

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：34506

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03412

研究課題名（和文）外場駆動で誘起される乱れた系における新奇状態の探索

研究課題名（英文）Search for novel states in disordered systems induced by external field driving

研究代表者

高吉 慎太郎（Takayoshi, Shintaro）

甲南大学・理工学部・准教授

研究者番号：80710722

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：乱れのある相互作用フェルミオン系における動的伝導度スペクトルを、密度行列繰り込み群を用いた数値手法およびボゾン化有効場の理論を利用して計算した。スペクトルはピーク構造を示し、乱れが強くなるほどピーク周波数は高く、ピーク高さは低くなった。高周波領域においては、スペクトルはべき乗則にしたがって減衰し、べきの値の相互作用依存性は有効場の理論から予測される。相互作用が小さいときには数値計算の結果と場の理論の予測は良好な一致を示すが、相互作用が大きくなるにつれ、理論からのずれが大きくなった。低周波領域では、動的伝導度スペクトルが相互作用の強さによらない振る舞いを示すことが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

相互作用のあるフェルミオン系は、物性物理学における代表的な研究対象である。本研究により、この系に対して乱れが与える影響が明らかになったことにより、実験において測定に用いた試料が高純度ではなく、不純物を含むものであった場合に、測定結果を解析する際、純粋なバルク資料としての性質と不純物に由来する効果を区別できるようになる。また乱れのある系とその有効場の理論が明らかになったことにより、格子模型を場の量子論で記述するという基礎物理学の研究において汎用性の高い手法について、新たな知見が得られた。さらに不純物濃度を調節する技術が確立すれば、それによって物質の性質を制御することが可能になると期待される。

研究成果の概要（英文）：Dynamical conductivity spectra of interacting fermion systems with disorder are calculated by combining numerical methods with density matrix renormalization group and bosonized effective field theory. The spectra have a peak structure, with the peak frequency increasing and the peak height decreasing as the strength of disorder increases. In the high-frequency region, the spectra decay according to the power law, and the interaction dependence of the power is predicted from the effective field theory. For weak interaction, the numerical results and the prediction of the field theory are in good agreement, but as the interaction increases, the deviation from the theory increases. In the low-frequency region, the behavior of dynamical conductivity is independent of the interaction strength.

研究分野：物性理論

キーワード：量子ダイナミクス 乱れた系

1. 研究開始当初の背景

物性物理学においてはバルクな純物質の性質を探求する 경우가多く、不純物は一般に調べたい性質を覆い隠す望ましくないものである。しかし、不純物の存在が系に興味深い現象をもたらす場合もある。金属を冷却したときに、その中に含まれる磁性不純物によって、電気抵抗が極小値をとる近藤効果などはその代表的な例である。また不純物の導入によって金属から絶縁体へと相転移が起こるアンダーソン局在のように、系の乱れによって系の状態が大きく変わることもある。アンダーソン局在は、自由フェルミオンが不純物にトラップされて拡散が抑えられることに起因する。近年では相互作用のあるフェルミオンが系の乱れによって局在する多体局在現象が、孤立系における熱平衡化の議論といった統計物理学の観点から興味を集めている。パラメーターを変化させて相転移を誘起することは、物質の機能性および制御可能性を高めるために必要な技術であり、応用面においても重要である。

さらに相互作用する量子系における不純物の効果を明らかにすることで、不純物を含むような物質の測定結果に対して、純粋なバルク物質の性質と不純物に由来する効果を区別して解析することができるようになる。系の乱れが量子ダイナミクスにもたらす影響を定量的に議論できる理論を整備することは、物性物理学の基礎研究において重要な課題である。

2. 研究の目的

相互作用のあるフェルミオン系において、系に乱れを導入したときに、基底状態の性質や励起構造がどのような影響を受けるかを明らかにすることが、本研究の目的である。特に、行列積状態を用いた数値計算や有効場の理論などの強力な手法が適用可能である量子一次元系を対象として、相互作用の強さや系の乱れの強さをパラメーターとして変化させたときの動的伝導度の振る舞いを明らかにする。

また場の理論による記述は、系のユニバーサルな性質を抽出することができ、一見全く異なる系であっても同じ場の理論に帰着されるならば統一的に解析することができるなどの利点があるが、元のハミルトニアンとその有効場理論の対応が良いかどうかは一般にそれほど自明ではない。乱れた相互作用系における格子模型・場の理論対応や、その対応が有効なパラメーター領域を明らかにすることも本研究の目的である。

3. 研究の方法

乱れのある相互作用量子系として、最近接サイト間相互作用のあるスピンレスフェルミオン鎖を対象にする。乱れはサイトごとにランダムな化学ポテンシャルによって導入する。この系の動的伝導度を、行列積状態を利用した数値計算によって求める。まず密度行列繰り込み群によって系の基底状態を求める。次にスペクトル関数をチェビシェフ多項式によって展開したときのモーメントを数値的に計算する。モーメントの数値評価はチェビシェフ多項式の満たす漸化式を利用し、行列積状態を逐次的に計算することによって、行うことができる。乱れについては、化学ポテンシャルのランダム配置をさまざまに変えたものの平均を取って評価する。

この量子鎖模型はボソン化の手法を用いて、サイン・ゴールドン模型で記述される有効場の理論にマップすることができる。この場の理論はスピノン速度・ラッティンジャーパラメーター・乱れの強さという3つのパラメーターを含む。これら3つのパラメーターについて繰り込み群方程式を立てて、繰り込みフローを解析する。

4. 研究成果

乱れたスピンレスフェルミオン鎖のハミルトニアンは

$$\hat{\mathcal{H}} = \frac{J}{2} \sum_l (\hat{c}_l^\dagger \hat{c}_{l+1} + \text{H.c.}) + J\Delta \sum_l \hat{n}_l \hat{n}_{l+1} + \sum_l h_l \hat{n}_l$$

と表される。 $h_l \in [-W, W]$ はサイトごとにランダムで一様分布に従う。乱れない場合は、 $-1 \leq \Delta \leq 1$ の領域において系はギャップレスな朝永・ラッティンジャー液体状態にあり、基底状態はスピノン速度とラッティンジャーパラメーター K で特徴づけられる。乱れのある場合、 $K < 3/2$ をみたすときに系は局在化する。

$\Delta = 0.5$ の場合に、乱れの強さを変化させたときの数値計算で求められた動的伝導度スペクトルの変化を図1に示す。スペクトルのピーク周波数 ω_p は乱れが強いほど高周波側へとシフトし、 $\omega_p \propto W^{2/(3-2K)}$ という依存性を持つことが明らかになった(図2)。またピークの高さ $\sigma(\omega_p)$ は ω_p の逆数に比例する。

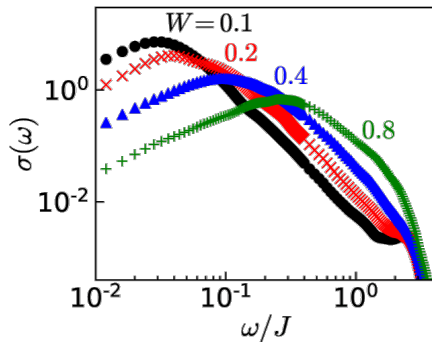


図1: 動的伝導度スペクトルの乱れの強さ依存性

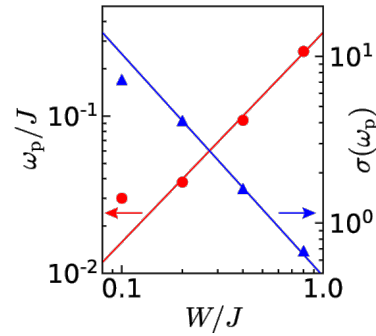


図2: ピーク周波数とピーク高さの乱れの強さ依存性

ピーク周波数より高周波側では、スペクトルはべき乗則にしたがって減衰する。図3に減衰べき μ の Δ 依存性を示す。ボソン化有効場の理論からは $\mu = 4 - 2K$ が予言される。 Δ が小さいときには数値計算の結果と場の理論の予言は良い一致を示すが、 $\Delta = 1$ に近づくとずれが大

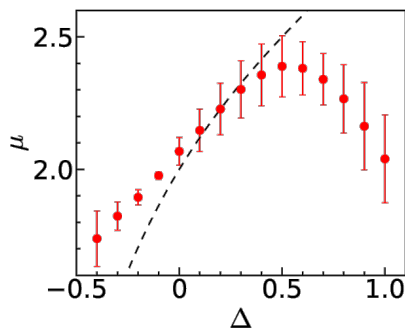


図3: 動的伝導度スペクトルの高周波領域における減衰べきの相互作用依存性

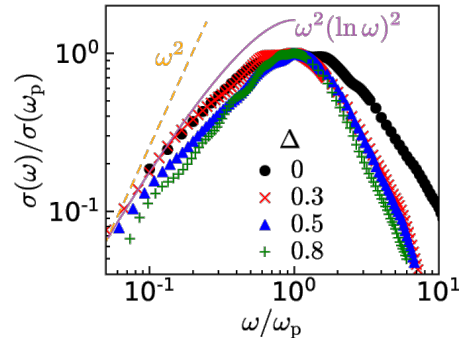


図4: ピークにおいて規格化された動的伝導度スペクトルの低周波領域の振る舞い

きくなる。この原因としては、場の理論にマップする際に無視するイレレバント項の影響が大きくなっていくことなどが考えられるが、詳しい研究は今後の課題である。一方で、ピーク周波数より低周波側では、動的伝導度スペクトルが相互作用の強さによらずに、 $\omega^2(\ln\omega)^2$ と振る舞うことがわかった(図4)。

また実験技術の進展にともない、現実には乱れた量子一次元系を用意することも可能になってきている。カーボンナノチューブに電子線を照射して欠陥を生成したり、量子細線に不純物を導入した系における実験結果は、本研究における理論結果と比較可能であると考えられる。また1次元では、ジョルダン・ウィグナー変換によってフェルミオン系とスピン系の間に対応をつけることができるので、乱れた量子スピン系における動的スピン伝導度の測定などが可能になれば、その結果も本研究における理論を用いて解析できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Kaneko Tatsuya, Murakami Yuta, Takayoshi Shintaro, Millis Andrew J.	4. 巻 105
2. 論文標題 Second-order magnetic responses in quantum magnets: Magnetization under ac magnetic fields	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 195126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.195126	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 Takayoshi Shintaro, Giamarchi Thierry	4. 巻 76
2. 論文標題 Dynamical conductivity of disordered quantum chains	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The European Physical Journal D	6. 最初と最後の頁 213
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjd/s10053-022-00524-1	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 該当する
1. 著者名 Murakami Yuta, Takayoshi Shintaro, Kaneko Tatsuya, Lauchli Andreas M., Werner Philipp	4. 巻 130
2. 論文標題 Spin, Charge, and π -Spin Separation in One-Dimensional Photodoped Mott Insulators	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 106501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.130.106501	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 該当する
1. 著者名 宇田川 将文, 高吉 慎太郎, 岡 隆史	4. 巻 57
2. 論文標題 キタエフスピン液体におけるマヨラナ素励起の局所検出	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 713-724
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 無
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 Takayoshi Shintaro, Wu Jianda, Oka Takashi	4. 巻 11
2. 論文標題 Nonadiabatic nonlinear optics and quantum geometry - Application to the twisted Schwinger effect	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 SciPost Physics	6. 最初と最後の頁 75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21468/SciPostPhys.11.4.075	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 該当する

1. 著者名 Murakami Yuta, Takayoshi Shintaro, Kaneko Tatsuya, Sun Zhiyuan, Golez Denis, Millis Andrew J., Werner Philipp	4. 巻 5
2. 論文標題 Exploring nonequilibrium phases of photo-doped Mott insulators with generalized Gibbs ensembles	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-021-00799-7	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 該当する

1. 著者名 Faure Quentin, Takayoshi Shintaro, Grenier Beatrice, Petit Sylvain, Raymond Stephane, Boehm Martin, Lejay Pascal, Giamarchi Thierry, Simonet Virginie	4. 巻 3
2. 論文標題 Solitonic excitations in the Ising anisotropic chain BaCo2V2O8 under large transverse magnetic field	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 43227
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.043227	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 該当する

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 高吉 慎太郎
2. 発表標題 量子磁性体における非線形光学応答の理論
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高吉 慎太郎, Jianda Wu, 岡 隆史
2. 発表標題 ディラック・ワイル系の非摂動的トンネル現象における非断熱幾何学的効果
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高吉 慎太郎
2. 発表標題 レーザー駆動超高速スピントロニクスの理論
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高吉 慎太郎
2. 発表標題 乱れのある量子鎖における光学伝導度スペクトル
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
スイス	ジュネーブ大学			