

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：32612
研究種目：挑戦的研究（萌芽）
研究期間：2021～2023
課題番号：21K18607
研究課題名（和文）ヘリウムスピントロニクスの開拓

研究課題名（英文）Helium Spintronics

研究代表者

白濱 圭也（Shirahama, Keiya）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・教授

研究者番号：70251486

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、核スピン1/2を有する液体ヘリウム3と固体中電子の結合系を創成し、ヘリウムスピントロニクスという新分野の開拓を目指すものである。白金の容器壁に沿って液体ヘリウム3を流すと、速度勾配による渦度が核スピン流に変換されると期待される。このスピン流が白金壁に浸入することで生じる逆スピンホール電流の観測を試みる。これまでに、スピンホール電流測定が可能な白金壁を有する超流動特性測定用ねじれ振動子の開発を行った。また貫通スリット構造を利用した流れ実験で、超流動ヘリウム4の量子渦による多重位相スリップ現象を観測した。これらの実験により、中性超流動体の電気的位相制御を目指す。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、量子液体・強相関係としての液体ヘリウムをスピントロニクスの研究対象と考え、その実験手法の開発を試みるものである。液体ヘリウムの研究は、物理学における多様な基本概念の確立に重要な貢献をなしてきた。ヘリウム3が核スピン1/2を有することから、ヘリウム3中のスピンの流れースピンの流れーを金属壁内の電子に転送し、電気的に中性なヘリウムの性質を電気的に研究・制御する画期的な方法を生み出すことを目的とする。本研究は超流動を始めとする量子物質の理解に貢献するだけでなく、液体ヘリウムを用いた新しい量子デバイスにも発展する可能性を有している。

研究成果の概要（英文）：This study aims to create a coupled system of liquid helium-3 with and electrons in the solid wall of the liquid container. It will open up the new field of helium spintronics. When liquid helium-3 flows along a wall of metal, say platinum, the vorticity due to the velocity gradient in liquid is generated, and it may be converted to spin current of ^3He . We will attempt to observe the inverse spin Hall currents generated by the penetration of the ^3He spin current into the metal wall. We have developed a torsional oscillator for measuring superfluid properties with a platinum wall that enables to measure inverse spin Hall current. In a preliminary flow experiments using liquid ^4He in a microslit structure, we have observed multiple phase-slip phenomena caused by quantized vortices. Developing these experiments, we aim to realize controlling quantum phase of neutral superfluids by electric means.

研究分野：低温物理学

キーワード：物性物理 スピントロニクス 低温物性 量子流体固体 ヘリウム ヘリウム3 スピン流 白金

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

液体ヘリウムは量子液体として、物理学の重要な研究対象となってきた。ボース及びフェルミ同位体の⁴Heと³Heが示す2種類の超流動は、ボース・アインシュタイン凝縮と異方的超流動の典型として研究され、その過程で素励起、フェルミ液体、p波三重項超流動といった物理学に変革をもたらす重要概念が次々と生まれた。近年は特に液体⁴Heの量子乱流と、³Heではトポロジカル超流動が、大きな注目を集めている。

しかし、一般にヘリウムでこれらの新奇的な性質を実験で調べることは容易でない。その最大の理由はヘリウムが電氣的に中性で、固体中電子系のような多体系に対する実験手法が適用できないためである。本研究は、このような実験的困難を解決するために考案された。

2. 研究の目的

本研究は、過去20年以上にわたって発展してきたスピントロニクスの実験手法を液体ヘリウムに適用して、これまで観測し得なかったヘリウムの新奇的な性質を明らかにする研究手段を確立しようとするものである。特に近年、スピン角運動量の流れ「スピン流」と、電流、熱流、回転場との変換が実証され、スピントロニクスが磁性だけでなく様々な物理現象の研究手段として発展していることに着目する。

液体³Heは核スピン1/2を持ち、常流動(フェルミ液体)と超流動状態の両方でスピン流を生じる。また液体⁴Heはスピンを持たない磁氣的にも不活性な粒子だが、³Heを混合した超流動⁴Heではスピン流を生じうる。本研究では、³Heがつくるスピン流を容器金属壁中の電流で検出してトポロジカル超流動や量子乱流の情報を電氣的に取得する方法を開発する。さらに将来、その逆過程を実現することで超流動体の電氣的制御という夢の実現を目指す。

3. 研究の方法

本研究の目標は、³Heから金属壁中電子へのスピン流を電氣的に検出することである。実験では、最初に常流動液体³Heを使用する。図1のように金属壁に沿って液体³Heが流れるとき、粘性による壁垂直方向の速度勾配のため、渦度(流体の回転)が発生する。渦度と³Heスピン間にはスピン回転結合があるため、壁面直方向にスピン流が生じる。スピン流は界面を通過して金属中にスピン拡散長(約10nm)の程度しみ出す。このとき「逆スピンホール効果」により壁面に電流(管に端があるときは電位差)が生じる。これを検出して、³Heスピン流の生成と金属壁への転送を検証する。

金属壁には、スピン軌道相互作用が大きい白金を用いる。堤の理論[1]によると、白金管中の液体³Heに圧力勾配 ΔP により流れを作ると、両端の電位差 ΔV は $0.1\Delta P$ nV/Paと得られ、 ΔP を1~100 Pa/cmにとれば十分検出可能である。本研究ではまず常流動³He(1-100mK)でこの電位差を測定し、これを超流動状態(約1mK以下)にも拡張する。また、³He-⁴He混合液にも本研究手法を適用できる。

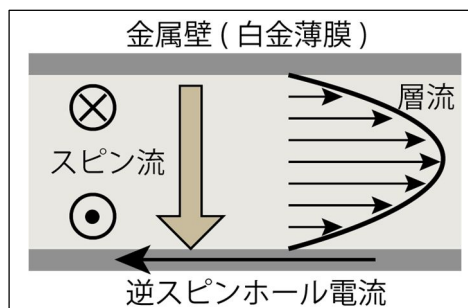


図1: 本研究の概念図。白金薄膜で壁面をコートしたパイプや平行平板中に液体³Heを流すと、速度勾配により生じる渦度が核スピン流(◎の向きがスピンの向きに対応)に変換される。白金へのスピン流のしみ出しにより生じた逆スピンホール電流を観測してスピン流の検出を行う。

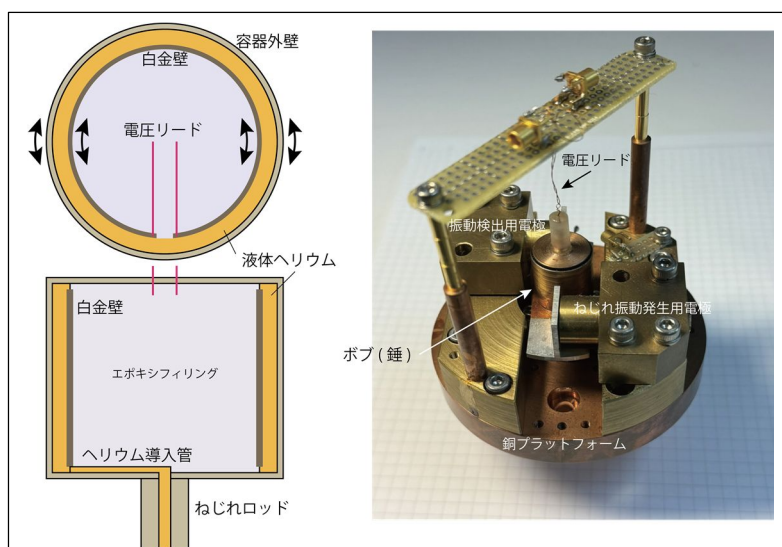


図2: 振動流(スピン流)誘起ねじれ振動子。(左)ねじれ振動子の断面概略図。金属(BeCu)容器に液体³Heが入る円環空間を設ける。内側の壁を白金膜で覆い、ねじれ振動により誘起される両端の電位差を測定する。(右)実際の装置の外観写真。中央にねじれ振動子ポブがあり、2対の平行平板電極で静電的にねじれ振動を駆動検出する。

4. 研究成果

当初の研究計画では、(a)水晶マイクロバランス、(b)サブミクロンスリット中振動流、(c)熱対向超流動流の3種類の実験においてスピンの検出を計画したが、現有実験設備の状況を検討し、(a)と同様の手法である、ねじれ振動子による振動流誘起スピン流の検出と、(b)貫通スリット構造中振動流によるスピン流検出装置、の2つを準備した。振動流実験を行うのは、液体³Heの一方向流をつくることは簡単でなく、むしろ壁面を振動させて実効的な振動流を作るのが容易なためである。この場合検出される逆スピンホール電流は交流電圧として検出される。

(1) ねじれ振動子による振動流誘起スピン流検出装置の開発

図2に示すようなねじれ振動子を製作した。振動子はBeCuねじれロッドと円柱状のポブ(錘)部分からなる。円柱の内部に幅 $0.5 \times 12 \text{ mm}$ の円環状空間があり、液体³Heはロッド内部を通して導入される。円環の片側内壁に厚さ $5 \mu\text{m}$ の白金箔を貼り付け、容器の微小回転振動による渦度誘起逆スピンホール電流を、箔両端の電位差測定より検出する。

現在までに装置製作を終え、今後冷凍機に搭載して性能確認を行う予定である。

(2) 貫通スリット構造中振動流誘起スピン流検出装置の開発

上述のねじれ振動子中の円環空間の幅は、³Heの粘性(温度域)にもよるが、ある程度狭いことが望ましい。しかし均一に狭くして様な流速勾配を持つ流れを作ることは難しいので、貫通スリット構造と呼ばれる微細構造を用いる実験手段を提案してきた。その方法の概略を図3に示す。二重のヘリウム容器において隔壁にスリット状の貫通孔を設け、孔内を薄い白金膜で覆う。容器壁をダイヤモンドにして静電的に振動させて圧力差をつくり、貫通孔内に振動流を発生させる。振動流により生じたスピン流を上記の方法で検出する。

本実験の予備実験として、核スピンを持たない液体⁴Heを用いて超流動特性の測定を行った[2]。測定には厚さ $50 \mu\text{m}$ のシリコンウェハに $2 \times 100 \mu\text{m}$ の細長い貫通スリットを開けた試料を使用した。その結果、超流動流が量子渦による位相スリップで減衰する振る舞いを明瞭に観測することに成功した。超流動臨界流における量子渦誘起位相スリップの観測は過去に短い細孔で観測された例がいくつかあるが、今回 $100 \mu\text{m}$ 程度の長い流路で観測に成功したことは、液体³Heにおいても振動流を精密に制御してスピン流を検出できることを示唆する成果である。また、量子渦が流れを横切る様子を観測できたことで、当初の研究計画の一つに掲げていた³He-⁴He混合液を用いた量子渦芯中³Heスピンの効果も高い精度で調べることが可能となった。

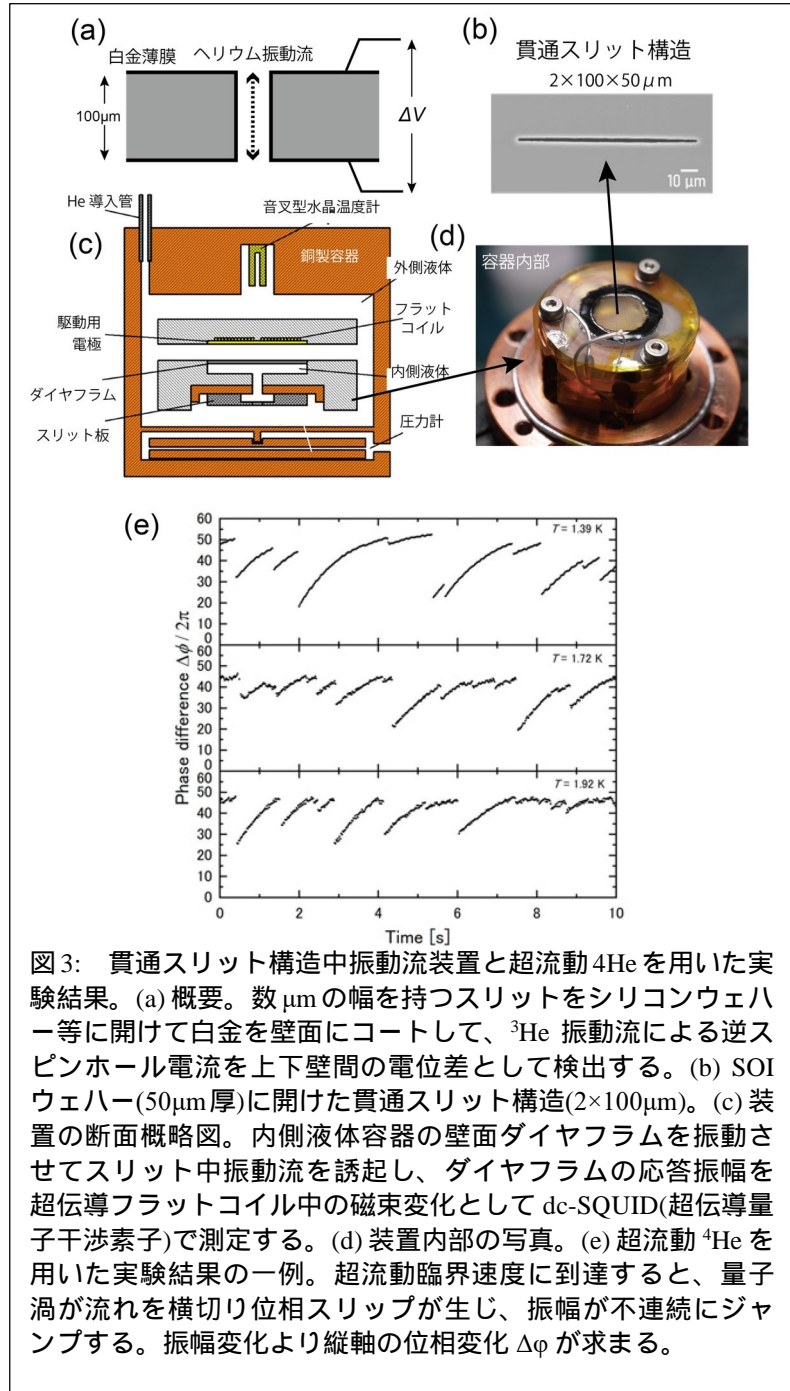


図3: 貫通スリット構造中振動流装置と超流動⁴Heを用いた実験結果。(a)概要。数 μm の幅を持つスリットをシリコンウェハ等に開けて白金を壁面にコートして、³He振動流による逆スピンホール電流を上下壁間の電位差として検出する。(b)SOIウェハ($50 \mu\text{m}$ 厚)に開けた貫通スリット構造($2 \times 100 \mu\text{m}$)。(c)装置の断面概略図。内側液体容器の壁面ダイヤモンドを振動させてスリット中振動流を誘起し、ダイヤモンドの応答振幅を超伝導フラットコイル中の磁束変化としてdc-SQUID(超伝導量子干渉素子)で測定する。(d)装置内部の写真。(e)超流動⁴Heを用いた実験結果の一例。超流動臨界速度に到達すると、量子渦が流れを横切り位相スリップが生じ、振幅が不連続にジャンプする。振幅変化より縦軸の位相変化 $\Delta\phi$ が求まる。

(3) 金属壁の作成方法について

本研究では、ヘリウム流路の壁を白金薄膜で作ることが課題となる。上記(a)、(b)の方法ともに、絶縁体容器壁でかつ入り組んだスリット構造にも白金コーティングが可能な無電解白金メッキ法を採用して、100nm オーダーの厚みをもつ白金薄膜を作成することを検討してきた。現時点ではメッキ設備が未準備であるため行えていないが、今後迅速に準備して実験を進めていく予定である。

参考文献

[1] Y. Tsutsumi and S. Maekawa, Generation of Effective Field Gradient and Spin Current by a Flow of Liquid Helium-3, *Journal of Low Temperature Physics* 203, 255-261 (2021); 前川禎通、堤康雅、スピントロニクス 第8章、日本評論社(2019).

[2] Tomoyuki Tani, Kohei Kaiya, Ryoma Wada, Satoshi Murakawa, Yusuke Nago, Keiya Shirahama, in preparation.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tani Tomoyuki, Nago Yusuke, Murakawa Satoshi, Shirahama Keiya	4. 巻 208
2. 論文標題 ⁴He in Nanoporous Media: 4D XY Quantum Criticality at Finite Temperatures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 449 ~ 456
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-022-02742-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tani Tomoyuki, Nago Yusuke, Murakawa Satoshi, Shirahama Keiya	4. 巻 91
2. 論文標題 4D-XY Superfluid Transition and Dissipation in ⁴He Confined in Nanoporous Media	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 014603 1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.014603	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Leo Maximov, Nico Huber, Andreas Bauer, Yusuke Nago, Keiya Shirahama, and Christian Pflleiderer
2. 発表標題 Development of a nuclear adiabatic demagnetization stage using PrNi5 as cooling medium
3. 学会等名 International Conference on Magnetism 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 谷智行、和田龍馬、海谷航平、永合祐輔、村川智、白濱圭也
2. 発表標題 マイクロ流路中ヘリウム4超流動流の多重位相スリップ現象
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 白濱圭也
2. 発表標題 制限空間中超流動ヘリウムにおける量子渦系による多重位相スリップ
3. 学会等名 第29回渦系物理ワークショップ
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Keiya Shirahama
2. 発表標題 Multiple phase-slip phenomenon in 4He superflow through a well-defined microchannel
3. 学会等名 International Conference on Quantum Fluids and Solids 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Keiya Shirahama
2. 発表標題 4D XY Quantum Criticality in 4He Confined in Nanoporous Media
3. 学会等名 29th International Conference on Low Temperature Physics (LT29) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toyoyuki Tani, Ryoma Wada, Kohei Kaiya, Yusuke Nago, Satoshi Murakawa, Keiya Shirahama
2. 発表標題 Observation of Phase Slippage in 4He Superflow through a Newly Developed Microslit
3. 学会等名 29th International Conference on Low Temperature Physics (LT29) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Leo Maximov, Nico Huber, Andreas Bauer, Keiya Shirahama, and Christian Pfleiderer
2. 発表標題 Development of a miniaturized, modular, nuclear demagnetization stage
3. 学会等名 DPG Spring Meeting of the Condensed Matter Section (SKM) 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Keiya Shirahama
2. 発表標題 4He Confined in Nanoporous Media: 4D XY Criticality at Finite Temperatures
3. 学会等名 International Conference on Quantum Fluids and Solids 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoyuki Tani, Yusuke Nago, Satoshi Murakawa, Keiya Shirahama
2. 発表標題 4D XY Quantum Criticality of Superfluid 4He confined in Gelsil Glass
3. 学会等名 International Conference on Quantum Fluids and Solids 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Shirahama Group http://www.phys.keio.ac.jp/guidance/labs/sirahama/sirahama-lab-jp.html
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------