

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400368

研究課題名(和文) 乱れと異方性が生み出す新奇フェルミ超流動対称性

研究課題名(英文) Novel Fermi superfluid symmetry induced by anisotropy and randomness

研究代表者

池田 隆介 (Ikeda, Ryusuke)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60221751

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：自由空間での液体ヘリウム3は等方的フェルミ粒子系で、そこでは等方的な超流動相と強相関効果で安定化された異方的カイラル超流動相のみが実現される。10年ほど前に、異方的な液体ヘリウム3の超流動相がエアロジェルという多孔質媒質中で実現可能であることが提案され、理論的に予言されたポーラー相が最近実験的に確認された。本課題では、異方的強相関効果の重要性に関する着想に基づき、実験的相図と過去の理論との不一致を解消できることが示された。

研究成果の概要(英文)： It is known that, in the bulk liquid of Helium-three which is an isotropic Fermion system, just two superfluid phases, an isotropic B phase and an anisotropic chiral phase stabilized by the strong correlation, are realized. One decade ago, we have proposed theoretically a possible realization of an anisotropic superfluid Helium-three in the porous medium called aerogel, and a realization of the proposed polar phase has been verified in recent experiments. In the present research project, it has been shown, based on our idea that the anisotropic strong correlation effect induced by the scattering events due to the aerogel structure plays crucial roles, that discrepancies between the experimental phase diagrams and the previous theoretical ones can be resolved.

研究分野：物性理論

キーワード：超流動 超伝導 異方性 多孔質媒質

1. 研究開始当初の背景

液体ヘリウム3の超流動相は1970年代初頭にその存在が発見され、そのバルク液体で実現する2つの超流動相の正体、薄膜サンプルで可能となる新たな相に関するアイデアの提案、といった主な理論的研究は1980年代初頭までにほぼ終わったと考えられていた。

しかし、超流動ヘリウム3への不純物効果という、金属固体で実現する超伝導に関する研究でのアイデアを基礎とした題材については、17年ほど前からエアロジェルという多孔質媒質中に液体ヘリウム3を閉じ込めた系で研究されるようになった。エアロジェルの局所的な壁からヘリウム原子(より正確に言えば、準粒子)が散乱されるが、エアロジェルの表面は複雑な襞(ひだ)構造をしているため、固体電子系での点状欠陥による散乱とは大きく異なり、散乱現象は異方的である。その結果、準粒子の寿命が異方的になり、超流動凝縮体(秩序パラメタ)にも異方性がもたらされる。そこで生まれる主要な興味の一つが、散乱の異方性が大局的である(長距離にわたる)場合に巨視的な秩序パラメタの異方性が生じ、3次元クーパー対状態自体が変更を受ける可能性についてである。2006年発表の論文で当研究代表者らは、エアロジェルを一軸的に圧縮、あるいは伸張させたりすることでA相領域が拡大すること、特に後者の系ではフェルミ球面の“赤道”が超流動エネルギーギャップの線状ノードとなる1次元的なPolar状態が実現できることを、準粒子散乱の散乱振幅の実現可能な異方性がエアロジェルを変形して与えられたと仮定して、具体的に示した。この計

算により3次元系でのPolar状態という新奇対状態の発現が厳密味を帯びたと考えられ、国内外の複数の実験グループで、一様変形したエアロジェル中ヘリウム3の相図研究がNMR(核磁気共鳴)や超音波吸収などを用いて盛んに行われ始めた。そして2013年度、ロシア・カピッツァ極低温研究所のDmitrievらのグループが構造が極めて長距離にわたり1次元的に揃ったエアロジェルサンプルを準備することに成功し、その中で液体ヘリウム3の超流動転移の圧力依存性をNMR実験により調べて、乱れの影響を有したABM状態や均一なPolar状態でのNMR振動数シフトの公式などと実験データとを比較検討した。その結果、高圧では昇温とともにB相から乱れたA相への1次転移という従来型の対状態変化がみられたが、低圧側では異方性により変形したB相が昇温とともに別の超流動相に連続転移により移行していることから、この高温超流動相はPolar状態以外にはありえないと結論した。これが正しい解釈であれば、バルク液体で実現するクーパー対状態以外の凝縮相が超流動ヘリウム3の3次元相として見出された初めての例となり、当代表者ら過去の研究での主張が実験的に証明されたことになろう。さらにほぼ同時期に、米国・ノースウェスタン大学のHalperinらのグループにより、空孔率が少ないため、散乱の影響がより強いエアロジェルを用いた実験が行われ、一軸伸張の系ではA相だけで超流動相は占められ、Polar相どころかB相さえ見出されない、という驚くべき結果が得られた。この系では、乱れの影響が大きく、A相もその秩序パラメタの顕著な空間的

不均一性を持ったまま実現しているため、見出された現象の説明には、異方性のみでなくエアロジェルの構造の乱れ（ランダムネス）が秩序パラメタに及ぼす効果をコンシステントに考慮した、未だ構築されていない理論が必要であるように思われる。

2. 研究の目的

上で述べた 2 つの実験グループにより見出された実験事実をコンシステントに説明する形に理論研究を進めるのが当面の目標になる。Polar 相の発現という点に絞れば、当代表者らの過去の研究では低温相である B 相の秩序パラメタの異方性を考慮しなかったために 2 相間の直接の(A 相を介さない)連続転移は得られなかった。今回、強い異方性の場合も適用できる理論に改良して、実験事実の理論的解釈の確立を目指したい。また、米国実験グループの実験では超流動と常流動両相間の低圧側での量子臨界点があり高圧側に見出されているため、その結果は確実に乱れの効果の強いエアロジェルでの実験である。当研究代表者は、この乱れの効果のために相対的に脆い Polar 状態が失われたと、当初は考えた。従って、後者の実験を説明するために乱れと異方性の効果がともに強い系を想定した理論に仕上げ後者の実験事実を説明することで、乱れと異方性の影響下にある超流動ヘリウム 3 の標準理論の構築を目指した。

3. 研究方法

エアロジェルという多孔質媒質がもたらす異方性を準粒子とエアロジェル構造との間の散乱時間にもたらし、過去の弱結合理論に含まれていなかった強

結合効果への異方性依存性を考慮した理論を構築した。等方的なバルク液体を記述するのに転移温度に寄与する強結合効果は、実現する対状態間の差異につながらないため、従来無視されてきたが、この転移温度に寄与する強結合効果が異方的な状況では出現する対状態間の差異を生む主要項になりうることを指摘し、過去の理論の拡張を行った。

4. 研究成果

強結合効果への異方性依存性により、ポラー相の温度域が圧力の増大とともに減少するという、弱結合理論では説明できなかった特徴を説明できた。また、上記の強結合効果が十分に大きい場合、米国の実験グループが主張したポラー相が出にくい状況が実現することを示した。

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 5 件)

池田隆介、Anisotropic Strong Coupling Effects on Superfluid ^3He in Aerogels – Conventional Spin Fluctuation Approach, Physical Review B 誌、査読有、91 巻、2015、174515 <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.91.174515>

畠山雄気、池田隆介、Coupled k-space structure of d-wave superconducting and magnetic orders induced by paramagnetic pair-breaking effect, Physical Review B 誌、査読有、93 巻、2016、104503 <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.93.104503>

弾雄一郎、池田隆介、Quasiclassical analysis of vortex lattice states in Rashba noncentrosymmetric superconductors, Physical Review B 誌、92 巻、2015、144504 <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.92.144504>

足立景亮、池田隆介、Possible field temperature phase diagrams of two-band superconductors with paramagnetic pair-breaking, Journal of the Physical Society of Japan 誌、査読有、84 巻、2015、064712 <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.84.064712>

畠山雄気、池田隆介、Antiferromagnetic order oriented by Fulde-Ferrell-Larkin - Ovchinnikov superconducting order, Physical Review B 誌、91 巻、2015、094504 <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.91.094504>

〔学会発表〕(計 1 件)

池田隆介、Antiferromagnetic order and spatial modulation in high field superconducting phases of CeCoIn5, 20th international conference on magnetism (2015 7 月、Barcelona, Spain, 講演、国際学会)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://cond.scphys.kyoto-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

池田 隆介 (IKEDA, Ryusuke)
京都大学 大学院理学研究科 准教授
研究者番号：60221751

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし