

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 5月31日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2011

課題番号：21244060

研究課題名（和文） 超流動ヘリウム3境界効果の研究

研究課題名（英文） Study of Boundary Effect in Superfluid Helium-3

研究代表者

河野 公俊 (KONO KIMITOSHI)

独立行政法人理化学研究所・河野低温物理研究室・主任研究員

研究者番号：30153480

研究成果の概要（和文）：

超流動ヘリウム3において、表面や境界に出現する特異な現象を解明することを目的として、ヘリウム液面上の電子や液面下のイオンをプローブとした研究を行った。その結果、意外性のある結果を、超流動³He-A相において発見した。すなわち、表面に沿った駆動電場に対して電場と法線のどちらとも直交する方向にイオンの軌道が曲げられるという効果である。これは超流動相における軸性の異方性を顕著に反映した効果として非常に興味深い。

研究成果の概要（英文）：

We carried out experiment to elucidate anomalous phenomena in superfluid ³He occurring at free surfaces and boundaries. In particular, we employ, electrons on the surface or ions below the surface as a probe. Among our research findings, quite an unexpected effect was observed. That is, in superfluid ³He-A phase, ions driven parallel to the surface by an electric field experienced force which is in the direction perpendicular to both the driving electric field and surface normal. This is a direct evidence for a chiral property of superfluid ³He-A.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	10,900,000	3,270,000	14,170,000
2010年度	12,300,000	3,690,000	15,990,000
2011年度	12,300,000	3,690,000	15,990,000
年度			
年度			
総計	35,500,000	10,650,000	46,150,000

研究分野：低温物理学（実験）

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：

超流動ヘリウム3、電子バブル、イオンプール、表面束縛状態、マヨラナ状態、易動度テンソル、カイラリティ

1. 研究開始当初の背景

P波超流動の典型である超流動³Heは、表面や境界面において特異な状態を持つこと

が知られていた。アンドレーエフ束縛状態という表面状態である。この状態は超流動エネルギーギャップ内に生成されるので、低温に

においても励起されることが期待され、表面下に蓄えたイオンなどに対して余剰な散乱効果をもたらすことが期待された。この余剰な散乱効果はイオンの移動度の測定により検出されるはずであるので、そのような実験計画のもとに研究をスタートさせた。

2. 研究の目的

本研究は、異方的超流動の典型である、P波超流動 ^3He の表面や境界に出現する特異な現象を解明するために、ヘリウム液面上の電子や液面下のイオンをプローブとした研究を展開することを目的とする。特にP波超流動で存在が期待される表面束縛状態の直接検出を試みる。それによって、複雑な対称性の破れを示す凝縮系において現れる、特異な現象について理解することを目指した研究を行った。

3. 研究の方法

自由表面の下に電場によって表面に押し付けられたイオンは2次元的なイオンプールを形成し、安定に保持することができる。これに僅かな電場を表面と平行に加えることで、非常に精密な移動度の測定が可能である。もしも、表面束縛状態からの散乱があれば、液体内部の移動度と表面近傍の移動度に差が期待される。これを検出すべく、超流動ヘリウム表面下に負イオンである、電子バブルを蓄積し、その易動度の測定を行った。表面束縛状態からの寄与が顕著にみられるためには非常に低い温度での測定が必要となる。超流動ヘリウム3でもB相と呼ばれる相においてのみ表面束縛状態が存在すると考えられており、まずB相の測定から開始した。

4. 研究成果

超流動ヘリウム3B相における測定において、表面束縛状態からの余剰な散乱に起因すると考えられる易動度は今のところ観測されていない。この余剰な散乱の強度に関する情報が少なく、不確定さは残るものの、測定温度がまだ十分に下がっていない恐れがある。その一方で、自由表面に存在する表面状態が、マヨラナ状態と呼ばれる特殊な状態であるという理論的な予言が、実験開始後に提案された。もしもこれが本当だとすると、余剰な散乱は存在せず、易動度に異常は認められないことが期待される。我々の結果はこの予言と矛盾しないが、積極的な検証を行うためには、さらに低温での測定が必要である。

自由表面の束縛状態がマヨラナ状態だとすると、散乱などの運動量変化として現れる現象にはその存在が反映されない。それでは全く見えないかということ、磁氣的な異方性を調べることによって、その存在を結論づけることが可能である。そのためにはゼロ磁場の

もとでの、スピン緩和の測定が有効である。この測定は通常の磁気共鳴の手法では実行することが難しいが、光ポンピングを用いた方法によれば、その実現の可能性がある。当初の計画を若干修正して、この方法の開発を開始し、予備的な実験を行うに至った。ただ、その研究成果が得られるまでには、なお若干の時間を必要とする。

表面束縛状態はB相において存在が期待され、A相には存在しないと考えられている。しかし、A相の自由表面では異方性軸が表面と垂直になるという性質があり、それをうまく利用すれば、異方性軸周りのカイラル性を直接検出する可能性があることに気が付いた。これまでに、理論的にはカイラル性があることは知られていたが、実際の現象において、異方軸の存在以上にその方向まで定めるような現象は知られていない。自由表面下のイオンの移動度測定からそれをするのが可能である。実際に、表面に沿ったある方向に電場を加えイオンをその方向に駆動すると、電場と直角でかつ表面に沿った方向にイオンの軌道が曲げられることが分かった。この軌道の湾曲が右向きか左向きかによって異方性ベクトルが表面の外に向いているか、内に向いているか区別することができる。この効果が実際に発見され、今後その現象の詳細が解明されるものと考えている。

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14件)

1. H. Ikegami, H. Akimoto, K. Kono: *Phys. Rev. Lett.* **102** (2009) 046807 (4 pages) (査読有) .
2. D. Konstantinov, M. Dykman, M. Lea, Y. Monarkha, K. Kono: *Phys. Rev. Lett.* **103** (2009) 096801 (4 pages) (査読有) .
3. D. Konstantinov, K. Kono: *Phys. Rev. Lett.* **103** (2009) 266808 (4 pages) (査読有) .
4. D. Konstantinov, K. Kono: *J. Low Temp. Phys.* **158** (2010) 324-330 (査読有) .
5. D. Rees, K. Kono: *J. Low Temp. Phys.* **158** (2010) 301-306 (査読有) .
6. K. Kono: *J. Low Temp. Phys.* **158** (2010) 288-300 (査読有) .
7. M. Saitoh, H. Ikegami, K. Kono: *J. Low Temp. Phys.* **158** (2010) 716-721 (査読有) .
8. D. Takahashi, H. Ikegami, K. Kono: *J. Low Temp. Phys.* **158** (2010) 391-396 (査読有) .

9. H. Ikegami, H. Akimoto, K. Kono: Phys. Rev. B **82** (2010) 201104(R) [4 pages] (査読有) .
10. D. Konstantinov, K. Kono: Phys. Rev. Lett. **105** (2010) 226801 [4 pages] (査読有) .
11. H. Choi, D. Takahashi, K. Kono, E. Kim: Science **330** (2010) 1512-1515 (査読有) .
12. D. G. Rees, I. Kuroda, C. A. Marrache-Kikuchi, M. Höfer, P. Leiderer, K. Kono: Phys. Rev. Lett. **106** (2011) 026803 [4 pages] (査読有) .
13. D. Takahashi, H. Ikegami, K. Kono: J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) 025002 (2 pages) (査読有) .
14. D. G. Rees, I. Kuroda, C. A. Marrache-Kikuchi, M. Höfer, P. Leiderer, K. Kono: J. Low Temp. Phys. **166** (2011) 107-124 (査読有) .

[学会発表] (計 53 件)

1. H. Ikegami, H. Akimoto, K. Kono: “Crystallization of Electrons on Liquid Helium in Channel Geometry”. EP2DS-18/MSS-14, Kobe, Japan, July 23, 2009.
2. D. Takahashi, H. Ikegami, K. Kono: “Nonlinear transport of two-dimensional positive ions below surface of superfluid ^4He ”, EP2DS-18/MSS-14, Kobe, Japan, July 23, 2009.
3. D. Konstantinov, K. Kono: “A new type of microwave-induced resistance oscillations in a nondegenerate 2DES on liquid helium”, EP2DS-18/MSS-14, Kobe, Japan, July 23, 2009.
4. H. Ikegami, H. Akimoto, K. Kono: “Melting of a Wigner Solid in Quasi-One-Dimensional Channels”, QFS2009, Evanston, USA, Aug. 6, 2009.
5. K. Kono: “Electrons on the Surface of Superfluid ^3He ”, QFS2009, Evanston, USA, Aug. 7, 2009.
6. D. Konstantinov, K. Kono: “Self-sustained microwave absorption induced by extremely high radiation intensities in surface electrons on helium”, QFS2009, Evanston, USA, Aug. 7, 2009.
7. D. Takahashi, H. Ikegami, K. Kono: “Critical Velocity of 2D Snowballs Below the Free Surface of $^4\text{He-II}$ ”, QFS2009, Evanston, USA, Aug. 7, 2009.
8. D. Takahashi, H. Ikegami, K. Kono: “Transport Properties of Two-dimensional Snowballs Below the Surface of $^4\text{He-II}$ Under Rotation”, QFS2009, Evanston, USA, Aug. 7, 2009.
9. M. Saitoh, H. Ikegami, K. Kono: “Thickness Dependence of Superfluid Transition Temperature of ^3He film in Magnetic Fields of 0 and 0.3 Tesla”, QFS2009, Evanston, USA, Aug. 9, 2009.
10. M. Saitoh, H. Ikegami, K. Kono: “Electrostatic Bulk Liquid Manipulation for Saturated Superfluid ^3He Films”, QFS2009, Evanston, USA, Aug. 9, 2009.
11. 池上弘樹, 秋元彦太, 河野公俊: 1次元チャンネルにおける Wigner 結晶転移, 日本物理学会第 64 回年次大会, 東京, 2009 年 (3 月 28 日).
12. 池上弘樹: 2次元電子を用いた超流動ヘリウム 3 の表面研究: 日本物理学会第 64 回年次大会, 東京, 2009 年 (3 月 29 日).
13. 斎藤政通, 池上弘樹, 河野公俊: 膜厚制御によるサブミクロン ^3He 薄膜の超流動転移, 日本物理学会第 64 回年次大会, 東京, 2009 年 (3 月 30 日).
14. コンスタンチノフ デニス, 河野公俊: Ultra-hot surface state electrons on liquid helium induced by microwave resonance, 日本物理学会第 64 回年次大会, 東京, 2009 年 (3 月 28 日).
15. 池上弘樹, 秋元彦太, 河野公俊: 擬 1次元チャンネルにおけるヘリウム液面電子の伝導度測定, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本, 2009 年 10 月 27 日
16. コンスタンチノフ デニス, 河野公俊: Novel microwave-induced magnetooscillations in 2D electrons on He_3 , 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本, 2009 年 10 月 27 日
17. 高橋大輔, 河野公俊, 池上弘樹: 二次元正イオン系の臨界速度と量子渦輪生成: 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本, 2009 年 10 月 27 日
18. 斎藤政通, 池上弘樹, 河野公俊: 超流動 ^3He 薄膜臨界流の磁場依存性: 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本, 2009 年 10 月 28 日
19. H. Ikegami, H. Akimoto, and K. Kono: “Transport Measurements of

- Electrons on Liquid ^4He in the 1.6 μm Channel”, QFS2010, Grenoble, France, Aug. 3, 2010.
20. M. I. Dykman, K. Kono, D. Konstantinov, E. Collin, and M. J. Lea: “Ripplonic Lamb shift for electrons on helium surface”, QFS2010, Grenoble, France, Aug. 3, 2010.
 21. D. Konstantinov, and K. Kono: “Radiation-induced zero-resistance states in surface electrons on He”, QFS2010, Grenoble, France, Aug. 3, 2010.
 22. M. Ashari, D. Rees, F. Shaban, J. Engelhardt, J. Gleixner, K. Kono, and P. Leiderer: “Electron transport on liquid helium in confined geometry”, QFS2010, Grenoble, France, Aug. 3, 2010.
 23. D. G. Rees, I. Kuroda, M. Höfer, P. Leiderer, and K. Kono: “Transport through a point constriction of an electron liquid on the surface of superfluid ^4He ”, QFS2010, Grenoble, France, Aug. 3, 2010.
 24. H. Choi, D. Takahashi, K. Kono, and E. Kim: “Supersolid under slow rotation”, QFS2010, Grenoble, France, Aug. 5, 2010.
 25. 高橋大輔, 池上弘樹, 河野公俊: 回転超流動中の二次元正イオン系のプラズマ共鳴測定—回転超流動内における二次元イオン系の移動度測定 III—, 日本物理学会第 65 回年次大会, 岡山, 2010 年 (3 月 22 日).
 26. 渡邊正満, 河野公俊: ヘリウム液面電子研究のための低エネルギー電子源の試作: 日本物理学会第 65 回年次大会, 岡山, 2010 年 (3 月 23 日).
 27. Denis Konstantinov, 河野公俊: Quantum Electrodynamics with Electrons on Liquid Helium, 日本物理学会第 65 回年次大会, 岡山, 2010 年 (3 月 22 日).
 28. David Rees, 黒田勲, Moritz Hofer, 河野公俊: Conductivity measurements of electrons on liquid helium in a point-contact device, 日本物理学会第 65 回年次大会, 岡山, 2010 年 (3 月 22 日)).
 29. 東辻浩夫, David Rees, 河野公俊: 点接触型デバイスにおける He 液面上電子の伝導: シミュレーション, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 堺, 2010 年 (9 月 26 日).
 30. 高橋大輔, Hyungsoon Choi, 河野公俊, Eunseong Kim: Evidence of Quantized Vortices in Supersolid ^4He , 日本物理学会 2010 年秋季大会, 堺, 2010 年 (9 月 26 日).
 31. Denis Konstantinov, 河野公俊: Radiation-induced zero-resistance states in 2D electrons on liquid helium, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 堺, 2010 年 (9 月 24 日).
 32. David Rees, 黒田勲, 河野公俊, Moritz Hofer, Paul Leiderer: Coulomb interaction of electrons on helium at a point constriction, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 堺, 2010 年 (9 月 26 日).
 33. D. Konstantinov (Invited): “Microwave-induced zero-conductance states in a multisubband 2DES on liquid helium”, EP2DS-19, Tallahassee, USA, July 28, 2011.
 34. D. G. Rees, I. Kuroda, C. A. Marrache-Kikuchi, M. Höfer, P. Leiderer, Totsuji H., K. Kono: “Transport Properties of Strongly Correlated Electrons on Helium in a Classical Point-Contact”, EP2DS-19, Tallahassee, USA, July 28, 2011.
 35. K. Kono (Invited): “Nonequilibrium phenomena in electrons on a liquid He surface”, Fluctuations and Coherence: from Superfluids to Living Systems, Lancaster, UK, July 14, 2011.
 36. D. Takahashi, T. Harano, K. Kono, K. Shirahama: “Rotation Measurement of Supersolid in Nanoporous Media”, LT26, Beijing, China, Aug. 11, 2011.
 37. H. Ikegami (Invited): “Ultra-low Temperature Mobility of Electron Bubbles Formed below the Free Surface of Superfluid $^3\text{He-B}$ ”, LT26, Beijing, China, Aug. 16, 2011.
 38. H. Ikegami, H. Akimoto, K. Kono: “Nonlinear Transports of Electrons on Liquid ^4He in a 1.6 μm Channel”, LT26, Beijing, China, Aug. 16, 2011.
 39. D. Konstantinov (Invited): “Vanishing conductance states of microwave-excited electrons on a liquid helium surface”, LT26, Beijing, China, Aug. 15, 2011.
 40. M. Watanabe, K. Kono: “Low energy electron source for low temperature”, LT26, Beijing, China, Aug. 13, 2011.
 41. M. Ashari, D. Rees, K. Kono, P. Leiderer: “Measurements and

- investigations on Helium-FET”, LT26, Beijing, China, Aug. 15, 2011.
42. A. Matsubara, T. Ueno, A. Sawada, K. Kono: “Micro NMR Coil for Liquid ^3He at Ultra Low Temperature”, LT26, Beijing, China, Aug. 16, 2011.
43. D. Rees, I. Kuroda, C. Marrache-Kikuchi, M. Hofer, P. Leiderer, H. Totsuji, K. Kono: “Point-Contact Transport Properties of Classical Electrons on Helium”, LT26, Beijing, China, Aug. 16, 2011.
44. D. Takahashi, T. Harano, K. Kono, Keiya Shirahama: “Supersolid in a Porous Vycor Glass under Rotation”, ULT2011, Daejeon, Korea, Aug. 19, 2011.
45. W. Choi, D. Takahashi, K. Kono, E. Kim: “Acoustic Resonance Measurement of Solid ^4He in Torsional Oscillator under DC Rotation”, ULT2011, Daejeon, Korea, Aug. 19, 2011.
46. H. Ikegami, T. Matsumoto, K. Kono: “Ultra-low Temperature Mobility of Electron Bubbles Formed below the Free Surface of Superfluid $^3\text{He-B}$ ”, ULT2011, Daejeon, Korea, Aug. 19, 2011.
47. K. Kono (Invited): “Physics of confinement at liquid helium surface”, ULT2011, Daejeon, Korea, Aug. 21, 2011.
48. 高橋大輔, 原野貴幸, 河野公俊, 白濱圭也: DC 回転下における多孔質ガラス中の超固体, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山, 2011 年 (9 月 24 日).
49. 池上弘樹, 松本喬博, 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, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山, 2011 年 (9 月 23 日).
50. 池上弘樹, 秋元彦太, D. Rees, 河野公俊: 幅 $1.6 \mu\text{m}$ チャネル中での Wigner 結晶の融解, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山, 2011 年 (9 月 22 日).
51. 渡邊正満, 河野公俊: 低エネルギー電子源を用いたヘリウム膜上の低次元電子輸送および電子透過, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山, 2011 年 (9 月 23 日).
52. D. Rees, 東辻浩夫, 河野公俊 (Invited): Point-Contact Transport Properties of Strongly Correlated Electrons on the Surface of Liquid Helium, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山, 2011 年 (9 月 22 日).
53. 東辻浩夫, D. Rees, 河野公俊: 点接触型デバイスにおける He 液面上電子の伝導: シミュレーション III: 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山, 2011 年 (9 月 22 日).

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.lt.riken.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河野 公俊 (KONO KIMITOSHI)

独立行政法人理化学研究所・河野低温物理研究室・主任研究員

研究者番号: 3 0 1 5 3 4 8 0

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

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: 7 0 3 1 3 1 6 1

齋藤 政通 (SAITOH MASAMICHI)

独立行政法人理化学研究所・河野低温物理研究室・協力研究員

研究者番号: 7 0 4 1 5 1 6 5

高橋 大輔 (TAKAHASHI DAISUKE)

独立行政法人理化学研究所・河野低温物理研究室・協力研究員

研究者番号: 8 0 4 1 5 2 1 5