

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 27 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25610104

研究課題名(和文) 2次元超流体新規ボルテックス相の探索

研究課題名(英文) Search for new vortex phase in two-dimensional superfluid

研究代表者

檜枝 光憲 (Hieda, Mitsunori)

名古屋大学・理学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：30372527

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：水晶マイクロバランス(QCM)を使い、金基盤上ヘリウム3-ヘリウム4混合薄膜の超流動性を研究した。現状の実験範囲内では新規ボルテックス相の明確な証拠は観測されなかったが、ヘリウム3ドーピングによる超流動の異常抑制が観測された。KT繰り込み計算との定性的な比較から、ヘリウム3不純物によって量子渦の渦芯エネルギーが減少した事が有力なシナリオの一つとして考えられる。このシナリオでは温度上昇に伴い量子渦の数密度が劇的に増加するため、新たな量子渦相の創発が期待される。

研究成果の概要(英文)：We studied superfluidity of 3He-4He mixture films on gold substrate by quartz crystal microbalance (QCM). At present there were no clear evidence of new vortex phase in this experimental region. However the submonolayer superfluidity was strongly affected by the coverage of the 3He overlayer. Yet the mechanism is not been fully understood. From a qualitative comparison with a calculation of KT theory, we suggest the reduction of the superfluid vortex core energy by 3He as a possible scenario. With increasing temperature this scenario predicts a rapid increase of number density of vortex and therefore the emergence of a new quantum vortex phase is expected.

研究分野：低温物理

キーワード：KT転移 量子渦 トポロジカル欠陥 超流動 ヘリウム4

1. 研究開始当初の背景

超純粋(スーパークリーン)物質である液体ヘリウム量子流体は、物理を研究するモデル系として超流動、超固体、フェルミ液体状態、多体交換による核磁気秩序、量子乱流、量子相転移、など物性物理学の根幹を成す豊かな物理現象の研究に利用され、新しい概念を次々に生み出してきた。2次元XY系においてトポロジカル励起であるボルテックス-アンチボルテックスの対形成による新しいタイプの相転移、つまりコスタリッツ-ザウレス(KT)転移がヘリウム4薄膜の超流動転移で最初に実証された事実はその最たる例である。

このような2次元XYボルテックス-アンチボルテックス系では、KTHNY理論によってKT相(渦対相)に加え、さらに新規なボルテックス相が理論的に予見されている(Halperin, Nelson, PRL (1978))。ある理論計算によれば、ヘリウム3を不純物としてドーピングボルテックスを劇的に生成し易くする(渦芯エネルギーを小さくすると、KT相(超流動)-自由渦相(常流動)の中間に新規ボルテックス相(ボルテックス-アンチボルテックス渦格子相、ヘキサティック渦相)が出現する(Zhang, PRL (1993); Gabay PRL (1993))。しかし実験的には実証されておらず、さらなる実験的な探索が必要な状況であった。

2. 研究の目的

本研究は2次元超流体を利用し、2次元XYボルテックス-アンチボルテックス系で予見されている新規ボルテックス相を実験的に探索にチャレンジングするものである。理論的には1978年にKTHNY(Kosterlitz, Thouless, Nelson, Halperin, Young)によって提案されたが、すべての物理系を合わせても実験的には報告例が少なく極めて実証が困難な問題として現在に至っている。我々は水晶マイクロバランス法を用い、ヘリウム4薄膜にヘリウム3を不純物としてドーピングすることで2次元超流体新規ボルテックス相を実験的に探索する。新規ボルテックス相(ボルテックス-アンチボルテックス格子相、ヘキサティック渦相)の出現により段階的超流動転移が生じるかを明らかにする。

3. 研究の方法

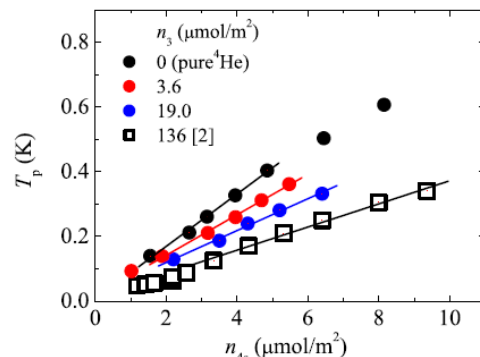
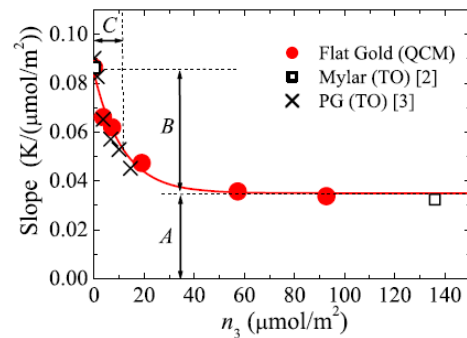
本研究は、平成25~26年の2年計画で行われ、初年度に一部の測定システムの改良を行い、希釈冷凍機を用いて30mK~1Kの温度範囲で水晶マイクロバランス(QCM)測定を行う。超流動密度及びエネルギー散逸の温度をいろいろなヘリウム3不純物ドーピング量に対して系統的な測定を行い、さらに高調波

モードの利用によって1~200MHzの高周波広帯域で測定周波数を変化した測定を実施する。超流動密度とエネルギー散逸の温度変化と超流動ボルテックスパラメータ(拡散係数、渦芯サイズ、渦芯エネルギー)の観点から、新規ボルテックス相(ボルテックス-アンチボルテックス格子相、ヘキサティック相)の探索を行う。

4. 研究成果

25年度は高周波振動子である水晶マイクロバランス(QCM)を使い、50mK~1Kにおいて主に60MHzの金基板上ヘリウム3-ヘリウム4混合薄膜の超流動性を研究した。超流動密度の異常抑制はヘリウム3ドーピング量の増加に伴い大きくなっていくが、ヘリウム3オーバーレイヤーが1layer程度に達するとこの異常は飽和する。エネルギー散逸ピーク温度のヘリウム4吸着量依存を検討し、さらに他グループで過去に研究されたマイラーやポラス金の実験データとの比較することで、基盤によらないユニバーサルな関数に載ることを見出した。KT繰り込み計算との定性的な比較から、この異常抑制効果の原因として、ヘリウム3の超流動ヘリウム4中への溶解によるヘリウム4量子流体の局在化、ヘリウム3不純物による量子渦パラメータ(渦芯エネルギー等)の変化、の2つの可能性が考えられる。特にシナリオでは、温度上昇に伴い量子渦の数密度が劇的に増加するため、新たな量子渦相の創発が期待させるものである。さらにいくつかの膜厚において周波数依存の研究を行い、渦芯サイズ、拡散係数を算出した。

26年度は前年度に引き続き、QCM実験のよ



り詳細なデータ解析を実施した。ヘリウム3の不純物効果は面密度の不均一性に起因している事が懸念されたが、不均一性を取り入れたKT線り込み計算と実験データ(超流動密度及びエネルギー散逸)との比較から、ヘリウム3ドープ後も系はほぼ均一である事が証明された。不純物効果の1つのシナリオとして超流動量子渦パラメータの1つである渦芯エネルギーが下がっている事が考えられる。現状の実験範囲内(ヘリウム3を5layer装飾以下)では新規ボルテックス相の明確な証拠は観測されなかった。今後はさらにヘリウム3を高ドープした系に対する実験に興味を持たれる。加えて、我々は新規ボルテックス相創発の新たな手段として回転希釈冷凍機を使って量子渦を導入する着想に至った。回転実験用の無酸素銅QCM実験セルを開発し予備実験を実施した結果、約1回転/秒の回転下において超流動転移の観測に成功し、今後の研究展開に新しい可能性を示した。

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 2件)

発表者: Oda, and M. Hieda,
題目: Temperature-dependent pinning or depinning of a ^3He overlayer in a 3He - 4He mixture film
発表誌: Phys. Rev. Lett. 111, 106101 (2013).
DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.106101

発表者: H. Yamaguchi, T. Oda, M. Hieda, T. Matsushita, and N. Wada,
題目: ^3He effect on 2D superfluidity in 3He - 4He mixture films on planar gold
発表誌: J. Low Temp. Phys. 171, 650 (2013).
DOI: 10.1007/s10909-012-0792-3

[学会発表](計 6件)

発表者: 田中春奈, 山口寛, 檜枝光憲, 松下琢, 和田信雄
題目: 金基板上 4He 薄膜 KT 超流動の面密度分布線り込み計算による研究
学会: 日本物理学会 2013 年秋季大会 [物性]
場所: 徳島大学常三島キャンパス
日時: 2013 年 9 月 25 日-28 日

発表者: 小田拓也, 檜枝光憲
題目: 3He - 4He 混合薄膜中 3He オーバーレイヤーのピンニング-ディピンニング
学会: 日本物理学会第 69 回年次大会

場所: 東海大学湘南キャンパス
日時: 2014 年 3 月 27 日-30 日

発表者: M. Hieda, H. Yamaguchi, H. Tanaka, T. Matsushita, and N. Wada
題目: Submonolayer Superfluidity of 4He Films on Planar Gold
学会: International Symposium on Quantum Fluids and Solids, QFS2013
場所: KUNIBIKI MESSE, Matsue, Japan
日時: August 1-6, 2013

発表者: J. Taniguchi, T. Mouri, M. Suzuki, M. Hieda, and T. Minoguchi
題目: Competition between superfluid overlayer and mobile solid layer of 3He - 4He mixture films on porous gold
学会: International Symposium on Quantum Fluids and Solids, QFS2013
場所: KUNIBIKI MESSE, Matsue, Japan
日時: August 1-6, 2013

発表者: 小田拓也、檜枝光憲
題目: 3He - 4He 混合薄膜中 3He オーバーレイヤーのピンニング-ディピンニング
学会: 物性研短期研究会「スーパーマターが拓く新量子現象」
場所: 東京大学 物性研究所
日時: 2014 年 4 月 17-19 日

発表者: M. Hieda and T. Oda
題目: Pinning or Depinning of A 3He Overlayer in A 3He - 4He Mixture Film
学会: The 27th International Conference on Low Temperature Physics, LT27
場所: Palais Rouge, Buenos Aires, Argentina
日時: August 6-13, 2014

[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]
ホームページの URL:
<http://ult.phys.nagoya-u.ac.jp/>

6. 研究組織
(1)
研究代表者
檜枝 光憲 (HIEDA MITSUNORI)

名古屋大学・大学院理学研究科・講師
研究者番号：30372527

(2)
研究分担者無し

(3)
連携研究者無し