

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740264

研究課題名(和文) 1次元細孔中の液体 ^3He を用いた朝永 ラッティンジャー液体の研究研究課題名(英文) Search for Tomonaga-Luttinger liquid in liquid ^3He confined in one-dimensional pores

研究代表者

谷口 淳子(Taniguchi, Junko)

電気通信大学・情報理工学(系)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) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題ではまず、1次元 ^3He の量子的性質の出現の有無を調べるために、孔径2.8nmの細孔中に導入した ^3He のNMR測定を行った。 ^3He の導入量を増やすにつれて、まず細孔内壁に第1層固相が形成され、その内側に非晶質固相、さらにその内側に液相が現れることが分かった。この液相において、約300mKより低温で磁化がキュリー則よりも小さくなる現象が観測された。この原因として液体 ^3He が縮退を始め、量子的な状態が出現していることが考えられ、過去に観測された比熱の縮退による温度変化とも整合する。得られた結果は、今後1次元系特有の磁気的性質を探求していくうえで、重要な足がかりとなることが期待される。

研究成果の概要(英文)：The purpose of study is to search the feature of a quasi one-dimensional (1D) system of fermion with a hard core. For this purpose, we adopt the system of ^3He which is confined into a nano meter-size 1D channel. We have performed NMR measurements under the saturation vapor pressure, and observed the reduction of magnetic moment at low temperatures. This is due to the degenerate of liquid ^3He in the channel. Our findings are significant advance to search the feature of degenerate phase in quasi 1D system of ^3He .

As a target for comparison, a ^4He system, which obeys bose statistics, is important. Thus, we have also promoted the study of ^4He confined in 1D channel. We found that the superfluid response shows a large frequency dependence. Furthermore, this dynamic superfluid response is consistent with the theoretical prediction based on the Tomonaga-Luttinger liquid model.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学

キーワード：1次元量子系 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、理論物理の一つの中心的な課題である。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等、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。申請者は、孔径が原子数個分に相当する1次元ナノ細孔に閉じ込めた液体ヘリウムが新たな1次元系の研究の舞台となりうることに着目していた。

本研究の開始前に申請者は、1次元ナノ細孔に閉じ込めてボーズ粒子系である液体⁴Heの物性を加圧下で測定し、超流動転移温度がボーズ凝縮温度より低温に抑制されることを見出していた。この抑制は次元性に基く強い量子揺らぎによると考えられる。一方、1次元細孔に閉じ込めた液体³Heの性質は明らかではなかったが、統計性の違いから、1次元性に由来する物性に興味を持っていた。そこで、申請者は、1次元細孔中液体³Heの比熱と帯磁率の温度依存性を細孔径と圧力を系統的に変えて測定し、典型的なフェルミ液体であるバルク³Heを比較することで、1次元の液体³Heの性質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³Heの比熱・帯磁率を測定し、バルクの液体³Heの振る舞いと比較することにより、1次元³Heの性質を明らかにすることである。

比較対象であるバルクの液体³Heの振る舞いはフェルミ液体でよく説明できる。粒子間の相互作用の強さはランダウパラメータとして測定できる比熱や帯磁率の大きさと関係づけられる。1次元系のフェルミ粒子においても比熱や帯磁率の温度依存性は3次元と変わらないが、その大きさは量子揺らぎのため変化することが予想され、形式的には相互作用の強さを表すランダウパラメータの異常としてまとめられる。

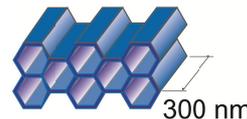
本研究では、比熱と帯磁率の温度依存性を細孔径と圧力を系統的に変えて測定することで、ハードコアを持つフェルミ粒子系である液体³Heに対して、1次元性がどのような影響を与えるか、またその時の量子揺らぎの効果はどのようなものかを明らかにする。

3. 研究の方法

本研究課題では、1次元細孔に閉じ込めたハードコアを持つフェルミ粒子系である液体³Heの性質を、バルクの液体³Heと比較して、明らかにすることを目的とした。その目的を達成するために、(1)1次元ナノ細孔を持つ多孔体を採用し、二つの実験的研究(2)比熱(有効質量)測定と、(3)帯磁率(反対

称ランダウパラメータ)測定を計画した。

(1)1次元ナノ多孔体:本研究では、1次元の液体³Heを実現するために1次元ナノ細孔を持つ多孔体(FSM)を用いた。この多孔体の構造は右下図に示されるように、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。細孔径は多孔体作製途中のテンプレート分子により1.5~4.7 nmの範囲で制御できる。本研究では、孔径2.8 nmのものを用いた。



(2)比熱測定:比熱測定には断熱パルス法を用いる。多孔体FSMは直径300 nm程度の粒上シリケートであり、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。実際には、科研費の交付を受けた研究期間では測定まで行うことができなかったが、飽和蒸気圧以下の過去の実験データをもとに解析を進めた。

(3)帯磁率測定:

細孔中の液体³Heの帯磁率測定はNMR共鳴法を用いて行う。NMR共鳴法を用いることで、測定対象である³He原子以外で大きな磁化を有する物質(多孔体中の磁性不純物など)が存在する場合でも、³He原子の微弱な核スピンの磁化のみを検出できる特徴を持つ。

4. 研究成果

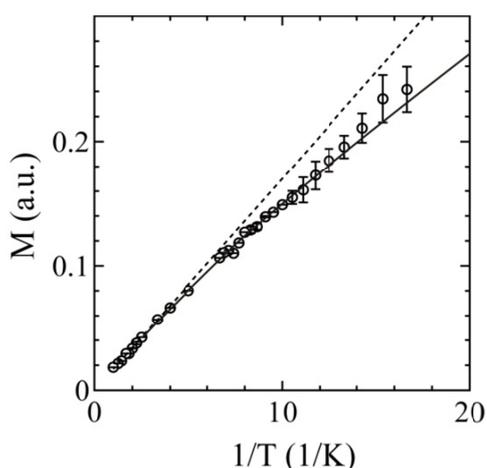
本研究課題では、大きく分けて以下の三つの研究を行った。

(1)飽和蒸気圧以下における比熱の温度・面密度依存の解析:

比熱の温度依存の解析から、細孔中³Heは面密度によって三つの状態をとることが明らかになった。まず、1層完了までは、比熱は低温で温度の-2乗に比例する成分を持つ。これは、一定の交換相互作用(約2 mK)を持つ固相が形成されることを意味する。1層完了より面密度を増やすと、低温で温度の逆数に比例する比熱が観測される。これは、交換相互作用が大きな分布(数mK~100mK)をもつ時に見られるもので、第1層固相の内側に非晶質固相が形成されていることを示唆する。さらに面密度を増やすと、低温で比熱は減少する。全体の比熱から固相・非晶質固相の比熱を差し引くと、高温側の3次元古典ガスの比熱から温度に対し線形な比熱に移り変わる様子が見られた。そのことから、非晶質固相の内側に³Heの液柱が形成され、その液相は十分低温で縮退し、量子的になっていることが明らかになった。

(2)孔径2.8 nmの試料を用いたNMR測定:NMR測定系を構築し、孔径2.8 nmの細孔中に導入した³HeのNMR測定を行った。比熱の解析から液相の出現が期待される面密度領域において、約300mKより低温で磁化がキュリー則(図中点線)よりも小さくなる現象が観

測された。この原因として液体 ^3He の縮退が考えられる。そこで、比熱の解析から得られたフェルミ縮退温度や固相・非晶質固相の交換相互作用を用いて、磁化の温度依存を計算した。図に示すように、測定結果と誤差内で一致したことから、細孔中に縮退した量子流体相が出現していることが確かめられた。これにより、今後、圧力や細孔径を系統的に変えて測定し1次元系特有の磁気的性質を探索するうえで、重要な足がかりを得ることができた。



図：面密度 16 atoms/nm^2 における磁化の温度依存。点線はキュリー則、実線は計算値。

(3) 細孔中 ^4He における超流動応答の観測：孔径 2.8 nm 細孔中 ^4He の超流動を二重連成振子を用いて、二つの周波数で測定したところ、大きな周波数依存が観測された。これは、細孔中の超流動応答が、従来の熱力学的な相転移ではなく、動的なものであることを示唆している。この超流動の周波数依存は朝永ラッティンジャー液体モデルに基づいた理論予測とほぼ一致しており、1次元性に由来する特徴的な振る舞いであることが分かった。

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 7件)

1. "Path Integral Calculation of ^4He in One-Dimensional Channel Model", Hajime Kiriyama, Junko Taniguchi, Masaru Suzuki, and Takeo Takagi, *Journal of Physical Society of Japan*, 83, 044601-1, -5 (2014). (査読有)
DOI: 10.7566/JPSJ.83.044601

2. "Competition Between the Superfluid Overlayer and the Mobile Solid Layer of ^3He - ^4He Mixture Films on Porous Gold", Junko Taniguchi, Toshio Mouri, Masaru Suzuki, Mitsunori Hieda, and Tomoki

Minoguchi, *Journal of Low Temperature Physics*, 175, 414-419 (2014). (査読有)
DOI: 10.1007/s10909-013-0963-x

3. "Dynamical superfluid response of ^4He confined in a nanometer-size channel", Junko Taniguchi, Kenta Demura, Masaru Suzuki, *Physical Review B*, 88, 014502-1, -4 (2013) (査読有)
DOI: 10.1103/PhysRevB.88.014502

4. "Double Torsional Oscillator Measurements for ^4He confined in 1D Nano-porous Medium FSM16 with a 2.8 nm channel", Junko Taniguchi, Kenta Demura, Masaru Suzuki, *Journal of Low Temperature Physics*, 171, 644-649 (2013) (査読有)
DOI: 10.1007/s10909-012-0725-1

5. "Anomalous suppression of superfluidity for ^4He in Gelsil glass", Kouetsu Mikami, Toshiaki Kobayashi, Junko Taniguchi, Masaru Suzuki, and Keiya Shirahama, *Journal of Physics: Conference Series*, 400, 012048-1, -4 (2012). (査読有)
DOI: 10.1088/1742-6596/400/1/012048

6. "Solidification of ^4He confined in a nanometer-size channel", Junko Taniguchi and Masaru Suzuki, *Physical Review B*, 84, 054511-1, -6 (2011). (査読有)
DOI: 10.1103/PhysRevB.84.054511

7. "Superfluidity and BEC of liquid ^4He confined in a nanometer-size channel", Junko Taniguchi, Rina Fujii, and Masaru Suzuki, *Physical Review B*, 84, 134511-1, -5 (2011). (査読有)
DOI: 10.1103/PhysRevB.84.134511

[学会発表](計 16件)

1. "孔径 2.8 nm の細孔を有する FSM 中 ^3He の NMR 測定"発表予定, 田中大貴, 谷口淳子, 鈴木勝, 日本物理学会, 中部大学, 2014/09.

2. "1次元ナノ多孔体中液体 ^4He の2重連成振子による超流動の観測", 出村健太, 谷口淳子, 鈴木勝, 日本物理学会, 東海大学, 2014/03.

3. "1次元ナノ多孔体中液体 ^4He の2重連成

振り子による超流動の観測",
出村健太, 谷口淳子, 鈴木勝,
日本物理学会, 徳島大学, 2013/09.

4. "3He impurity effect on the superfluidity for liquid 4He confined in 1D nano-porous medium FSM16",
K. Demura, J. Taniguchi, M. Suzuki,
International Conference on Quantum Fluid and Solid (QFS2013), Matsue, 2013/08.

5. "Competition Between the Superfluid Overlay and the Mobile Solid Layer of 3He-4He Mixture Films on Porous Gold",
Junko Taniguchi, Toshio Mouri, Masaru Suzuki, Mitsunori Hieda, and Tomoki Minoguchi,
International Conference on Quantum FLuid and Solid (QFS2013), Matsue, 2013/08.

6. "1次元ナノ多孔体中液体 4He の超流動の動的抑制における 3He 不純物効果の観測",
出村健太, 谷口淳子, 鈴木勝,
日本物理学会, 広島大学, 2013/03.

7. "1次元ナノ多孔体中液体 4He の2重連成振り子による超流動の観測",
出村健太, 谷口淳子, 鈴木勝,
日本物理学会, 横浜国立大学, 2012/09

8. "Superfluidity and BEC of 4He confined in a one-dimensional channel",
Junko Taniguchi,
International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2012)(Invited talk), Lancaster, UK, 2012/08

9. "ナノ多孔体中 4He 液体における量子相転移と1次元超流動性の実験的研究",
谷口淳子,
日本物理学会(若手奨励賞受賞記念講演),
関西学院大学, 2012/03

10. "1次元ナノ多孔体中の超流動",
三上巧悦, 谷口淳子, 鈴木勝,
日本物理学会, 関西学院大学, 2012/03

11. "1次元ナノ多孔体中 4He の2重連成振り子による超流動の観測",
谷口淳子, 出村健太, 鈴木勝,
日本物理学会, 関西学院大学, 2012/03

12. "1次元ナノ多孔体に閉じ込めた 4He の超流動の2段階成長",
谷口淳子, 鈴木勝,
日本物理学会, 富山大学, 2011/09

13. "1次元ナノ多孔体中の超流動",
三上巧悦, 谷口淳子, 鈴木勝,
日本物理学会, 富山大学, 2011/09

14. "Phonon excitation for 4He confined in nanometer-size uniform channel under pressure",
Junko Taniguchi and Masaru Suzuki,
26th International Conference of Low Temperature Physics (LT26), Beijing China, 2011/08

15. "Anomalous suppression of superfluidity for 4He in Gelsil glass",
Kouetsu Mikami, Toshiaki Kobayashi, Junko Taniguchi, Masaru Suzuki, and Keiya Shirahama,
26yth International Conference of Low Temperature Physics (LT26), Beijing China, 2011/08

16. "Superfluidity and BEC of liquid 4He confined in uniform nano-meter size channel",
Junko Taniguchi and Masaru Suzuki,
International Conference of Ultra Low Temperature Physics (ULT2011), Daejeon, Korea, 2011/08

〔その他〕
ホームページ等
<http://ns.phys.uec.ac.jp>

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: