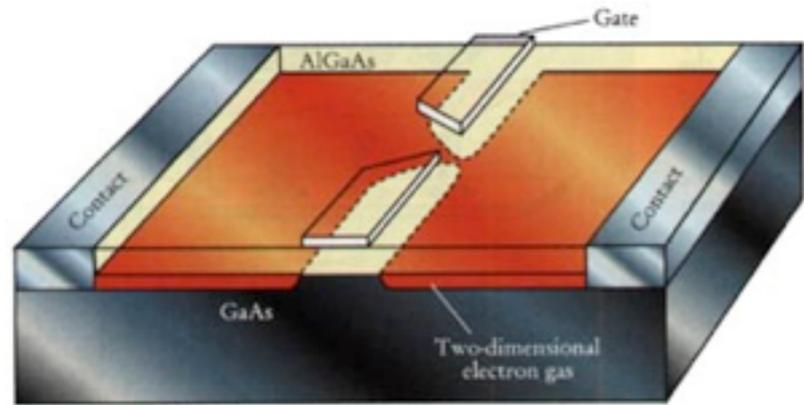
冷却原子気体での量子輸送



S. Krinner (Ph.D thesis, ETH, 2015)

	Cold fermionic atoms (${}^6\text{Li}$)	Electrons in solids	
		Metals [Ash76]	GaAs 2DEG [Fer97, Wee91, Rös11]
Density	10^{12} cm^{-3}	10^{23} cm^{-3}	10^{11} cm^{-2}
Mass	10^{-28} kg	10^{-30} kg	10^{-32} kg^1
Fermi wavelength	$1 \mu\text{m}$	0.5 nm	40 nm
Fermi velocity	cm/s	10^8 cm/s	10^7 cm/s
Fermi temperature T_F	μK	10^5 K	100 K
Temperature T	nK		mK
T/T_F	0.1	$T[\text{K}]/10^5$	10^{-3}
Interactions	van der Waals effectively contact-like ² tunable		Coulomb long-range ³ material dependent

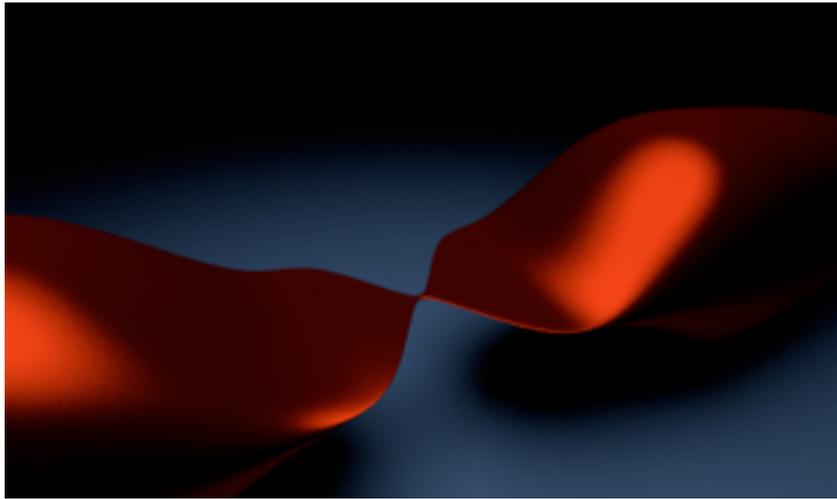
共通の現象



Wees et al., PRL **60**, 848 (1988).

Krinner et al., Nature **517**, 64 (2015).

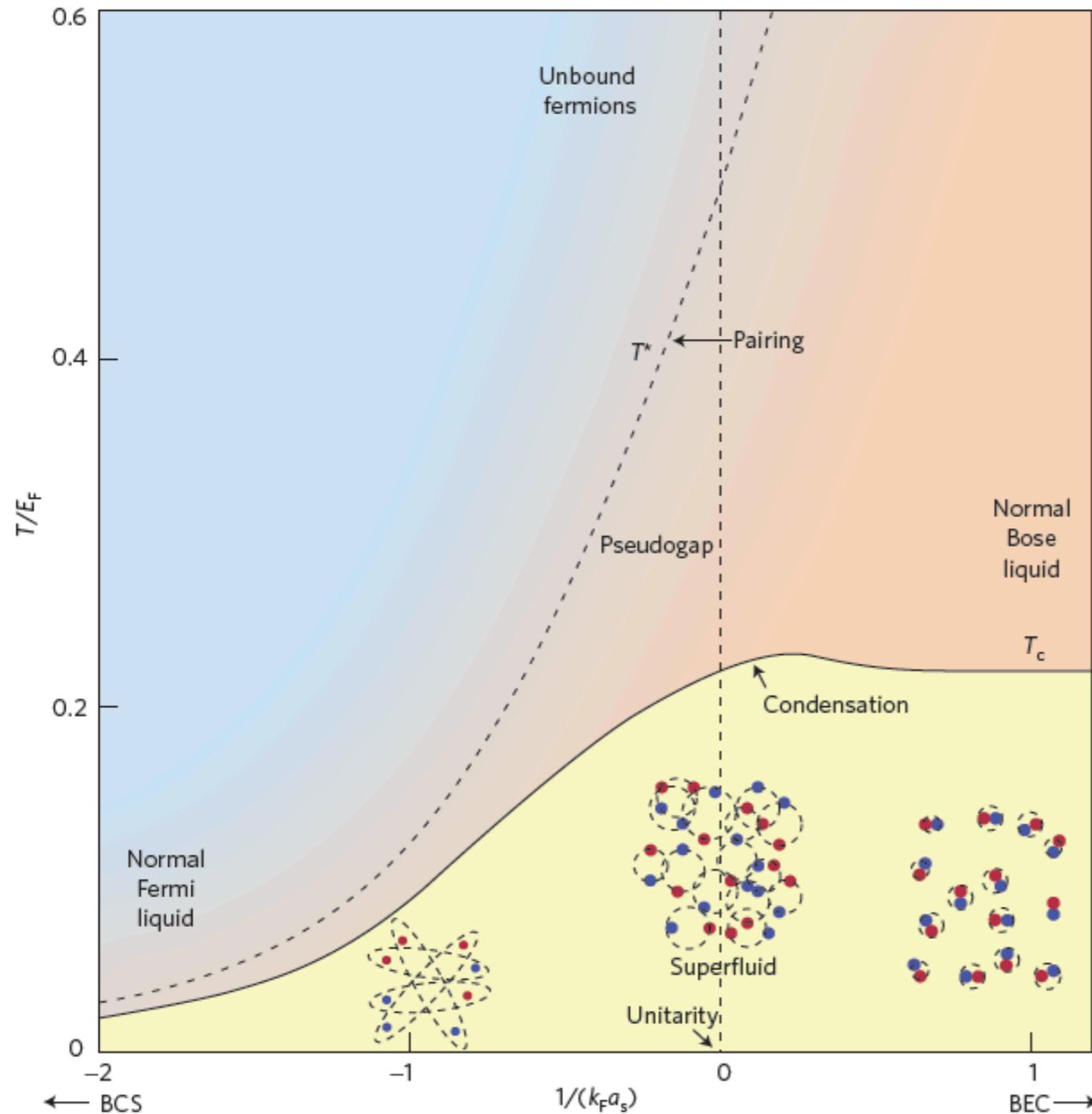
冷却原子気体での量子輸送



S. Krinner (Ph.D thesis, ETH, 2015)

	Cold fermionic atoms (${}^6\text{Li}$)		Electrons in solids	
			Metals [Ash76]	GaAs 2DEG [Fer97, Wee91, Rös11]
Density	10^{12} cm^{-3}	10^{23} cm^{-3}	10^{23} cm^{-3}	10^{11} cm^{-2}
Mass	10^{-28} kg	10^{-30} kg	10^{-30} kg	10^{-32} kg^1
Fermi wavelength	$1 \mu\text{m}$	0.5 nm	0.5 nm	40 nm
Fermi velocity	cm/s	10^8 cm/s	10^8 cm/s	10^7 cm/s
Fermi temperature T_F	μK	10^5 K	10^5 K	100 K
Temperature T	nK			mK
T/T_F	0.1		$T[\text{K}]/10^5$	10^{-3}
Interactions	van der Waals effectively contact-like ²			Coulomb long-range ³
	tunable			material dependent

強結合フェルミ原子気体の相図



強結合領域での転移温度

$$T_c \sim 0.2T_F$$

cf., high- T_c superconductor:

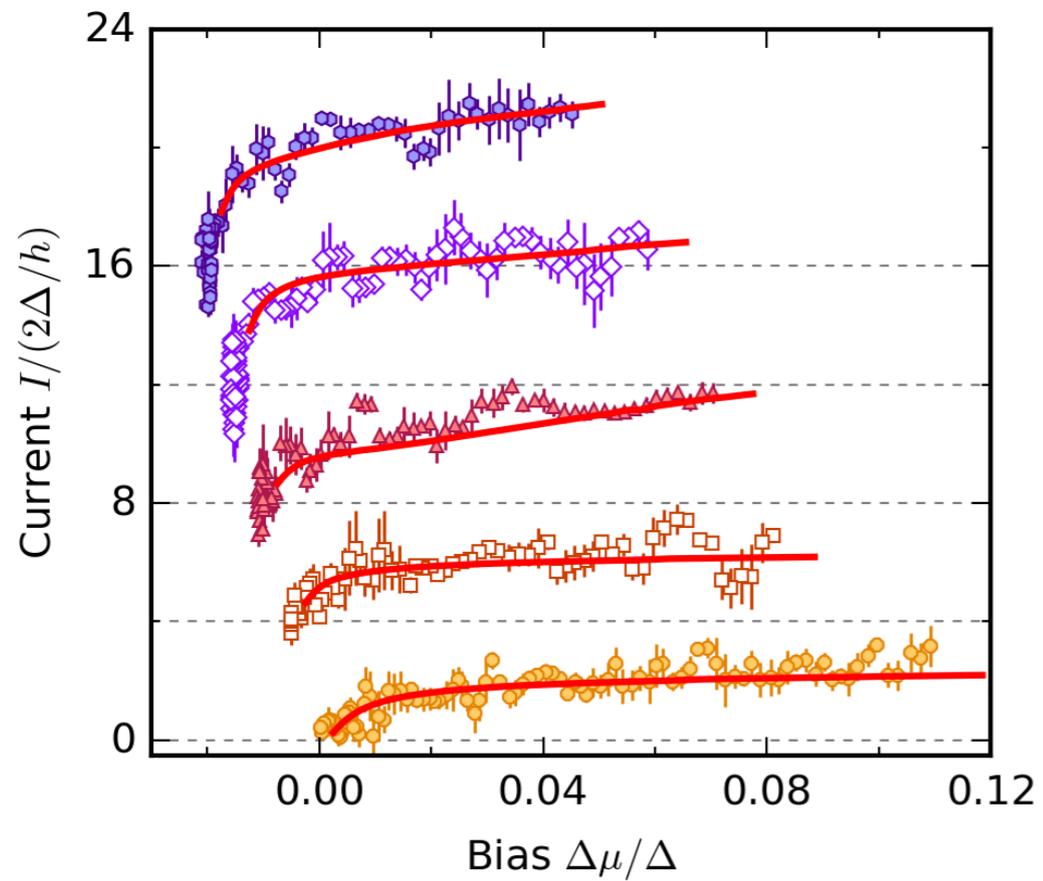
$$T_c \sim 10^{-2}T_F$$

M. Randeria, E. Taylor,

Annual Review of Condensed matter physics **5**, 209 (2014).

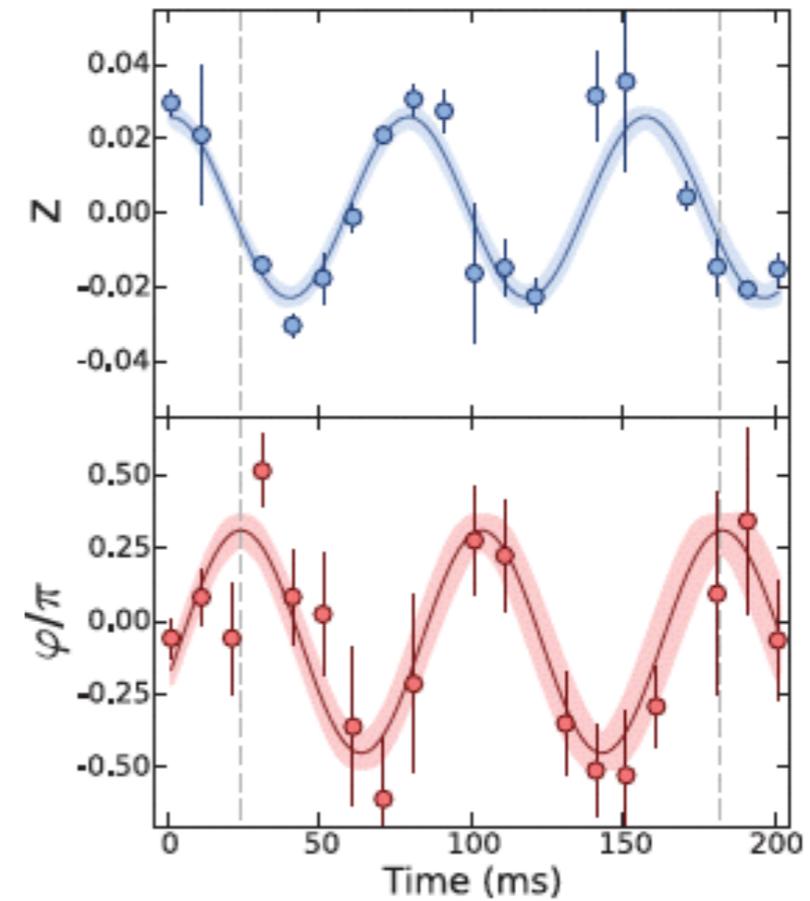
強結合フェルミ原子気体超流動の輸送特性

多重Andreev反射による非線形I-V曲線



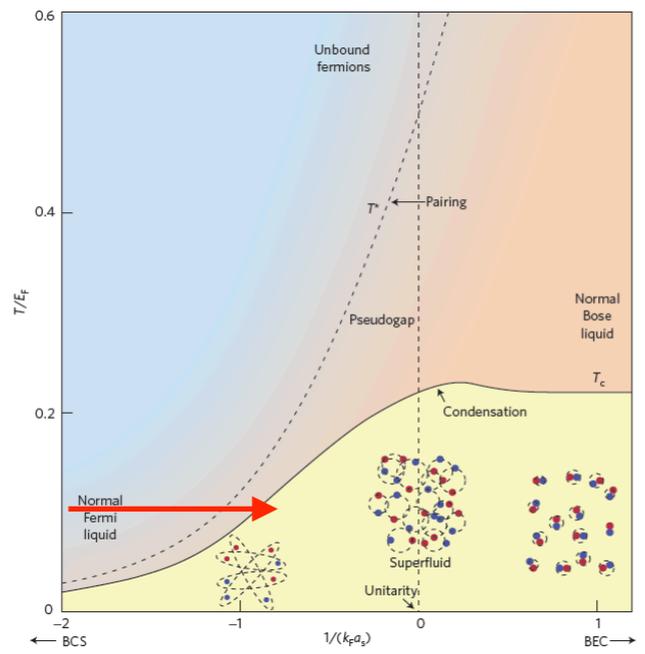
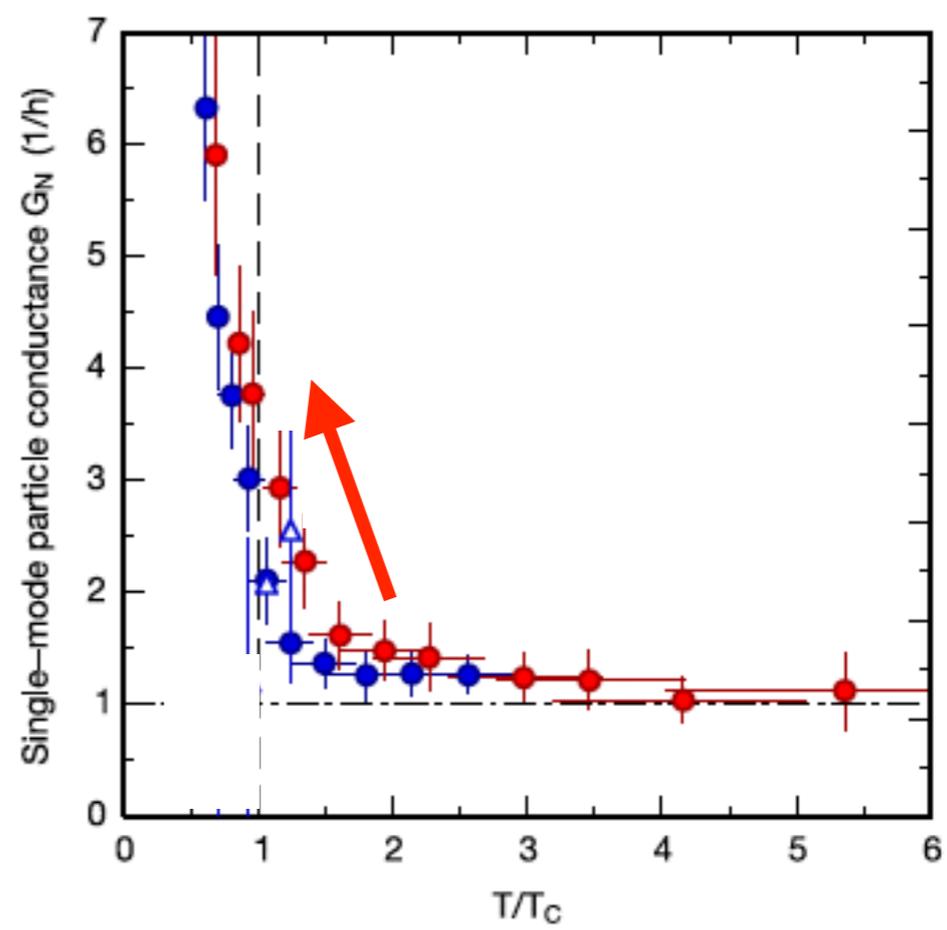
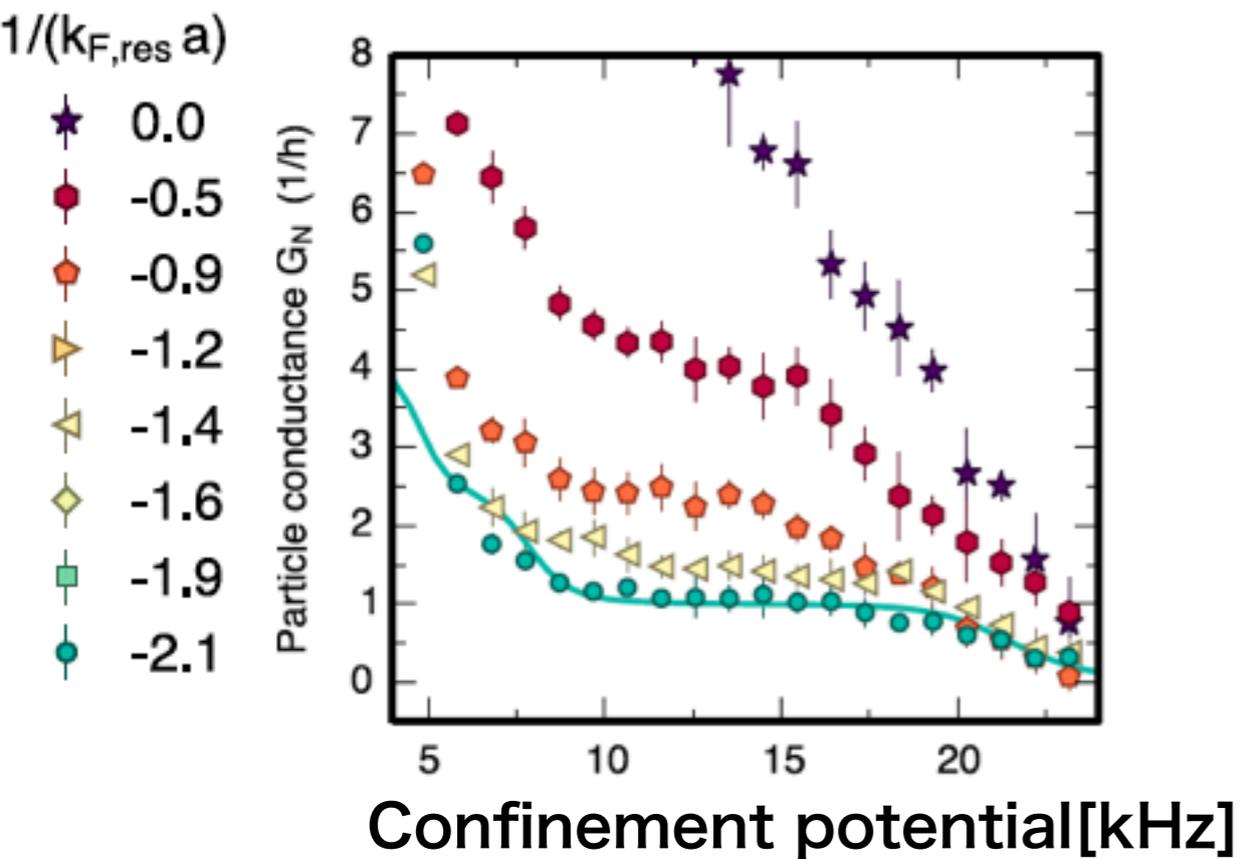
Husmann, SU et al.,
Science **350**, 1498 (2015).

Josephson振動



Valtolina et al.,
Science **350**, 1505 (2015).

強結合フェルミ原子気体の異常コンダクタンス

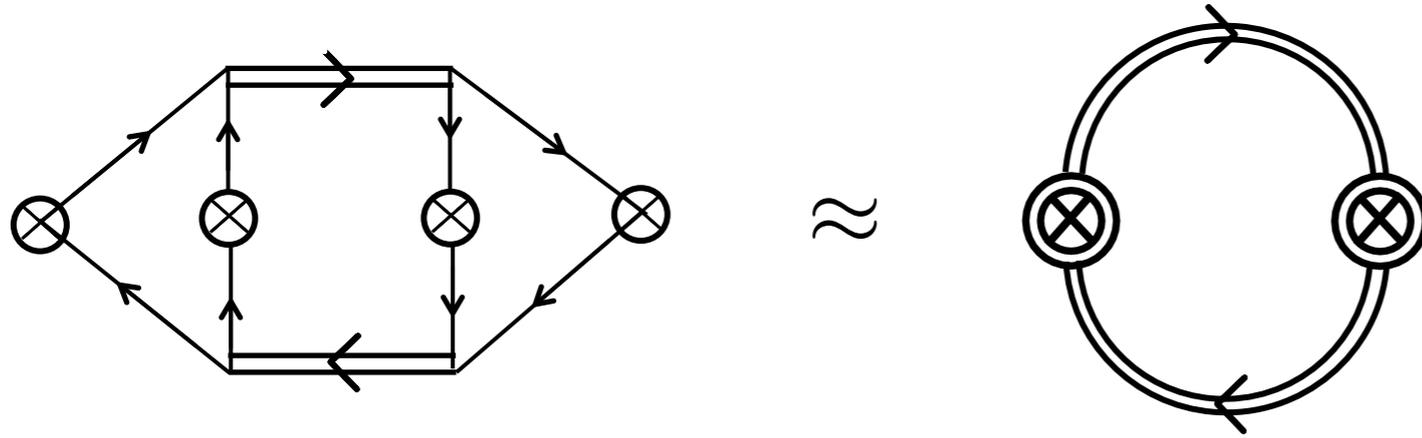


これまで知られていない現象

S. Krinner et al., PNAS **113**, 8144 (2016).

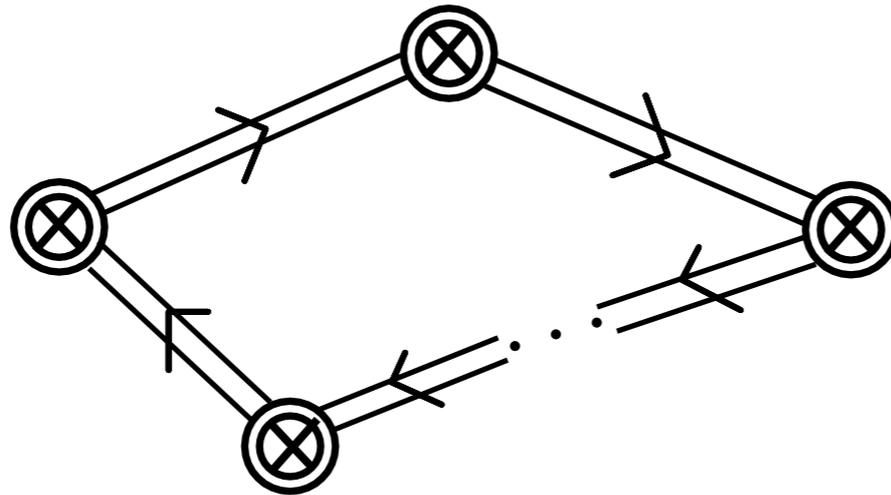
超流動揺らぎ効果による理解

- リーディング・オーダーのペア輸送(トンネルハミルトニアン)

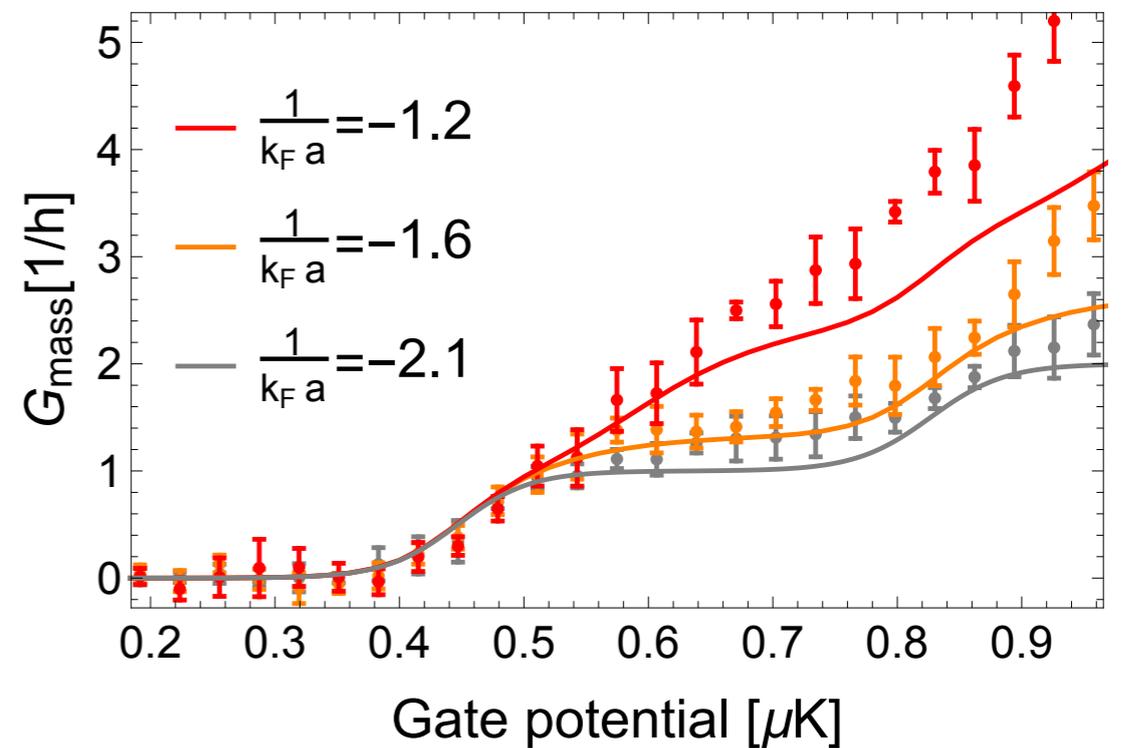
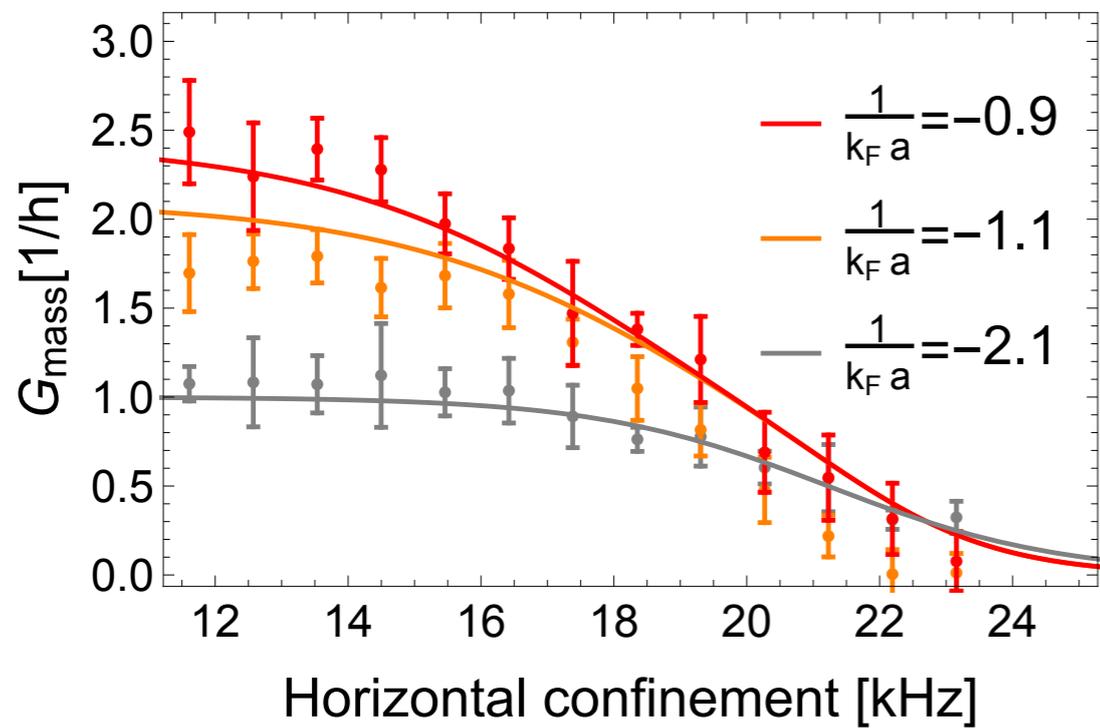
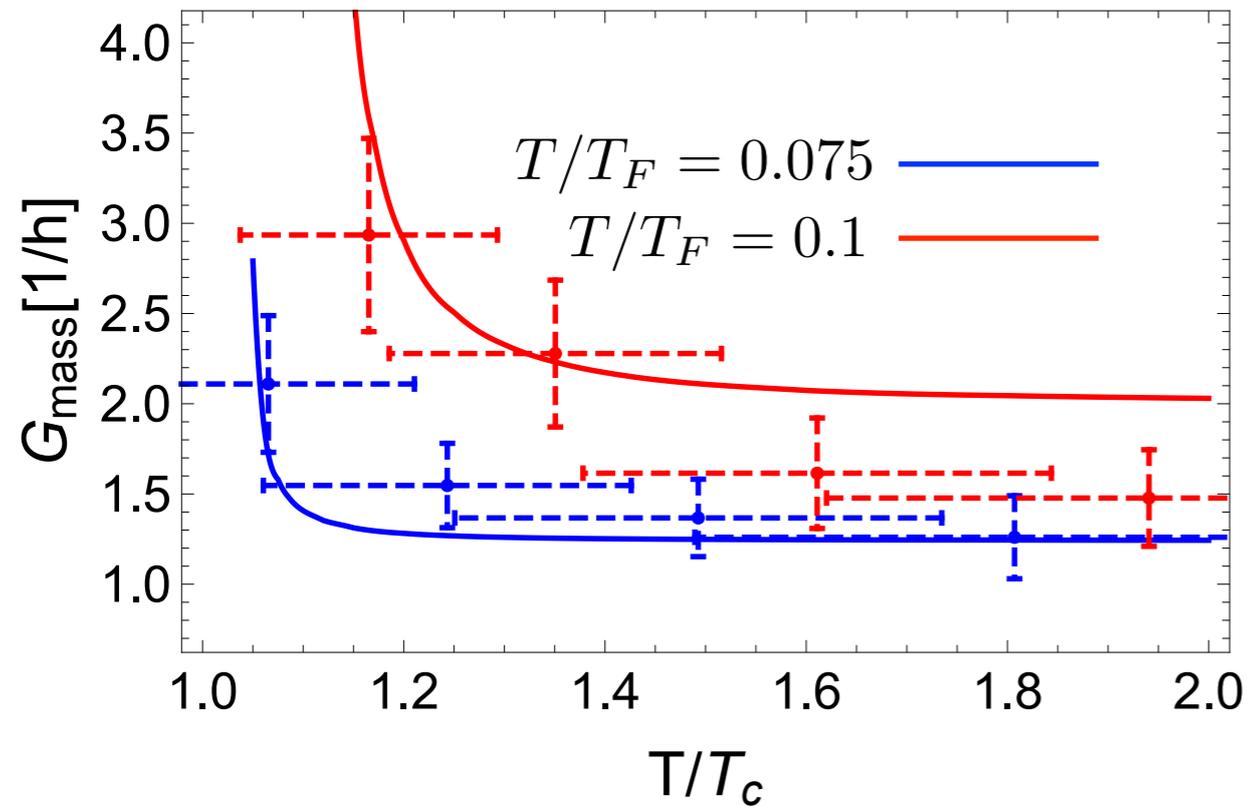


Aslamazov-Larkin過程

- 高次の項(透過率 ~ 1 の弾道極限で無視できない)

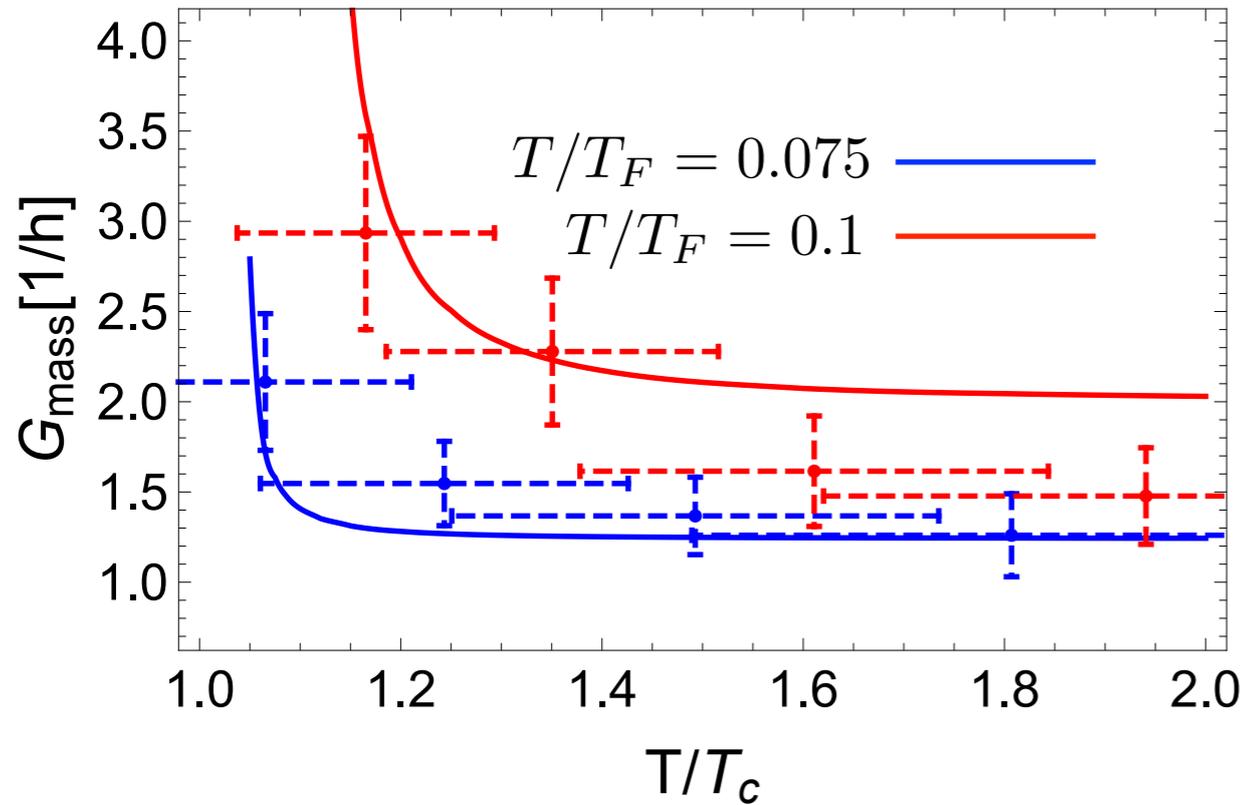


実験と理論の比較

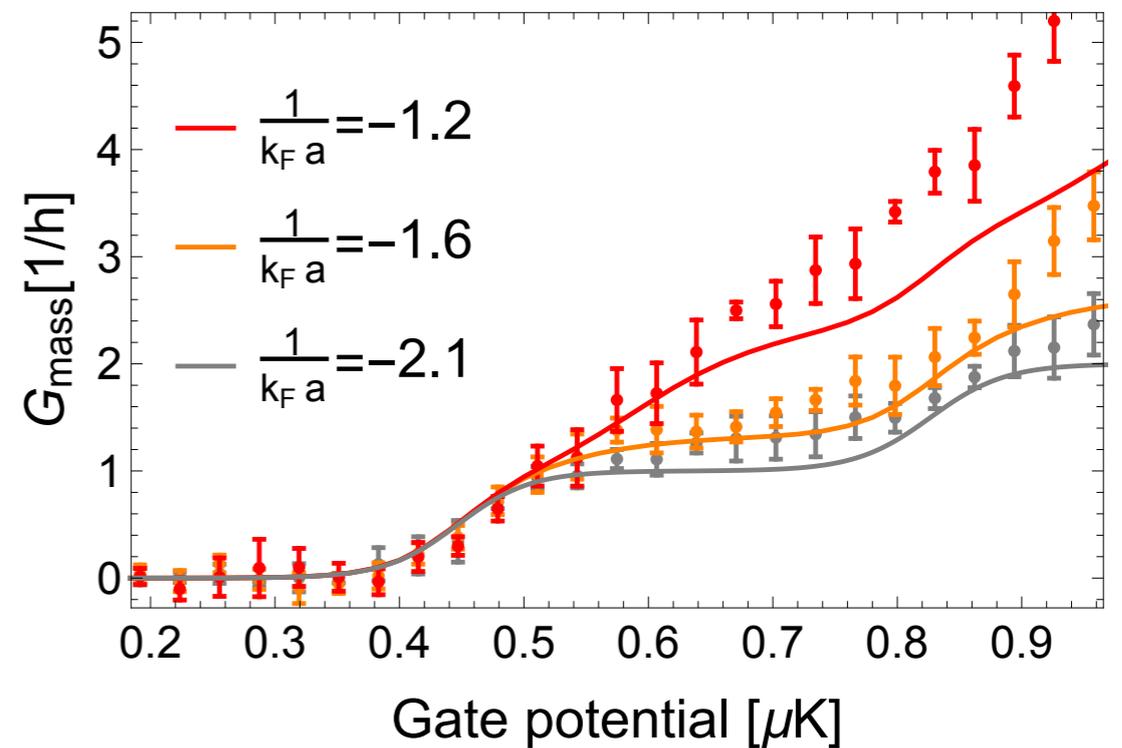
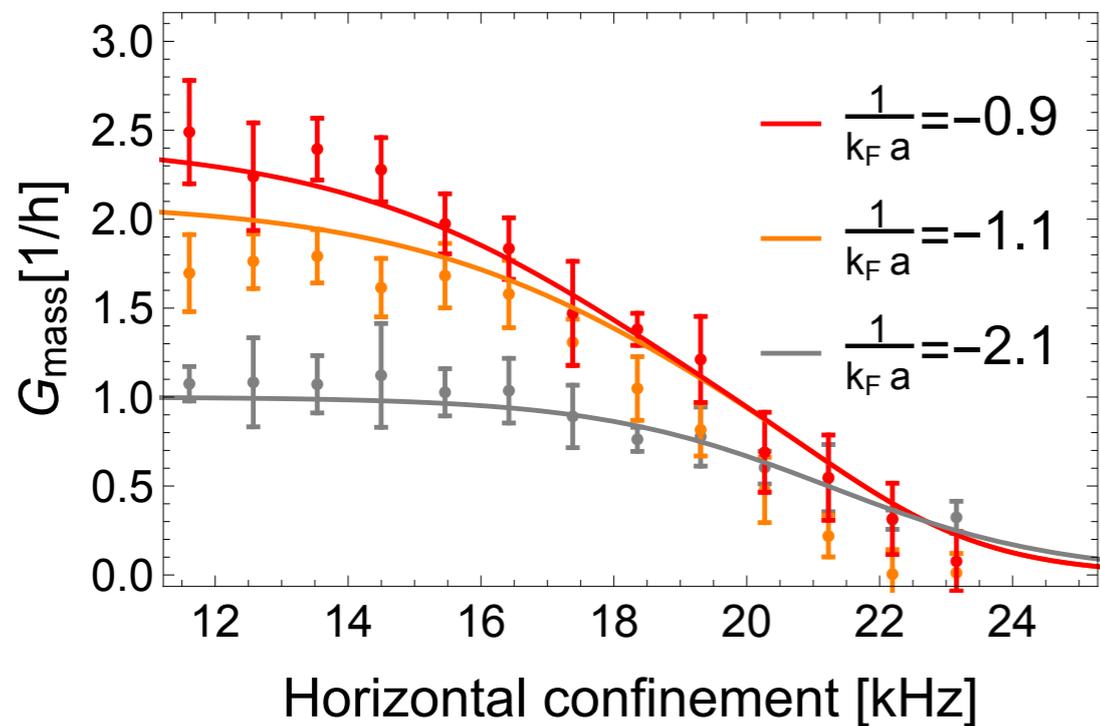


SU and M. Ueda, PRL **118**, 105303 (2017).

実験と理論の比較



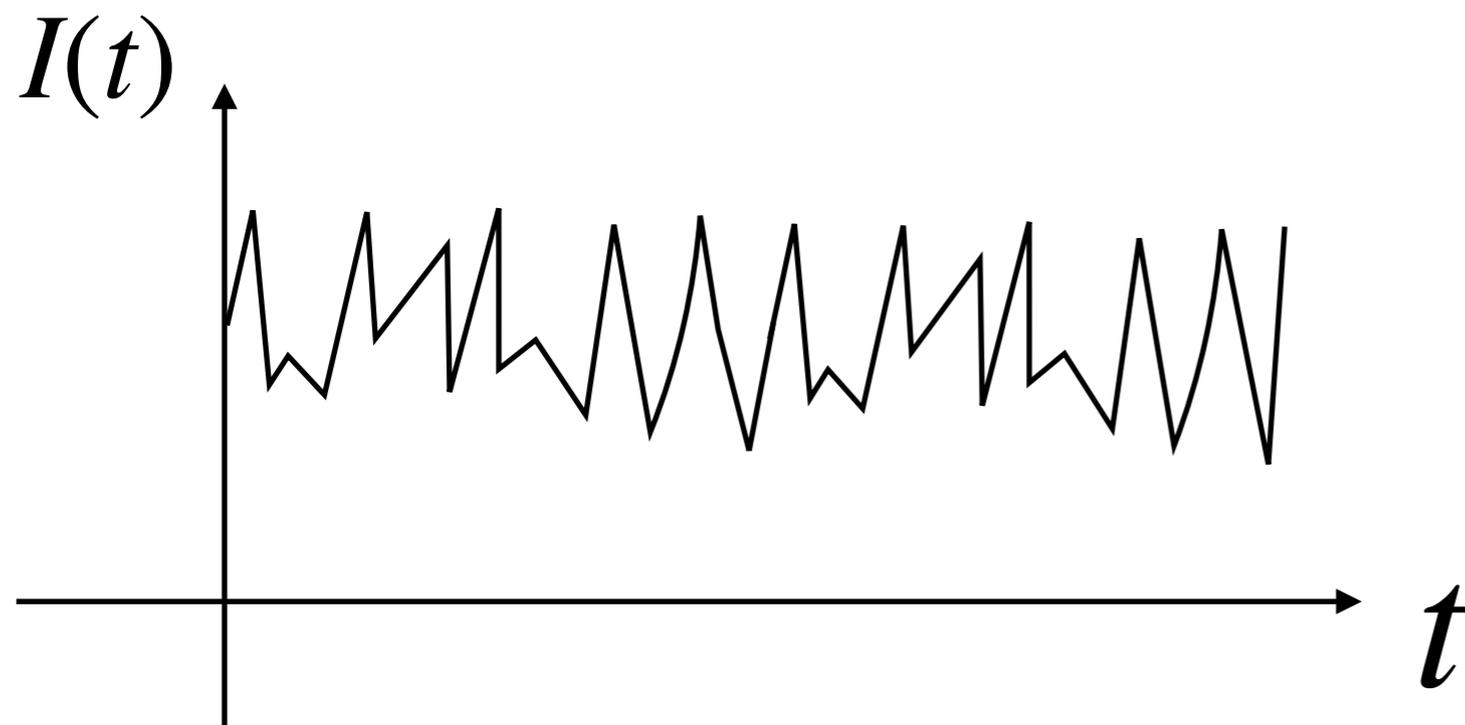
異常コンダクタンスの本質:
超流動揺らぎに起因するペア輸送



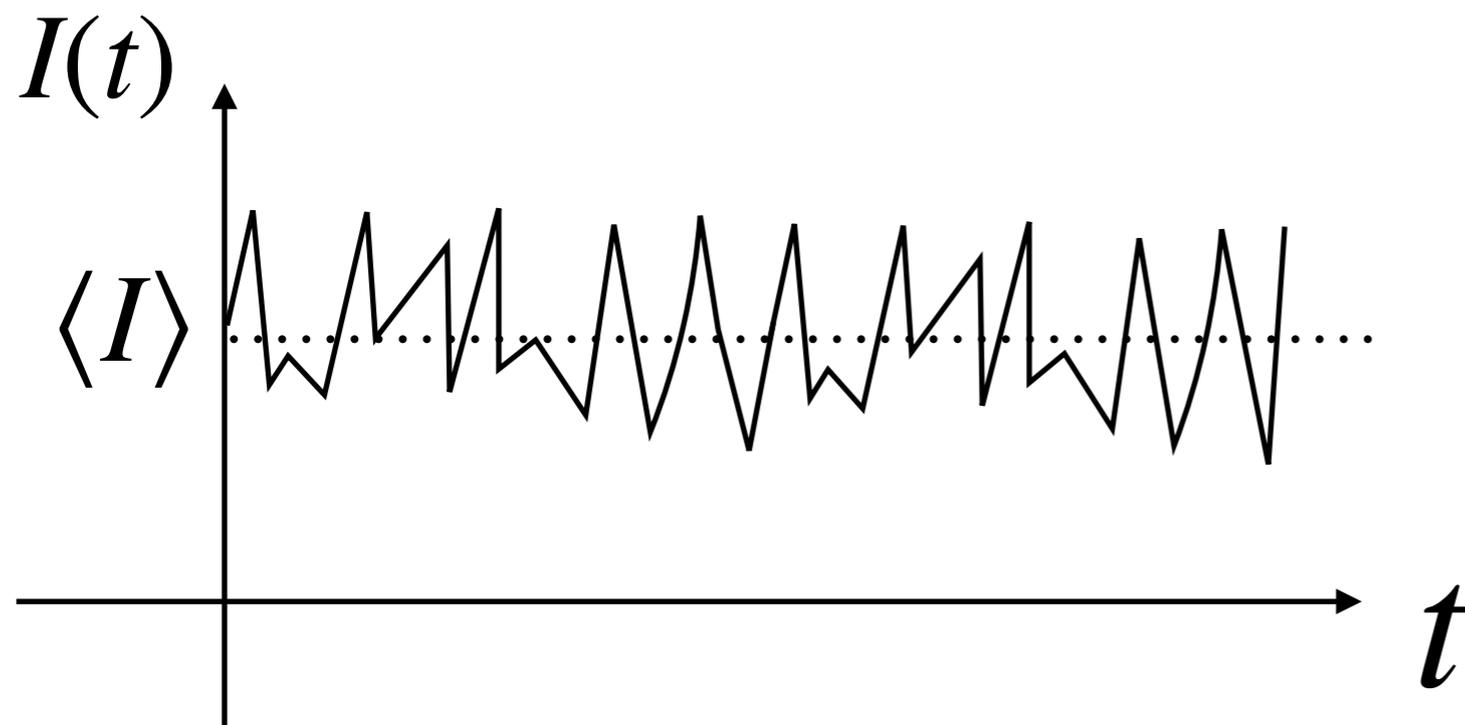
冷却原子気体におけるカレント・ノイズ測定

SU, M. Ueda, and J.-P. Brantut, arXiv:1802.04024

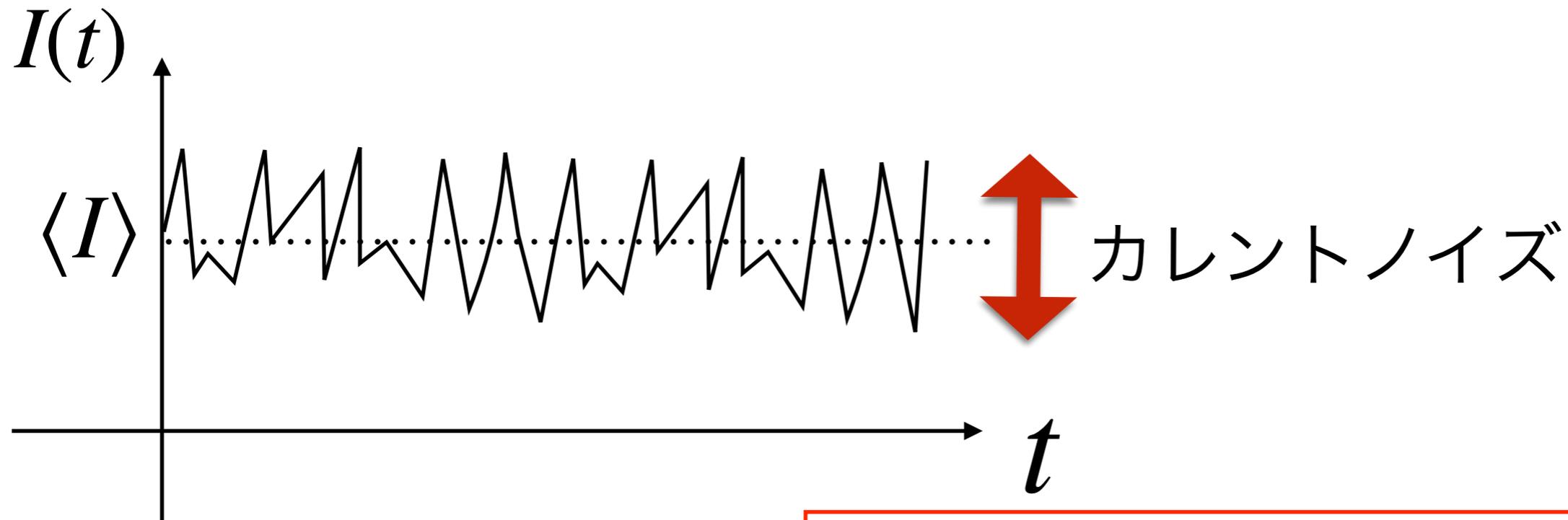
メゾスコピック系におけるカレントの振る舞い



メゾスコピック系におけるカレントの振る舞い

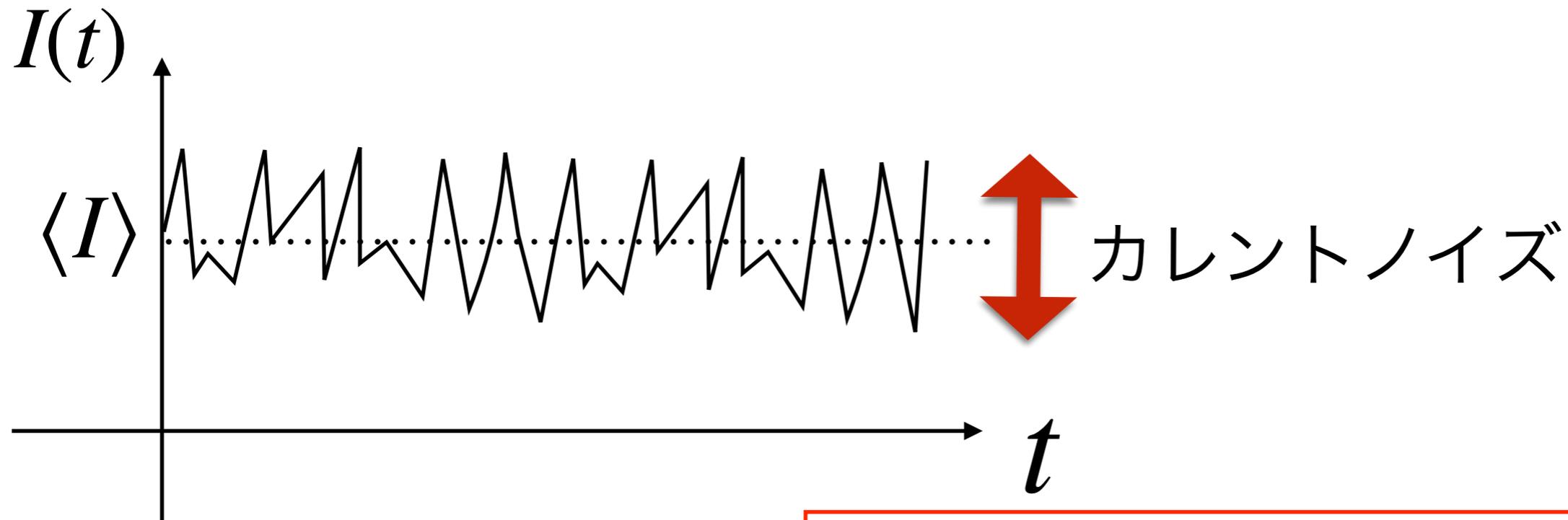


メゾスコピック系におけるカレントの振る舞い



$$S(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} dt \int_{-T/2}^{T/2} dt' e^{i\omega(t-t')} \langle \Delta I(t) \Delta I(t') \rangle$$

メゾスコピック系におけるカレントの振る舞い

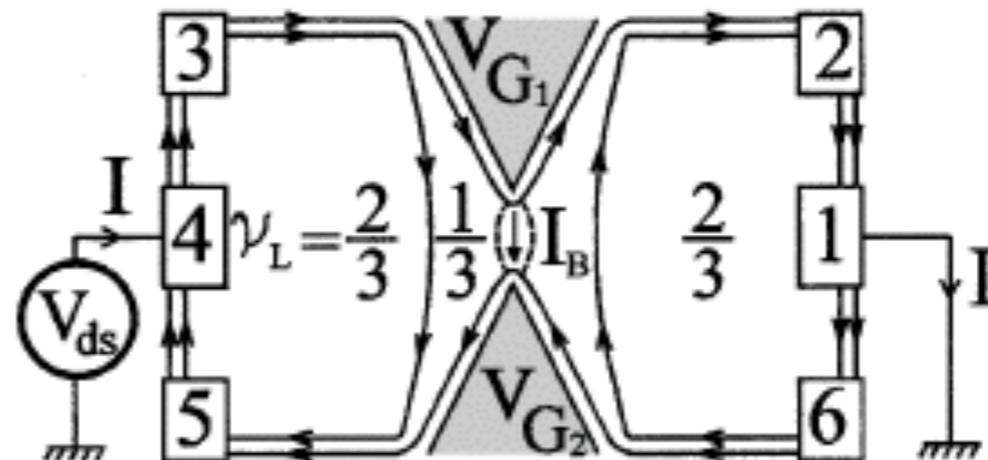


$$S(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} dt \int_{-T/2}^{T/2} dt' e^{i\omega(t-t')} \langle \Delta I(t) \Delta I(t') \rangle$$

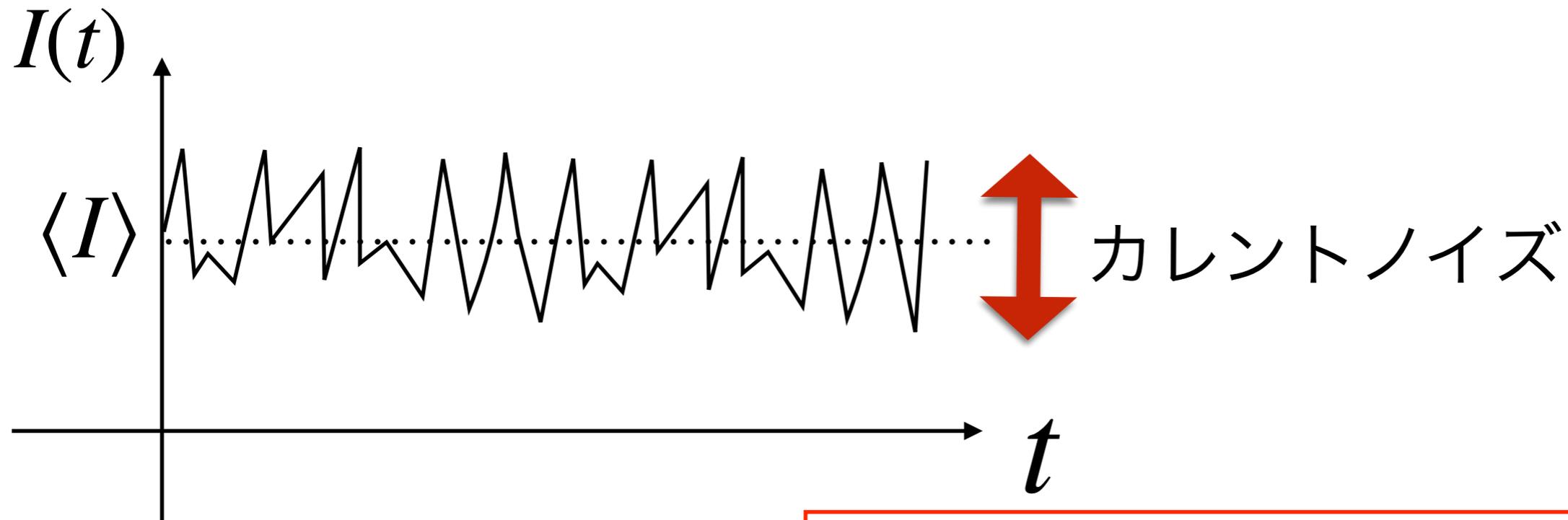
例) 分数量子Hall効果の電荷

$$\frac{S(0)}{I} = 2e^*$$

$$e^* = e/3 \quad (\nu = 1/3)$$



メゾスコピック系におけるカレントの振る舞い



$$S(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} dt \int_{-T/2}^{T/2} dt' e^{i\omega(t-t')} \langle \Delta I(t) \Delta I(t') \rangle$$

例) 分数量子Hall効果の電荷

$$\frac{S(0)}{I} = 2e^*$$

$$e^* = e/3 \quad (\nu = 1/3)$$

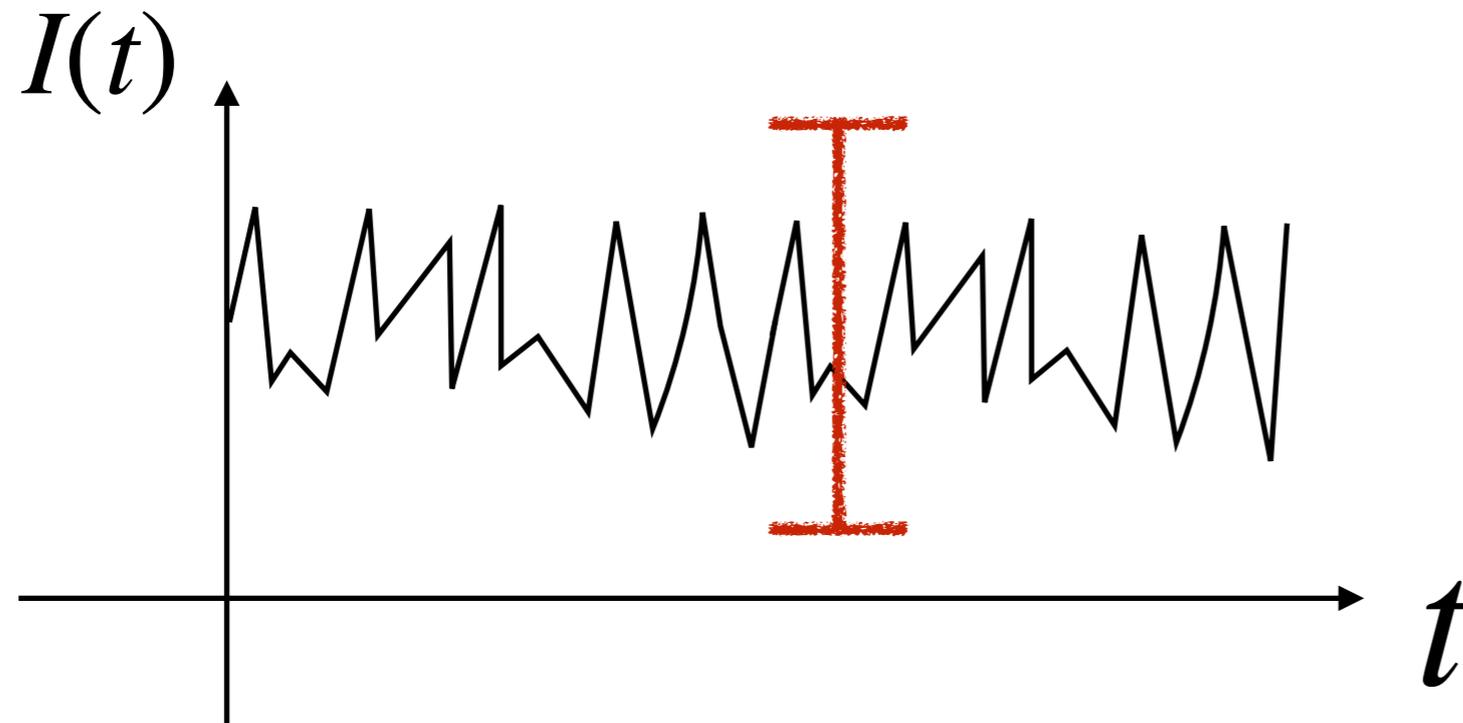


R. Landauer

The noise is the signal.

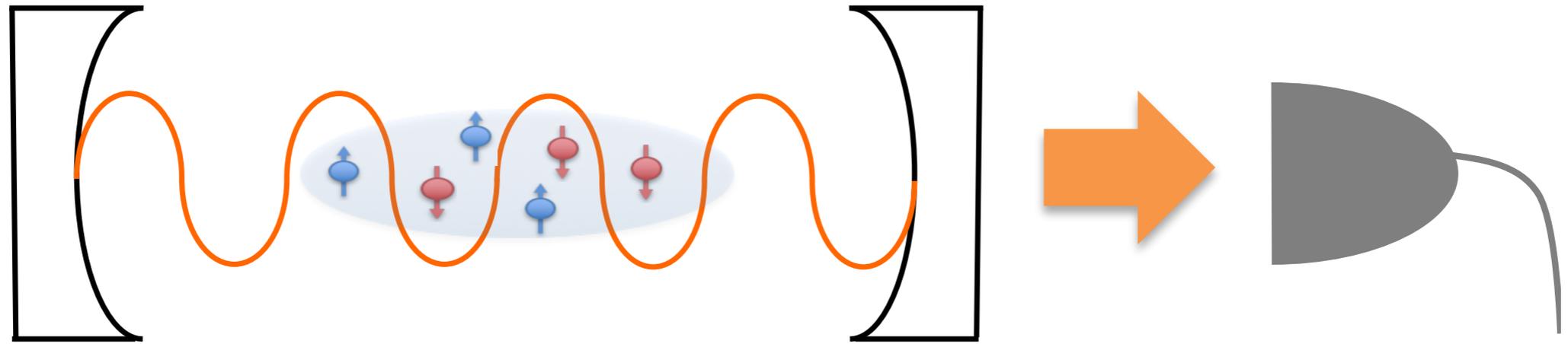
冷却原子気体でのカレントノイズ測定

問題点: 破壊測定由来の大きなエラーバー



➡ 冷却原子気体を用いたメゾスコピック系の重大な欠陥

光共振器中での冷却フェルミ原子気体



アイデア: 光子の測定を介した原子気体測定
(原子気体を壊す必要がない)

分散極限でのハミルトニアン (large atomic detuning)

$$H_{\text{system}} = H_{\text{atom}} + \omega_c a^\dagger a + \Omega M a^\dagger a$$

$$M = \int d^3 r \cos^2(kz) \psi_\sigma^\dagger(r) \psi_\sigma(r)$$

ヒーティングの効果

$$\frac{dH_{\text{atom}}}{dt} = -i\Omega[H_{\text{atom}}, M]a^\dagger a$$

一般には、 $[H_{\text{atom}}, M] \neq 0$

➡ 厳密には非破壊測定でない

線形応答での表式

$$\frac{dE_{\text{atom}}}{dt} = -\frac{g^2\kappa}{16n}\chi^R(2k, i\kappa/2)$$

χ^R : density response function

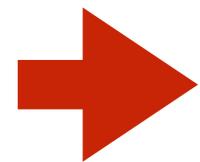
κ : cavity decay rate

$g = 2\Omega\sqrt{\frac{\Phi}{\kappa}}$ with photon flux Φ

ヒーティングの効果

$$\frac{dE_{\text{atom}}}{dt} = -\frac{g^2 \kappa}{16n} \chi^R(2k, i\kappa/2)$$

典型的なCavity QED系では、 $\frac{k^2}{2m}, \kappa \gg \epsilon_F$



演算子積展開による漸近形を得ることが可能

$$\hat{A}(x)\hat{B}(0) \sim \sum_i C_i(x)\hat{O}_i(0)$$

PRL **100**, 205301 (2008); PRA **81** 063634 (2010);
PRA **84**, 043603(2011); PRA **85**, 013613 (2012);
PRX **7**, 011022 (2017).

ヒーティングの効果

$$\frac{1}{g^2} \frac{dE_{\text{atom}}}{dt} = g_n(x) + g_c(x, ka) \frac{C}{k_F^4} \left(\frac{k_F}{2k} \right) + g_H(x) \frac{E_{\text{at}}}{E_{0\text{at}}} \left(\frac{k_F}{2k} \right)^2 + \dots$$

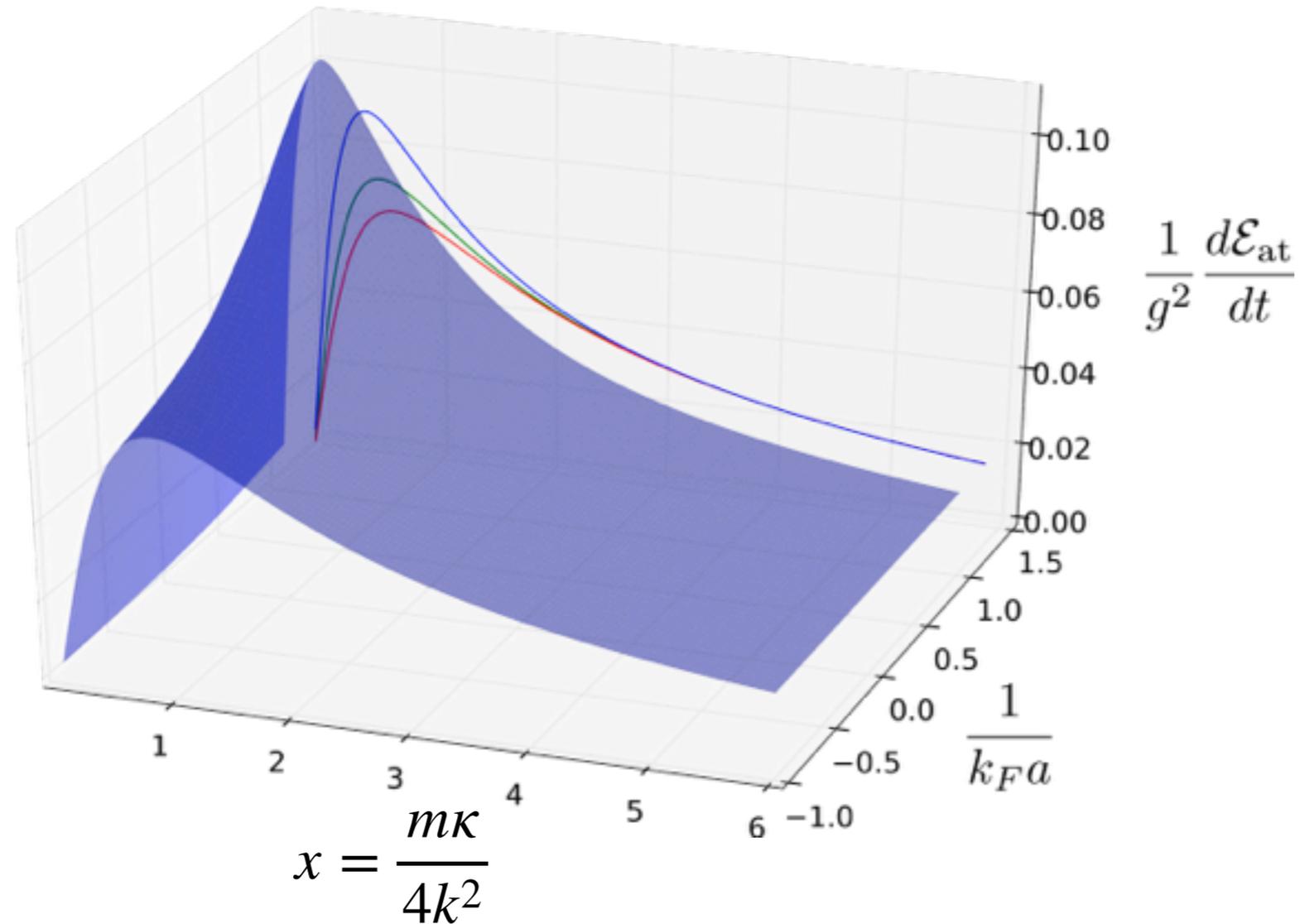
C : Tan's contact $\sim \langle \psi_{\downarrow}^{\dagger} \psi_{\downarrow}^{\dagger} \psi_{\downarrow} \psi_{\uparrow} \rangle$

$E_{0\text{at}}$: energy of a noninteracting gas $x = \frac{m\kappa}{4k^2}$

このヒーティングレートを表式は以下の条件によらずに成り立つ

1. 原子間相互作用の強さ
2. 温度
3. 量子状態

ヒーティングの効果

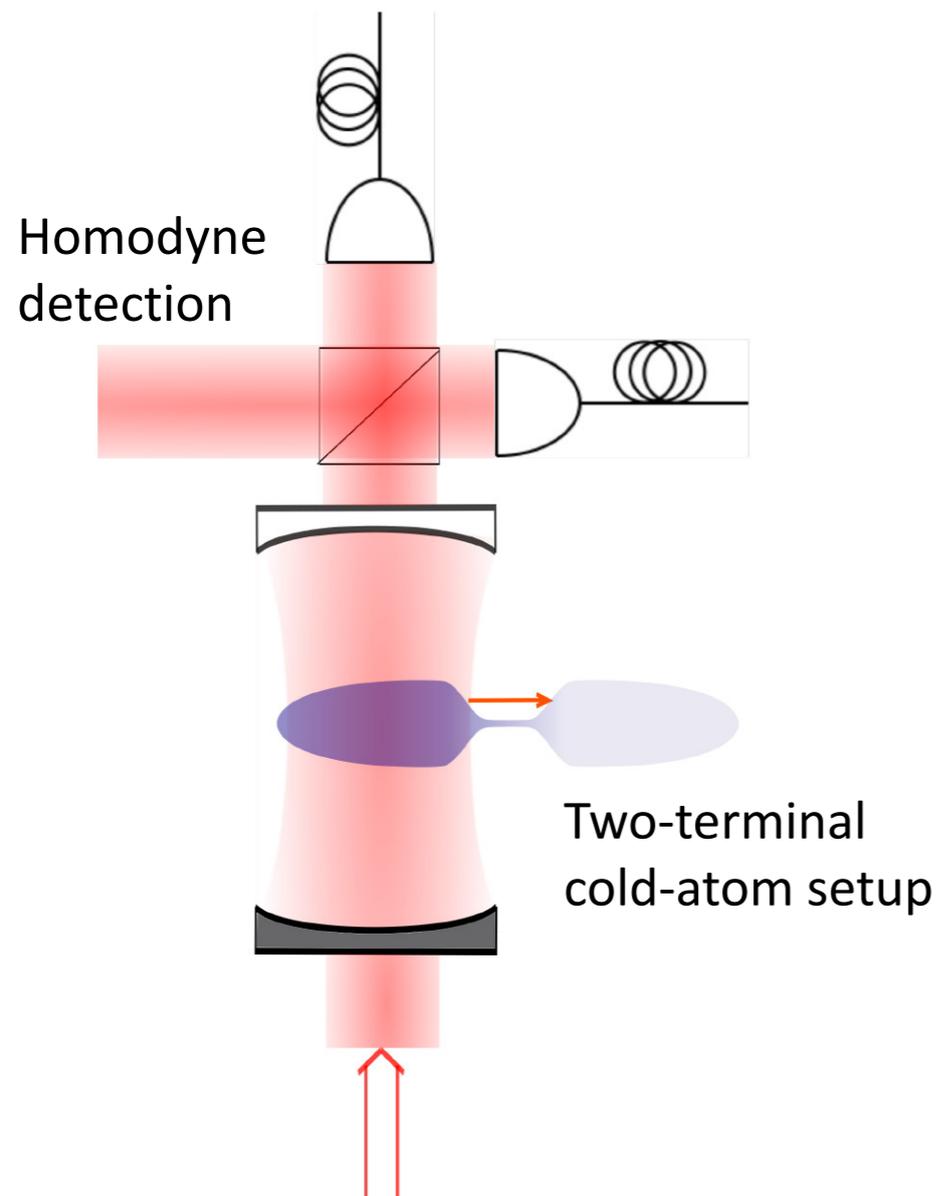


良いCavityの極限で、ヒーティングは無視できる

➔ Emergent QND (cf. Yang et al., PRL **120**, 133601 (2018))

* photonに関するカレントにも同様な性質が現れる

メゾスコピック輸送系への応用



ホモダインカレント

$$I_h \propto a_{\text{in}} + a_{\text{in}}^\dagger + \sqrt{\kappa}(a + a^\dagger)$$

Input-output形式

cf. Gardiner and Zoller, Quantum noise
(2004)

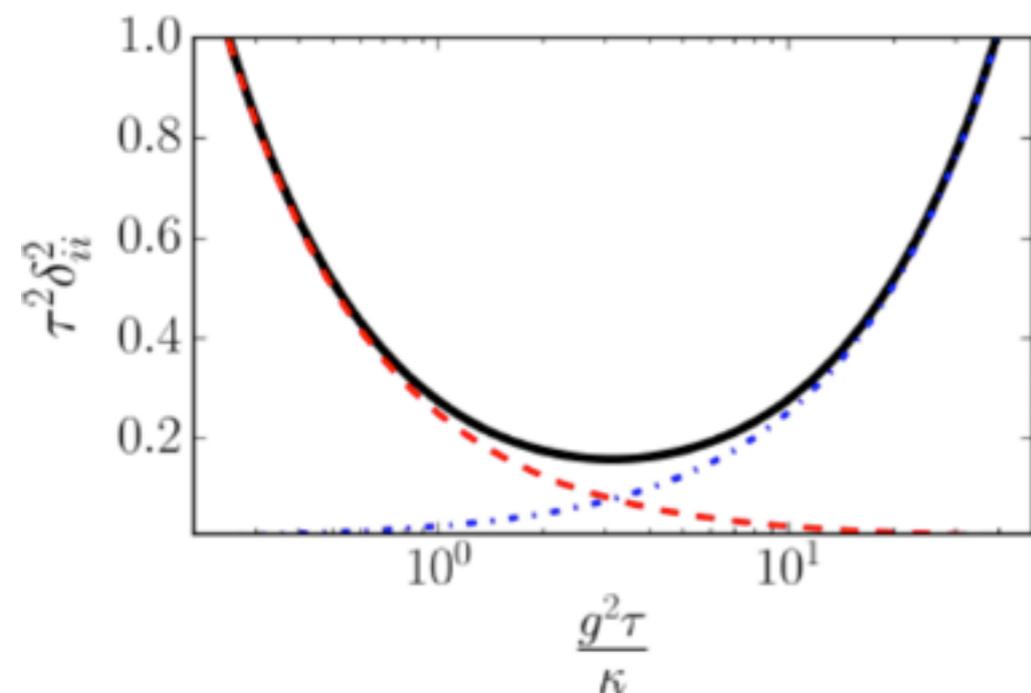
ホモダイニングシグナル/カレントノイズ対応

$$\langle \Delta I_h(t) \Delta I_h(0) \rangle = S_{\text{atom}}(t) + S_{\text{imp}}(t)$$

$$\Delta I_h(t) \propto \frac{I_h(t + \tau) - I_h(t)}{\tau} \quad S_{\text{atom}} : \text{カレントノイズ}$$

S_{imp} : カレント測定における不正確さ

- 量子ポイントコンタクト系での S_{imp}



赤線: photonのショットノイズ

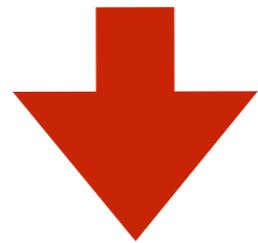
青線:測定による効果

ホモダイニング信号/カレントノイズ対応

$$\langle \Delta I_h(t) \Delta I_h(0) \rangle = S_{\text{atom}}(t) + S_{\text{imp}}(t)$$

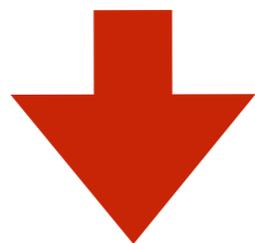
典型的なCavity QEDのパラメーター

$$\kappa \sim \Phi \sim 10^5 \text{Hz}, \Omega \sim 10 \text{Hz}$$



$$S_{\text{atom}} > S_{\text{imp}}$$

* ヒーティングレート $\sim 10 \text{nKs}^{-1}$



カレントノイズ測定できる!

まとめ

- ・ 強結合フェルミ原子気体超流動におけるメゾスコピック伝導
非線形I-V曲線
多重Andreev反射
D. Husmann, SU et al., Science **350**, 1498 (2015).
- ・ 強結合フェルミ原子気体における異常コンダクタンス
Landauer-Buttiker公式の破れ
超流動揺らぎペアの効果
SU and M. Ueda, PRL **118**, 105303 (2017).
- ・ 光共振器中での冷却フェルミ原子気体
カレントノイズ測定
SU, M. Ueda, and J.-P. Brantut, arXiv:1802.04024