

令和 元年 9 月 13 日現在

機関番号：12612

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2016～2018

課題番号：15KK0154

研究課題名（和文）ナノ細孔中4Heを用いた1次元特有の動的な超流動応答の実験的解明（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Experimental study on dynamic superfluid response of 4He confined in 1D nano-channel(Fostering Joint International Research)

研究代表者

谷口 淳子 (Taniguchi, Junko)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号：70377018

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 9,500,000円

渡航期間： 9ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、“細孔軸方向に特化した”超流動流の測定を可能にするために、新しい超流動計の開発を行った。大きく分けて（1）ナノヘルムホルツ共鳴器の高周波化、（2）擦れ振り子による垂直配向性多孔質膜内4Heの超流動性の確認、を行った。（1）では、共同研究先（アルバータ大、カナダ）で、ナノヘルムホルツ共鳴器の設計・試作を行い、従来の擦れ振り子に比べ、一桁以上高い共鳴周波数を実現することができた。（2）では、低圧ではナノ細孔内に超流動が出現することが確認できた。今後、ナノヘルムホルツ共鳴器に配向したナノ細孔を直接合成する技術を開発できれば、1次元超流動の実験的研究が飛躍的に進むことが期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今回の国際共同研究は、日本とカナダ、両国の量子流体研究の強みを活かした物であった。本研究結果により可能となった、ナノヘルムホルツ共振器による観測周波数の制御、および、配向性多孔質膜内での超流動応答の発現、は今後、1次元超流動の理解・制御を飛躍的に推進させることが予想される。さらに、本研究により確立された測定手法は、1次元超流動だけでなく、2次元系その他の量子臨界領域の動的な物性の研究に応用することができ、低次元量子系の研究の発展に寄与するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：4He confined in a nanometer-sized channel is a promising system to study the superfluidity of the 1D Bosonic Tomonaga-Luttinger (TL) liquid. The dynamical theory based on TL liquid model predicts that the superfluid onset strongly depends on measuring frequency. The purpose of this research is to develop a new superfluid detector which can detect the superflow along the channel at various measuring frequencies. We fabricated nano-Helmholtz resonators at the J. H. Davis lab. (University of Alberta). By decreasing the cavity size of the resonators, we succeeded in elevating the resonance frequency one order of magnitude higher than that of the conventional torsional oscillator. We also tried the torsional oscillator measurements for 4He in a new oriented porous membrane and confirmed the existence of superfluid response. By attaching this membrane to the fabricated resonators, the detailed study on the superfluid response specific to 1D system will be possible.

研究分野：量子流体・固体

キーワード：低次元系 超流動 朝永 ラッティンジャー液体

様式 F - 19 - 2

1. 研究開始当初の背景

1次元量子多体系の物理は、その強い量子揺らぎのため物性物理の中心的な課題の一つとなっている。特に1次元フェルミ系は朝永-ラッティンジャー(TL)液体として振舞うことが理論的に予測され、すでに電子系や冷却電子気体での実験的研究が進んでいる。申請者は、1次元ナノ細孔に閉じ込めた液体 ^4He が新たな1次元ボーズ系の研究の舞台となることに着目し、1次元系超流動の特徴の一部を実験的に捉えていた。

一方、理論面からは、細孔の軸方向と方位角方向とでは超流動転移温度が異なり、1次元系特有の動的な特性は、軸方向でより顕著に現れるという指摘がなされた。超流動応答の周波数依存を、軸方向と方位角方向で分離して観測することができれば、1次元超流動の理解は飛躍的に進むことが期待される。しかし、従来用いられてきた粉状試料と捩れ振り子法の組み合わせでは、両者の分離は原理的に不可能であり、新たな測定技術の開発が喫緊の課題となっていた。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、ナノ細孔の軸方向の超流動流のみを観測することが可能な超流動計(新超流動計)を開発することである。

3. 研究の方法

新超流動計の基本構成は、ヘルムホルツ共鳴器の開口部に垂直配向性メソポーラス膜を配したものとなる(図1)。メソポーラス膜のナノ細孔中で超流動成分が生じている時のみ共鳴が起こり、共鳴周波数の変化から超流動成分を検出する。従来のねじれ振り子と同程度から一桁上の周波数領域で共鳴を起こすには、共鳴器空洞部の内容積をナノリットルオーダーにする必要がある。さらに、共鳴駆動・検出用キャパシタの電極間距離を数100nm程度にしなければならない。新超流動計の実現に向け、以下の2つの開発・研究を行った。

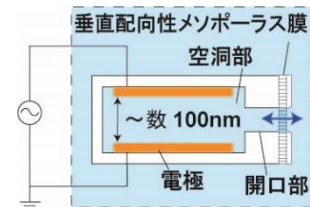


図1: 新超流動計の概略

1. ナノヘルムホルツ共鳴器の高周波数化

ナノメカニクスをいち早く量子流体の研究へ応用し、すでにナノヘルムホルツ共鳴器による3次元超流動の観測に成功している、J. H. Davis (Univ. of Alberta, Canada) 研究室に9ヶ月滞在し、ナノヘルムホルツ共鳴器の共鳴周波数の高周波数化に向けて、小型の共鳴器の設計・微細加工を行った。

2. 従来の手法であるねじれ振り子法による垂直配向性多孔質膜内 ^4He の超流動性の確認

細孔軸方向の超流動流を観測するため本実験では細孔試料として垂直配向性多孔質膜を用いた(図2)。(茨城大学山口央先生に合成・提供していただいた。)これは、多孔質アルミナ膜のガイド孔(孔径0.1 μm)内にナノ細孔を合成する事で、ナノ細孔(孔径 $\sim 3\text{nm}$, 細孔長 $5\sim 20\ \mu\text{m}$)を膜に対して垂直方向に配向させたものである。従来用いてきた粉状試料FSM(孔径2.8 nm, 細孔長0.2-0.5 μm)と形状が異なるため、まず、多孔質膜内に閉じ込めた ^4He において超流動応答が出現するのかを確認する必要がある。そこで、トーラス状(断面 $1.0\times 3.0\text{mm}^2$)の試料容器に、ナノ細孔の軸方向とねじれ振動の方向が一致するように設置したねじれ振り子を製作した。ナノ細孔内の ^4He が常流動の時は、円筒容器内の全ての ^4He がねじれ振動に追従する。一方、ナノ細孔内の ^4He が超流動になると、円筒容器内の一部の ^4He がナノ細孔内を流れ、ねじれ振動に追従しなくなるため、共振周波数が上昇する。この共振周波数の変化から、細孔内の超流動流を検出できる。

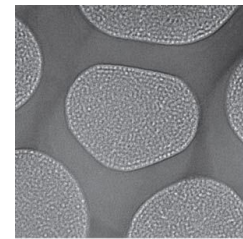


図2: 垂直配向性多孔質膜 (A. Yamaguchi et. al Nat. Matt., 3, 337, 2004)

4. 研究成果

この節では、研究方法の1. ナノヘルムホルツ共鳴器の高周波数化、2. 垂直配向性多孔質膜内 ^4He の超流動の観測、に分けて、それぞれの研究成果について述べる。

4. 1: ナノヘルムホルツ共鳴器の高周波数化

共鳴周波数を高周波数化するには、共鳴空洞部を小さくする必要がある。まず、空隙部の半径を変化させたときの共鳴周波数のシミュレーションを行った。その結果、図3に示すように、空隙部の半径を6 mmから1 mmまで小さくすることで、共鳴周波数は300 Hzから20 kHzまで二桁に渡って変化することが予想された。そこで、図3中に赤点で示したサイズの共鳴器を加工・作製した。

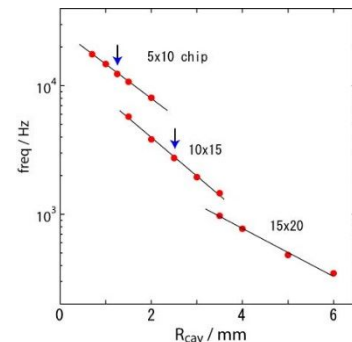


図3: 共鳴周波数の空洞部半径に対する計算結果

共鳴周波数が設計の通りに上昇したかを確認するため、青矢印で示した共鳴器を1 K 冷凍機に設置し、予備的な測定を行った。図4に0.1 MPaにおける観測結果を示す。共鳴空洞部の半径を小さくすることにより、13 kHz程度の共鳴周波数が得られることが確認できた。また、恒温におけるQ値は、3 kHzのものに比べ改善しており、より高感度な超流動観測が期待できる。この観測結果から、ナノヘルムホルツ共鳴器の小型化により、従来の抜け振り子では実現できなかった高い周波数領域での超流動観測が可能であることが明らかになった。これまで、超流動の実験的観測はほぼ、抜け振り子（～kHz台）と超音波（～MHz台）に限定されていたが、本研究により、その間の周波数領域での観測への道が開拓された。量子揺らぎの大きい低（1）次元系の超流動の振舞いを明らかにするには、広い周波数領域での研究が必要不可欠であり、本研究の成果はそのブレイクスルーとなりうる。今後は、作製した他のナノヘルムホルツ共鳴器の共鳴周波数・Q値を調べ、どのような周波数範囲での測定が可能かを正確につめていく予定である。また、ナノヘルムホルツ共鳴器にナノ細孔を直接合成する手法の開発を進めていきたい。

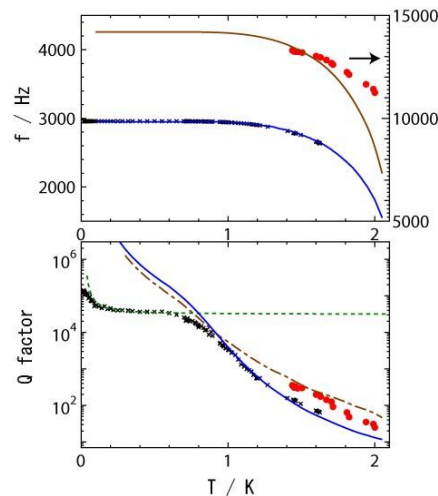


図4：共鳴周波数の温度変化

4.2：垂直配向性多孔質膜内⁴Heの超流動の観測

製作したねじれ振り子の共振周波数は2.3 kHzと、従来用いていたねじれ振り子と同程度であった。また、試料容器が空の時のQ値は 3.0×10^5 で、ナノ細孔内の超流動流による共振周波数の変化を検出するのに十分な高さであった。このねじれ振り子を用いて、0.2, 1.7 MPaの2つの圧力条件の下、超流動の観測を試みた。当初、バルク⁴Heの超流動転移温度 T_λ 直下では、周波数の上昇は見られないと予想していた。しかし、実際には、周波数の上昇が観測された。これは、垂直配向性多孔質膜 抜け振り子内壁間、または、多孔質膜内に μ mサイズの流路が残っていたことを意味する。今後、あらかじめ多孔質膜のインピーダンスを確認できるよう、測定系の改良を行う必要があると考えている。

一方、0.2 MPa下では、0.6 Kにおいて、第二音波の共鳴が観測された。（図5中、赤×印で示す。）第二音波とは、超流動成分と常流動成分が対抗して流れる、超流動に特有の音波である。この結果は、配向性多孔質膜中のナノ細孔に超流動が出現していることを示唆している。さらに、ねじれ振り子の振動速度（振幅）に対する変化を調べたところ、58 nm/s以上では第二音波の共鳴が観測されなかった。これは、1次元的な超流動応答において、臨界速度が非常に小さい可能性を示唆している。このような第二音波は、1.7 MPaでは、最低温度（60 mK）まで観測されなかったことから、1.7 MPaではすでにナノ細孔内の超流動が消失している可能性が考えられる。

図5は、従来用いていた粉状試料（孔径 $D=2.8$ nm、孔長 $l=0.2-0.5$ mm）における超流動オンセット T_c を圧力-温度相図に示したものである。バルクの3次元的な超流動転移温度 T_λ に比べ非常に強く抑制されていることが分かる。それに、今回の測定でナノ細孔内の超流動を示唆する第二音波共鳴が見られた点（0.2 MPa）、と超流動が消失していると思われる点（1.7 MPa）を加えて示している。超流動が消失する圧力は、孔径が同程度で孔長が一桁以上短い粉状試料に比べて、抑制されているように見える。最近、1次元系超流動の温度依存性は、孔径と孔長の比でスケールされている、という理論も提案されており、孔長に対する超流動の変化も今後の重要な課題の一つと考えている。

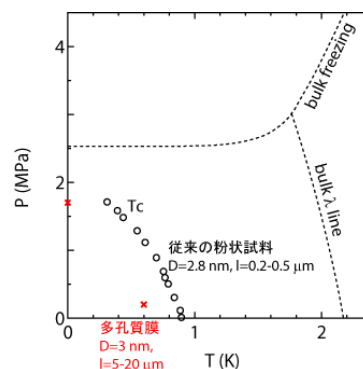


図5：超流動の圧力-温度相図。

本研究では、ナノ細孔中に超流動が出現していることは確認できたものの、その詳細な圧力-温度相図を得ることができていない。しかし、ナノヘルムホルツ共鳴器を基本とした新超流動計に不可欠な要素技術を開発することができた。残された重要な課題は、配向性多孔質膜を新超流動計に組み込む技術を開発することである。それにより、1次元的な超流動の動的な性質（観測周波数依存）に関する実験的研究を協力で推進できるものと考えている。

5. 主な発表論文等
(研究代表者は下線)

[雑誌論文](計 4件) 全て査読有り

1. "Ultrasound study of the mass decoupling of ^4He inert films on mesoporous silica", J. Taniguchi, H. Ichida, M. Suzuki, Physical Review B, 99, 024112-1,-4 (2019).
2. "Torsional Oscillator Measurements of Liquid ^4He Confined in 2.5-nm Channel of FSM", K. Taniguchi, J. Taniguchi, M. Suzuki, Journal of Physics: Conference Series, 969 1 012005-1,-5 (2018).
3. "Decoupling of Solid ^4He Layers under the Superfluid Overlayer", K. Ishibashi, J. Hiraide, J. Taniguchi, M. Suzuki, Journal of physics: Conference Series, 969 1 012011-1,-5 (2018).
4. "Twofold Torsional Oscillator Experiments from Film to Pressurized Liquid ^4He in a nanometer-Size Channel", K. Demura, J. Taniguchi, M. Suzuki, Journal of the Physical Society of Japan, 86, 114014-1,-5 (2017).

[学会発表](計 20件)

1. 配向性多孔質膜中 He の超流動の測定, 谷口淳子, 鈴木勝, 山口央, 渋谷祐太, 伊藤徹二, Paul Kim, Fabien Souris, John P. Davis, 日本物理学会第74回年次大会(2019.3).
2. ^3He をドーブしたグラファイト基板上 ^4He 吸着膜の滑り摩擦, 石橋健次, 平出丈, 谷口淳子, 鈴木勝, 日本物理学会第74回年次大会(2019.3).
3. ナノポーラスシリカに吸着した ^4He の物性, 谷口淳子, 第4回電気通信大-東京理科大合同研究会(2019.3) **招待講演**.
4. ^3He をドーブしたグラファイト基板上 ^4He 吸着膜の滑り摩擦, 石橋健次, 谷口淳子, 鈴木勝, 第4回電気通信大-東京理科大合同研究会(2019.3)
5. ナノヘルムホルツ共鳴器と配向性多孔質膜を組み合わせた超流動計の開発, 谷口淳子, 鈴木勝, 山口央, 渋谷祐太, 伊藤徹二, Paul Kim, Fabien Souris, John P. Davis, 日本物理学会2018年秋季大会(2018.9).
6. ^3He をドーブしたグラファイト基板上 ^4He 吸着膜の滑り摩擦, 石橋健次, 平出丈, 谷口淳子, 鈴木勝, 日本物理学会2018年秋季大会(2018.9).
7. グラファイト上ヘリウム単原子層薄膜における動的応答測定, 森下将史, 梅本匡敏, 谷口淳子, 鈴木勝, 日本物理学会2018年秋季大会(2018.9).
8. "Competition between thermodynamical and dynamical superfluid on ^4He confined in a nanometer-size channel", J. Taniguchi, K. Taniguchi, M. Suzuki, QFS2018 (Tokyo, Japan, 2018.7). **Invited**
9. "Mass decoupling of ^3He - ^4He mixture films and its relaxation", K. Ishibashi, J. Taniguchi, M. Suzuki, International Symposium on Quantum Fluids and Solids, QFS2018 (Tokyo, Japan, 2018.7).
10. "Slippage and localized-unlocalized transition in a ^4He solid film system", Junko Taniguchi, Hideyuki Ichida, Masaru Suzuki, International Symposium on Quantum Fluids and Solids, QFSM2018 (Tokyo, Japan, 2018.7).
11. 1次元ナノ多孔体中液体 ^4He の超流動の孔径依存性, 谷口健人, 谷口淳子, 鈴木勝, 日本物理学会第73回年次大会(2018.3).
12. ^3He をドーブしたグラファイト基板上 ^4He 吸着膜の滑り摩擦, 石橋健次, 平出丈, 谷口淳子, 鈴木勝, 日本物理学会第73回年次大会(2018.3).
13. ヘリウム吸着膜の滑りと局在 非局在転移, 谷口淳子, 鈴木勝, 第3回電気通信大 東京理科大合同研究会(2018.3)
14. グラファイト基板上に吸着させた ^4He 薄膜の滑り摩擦に対する ^3He の影響, 石橋健次, 谷口淳子, 鈴木勝, 第3回電気通信大 東京理科大合同研究会(2018.3)
15. "Novel Superfluid Response of ^4He Confined in 1D Nanotube", Junko Taniguchi, The IRAGO Conference 2017, (2017.11) **Invited**.
16. 1次元ナノ多孔体中加圧液体 ^4He の孔径依存, 谷口健人, 谷口淳子, 鈴木勝, 日本物理学会2017年秋季大会,(2017.9).
17. 孔径2.2 nmの1次元ナノ多孔体中加圧液体 ^4He の比熱測定, 出村健太, 谷口淳子, 鈴木勝, 日本物理学会2017年秋季大会,(2017.9).
18. グラファイト基板上の ^4He 吸着膜の超流動とスリップ現象の競合, 石橋健次, 平出丈, 谷口淳子, 鈴木勝, 日本物理学会2017年秋季大会,(2017.9).
19. "Torsional Oscillator Measurements of Liquid ^4He Confined in 2.5-nm Channel of FSM", K. Taniguchi, J. Taniguchi, M. Suzuki, International Conference on Low Temperature Physics (LT28), (2017.8).
20. "Decoupling of Solid ^4He layers under the Superfluid Overlayer", K. Ishibashi, J. Hiraide, J. Taniguchi, M. Suzuki, International Conference on Low Temperature Physics (LT28), (2017.8).

[図書](計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://ns.phys.uec.ac.jp/index.html>

6 . 研究組織

研究協力者

〔主たる渡航先の主たる海外共同研究者〕

研究協力者氏名： John P. Davis

ローマ字氏名： John P. Davis

所属研究機関名： アルバート大学

部局名： Department of Physics

職名： Associate Professor

〔その他の研究協力者〕

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。