

平成 22 年 5 月 17 日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2005 年度 ～ 2009 年度

課題番号：17071006

研究課題名（和文）1次元ボースおよびフェルミ流体の量子物性

研究課題名（英文）Quantum properties of Bose and Fermi fluids in one-dimensional states

研究代表者

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

研究成果の概要（和文）：

我々はナノ・ケージから細孔が3次元的につながった多様なナノ多孔体中で実現する新規ヘリウム量子流体を研究してきた。ナノ多孔体中でヘリウムがどのような吸着状態(吸着エネルギーや層形成)かを明らかにする実験方法を確立し、さまざまなナノ多孔体で吸着状態を明らかにした。ゼロおよび1次元状態の新規4Heと3He流体は、ナノ・ケージと1次元トンネルにおいて実現する研究を行った。そして超流動オンセット(転移)が1次元と3次元ナノ多孔体で、明らかに異なる特徴を持ち、後者では3次元の相転移を示す結果をえた。更に1次元ナノ多孔体では、超流動オンセットの細孔直径依存を実験および理論的に研究し、有限長さを考慮すると1次元状態でも超流動が存在する可能性を初めて示した。基盤からの局在ポテンシャルが小さいガス状態の3Heは、ナノ多孔体の壁面を1層程度4Heで覆うことにより実現し、ゼロから3次元のナノ多孔体において3He量子流体を実現した。このうち1.8nm以上の孔径の1次元ナノ多孔体では、高温での2次元ボルツマンガスから低温での1次元ガスへの次元性のクロスオーバーを観測した。また、2次元のKosterlitz-Thouless超流動転移を極限的な高周波数で観測して、その周波数依存から超流動渦の大きさやその量子拡散について正確な知見を得た。

研究成果の概要（英文）：

We have studied helium adsorbed in new nanopores which have regular structures from nano-cage to three-dimensionally (3D) connected pores. Adsorption potential and layer formation of the adsorbed helium are observed by the vapor pressure for the adsorption. New paradigms of zero-D and 1D helium fluids are realized in nano-cages and nano-channels, respectively. The superfluid onsets (transitions) in the 1D and 3D nanopores show obvious dependence on the pore connections. The superfluid in the 3D pores has properties similar to the Bose-Einstein condensation of the 3D Bose atomic gas. The films of the 3He gas formed in the 4He preplated nanopores show the dimensional crossover depending on the pore connection: from the 2D Boltzmann gas to a 1D or 3D gas state with decreasing temperature. This 3He-gas changes to the degenerate state in each dimension at the lower temperatures. Extremely high frequency superfluid measurements of 4He films on flat substrate determined the superfluid vortex parameters of the 4He films.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005 年度	27,100,000	0	27,100,000
2006 年度	11,800,000	0	11,800,000
2007 年度	6,000,000	0	6,000,000
2008 年度	5,800,000	0	5,800,000
2009 年度	5,900,000	0	5,900,000
総計	56,600,000	0	56,600,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 I I

キーワード：1次元，ヘリウム，フェルミ流体，超流動，ナノチューブ

1. 研究開始当初の背景

バルク 4He および 3He 液体は，低温で超流動やフェルミ縮退と P 波超流動に 3 次元相転移する典型的な量子流体である。更にグラファイトなどの平らな基盤上に吸着した 4He の Kosterlitz-Thouless 転移や 2 次元固体および液体 3He の研究が盛んに行われていた。また 10 nm 近くの細孔がランダムではあるが 3 次元的につながった多孔質ガラスに吸着した 4He 薄膜について，3 次元的な超流動転移の可能性が Reppy らにより指摘されていた。

一方，次元性が 2 次元よりも更に低い 1 次元やゼロ次元の 4He と 3He 量子流体の実現は，当時我々の研究を除いてほとんど無かった。また極限的に小さな細孔中でヘリウムが量子流体状態にあるかどうかはわかっていなかった。そこで我々は，直径がナノメートルサイズの細孔が規則的な構造でつながったナノ多孔体において，4He および 3He 量子流体を実現し，次元性や相関を制御した新規ボースおよびフェルミ量子流体を実現する研究を，世界に先駆けて開始していた。

2. 研究の目的

バルクの 4He および 3He 液体は，それぞれボースおよびフェルミ量子流体の理想的な研究対象である。これら 3 次元バルク液体や本領域の福山らが行うヘリウムの 2 次元系よりも更に低次元にした，1 次元ヘリウム量子流体等を，我々は新規実現する研究を行ってきた。

本研究の目的は，ナノ極限環境により 1 次元やゼロ次元の 4He と 3He 量子流体を初めて実現し，3 からゼロ次元状態での 4He の超流動性や 3He の縮退状態，それにナノ細孔環境での新奇相関とそれによる量子状態(ボースガラスや量子相転移など)を研究する。

以上のような次元性と相関を制御したヘリウム量子流体と，原子ガスの BEC(上田らの研究)などとは全く異なった実験対象であるが，本質は共通の基本原則で理解されるべきである。本領域での有機的な連携でこれらの本質的な理解をする。

3. 研究の方法

新規ナノ多孔体基盤では，まずヘリウムがどのような吸着状態であるかを明らかにする必要がある。これを吸着圧力や最近では比

熱やねじれ振り子実験で観測されるヘリウムの脱着の解析から解明し，層形成や吸着エネルギーを求めた。次に吸着 4He と 3He の相関を比熱などから決めて，量子流体状態を探索する。

1 次元などにおける 4He の超流動性については，3 からゼロ次元状態の 4He ボース流体を実現し，それぞれの次元性を反映した超流動性をねじれ振り子，比熱等で検証する。また低次元での超流動性の新たな研究方法として，超流動の高周波数依存を水晶マイクロバランス法で測定する。

1 次元など低次元の 3He フェルミ量子流体を実現するには，フェルミ縮退温度が十分低いことが必要条件と分かってきた。このためナノ多孔体の細孔壁を 1 層程度の 4He で覆ったあとに，希薄密度の 3He を吸着させてゼロから 3 次元の 3He フェルミガスを実現する。そして縮退状態などを比熱や NMR で研究する。

理論の分担者や協力者は，ナノ細孔中のポテンシャルや He 吸着状態の理論的解析を行う。また 1 次元状態での 4He の超流動性や 3He フェルミ流体の相関などの理論研究を行う。

4. 研究成果

ナノ多孔体中でヘリウムがどのような吸着状態(吸着エネルギーや層形成)かを，吸着圧力から明らかにする実験方法を確立し，更に最近では，比熱やねじれ振り子で観測する He の脱着データの解析から明らかにした。

次に，多様なナノ多孔体においてヘリウムの吸着状態と相関を決定し，各ナノ多孔体細孔のつながりの次元を反映した新規次元の量子流体状態を実現した。

4He の超流動性については，超流動オンセット(転移)が 1 次元と 3 次元ナノ多孔体で，明らかに異なる特徴を持ち，後者では 3 次元の相転移を示す明確な結果をえた。一方の 1 次元状態での超流動性については，1 次元細孔の孔径依存が観測された。この 1 次元状態での超流動観測は，1 次元長さを相関長が超えると可能であるとする指摘が，山下・平島により提案された。

基盤からの局在ポテンシャルが小さいガス状態の 3He は，ナノ多孔体の壁面を 1 層程度 4He で覆うことにより実現し，ゼロから 3 次元のナノ多孔体において 3He 量子流体を実現した。このうち 1.8nm 以上の孔径の 1 次元ナノ多孔体では，高温での 2 次元ボルツ

マンガスから低温での1次元ガスへの次元性のクロスオーバーが観測された。またナノ細孔中での3He粒子間の結合エネルギーが、特定の孔径付近で大きく増強される可能性を平島らは理論的に指摘した。

2次元のKosterlitz-Thouless超流動転移を極限的な高周波数で観測して、その周波数依存から超流動渦の大きさやその量子拡散について正確な知見を得た。

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5件 全て査読有)

[1] T. Matsushita, R. Toda, M. Hieda, and N. Wada, "Quantum states of helium atoms confined in nanocage in Na-Y zeolite"

J. Low Temp. Phys. **158**, 188 (2010) (6pages)

[2] T. Oda, M. Hieda, R. Toda, T. Matsushita, and N. Wada, "Vortex diffusivity and core diameter of 2D superfluid in 4He films on gold and H₂ substrates",

J. Low Temp. Phys. **158**, 262 (2010) (6pages)

[3] Y. Kinoshita, R. Toda, T. Matsushita, M. Hieda, N. Wada, H. Nishihara, and T. Kyotani, "Helium film formed in 1.2 nm pore in zeolite templated carbon", J. Low Temp. Phys. **158**, 275 (2010) (6pages)

[4] N. Wada, T. Matsushita, M. Hieda, and R. Toda, "Fluid states of helium adsorbed in nanopores", J. Low Temp. Phys. **157**, 324 (2009) (6pages)

[5] M. Hieda, K. Matsuda, T. Kato, T. Matsushita, and N. Wada, "Extremely high frequency dependence of two-dimensional superfluid onset" J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 033604 (2009) (4pages)

[学会発表] (計36件)

[1] N. Wada, T. Matsushita, M. Hieda, and D. S. Hirashima

O9 One-Dimensional Phonon State and Superfluidity of 4He Fluid Nanotubes
International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials, PSM2010

March 9-12, 2010, Hamagin hall "VIA MARE", Yokohama, JAPAN

[2] T. Harada, T. Matsushita, N. Wada, S. Nishihara, and Y. Hosokoshi

P39 Field-Induced Magnetic Orderings of S=1/2 Bond-Alternating Antiferromagnetic Chain F5PNN

International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials, PSM2010, March 9-12, 2010, Hamagin hall "VIA MARE", Yokohama, JAPAN

[3] M. Hieda, T. Oda, T. Matsushita, and N. Wada
P59 Vortex Dynamics of 2D Superfluid in 4He and 3He-4He Films

International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials, PSM2010

March 9-12, 2010, Hamagin hall "VIA MARE", Yokohama, JAPAN

[4] T. Matsushita, J. Miura, A. Ohma, M. Hieda, and N. Wada

P61 Helium Fluid Adsorbed in 1.5 nm One-Dimensional Straight Pores

International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials, PSM2010

March 9-12, 2010, Hamagin hall "VIA MARE", Yokohama, JAPAN

[5] S. Kiyota, M. Hieda, T. Matsushita, and N. Wada

P69 Size Effect on Superfluid Transition of 4He Films in Thin Porous Gold

International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials, PSM2010

March 9-12, 2010, Hamagin hall "VIA MARE", Yokohama, JAPAN

[6] T. Oda, M. Hieda, T. Matsushita, and N. Wada
P58 QCM Study of Superfluid Transition in 3He-4He Mixture Films

International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials, PSM2010

March 9-12, 2010, Hamagin hall "VIA MARE", Yokohama, JAPAN

[7] Y. Minato, M. Hieda, T. Matsushita, and N. Wada

P64 Pore-size Dependence of Superfluidity of 4He in 1D-Nanopores FSM

International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials, PSM2010

March 9-12, 2010, Hamagin hall "VIA MARE", Yokohama, JAPAN

[8] Y. Nakashima, Y. Minato, M. Hieda, T. Matsushita, and N. Wada

P66 State of 4He Adsorbed in Three-Dimensional Nanopores of ZTC with 3D-period 1.4nm

International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials, PSM2010

March 9-12, 2010, Hamagin hall "VIA MARE", Yokohama, JAPAN

[9] K. Sahashi, A. Ohma, T. Matsushita, R. Toda, M. Hieda, and N. Wada

P68 Quantum Clusters of Helium Formed in Nanocage in Na-Y Zeolite

International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials, PSM2010

March 9-12, 2010, Hamagin hall "VIA MARE", Yokohama, JAPAN

[10] T. Matsushita, K. Sahashi, M. Hieda, and N. Wada

CD35 Quantum States of Helium Atoms Confined in Nanocage in Na-Y Zeolite

QFS2009: International Symposium on Quantum Fluids and Solids August 5-11, 2009 -

Northwestern University, Evanston, Illinois, USA

[11] Y. Kinoshita, Y. Minato, Y. Nakashima, T. Matsushita, M. Hieda, and N. Wada

CD36 (IPS/CD#3) Helium Film Formed in 1.2 nm Pore in Zeolite Templated Carbon

QFS2009: International Symposium on Quantum Fluids and Solids August 5-11, 2009 -

Northwestern University, Evanston, Illinois, USA

[12] T. Oda, M. Hieda, R. Toda, T. Matsushita, and N. Wada

CD37 Vortex Diffusivity and Core Diameter of 2D Superfluid in 4He Films on Gold and H₂

Substrates

QFS2009: International Symposium on Quantum Fluids and Solids August 5-11, 2009 – Northwestern University, Evanston, Illinois, USA

[13] 和田信雄

A#1 4He 流体ナノチューブの1次元フォノン状態と超流動性
特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」
A02 班研究会, 1月7-9日/2010、八王子セミナーハウス

[14] 松下琢

A#2 ナノケージ中に形成された少数ヘリウム粒子系(量子クラスター)の比熱
特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」
A02 班研究会, 1月7-9日/2010、八王子セミナーハウス

[15] 檜枝光憲

B#5 4He 及び 3He - 4He 超流動薄膜の QCM 測定
特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」
A02 班研究会, 1月7-9日/2010、八王子セミナーハウス

[16] 原田太陽, 松下琢, 和田信雄, 西原禎文, 細越裕子

21pGJ-11 反強磁性ボンド交替鎖有機磁性体 F5PNN の磁場中構造相転移
日本物理学会第 65 回年次大会, 岡山大学津島キャンパス, 2010年3月20日-23日

[17] 松下琢, 三浦準, 大間章央, 檜枝光憲, 和田信雄

23aHX-4 4He でコートした孔径 1.5nm の一次元トンネル中の希薄 3He の比熱
日本物理学会第 65 回年次大会, 岡山大学津島キャンパス, 2010年3月20日-23日

[18] 中嶋佑奈, 湊祐輔, 檜枝光憲, 松下琢, 和田信雄

23aHX-6 3次元周期 1.4nm のナノ多孔体 ZTC 中の 4He の吸着状態
日本物理学会第 65 回年次大会, 岡山大学津島キャンパス, 2010年3月20日-23日

[19] 湊祐輔, 戸田亮, 檜枝光憲, 松下琢, 和田信雄

23aHX-7 一次元ナノ多孔体 FSM 中 4He 流体の一次元性と超流動性
日本物理学会第 65 回年次大会, 岡山大学津島キャンパス, 2010年3月20日-23日

[20] 清田修一郎, 檜枝光憲, 松下琢, 和田信雄

23aHX-8 板状 Porous Gold 基盤に吸着した 4He 薄膜超流動転移の QCM 測定
日本物理学会第 65 回年次大会, 岡山大学津島キャンパス, 2010年3月20日-23日

[21] 小田拓弥, 檜枝光憲, 松下琢, 和田信雄
23aHX-9 金基盤上 3He - 4He 混合薄膜超流動転移の QCM 測定 II
日本物理学会第 65 回年次大会, 岡山大学津島キャンパス, 2010年3月20日-23日

[22] 湊祐輔, 檜枝光憲, 松下琢, 和田信雄

P9 一次元ナノ多孔体 FSM 中 4He 超流動の孔径依存
特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」
A02 班研究会, 1月7-9日/2010、八王子セミナーハウス

[23] 佐橋一裕, T. Matsushita, M. Hieda, N.

Wada

P10 ナノケージ中におけるヘリウム量子クラスターの形成
特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」

A02 班研究会, 1月7-9日/2010、八王子セミナーハウス

[24] 清田修一郎, 檜枝光憲, 松下琢, 和田信雄

P11 板状 Porous Gold 基盤に吸着した 4He 薄膜超流動転移の板厚依存
特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」

A02 班研究会, 1月7-9日/2010、八王子セミナーハウス

[25] 小田拓弥, 檜枝光憲, 松下琢, 和田信雄

P12 水素及び 3He で基盤修飾した 4He 薄膜超流動転移の QCM 測定
特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」

A02 班研究会, 1月7-9日/2010、八王子セミナーハウス

[26] 中嶋佑奈, 湊祐輔, 檜枝光憲, 松下琢, 和田信雄

P13 3次元周期 1.4nm の多孔体 ZTC 中の 4He の吸着状態と超流動の観測

特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」

A02 班研究会, 1月7-9日/2010、八王子セミナーハウス

[27] 原田太陽, 松下琢, 和田信雄, 細越裕子, 西原禎文

P14 $S=1/2$ 反強磁性ボンド交替鎖 F5PNN の磁気秩序と量子液体との対応

特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」

A02 班研究会, 1月7-9日/2010、八王子セミナーハウス

[28] T. Harada, T. Matsushita, N. Wada, S. Nishihara, and Y. Hosokoshi

P33 Field-Induced Magnetic Orderings of $S=1/2$ Bond-Alternating Antiferromagnetic Chain F5PNN

特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」スーパークリーン特定・若手秋の学校, 2009年9月28日-10月1日、休暇村南阿蘇(熊本県阿蘇郡高森町)

[29] Y. Nakashima, Y. Kinoshita, Y. Minato, R. Toda, M. Hieda, T. Matsushita, and N. Wada

P35 Superfluidity of 4He Film in 1.2 nm 3D Nanopore of ZTC

特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」スーパークリーン特定・若手秋の学校, 2009年9月28日-10月1日、休暇村南阿蘇(熊本県阿蘇郡高森町)

[30] Y. Minato, Y. Kinoshita, M. Hieda, T. Matsushita, and N. Wada

P37 Pore-Size Dependence of Superfluidity of 4He Films in 1D Nanopores

特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」スーパークリーン特定・若手秋の学校, 2009年9月28日-10月1日、休暇村南阿蘇(熊本県阿蘇郡高森町)

[31] T. Oda, M. Hieda, T. Matsushita, and N. Wada

P34 QCM Study of Superfluid Transition in 3He - 4He Mixture Films Adsorbed on Gold

特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」スーパークリーン

特定・若手秋の学校, 2009年9月28日-10月1日、休暇村南阿蘇(熊本県阿蘇郡高森町)

[32] T. Watanabe, K. Sahashi, A. Ohma, T. Matsushita, M. Hieda, and N. Wada

P36 Heat Capacities of Heliums Adsorbed in One-Dimensional 1.5 nm Pores of FSM

特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」スーパークリーン特定・若手秋の学校, 2009年9月28日-10月1日、休暇村南阿蘇(熊本県阿蘇郡高森町)

[33] 原田太陽, 松下琢, 檜枝光憲, 和田信雄, 細越裕子, 西原禎文

25pQJ-5 1次元反強磁性ボンド交替鎖有機磁性体 F5PNN の磁場中磁気秩序

日本物理学会 2009年秋季大会 [物性], 熊本大学黒髪キャンパス, 2009年9月25日-28日

[34] 渡辺匡洋, 佐橋一裕, 大間章央, 松下琢, 檜枝光憲, 和田信雄

26pYB-2 孔径 1.5nm の一次元多孔体 FSM に吸着した He の比熱

日本物理学会 2009年秋季大会 [物性], 熊本大学黒髪キャンパス, 2009年9月25日-28日

[35] 小田拓弥, 檜枝光憲, 松下琢, 和田信雄

26pYB-7 金基盤上 ^3He - ^4He 混合薄膜超流動転移の QCM 測定

日本物理学会 2009年秋季大会 [物性], 熊本大学黒髪キャンパス, 2009年9月25日-28日

[36] 中嶋佑奈, 木下裕介, 湊祐輔, 檜枝光憲, 松下琢, 和田信雄

26pYB-9 孔径 1.2nm の3次元ナノ多孔体 ZTC に吸着した ^4He 薄膜の超流動観測

日本物理学会 2009年秋季大会 [物性], 熊本大学黒髪キャンパス, 2009年9月25日-28日

[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:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

平島大 (HIRASHIMA DAI)

名古屋大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号: 20208820

松下琢 (MATUSHITA TAKU)

名古屋大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号: 00283458

檜枝光憲 (HIEDA MITSUNORI)

名古屋大学・大学院理学研究科・講師

研究者番号: 30372527

(3) 連携研究者

研究者番号:

研究協力者

Milton W. Cole (ミルトン・コール)

Pennsylvania State University

Department of Physics・Professor