

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 29 日現在

機関番号 : 82401
研究種目 : 特別推進研究
研究期間 : 2012 ~ 2016
課題番号 : 24000007
研究課題名 (和文) ヘリウム表面における新奇量子現象—マヨラナ状態の検証
研究課題名 (英文) Novel quantum phenomena at Liquid He surface - Verification of Majorana state
研究代表者
河野 公俊 (KONO, Kimitoshi)
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・チームリーダー
研究者番号 : 30153480
交付決定額 (研究期間全体) (直接経費) : 208,100,000 円

研究成果の概要 (和文) : 2次元電子やイオンを用いて、ヘリウム表面に特有な量子現象の研究を行った。超流動 $^3\text{He-B}$ 相表面近傍では、マヨラナ表面状態と、電子を取り囲む気泡 (電子泡) の周囲に形成される準束縛状態が混合することで、電子泡の散乱断面積が増大し、バルク中よりも移動度が減少する一方で、深さ依存性を示さないという性質が、最近の理論計算により説明された。これが実験結果と定量的に一致することにより、超流動 $^3\text{He-B}$ 相の自由表面のマヨラナ状態を検証した。

研究成果の概要 (英文) : Novel quantum phenomena occurring at liquid He surface are investigated. The complete agreement between our mobility data of electron bubble in the vicinity of the superfluid $^3\text{He-B}$ surface and the recent theoretical calculation concludes that the hybridization between the surface Majorana state and quasi-bound-states formed around the bubble results in the excess mobility reduction without depth dependence. This fact evidences the Majorana state near the free surface of $^3\text{He-B}$.

研究分野 : 低温物理

キーワード : 低温物性 トポロジカル超流動 対称性の破れ 非線形非平衡現象 ヘリウム液面電子 ヘリウム液面イオン 少数電子制御 量子計算

1. 研究開始当初の背景

2次元電系やイオンを用いたヘリウム表面に特有な量子現象の研究において、世界的に高い評価を得ており、それをさらに押し進めて、他の追従を許さないレベルに到達することを目指して本プロジェクトを開始した。

2. 研究の目的

具体的な研究の目的として、下記2項目を掲げた。1) 超流動ヘリウム3自由表面に存在することが期待されたマヨラナ表面状態を直接検出する方法を開発すること。2) ヘリウム表面上2次元電子で、我々が発見した表面準位間のマイクロ波吸収励起に伴う磁気伝導度消失現象の機構を解明し、ヘリウム表面上の単電子輸送の測定方法を組み合わせることで、量子ビット作成へと応用すること。これら二つを研究の目的とした。

3. 研究の方法

第1の目的のために、従来行ってきた、ヘリウム表面下に蓄積したイオン(電子泡および正電荷をもつヘリウムクラスター)の伝導度測定に加えて、バリウムイオンを表面下に補足して、そのレーザー分光により周囲の液体ヘリウム3の磁気的な性質をプローブする方法の開発を目指した。結果的に、バリウムイオンの補足は困難を極め、未だに成功していない。

一方で、伝導度測定の精密化を図り、定量的な移動度およびホール係数のデータを提供することによって、理論家を触発して、計算の再検討を行う動機を与えた。その結果、後に述べるように、重要な概念の獲得に大きな貢献をすることとなった。

第2の目的として掲げた、表面準位間のマイクロ波吸収励起に伴う磁気伝導度消失現象に関しては、分割した電極構造を採用し、すべての電極に流れる電流を同時に計測する方法を採用することによって、自発的に表れる時空間秩序について、示唆に富む情報を獲得することに努めた。

単一電子輸送は、毛細管凝縮した液体ヘリウムチャネルを電子の基盤として用いることで、電子一つ一つを制御可能なポテンシャル分布を作りだすことを目指して、様々な電極構造の作成とその動作特性について調べることにした。その過程で、ポテンシャルを時間に関して線形に掃引する準直流測定方法を思い付き、試したところ、交流測定では解析が非常に困難であった非線形伝導現象にていての知見が得られることが分かった。この準直流測定方法の積極的な活用により、飛躍的に現象の理解を増進さ

せることができた。

技術的には単一電子を操ることができると考えられるが、実際に単一電子の制御を実現するためには、単一電子の検出を実現する必要がある。本研究計画ではそこまで実現したかったが、果たせなかった。しかし、今後の目標として実現性が十分に視野にはいるところまでできていると考えている。

4. 研究成果

マヨラナ状態の検証という大テーマは、実は、ここで提案した新しい実験方法の確立によらず、伝統的ではあるが超高精度伝導度測定により実現された。これには注意深く測定を行う高度な実験技量が本質的な役割を果たした。

そのきっかけは、本研究計画がスタートする直前に測定に成功した、超流動³He-Aの異常ホール効果の検出にある[雑誌論文(以下同)⑬, ⑮]。超流動³He-Aの秩序変数(クーパー対)は、2個の³He原子の相対運動における軌道角運動量の量子化軸への射影が $L_z = \pm 1$ という有限な値をもつ固有状態の波動関数で表現される。ちなみに、軌道角運動量の量子数は $L=1$ であることが、実験・理論の両面から確立している。この³He-Aの状態は、軌道角運動量の量子化軸方向に空間的な異方性を持ち、 L_z の符号によって、³He原子の相対運動が、反時計回りか、時計回りのカイラル性をもつ、カイラル状態である。

液体ヘリウム中の電子はパウリ原理によりヘリウム原子を押しつけて気泡を生成し、その中に自縄自縛された電子泡という状態を形成する。その大きさは、気泡生成にともなう液体ヘリウムの表面エネルギーと電子が閉じ込められることによるゼロ点エネルギーのバランスによって決まる。この電子泡は³He準粒子の散乱に関して、球対称なハードコア・ポテンシャルとしてはたらく。電子泡の直径はおおよそ3nmで³Heのフェルミ波長0.8nmに比べて大きい。準粒子は、衝突径数が電子泡の半径より小さい時にのみ相互作用すると考えられる。超流動³He-A中で異方軸に垂直に運動する準粒子の電子泡による散乱が左右非対称となることは、カイラル性から自然に予想され、理論的にも予言されていた[1]。この非対称性により、³He-A中の異方軸に垂直に運動する電子泡が異常ホール効果を示すことが期待される。

我々による異常ホール効果の観測と定量的なホール係数の測定は、さらなる理論的研究の進展を促し、電子泡の周りにできる準束縛状態の重要性を再認識させることとなった。電子泡は準束縛状

態をまとふことにより、図1のように異方軸に垂直な面内のミクロな質量流を伴うことが理論的に示された[2]。

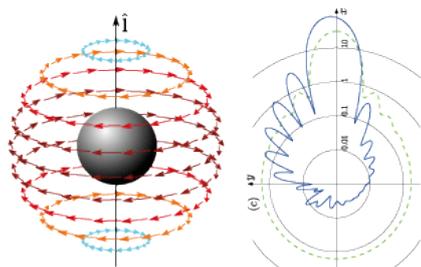


図1 電子泡周りの質量流と左右非対称な微分散乱断面積[2]。

離散的な準束縛状態は準粒子を共鳴的に散乱し、左右非対称性が現れる。この理論により、我々の実験結果は定量的に説明されるとともに、超流動³Heの対称性に関する理解を再整理して、正しい理論的な取扱法を示した。

この方法を³He-Bに適用した計算がなされ[3]、マヨラナ状態と電子泡周りの準束縛状態の間の相互作用を取り入れることで、実験結果を正確に再現することが分かり、³He-Bにおけるマヨラナ表面状態の存在が検証された。

この事実は、凝縮系物理におけるマヨラナ状態(フェルミ粒子)の概念を疑念の余地なく確立するものであり、大きな学術的な意義をもつ。今後、マヨラナ粒子のさらなる物性を解明する上で、超流動³Heがこの上のない系であることが明白となった。

マヨラナ状態の磁気的な性質を検知することを目的にしたBaイオンの実験的な試みは本研究期間中には実現しなかったが、今後のさらなる試行の努力が稔多いものであることが了解される。

Baイオンに関する様々な試行を繰り返すうちに、超流動ヘリウムの電気流体力学効果をはじめとし多くの新奇現象が見いだされ、論文として発表されていることを付言する[①, ⑤, ⑥, ⑩, ⑪]。

2つ目の目的に関して、精力的に研究を進めた結果、マイクロ波共鳴吸収下の磁気抵抗が示す、無散逸伝導現象が、非圧縮性を示すことを発見し[⑫]、また自発的な時空間構造を発現することが徐々に明らかになりつつある[⑬]。

液体ヘリウムの表面張力による毛細管凝縮によって形作られたヘリウムチャンネル上のウィグナー結晶の伝導現象の準直流測定という、新しい実験手法を開拓し、ウィグナー結晶のスティック・スリップ伝導を初めて観測することに成功した(図2)[⑧]。

今後、さらにこれらの技術に磨きをか

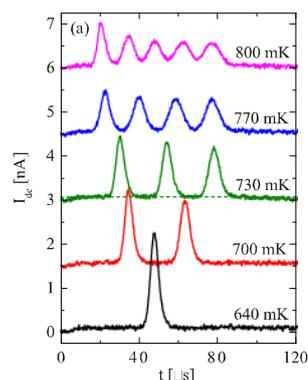


図2 ウィグナー結晶の間歇的なスティック・スリップ伝導現象。

け、単一電子の量子制御と状態検出へと研究を発展させることが実現可能な目標として視野に入ってきた。

<引用文献>

1. R. H. Salmelin, M. M. Salomaa, and V. P. Mineev: Phys. Rev. Lett., **63** (1989) 868.
2. O. Shevtsov and J. A. Sauls: Phys. Rev. B, **94** (2016) 064511.
3. Y. Tsutsumi: Phys. Rev. Lett., **118** (2017) 145301.

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 36 件)

- ① P. Moroshkin, A. Borel, and K. Kono: “Laser spectroscopy of phonons and rotons in superfluid helium doped with Dy atoms,” Phys. Rev. B, **97** (2018) 094504 [6 pages] (査読有). DOI: 10.1103/PhysRevB.97.094504
- ② M. I. Dykman, K. Kono, D. Konstantinov, and M. J. Lea: “Ripplonic Lamb Shift for Electrons on Liquid Helium,” Phys. Rev. Lett., **119** (2017) 256802 [5 pages] (査読有). DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.256802
- ③ D. G. Rees, S.-S. Yeh, B.-C. Lee, K. Kono, and J.-J. Lin: “Bistable transport properties of a quasi-one-dimensional Wigner solid on liquid helium under continuous driving,” Phys. Rev. B, **96** (2017) 205438 [10 pages] (査読有). DOI: 10.1103/PhysRevB.96.205438
- ④ H. Ikegami, K. Kim, D. Sato, K. Kono, H. Choi, and Y. P. Monarkha: “Anomalous Quasiparticle Reflection from the Surface of a ³He - ⁴He Dilute

- Solution,” *Phys. Rev. Lett.*, **119** (2017) 195302 [5 pages] (査読有).
DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.195302
- ⑤ P. Moroshkin, P. Leiderer, Th. B. Moeller, and K. Kono: “Taylor cone and electro spraying at a free surface of superfluid helium charged from below,” *Phys. Rev. E*, **95** (2017) 053110 [9 pages] (査読有).
DOI: 10.1103/PhysRevE.95.053110
- ⑥ P. Moroshkin, P. Leiderer, and K. Kono: “Motion of metallic microparticles in superfluid helium in the presence of space charge,” *Physics of Fluids*, **29** (2017) 047106 [10 pages] (査読有).
DOI: 10.1063/1.4979819
- ⑦ M. Saitoh, H. Ikegami, and K. Kono: “Onset of Superfluidity in ^3He Films,” *Phys. Rev. Lett.*, **117** (2016) 205302 [5 pages] (査読有).
DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.205302
- ⑧ D. G. Rees, N. R. Beysengulov, J.-J. Lin, and K. Kono: “Stick-Slip Motion of the Wigner Solid on Liquid Helium,” *Phys. Rev. Lett.*, **116** (2016) 206801 [5 pages] (査読有).
DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.206801
- ⑨ D. G. Rees, N. R. Beysengulov, Y. Teranishi, C.-S. Tsao, S.-S. Yeh, S.-P. Chiu, Y.-H. Lin, D. A. Tayurskii, J.-J. Lin, and K. Kono: “Structural order and melting of a quasi-one-dimensional electron system,” *Phys. Rev. B*, **94** (2016) 045139 [6 pages] (査読有).
DOI: 10.1103/PhysRevB.94.045139
- ⑩ P. Moroshkin and K. Kono: “Bound-bound transitions in the emission spectra of $\text{Ba}^+\text{-He}$ excimer,” *Phys. Rev. A*, **93** (2016) 052510 [6 pages] (査読有).
DOI: 10.1103/PhysRevA.93.052510
- P. Moroshkin, R. Batulin, P. Leiderer, and K. Kono: “Metallic nanowires and mesoscopic networks on a free surface of superfluid helium and charge-shuttling across the liquid-gas interface,” *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **18** (2016) 26444-26455 (査読有).
DOI: 10.1039/C6CP04607J
- A. D. Chepelianskii, M. Watanabe, K. Nasyedkin, K. Kono, and D. Konstantinov: “An incompressible state of a photo-excited electron gas,” *Nature Communications*, **6** (2015), 7210 [7 pages] (査読有).
DOI: 10.1038/ncomms8210
- H. Ikegami, Y. Tsutsumi, and K. Kono: “Observation of Intrinsic Magnus Force and Direct Detection of Chirality in Superfluid $^3\text{He-A}$,” *J. Phys. Soc. Jpn.*, **84** (2015) 044602 [16 Pages] (査読有).
DOI: 10.7566/JPSJ.84.044602
- H. Ikegami and K. Kono: “Nonlinear Transport of Positive Ions Below a Free Surface of Topological Superfluid $^3\text{He-B}$,” *J. Low Temp. Phys.*, **175** (2014) 718-724 (査読有).
DOI: 10.1007/s10909-014-1155-z
- H. Ikegami, Y. Tsutsumi, and K. Kono: “Chiral Symmetry Breaking in Superfluid $^3\text{He-A}$,” *Science*, **341** (2013) 59-62 (査読有).
DOI: 10.1126/science.1236509
- D. Konstantinov, Yu. Monarkha, and K. Kono: “Effect of Coulomb Interaction on Microwave-Induced Magnetoconductivity Oscillations of Surface Electrons on Liquid Helium,” *Phys. Rev. Lett.*, **111** (2013) 266802 [5 pages] (査読有).
DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.266802
- H. Ikegami, S. B. Chung, and K. Kono: “Mobility of Ions Trapped Below a Free Surface of Superfluid ^3He ,” *J. Phys. Soc. Jpn.*, **82** (2013) 124607 [12 pages] (査読有).
DOI: 10.7566/JPSJ.82.124607
- D. Konstantinov, M. Watanabe, and K. Kono: “Self-Generated Audio-Frequency Oscillations in 2D Electrons with Nonequilibrium Carrier Distribution on Liquid Helium,” *J. Phys. Soc. Jpn.*, **82** (2013) 075002 [2 pages] (査読有).
DOI: 10.7566/JPSJ.82.075002
- H. Ikegami, H. Akimoto, D. G. Rees, and K. Kono: “Evidence for Reentrant Melting in a Quasi-One-Dimensional Wigner Crystal,” *Phys. Rev. Lett.*, **109** (2012) 236802 [5 pages] (査読有).
DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.236802

- ① K. Kono and K. Nasyedkin: “Experimental evidence for density domain formation in zero-resistance states of electrons on liquid helium surface,” ULT 2017: Frontiers of Low Temperature Physics, Heidelberg, Germany, 2017.
- ② K. Kono: “Ion transport on the surface of superfluid ^3He ,” The 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28), Gothenburg, Sweden, 2017.
- ③ P. Moroshkin and K. Kono: “Scattering of phonons by atomic nano-bubbles in superfluid helium doped with dysprosium,” The 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28), Gothenburg, Sweden, 2017.
- ④ H. Ikegami, K. Kim, H. Choi, D. Sato, K. Kono, and Y. Monarkha: “Anomalous enhancement of mobility of a Wigner crystal on a free surface of dilute ^3He - ^4He mixtures,” The 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28), Gothenburg, Sweden, 2017.
- ⑤ K. Nasyedkin and K. Kono: “Edge Magnetoplasmons in a Microwave-Excited 2D Electron Gas on Liquid Helium,” The 22nd International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS22), State College, USA, 2017.
- ⑥ K. Kono: “An evidence for density domains in ZRS of 2D electrons on liquid He,” School for advanced sciences of Luchon: Quantum transport in 2D systems - II, Bagnères-de-Luchon, France, 2017.
- ⑦ D. Rees: “Stick-Slip Motion of the Wigner Solid on the Surface of Liquid Helium,” APS March Meeting, New Orleans, USA, 2017.
- ⑧ K. Kono: “Slip transport of the Wigner solid on liquid He surface,” NUCLEI and MESOSCOPIC PHYSICS -- V (NMP17), East Lansing, USA, 2017.
- ⑨ K. Kono, D. Rees, N. Beysengulov, D. Tayurskii, and J.-J. Lin: “Stick-Slip Motion of the Wigner Solid over Liquid Helium Surface,” The 11th International Conference on CryoCrystals and Quantum Crystals, Turku, Finland, 2016.
- ⑩ P. Moroshkin, K. Kono, and P. Leiderer: “Metal nanowires and mesoscopic networks at a free surface of superfluid He,” The 11th International Conference on CryoCrystals and Quantum Crystals, Turku, Finland, 2016.
- ⑪ P. Moroshkin: “Electrohydrodynamic effects in superfluid He,” QFS2016: International Conference on Quantum Fluids and Solids, Prague, Czech Republic, 2016.
- ⑫ K. Kono: “Fascinating phenomena on free surface of superfluid helium probed by surface charges,” KPS Spring Meeting, Daejeon, Korea, 2016.
- ⑬ D. G. Rees, N. R. Beysengulov, Y. Teranishi, D. A. Tayurskii, J.-J. Lin, and K. Kono: “Structural Diagram of a Quasi-One-Dimensional Wigner Crystal on the Surface of Liquid Helium,” The 21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS21), Sendai, Japan, 2015.
- ⑭ K. Kono: “Single Electron Transport on Liquid Helium Surface,” XXXVII Meeting on Low Temperature Physics, Kazan, Russia, 2015.
- ⑮ K. Kono: “Spontaneous current oscillation in 2D electrons on liquid helium,” School for advanced sciences of Luchon: Quantum transport in 2D systems, Bagnères-de-Luchon, France, 2015.
- ⑯ K. Kono, H. Ikegami, and Y. Tsutsumi: “Surface Ions to Study Chirality of Superfluid $^3\text{He-A}$,” ULT 2014 - Frontiers of Low Temperature Physics, San Carlos de Bariloche, Argentinian, 2014.
- ⑰ P. Moroshkin, R. Batulin, D. Tayurskii, P. Leiderer, T. Arai, K. Kono: “Impurity Ions at the Surface of Superfluid He,” The 27th International Conference on Low Temperature Physics (LT27), Buenos Aires, Argentina, 2014.
- ⑱ H. Ikegami, Y. Tsutsumi, and K. Kono: “Direct Detection of Chirality in Superfluid $^3\text{He-A}$,” QFS2013: International Conference on Quantum Fluids and Solids, Matsue, Japan, 2013.
- ⑲ D. G. Rees, N. Beysengulov, H. Ikegami, D. A. Tayurskii, and K. Kono: “Confinement effect on electron transport of Wigner solid on liquid He,” QFS2013: International Conference on Quantum Fluids and Solids, Matsue, Japan, 2013.
- ⑳ K. Kono, H. Ikegami, and Y. Tsutsumi: “Probing Chirality in Superfluid $^3\text{He-A}$: Free Surface as an Ideal Boundary Condition,” APS March Meeting, Baltimore, USA, 2013.

- 21 K. Kono, H. Choi, D. Takahasi, W. Choi, and E. Kim: "Supersolid helium under rotation," 9th Conference on Cryocrystal and Quantum Crystal, Odessa, Ukraine, 2012.
- 22 K. Kono: "Transport of electrons on helium channels," QFS2012: International Conference on Quantum Fluids and Solids, Lancaster, UK, 2012.
- 23 H. Ikegami and K. Kono: "Probing Chirality in Superfluid $^3\text{He-A}$," QFS2012: International Conference on Quantum Fluids and Solids, Lancaster, UK, 2012.

[その他]

ホームページ等

- ① K. Kono: "Surface state electrons on liquid helium," Heilborn Lectures, Northwestern University, Evanston, IL USA, 2012
- ② 国際会議開催
<http://ult.riken.jp/2017/eiqfs2018/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河野 公俊 (KONO, Kimitoshi)
理化学研究所・CEMS・チームリーダー
研究者番号：30153480

(3) 連携研究者

松尾 由賀利 (MATSUO, Yukari)
法政大学・理工学部・教授
研究者番号：50231593
(平成 25 年度まで連携研究者)

モロシュキン ピーター (MOROSHKIN, Petr)
理化学研究所・CEMS・研究員
研究者番号：00715237
(平成 25 年度より連携研究者)

池上 弘樹 (IKEGAMI Hiroki)
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
(平成 26 年度まで連携研究者)

石黒 亮輔 (ISHIGURO Ryosuke)
日本女子大学・理学部・准教授
研究者番号：40433312
(平成 26 年度まで連携研究者)

佐藤 大輔 (SATO, Daisuke)
理化学研究所・CEMS・協力研究員
研究者番号：00709363

リース デイビッド (REES, David)
国立交通大学・物理学科・研究員
研究者番号：70462744

天羽 真一 (AMAHA, Shinichi)
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：90587924
(平成 25 年度まで連携研究者)

ナシエドキン、コスチャンティン (NASYEDKIN, Kostyantín)
理化学研究所・CEMS・特別研究員
研究者番号：80722397
(平成 25 年度より連携研究者)

渡邊 正満 (WATANABE, Masamitsu)
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：00300674
(平成 26 年度まで連絡研究者)

スン、ユーチェン (SUN, Yuchen)
理化学研究所・CEMS・特別研究員
研究者番号：60720860
(平成 25 年度より連携研究者)

(4) 研究協力者

ライドラー、パウル (LEIDERER, Paul)
コンスタンツ大学・物理学科・名誉教授

ベイゼングロフ、ニヤス (BEYSENGULOV, Niyaz)
理化学研究所・CEMS・国際プログラム大学院生
(平成 28 年度まで研究協力者)

バツリン ルスラン (Batulin, Ruslan)
理化学研究所・CEMS・国際プログラム大学院生
(平成 25 年度まで研究協力者)

タユルスキー、ドミトリー (TAYURSKII, Dmitrii)
カザン大学・物理学科・教授

林志忠 (LIN, Juhn-Jong)
国立交通大学・物理学科・教授

シェペリアンスキー、アレクセイ (CHEPELIANSKII, Alexei)
パリ南大学・物理学科・研究員

注) CEMS: 創発物性科学研究センター