

令和 5 年 5 月 12 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03493

研究課題名(和文)冷却原子気体におけるスピン流制御の実現に向けた理論研究

研究課題名(英文)Theoretical study on spin current control of cold atoms

研究代表者

森 弘之 (Mori, Hiroyuki)

東京都立大学・理学研究科・教授

研究者番号：60220018

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：ボーズ・フェルミ混合系のボーズ原子のみにスピン軌道相互作用を持たせた場合、ボーズ原子のスピンがスパイラル構造を形成することを明らかにした。このスピン構造を背景にフェルミ原子のスピン流が生じることが期待されたため、非平衡グリーン関数を用いたスピン流の解析をした結果、人工SOCを作るために系に印加しているレーザーの波数を変化させた場合、フェルミ原子のスピン流がピーク構造を持つことが明らかになった。さらに、機械学習による解析手法を模索し、テストケースとしてスピン系に対する新規の手法を複数提案し、混合系に対して新しい道筋をつけた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピントロニクスに代表されるような、スピン流に着目した研究が固体物理では盛んであるが、同様の視点を冷却原子系に持ち込むことで、新たな分野開拓につながると考える。

また、その過程で生じた相関特定の困難な点については、機械学習・深層学習を応用するというこれまでにないアプローチを考案した。スピン系に対する予備的研究が成功したことから、量子力学的粒子系の解析にも機械学習が有効であると考えられる。これは理論計算における解析計算、数値計算に続く第3の手法として、今後の新たな発展が期待できる。

研究成果の概要(英文)：When only the Bose atoms in a Bose-Fermi mixture system have spin-orbit interactions, the spins of the Bose atoms form a spiral structure. Since the spin current of Fermi atoms was expected to be generated against the background of this spin structure, an analysis of the spin current using the nonequilibrium Green's function revealed that the spin current of Fermi atoms has a peak structure when the wavenumber of the laser applied to the system to create an artificial SOC is changed. Furthermore, we explored analysis methods by machine learning and proposed several novel methods for spin systems as a test case, which led us to a new path for mixed systems.

研究分野：物性理論

キーワード：冷却原子 混合系 ボーズ・フェルミ混合系 スピン流 深層学習 機械学習 量子モンテカルロシミュレーション

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

固体における電子スピンによるスピントロニクス現象は、既に一定の歴史を持ち、さまざまな展開を見せている。現在では、応用も見据えた上で、スピン流の物性制御についても国内外で多くの研究が活発になされている。

一方、原子スピンによるスピントロニクス現象が、原子を極低温まで冷やした冷却原子気体において実現できるとの指摘がこれまでされてきた。しかし研究開始時点において実験的には達成されておらず、また、実現のための成立要件についても不明確な状況が続いていた。

原子によるスピントロニクスを検討する最大の理由は、固体系よりもはるかに高いパラメータ制御性にある。もともと冷却原子系には、固体では不可能だった様々なパラメータ(相互作用、ポテンシャル、ゲージ場など)を人工的に調整できるという特徴がある。原子のスピントロニクス系も例外ではなく、実現すればスピン流の制御が実験的に行え、操作性に富んだスピントロニクス系が実現できると期待される。

冷却原子気体のスピン流は、実験では観測できていないものの、理論的な研究ではその実現可能性が議論されてきた(代表的なものに N. T. Phuc, et al.: Nature Comm. 6, 8135 (2015))。しかし提案されたスピン流の発生機構は、いずれもスピン流を制御できないという大きな欠点があった。

申請者らは制御可能な原子スピントロニクス系の実現を目指し、研究開始までの2年程度の期間をかけて、次の問題点について一つずつ検証してきた。

スピン流の誘起に必要なヘリカル磁気構造を、制御可能な形でどのように発生させるか。

そこにフェルミ原子を混入した場合、磁気構造は安定に存在できるか。

フェルミ原子にスピン流が誘起されるか。それはラマンレーザーを通じて制御が可能か。

2. 研究の目的

本研究の目的は、研究開始時までに得られた成果を基盤に、実現されていない冷却原子気体のスピントロニクス系の実験的成立要件を理論的に確立し、スピン流の制御手法を世界に先駆けて提案することにある。この目的のため申請者らが考えた機構は、次のようなものである。

すなわち、スピン 1/2 のフェルミ原子にスピン流を担わせ、背景にはヘリカル磁気構造を持ったスピン 1 のスピノール BEC を配置する。その磁気構造は、BEC にラマンレーザーを照射させてスピン軌道相互作用を作り出すことで発生させる。これにより、ラマンレーザーの周波数や強度を変化させることで磁気構造が変化し、結果としてスピン流を制御させることにつながることを考えた。

本研究ではこのシナリオに基づいて実際にスピン流の解析的・数値的計算を行ない、提案する機構の妥当性を吟味し、実験への提言につなげることを目指した。

申請者らは、

ラマンレーザーを用いてスピン 1 のスピノール BEC にスピン軌道相互作用を発生させると、そこにヘリカル磁気構造が生じること、

その磁気構造を背景に別種の原子を導入しても、磁気構造が安定に存在しうる条件があること

を明らかにしてきた。本研究ではこのアイデアをさらに推し進め、

上述のヘリカル磁気構造を背景にスピン 1/2 のフェルミ原子を注入することで、スピン流が安定的に誘起されるか。

このスピン流の特徴は何か。ラマンレーザーを調整することで、流れの向きや強さを容易に変えられるか。最大のスピン流を得る条件は何か。

制御可能なスピン流を得る上で必要な条件をすべて満たすことは、実験的に可能か。

他の機構の可能性、アトムチップによる実現可能性はあるか。

などを順次明らかにすることを目指した。

3. 研究の方法

【解析的アプローチ】BEC のヘリカル磁気構造を背景としたスピン 1/2 のフェルミ原子のスピン流を非平衡グリーン関数を用いて解析した。解析的アプローチで用いる非平衡グリーン関数による解析手法は、固体のスピントロニクス系で多用されており、その応用で結果に到達できると見込んだためである。

【数値的アプローチ】量子モンテカルロシミュレーションにより、解析計算で届かないパラメータ領域におけるスピン流を数値的に明らかにする。数値的アプローチで用いる量子モンテカルロシミュレーションは、申請者のグループでボーズ原子とフェルミ原子の混合冷却原子気体の研

究のために何年にもわたって実施してきた技法である。汎用性のある計算コードをすでに構築しており、本研究に活用できると考えた。また、もう一つの数値的アプローチとして、機械学習を応用した新たな計算手法の開拓も検討した。最初にテストケースとしてスピン系の相転移点の特定に機械学習の技法を用い、改良を加えたうえで、量子力学的粒子系の相や相境界の特定を行うこととした。

4. 研究成果

人工スピン軌道相互作用を持つ極低温冷却原子系におけるスピン流の理論解析を行なった。中性原子にはスピン軌道相互作用 (SOC) が働かないが、人工的に SOC が存在するような系を作成することが実験的にできるようになったことから、人工 SOC を持つ冷却原子系における原子スピンの構造を調べた。ボーズ原子のみからなる系ではすでに先行研究があるが、本研究ではボーズ原子とフェルミ原子の混合系に対して解析を行なった。混合系のボーズ原子のみにスピン軌道相互作用を持たせた場合、ボーズ原子のスピンがスパイラル構造を形成することが明らかになった。このスピン構造を背景にフェルミ原子のスピン流が生じることが期待されたため、非平衡グリーン関数を用いたスピン流の計算を行い、実験的に制御が可能なささまざまなパラメタの関数としてどのような振る舞いをするかを解析した。解析の結果、人工 SOC を作るために系に印加しているレーザーの波数を変化させた場合、フェルミ原子のスピン流がピーク構造を持つことが明らかになった。すなわちスピン流を最大にする最適なレーザー波数の存在を指摘した。

さらに関連する事象として、ボーズ・フェルミ混合原子系の閉じ込めに関する技法についても議論した。上記のスピン流の研究では閉じ込めポテンシャルを考慮に入れておらず、その点でさらに深い解析が必要になるが、そもそも閉じ込めポテンシャルとして一般的に用いられているものが最適なのかどうかは自明ではない。そこで別の可能性として非対角閉じ込めと呼ばれる方法の有用性について、シミュレーション解析を行ない、通常閉じ込めポテンシャルで見られるような密度分布とは異なる特徴的な分布が現れることが明らかになった。より一様に近い分布が得られることから、スピン流の発生にも有利と期待され、解析をさらに進めた。

冷却原子系のうち、統計性の異なる粒子が混在するボーズ・フェルミ混合系におけるスピン流の研究を進めた結果、そのベースとなる同系の相図について、より正確な情報が必要となった。しかし相図の特定についてはすでにさまざまな手法を用いて行われてきたため、同じ方向からのアプローチでは大きな改善が期待できないことがわかった。そこで従来とは全く異なる新たな視点を模索した。そこで、多方面で応用が進む機械学習を冷却原子気体の解析に用いるアプローチについて検討し、次のいくつかの成果を得た。

(1) 畳み込みニューラルネットワークを用いてスピン系の各相の相関関数の様子を学習させ、転移点の特定を行うことに成功した。また汎化性能(たとえば1次相転移を学習させて2次相転移点を特定することや、その逆も行える点)も高いことが明らかになった。この研究は論文に発表し、日本経済新聞にも取り上げられ大きな反響を得た。この技術を量子粒子系に利用すれば、相境界の特定が行えると期待できた。

(2) 摂動を含むシュレディンガー方程式において、摂動の一次の結果を学習させ、無限次までの結果を推定することに成功した。この研究については現在論文を準備中である。冷却原子系においてはこの技術をグロス・ピタエフスキー方程式の解法等に活用できると期待された。

(3) 深層学習の各種手法は、複雑な現象に対してそのデータから有益な情報を引き出すことができる汎用的な枠組みであるが、そのデータを集めることは一般的に難しい。そこで、Li and Wang の手法を拡張し、スピン状態の超解像を実現した。我々の手法は、比較的入手が容易な格子サイズの小さいスピン状態を入力として、より大きな格子サイズのスピン状態を生成できることを明らかにした。

(4) 機械学習を用いた相転移の解析においては、ニューラルネットワーク (NN) を学習させるトレーニングデータが必要となる。系のサイズが変わるとトレーニング画像の大きさも変わり、そのために NN のパラメタの最適化もサイズごとに行う必要がある。これに対してトレーニング画像の大きさを変えない手法を提案した。

(5) イジングスピン系および量子力学的粒子系の機械学習解析における入力データの新しい準備法機械学習の物理系の解析に用いるアプローチについて引き続き検討し、スピン系の相転移現象を機械学習の画像認識を用いて解析する際、画像を用意する方法に工夫をすることで汎化性能を上げられることを発見し、論文に発表した。また、量子力学的粒子系への応用を目指し、世界線を用いたモンテカルロシミュレーションのスナップショットを画像として扱い、相特定に機械学習を用いる方法を考案した。

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 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Sakamoto Akimichi, Shiina Kenta, Mori Hiroyuki	4. 巻 90
2. 論文標題 Image Preparation for Machine-Learning Analysis of Multiple-Size Spin Systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 065001 ~ 065001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.065001	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 Shiina Kenta, Mori Hiroyuki, Tomita Yusuke, Lee Hwee Kuan, Okabe Yutaka	4. 巻 11
2. 論文標題 Inverse renormalization group based on image super-resolution using deep convolutional networks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 9617
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-88605-w	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 Masao Iwamatsu and Hiroyuki Mori	4. 巻 100
2. 論文標題 Effect of line tension on axisymmetric nanoscale capillary bridges at the liquid-vapor equilibrium	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. E	6. 最初と最後の頁 42802
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.100.042802	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 Kenta Shiina, Hiroyuki Mori, Yutaka Okabe, Hwee Kuan Lee	4. 巻 10
2. 論文標題 Machine-Learning Studies on Spin Models	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 2177
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-58263-5	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 Ryohei Sakamoto, Yosuke Ono, Emiko Arahata, and Hiroyuki Mori	4. 巻 87
2. 論文標題 Spin Current of Fermions Induced in Spin Orbit Coupled Bose-Fermi Mixture	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 074004-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.074004	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 Yosuke Ono, Rei Hatsuda, Kenta Shiina, Hiroyuki Mori, and Emiko Arahata	4. 巻 88
2. 論文標題 Three Sound Modes in a Bose-Fermi Superfluid Mixture at Finite Temperatures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 034003-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.034003	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 Kenta Shiina, Emiko Arahata, and Hiroyuki Mori	4. 巻 87
2. 論文標題 Bose-Fermi Mixtures in Off-diagonal Confinement	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 125002-1-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.125002	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 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 椎名拳太, Hwee Kuan Lee, 森弘之,
2. 発表標題 Flow-based modelによる古典スピン系の解析
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 椎名拳太, Hwee Kuan Lee, 森弘之
2. 発表標題 Flow-based modelを用いたスピン状態の超解像
3. 学会等名 日本物理学会第76回年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂本晟学, 森弘之
2. 発表標題 機械学習による2次元古典スピン系相転移現象の数値解析
3. 学会等名 日本物理学会第76回年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenta Shiina, Hiroyuki Mori, Yutaka Okabe, Hwee Kuan Lee
2. 発表標題 Solving Schrodinger equation by Machine Learning with support of Perturbation theory
3. 学会等名 Deep Learning and Physics DLAP 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋岳志, 椎名拳太, 森弘之
2. 発表標題 ミクロカノニカル純粋状態の制限ボルツマンマシンによる生成
3. 学会等名 日本物理学会2020年3月第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂本良平, 荒畑恵美子, 森弘之
2. 発表標題 スピン軌道相互作用を持つ冷却原子系に対する異種原子の混合効果
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 初田黎, 坂本良平, 小野洋輔, 椎名拳太, 森弘之, 荒畑恵美子
2. 発表標題 三次元光格子中ボーズ-フェルミ混合系の基底状態及び励起状態の解析II
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂本良平, 荒畑恵美子, 森弘之
2. 発表標題 スピン・軌道角運動量結合したBECの回転スピン流
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryohei Sakamoto, Emiko Arahata, and Hiroyuki Mori
2. 発表標題 Spin current in spin-orbit coupled Bose- Fermi mixture
3. 学会等名 The 26th International Conference on Atomic Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yosuke Ono, Rei Hatsuda, Kenta Shiina, Hiroyuki Mori, and Emiko Arahata
2. 発表標題 Sound Propagation excited by Density Perturbation in a Bose-Fermi Mixture Superfluid at Finite Temperatures
3. 学会等名 The 26th International Conference on Atomic Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 森弘之	4. 発行年 2019年
2. 出版社 講談社	5. 総ページ数 240
3. 書名 2つの粒子で世界がわかる	

〔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
---------	---------