

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 4月 3日現在

機関番号：13101

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20740187

研究課題名（和文） 乱れた系の局在・磁性・超伝導・超流動の微視的理論

研究課題名（英文） Microscopic theory of localization, magnetism, superconductivity, and superfluidity in disordered systems

研究代表者

柳瀬 陽一（YANASE YOUICHI）

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：70332575

研究成果の概要（和文）：

固体電子系におけるランダムネスおよび冷却原子気体におけるトラップポテンシャルによって局在したフェルミオンが示す新しい量子凝縮現象を理論的に調べた。なかでも、（1）アンダーソン局在と超伝導の競合による超伝導絶縁体転移のメカニズムを解明したこと、（2）冷却原子気体における新しいFFLO超流動相を発見したこと、（3）ランダムなスピン軌道相互作用があるスピン三重項超伝導体の秩序変数を決定したこと、の3点は特筆すべき成果である。

研究成果の概要（英文）：

I theoretically investigated novel quantum condensation phenomena in the fermion systems which are localized by the randomness (for electrons) or by the trap potential (for cold atom gases). I obtained the following three outstanding results; (1) I clarified the mechanism of superconductor-insulator transition due to the competition between Anderson localization and superconductivity. (2) I discovered the new FFLO superfluid phases in the cold atom gases. (3) I determined the order parameter of spin triplet superconductor with random spin-orbit coupling.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：物性理論

科研費の分科・細目：物性 I I

キーワード：ランダムネス、アンダーソン局在、電子相関、エキゾチック超伝導・超流動

1. 研究開始当初の背景

乱れた系の電子相関が注目を集める契機の一つとなったのは、2次元電子系における金属絶縁体転移の発見である [Kravchenko, 1995]。電子相関がない2次元系は必ず絶縁体となるため、実験的に観測された金属相は

電子相関によって生じるものと考えるのが妥当である。

より近年になって注目を集めているのは、銅酸化物高温超伝導体や重い電子系、巨大磁気抵抗マンガン酸化物などの強相関電子系に存在するランダムネスである。特に酸化物は一般に多く乱れを含むので、それが磁性・超

伝導・電荷秩序などの相を制御するパラメーターの一つとなり得る。また、磁性や超伝導の（量子）臨界現象はそれ自体が大きな注目を集めるテーマだが、クリーンな系に対する理論では説明できない現象が数多くある。そのため、実験との比較の観点からも、ランダムネスを含む強相関電子系の理論研究が望まれている。

また、InOx や TiN に対する最近の実験研究により、アンダーソン局在と超伝導の競合による超伝導絶縁体転移が新たな局面を迎えている。1980 年代の前川・福山らの研究において、長距離クーロン相互作用による超伝導絶縁体転移が調べられているが、InOx や TiN における超伝導絶縁体転移はそれとは異なるクラスに属することが分かっている。また、超伝導絶縁体転移近傍において、“Hard gap insulator”相の存在が発見されるなど、新たな展開が続いている。

さらに、最近発見されたホウ素ドーパダイヤモンドの超伝導もまた超伝導絶縁体転移の観点から面白い研究対象となっている。これは、母物質のバンド絶縁体から半導体、さらに超伝導体となる物質であり、新奇な物性の存在を示唆している。実際に、「フェルミ面のない超伝導」「不純物バンドの超伝導」というアイデアが提案されており、非常に興味深いテーマとなっている。

最後に触れたいのは、中性原子気体の超流動に関する最近の発展である。この系の非常に魅力的な特徴は、系のパラメーターを自在にコントロール出来ることにある。例えば、相互作用の強さを変えることで BCS 型超流動から BEC 型超流動へのクロスオーバーが観測されたことは非常に強いインパクトを与えている。最近では光学格子を導入した系の物性が注目を集めているが、そこに人為的にランダムネスを入れる実験が 2005 年に Lye らによって報告された。固体金属では一般にランダムネスを操作することが難しいため、中性原子気体は非常に貴重な実験系となり得る。

このように、アンダーソン局在・強相関電子系・超伝導・中性原子気体といった分野を包括的に眺めて見ると、「電子(原子)相関とランダムネス」という共通のテーマが存在することが分かる。分野横断的な研究を行うことで、これらの問題に対する系統的な理解が得られると期待される。

2. 研究の目的

本研究の目的は、以下のような問題を解明することである。

- (1) 競合する秩序の多重臨界現象、
- (2) 超伝導体における超伝導絶縁体転移、
- (3) 中性原子気体における新奇超流動相。

超伝導絶縁体転移に関しては、超伝導のメゾスコピック揺らぎ・熱揺らぎ・量子揺らぎの影響を調べる。超伝導絶縁体転移に伴う強い揺らぎが存在することが、InOx, TiN, ホウ素ドーパダイヤモンドなどの特徴である。これらの物質の個性を反映した計算を行い、磁場効果も計算したい。

中性原子気体に関しては、ランダムポテンシャル及びトラップポテンシャルの存在下で起こる BCS-BEC クロスオーバーと、そこで期待される新奇超流動相を明らかにする予定である。ボーズ粒子化に伴うアンダーソン局在相から金属相・超流動相への転移や、フェルミオン系の局在からボゾン系の局在へのクロスオーバーの可能性も調べたい。また、有限温度での擬ギャップ現象の計算も行う予定である。

3. 研究の方法

研究代表者の柳瀬は 2006 年に「磁性と超伝導およびその多重臨界領域におけるランダムネス」の研究を行った。これは高温超伝導体や重い電子系を念頭に、これらの系に特有の微視的不均一性とその影響を明らかにしたものである。このような場合には、ランダムネスに対する平均操作を用いる近似が破綻する一方で、この研究において開発した実空間グリーン関数を用いる計算法が力を発揮することが分かった。この多体相関理論と実空間平均場近似を組み合わせ本研究課題に取り組んだ。

4. 研究成果

(1) アンダーソン局在と S 波超伝導の競合による超伝導絶縁体転移の新しい典型例としてホウ素ドーパダイヤモンドやシリコン等の高濃度半導体における超伝導を考察し、そのグローバルな相図を決定した。特に、超伝導絶縁体転移に関して、超伝導のメゾスコピック揺らぎ・熱揺らぎの影響を調べた。これらの系では、アンダーソン局在に伴うクーパーペアの局在現象が超伝導絶縁体転移の起源となりうることを示した。

(2) 重い電子系超伝導体 CeCoIn₅ の低温高磁場領域で実現されていると考えられている FFL₀ 超伝導相におけるランダムネスの効果を調べた。ランダムポテンシャルを含む微視的モデルをボゴリウボフ・ド・ジャン方程式に基づいて解析した結果、新しいタイプのグラス相が現れることを見出し、これを FFL₀ グラス相と名付けた。その相において期待される磁気的性質を調べ、その空間分布と統計性に現れる特徴を考察した。

(3) インバランスな冷却フェルミ原子気体における FFL0 超流動相の研究を行った。この系における FFL0 超流動の可能性が大きな注目を集めているが、現在までに実験的な観測例はない。その理由が、この系に特有のトラップの性質にあることを我々は見出し、FFL0 超流動を実現するためには別の種類のトラップを用意すれば良いことを提案した。本研究では、トラップがある系の超流動相をボゴリウボフ-ド・ジャン方程式および実空間 T 行列近似を用いた解析により考察した。

(4) ランダムなスピン軌道相互作用があるスピン三重項超伝導体について研究を行った。特に層状欠陥がある系に注目し、局所的な空間反転対称性の破れに起因するランダムスピン軌道相互作用により、新奇なスピン三重項超伝導状態が安定になることを発見した。その結果に基づいて Sr₂RuO₄-Sr₃Ru₂O₇ 共晶系と CePt₃Si の 2 つの超伝導体を考察した。

(5) 界面近傍に局在した電子状態には反対称スピン軌道相互作用が現れることが知られており、近年スピントロニクスやトポロジカル絶縁体の観点からも大きな注目を集めている。本研究では、Sr₂RuO₄ の [001] 界面における反対称スピン軌道相互作用をミクロに導出し、その結果に基づいて、界面超伝導状態が通常のラシュバ型スピン三重項超伝導体で期待されるヘリカル状態とは異なるものになることを示した。さらに、そのような場合には界面近傍に非ユニタリー超伝導相が現れ、超伝導ボルテックスが自発的に生じることを示した。

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 2 2 件)

①柳瀬陽一、播磨尚朝、
スピン軌道相互作用と結晶中の電子状態(その 3)、
固体物理、47 巻、101-111、
2011 年、査読なし

②柳瀬陽一、播磨尚朝、
スピン軌道相互作用と結晶中の電子状態(その 2)、
固体物理、46 巻、283-292、
2011 年、査読なし

③柳瀬陽一、播磨尚朝、
スピン軌道相互作用と結晶中の電子状態(その 1)、

固体物理、46 巻、229-239、
2011 年、査読なし

④Y. Yanase,
Random Spin-orbit Coupling in Spin Triplet
Superconductors: Stacking Faults in
Sr₂RuO₄ and CePt₃Si,
J. Phys. Soc. Jpn. 79, 084701,
2010 年、査読有り

⑤Y. Yanase,
Angular Fulde-Ferrell-Larkin-
Ovchinnikov State in cold fermion gases in
a toroidal Trap,
Phys. Rev. B, 80, 220510(R),
2009 年、査読有り

⑥Y. Yanase,
The disordered Fulde-Ferrel-Larkin-
Ovchinnikov state in d-wave
superconductors,
New J. Phys. 78, 55056,
2009 年、査読有り

⑦Y. Yanase and N. Yorozu,
Superconductivity and Localization in
Doped Semiconductors,
J. Phys. Soc. Jpn. 78, 034715,
2009 年、査読有り

⑧柳瀬陽一、萬直行、
ドーブされた半導体の局在と超伝導、
固体物理、43 巻、637-649、
2008 年、査読なし

[学会発表] (計 4 8 件)

①Y. Yanase,
Rotating FFL0 superfluid in cold atom gas,
Kyoto University GCOE Symposium on "Link
of Hierarchy",
2012 年 2 月 13 日,
京都大学

②柳瀬陽一,
冷却原子気体および強相関電子系における
エキゾチック FFL0 超流動,
USS2012,
2012 年 1 月 12 日,
東京理科大学森戸記念館

③吉田智大, 柳瀬陽一,
冷却フェルミ原子気体における回転する
FFL0 超流動,
日本物理学会 2011 年秋季大会,
2011 年 9 月 22 日,
富山大学五福キャンパス

④T. Yoshida, Y. Yanase,
Rotating Fulde-Ferrell-Larkin
-Ovchinnikov superfluid state in
ultra-cold fermion gases,
ICNS2011,
2011年8月25日,
PKNU, Busan. Korea

⑤T. Yoshida and Y. Yanase,
Crossover from Fulde-Ferrell state to
Larkin-Ovchinnikov state in cold fermion
gases,
LT26,
2011年8月12日,

⑥柳瀬陽一
APCTP Conference on Localisation 2011,
"Effects of disorders on exotic
superconductors",
2011年8月6日,
APCTP, Pohang, Korea

⑦吉田智大、柳瀬陽一,
冷却フェルミ原子気体における FF 超流動から
L0 超流動へのクロスオーバー,
日本物理学会,
2011年3月25日,
新潟大学

⑧柳瀬陽一
International conference on Ultracold
Fermi Gas: Superfluidity and Strong
Correlation (USS2010),
"Angular Fulde-Ferrell-Larkin-
Ovchinnikov state in cold Fermi gases near
BCS-BEC crossover",
2010年5月13日,
日本原子力機構

⑨柳瀬陽一
スピン三重項超伝導におけるランダムスピ
ン軌道相互作用: Sr₂RuO₄ と CePt₃Si,
第3回物性科学領域横断研究会,
2009年11月30日,
東京大学

⑩柳瀬陽一
層状欠陥があるスピン三重項超伝導体の d
ベクトルとその安定性
日本物理学会 2009 年秋季大会
2009年9月25日
熊本大学

⑪柳瀬陽一
Localization and Superconductivity in
Doped Semiconductors,
9th International Conference on Materials

and Mechanisms of Superconductivity,
2009年9月8日,
京王プラザホテル

⑫柳瀬陽一
International Workshop on
Superconductivity in Diamond and Related
Materials (IWSDRM2008),
"Superconductivity and Localization in
Hole-doped Semiconductors",
2008年7月8日,
エポカル筑波

[その他]
ホームページ:
<http://bussei.gs.niigata-u.ac.jp/~yanase/study.html>

新聞報道:
2009年12月4日付け科学新聞において、
研究成果が紹介されました。

受賞:
①2011年3月に第5回日本物理学会若
手奨励賞(領域8)を受賞しました。

②2009年11月に出版した論文が、JPSJ
Papers of Editor's choice に選ばれました。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柳瀬 陽一 (Yanase Youichi)
新潟大学・自然科学系・准教授
研究者番号: 70332575

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

萬 直行 (Yorozu Naoyuki)
東京大学・大学院理学系研究科・博士課程
退学
(2011年3月)

吉田 智大 (Yoshida Tomohiro)
新潟大学・大学院自然科学研究科・博士前
期課程2年