

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26870284

研究課題名(和文) 制御された非一様性で強められる超伝導と外場の効果

研究課題名(英文) Superconductivity enhanced by controlled inhomogeneity and effect of external field

研究代表者

手塚 真樹 (Tezuka, Masaki)

京都大学・理学研究科・助教

研究者番号：40591417

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)：有効次元を制御して安定化した低次元超流動体の量子クエンチによる崩壊過程や、相関フェルミオン系のエネルギー散逸を伴う輸送現象における多体効果を明らかにした。また、銅酸化物高温超伝導と関連する非フェルミ液体状態を生じる新たな模型の冷却気体系での実現法を提案し、この模型の量子重力系等との関連を調べた。トポロジカルポンピングでの多体効果による量子化の破れを数値的に調べ、有効模型との関係を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have studied the decay process of a low dimensional superfluid stabilized by effective dimension engineering after quantum quench, and the many-body effects in transport phenomena of a correlated fermion system with energy dissipation. Also, we have proposed a realization scheme of a recently proposed model, which exhibits a non-Fermi liquid state related to the cuprate high-temperature superconductivity, in ultracold gas, and studied the relation of this model to other phenomena such as quantum gravity. Moreover we have numerically studied the breakdown of quantization in topological pumping due to many-body effects and clarified the relation to an effective model.

研究分野：凝縮系物理理論

キーワード：物性理論 強相関系 実時間ダイナミクス 輸送現象 トポロジカル量子現象

1. 研究開始当初の背景

系の非一様性は必ずしも超伝導の対破壊や転移温度の低下につながらない。例えば銅酸化物高温超伝導体で最適ドーピング近くでも空間的に一様でない状態密度分布が見られた[S.H. Pan et al.: Nature 413, 282 (2001)]。S. Bose と A. M. Garcia-Garcia らは、スズ(Sn)の微粒子の超伝導エネルギーギャップが粒径に依存して振動することを実験的に示し、BCS理論に基づいて振幅を再現する理論を構成して、バルクに比べ60%程度の転移温度上昇が起きうるとした[Nature Materials 9, 550 (2010)]。

また、超伝導体の細線と2次元の金属が結合した系で、散逸を伴う相互作用が超伝導の位相を安定化して長距離秩序が現れる可能性が A. M. Lobos らにより提案された[Phys. Rev. Lett. 80, 214515 (2009)]。通常、1次元では超伝導は量子揺らぎにより長距離秩序となり得ないが、空間的に乱れた常伝導金属との間でクーパー対が行き来する相互作用を与えると、位相の揺らぎが抑制されて長距離秩序をもつ超伝導が基底状態となり、有限温度でも抵抗が大きく抑制されるとの理論である。

研究代表者は、Garcia-Garcia氏とともに、引力相互作用がある冷却フェルミオン系で、非一様性により超伝導に対応するペア相関が強められることを明らかにし[Phys. Rev. A 82, 043613 (2010)]、さらに、局在-非局在転移付近での実時間ダイナミクスのシミュレーションにより、相互作用の強さと転移点近傍での粒子の拡散過程の関係を解析した[Phys. Rev. A 85, 031602R (2012)]。

また、低次元冷却イオン気体において、距離 r の幕で($r^{-\alpha}$ のように)減衰する相互作用を導入し、幕 α を幅広く変化させる実験が行われている。研究代表者は、Lobos, Garcia-Garcia 両氏とともに、距離に依存したホッピングを持つ1次元フェルミオン気体系で、超流動相関が長距離秩序となりうる α の範囲を、解析的手法(ボソン化)と数値的手法(DMRG)を併用して明らかにした[Phys. Rev. B 88, 134506 (2013)]。

これらを背景に本科研費に応募し、研究を開始した。

2. 研究の目的

超伝導の転移温度を高めることは量子情報処理等の分野での応用上も重要で、基礎物理としても興味深い課題である。形状の効果や非一様性で転移温度を高める可能性が調べられている。また、超伝導は秩序変数の位相のゆらぎにより破壊され、特に低次元の系では量子ゆらぎの効果が大きい、通常金属のような散逸のある系と結合させることで位相を固定する先行研究がある。これらのことから、本研究では、非一様な超伝導体をはじめとする多体量子系のダイナミクス、またこれらの系への外場、とくに外部との結合に

伴う散逸の効果モデル計算の範囲で明らかにすることを目的とした。これにより、制御された非一様性と、外部との結合を組み合わせ、具体的に現実の超伝導の転移温度の上昇につなげることを目指してきた。

なお、申請時、「研究が当初計画どおりに進まない時の対応」として、最近、電子状態が非自明なトポロジカル数で特徴づけられ、局在したエッジ状態をもつトポロジカル絶縁体やトポロジカル超伝導体の研究が急速に進展しており、その中には研究代表者らが当時までの研究で調べたような1次元のトポロジカル超伝導体も含まれることを指摘し、上記の計画のうち電子相関の強い超伝導体の系の研究にはより困難が多いと予想され、研究の進捗状況によっては、トポロジカル絶縁体・超伝導体の研究状況に注目し、とくに、バルクにおける散逸と、エッジ状態の安定性の関係に着目して研究を進めるとしていた。

3. 研究の方法

(1) 長距離非対角秩序の減衰ダイナミクス

低次元系では量子揺らぎの効果が強く超伝導のような秩序は一般に抑制される。非一様性や外部との相互作用の制御により、これを安定化させる可能性を調べることが本研究の中心的な課題である。長距離ホッピングにより有効次元を制御した系では、空間1次元であっても、量子揺らぎが抑えられて、超伝導のような長距離非対角秩序をもつ基底状態をとりうる。このような状態を初期状態とし、長距離ホッピングを瞬間的に除いた(クエンチ)後の長距離秩序の崩壊過程を調べた。クーパー対をなす電子対のかわりにハードコア・ボソンを考えると超伝導成分の比率に対応して超流動密度が得られる。時間依存密度行列繰り込み群により、多体の波動関数の時間発展を追跡し、密度行列の最大固有値に比例する超流動密度を計算した。

(2) 散逸のある輸送現象での多体効果

相関フェルミオン系のエネルギー散逸を伴う輸送現象における多体効果を調べるため、種類Aのフェルミ粒子がほぼ一定の密度で分布した1次元系の中で、これらと近距離相互作用する別の種類Bのフェルミ粒子を数個、Bのみが感じるトラップに捕獲し、トラップを一定速度で動かした系のダイナミクスを解析した。

(3) 強相関非フェルミ液体の模型の実験法提案と有限自由度の数値・理論解析

2015年に、高温超伝導体の母物質にみられる中性子散乱強度の異常に関係して1990年代初頭より調べられてきた Sachdev-Ye 状態を実現する新たな模型である、Sachdev-Ye-Kitaev (SYK)模型が提案された。この模型は N 個のマヨラナあるいはディラックフェルミオンのうち任意の4個の組合せがランダムに相互作用するものである。既存

の高温超伝導体と関係する非フェルミ液体状態を実現するものとして、また、マヨラナ版については1次元トポジカル超伝導体の端状態間の相互作用とも関連するものとして、本研究の観点から注目し、国際共同研究を含む複数の共同研究を実施した。

(4) トポジカル量子ポンピングでの強相関効果

2015年に、京都大学の実験グループを含む複数のグループにより、周期ポテンシャルの形状を規則的に時間変化させた際、輸送される粒子の個数が量子化される現象である、Thouless 量子ポンピングの実験が冷却気体系で実現された。これは空間1次元、時間1次元の自由度をもつ系において、空間2次元の量子ホール系との対応をもつトポジカル輸送現象である。当初の理論提案ではポテンシャルの時間変化が充分遅い場合に、粒子間の相互作用や系の空間的な乱れに対し頑健な量子化が予測されていたが、有限の速度で駆動した際の粒子間相互作用の効果等は未解明であった。そこで、本課題に関連し、冷却フェルミオン系で実験的に実現しうる引力あるいは斥力相互作用について、時間依存密度行列繰り込み群を用いたシミュレーションにより調べた。

4. 研究成果

(1) 長距離非対角秩序の減衰ダイナミクス

超流動密度は、クエンチ後の時間の関数として、当初はガウシアン関数に沿って減少するが、やがて、時間の初期状態に依存した冪の指数関数に沿って減衰することを明らかにした。また、この結果は、自己無撞着調和近似による解析と定性的に一致する[論文2]。

さらに、系に導入した非一様性の効果も調べた。このようなダイナミクスは、スピンをもつ冷却イオン間の相互作用の距離依存性を制御する実験で実現される可能性がある。また、トポジカルに非自明な超伝導状態について、長距離ホッピングを導入すると、有効次元の変化と端状態の有無が対応することを明らかにした[学会発表 5, 6, 10; 投稿準備中]。

(2) 散逸のある輸送現象での多体効果

系のエネルギーの単位時間あたりの増分、すなわち、捕獲された成分 B を駆動するとき受ける抵抗力に、ほぼ一定密度で分布させた成分 A の高密度領域においては、複数の非自明なピークが生じることを明らかにし、その起源を議論した。[論文 4]

(3) 強相関非フェルミ液体のモデルの実験法提案と有限自由度の数値・理論解析

[論文 5 および投稿中の論文 2 編]

冷却気体系の専門家および素粒子理論の専門家との共同研究により、Sachdev-Ye-Kitaev (SYK)モデルを冷却気体系で

実現する方法を提案した(arXiv:1606.02454, 投稿中, プレプリントとしての引用 32 件)。また、米国の素粒子理論の研究者たちとの国際共同研究により、有限自由度の場合の分配関数、相関関数などの、系の対称性等にも関連する特徴的な振舞を明らかにし、量子重力系やランダム行列との関係を議論した([論文 5], プレプリント arXiv:1611.04650 としての引用を含む引用件数 45 件)。さらに、SYK 模型で非時間順序相関(OTOC)を調べることでより検出されるリアプノフ指数がラージ N 極限でカオス系の上限を満たすと予想されていることをヒントに、非一様系のダイナミクスを特徴づける量としてのリアプノフスペクトルを数種類のカオス系で数値的に調べ、自由度の増大とともに、準統計がランダム行列の固有値のものに近づくことを見出した(arXiv:1702.06935, 投稿中)。

(4) トポジカル量子ポンピングでの強相関効果[学会発表 17, 19, 投稿準備中]

ポテンシャルの時間変化が速く、量子化の前提が成り立たなくなる状況での、輸送効率の駆動速度依存性を調べ、隣接する2個のポテンシャル極小点に着目した有効模型で理解できる範囲を明らかにした。

本研究においては上記のように非一様な多体量子系、特にそれらに対する量子クエンチや外力による駆動等の状況でのダイナミクスについての成果が得られた。上記(1)-(4)に述べたほかに、制御された非一様性をもつ系のうち準周期系についても、ボソン系のトポジカル相[論文 1]やf軌道を持つサイトが準周期的に配置したアンダーソン模型の揺らぎ等[論文 3]に関する成果を得た。

また、当初予期していなかった、SYK 模型の提案と同模型や非時間順序相関への関連コミュニティからの大きな注目、冷却気体系での Thouless 量子ポンピングの実現といった事象に対し、本研究の観点から、専門分野の異なる研究者を含む国際共同研究等に取り組み、複数の投稿論文を含む成果が得られた。

一方で、提案時の最終的な目的である、制御された非一様性と、外部との結合を組み合わせ、具体的に現実の超伝導の転移温度の上昇につながる貢献をすることについては、当初予定していた研究計画と一部類似する論文が、早期に他の研究者グループにより発表され、他の方針を模索してきたものの、具体的な提案の成果発表に至っていない。引き続き、本研究期間に得られた関連研究者とのネットワーク・得られた知見・購入した物品等を活用し、進捗を図り、原著論文投稿等を進める。また、上記に[投稿準備中]として記載したものはじめとして、原著論文として未投稿の成果については、今後速やかに取りまとめ投稿し、早期の論文掲載を目指す。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5件)

[1] Fuyuki Matsuda, Masaki Tezuka, and Norio Kawakami, “Topological Properties of Ultracold Bosons in One-Dimensional Quasiperiodic Optical Lattice”, Journal of the Physical Society of Japan, 査読あり, **83**, 2014年, 083707.
DOI: 10.7566/JPSJ.83.083707

[2] Masaki Tezuka, Antonio M. García-García, and Miguel A. Cazalilla, “Destruction of long-range order by quenching the hopping range in one dimension”, Physical Review A, 査読あり, **90**, 2014年, 053618.
DOI: 10.1103/PhysRevA.90.053618

[3] Fuyuki Matsuda, Masaki Tezuka, and Norio Kawakami, “Correlation Effects in One-Dimensional Quasiperiodic Anderson-Lattice Model”, Physics Procedia, 査読あり, **75**, 2015年, 245-251.
DOI: 10.1016/j.phpro.2015.12.030

[4] Jun'ichi Ozaki, Masaki Tezuka, and Norio Kawakami, “Drag dynamics in one-dimensional Fermi systems”, Physical Review A, 査読あり, **92**, 2015年, 023607.
DOI: 10.1103/PhysRevA.92.023607

[5] Jordan S. Cotler, Guy Gur-Ari, Masanori Hanada, Joseph Polchinski, Phil Saad, Stephen H. Shenker, Douglas Stanford, Alexandre Streicher, and Masaki Tezuka, “Black holes and random matrices”, Journal of High Energy Physics, 査読あり, **05(2017)**, 2017年, 118.
DOI: 10.1007/JHEP05(2017)118

[学会発表](計 20件)

1. Masaki Tezuka, Phase diagram and quench dynamics of one-dimensional cold gas with power-law interaction, New Horizon of Strongly Correlated Physics, 2014年6月16日-7月4日, 東京大学物性研究所(千葉県・柏市)

2. Masaki Tezuka, Long-range order and quench dynamics in one-dimensional quantum systems with power-law interactions, Nonequilibrium Phenomena in Novel Quantum States, 2014年12月3-5日, 京都大学基礎物理学研究所(京都府・京都市)

3. 手塚真樹, 時間依存密度行列繰り込み群による冪的相互作用系のクエンチダイナミクス, 量子多体系研究の新しい潮流 — テンソルネットワーク・繰り込み群・エンタングルメント —, 2014年12月15-17日, 京都大学基礎物理学研究所(京都府・京都市)

4. 手塚真樹, 冪的相互作用系のトポロジカル相: 冷却気体系の場合, 日本物理学会 第70回年次大会, 2015年3月21-24日, 早稲田大学(東京都・東京)

5. 手塚真樹, 実効的に非整数次元の格子系とトポロジカル相, 第1回「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」領域研究会, 2015年12月11-13日, 京都大学(京都府・京都市)

6. Masaki Tezuka, Lattices mimicking spatial dimensions: boson dynamics and fate of topological phases, YITP Workshop on Quantum Information Physics (YQIP2016), 2016年1月5-8日, 京都大学基礎物理学研究所(京都府・京都市)

7. **(招待講演)** Masaki Tezuka, Fermions on quasiperiodically modulated lattices, EMN Meeting on Quantum 2016, 2016年4月8-10日, プーケット(タイ)

8. Masaki Tezuka, Numerical Study of the Sachdev-Ye-Kitaev model, Quantum Information in String Theory and Many-body Systems, 2016年5月23日-6月24日, 京都大学基礎物理学研究所(京都府・京都市)

9. Masaki Tezuka, Proposal for experimental realization and out-of-order correlation measurement of the Sachdev-Ye-Kitaev model with ultracold gases, International Symposium on New Horizons in Condensed Matter Physics, 2016年6月18-19日, 東京大学(東京都・東京)

10. Masaki Tezuka, One-dimensional chain with long-range hoppings: boson dynamics and fate of topological phases, Conference on Long-Range Interacting Many-Body Systems: from Atomic to Astrophysical Scales, 2016年7月25-29日, トリエステ(イタリア)

11. 手塚真樹, 段下一平, 花田政範, 冷却原子系における Sachdev-Ye-Kitaev 模型 I: 背景と結合原子・分子混合モデルからの導出, 日本物理学会 2016年秋季大会, 2016年9月13-16日, 金沢大学(石川県・金沢市)

12. Masaki Tezuka, Route to realize the Sachdev-Ye-Kitaev model in ultracold gases, Topo Mat Meeting, 2016年9月19-21日, シュツットガルト(ドイツ)

13. **(招待講演)** Masaki Tezuka, Topological properties of quasi-periodic quantum systems, Quantum Science Symposium Europe-2016, 2016年11月1-2日, ケンブリッジ(英国)

14. **(招待講演)** Masaki Tezuka, Sachdev-Ye-Kitaev model: comparison to random matrix model and proposal for experimental realization, Quantum Simulations and Numerical Studies on Many-Body Physics, 2016年12月9-11日, 新竹(台湾)

15. Masaki Tezuka, The Sachdev-Ye-Kitaev model: proposal for ultracold gas realization and numerical study of the dynamics, International School on Topological Science and Topological Matter, 2017年2月13-18日、京都大学基礎物理学研究所(京都府・京都市)

16. Masaki Tezuka, The dynamics and proposal for experimental study of the Sachdev-Ye-Kitaev model and related models, Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems, 2017年2月20-22日、東京大学(千葉県・柏市)

17. 尾崎順一, 手塚真樹, 1次元光格子上で相互作用するフェルミ原子系のトポロジカルポンプの理論, 日本物理学会第72回年次大会, 2017年3月17-20日、大阪大学(大阪府・豊中市)

18. Masaki Tezuka, Universality in Chaos: Lyapunov Spectrum and Random Matrix Theory, Quantum Gravity, String Theory and Holography, 2017年4月3-7日、京都大学基礎物理学研究所(京都府・京都市)**(ポスター賞)**

19. Masaki Tezuka and Jun'ichi Ozaki, Robustness of topological pumping in one-dimensional interacting fermions, International Conference on Topological Material Science 2017, 2017年5月10-13日、東京工業大学(東京都・東京)

20. Masaki Tezuka, Proposal for quantum gravity studies with ultracold gases: a case of the Sachdev-Ye-Kitaev model, GGI Conference "Quantum Science approaches to strongly correlated systems", 2017年5月29日-6月3日、フィレンツェ(イタリア)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0件)

○取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://cond.scphys.kyoto-u.ac.jp/~tezuka/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

手塚 真樹 (TEZUKA, Masaki)

京都大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号: 40591417