

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24654110

研究課題名(和文)超流動ヘリウムにおける電場・磁場・流れ場の交差相関と人工ゲージ場

研究課題名(英文)Cross correlations of electric, magnetic and flow fields in superfluid helium

研究代表者

白濱 圭也 (Shirahama, Keiya)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：70251486

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)：本研究は、超流動ヘリウム4に対して静電場と静磁場を用いて「人工ゲージ場」を生成する方法を提案・実証し、超流動の新しい物理を開拓するものである。超流動体では電場・磁場・流れ場に「交差相関」の存在が予想され、例えば静電場Eと静磁場Hを直角に与えると $E \times H$ に比例する超流動速度 v_s が生じうる。これを実験的に検証することを目標として掲げた。研究期間内に、超流動流検出用捻れ振り子の製作、回転クライオスタットの開発と、ナノ多孔体中4Heへの電場効果の探索を行った。今後これらの装置により、電場・磁場でつくられる超流動流を、超流動ヘリウム特有の音波である第二音波のドップラーシフトにより検出することを試みる。

研究成果の概要(英文)：This work aims at producing an artificial gauge field in superfluid 4He by static electric and magnetic fields. In neutral superfluids one may expect cross-correlation effects of electric, magnetic, and superflow fields (E , H , v_s): e.g. v_s is produced by $E \times H$. In order to study such cross correlation effects, we have constructed a rotating cryostat in which electric and magnetic fields can be applied under rotation of the apparatus, and a torsional oscillator device for detection of superfluidity. We try to detect superflow induced by $E \times H$ using the Doppler shift of superfluid second sound.

研究分野：物性II

科研費の分科・細目：超低温・量子凝縮系

キーワード：物性実験 低温物性 超流動 ゲージ場 ヘリウム 交差相関

1. 研究開始当初の背景

超流動ヘリウム(^4He)は物性物理学の重要な研究対象であり、その物性は高度な理解に達している。近年、申請者を中心とした研究によって、ナノスケール化した ^4He が量子相転移を示すなど、 ^4He が強相関ボース粒子系としての側面を持つことが明らかになり、大きな発展が期待されている。

超流動 ^4He は電気的に中性でスピンも持たないため、その物性はほとんど熱的・力学的な実験手段で解明されてきた。このため同じ現象である超伝導に比べ、実験研究が常に立ち後れ、超流動の物理的理解を妨げる要因となってきた。もし超流動 ^4He に対して固体中電子のような電磁場応答が存在すれば、従来の中性量子流体とは全く異なる視点での実験が可能になり、物性物理学に新たなパラダイムを生み出すことは間違いない。

中性超流体に対して電磁応答は存在するだろうか？ 実は超流動 ^4He に直角に交差する静電場と静磁場を印加すると、電場磁場の外積方向に超流動の流れが発生することが、1978年にShevchenkoやGinzburgにより提案された。この理論は90年代にWilkinsらにより再発見され、ボース凝縮体における幾何学的位相(ベリー位相)の生成に伴う現象であることが示された。これらの理論の実験による検証は、これまで全くなかった。この電磁場効果が観測されれば、電気的に中性なヘリウムでローレンツ力に対応する力を創出することが可能になり、超流動 ^4He に内在する新しい量子効果の発見をもたらすと期待される。

2. 研究の目的

本研究では、上記の背景・動機に基づき、以下の実験を行って超流動 ^4He に対する新しい電磁場効果の検証・人工ゲージ場の生成を試みる。

- (1) 超流動 ^4He に静電場 \mathbf{E} と静磁場 \mathbf{H} を直角に印加し、外積 $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ の方向に発生する超流動速度場 \mathbf{v}_s を観測する。
- (2) 回転する超流動 ^4He に生じる量子渦格子状態に静磁場を印加し、量子渦の周囲に放射状に発生する電気分極の観測を試みる。

3. 研究の方法

交差相関効果の観測に向けて、以下の3つの実験及び装置開発を進めた。

- (1) 第二音波のドップラー効果を利用した超流動流速測定装置の開発
- (2) ナノ多孔体中超流動 ^4He に対する静電場効果の探索
- (3) ダイレクトドライブモータを使用したコンパクトな回転クライオスタットの開発

以下それぞれの研究方法について述べる。

- (1) 交差静電磁場下で超流動流を観測するための簡単で新しい手法として、円環容器中超流動 ^4He の第二音波定在波のドップラーシフトの観測手法の開発を行った。この技術は研究代表者の研究室で行われた、ポーラスアルミナナノポアアレイ中ヘリウムの超流動特性の測定から生まれたものである。ポーラスアルミナ板で間仕切りをした円環容器を捻れ振動子に装着し、円環軸の周りにねじれ振動させることで、多数の第二音波定在波を励起させることに成功した(発表論文³⁾)。円環に超流動流が発生すると、時計・反時計回りの第二音波進行波にドップラー効果が生じて、定在波の二重縮退が解けて共振周波数が分離すると期待される。下記(3)で開発した回転クライオスタットと組み合わせて、超流動流速に対するドップラーシフト量の校正を、クライオスタット全体を一定速度で回転させて行うことで、流速測定装置として完成する。

- (2) 超流動ヘリウムに強い静電場を印加する技術を確認することを目的として、孔径2.5nmのナノ多孔質ガラス中超流動 ^4He の転移温度に対する静電場効果の探索を行った。これは上記の実験と独立に、平行平板コンデンサ中に多孔質ガラスを挿入したねじれ振り子装置を製作し、希釈冷凍機温度で実験を進めた。

- (3) 上述の第二音波を用いた超流動流検出実験、および研究の目的(2)の静磁場中電気分極の観測における量子渦格子の生成用として、回転クライオスタットの開発を行った(学会発表⁵、⁶)。目標到達温度を1.5K、目標回転速度を毎秒1回転とし、クライオスタット本体及びデューワー、測定用エレクトロニクスとコンピュータを直径120cmの円盤に載せ、全体を下部に設置したダイレクトドライブモータで回転させるという方式を提案した。構造が単純かつコンパクトで扱いやすく、手軽に実験を行えるのが特徴となっている。

4. 研究成果

- (1) 第二音波のドップラー効果を利用した超流動流速測定装置の開発
ポーラスアルミナ板で仕切った円環流路を持つねじれ振り子の製作を行い、第二音波の定在波共鳴が十数個の鋭いモードとして励起されることを確認した。これらの共鳴に対するモードの同定を行った(発表論文³⁾)。
- (2) ナノ多孔体中超流動 ^4He に対する静電場効果の探索
ナノ多孔質ガラス中 ^4He の超流動特性

に対する静電場効果を、平行平板コンデンサを挿入したねじれ振り子を製作し、希釈冷凍機温度(25mK以上)で調べた。ねじれ振り子が電場印加用コンデンサを挿入した複雑な構造を持つため、振り子の動作特性(振動の Q 値および周波数安定度)に問題があり、電場効果の検出には至っていない。現在、いくつかの問題点を解決し、動作特性を大幅に改善したねじれ振り子を再度製作中である。これを用いて電場効果の探索を進めていく。

(3) コンパクトな回転クライオスタットの開発

回転クライオスタットを製作設置し、動作テストを行った。また、専用のクライオスタットインサートを自作し、動作テストを行った(学会発表⁵、⁶)。現在、第二音波ドブラー効果検出用ねじれ振り子を装着して、実験を行おうとしているところである。

以上、装置開発準備は順調に進んできており、交差相関効果の観測に向けた本格的な実験を開始する段階にある。

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4件)

¹ Aaron M. Koga, Yoshiyuki Shibayama, Keiya Shirahama
Discontinuous Growth of Solid ⁴He on Graphene
Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 82, 093601 1-4 (2013).
DOI:10.7566/JPSJ.82.093601
査読有り

² Hitomi Yoshimura, Rama Higashino, Yoshiyuki Shibayama, Keiya Shirahama
Anomalous Response of ⁴He Confined in Nanoporous Media to Torsional Oscillation
Journal of Low Temperature Physics, Vol. 169, 218-227 (2012)
DOI: 10.1007/s10909-012-0687-3
査読有り

³ S. Murakawa, R. Higashino, K. Yoshimura, Y. Chikazawa, T. Tanaka, K. Kuriyama, K. Honda, Y. Shibayama, Keiya Shirahama
Torsional oscillator experiment on superfluid ⁴He confined in a porous alumina nanopore array
Journal of Physics C:Conference Series, Vol.400, 012053 1-4 (2012)
DOI:10.1088/1712-6596/100/1/012053

査読有り

⁴ Kouetsu Komatsu, Toshiaki Kobayashi, Junko Taniguchi, Masaru Suzuki, Keiya Shirahama
Anomalous suppression of superfluidity for ⁴He in Gelsil Glass
Journal of Physics C: Conference Series Vol. 400, 012048 1-4 (2012)
10.1088/1742-6596/400/1/012048
査読有り

[学会発表](計6件)

¹ 村川智,田中智也,大澤康平,中原亮,本多謙介,白濱圭也
ナノポアアレイ中の超流動⁴Heの流れと散逸
日本物理学会第69回年次大会
東海大学平塚キャンパス、2014年3月30日(口頭発表)

² 立木智也,高橋大輔,村川智,河野公俊,白濱圭也
DC 回転印加に対する多孔質中固体ヘリウムの応答
日本物理学会第69回年次大会
東海大学平塚キャンパス、2014年3月30日(口頭発表)

³ Aaron M. Koga, Yoshiyuki Shibayama, Keiya Shirahama
Discontinuous Growth of Solid ⁴He from the Superfluid Phase on Graphene Nanoplatelets
International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2013)
松江市くにびきメッセ、2013年8月5日(招待講演)

⁴ S. Murakawa, T. Tanaka, K. Osawa, A. Nakahara, K. Honda, Y. Shibayama, Keiya Shirahama
Superfluid flow and dissipation of ⁴He confined in a well-controlled nanopore array
International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2013)
松江市くにびきメッセ、2013年8月3日(招待講演)

⁵ 白濱圭也, 谷口真章
DD モータを用いたコンパクトな回転クライオスタットの開発
日本物理学会2012年度秋季大会
横浜国立大学、2012年9月21日(口頭発表)

⁶ Keiya Shirahama, Masaaki Taniguchi
A Compact Rotating Cryostat for Superfluid ⁴He Studies

International Symposium on Quantum
Fluids and Solids (QFS2012)
Lancaster University, 2012年8月18日(ポ
スター発表)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

白濱 圭也 (SHIRAHAMA, Keiya)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：70251486