

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 27 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23684030

研究課題名(和文) 超流動ヘリウム3自由表面で期待されるマヨラナ表面状態の観測

研究課題名(英文) Detection of Majorana surface bound states at the free surface of the superfluid 3He

研究代表者

池上 弘樹 (Ikegami, Hiroki)

独立行政法人理化学研究所・河野低温物理研究室・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) 19,000,000円、(間接経費) 5,700,000円

研究成果の概要(和文)：超流動ヘリウム3-Bの表面に形成される表面束縛状態を観測するため、自由表面直下にトラップされた正イオンの非線形伝導特性の測定を行った。非線形伝導特性は深さ依存性を全く示さない事を明らかにした。また、表面直下の正イオン、負イオンの移動度が、0.2 mKまで深さ依存性を示さないことを明らかにした。これは、表面束縛状態のイオンによる散乱断面積が小さい事を意味し、表面束縛状態のマヨラナ粒子性の関与を示唆している。さらに、超流動ヘリウム3-Aでイオンに働く固有マグナス力を観測を発見し、カイラリティを初めて直接観測した。

研究成果の概要(英文)：I investigated nonlinear transport properties of the positive ions trapped below the free surface of the superfluid 3He-B in order to observe surface bound states. I found that the nonlinear transport properties do not show any depth dependence. I furthermore revealed that mobilities of the positive and negative ions trapped below the free surface do not have any depth dependence. The lack of the depth dependence in the mobilities suggests that the scattering cross sections of the ions are significantly small, which is possibly understood by the Majorana nature of the surface bound states. In addition to these investigations, I discovered the intrinsic Magnus force and detected chirality directly for the first time in the superfluid 3He-A.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性

キーワード：超流動ヘリウム3 表面束縛状態 トポロジカル超流動 マヨラナ粒子 イオン 固有マグナス力 カイラリティ

1. 研究開始当初の背景

トポロジカルに非自明な超流動体、超伝導体、絶縁体が、最近、急激に注目を集めている。これら微視的性質が全く異なる系を波動関数のトポロジーのという大局的な観点から統一に理解する事により普遍性を見出し、量子凝縮相に対する我々の理解に深化をもたらしている。これらの系の表面には共通してトポロジカルに保護されたギャップレスな表面束縛状態が現れる。トポロジカル超流動体の代表としてp波超流動状態である超流動ヘリウム3がある。その超流動相の1つの超流動ヘリウム3 - Bの表面には、表面束縛状態が形成される。形成された表面束縛状態は粒子と反粒子が等価なマヨラナ粒子的性質を持つという驚くべき事が理論的に予想されている。マヨラナ粒子は素粒子の分野で提唱されたものであり、ニュートリノがその候補として考えられているが、実験的検証は未だなされていない。一方、量子凝縮相においてこのような特異な粒子が創発的に形成されることは非常に興味深く、その観測は物性物理と素粒子物理の両方に対して重要な意味を持つ。

本研究の研究対象である超流動ヘリウム3は、不純物を全く含まない超高純度の物質であるため実験の細部に至るまで理論との一致が良く、またその秩序状態も完全に理解されている。それゆえトポロジカル超流動体を研究する上で理想的な対象である。さらに、本研究の対称である自由表面は原子レベルで平坦な理想的な表面であり、その自由表面下にはマヨラナ粒子的な表面束縛状態が存在することが理論的に予想されている。通常境界である液体ヘリウム3と容器内壁との境界では、乱れが存在するために表面状態は形成されるもののマヨラナ粒子的ではない。超流動ヘリウム3自由表面はマヨラナ粒子的の表面束縛状態の研究を行う最高の舞台である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、超流動ヘリウム3 - B相の表面に形成される表面束縛状態の存在を確認し、異方的磁場応答によりそのマヨラナ粒子性を検証することである。

3. 研究の方法

上記目的を達成するために、以下の2つの手法を用いる。

(1) 超流動ヘリウム3 - B自由表面下にトラップされたイオンを用いたクーパー対破壊による表面束縛状態の励起

まず、正イオンあるいは負イオンを超流動ヘリウム3自由表面下にトラップする。トラップされるイオンの深さは、表面から深さ10~60 nmで調節可能である。一方で、表面束縛状態は、表面からコヒーレンス長程度(~75 nm)の深さに形成される。そのため、イオンは表面束縛状態が形成される深さに位置し

ており、イオンを高速で移動させた際、イオンによりクーパー対が破壊され表面束縛状態が励起することが予想される。このようなプロセスは、イオンの臨界速度に現れると予想される。臨界速度を測定することにより表面束縛状態の存在を検証する。

(2) 超流動ヘリウム3薄膜の帯磁率の異方性の測定

超流動ヘリウム3が薄膜の場合、表面束縛状態が薄膜全体の帯磁率に影響を及ぼす。薄膜の帯磁率を測定するため、微細加工技術を駆使してヘリウム3薄膜を扱う微細電極と微小NMR電極を組み合わせたデバイスを作製する。表面束縛状態がマヨラナ粒子的である場合、帯磁率の増大と異方性が現れることが理論的に予想されている。磁場の向きを変えて帯磁率を測定し異方性を観測することにより、表面束縛状態がマヨラナ粒子的であることを検証する。

4. 研究成果

(1) 超流動ヘリウム3 - B相自由表面下にトラップされたイオンを用いたクーパー対破壊による表面束縛状態の励起

クーパー対破壊により表面束縛状態を励起させ、表面束縛状態の存在を確認する。イオンの速度を大きくしていきクーパー対破壊が起こると、イオンの移動度が急激に低下する。その臨界速度は、バルクヘリウム3中では、バルク準粒子励起により決まり Δ/p_F である(Δ : 超流動ギャップ、 p_F : フェルミ運動量)。一方表面では、クーパー対が破壊されることにより表面束縛状態が励起されることが予想される。表面束縛状態はギャップレスであるため、臨界速度はバルク中のものより小さくなると予想される。

このようなイオンの臨界速度を0.2 mKという超低温領域まで測定可能な測定系を構築した。トラップされるイオンの深さは、垂直にかける電場の大きさにより10~60 nmの間で可変である。この深さは、表面束縛状態が形成される深さ(コヒーレンス長程度~75 nm)に対応する(図1)。この深さでは、表

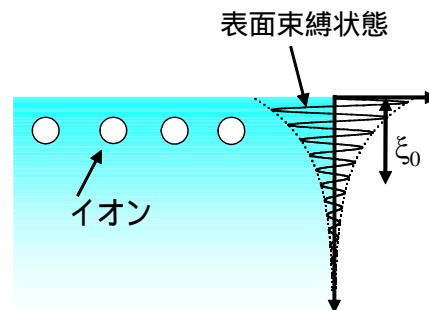


図1 自由表面下にトラップされたイオン。トラップされたイオンの深さは、10~60 nmで調節可能である。表面束縛状態は、表面からコヒーレンス長程度(ξ_0 ~75 nm)の深さに形成される。

面束縛状態の振幅が大きく変化する。表面に近い所では表面束縛状態の振幅が大きいため、より大きな非線形伝導特性が観測されると予想される。

実験は正イオンで行った。正イオンは、負イオンより有効質量が1桁小さく、そのため臨界速度まで加速が容易であるためである。測定を行ったところ、イオンの非線形伝導特性は深さ依存性を全く示さないという興味深い事が明らかになった。深さ依存を示さない物理的な理由は未だ明らかになっていない。また測定により、イオンの伝導特性における非線形性が、 Δ/p_F の半分程度の速度から現れることが明らかとなった。これは、超低温領域ではヘリウム3準粒子のイオンによる散乱が非弾性的であるため、この非弾性散乱の効果により非線形性が小さい速度から現れるためであると解釈できる。この実験結果は Journal of Low Temperature Physics 誌に論文として出版した。

また、構築した測定システムではイオンの移動度を0.2 mKの超低温領域まで測定が可能である。表面束縛状態がイオンの移動度に及ぼす影響を調べるために、移動度の測定も深さを変えて行った。移動度は、正イオンと負イオンの両方に対して行った。正イオンと負イオンは大きさおよび有効質量が1桁異なるため、イオンのヘリウム3準粒子による散乱メカニズムも異なる。そのゆえ、表面束縛状態の影響が異なる可能性がある。実験の結果、正イオンと負イオンの両方とも、移動度は深さ依存性を示さないことが明らかとなった。

正イオン、負イオンで共に深さ依存を示さない理由として、二つの可能性が考えられる。一つは、0.2 mKという超低温においてもバルク準粒子との散乱の寄与が支配的な事、もう一つは、表面束縛状態のマヨラナ粒子的性質により、散乱断面積が小さくなっていることである。一つ目の可能性を検証するため、表面束縛状態を通常のフェルミ粒子と仮定して、表面束縛状態による散乱の寄与を見積もった。その結果、最低温付近では、表面束縛状態が観測されるのに十分な大きさまでバルク準粒子の寄与が小さくなっている事がわかった。すなわち、表面束縛状態のイオンによる散乱断面積が小さくないと実験結果が説明されない。これは、散乱断面積が小さい事は、表面束縛状態のマヨラナ粒子性が関与していると考えられる。この実験結果は、Journal of the Physical Society of Japan 誌に論文として出版した。

(2) 超流動ヘリウム3 - Aにおけるカイラリティの観測

上記(1)の研究をしている際に、(1)の実験手法を応用する事により超流動ヘリウム3 - Aにおいてカイラリティを直接観測する研究が可能である事に気が付いた。超流動ヘリウム3 - Aは時間反転対称性を破ったカイ

ラルp波超流動状態であり、全てのクーパー対は軌道角運動量が同一方向にそろった形で凝縮している。その軌道角運動量の向きは、 l vector と呼ばれる。超流動ヘリウム3 - A相中をイオンが運動するすると、イオンは l vector と速度に垂直な方向に固有マグナス力を受ける(図2)という事が理論的に予想されている。

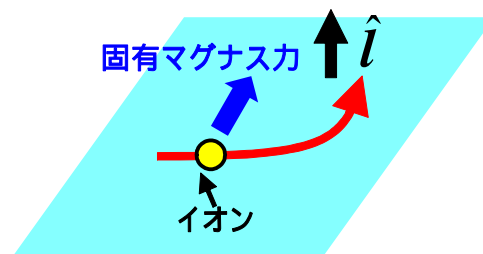


図2 固有マグナス力。超流動ヘリウム3 - A相中を運動するイオンは、 l vector と速度に垂直な方向に固有マグナス力を受ける。

この固有マグナス力を観測するために、イオンを自由表面下にトラップし、表面に沿った方向に運動させて横方向に流れる電流を測定した。自由表面では l vector が表面に垂直に向くため、固有マグナス力を測定するのに適した状況を自然に作り出すことが出来る。

実験の結果、横方向に流れる電流を観測し、イオンに固有マグナス力が働くことを発見した。さらに、固有マグナス力が進行方向に対して左方向に働く場合と右方向に働く場合があることを見出した。これは l vector が上を向いているか下を向いているかを反映しており、カイラリティを直接観測していることに対応する。この実験結果は、超流動ヘリウム3 - Aでのカイラリティを初めて直接観測したものである。また固有マグナス力の大きさは理論から予想されるものと同程度であることを見出した。この研究は science 誌に論文として出版した。

(3) 超流動ヘリウム3 薄膜の帯磁率の異方性の測定

超流動ヘリウム3 Bの表面に形成される表面束縛状態による帯磁率の増大と異方性を観測するために、超流動ヘリウム薄膜を簡単に実現できるマイクロチャネル電極を作製し、超流動ヘリウム4で予備実験を行った。マイクロチャネル電極でヘリウム表面上にトラップされた電子の移動度の測定を行い、予想通り超流動薄膜が実現している事を確認した。それにより、この技術が超流動ヘリウム3表面束縛状態の研究に使用可能である事が分かった。

5. 主な発表論文等
〔雑誌論文〕(計4件)

池上弘樹、河野公俊、Nonlinear Transport of Positive Ions Below a Free Surface of Topological Superfluid $^3\text{He-B}$, Journal of Low Temperature Physics **175**, 718-724 (2014). 査読有
DOI: 10.1007/s10909-014-1155-z

池上弘樹、Suk Bum Chung, and 河野公俊、Mobility of Ions Trapped Below a Free Surface of Superfluid ^3He , Journal of the Physical Society of Japan **82**, 124607-1-12 (2013). 査読有
DOI: 10.7566/JPSJ.82.124607

池上弘樹、堤康雅、河野公俊、Chiral symmetry breaking in superfluid $^3\text{He-A}$, Science **341**, 59-62 (2013). 査読有
DOI: 10.1126/science.1236509

池上弘樹、松本喬博、河野公俊、Unexpected Density Dependence of Mobility of Electron Bubbles Trapped below the Free Surface of Normal ^3He , Journal of Low Temperature Physics **171**, 159-164 (2013). 査読有
DOI: 10.1007/s10909-012-0711-7

〔学会発表〕(計 3 件)

池上弘樹、Direct Detection of chirality in Superfluid $^3\text{He-A}$, International Workshop for Young Researchers on Topological Quantum Phenomena in Condensed Matter with Broken Symmetries, 2013 年 10 月 24 日、宜野湾、招待講演

池上弘樹、Direct Detection of chirality in Superfluid $^3\text{He-A}$, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2013), 2013 年 8 月 1 日、松江、招待講演

池上弘樹、河野公俊、超流動ヘリウム 3 自由表面下のイオンの輸送現象、日本物理学会第 68 回年次大会、2013 年 3 月 27 日、東広島

池上弘樹、超流動ヘリウム 3 - A 相における軌道角運動量由来の新量子現象、日本物理学会 2012 年秋季大会シンポジウム「量子流体で拓かれる新しい物理」、2012 年 9 月 19 日、横浜、招待講演

池上弘樹、Probing chirality of superfluid $^3\text{He-A}$, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2013), 2012 年 8 月 20 日、ランカスター(イギリス)、招待講演

池上弘樹、河野公俊、Probing chirality of superfluid $^3\text{He-A}$, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2013), 2012 年 8 月 20 日、ランカスター(イギリス)

池上弘樹、松本喬博、河野公俊、Unexpected Density Dependence of Mobility of Electron Bubbles Trapped below the Free Surface of Normal ^3He , International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2013), 2012

年 8 月 20 日、ランカスター(イギリス)

池上弘樹、Ultra-low Temperature Mobility of Electron Bubbles Formed below the Free Surface of Superfluid ^3He , TQP2012 International Conference on Topological Quantum Phenomena, 2012 年 5 月 24 日、名古屋

池上弘樹、Probing the direction of the angular momentum of Cooper pairs in superfluid $^3\text{He-A}$, TQP2012 International Conference on Topological Quantum Phenomena, 2012 年 5 月 17 日、名古屋

池上弘樹、Direct observation of broken time-reversal symmetry in $^3\text{He A-phase}$, International Workshop on Nonequilibrium Phenomena in Complex Quantum Systems: from Correlated Electrons to Mesoscopic Devices, 2012 年 4 月 24 日、恩納村

池上弘樹、河野公俊、超流動ヘリウム 3 B 相の自由表面下にトラップされたイオンの移動度 II、日本物理学会第 67 回年次大会、2012 年 3 月 27 日、西宮市

池上弘樹、自由表面下にトラップされた電子バブルの移動度、東京大学物性研究所短期研究会、2012 年 1 月 7 日、柏

池上弘樹、松本喬博、河野公俊、Ultra-low Temperature Mobility of Electron Bubbles Formed below the Free Surface of Superfluid $^3\text{He-B}$, International Workshop for Young Researchers on Topological Quantum Phenomena in Condensed Matter with Broken Symmetries, 2011 年 11 月 2 日、守山

〔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

<http://lt.riken.go.jp/index.shtml>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

池上弘樹 (IKEGAMI Hiroki)

独立行政法人理化学研究所・河野低温物理研究室・専任研究員
研究者番号: 70313161

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし