

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：12602

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26287077

研究課題名(和文)多重極限における強相関ボーズ流体の量子相転移

研究課題名(英文)Quantum phase transition of strongly correlated Bose fluid under multi-extreme conditions

研究代表者

檜枝 光憲(Hieda, Mitsunori)

東京医科歯科大学・教養部・教授

研究者番号：30372527

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：ナノ構造体を用いて次元制御した強相関ヘリウム4ボーズ量子流体を実現し、多重極限下の超流動、量子相転移などの新規物性を開拓した。本研究により、主に次の結果が得られた。回転下2次元超流動の高周波実験を実施し、有為な回転効果が認められなかった。これは低周波の先行研究と相反している。ナノ多孔体MCM-48中の3次元接続を持つヘリウム4薄膜の研究から、その新規な相図を明らかにした。1次元細孔長がFSM-16よりも数十倍長い多孔体HMM-1中の1次元強相関ボーズ流体の実験を実施し、1次元ナノチューブ超流動の「有限長理論」の妥当性を示した。

研究成果の概要(英文)：We realized strongly correlated Helium-4 Bose fluid with dimensionality controlled by nano-porous materials and explored new properties of the superfluid and the quantum phase transition under multi-extreme conditions. Main results we obtained are as follows. (1) In high frequency experiment of 2D superfluid of helium-4 under rotation, we found no clear rotational effect. This results conflict with the previous experimental study at low frequency performed by another group. (2) We performed the study of 1D correlated Helium-4 Bose fluid adsorbed in HMM-1 with about 20 times longer pore length than that of FSM-16. The validity of the theory of effective length for 1D nano-tube superfluid were discussed. (3) By exploratory of helium-4 film with a 3D connectivity adsorbed in MCM-48, we revealed the novel phase diagram.

研究分野：低温物理

キーワード：量子相転移 超流動 低次元 強相関 ボーズ流体

1. 研究開始当初の背景

ヘリウム4強相関ボーズ流体はナノ構造体中に閉じ込めることによって容易に次元性、原子相関、乱れの制御が可能であり、量子相転移のモデル系としての一端を担ってきた。現在までに2次元ヘリウム4の量子相転移挙動が実験的に報告され、量子絶縁体相ではボーズガラス、モット絶縁体、超固体、量子スリップ等の新規な量子物性が示唆され極めて興味深い。また、直径2.5nmのナノ細孔を持つ多孔質ガラスに閉じ込めたヘリウム4では、加圧により絶対零度において3.4MPa以上で超流動が消失する新しい量子臨界点(QCP)や局在BEC相が発見されている。低次元極限である1次元における量子相転移は全く自明ではなく、理論的には量子基底状態として朝永-ラッティンジャー流体が実現し、極めて興味深い。しかしながら、温度、原子相関に加えて、周波数、回転、次元を自在に操った多重極限における研究は皆無であった。

2. 研究の目的

本研究はナノ構造体を用いて次元制御した強相関ヘリウム4量子流体を実現し、未知の研究領域である多重極限(超低温、強相関、高周波、高回転)の量子相転移とその特異な量子多体現象(超流動、超固体、ボーズガラス、モット絶縁体、局在BEC、量子スリップなど)を研究する。また、多重極限下の超流動、量子相転移など新規物性を開拓することにある。

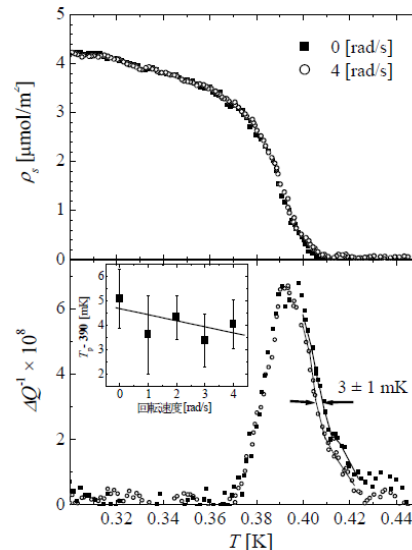
3. 研究の方法

ゼロ回転下における機械的応答測定(水晶マイクロバランス、ねじれ振り子)と熱力学的測定(比熱)の準備を行い、測定を開始する。さらにこれと並行して理化学研究所の回転希釈冷凍機実験の準備を進め、完了後、実験を開始する。強相関ボーズ流体の実現に必要なナノ構造体として金基盤(2次元)、ナノ多孔体FSM-16(1次元)、HMM-1(1次元)、HMM-2(3次元)、MCM-48(3次元)などを使用する。様々な次元の強相関ボーズ流体に対して得られたデータの解析から、機械的応答と熱的測定の各パラメータ依存(温度、原子相関、周波数、回転)を明らかにする。さらに情報が十分であれば量子臨界領域・相図を決定する。

4. 研究成果

(1) 2次元超流動の回転実験

回転希釈冷凍機を用いた水晶マイクロバランス(QCM)実験により、高周波及び低温領域(1K以下)における金基板上ヘリウム4薄膜超流動転移の研究を実施した。測定周波数20MHzの実験では、回転下(4rad/sec)での

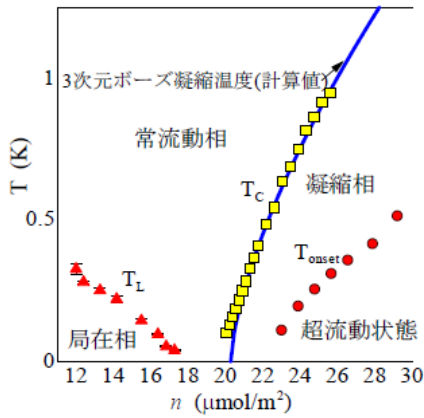


超流動密度の温度変化は、ゼロ回転下での実験結果と誤差内で一致した。一方で、エネルギー散逸については回転効果が示唆されるデータを得た。エネルギー散逸ピーク温度を回転速度に対してプロットすると、測定データのばらつきの範囲内で回転速度に比例して低温側へのシフトを示唆する結果を得た。また、ピーク温度より高温側のエネルギー散逸データが3mKほど低温側にシフトした。しかしながら、これらの違いはデータのばらつき程度の差しかないことから、有為な差とは言えない状況となっている。これは、過去にGlabersonらが1.2K以上で実施したマイラー基盤上の2次元ヘリウム4のねじれ振り子実験(PRB 35, 4633 (1987))において、回転下で明らかな余剰なエネルギー散逸を観測した報告と相反している。可能性として、測定周波数、基盤依存などが候補として考えられるが、原因の特定にはさらなる実験的検証が必要である。

さらに本研究の副産物的な成果として、実験的に25倍高調波を使い500MHzのQCM実験を実施した。その結果、世界で初めてマイクロ波帯における超流動薄膜の振動応答測定に成功した。マイクロ波帯における超流動応答、量子相の応答の研究は存在せず、今後の成果が期待される。また、バルクヘリウム4のQCM回転実験を実施し、回転による異常な振動子応答を観測した。原因は特定されておらず、継続した研究が必要となっている。

(2) 3次元多孔体中ヘリウム4の相図

3次元接続を持つナノ多孔体MCM-48(接続周期3.7nm、細孔直径3.3nm)中に吸着したヘリウム4薄膜の比熱実験とねじれ振り子測定を実施した。2種類の異なる比熱ピークの解析から温度-吸着量相図を明らかにし、2次元相および3次元相領域を確定した。過去に実施したHMM-2(接続間隔5.5nm、細孔直径2.7nm)のデータと比較して、3次元相転移を示す温度領域はHMM-2の場合は換算温度 $t < 0.15$ であるが、MCM-48の方がより高温ま

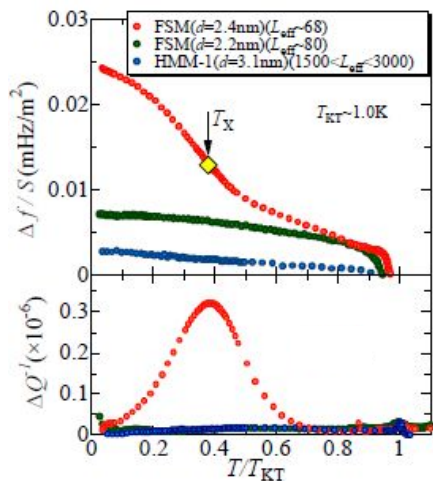


であり、比熱ピークも3倍以上大きく観測された。これはHMM-2の3次元相の領域が高温側まで広がっており、より3次元性が強いことを示している。これはMCM-48の3次元周期が短いため、3次元性が強く発現したことを示唆する。またねじれ振子で観測された超流動転移は、比熱のフォノン解析より3次元超流動転移であることが解った。以上の研究から、図のような相図(超流動相、凝縮相、定流動相、局在相)が得られ、吸着量 $20 \mu\text{mol/m}^2$ 付近に量子臨界点の存在が示唆される。

(3) 擬1次元での超流動性

細孔直径 2.2nm のFSM-16(細孔長 300nm) 中のヘリウム4ナノチューブ(1次元強相関ボーズ流体)についてねじれ振子測定を実施し、超流動シフトとエネルギー散逸を高精度で測定した。一次元超流動オンセットとそれに伴う散逸ピークを検証した結果、有効長理論で説明されることが示唆された。

上記の結果をさらに拡張するため1次元細孔長がFSM-16よりも数十倍長い多孔体HMM-1(細孔長 $10\text{-}20\mu\text{m}$ 、孔径 3.1nm)に形成したヘリウム4ナノチューブについてねじれ振子測定を実施した。孔径が大きいかかわらず、表面積で規格化した周波数シフト量は孔径 2.2nm のFSMよりも更に小さく、エネルギー散逸も観測されなかった。この実験結果は1次元クロスオーバー温度が測定範囲よりも低温であることを示唆している。ま



た、この1次元クロスオーバー温度が生細孔長に依存せず、細孔の円周で規格化した有効長に依存していることを示す。これらの結果から、 1kHz という測定周波数では有効長理論の妥当性が示された。

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)

T. Matsushita, K. Kurebayashi, R. Shibatsuji, M. Hieda, and N. Wada

Possible dimensional crossover to 1D of ^3He fluid in nanochannels observed in susceptibilities

J. Low Temp. Phys. 183, 251 (2016)

doi:10.1007/s10909-015-1369-8、査読有

T. Matsushita, A. Shinohara, M. Hieda, and N. Wada

Superfluid onset of ^4He nanotube depending on a one-dimensional length

J. Low Temp. Phys. 183, 273 (2016)

doi:10.1007/s10909-015-1393-8、査読有

[学会発表](計24件)

天池一憲, 柴辻亮介, 松下琢, 檜枝光憲, 和田信雄

3次元ナノ多孔体HMM-2に吸着した ^4He 薄膜上 ^3He のNMRによる観測II

日本物理学会第72回年次大会

大阪大学豊中キャンパス(大阪府、豊中市)、2017年3月17日-20日

村木智徳, 浦野慎也, 松下琢, 檜枝光憲, 和田信雄

1次元ナノ多孔体HMM-1のナノチャンネルに充填した ^4He 液体の超流動オンセット測定

日本物理学会第72回年次大会

大阪大学豊中キャンパス(大阪府、豊中市)、2017年3月17日-20日

鈴木尚将, 西田竹潔, 原佑樹, 檜枝光憲, 松下琢, 和田信雄

3次元接続周期の短いナノ多孔体MCM-48中 ^4He 薄膜の超流動転移比熱ピーク

日本物理学会第72回年次大会

大阪大学豊中キャンパス(大阪府、豊中市)、2017年3月17日-20日

檜枝光憲, 滝沢亮人, 立木智也, 高橋大輔, 白濱圭也, 河野公俊, 松下琢, 和田信雄

回転下における2次元 ^4He のKosterlitz-Thouless超流動転移

日本物理学会第72回年次大会

大阪大学豊中キャンパス(大阪府、豊中市)、2017年3月17日-20日

天池一憲, 柴辻亮介, 松下琢, 檜枝光憲, 和田信雄

3次元ナノ多孔体HMM-2に吸着した

4He 薄膜上 3He の NMR による観測
日本物理学会 2016 年秋季大会 [物性],
金沢大学角間キャンパス (石川県、金沢市) 2016 年 9 月 13 日-16 日
土屋雄太, 原佑樹, 西田竹潔, 檜枝光憲,
松下琢, 和田信雄
3 次元ナノ多孔体 HMM-2 中 3He の巨大なフェルミ液体および非フェルミ液体比熱
日本物理学会 2016 年秋季大会 [物性],
金沢大学角間キャンパス (石川県、金沢市) 2016 年 9 月 13 日-16 日
N. Wada, T. Matsushita, T. Nishida, Y. Tsuchiya, Y. Hara, M. Hieda
Huge Fermi liquid and non-Fermi liquid heat capacities of 3He films formed in 3D nanopore
International Conference on Quantum Fluids and Solids 2016, 10th-16th August 2016, Clarion Congress Hotel, Prague (Czech Republic)
T. Matsushita, R. Shibatsuji, K. Amaike, M. Hieda, N. Wada
NMR for 3He in the 1D state in nanochannels, -possible Tomonaga Luttinger liquid 3He-
International Conference on Quantum Fluids and Solids 2016, 10th-16th August 2016, Clarion Congress Hotel, Prague (Czech Republic)
N. Wada, T. Matsushita, M. Hieda
Superfluid transitions of 4He films under new dimensional and topological conditions of nanopores
International Conference on Quantum Fluids and Solids 2016, 10th-16th August 2016, Clarion Congress Hotel, Prague (Czech Republic)
柴辻亮介, 紅林克哉, 松下琢, 檜枝光憲,
和田信雄
ナノ多孔体 FSM に吸着した 4He 薄膜上 1 次元 3He 気体の NMR による観測 II
日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学泉キャンパス (宮城県、仙台市) 2016 年 3 月 19 日-22 日
村木智徳, 篠原淳希, 檜枝光憲, 松下琢,
和田信雄
一次元ナノ多孔体中 4He ナノチューブの超流動状態と散逸ピーク
日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学泉キャンパス (宮城県、仙台市) 2016 年 3 月 19 日-22 日
西田竹潔, 吉村拓哉, 檜枝光憲, 松下琢,
和田信雄
新規 3 次元ナノ多孔体 MCM-48 中 3He の比熱
日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学泉キャンパス (宮城県、仙台市) 2016 年 3 月 19 日-22 日
篠原淳希, 村木智徳, 檜枝光憲, 松下琢,

和田信雄
新規 3 次元ナノ多孔体 MCM-48 中 4He の吸着状態と比熱
日本物理学会 2015 年秋季大会 [物性]
関西大学千里山キャンパス (大阪府、吹田市) 2015 年 9 月 16 日-19 日
村木智徳, 篠原淳希, 檜枝光憲, 松下琢,
和田信雄
新規 3 次元ナノ多孔体 MCM-48 内に吸着した 4He の超流動密度測定
日本物理学会 2015 年秋季大会 [物性]
関西大学千里山キャンパス (大阪府、吹田市) 2015 年 9 月 16 日-19 日
滝沢亮人, 檜枝光憲, 立木智也, 白濱圭也, 高橋大輔, 河野公俊, 松下琢, 和田信雄
QCM を用いた DC 回転下 2 次元 4He 薄膜超流動転移の研究
日本物理学会 2015 年秋季大会 [物性]
関西大学千里山キャンパス (大阪府、吹田市) 2015 年 9 月 16 日-19 日
T. Matsushita, K. Kurebayashi, R. Shibatsuji, M. Hieda, and N. Wada
Possible Tomonaga-Luttinger Liquid 3He in 1D Nanochannels Examined by NMR
2015 International Symposium on Quantum Fluids and Solids, Conference and Event Center, Niagara falls (USA), Aug. 9-15 2015
N. Wada, T. Matsushita, A. Shinohara, and M. Hieda
One-Dimensional Superfluid Onset of 4He Nanotube with a Long Length
2015 International Symposium on Quantum Fluids and Solids, Conference and Event Center, Niagara falls (USA), Aug. 9-15 2015
N. Wada, T. Matsushita, M. Kuno, T. Nishida, M. Hieda, and R. Toda
From 3D Boltzmann Gas to Fermi Liquid with a Huge γ -Value Realized for 3He Film Formed in 3D Nanopore
2015 International Symposium on Quantum Fluids and Solids, Conference and Event Center, Niagara falls (USA), Aug. 9-15 2015
名大院理, 篠原淳希, 岡本峰和, 檜枝光憲, 松下琢, 和田信雄
有効長の長い 4He ナノチューブにおける超流動の観測
日本物理学会第 70 回年次大会
早稲田大学早稲田キャンパス (東京都、新宿区) 2015 年 3 月 21 日-24 日
M. Hieda
Nanoscale superfluid transition of two-dimensional 4He revealed by MHz frequencies
Workshop on New Perspectives in Quantum Turbulence: experimental

visualization and numerical simulation
Nagoya University (Nagoya, Aichi),
December 11-12, 2014

- ⑳ N. Wada, D. Tokioka, R. Toda, M. Hieda, and T. Matsushita
Possible superfluid transition from 2D Bose fluid to 3D long-range-ordered state of 4He film formed in 3D nanopore
LT27, The Palais Rouge, Buenos Aires (Argentina), August 6-13, 2014
- ㉑ M. Hieda, H. Tanaka, H. Yamaguchi, T. Matsushita, and N. Wada
QCM study on nanoscale two-dimensional superfluid transition of 4He submonolayer
LT27, The Palais Rouge, Buenos Aires (Argentina), August 6-13, 2014
- ㉒ N. Wada, T. Endoh, R. Toda, M. Hieda, and T. Matsushita
System size and measurement frequency dependences of superfluidity observed in one-dimensional state
LT27, The Palais Rouge, Buenos Aires (Argentina), August 6-13, 2014
- ㉓ 檜枝光憲、田中春奈、山口寛、松下琢、和田信雄
2次元 4He 薄膜 KT 超流動転移の高周波応答
第 22 回渦糸物理国内会議, ハイランドふらの(北海道・富良野市)、平成 26 年 7 月 10 ~ 12 日

〔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〕

ホームページ等

<http://ult.phys.nagoya-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

檜枝 光憲 (HIEDA, Mitsunori)
東京医科歯科大学・教養部・教授
研究者番号：30372527

(2) 研究分担者

高橋 大輔 (TAKAHASHI, Daisuke)
足利工業大学・工学部・准教授
研究者番号：80415215

和田信雄 (WADA, Nobuo)
名古屋大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：90142687

(平成 27 年度より共同研究者。平成 26 年度は連携研究者)

(3) 連携研究者

河野 公俊 (KONO, Kimitoshi)
理化学研究所・創発物性科学研究センター・チームリーダー
研究者番号：30153480

(4) 研究協力者

滝沢 亮人 (TAKIZAWA, Ryoto)
立木 智也 (TSUIKI, Tomoya)