

令和元年6月4日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05471

研究課題名(和文) 1次元ヘリウム3の朝永ラuttinger液体状態のNMRによる実証

研究課題名(英文) NMR verification of Tomonaga-Luttinger state for one-dimensional helium-3

研究代表者

松下 琢 (Matsushita, Taku)

名古屋大学・理学研究科・講師

研究者番号：00283458

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)：直線的なナノ細孔中では、低温で熱ドブロイ波長が細孔径より大きくなる結果、軸方向の自由度のみを持つ1次元ヘリウム3流体が形成されると考えられる。この流体が1次元量子流体である朝永ラuttinger (TL) 液体を実現しているか核磁気共鳴を用いて検証を行った。1次元系を実現する低温ではTL液体の振る舞いに合致した温度に反比例するスピンスピン緩和が観測された。孔間の接続のみが異なる3次元細孔を用いた対照実験からは、この振る舞いが1次元状態のヘリウム3に特有の現象であることが実証された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

1次元量子系は理論的には取り扱いやすく、また3次元系とは全く異なる物性を示すため、様々な技術を発展させながら精力的に研究されてきたが、その実験的な実現は容易ではなく、近年になりようやく電子系やスピン系でTL液体の振る舞いが観測されるようになった。一方、原子が実際にフェルミ液体を作るヘリウム3系では、本研究で初めてTL液体と合致する特徴が観測された。ヘリウム3系は電子等とは異なる相互作用をもち、新たなTL液体のモデル系となりうる。その実証は1次元量子系の物理をこれまで以上に発展させることが期待される。

研究成果の概要(英文)：In straight nanochannels, one-dimensional (1D) helium-3 fluid with a motional freedom only in the axial direction is considered to be formed at low temperatures where the thermal de Broglie wavelength becomes longer than the channel diameter. For this fluid, realization of 1D quantum fluid, Tomonaga-Luttinger (TL) liquid, was examined using a nuclear magnetic resonance. At low temperatures where 1D systems are realized, the spin-spin relaxation in inverse proportion to temperatures was observed in agreement with a TL liquid behavior. By a control experiment using nanopores with 3D connectivity, this behavior was verified to be specific of 1D helium-3 systems.

研究分野：低温物理学

キーワード：朝永ラuttinger液体 ヘリウム3 核磁気共鳴 ナノ細孔 次元性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ランダウのフェルミ液体論は2次元フェルミ系では有効であるが1次元系では破綻し、縮退状態で明確なフェルミ面をもたず、スピンと電荷(質量)が異なる励起をもつなど特異な物性を示す朝永ラッティンジャー液体となることが理論的に示される。この液体はフェルミ系のみならず1次元量子系を包括して記述すると考えられているが、現実の系で実現できるかが積年の問題であった。近年カーボンナノチューブ上の電子や半導体量子細線、擬1次元量子スピン系などでこの液体を特徴付ける実験的な証拠が観測されるようになってきたが、原子が実際にフェルミ液体を形成するヘリウム3系ではその実証例はなかった。

申請者らは基盤にコートしたヘリウム4の自由表面上に吸着された希薄ヘリウム3が理想的な2次元Fermi気体として振舞うことを用い、近年合成可能になったナノサイズの規則的な細孔構造を持つ多孔体によってヘリウム3の1次元系の実現を目指してきた。温度を下げることでこのヘリウム3薄膜中の特徴的な長さ(フェルミ波長や熱的ドブロイ波長など)が細孔周より長くなると、細孔の断面内の運動の自由度は消失することが期待される。申請者らのグループはその研究を世界に先駆けて進めてきており、実際に直線的なナノ細孔中のヘリウム3で2次元膜から1次元系への次元性クロスオーバーを示唆する比熱を観測した。また比熱測定に加えてその基底状態を微視的に調べる核磁気共鳴を用いた研究を近年開始した。その結果、直線的なナノ細孔中のヘリウム3において2次元から1次元流体へクロスオーバーすることに関係する帯磁率のずれを初めて観測し、さらに1次元領域では朝永ラッティンジャー液体と合致するスピン緩和の振る舞いが一部観測されその実現が示唆されている。これらの研究は申請者らが世界的に先行してきたが、ロンドン大や電通大でも高温からNMRの予備実験を開始するなど注目されてきており、その進展が急務となってきていた。

2. 研究の目的

本研究では、直線的なナノ細孔中に形成した1次元ヘリウム3流体で実現が示唆された朝永ラッティンジャー液体の可能性について、主として核磁気共鳴法を用いた微視的な観点の系統的な実験からその存在を実証しその物性を研究することを目的とした。ヘリウム3気体の原子間相互作用はハードコア斥力とファンデルワールス引力によるが、最近の理論的研究は細孔径によりヘリウム3の実効的な相互作用を引力から斥力まで変えることができることを示唆している。当初は、系統的にヘリウム3密度を変えた実験の後、コートするヘリウム4膜厚を変えることなどでスピン相互作用依存性などの検証も行い、この流体の1次元量子流体としての特性を引き出すことを計画した。

3. 研究の方法

1次元ヘリウム3量子流体を実現するために、ヘリウムを吸着させる基盤として豊田中央研究所から研究用に提供されたFSM(C14)を使用した。この多孔体基盤は蜂の巣状に配列した孔直径2.4nm長さ約300nmの直線的な細孔をもつシリカ粉末である。このFSMの細孔をヘリウム4薄膜でコートし、そのうえに浮かべた希薄ヘリウム3薄膜の1次元状態を得るには、そのフェルミエネルギーが細孔周方向運動の励起エネルギーより小さい必要がある。そのため1原子層完結吸着量の1%以下という極微量のヘリウム3から1次元状態が得られなくなる量まで密度を増やした、帯磁率、核スピン緩和の系統的な観測を行った。本研究では特にここで観測された結果が、1次元系のみで観測されることを対照実験によって明らかにすることで、1次元量子流体が実現していることを実証した。対照実験には、1次元細孔と近い直径2.7nmの細孔が5.5nmで3次元的に接続されている多孔体HMM-2を用いた。この多孔体のヘリウム3に対する吸着ポテンシャルは1次元多孔体FSMと同程度であることがわかっている。また、細孔内でヘリウム3の相互作用をどの程度変えることができるか調べるために、この3次元多孔体を持ちいて、コートするヘリウム4膜厚を変えた核スピン緩和の系統的な測定も行った。

4. 研究成果

(1) 1次元細孔中のヘリウム3の次元性クロスオーバーを示す帯磁率と朝永ラッティンジャー液体の振る舞いと合致した1次元状態でのスピン緩和

図1に25 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ のヘリウム4をコートした1次元細孔中で観測されたヘリウム3の帯磁率を示した。温度を乗じてヘリウム3量で規格化しており、高温で一定値を示すのは古典流体のキュリー則である。ヘリウム3密度によらず0.3K付近から帯磁率の減少がみられる。比熱においては高温で2次元古典流体の比熱がみられるが、細孔周方向運動の励起エネルギー Δ_{01} の半分程度の温度で1次元へのクロスオーバーに伴い比熱が山をもち、低温で縮退比熱が見られる。帯磁率では1次元系の場合フェルミ温度より十分高温から縮退の影響で帯磁率が小さくなるため、次元クロスオーバーが非縮退領域で起きると、ヘリ

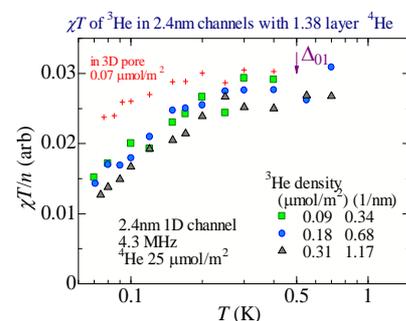


図1 1次元細孔中ヘリウム3薄膜の帯磁率および3次元細孔中ヘリウム3との比較

ウム 3 密度に依らず同じ温度から帯磁率が減少すると考えられる。したがって、この観測結果は Δ_{01} が 0.5K 程度であり、0.3K 以下で 1 次元系が実現していることを示唆する。図 2 にスピンスピン緩和時間 T_2 の結果を示した。低吸着量の 1 次元領域の低温で T_2 は温度に反比例することがわかるが、この振る舞いはスピンスピンの朝永ラッティンジャー液体の ESR でよく知られる特徴である。フェルミ温度が Δ_{01} を上回ると 1 次元系は最低温でも実現しないはずである。これを検証したのが 0.75 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ のデータである。期待されたように低温での T_2 の上昇がみられなくなることがわかった。

(2) 形状の異なる細孔を用いた対照実験による、ヘリウム 3 の 1 次元性の検証

上記の結果は 1 次元細孔中でヘリウム 3 が朝永ラッティンジャー液体を実現している可能性を強く示唆するものであり、国内外での理論・実験研究を喚起する契機となったが、一方で縮退領域にはないと考えられる希薄なヘリウム 3 においても T_2 の上昇が観測されるなど未解明の問題も残されている。そこで、 T_2 の上昇などの特徴がヘリウム 3 の 1 次元性に由来することを実験的に明らかにするために、上記方法に示したように細孔径や吸着ポテンシャルは同様であるが、細孔の形状すなわちそこに吸着されたヘリウム 3 膜の形状が 1 次元的でない HMM-2 を用いた場合について対照実験を行った。図 1 および図 2 には 3 次元細孔に同じ 25 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ のヘリウム 4 をコートした場合の帯磁率及び T_2 の結果を合わせて示した。ここでは帯磁率では 1 次元クロスオーバーによると考えられる帯磁率の減少が起きないこと、また特徴的な低温での T_2 の上昇は存在しないことが明らかになった。帯磁率、 T_2 とともにより低温で減少が新たに始まるが、これは比熱で観測される起源が未解明だった束縛状態に伴うものと考えられる。帯磁率の減少はこの束縛状態が反強磁性二量体の形成によることを強く示唆するが、これは全く新しい知見である。本研究のテーマとは離れるがその起源についても今後の研究が必要である。この束縛状態をさけるために比熱で束縛状態が観測されなくなる、よりヘリウム 4 膜が厚い状態でも対照実験を行った。その結果、同様に次元クロスオーバーによる帯磁率の減少は起きないこと、 T_2 の上昇はないことが明らかになった。これらの結果により、低温で T_2 が温度に反比例して長くなる振る舞いを始めとした特徴は 1 次元状態のヘリウム 3 固有のものであり、ヘリウム 3 流体の 1 次元性に起因することが実証された。

(3) ヘリウム 4 膜厚に依存する細孔内ヘリウム 3 の運動状態とスピン相関

ヘリウム 3 気体の原子間相互作用は細孔径やコートするヘリウム 4 の膜厚によって変調できると考えられるが、既存はモデル計算のみであり定量的にはどの程度相互作用を変えられるか明らかになっていない。今回、上記の対照実験においてスピンスピン緩和時間 T_2 の温度依存性を調べたところ、低温で温度に依存せず、高温で指数関数的に長くなる振る舞いがみられた。これは単体のヘリウム 3 吸着膜等で観測されるものと同様に、ヘリウム 3 間の双極子相互作用による緩和、BPP 模型によって理解されると考えられる。この模型では T_2 は運動による先鋭化によって決まり、その緩和時間はヘリウム 3 間の交換の典型的な時間に依存する。 T_2 が低温で温度に依存しなくなるのは、熱励起運動からトンネリングに移行することによるものと考えられ、その流動性を知ることができる。このような情報は 1 次元性によって T_2 に特徴的な振る舞いが現れる 1 次元ヘリウム 3 流体では直接得られないため、1 次元系の実験に先立ってその詳細をヘリウム 4 膜厚を変えて系統的に調べることとした。図 3 にトンネル領域のヘリウム 3 について T_2 のヘリウム 4 膜厚依存性を示した。ヘリウム 4 膜が超流動性を示す密度直上の 21 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ から膜厚を増やすと急激に T_2 は長くなり、ヘリウム 3 の流動性が増すことが示唆される。一方、さらに膜厚を上げると T_2 は短くなった。これは超流動がヘリウム 3 の流動性を助けるという従来の考えに反し、密度増加によって流動が障害されることを示唆する新しい知見である。また束縛状態がみられないヘリウム 4 膜が厚い領域では、比熱および帯磁率に典型的なフェルミ液体の振る舞いが見られたため、その Wilson 比の解析を行った。その結果、1 次元系が実現するような希薄なヘリウ

T dependence of transverse spin relaxation

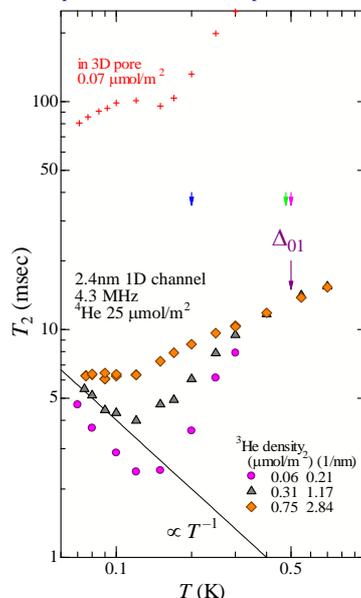


図3 1次元細孔中ヘリウム3薄膜のスピンスピン緩和時間および3次元細孔中ヘリウム3との比較

⁴He thickness dependence of T_2 of tunneling ³He

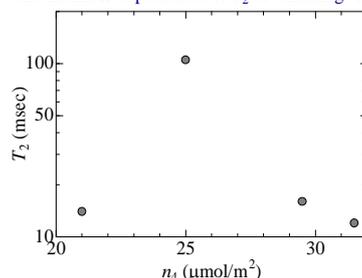


図2 トンネリング領域の 1 次元細孔中ヘリウム 3 薄膜のスピンスピン緩和時間のヘリウム 4 膜厚依存性

ム3の領域では強磁性相関がみられ、ヘリウム4膜厚の減少とともに小さくなることがわかった。これはさらに薄いヘリウム4膜厚で反強磁性二量体が見られるのに呼応すると考えられる。このようにヘリウム4膜厚を変えることでヘリウム3間の相関を広範囲にかえられることが実証された。予想外に長いスピン格子緩和時間のためにこれらの測定が長期にわたったため当初の計画が遅れることとなったが、この知見を基にした1次元ヘリウム3の相関を変えた系統的な実験を現在準備している。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 5 件)

T. Matsushita, V. Sonnenschein, W. Guo, H. Hayashida, K. Hiroi, K. Hirota, T. Iguchi, D. Ito, M. Kitaguchi, Y. Kiyayagi, S. Kokuryu, W. Kubo, Y. Saito, H. M. Shimizu, T. Shinohara, S. Suzuki, H. Tomita, Y. Tsuji, N. Wada, Generation of $^4\text{He}_2^*$ clusters via neutron- ^3He absorption reaction toward visualization of full velocity field in quantum turbulence, *J. Low Temp. Phys.* (online published), 1-8 (2018), 査読有, DOI: 10.1007/s10909-018-02112-3

T. Matsushita, M. Hieda, R. Toda, S. Inagaki, and N. Wada, Transition from a 2D degenerate Bose liquid to 3D superfluid in ^4He films formed in nanopores, *J. Phys. Soc. Jpn.* **86**, 103601-1-4 (2017), 査読有, DOI: 10.7566/JPSJ.86.103601

T. Matsushita, N. Hori, S. Takata, N. Wada, N. Amaya, and Y. Hosokoshi, Direct three-dimensional ordering of quasi-one-dimensional quantum dimer system near critical fields, *Phys. Rev. B* **95**, 020408(R)-1-4 (2017), 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevB.95.020408

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**, 251-257 (2016), 査読有, DOI: 10.1007/s10909-015-1369-8

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**, 273-283 (2016), 査読有, DOI: 10.1007/s10909-015-1393-8

[学会発表](計 14 件)

松下琢, 稲垣諒一, 伊藤正行, 天池一憲, 檜枝光憲, 和田信雄, ^4He 被覆した3次元ナノ細孔中に吸着した ^3He 薄膜の γ 値の大きなフェルミ液体状態、日本物理学会第74回年次大会、九州大学、2019年3月14-17日

松下琢, 稲垣諒一, 天池一憲, 檜枝光憲, 和田信雄, 伊藤正行, 3次元ナノ細孔中の液体 ^4He 薄膜上に形成される ^3He 束縛状態、日本物理学会2018年秋季大会 [物性]、同志社大学、2018年9月9-12日

T. Matsushita, K. Amaike, M. Hieda, and N. Wada, Singlet Dimer Bound State of ^3He in Nanopore Suggested by NMR, International Symposium on Quantum Fluids and Solids, QFS2018, July 25-31, 2018, the University of Tokyo, Tokyo, Japan

天池一憲, 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 IV、日本物理学会第73回年次大会、東京理科大学、2018年3月22-25日

天池一憲, 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 III、日本物理学会2017年秋季大会 [物性]、岩手大学、2017年9月21-24日

T. Matsushita, K. Amaike, R. Shibatsuji, M. Hieda, N. Wada, Essentially Different ^3He Fluid States in ^4He -preplated 1D and 3D Nanopores Revealed by NMR, International Conference on Ultra Low Temperature Physics, ULT 2017: Frontiers of Low Temperature Physics, August, 17-21, 2017, Kirchhoff-Institute for Physics, Heidelberg University, Heidelberg, Germany

T. Matsushita, R. Shibatsuji, K. Kurebayashi, M. Hieda, N. Wada, Possible Tomonaga-Luttinger liquid state of ^3He adsorbed in 1D nanochannels, 28th International Conference on Low Temperature Physics, LT28, 9-16 August 2017, Gothenburg, Sweden

T. Matsushita, K. Amaike, T. Yoshimura, M. Kuno, M. Hieda, N. Wada, ^3He fluid states adsorbed in ^4He -preplated nanopores with 3D connection, 28th International Conference on Low Temperature Physics, LT28, 9-16 August 2017, Gothenburg, Sweden

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、2017年3月17-20日

T. Nishida, T. Yoshimura, M. Hieda, T. Matsushita, N. Wada, Specific heat of ^3He adsorbed in new 3D nanoporous MCM-48, IGER International Symposium on Science of Molecular Assembly and Biomolecular Systems 2016, 29-30 September 2016, Nagoya University, Japan

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、2016年9月13-16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、2016 年 9 月 13-16 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, QFS 2016, 10-16 August 2016, 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, QFS 2016, 10-16 August 2016, Prague, Czech Republic

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称：熱交換器、冷凍機および焼結体

発明者：和田信雄，松下琢，檜枝光憲

権利者：名古屋大学

種類：特許

番号：特願 2018-032417

出願年：2018 年

国内外の別：国内

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)研究分担者

該当なし

()研究連携者

研究連携者氏名：和田信雄

ローマ字氏名：Nobuo Wada

所属研究機関名：名古屋大学

部局名：大学院理学研究科

職名：教授

研究者番号(8桁)：90142687

(2)研究協力者

研究協力者氏名：天池一憲

ローマ字氏名：Kazunori Amaike

研究協力者氏名：稲垣諒一

ローマ字氏名：Ryoichi Inagaki

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。