

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03462

研究課題名(和文) スピン軌道相互作用を持つボース・アインシュタイン凝縮体における渦ソリトン

研究課題名(英文) Vortex solitons in Bose-Einstein condensates with spin-orbit coupling

研究代表者

坂口 英継 (Sakaguchi, Hidetsugu)

九州大学・総合理工学研究院・准教授

研究者番号：90192591

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：アルカリ金属原子気体などを超低温にするとボース・アインシュタイン凝縮を起こす。ボース凝縮体は平均場近似でグロス・ピタエフスキー方程式で記述できる。様々な効果を取り込んだグロス・ピタエフスキー方程式の振る舞いを数値計算で研究した。正と負の実効的質量を持つソリトンが相互作用すると負の質量のソリトンが正の質量のソリトンに追いつかれ、質量が等しい場合には無限に加速しあう現象を見つけた。正と負の電荷をもつイオン気体のボース・アインシュタイン凝縮体を記述するグロス・ピタエフスキー・ポアソン方程式の振る舞いを調べ、電荷密度波が形成されたり、ダイポール型や四重極型のソリトンが形成されることを見つけた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ボース・アインシュタイン凝縮体のソリトン解に対しては様々な研究がなされているが、今回の研究で、正と負の質量の粒子が相互作用するという通常の力学では現れない興味深い状況が実現可能だと分かった。外力がない系にもかかわらず相互作用だけで互いに無限に加速されるという一見作用反作用の法則やエネルギー保存則に反するようにみえる現象が起こることを数値計算で示したことは物理学の基礎を見直すことにもつながる結果といえる。また、イオン状態の電荷をもったGP方程式の解析はこれまで行われておらず、非自明な非線形状態が現れることを示したのは学術的意義があると考えている。

研究成果の概要(英文)：Bose-Einstein condensates can be well described by the Gross-Pitaevskii equation. We generalize the Gross-Pitaevskii (GP) equation by incorporating various effects and studied various nonlinear phenomena in the generalized GP equations. The soliton and vortex are typical nonlinear solutions to the GP equation. When two solitons with positive and negative mass interact with each other, the negative mass soliton escapes from the positive mass soliton. When the magnitude of the mass is the same, the two solitons are accelerated infinitely. When the ultra cold gas has positive and negative charge, the effect of the electric field needs to be considered. In a parameter range, the charge-density-wave state appears. In another parameter range, dipole or quadrupole type soliton appears.

研究分野：非線形物理学

キーワード：ソリトン ボース・アインシュタイン凝縮体 スピン軌道相互作用

1. 研究開始当初の背景

スピン軌道相互作用は原子内での電子のエネルギー準位の分裂の原因となることで古くから知られているが、近年スピントロニクス分野でスピン流の制御に関連して多くの研究がなされている。また、最近盛んに研究されているトポロジカル絶縁体でもスピン軌道相互作用は重要な役割を果たす。

一方、ボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)の研究分野では、磁場やレーザーの技術を駆使して、さまざまなゲージ場を人工的につくるのが可能になってきた。その一つの応用として、2011年 Spielman のグループの研究は、2成分ボース凝縮体のなかにスピン軌道相互作用に対応する相互作用をつくることに成功した。(Y.J.Lin, K.Jimenez-Garcia, and I.B.Spielman, Nature Vol.471, 83,2011) 実際のスピニングがアップとダウンの状態にあるわけではないが、2成分ボース凝縮体間の有効相互作用ハミルトニアンがスピン軌道相互作用の形をしている系を実験的に作成した。

BECの理論研究の中に、Gross-Pitaevskii (GP) 方程式と呼ばれる外部ポテンシャル項を持つ非線形シュレディンガー方程式の数値的研究分野がある。GP方程式は物質波の波動方程式であるシュレディンガー方程式に、原子間の相互作用を平均場的に扱って得られる非線形項を付け加えた方程式である。非線形項の係数が正の場合が斥力相互作用、負の場合が引力相互作用に対応する。

Spielman 等の実験に触発され、スピン軌道相互作用をもつ2成分 Gross-Pitaevskii 方程式の研究がいくつかある。例えば、Ramachandran 等は調和ポテンシャル中での斥力相互作用する BEC では、half-vortex 状態(1つの成分のみが中心に渦を持つ状態)がエネルギーの最底状態になることが示した。(B.Ramachandran, B.Opanchuk, X-J. Liu, H.Pu, P.Drummond, and H.Hu, Phys. Rev. A,85,023606,2012)

2. 研究の目的

研究の目的はこれまで行ってきた研究を拡張発展させ、スピン軌道相互作用を持つ BEC の渦ソリトンのパターンやダイナミクスの多様性をさらに詳しく調べることである。例えば、外部磁場による **Zeeman 効果**がある系に拡張して、half-vortex soliton を研究する。Zeeman 効果があると上向きスピン成分と下向きスピン成分の対称性が破れる。そのような対称性が破れた系でも half-vortex soliton が安定に存在できるか調べる。

3. 研究の方法

スピン軌道相互作用を持つ Gross-Pitaevskii 方程式の数値計算を行い、その結果を近似理論などで解析し、half-vortex soliton 解や mixed-mode soliton 解の特性を研究する。さらに、さまざまな項を付けて拡張した Gross-Pitaevskii 方程式のソリトン解、渦解の性質を調べる。

4. 研究成果

1. スピン軌道相互作用を持つ分散項を持たない Gross-Pitaevskii 式を研究した。線形系ではグラフェン中の電子を記述する Weyl 方程式と同等な方程式系になる。Weyl 方程式のエネルギー分散関係はディラックコーンと呼ばれる交差する線形関係になる。ここに外部磁場による Zeeman 項をさらに導入すると、エネルギーギャップが生じる。非線形項を導入するとこのエネルギーギャップの領域にソリトンや渦ソリトンが存在するようにな

る。エネルギーギャップにあるソリトンという意味でギャップ ソリトンとがギャップ渦ソリトンなどと呼ばれる局在状態の 1 つと考えられる。1 次元系ではそのギャップソリトン解の厳密解が得られた。ギャップソリトン解が安定に存在するパラメータ領域を調べた。

2 . 正と負の有効質量をもつ 2 つのソリトンが相互作用する系の数値計算を行った。質量の符号が異なる場合にはソリトンの追いかけ運動が生じる。特別な 場合にはソリトン間の間隔が時間変化せず、外力がはたらかない系なのに内力だけで等加速度運動する様子が観測された。

3 . スピン軌道相互作用を持つ 2 成分ボース・アインシュタイン凝縮体の相互作用項を周期的に変動させた場合の渦ソリトン解の安定性の相図を作った。振動外 力に特徴的な tongue 構造をもった相図が得られ、ある種のパラメータ共鳴が起きていると解釈した。

4 . 斥力的な非局所相互作用を持つボース・アインシュタイン凝縮体がソリトン格子型の空間構造を取ることを見出だした。ある距離まで一定の相互作用を持つ という単純なモデルではその距離が空間周期構造の周期よりわずかに小さい場合には実効的に局所的引力相互作用系を持つ非線形シュレディンガー方程式で近似 でき、ソリトンの局在構造が現れる原因が明快になった。スピン軌道相互作用がある場合には渦ソリトンの格子が得られることも分かった。

5 . 斥力型局所相互作用をもつボース・アインシュタイン凝縮体に原点で弱く発散する singular soliton 解が存在することを示した。一様な系ではこの解は不安 定であるが、デルタ関数的なポテンシャル井戸があると、この singular soliton 解で近似される状態が安定化されることが分かった。

6 . 正と負の電荷をもつボース・アインシュタイン凝縮体に対応する Gross-Pitaevskii 方程式を研究し、電荷密度波が形成されたり、ダイポール型や四重極型のソリトンが形成されることを数値計算で示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hidetsugu Sakaguchi and Boris, A. Malomed	4. 巻 11
2. 論文標題 Nonlinear Management of Topological Solitons in a Spin-Orbit-Coupled System	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Symmetry	6. 最初と最後の頁 388
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/sym11030388	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 Hidetsugu Sakaguchi	4. 巻 383
2. 論文標題 Soliton lattices in the Gross-Pitaevskii equation with nonlocal and repulsive coupling	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics Letters A	6. 最初と最後の頁 1132-1137
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physleta.2018.12.0360375-9601	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 Hidetsugu Sakaguchi and Boris A. Malomed	4. 巻 101
2. 論文標題 Singular solitons	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 12211
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.101.012211	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 Hidetsugu Sakaguchi, Dmitry V. Skryabin, Boris A. Malomed	4. 巻 43
2. 論文標題 Stationary and oscillatory bound states of dissipative solitons created by third-order dispersion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 2688-2691
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OL.43.002688	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 Hidetsugu Sakaguchi	4. 巻 14
2. 論文標題 New models for multi-dimensional stable vortex solitons	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Frontiers of Physics	6. 最初と最後の頁 12301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11467-018-0857-0	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 Hidetsugu Skaguchi and Boris A. Malomed	4. 巻 99
2. 論文標題 Interaction of solitons with positive and negative masses: Shuttle motion and coacceleration	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 22216
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.99.022216	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5件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 坂口英継
2. 発表標題 スパイラルパターンのダイナミクス：コアの運動とその制御
3. 学会等名 第42回日本分子生物学会年会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石橋和也 坂口英継
2. 発表標題 イジング型Vicsekモデルにおける孤立波の反転現象
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂口英継
2. 発表標題 正負の電荷をもつボース・アインシュタイン凝縮体のパターン形成
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂口英継
2. 発表標題 正と負の質量をもつ2つのソリトンの運動
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂口英継 B.A. Malomed
2. 発表標題 スピン軌道相互作用をもつボース・アインシュタイン凝縮体におけるギャップソリトン
3. 学会等名 日本物理学会2018秋季大会
4. 発表年 2018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
---------	---------