

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 28 日現在

機関番号：82401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24654114

研究課題名(和文) 超流動ヘリウム3 表面束縛状態のマヨラナ粒子性検証のための新技術

研究課題名(英文) New technique for demonstrating Majorana nature of surface bound states in the superfluid helium-3

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) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：超流動ヘリウム3-Bの自由表面に形成される表面束縛状態のマヨラナ粒子性の検証を目的として、毛細管現象と微小SQUIDを利用した新しい実験系の構築のための基礎的研究を行った。幅1～10マイクロメートルのマイクロチャネル構造中を作製し、液体ヘリウムの毛細管現象の研究を進めた。特にのマイクロチャネル中の液体ヘリウム4の表面にトラップされた電子の輸送特性から、毛細管凝縮したヘリウムの表面は予想通りの形状になっている事を示した。また輸送特性に現れる振動は、電子密度を変化させた際に起こるWigner結晶のreentrantな融解に起因する事を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：I made basic investigation to develop a new measurement system using the capillary condensation effect and a micro-SQUID for demonstrating Majorana nature of surface bound states at a free surface of the superfluid $^3\text{He-B}$. I fabricated micro-channel structures of a width 1-10 micrometer, and investigated the properties of the liquid helium capillary-condensed in the micro-channels. From the observed transport properties of electrons trapped on the surface of the capillary-condensed liquid ^4He , I showed that the surface of the condensed liquid has an expected shape. I further showed that the oscillation observed when the electron density was varied arose from the reentrant melting of a Wigner crystal.

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 マイクロ構造

1. 研究開始当初の背景

p 波ペアリング状態である超流動ヘリウム 3 はスピンと軌道の内部自由度を持ち、その波動関数はトポロジカルに非自明である。トポロジカルに非自明な状態を反映して、超流動ヘリウム 3 - B 相の表面にはギャップレスな表面束縛状態が形成される。最近の理論研究から、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示すという驚くべきことが予想されている。通常のフェルミ粒子からクーパペアリングを経てマヨラナ粒子性が創発的に出現しており、非常に興味深く、また実験的に検証すべきことである。

液体ヘリウム 3 は不純物を全く含まない超高純度液体であり、実験の細部に至るまで理論との比較が可能である。超流動ヘリウム 3 において実験の細部まで理論と比較することにより、マヨラナ粒子の詳細の解明につながる。また、素粒子実験で未だ発見されていないマヨラナ粒子を実験室で再現・検証する場を提供する。そのため物性物理だけではなく素粒子物理に対しても大きな意味を持つ。また、マヨラナ粒子は外乱に強い量子計算素子としての応用が期待されており、マヨラナ粒子の詳細の実験的研究は量子情報科学の発展にも寄与する。

マヨラナ粒子的束縛状態は、準粒子の反射が鏡面的に起こる鏡面的表面でのみ形成されると考えられている。実際の超流動ヘリウム 3 では、自由表面と呼ばれる液体を容器の途中まで入れた時にできる表面が唯一の鏡面的表面であり、表面束縛状態のマヨラナ粒子性を検証するのに最適な表面である。

表面束縛状態のマヨラナ粒子性は、表面束縛状態のイジング的異常磁気応答に現れる。このイジング性を反映して、磁化率の低温での Curie 的発散と磁化率の印可磁場方向に対する異方性が生じると理論的に予想されている。このようなイジング的磁気応答を観測することが、表面束縛状態がマヨラナ粒子的であることを検証できる、現在知られている唯一の方法である。しかし、このようなマヨラナ粒子性の検証を行った実験的研究は無い。

2. 研究の目的

上述のようにマヨラナ粒子性の検証には、表面付近のイジング的異常磁気応答を観測する必要がある。本研究の目的は、これまで困難であった自由表面近傍の磁化の測定を可能にする手法を開発する事である。具体的には、毛細管現象と微小 SQUID を利用することにより、これまで困難であった自由表面を壊さずかつ自由表面近傍の磁化を測定できる実験系を構築する。それにより、表面束縛状態のイジング的磁気応答を観測できる実験系を実現し、マヨラナ粒子性の検証のための足掛かりを得る。

3. 研究の方法

表面束縛状態のマヨラナ粒子性を検証するために、自由表面近傍の磁化測定が可能でかつ自由表面が破壊されないという実験状況を作り出すことが本研究の目的である。そのために毛細管現象と微小 SQUID を利用する。毛細管凝縮した液体ヘリウムの周囲に微小 SQUID を微細加工技術を駆使して作製する。実現する系には以下のような特徴がある。

(1) 毛細管現象した液体ヘリウムでは、自由表面は壊れていない。

(2) 表面近傍の磁化が測定可能

SQUID の直径が 1 マイクロメートル程度であるため、深さ 1 マイクロメートル程度までの磁化が測定にかかる。表面束縛状態の影響はコヒーレンス長 (~100 nm) の数倍程度にまで及ぶため、SQUID で検出される磁化の数十% は表面束縛状態からのものとなる。

(3) 低磁場での測定が可能

マヨラナ粒子性は数十ガウスの磁場で失われる。ヘリウム 3 の磁化測定によく用いられる NMR は数百ガウスの磁場が必要である。一方、SQUID は十分低磁場での測定が可能である。

(4) 実験系がシンプル

微小 SQUID の位置の微調整を必要としない。毛細管現象により、液体ヘリウムは微小 SQUID の所まで自然に上昇する。このシンプルな構造は、省スペースで微調機構なしで実験が行えることを意味し、制約の多い 1mK 以下での超流動ヘリウム 3 の実験を行う上で有利である。

まず、毛細管凝縮した液体ヘリウムの周囲に微小 SQUID を微細加工技術を駆使して作製し、冷却テストにより毛細管凝縮のテストおよび SQUID の感度と発熱量を評価する。まずは、実験が容易な超流動ヘリウム 4 で評価を行う。毛細管凝縮のテストと SQUID の作製、評価を繰り返して、超流動ヘリウム 3 の実験に使用可能でかつ発熱量が 100 pW 以下と小さいものを開発する。その後、実際に液体ヘリウム 3 の磁化を常流動状態で測定することにより、1mK 以下の超流動ヘリウム 3 の研究に使用する際の問題点を洗い出し、さらに改良を加えることで使用可能なものに仕上げる。

4. 研究成果

マイクロメーター領域での液体ヘリウムの毛細管現象の研究を行うための技術開発および毛細管現象の詳細の理解を先ず行う必要がある。そのため、まずはマイクロチャネル構造中への液体ヘリウムの毛細管現象の研究を進めた。幅 1~10 マイクロメーターを作製した。マクロな大きさのチャネル中では、液体表面にはメニスカスが形成されるが、10 マイクロメーター以下の幅のチャネルでは、毛細管凝縮したヘリウムの表面は平らになると予想される。予想される様に液体ヘリウムがマイクロチャネル中に毛細管縮して

いるかを検証するために、液体ヘリウム4の表面に電子をトラップして輸送特性を測定した(図1)。その結果、電子ガスの領域では、移動度は理論から予想される振舞いを示した。この事は、毛細管凝縮したヘリウムの表面は予想通りの形状になっている事を示している。

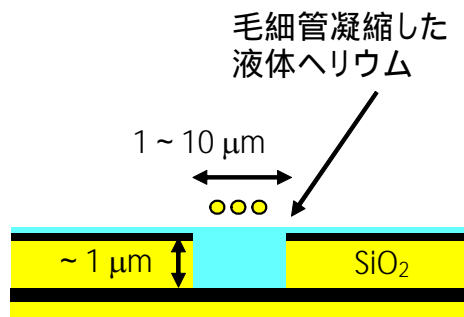


図1 マイクロチャンネル構造とチャンネル部に毛細管凝縮した液体ヘリウム。チャンネル周辺には、ヘリウム表面上の電子に電場を印加するための電極と、電子の輸送特性を測定するための電極がある。

幅 1.6 および 10 マイクロメートルでのマイクロチャンネルでの電子の輸送特性の測定を進めていく過程で、1 ケルビン程度の温度が高い領域で、電子の輸送特性が密度に対して振動する事を見出した。またチャンネル幅が大きい 10 マイクロメートルのものでは、多くの振動が観測されることが明らかになった。さらに非線形伝導特性を密度および温度を変えて行った。それらのデータの詳細な解析および数値計算との比較から、振動は密度を変化させた際に起こる Wigner 結晶の構造の変化に関連した、Wigner 結晶の reentrant な融解に起因する事を明らかにした。このような構造の変化に関連する現象が観測されるという事は、幅 1~10 マイクロメートルのマイクロチャンネルでは、チャンネル構造中への液体ヘリウムの毛細管現象が予想通りに実現されていることを示している。

さらにマイクロチャンネルの折れ曲がりの効果がメニスカスにどのような影響を及ぼすかを調べるために、折れ曲がりの部分を滑らかな形状にしたマイクロチャンネルを製作し電子の輸送特性を調べた。折れ曲がり滑らかなになると輸送特性はシャープな特性を示し、Wigner 結晶の reentrant な融解に起因する振動が 10 周期以上も観測される事がわかった。これは、滑らかな折れ曲がりによりメニスカスの屈曲具合が小さくなったためと考えられる。すなわち毛細管凝縮した液体ヘリウムのメニスカスの制御が予想通りに実現していることを示している。

以上と並行して、自由表面近傍の磁化を測定するための微小 SQUID デザインおよび SQUID 測定回路系の構築を進めた。液体ヘリウム3が超流動になる 1 mK 以下の温度で使

用するためには、発熱量を 100 pW 以下に抑える必要がある。発熱量を見積ったところ、当初予定していたブレークジャンクション型の微小 SQUID では発熱量を抑える事が難しい事が判明した。そのため、トンネル接合型の小 SQUID を用いる必要があることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

David. G. Rees、池上弘樹、河野公俊、Reentrant Melting of a Classical Quasi-One-Dimensional Wigner Crystal on the Surface of Liquid Helium、Journal of the Physical Society of Japan **82**, 124602-1-8 (2013). 査読有
DOI: 10.7566/JPSJ.82.124602

池上弘樹、秋元彦太、David G. Rees、河野公俊、Evidence for Reentrant Melting in a Quasi-One-Dimensional Wigner Crystal、Physical Review Letters **109**, 236802-1-5 (2012). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.236802

池上弘樹、秋元彦太、河野公俊、Nonlinear Transports of Electrons on Liquid 4He in a 1.6 μm Channel、Journal of Physics: Conference Series **400**, 012020-1-4 (2012) 査読有。
DOI:10.1088/1742-6596/400/1/012020

〔学会発表〕(計3件)

N.R. Beysengulov, D.G. Rees、池上弘樹、D.A. Tayurskii、河野公俊、Nonlinear Transport of the Wigner Crystal in a Confinement Geometry、International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2013)、2013年8月5日、松江

N.R. Beysengulov, D.G. Rees、池上弘樹、D.A. Tayurskii、河野公俊、Confinement effect on electron transport of Wigner solid on liquid He、The 12th Asia Pacific Physics conference (APPC12)、2013年7月18日、千葉

池上弘樹、Reentrant melting of a quasi-one-dimensional Wigner crystal、International Workshop on Nonequilibrium Phenomena in Complex Quantum Systems: from Correlated Electrons to Mesoscopic Devices、2012年4月24日、恩納村

〔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

秋元 彦太 (AKIMOTO Hikota)
独立行政法人理化学研究所・支援チーム・
チームヘッド
研究者番号：60202545