

科学研究費助成事業（特別推進研究）公表用資料
〔研究進捗評価用〕

平成24年度採択分

平成27年 5月28日現在

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 Helium
Surface - Verification of Majorana state

課題番号：24000007

研究代表者

河野 公俊 (KONO KIMITOSHI)

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



研究の概要：2次元電子系やイオンなどを用いて、ヘリウム自由表面を舞台とするユニークな量子現象の研究を行う。超流動ヘリウム3自由表面のマヨラナ表面束縛状態、ヘリウム表面上2次元電子系のミリ波励起による異常磁気抵抗効果、単電子輸送を組み合わせた表面状態の量子ダイナミクスの研究とその量子ビットへの応用について研究する。

研究分野：低温物理

キーワード：トポロジカル超流動、ヘリウム液面電子、非線形非平衡現象

1. 研究開始当初の背景

我々が進める、2次元電子系やイオンなどを用いて、ヘリウム自由表面を舞台とするユニークな研究は、国際的にも極めて特徴のある独創的な研究として認知されている。本研究では、これまでの研究で得られた、ヘリウム表面に特有な量子現象の中で、特に重要なものについて、研究を集中的に深化させることを目的とする。

2. 研究の目的

(1) 超流動ヘリウム3自由表面に存在する表面束縛状態のマヨラナ性を理想的な条件のもとで検証することが喫緊の課題である。マヨラナ性とは素励起と反素励起が同一であることを言う。

(2) ヘリウム表面上2次元電子系で我々が発見した、ミリ波励起に伴う磁気伝導度消失現象の機構解明と、ヘリウム表面上の単電子輸送を組み合わせ、表面状態の量子ダイナミクスの研究とその量子ビットへの応用を目的とする研究を進める。

3. 研究の方法

(1) 超流動ヘリウム3表面束縛状態のマヨラナ性の検証においては、イオン易動度の精密測定と、ヘリウム中Ba⁺イオンのレーザー分光という実験手法を用いて研究を進める。Ba⁺イオンの光検出電子スピン緩和率測定法を確立し、スピン緩和の異方性を検証する。(2) ヘリウム液面電子を用いた単一電子制御とその量子ビットへの応用に関する研究においては、ヘリウムマイクロチャンネル上のメゾスコピック電子系の輸送特性、ミリ波照

射によるヘリウム液面電子の磁気伝導現象、液面電子の3次元空間への逸出現象に関する測定を行う。

4. これまでの成果

(1) 超流動ヘリウム3自由表面下に捕獲した電子バブルの易動度の測定結果と理論計算の結果を図1に示す。

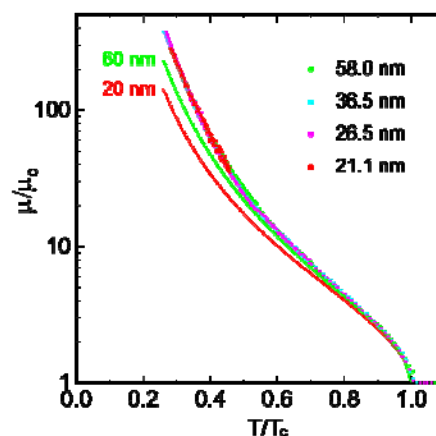


図1 超流動転移温度で規格化した電子バブルの易動度。実線は表面束縛状態がマヨラナではないとしたときの理論計算。

図1の実線は表面束縛状態がマヨラナではないとしたときに期待される易動度の理論予想を示している。表面からの深さが60nm(緑)の場合と20nm(赤)の場合の値を示し、明瞭な差があることが分かる。それに対して実験値は21nmから58nmの深さを変えた4つのデータがどれも一つの曲線上にのり、深さ依存性が見られないことを示している。

〔4. これまでの成果 (続き)〕

深さ依存性がないことは、表面束縛状態がマヨラナであれば、自然に期待されるところで、実験結果は表面束縛状態があれば、それはマヨラナであることを明確に示している。

超流動ヘリウム3 A相における自由表面下電子バブルの輸送現象の測定から、A相の基本的性質である、クーパー対が、軌道角運動量 $L_z=1$ という固有状態になっており、クーパー対の軌道角運動量ベクトルの向きに依存したカイラル性を持つことを実験的に直接決定することができることを初めて示し、超流動ヘリウム3物理の深化に大きな貢献を果たした。

(2) ミリ波照射下のゼロ抵抗状態においては、初期外部電位の値によらず、ある一定の電子密度が実現されることを発見した。この一定の電子密度がどのような機構によって実現されるのか、あるいはどのような意味を持つのかについてはまだ理解されていない。ある種の非圧縮性状態が実現していることを示唆しており、現象の安定性の理解に重要な役割を担っていることが期待され、その機構解明が待たれる。

液体ヘリウムマイクロチャンネルの上に束縛した表面状態電子系のスプリットゲート電極による制御と伝導現象測定の研究は、有限要素法を用いた実験データの解析を行い、電子系を精密に制御できる段階に到達した。これにより、 $100\mu\text{m}$ の長さにとり、電子が1列に整列した状態を実現しその伝導特性を測定することに成功し、この1次元電子系の液体・固体転移があることを実験的に示した。

ゲート電極電圧を制御することで、さらに電子系の幅を2列3列と増やしていくことができる。それぞれの列の数に応じて、閉じ込めポテンシャルと整数列が整合して安定な条件があることが伝導度測定から明らかになった。隣り合う整数のちょうど中間ではどちらの整数列が実現されるか微妙な状態となり、電子系が空間的な秩序を形成しづらい状況が出現し、固化を抑制することが分かった。これにより、液体・固体相境界近傍において、列数が増えるにしたがって、伝導度が周期的に振動する現象が現れ、実に20列以上まで、その周期的変化を同定することができる。この観測結果と有限要素法解析の結果から、マイクロチャンネル上に形成される電子系の列数を精密に制御可能であることが示された。これらの結果から、チャンネルエッジの揺らぎによる系の不均一性が大きな影響を及ぼさないことも明らかになり、今後の単一電子量子制御の可能性に明るい展

望を与える材料である。

5. 今後の計画

(1) 超流動ヘリウム3表面束縛状態のマヨラナ性の検証に欠かせない、スピン揺らぎの異方性検出のために、Ba⁺イオンのレーザー分光を援用する手法を提案しているが、Ba⁺イオンを自由表面に捕獲する技術を確認する必要がある。そのための試行を精力的に継続する。

(2) ヘリウムマイクロチャンネル上の単一電子制御に向けて、デバイスに改良を加えて、単一電子の局在とその検出に向けた試行を重ねる。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

(研究代表者は二重線、研究分担者は一重下線、連携研究者は点線)

(1) H. Ikegami, Y. Tsutsumi, and K. Kono: “Observation of Intrinsic Magnus Force and Direct Detection of Chirality in Superfluid ³He-A”, J. Phys. Soc. Jpn., **84** (2015) 044602 [16 pages].

(2) 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].

(3) H. Ikegami, Y. Tsutsumi, and K. Kono: “Chiral Symmetry Breaking in Superfluid ³He-A”, Science, **341** (2013) 59-62.

(4) 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].

(5) D. Konstantinov, A. Chepelianskii, and K. Kono: “Resonant Photovoltaic Effect in Surface State Electrons on Liquid Helium”, J. Phys. Soc. Jpn., **81** (2012) 093601.

(6) 河野公俊: “ヘリウム液面電子による表面量子現象の研究”、平成27年度文部科学大臣表彰、科学技術賞研究部門、平成27年4月15日。