

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14366

研究課題名（和文）冷却フェルミ気体における輸送現象の非線形応答理論を用いた探索

研究課題名（英文）Exploring transport of ultracold Fermi gases with nonlinear response theories

研究代表者

内野 瞬 (Uchino, Shun)

早稲田大学・高等研究所・講師（任期付）

研究者番号：80617465

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：冷却原子気体を用いたメソスコピック輸送は現在、欧米の実験グループを中心に実現が相次いでいる。我々は、2成分フェルミ原子気体の量子ポイントコンタクト輸送に関する研究を推進してきた。一つ目の大きな成果は、光共振器中で相互作用する冷却原子気体の研究であり、これまでの実験で測定が難しかったカレントノイズ測定がこのような系を考えることで測定可能になることを指摘した。もう一つの大きな成果は、強く相互作用するフェルミ原子気体のポイントコンタクト輸送であり、これまでに知られていない新しい輸送特性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

メソスコピック系の輸送現象は元来、固体の物性系において研究が進んできた。しかし近年、冷却原子気体を用いた研究も盛んに行われるようになり、固体系との相補的な役割が期待されている。本研究では、現在の固体の物性系で検証するのが難しいメソスコピック現象に焦点を当て、これまでに知られていない輸送特性を明らかにした。また、光共振器を用いたカレントノイズ測定法の提案により、既存の実験の困難が今後、解消される可能性がある。本研究の成果は、現在行われている実験への重要な示唆を与えるものであり、非平衡量子現象の理解にも重要なものであったと考えている。

研究成果の概要（英文）：Recently, mesoscopic transport systems have been realized in experiments of ultracold atomic gases. We have conducted theoretical studies on quantum-point-contact transport with two-component Fermi gases. First, we have revealed that a current noise measurement, which has been elusive in experiments of ultracold atomic gases due to large experimental error bars, is available in ultracold atomic gases in an optical cavity. Second, we have uncovered novel transport properties emerging in two-terminal quantum-point-contact systems with strongly interacting Fermi gases.

研究分野：量子多体物理

キーワード：メソスコピック系 冷却原子気体 非平衡物理

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ミクロとマクロの中間領域の量子現象を扱うメゾスコピック系はこれまで、固体の物性系において盛んに議論されてきた。最近では、真空中に捕獲された原子集団を扱う冷却原子気体が、メゾスコピック系の新たなプラットフォームとして登場している。その中でも、ETH の Tilman Esslinger グループにより実現されている 2 成分フェルミ原子気体を用いた 2 端子の量子ポイントコンタクト系は、冷却原子気体における普遍的なメゾスコピック現象の探索を可能にした。特に最近では、原子間相互作用を変化させたときの輸送特性の変化が実験により調べられており、超流動転移温度近傍において Landauer 公式を破るコンダクタンスの振る舞いが得られるなど、新奇なメゾスコピック輸送現象が観測されている。

### 2. 研究の目的

冷却原子気体の量子ポイントコンタクト系を用いて実現可能な 2 端子輸送に関わる以下の課題を理論的に解明することを目的とした。

- (1) 冷却原子気体における輸送特性は、破壊測定である時間飛行法を用いているため大きな測定誤差があり、メゾスコピック系における重要な測定量であるカレントノイズが測定できていなかった。本研究では、光共振器を用いた光子の連続測定を考えることにより、このような測定誤差の問題の解決を試みた。
- (2) Feshbach 共鳴を用いて実現される強く相互作用するフェルミ原子気体は、高温超伝導や中性子星の物理とも関連する普遍性を持ち、広く興味を持たれている。また最近では、このような系のポイントコンタクト輸送が調べられるようになってきている。本研究では、冷却フェルミ原子気体のポイントコンタクト輸送を説明する輸送理論の構築を試みた。

### 3. 研究の方法

- (1) 光共振器中で相互作用する冷却原子気体は、典型的な量子開放系である。本研究では、このような系を扱うために Input-output 形式を採用し、場の量子論的な手法と組み合わせることで、光子と原子の相互作用が系に与える影響を調べた。
- (2) 冷却原子気体の実験では、チャンネル領域のゲートポテンシャルを制御することで、トンネル極限から完全透過極限までの系の輸送を調べることができる。また実験では、粒子カレントに加え、熱カレントも測定されている。このような背景を踏まえ、我々は Keldysh グリーン関数法に基づく非平衡形式を用いて、様々な透過率での系の粒子及び熱輸送を調べた。

### 4. 研究成果

- (1) 論文[Physical Review A **98**, 06361 (2018)]では、東京大学の 上田正仁教授と EPFL の Jean-philippe Brantut 助教授と共同で、光子と原子集団が結合した光共振器系を考え、光子の連続測定に伴う原子集団の影響を調べた。我々は、量子開放系の解析で用いられる Input-Output 形式と、場の量子論における演算子積展開を組み合わせることで、連続測定による原子気体のヒーテイングが、Tan コンタクトと呼ばれる量子多体系の普遍定数によって特徴付けられることを明らかにした。さらに、光共振器系を図 1 のような 2 端子輸送系に応用し、光子のホモダイン測定を解析した。我々はこの測定法により、カレントノイズなどの高次のカレント相関関数が測定できることを示した。破壊測定に伴う測定誤差の影響によりカレントノイズ測定が難しいという冷却原子気体の弱点が、今後、我々の提案により克服される見込みがある。

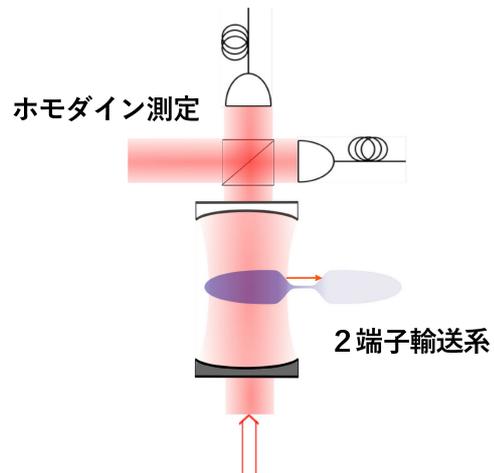
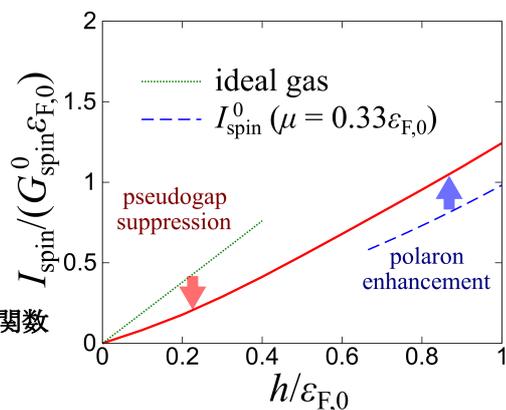


図 1: 光共振器を用いたカレントノイズ測定の概略図。

- (2) 論文[Physical Review Research **2**, 023152 (2020)]では、理化学研究所の関野裕太研究員と田島裕之研究員と共同で、量子ポイントコンタクト系のスピン輸送を調べた。我々は原子間相互作用を特徴づける s 波散乱長がフェルミ長に近いユニタリー領域に着目し、ノーマル相のスピンカレントの振る舞いを多体 T-行列法とトンネルハミルトニアンを用いて解析した。このような系ではスピンバイアスを変化させることで、擬ギャップ相と呼ばれる超流動の前駆現象が期待される領域から、フェルミポーラロン相と呼ばれる可動性の不純物効果が支配的領域へのクロスオーバーが生じる。我々はスピン依存の化学ポテンシャルバイアスを

変化させることにより、バルク系の変化に応じて擬ギャップ効果によるスピカレントの減少からフェルミポーラロン効果によるスピカレントの増加へのクロスオーバーが生じることを明らかにした(図2参照)。スピン依存の化学ポテンシャルの印加によるスピカレント測定はETHグループにより行われていることから、我々の結果を実験で確かめることは可能であると考えている。

図 2: スピン依存化学ポテンシャルの関数としてのスピカレントの振る舞い



- (3) 論文[Physical Review Research 2, 023284 (2020)]では、EPFLのJean-Philippe Brantut 助教授と共同で、2成分フェルミ原子気体の強結合極限における超流動ポイントコンタクト輸送を調べた。このような系における粒子と熱の輸送を調べるため、我々はBogoliubov理論とトンネルハミルトニアン、Keldysh法を組み合わせた輸送理論を構築した。そして、構築した理論を用いて系のAC/DC輸送を解析した。我々はこのような系の輸送においては、凝縮体とBogoliubovモード間の交差効果が、主要なDC輸送の寄与となることを明らかにした。特に非自明なこととして、この交差効果による寄与は、100%超流動状態となるゼロ温度でも無視できないことがわかった。これは、ゼロ温度で消滅するBogoliubovモードのトンネル効果とは大きく異なっている。我々は、ユニタリー領域で得られていた非線形輸送特性とは異なり、強結合極限においては、Ohmicな輸送特性が得られることを明らかにした。また、凝縮体とBogoliubovモード間の交差効果の存在により、Wiedemann-Franz則から大きく異なるLorenz数の振る舞いも得られることがわかった。さらに、我々は、AC Josephsonカレントについても解析し、高次のトンネル項の寄与により、通常のsine関数タイプの振動からのズレが生じることが明らかとなった。

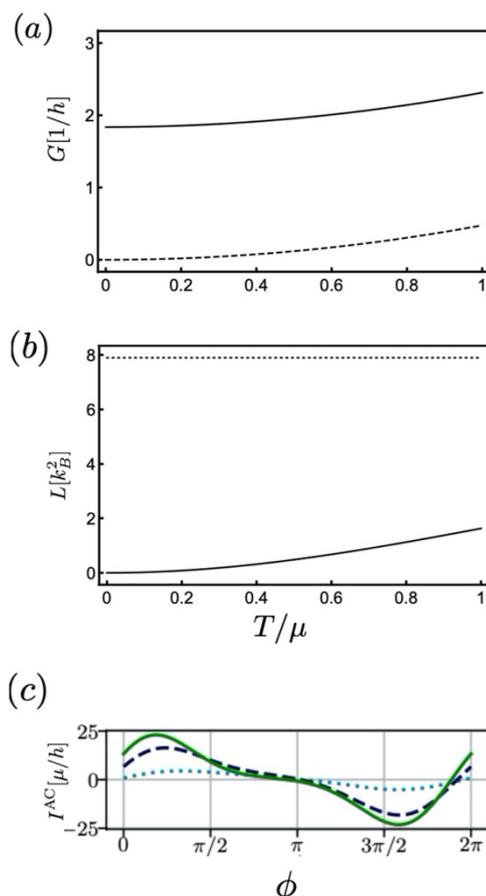


図 3: 強結合領域における超流動輸送の振る舞い。(a)コンダクタンスの温度依存性。(b)Lorenz数の温度依存性。(c)AC Josephsonカレントの振る舞い。

- (4) 論文[arXiv:2003.08672:Physical Review Research 誌に掲載決定済]では、弱結合のBCS極限において、南部-Goldstone(NG)モードが超流動ポイントコンタクト輸送に与える影響を調べた。我々は凝縮体とNGモードとの交差効果が、サブハーモニック領域でのDC輸送において主要な寄与を与えることを示した(図4参照)。この結果により、超流動ポイントコンタクト系の輸送は、Anderson-Higgs機構によってNGモードが消えてしまう超伝導系とは大きく異なる輸送特性を持つことが示された。

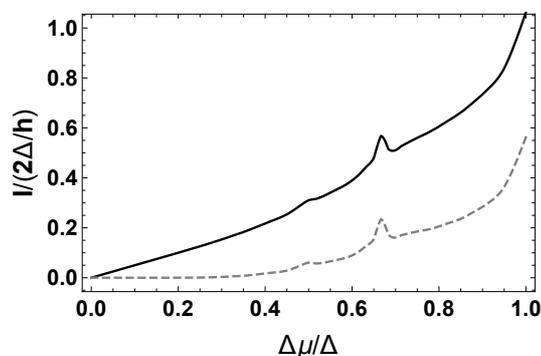


図 4:(実線)超流動系の輸送特性。(点線)超伝導系における結果。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Tajima Hiroyuki, Uchino Shun	4. 巻 20
2. 論文標題 Many Fermi polarons at nonzero temperature	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 073048 ~ 073048
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/aad1e7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Uchino Shun, Ueda Masahito, Brantut Jean-Philippe	4. 巻 98
2. 論文標題 Universal noise in continuous transport measurements of interacting fermions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 63619
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.98.063619	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Tajima Hiroyuki, Uchino Shun	4. 巻 99
2. 論文標題 Thermal crossover, transition, and coexistence in Fermi polaronic spectroscopies	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 63606
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.99.063606	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Fujimoto Kazuya, Uchino Shun	4. 巻 1
2. 論文標題 Floquet spinor Bose gases	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 33132
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.1.033132	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sekino Yuta, Tajima Hiroyuki, Uchino Shun	4. 巻 2
2. 論文標題 Mesoscopic spin transport between strongly interacting Fermi gases	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 23152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.023152	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Uchino Shun, Brantut Jean-Philippe	4. 巻 2
2. 論文標題 Bosonic superfluid transport in a quantum point contact	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 23284
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.023284	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shun Uchino	4. 巻 -
2. 論文標題 Role of Nambu-Goldstone modes in the fermionic superfluid point contact	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Shun Uchino
2. 発表標題 Universal aspects of interacting fermions in a cavity
3. 学会等名 Quantum Transport with Cold Atoms Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 内野瞬
2. 発表標題 冷却フェルミ気体におけるメソスコピック伝導
3. 学会等名 量子情報・物性の新潮流
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 内野瞬
2. 発表標題 光共振器中での冷却フェルミ気体におけるユニバーサルノイズ
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shun Uchino
2. 発表標題 Anomalous conduction property in an attractively-interacting Fermi gas
3. 学会等名 Bose-Einstein condensation 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 内野瞬
2. 発表標題 内部自由度を持つ冷却原子気体における非平衡ダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shun Uchino
2. 発表標題 Point contact transport in a bosonic superfluid
3. 学会等名 Bose-Einstein condensation 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 内野瞬
2. 発表標題 Quantum transport in Ultracold Atomic Gases
3. 学会等名 アトム学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 内野瞬
2. 発表標題 ボース原子気体超流動体のメソスコピック輸送
3. 学会等名 日本物理学会春季大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<https://sites.google.com/site/shunuchino/>  
<https://www.waseda.jp/inst/wias/other/2018/04/02/5057/>

## 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	ブラントゥ ジャンフィリップ (Brantut Jean Philippe)	スイス連邦工科大学ローザンヌ校	
研究協力者	田島 裕之 (Tajima Hiroyuki)	高知大学・理化学研究所	
研究協力者	関野 裕太 (Sekino Yuta)	理化学研究所	