

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400352

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

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

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) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、ナノ細孔中Heの超流動応答の孔径依存を詳細に測定した。その結果、孔径を2.8 nmから2.5 nmに狭めると、超流動の成長が緩やかになることを発見した。孔径2.5と2.8 nmの系での振る舞いの違いは、熱的に励起された位相スリップを考慮することで説明できる。また、細孔中Heの蒸気圧測定から、飽和蒸気圧より定圧において希薄な液体が存在することを明らかにした。さらに、この希薄な液体領域において、加圧下と同様に超流動の強い周波数依存を観測し、全密度領域において、統一的にTL液体モデルで振る舞いを説明できることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In the system of one-dimensional (1D) 4He, a dynamical superfluid response is expected to appear. Our purpose is to clarify how the superfluid specific to 1D becomes prominent. First, we studied the channel diameter dependence of superfluid response. When the channel diameter is reduced from 2.8 to 2.5 nm, the superfluid grows gradually with decreasing temperature, differently from the rather rapid rise for 2.8 nm. In the narrower channel, thermal activation of phase slip occurs at the lower temperature, which breaks the superfluid coherence at the lower temperature than the onset of dynamical one. We also studied the dilute limit that the dynamical superfluid response appears for 2.8 nm channel. We found that under the unsaturated vapor pressure, a dilute liquid exists in the channel and shows a dynamical superfluid response with a large frequency dependence. We succeeded in explaining the superfluid response from dilute to pressurized liquid by the TL liquid model.

研究分野：低温物理

キーワード：低次元系 超流動 朝永 ラッティンジャー液体

1. 研究開始当初の背景

1次元量子多体系の物理は、強い量子揺らぎのため特徴的な性質を示す朝永ラッティンジャー(TL)液体が報告されてから、理論物理の中心的課題の一つであり続けている。一方、実験面では、それまで研究の中心であった電子系に加え、1次元ポテンシャル中の冷却原子気体など、相互作用や量子統計が異なる系もTL液体の研究の舞台となり、1次元系の研究はますます広がりを見せていた。

本研究の開始前に申請者は、1次元ナノ細孔中液体⁴Heの超流動を二つの異なる観測周波数で測定し、超流動の立ち上がりに伴う散逸ピークの温度 T_p が周波数に大きく依存することを見出ししていた。この周波数依存は、細孔中の超流動応答が1次元特有の量子揺らぎに起因する動的な現象であることを示唆している。一方TL液体の特徴として、 T_p の観測周波数に対するべき的な依存性が理論的に予測されていた。そこで、申請者は、孔径を系統的に変えて T_p の周波数依存の測定を行うことで、1次元性が支配的になる過程を明らかにできると考え、本研究課題を提案した。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、1次元細孔中⁴Heの超流動応答において、1次元性が支配的になる過程を明らかにすることである。

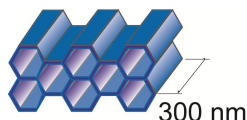
より具体的には、孔径を系統的に変えて、超流動応答に伴う散逸ピークの温度 T_p の周波数依存を明らかにする。そして、その周波数依存がどの孔径やどの周波数領域で、TL液体特有のべき的な依存を示すようになるかを調べることで、1次元性が支配的になる過程を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、1次元細孔中⁴Heの超流動応答において、 T_p の周波数依存性を調べることで、1次元性が支配的になる過程を明らかにすることを目的としている。その目的を達成するために、まずは(1)孔径が系統的に変えて、従来用いてきた単振り子による超流動の観測を行った。平行して、(2)より高周波での測定を可能にするための新しい捩れ振り子の開発を行った。さらに、(3)比熱の測定を行い、超流動の振る舞いと関連を調べることで、1次元系の特徴を探った。

以下にそれぞれの方法についてより詳しく説明する。

(1) 1次元ナノ多孔体試料: 本研究で用いた多孔体(FSM)は、右図のように、細孔径が均一で細孔同士の連結を持たない多数のチャンネルを持つ。細孔径は、周波数依存がすでに観測されている2.8 nm、



およびそれより小さい2.5, 2.2 nmのものを用いた。孔径依存をまずは、従来の単振り子を用いて調べた。

(2) 周波数可変ねじれ振り子: 二つの共振周波数を持つ2重連成振り子に、着脱式おもりをつけることで、周波数を1~20 kHzの間で変化させることを目標として、開発を行った。

(3) 比熱測定: 比熱測定には断熱パルス法を用いた。多孔体FSMは直径300 nm程度の粒状シリケートであり、熱接触のために銀粉を混ぜて焼結したペレットを用いる。これによりペレット内の熱伝導の緩和時間を減少させ、断熱パルス法による高精度の比熱測定が可能になる。

4. 研究成果

(1) 可変周波数捩れ振り子の開発:

従来の捩れ振り子に比べて一桁高い観測周波数を実現するために、周波数を着脱式おもりで変えられる連成ねじれ振り子を試作した。その結果、低周波モードでは、4 kHz(錘なし)から1 kHzまで、十分なQ値を有する共振を得ることができた。一方、高周波モード(~18 kHz)は安定な共振は得られなかった。高周波数側での超流動の測定に関しては、今後異なる測定手法(国際共同研究加速基金(国際共同研究強化)で開発を進めているナノヘルムホルツ共鳴器など)の検討を進めている。

(2) 少量の不純物(³He)が1次元超流動に及ぼす影響:

一般的に低次元になればなるほど、量子揺らぎが強くなり、超流動のような秩序は壊れやすくなる。1次元超流動において、不純物に対して、超流動はどの程度壊れやすいのかを調べるために、不純物として少量の³Heを導入した系について超流動の観測を行った。その結果、 T_p の抑制の大きさは³Heの量にほぼ比例し、バルクの場合に比べてそれほど大きくはならなかった。このことから、予想に反し、³Heによる超流動コヒーレンスの壊され方は、バルクの場合とあまり変わらないことが分かった。その理由については、未解決の問題として残っている。

(3) 細孔内希薄液体の出現と超流動:

1次元細孔内でTL液体が出現していることを示唆する、超流動の周波数依存が加圧下液体領域において観測されて以来、このTL液体的振る舞いは薄膜でも出現するのかが、大いに興味を持たれてきた。そこで、2重連成振り子を用いて、薄膜から加圧下液体まで系統的に⁴Heの細孔内密度を変えながら測定を行った。また平行して行った蒸気圧測定から、細孔内⁴Heの構造を詳細に調べた。その結果、バルク液体の飽和蒸気圧よりもはるかに低圧で、毛細管凝縮がおき、希薄な液体が存在していることが分かった。そして、この希

薄な液体において T_p の大きな周波数依存が観測され、希薄な液体から加圧下液体まで、統一的に TL 液体モデルで説明できることが分かった。

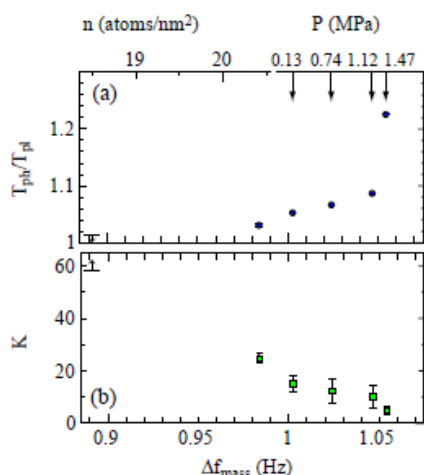


図 1：散逸ピーク温度およびラッティンジャーパラメータの密度依存

(4) 1 次元超流動の孔径依存

孔径 2.5 nm の試料について、単振り子による超流動の測定を行った。その結果、孔径 2.5 nm では、2.8 nm に比べて超流動の成長が緩やかであることが明らかになった。孔径 2.5, 2.8 nm の二つの系の振る舞いの違いは、熱的に励起された位相スリップの影響が小さい孔径の場合、より低温で顕著になるためと考えられる。

(5) 細孔中 ⁴He の比熱と超流動

1 次元細孔内における超流動の発現と BEC との関係は、興味深い問題の一つである。孔径 2.8 nm の細孔中液体については、すでに比熱測定を行い、細孔中 ⁴He が低エントロピー状態に落ち込む“BEC 的な状態”となり、それと同時に超流動は発現していることが分かっていた。本研究では、より小さい孔径 2.2 nm の試料について比熱測定を行った。孔径 2.2 nm においても非常に小さいながらも比熱のピークが超流動の現れ始める温度の付近で観測された。しかし、2.8 nm に比べて非常に小さく、またピークの形も異なるため、比熱のピークの起源が 2.8 nm のものと同じであるかは明らかでない。今後はこの起源を明らかにすることが課題である。

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 6 件) 全て査読有り。

1. “Torsional Oscillator Measurements of Liquid ⁴He Confined in 2.5-nm Channel of FSM”, Kento Taniguchi, Junko Taniguchi and Masaru Suzuki,

Journal of Physics: Conference Series, 969 1 012005-1, -5 (2018).
DOI:10.1088/1742-6596/969/1/012005

2. “Decoupling of Solid ⁴He Layers under the Superfluid Overlay”
Kenji Ishibashi, Jo Hiraide, Junko Taniguchi, and Masaru Suzuki,
Journal of Physics: Conference Series, 969 1 012011-1, -5 (2018).
DOI:10.1088/1742-6596/969/1/012011
3. “Twofold Torsional Oscillator Experiments from Film to Pressurized Liquid ⁴He in a nanometer-Size Channel”
Kenta Demura, Junko Taniguchi, and Masaru Suzuki,
Journal of the Physical Society of Japan, 86, 114014-1, -5 (2017)
DOI:10.7566/JPSJ.86.114601
4. “Dynamical Superfluid Response of ³He-⁴He Solutions in a Nanometer-Size Channel”
Kenta Demura, Junko Taniguchi, and Masaru Suzuki,
Journal of the Physical Society of Japan, 84, 094604-1, -5 (2015)
DOI:10.7566/JPSJ/84.094604
5. “Evidence for a Common Physical Origin of the Landau and BEC Theories of Superfluidity”
S. O. Diallo, R. T. Azuah, D. L. Abernathy, J. Taniguchi, M. Suzuki, J. Bossy, N. Mulders, H. R. Glyde,
Physical Review Letters, 113, 215302-1, -5 (2014)
DOI:10.1103/PhysRevLett/113.215302
6. “Nuclear magnetic resonance on ³He confined in 2.8-nm channel of FSM16”
Junko Taniguchi, Daiki Tanaka and Masaru Suzuki,
Journal of Physics: Conference Series, 568, 012022-1, -4 (2014)
DOI:10.1088/1742-6596/568/1/012022

[学会発表](計 24 件)

1. “Competition between thermodynamical and dynamical superfluid of ⁴He confined in a nanometer-size channel”,
Oral
Junko Taniguchi, Kento Taniguchi, and Masaru Suzuki,
International Symposium on Quantum Fluids and Solids (Tokyo Japan, 2018)
2. “Slippage and localized-unlocalized

- transition in a 4He solid film system”
Junko Taniguchi, Hideyuki Ichida, and Masaru Suzuki,
 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (Tokyo, Japan, 2018)
3. “Mass Decoupling of 3He-4He mixture films and its relaxation”
 Kenji Ishibashi, Junko Taniguchi, and Masaru Suzuki,
 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (Tokyo Japan, 2018)
 4. “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,
 日本物理学会代 73 回年次大会(2018)
 5. “ 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)
 6. “ ヘリウム吸着膜の滑りと局在-非局在転移 ”
谷口淳子, 市田英之, 鈴木勝
 ナノトライボロジー研究センター第二回シンポジウム・第 3 回電通大 - 理科合同研究会「物性科学から工学へ」(2018)
 7. “Novel Superfluid Response of 4He Confined in One-Dimensional nanotube” *Invited*
Junko Taniguchi,
 IRAGO(Interdisciplinary Research And Global Outlook) Conference (2017)
 8. “ 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. “ グラファイト基板上的 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)
 10. “ 1 次元ナノ多孔体中液体 4He の超流動の孔径依存 ”
 谷口健人, 谷口淳子, 鈴木勝,
 日本物理学会 2017 年秋季大会(2017)
 11. “Torsional Oscillator Measurements of Liquid 4He Confined in 2.5-nm Channel of FSM”
 Kento Taniguchi, Junko Taniguchi, and Masaru Suzuki,
 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28), Sweden (2017).
 12. “Decoupling of Solid 4He Layers under the Superfluid Overlayer”
 Kenji Ishibashi, Jo Hiraide, Junko Taniguchi, and Masaru Suzuki,
 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28), Sweden (2017).
 13. “ 1 次元ナノ細孔中の液体 4He の比熱と超流動 ”
 出村健太, 谷口淳子, 鈴木勝,
 電通大 - 理科大合同シンポジウム「ナノ構造が開く新規な物性物理学 広がるナノトライボロジーの世界」(2017)
 14. “ 1 次元ナノ細孔の超流動応答の孔径依存性 ”
 谷口健人, 福原大地, 谷口淳子, 鈴木勝
 電通大 - 理科大合同シンポジウム「ナノ構造が開く新規な物性物理学 広がるナノトライボロジーの世界」(2017)
 15. “ 周波数可変なねじれ振子子の開発 ”
 中道悠太, 谷口淳子, 鈴木勝,
 日本物理学会第 71 回年次大会(2016)
 16. “ 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,
 日本物理学会第 71 回年次大会(2016)
 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 2015 年秋季大会
 18. “Magnetization of 3He confined in 2.8-nm channel of FSM16”
Junko Taniguchi, Daiki Tanaka, and Masaru Suzuki,
 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (2015)
 19. “Heat capacity of liquid 4He confined in one-dimensional nano-porous media”
 Kenta Demura, Junko Taniguchi, and Masaru Suzuki,
 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (2015)
 20. “Superfluid response of 4He in 1D mesoporous media”, *invited*

Junko Taniguchi,
Grand Challenges in Quantum Fluids
and Solids, (2015)

21. “ 孔径 2.8 nm の細孔を有する FSM 中
3He の NMR 測定 ”
田中大貴, 谷口淳子, 鈴木勝
日本物理学会第 70 回年次大会(2015)
22. “Dynamical superfluid response of 4He
confined in 1D nano-porous medium
FSM16 under unsaturated vapor
pressure”
Kenta Demura, Junko Taniguchi and
Masaru Suzuki,
27th International Conference on Low
Temperature Physics (2014)
23. “ 孔径 2.8 nm の細孔を有する FSM 中
3He の NMR 測定 ”
田中大貴, 谷口淳子, 鈴木勝,
日本物理学会 2014 年秋季大会
24. “ 孔径 2.8 nm の FSM 中 3He の比熱
と磁化 ”
谷口淳子, 田中大貴, 鈴木勝,
日本物理学会 2014 年秋季大会

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

- 1) 『1次元ナノ細孔中ヘリウムの超流動と
朝永 ラッティンジャー液体的挙動』谷
口淳子, 科研費 NEWS, 3, 7 (2015).

2) 研究室ホームページ

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

6. 研究組織

(1)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

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：

(4)研究協力者

()