

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26287084

研究課題名(和文) 超流動ヘリウム3における微弱相互作用の巨視的増幅

研究課題名(英文) Macroscopic amplification of an ultra-small interaction in superfluid 3He

研究代表者

池上 弘樹 (Ikegami, Hiroki)

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・専任研究員

研究者番号：70313161

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：超流動3HeのA相では、クーパー対が3Heという中性原子で構成されているにも関わらず、磁場と軌道角運動量の間で微弱な相互作用が生じ、マクロな性質に影響を及ぼす可能性がある。この現象の検証を行うため、超低温高磁場冷凍機と実験セルの整備を行った。これと同時に、3He-4He混合液表面に出来る3He薄膜の研究を行った。この3He薄膜では、上下の面はきれいな表面であるため、明確な検証実験が可能と考えられる。この3He薄膜の性質の解明のため、3He-4He混合液上の電子の移動度測定を行った。移動度の詳細な解析により、3He準粒子は表面で3He薄膜との間で異常な散乱をしている事が明らかになった。

研究成果の概要(英文)：In the A phase of the superfluid 3He, the Cooper pairs can have a very tiny interaction between their orbital angular momentum and an external magnetic field even though 3He-A consists of charge-neutral Cooper pairs. In order to examine this unusual interaction experimentally, we developed a ultra-low temperature cryostat with a high magnetic field and constructed an experimental setup. We also conducted experimental studies of a 3He film formed on the surface of a 3He-4He mixture liquid. The 3He film should offer an ideal platform for examining the above-mentioned effect because it has smooth surfaces at both surfaces. To investigate properties of the 3He film, we measured mobility of electrons trapped on the surface of the mixture liquid. We found that the mobility is dominated by reflection of ballistic 3He quasiparticles at the surface. Detailed analysis elucidated that 3He quasiparticles experience unusual reflection at the surface.

研究分野：低温物理

キーワード：超流動ヘリウム3 時間反転対称性の破れ カイラリティ 巨視的量子現象 超低温 量子凝縮

1. 研究開始当初の背景

超流動や超伝導に代表される巨視的量子現象では、ミクロな量子効果がマクロなレベルへと増幅される。例えば、渦の量子化やジョセフソン効果は、ミクロな粒子の波動関数がマクロな大きさに増幅された結果として理解される。このような巨視的増幅は、マクロな数の粒子が同一量子状態に凝縮することにより実現される。そのため、通常は熱ゆらぎに埋もれてしまうような微小な相互作用でも、マクロな数の粒子の凝縮により増幅され巨視的な現象として観測されうる。

そのような例として、Leggett は、超流動ヘリウム3のA相において、ヘリウム3原子の内部の電子密度の偏りからクーパー対が磁気モーメントを持つことにより磁場と軌道角運動量との間に微弱な相互作用が生じ、それがマクロな性質に影響を及ぼすと提唱している。超流動ヘリウム3 (転移温度: 0.9mK) は巨視的量子現象の代表であり、クーパー対が軌道角運動量(L=1)を持つ p 波対状態である。特に、A相と呼ばれる超流動相では、全てのクーパー対が同一の軌道角運動量状態(Lz=1)をとる。中性原子のクーパー対であるため、ナイーブな考えでは、クーパー対は磁気モーメントを持たない。しかしながら、もし回転運動によりヘリウム3原子の内部の電子密度の偏りができると、クーパー対が磁気モーメントを持つため、磁場と軌道角運動量との間に微弱な相互作用が生じうる。Leggett の見積りによると、相互作用の大きさは 1 T の磁場中でクーパー対 1 個当たり $\sim 10^{-12}$ K 程度のエネルギーと非常に小さい。しかしながら、超流動状態では、マクロな数のクーパー対の凝縮により、この微小な効果が巨視的なスケールに増幅されて、それがマクロな性質に影響を及ぼす可能性がある。

2. 研究の目的

上記のクーパー対の軌道角運動量と磁場との間に予想される微弱相互作用の存在を実験的に検証する事が、本研究の目的である。

3. 研究の方法

上記の目標を達成するために、(1)バルク超流動ヘリウム3のA相で、10 T 程度の高磁場中で、磁場の大きさと向きを変えて軌道角運動量の向き(l vector)の測定を行い、磁場と軌道角運動量との相互作用の有無を検証する。そのために、液体 ^3He 中に打ち込んだ電子(電子バブル)に働く固有マグナス力を観測する。固有マグナス力とは、図1に示したように、A相中を運動する電子バブルに l vector と速度に垂直な方向に働く力で、研究代表者が発見した効果である。この固有マグナス力の観測が、軌道角運動量の向きを決める事が出来る唯一の方法である。磁場の向きと強さを変えて電子の運動を観測し固有マグナス力の向きを観測する事により、軌道角運動量の向きを決定する。それにより、軌道

角運動量と磁場との間の極微相互作用の有無を明らかにする。この測定は、超低温高磁場冷凍機の整備と実験セルの作製から開始する。

それと同時に、(2) ^3He - ^4He 混合液表面上に形成される ^3He 薄膜の研究を行う。この系では、 ^4He - ^3He 混合液中の ^3He の濃度を飽和濃度(6.7%)以上にすると、 ^4He - ^3He 混合液の表面上に ^3He 薄膜を作る事ができる。形成される ^3He 薄膜は、上下の面が共にきれいな表面であるため、l vector のドメイン壁などのトポロジカル欠陥が生成しにくく、またトポロジカル欠陥のピン止めもない。そのため、軌道角運動量と磁場との微小相互作用の検証実験を明確に行うことが出来る理想的な実験系と考えられる。 ^3He - ^4He 混合液表面上の ^3He 薄膜での微弱相互作用の検証するための第一歩として、まずは、 ^3He - ^4He 混合液の表面の ^3He 薄膜の性質の解明が必要である。その解明の第一歩として、数原子層の ^3He 薄膜が形成されている状況下でのヘリウム表面上の電子の移動度測定を行う。

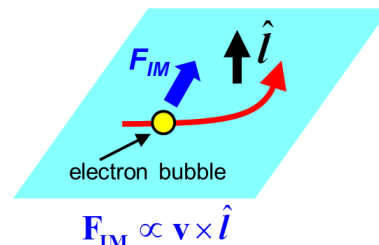


図1 固有マグナス力。超流動ヘリウム3 A 相中を運動する電子バブルは、l vector と速度に垂直な方向に固有マグナス力を受ける。

4. 研究成果

(1)の実験を行うために、まず、超低温高磁場冷凍機の整備を行った。この研究を行うためには、最低温 200 μK 程度、磁場 14 T 程度の性能が必要である。まず、冷凍機を整備し性能評価のための冷却テストを行ったところ、冷凍機に低温リークがあり冷却ができないことが判明した。超低温高磁場冷凍機は大型であり、またリークが 4K 以下の低温冷却時のみ出現するため、リーク部分の特定に非常に時間がかかり、多くの労力を費やした。最終的には、4K プレート付近の断熱真空管の低温リークであることを特定した。その修理を行い、本研究に必要な最低温 200 μK 、最高磁場 14 T の性能を実現した。

それと並行して、本研究を行うための実験セルを作製した。作製した実験セルは、イオンを生成するためのカーボンナノチューブ、電子をトラップするための電極、電子の輸送現象を測定するための電極、高磁場中でも液体 ^3He を 200 μK 程度まで冷却するための熱交換器により構成されている。特に、高磁場中では、ヘリウム3冷却用熱交換器の性能の低

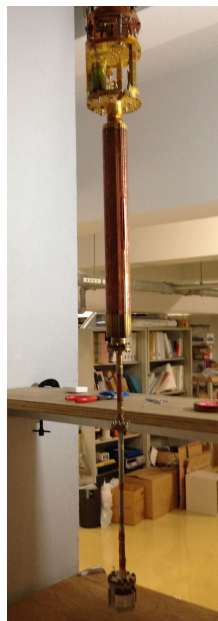


図2 超低温高磁場冷凍機と実験セル。

下、および、振動から生じる発熱の問題がある。この解決策として、通常の交換器に比べ熱交換面積が1桁以上大きい Pt 微粒子熱交換器を製作して冷却効率を高めることを行った。

上記の様に、超流動 ^3He A 相においてクーパー対の軌道角運動量と磁場との間に予想される微弱相互作用の存の実験的検証を行う準備が整った。今後、検証実験に入る予定である。

(2)の ^3He - ^4He 混合液表面上に形成される ^3He 薄膜の研究として、先ず、 ^3He - ^4He 混合液の表面にトラップされた電子の移動度測定を行った。 ^3He - ^4He 混合液の表面には、数原子層の ^3He 薄膜が形成されている。その膜厚は、 ^3He - ^4He 混合液中の ^3He の濃度を変えることにより変化させる事が出来る。 ^3He 薄膜と ^3He - ^4He 混合液中の ^3He 準粒子がどのように相互作用するかは明らかではない。その相互作用を解明するために、表面上の電子の移動度測定を行った。そのために、10 mK の極低温まで電子の移動度を測定すること

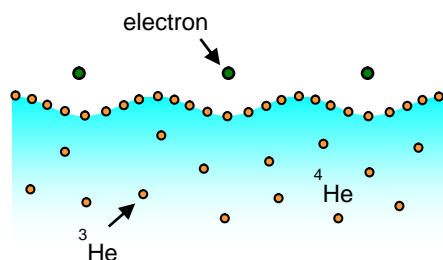


図3 ^3He - ^4He 混合液と表面電子。
 ^3He - ^4He 混合液の表面には、数原子層の ^3He 薄膜が形成される。表面電子は、低温ではウィグナー結晶になっている。

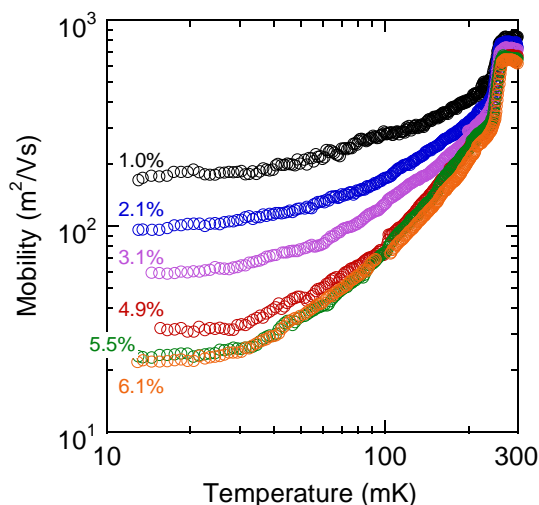


図4 ^3He - ^4He 混合液上のウィグナー化粒の移動度。観測された移動度は温度の低下とともに減少する。また ^3He 濃度の増加に従い低下する。電子密度は $\sim 1.4 \times 10^{12} \text{ m}^{-2}$ 。

のできる実験セルを開発した。

実験を行った電子密度 $\sim 1.4 \times 10^{12} \text{ m}^{-2}$ であり、約 260 mK 以下の極低温で電子はウィグナー結晶と呼ばれる固体を形成する(図3)。ウィグナー結晶が形成されると液体表面に dimple lattice と呼ばれる小さなくぼみが形成される。ウィグナー結晶は dimple lattice を引きずって運動するため、電子の移動度には、 ^3He - ^4He 混合液の性質が反映される。これにより、 ^3He - ^4He 混合液中の ^3He 準粒子が ^3He 薄膜とどのように相互作用するかの情報を得ることが出来る。

実験で得られた混合液中表面上のウィグナー結晶の移動度を図4に示す。移動度は温度の低下とともに減少する。またの混合液中の ^3He の濃度を増やすにつれて、移動度は低下する。理論解析により、ウィグナー結晶の移動度は、約 100 mK 以上の温度領域では ^4He - ^4He 混合液の粘性で決まっている事が明らかになった。

一方、100 mK 以下の低温領域では、混合液中の ^3He 準粒子の散乱で決まっていることが理論計算との比較により明らかになった。詳細な解析により、 ^3He 準粒子は、表面で鏡面散乱されるよりも少ない運動量の受け渡して散乱されることが判明した。この ^3He 準粒子の表面での異常な散乱により、電子は鏡面散乱よりも高い移動度を示す。この異常な散乱は、 ^3He 準粒子が ^3He - ^4He 混合液の表面にできる ^3He 薄膜との相互作用により生じる。また、詳細な解析により、異常な散乱の起こる割合、 ^3He - ^4He 混合液中の ^3He の濃度の関数として求めた。その結果、 ^3He - ^4He 混合液中の ^3He のフェルミ準位と ^3He 薄膜のフェルミ準位の差が小さくなるにつれて、異常な散乱の起こる割合が増える事が分かった。以上の結果を、Physical Review Letters 誌に論文

としてまとめた。

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)

池上弘樹、河野公俊、堤康雅、「超流動 ^3He における輸送現象と相対論的準粒子」「固体物理」(アグネ技術センター) vol.52, 12月号 11-21 (2017). 査読無し

Hiroki Ikegami, Kitak Kim, Hyoungsoon Choi, Daisuke Sato, Kimitoshi Kono, and Yuriy P. Monarkha, “Anomalous Quasiparticle Reflection from the Surface of ^3He - ^4He Dilute Solution” *Physical Review Letters* vol.119, 195302 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.195302、査読有

Masamichi Saitoh, Hiroki Ikegami, and Kimitoshi Kono, “Onset of Superfluidity in ^3He Films”, *Physical Review Letters* vol.117, 205302-1-5 (2016). DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.205302、査読有

池上弘樹、堤康雅、河野公俊、「超流動 ^3He -Aにおける時間反転対称性の破れと固有マグナスカ」、*日本物理学会誌* 第71巻 第10号 679-687 (2016). 査読無し

Hiroki Ikegami, Yasumasa Tsutsumi, and Kimitoshi Kono, “Observation of Intrinsic Magnus Force and Direct Detection of Chirality in Superfluid ^3He -A”, *Journal Physical Society of Japan*, vol.84, 044602-1-16 (2015). DOI: 10.7566/JPSJ.84.044602、査読有

[学会発表](計25件)

Hiroki Ikegami, “Topological phenomena of superfluid ^3He studied by ions trapped at the surface”, *The International Workshop on Electrons and Ions in Quantum Fluids and Solids*, 2018年3月14日, 三島, 招待講演

Kitak Kim, Hiroki Ikegami, Daisuke Sato, Kimitoshi Kono, and Yuriy P. Monarkha, Hyoungsoon Choi, “Anomalous Quasiparticle Reflection from the Surface of a ^3He - ^4He Dilute Solution”, 10th BK21+ Young Physicists Workshop, 2018年2月9-10日, ソウル(韓国)

Kitak Kim, Hiroki Ikegami, Daisuke Sato, Kimitoshi Kono, and Yuriy P. Monarkha, Hyoungsoon Choi, “Anomalous Quasiparticle Reflection from the Surface of a ^3He - ^4He Dilute Solution”, SRC Winter Workshop on Quantum Coherence, 2018年2月1-2日, デジョン(韓国)

Hiroki Ikegami, “Topological Phenomena and Relativistic Fermions in Superfluid ^3He ”, *International Symposium on Dynamics*

in Artificial Quantum Systems (DAQS2018), 2018年1月15日, 東京, 招待講演

Hiroki Ikegami, Kitak Kim, Hyoungsoon Choi, Daisuke Sato, Kimitoshi Kono, and Yuriy P. Monarkha, “Anomalous Enhancement of Mobility of a Wigner Crystal on a Free Surface of Dilute ^3He - ^4He Mixtures”, 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28), 2017年8月11日, ヨーテボリ(スウェーデン)

Hiroki Ikegami, “Topological aspects of superfluid ^3He investigated by ions trapped at the surface”, March Meeting 2017 of the American Physical Society (APS), 2017年3月13-17日, ニューオーリンズ(アメリカ), 招待講演

佐藤大輔、池上弘樹、河野公俊、“液体 ^4He 上ウィグナー結晶のスライディングとプラズモンリップロン結合モード”、*日本物理学会2016年秋季大会*、2016年9月、金沢

Hiroki Ikegami, Daisuke Sato, Kitak Kim, Hyoungsoon Choi, and Kimitoshi Kono “Mobility of Electrons on ^3He - ^4He Mixture”, *International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2016)*, 2016年8月10-16日, プラハ(チェコ) 発表: Aug. 12, 2016

Daisuke Sato, Hiroki Ikegami, Okuda Yuichi, and Kimitoshi Kono, “Coupling of the Wigner Crystal with Liquid Helium 4 under Sliding Condition”, *International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2016)*, 2016年8月10-16日

Hiroki Ikegami, “Unusual Aspects of Superfluid ^3He Elucidated by Electrons at Surface”, *SCCP Seminar*, 2016年8月8日, 上海(中国), 招待講演

池上弘樹、“表面電荷で探る超流動 ^3He の対称性の破れとトポロジ”、*名古屋大学大学院 IGER セミナー*、2016年4月27日、名古屋

池上弘樹、佐藤大輔、Kitak Kim、Hyoungsoon Choi、河野公俊、“ ^3He - ^4He 混合液自由表面上の電子の移動度 II”、*日本物理学会第71回年次大会*、2016年3月21日、仙台

Hiroki Ikegami, Yasumasa Tsutsumi, and Kimitoshi Kono, “Topological Aspects of Superfluid ^3He Detected by Electrons at Surface”, *International Symposium on Dynamics in Artificial Quantum Systems (DAQS2016)*, 2016年1月12-14日, 東京

池上弘樹、“超流動 ^3He -Aのカイラリティと固有マグナスカ”、*日本物理学会2015年秋季大会*、2015年9月16-19日、大阪、招待講演

佐藤大輔、池上弘樹、河野公俊、“液体 ^3He 表面に形成されたウィグナー結晶のプラズモン-リップロン結合モードの測定”、*日本物理学会2015年秋季大会*、2015年9月16-19日、大阪

Hiroki Ikegami, “Time-Reversal

Symmetry Breaking and Intrinsic Magnus Force in Superfluid $^3\text{He-A}$ ”, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2015), 2015年8月9-15日、ナイアガラフォールズ(アメリカ),招待講演

Hiroki Ikegami, Daisuke Sato, Kitak Kim, Hyoungsoon Choi, and Kimitoshi Kono “ Mobility of Electrons on $^3\text{He-}^4\text{He}$ Mixture”, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2015), 2015年8月9-15日、ナイアガラフォールズ(アメリカ)

Daisuke Sato, Hiroki Ikegami, and Kimitoshi Kono, “ Coupling of the Wigner Solid with Liquid ^3He Surface”, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2015), 2015年8月9-15日、ナイアガラフォールズ(アメリカ)

Hiroki Ikegami, “ Direct Detection of Chirality in Superfluid $^3\text{He-A}$ ”, Energy, Materials and Nanotechnology meeting (EMT Meeting), 2015年6月4-17日、チンタオ (中国),招待講演

Hiroki Ikegami, “ Time-Reversal Symmetry Breaking and Intrinsic Magnus Force in Superfluid $^3\text{He-A}$ ”, IGER International Symposium 2015: Spins in Action, 2015年3月26日、名古屋、招待講演

①池上弘樹、佐藤大輔、Kitak Kim, Hyoungsoon Choi、河野公俊、“ $^3\text{He-}^4\text{He}$ 混合液自由表面上の電子の移動度”、日本物理学会第70回年次大会、2015年3月24日、東京

②Hiroki Ikegami, “ Direct Detection of Chirality in Superfluid $^3\text{He-A}$ ”, International Conference on Topological Quantum Phenomena (TQP2014), 2014年12月17日、京都、招待講演

③Hiroki Ikegami, Yasumasa Tsutsumi, and Kimitoshi Kono, “ Observation of Chiral Domain Walls at the Free Surface of Superfluid $^3\text{He-A}$ ”, 27th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), 2014年8月7日、ブエノスアイレス (アルゼンチン)

④Hiroki Ikegami, Yasumasa Tsutsumi, and Kimitoshi Kono, “ Direct Detection Chirality in Superfluid $^3\text{He-A}$ ”, The international workshop "Higgs Modes in Condensed Matter and Quantum Gases, 2014年6月24日、京都

⑤池上弘樹、堤康雅、河野公俊、“超流動 $^3\text{He-A}$ におけるカイラリティの直接観測”、物性研短期研究会「スーパーマターが拓く新量子現象」、2014年4月18日、東大物性研

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

池上 弘樹 (IKEGAMI, Hiroki)

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・専任研究員
研究者番号：70313161

(2) 研究分担者

石黒 亮輔 (ISHIGURO Ryouusuke)

日本女子大学・理学部・准教授
研究者番号：40433312

(3) 連携研究者

佐藤 大輔 (SATO, Daisuke)

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・協力研究員
研究者番号：00709363