

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：12608

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25887020

研究課題名(和文) 強相関量子系における普遍性とその学際的展開

研究課題名(英文) Universality in strongly-correlated quantum systems and its interdisciplinary development

研究代表者

西田 祐介(Nishida, Yusuke)

東京工業大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：80704288

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：系の微視的詳細に関わらず同じ物理現象が現れるとき、その現象を普遍的であるといい、その顕著な例のひとつがエフィモフ効果である。量子スピン系でもマグノンによるエフィモフ効果が実現され得るとの最近の提案を受けて、本研究では希薄なマグノン気体における電子スピン共鳴に関する研究を行った。また、格子QCDにおいて実現されるような重いパイ中間子の場合にも、パイ中間子によるエフィモフ効果が実現され得ることも示した。さらに、グラフェンにおいて実現され得るような、クーロンポテンシャル中のディラック粒子も、エフィモフ効果と同様に、低エネルギーにおいて離散的なスケール不変性を示すことを示した。

研究成果の概要(英文)：Physics is said to be universal when it emerges regardless of the underlying microscopic details. A prominent example is the Efimov effect, which predicts the emergence of an infinite tower of three-body bound states obeying discrete scale invariance when the particles interact resonantly. Motivated by the recent proposal that the Efimov effect of magnons can be realized in quantum magnets, the electron spin resonance in dilute magnon gases was studied in this research. Also, it was shown that the Efimov effect can be realized with heavy pions, in principle, in lattice QCD. Furthermore, it was shown that the discrete scale invariance emerges for Dirac fermions subject to strong Coulomb potential.

研究分野：冷却原子気体を主とする理論物理

キーワード：エフィモフ効果 マグノン 電子スピン共鳴 パイ中間子 スーパーエフィモフ効果 グラフェン 離散的スケール不変性

1. 研究開始当初の背景

冷却原子の物理は、1995年のボーズ・アインシュタイン凝縮の実現から始まった比較的若い分野である。しかし、その後のめまぐるしい技術の進歩により、冷却原子を用いて実現された系を特徴づけるほとんど全ての自由度を自在に制御できるようになった。例えば、

- ・磁場を使って原子間相互作用を自由に变化させることのできる「フェッシュバツハ共鳴」

- ・光を使って原子を自在に閉じ込めることのできる「光格子」

などが代表的な実験技術である。また原子種を適切に選ぶことで、

- ・粒子の量子統計や質量比も自由に選択することができる。つまり冷却原子では、系を自由自在にデザイン・コントロールすることができ、興味のある物理を理解するための理想的な環境を人工的に作り出すことができる。例えば、中性子星内部の核物質など直接的に実験・観測することの難しい系の物理を冷却原子を使って実験室内で調べることが可能であるし、高い転移温度を持つ超伝導体など欲しい性質を持つ物質創成の手がかりを冷却原子を使って得ることも期待される。このように他分野にはない著しい利点を持つ冷却原子の物理は、基礎科学・応用科学の両面において、今後ますます重要になっていくと考えられる。

2. 研究の目的

このような背景の中で、西田は強相関量子系における普遍的性質の解明とその学際的展開を目的として研究を行って行く。強相関量子系は、原子物理・物性物理・原子核・素粒子物理など、物理学において幅広く現れる。従って、その性質の理解、そのための理論的・実験的手法の開発は、容易ではないものの非常に重要である。冷却原子では上記のように、相互作用・空間次元・粒子の量子統計や質量比といった系のほとんど全ての自由度を自在に制御することができるため、強相関量子系とその普遍的性質への理解を発展させるのに理想的である。ここで得られた知見は、冷却原子に留まらず他分野における強相関量子系の物理を解明するのにも有用であり、分野の境界を越えた学際的発展を目指す。

3. 研究の方法

相互作用・空間次元・粒子の量子統計や質量比といった系の自由度の選択に応じて、強相関量子少数系にどのような普遍的現象が現れるのかを系統的に調べる。新しい普遍的現

象を発見した場合には、それを冷却原子を用いた実験で実現するための提案を行う。また、エフィモフ効果が現れる物性系としては強磁性体があるが、例えば電子スピン共鳴といった実験的手法を用いた場合に、エフィモフ効果がどのように観測されるのかを明らかにする。そのために、量子クラスター展開による解析的方法とモンテカルロ・シミュレーションによる数値的方法とを相補的に用いる。さらに、エフィモフ効果が他のどのような物性系に現れるかを調べる。特に超流動ヘリウム中のロトン励起がエフィモフ効果を示しているかどうかを明らかにする。

4. 研究成果

系の微視的詳細に関わらず同じ物理現象が現れるとき、その現象を普遍的であるという。その顕著な例のひとつは、離散的なスケール対称性を持つ無限個の3体束縛状態が現れることを予言する、エフィモフ効果である。本研究では、エフィモフ効果とそれに関連する物理について、以下の具体的成果を得た。

(1年目)

低温の強磁性スピン系で実現される希薄なマグノン気体における電子スピン共鳴について、理論的な研究を行った。そのために量子クラスター展開を用いて、2体マグノン間の相互作用が散乱共鳴点を通過するときに、電子スピン共鳴スペクトルのピークのシフトが符合を変え、線幅は最大となることを示した。このような特徴的な振る舞いは普遍的であるため、マグノン間の散乱共鳴を実験的に見つけるのに使うことができる。もし将来、マグノン間の散乱共鳴が実験的に実現されれば、それは冷却原子系のフェッシュバツハ共鳴の実現と同様のインパクトを持ち、さらに、最近提案された3体マグノンのエフィモフ効果のような多種多様な強相関の物理への道を切り開くものであると考えられる。また、格子QCDにおいて実現されるような重いパイ中間子の場合にも、3体のパイ中間子によるエフィモフ効果が実現され得ることも示した。

(2年目)

2次元においてp波散乱共鳴点にあるような引力ポテンシャルで相互作用する2原子種から成る系について、理論的研究を行った。そのために低エネルギー有効場の理論を構築し、それを繰り込み群を用いて解析することで、系の普遍的な低エネルギー物理を引き出した。その結果、3体系において、同種粒子がボース粒子の場合には質量比が4.03404、同種粒子がフェルミ粒子の場合には質量比が2.41421、を超える場合に、スーパーエフィモフ効果が現れることを示した。質量比が増加するとともに、スーパーエフィモフ効果

のスペクトルはより密になるため、実験的に検出するのに有利であることを見出した。また、ボルン・オッペンハイマー近似は、スーパーエフィモフ効果を正しく再現するためには使えないことも指摘した。

さらに、グラフェンにおいて実現され得るような、クーロンポテンシャル中のディラック粒子も、エフィモフ効果と同様に、低エネルギーにおいて離散的なスケール不変性を示すことを示した。

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7件)

1) Philipp Gubler, Naoki Yamamoto, Tetsuo Hatsuda, Yusuke Nishida “Single-particle spectral density of the unitary Fermi gas: Novel approach based on the operator product expansion, sum rules and the maximum entropy method” *Annals of Physics* 356, 467-497 (2015) 査読あり
DOI:10.1016/j.aop.2015.03.007

2) Yusuke Nishida “Polaronic atom-trimer continuity in three-component Fermi gases” *Physical Review Letters* 114, 115302 (2015) 査読あり
DOI:10.1103/PhysRevLett.114.115302

3) Sergej Moroz and Yusuke Nishida “Super Efimov effect for mass-imbalanced systems” *Physical Review A* 90, 63631 (2014) 査読あり
DOI:10.1103/PhysRevA.90.063631

4) Yusuke Nishida “Vacuum polarization of graphene with a supercritical Coulomb impurity: Low-energy universality and discrete scale invariance” *Physical Review B* 90, 165414 (2014) 査読あり
DOI:10.1103/PhysRevB.90.165414

5) Tetsuo Hyodo, Tetsuo Hatsuda, and Yusuke Nishida “Universal physics of three bosons with isospin” *Physical Review C* 89, 032201(R) (2014) 査読あり
DOI:10.1103/PhysRevC.89.032201

6) Naoyuki Sakumichi, Yusuke Nishida, and Masahito Ueda “Lee-Yang cluster expansion approach to the BCS-BEC crossover: BCS and BEC limits” *Physical Review A* 89, 33622 (2014) 査読あり
DOI:10.1103/PhysRevA.89.033622

7) Yusuke Nishida “Electron spin resonance in a dilute magnon gas as a probe

of magnon scattering resonances” *Physical Review B* 88, 224402 (2013) 査読あり
DOI:10.1103/PhysRevB.88.224402

[学会発表](計6件)

1) Yusuke Nishida “Few-body universality and super Efimov effect” Dynamics of Critically Stable Quantum Few-Body Systems, 2014年10月12日-10月17日, Santos (Brazil)

2) Yusuke Nishida “Few-body universality and super Efimov effect” Exact Renormalization Group, 2014年09月22日-09月26日, Lefkada Island (Greece)

3) Yusuke Nishida “New analogies between cold atoms and high-energy physics” Cold atoms and beyond, 2014年06月24日-06月27日, Aarhus (Denmark)

4) Yusuke Nishida “Few-body universality: from Efimov effect to super Efimov effect” Few-body Universality in Atomic and Nuclear Physics: Recent Experimental and Theoretical Advances, 2014年05月12日-05月16日, Seattle (USA)

5) 西田祐介 “原子核、冷却原子、物性物理をつなぐ普遍性とエフィモフ効果” 新学術研究領域「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」ウィンタースクール, 2013年12月25日-12月26日, 理化学研究所・和光キャンパス(埼玉県・和光市)

6) 西田祐介 “原子核、冷却原子、物性物理をつなぐ普遍性とエフィモフ効果” 基礎物理セミナー合宿, 2013年12月07日-12月09日, 箱根・太陽山荘(神奈川県・箱根町)

[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

6. 研究組織

(1)研究代表者

西田 祐介 (NISHIDA Yusuke)

東京工業大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：80704288

(2)研究分担者
なし

(3)連携研究者
なし