

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13520

研究課題名(和文) ランダムネットワーク中のP波超流動体

研究課題名(英文) P-wave superfluid in randomly networked space

研究代表者

佐々木 豊 (SASAKI, YUTAKA)

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：60205870

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：直径100nmの細孔がランダムネットワーク構造をなす多孔質ガラス中の液体ヘリウム3の超流動転移を観測した。細孔表面にはヘリウム4膜を数原子層のせて境界条件を制御した。鏡面的なときは、細孔内部の液体ヘリウム3はバルクと同様の超流動相へ転移した。一方、ヘリウム4膜が薄い拡散的なときは、超流動転移温度がバルクより30μK程度高くなった。このとき細孔表面のヘリウム4層に混じってヘリウム3が一部固化しており、細孔中の液体ヘリウム3に大きなスピン揺らぎを伝達することが、転移温度上昇の誘因となっていることと推察される。また、磁気共鳴映像法の開発により超流動ヘリウム3のテクスチャーの可視化に成功した。

研究成果の概要(英文)：Superfluid transition of liquid  $^3\text{He}$  confined in randomly networked porous glass with pore diameters equally sized to 100nm is studied by NMR measurement. The surface of pore is coated with a few layers of solid and liquid  $^4\text{He}$ . With thick coating of  $^4\text{He}$ , where the boundary condition is specular, the superfluid state of liquid  $^3\text{He}$  inside pores was similar to that of the bulk liquid. With thinner coating of  $^4\text{He}$ , where the boundary condition is diffusive, the superfluid transition temperature is increased by 30 micro K from that of bulk liquid. In this case, we find that a small fraction of solid  $^3\text{He}$  is mixed into the surface  $^4\text{He}$  layers. Large spin fluctuation in the solid, which is transferred to liquid  $^3\text{He}$  in the pores, may be the cause of the raise of transition temperature. We have succeeded in developing magnetic resonance imaging technique that can visualize textures in superfluid  $^3\text{He}$ .

研究分野：低温物理学

キーワード：超流動ヘリウム3 制限空間 ランダムネットワーク 核磁気共鳴 MRI

## 1. 研究開始当初の背景

(1) スピントリプレット P 波対凝縮体である超流動ヘリウム 3 は、ノーベル物理学賞受賞に輝くその発見から 40 年以上にわたって精力的に研究され、バルクにおける特性は精密に測定されつくし、数ある量子凝縮系物質の中でも比類なき精度で理論的な理解も進んでいる。そのため、巨視的波動関数の内部自由度を境界条件や外場を精密に制御した状況下で、結果の解釈にあいまいさを残さない測定を行うことのできる理想的物質系として利用されることがある。例えば、ビッグバン直後の初期宇宙のように、実験室内で制御した実験測定をして検証することのできない物理系のモデル物質として利用して、実験研究を行うことも行われて来ている。近年ではその精密な知識を土台として、超流動ヘリウム 3 をバルクでない制限空間や異方的空間に閉じ込めたときに秩序変数の対称性に現れる効果や、トポロジカルな拘束を与えたときに起きる効果を対象とする研究が盛んに行われている。この流れの中でも、物質表面の境界条件を精密に制御することが、本質的でありかつ困難である、トポロジカル物性の研究対象物質系として、その重要性を提示し続けている。

(2) 超流動ヘリウム 3 のコヒーレンス長は数 10~100nm であり、遥かに短いコヒーレンス長を持つ超流動ヘリウム 4 や各種超伝導物質と比べて、人工的に制御可能なサイズの異方的空間や境界条件制御を用いた実験を行うことが可能であるという特徴を持つ。この特性を生かして低次元空間に閉じ込めた状態で新しい対称性を持つ超流動相の実現を目指した研究が行われているが、現状では新奇超流動相を明瞭に実現した結果は得られていない。一方、コヒーレンス長以下の微視的散乱体を低密度に充填した異方的空間を用いて、バルクでは存在しない対称性のポーラー相や新奇アキシカル相を実現したとの報告が近年になって相次ぎ、研究者の注目を浴びている。

(3) コヒーレンス長の短い超流動ヘリウム 4 にとって適切な空間サイズである数 nm の細孔径を持つ多孔質ガラス (Vycor 等) を材料として、細孔がランダムネットワークを構築する空間に閉じ込められた超流動ヘリウム 4 で、接続箇所の位相不整合に起因する秩序破壊効果の研究が従来から行われている。しかし、より複雑な秩序変数で記述される超流動ヘリウム 3 については、適切な空間サイズを持った多孔質材料が見つからなかったために、同種の研究は行われて来なかった。近年になって適切なサイズの孔径を持つ多孔質ガラス (SPG) がフィルター用として作成されるに至り、ヘリウム 3 を対象とした研究の実現可能性が出て来た。

## 2. 研究の目的

(1) コヒーレンス長程度のサイズの広がりを持つ、低次元あるいは異方的制限空間に閉じ込めた液体ヘリウム 3 がバルクと異なる対称性を持つ新超流動相となる条件について、制限空間を与える物質表面での境界散乱条件を鏡面的から拡散的まで制御した上で研究する。測定手段としては、核磁気共鳴 (NMR) 法を用いて秩序変数の内部状態を測定することを中心として、異方的制限空間内での異方的巨視的波動関数に特徴付けられる超流動相を探索する。また、試料の圧力に依存して変化するコヒーレンス長を利用して、細孔径とコヒーレンス長の大小関係を変えながら新超流動相の安定条件を探索する。

(2) ランダムネットワーク構造をなす細孔中に閉じ込められた液体ヘリウム 3 は、接続箇所の位相不整合に起因する秩序破壊効果を受けて、バルクとは対称性の異なる超流動状態に転移することと期待されるが、のみならず、位相フラストレーションや BCS ガラス相あるいは局在 BCS 相の発現など新しい物理現象の観測が期待される。それら新奇物理現象の実現条件を実験的に探索する。

## 3. 研究の方法

(1) 直径 100nm クラスの細孔がランダムネットワーク構造をなす多孔質ガラス SPG を用いて、ランダムネットワーク中の液体ヘリウム 3 のなす超流動状態について研究する。SPG を閉じ込めた容器中に充填する液体ヘリウム 3 のうち、SPG の細孔中にあるものからの NMR 信号を優先的に検出し、バルクの空間にある液体ヘリウム 3 からの NMR 信号検出は抑制されるような特殊形状試料セルを作成した。作成した試料セルをマイクロケルビン領域の超低温度を発生する核断熱消磁冷凍機に取付けて冷却して実験を行った。同冷凍機は世界にまたとない超低温磁気共鳴映像 (MRI) 法による実空間分離測定が可能であり、NMR 信号の発生場所を実空間で分離出来る特性を持つ。

(2) SPG 中に充填された液体ヘリウム 3 の NMR 測定を多孔質ガラス外のバルク液体の NMR 信号と分離して測定することで、細孔内部の液体ヘリウム 3 の超流動転移を実験観測した。バルクの部分の液体ヘリウム 3 の温度は水晶音叉振動子 (QTF) 温度計を用いて精密に測定し、バルクと細孔中ヘリウム 3 の微細な転移温度のずれが検出出来るように工夫した。細孔表面にはヘリウム 4 膜を数原子層レベルでのせて散乱境界条件を制御し、鏡面的な散乱境界条件から拡散的な散乱境界条件まで変化させたときの効果を検証した。

(3) 核断熱消磁冷凍機により、試料の温度を数 10mK 程度の高温から数 100  $\mu$ K まで冷却しながら、超流動転移温度以上の常流動状態では、NMR 測定による帯磁率の温度変化ならびにスピン拡散係数の温度変化などを手がかりとし、超流動転移温度以下では、帯磁率の温度変化、NMR 周波数の温度変化、パルス NMR 励起時のティップ角変化にたいする非線形応答効果、など各種 NMR 情報を元にして、実現した超流動状態の判別を行った。

#### 4. 研究成果

(1) 直径 100nm, 300nm の 2 種類の細孔内部の超流動転移を実験観測した。細孔表面にはヘリウム 4 膜を数原子層レベルでのせて境界条件を制御し、鏡面的な境界条件から拡散的な境界条件まで変化させたときの効果を検証した。液体ヘリウム 3 の圧力を 2.4MPa に設定したときは、ヘリウム 4 膜が 3 原子層程度以上あるときは鏡面的になり、細孔内部の液体ヘリウム 3 はバルクと同様の対称性を持つ超流動相へと転移温度の変化なしに転移することがわかった。

(2) 一方、直径 100nm の細孔表面のヘリウム 4 膜をより薄くしていくと、拡散的境界条件に近づくことで、ナイーブな思考では超流動転移温度の低下が期待されるものの、実際は、超流動転移温度がバルクの液体ヘリウム 3 より 30  $\mu$ K 程度高くなる (high-Tc) ことを発見した。このとき細孔表面の数原子層のヘリウム 4 に混じってヘリウム 3 が一部固化していることが、NMR 信号による帯磁率測定あるいはスピン拡散測定より確かめられた。この高密度固体ヘリウム 3 が、細孔中の液体ヘリウム 3 と高速直接スピン交換をすることにより、細孔中の液体ヘリウム 3 に大きなスピン揺らぎを伝達することで、クーパー対形成に寄与する相互作用の増強効果を生み、high-Tc 超流動の誘因となっているものと考えられる。

(3) この high-Tc 超流動状態が、バルクで安定な超流動相とは異なる対称性を持つことを示唆するデータは NMR 測定によっては得られなかった。また、ランダムに接続された細孔中で期待される位相フラストレーションや局在 BCS 相の発現は探索したパラメータの範囲内では発見されなかった。しかしながら、今回のプロジェクトでは時間的・資金的に制約があり、圧力 2.4MPa の試料のみという限られたパラメータ領域での探索であり、存在可能性そのものが否定されたことにはならず、今後の予算措置による再挑戦が望まれるところである。圧力を変化させることで、コヒーレンス長を変化させることができ、細孔径との大小関係を変え、また、スピン揺らぎの効果を変えることで、新状態が発見される可能性がある。

(4) また、非線形な磁気共鳴応答をする超流動ヘリウム 3 に適用可能な超低温磁気共鳴映像法の開発に成功し、超流動ヘリウム 3 の空間構造の可視化に成功した。この方法により、空間不均質な超流動状態を対象に精密な研究を進めることが世界で初めて可能となった。また、この方法を適用して、狭間隔の平行平板間に閉じ込めた超流動ヘリウム 3 の均一テクスチャー内に発生した局在空間構造 (ドメインウォール) を発見した。マクロな大きさでクーパー対の軌道角運動量によるカイラリティの揃ったドメインが安定保持され、カイラリティの異なるドメイン間のカイラルドメインウォールが局在形成されることを世界で初めての MRI 空間像撮影で実証した。この成果に関わる研究論文は現時点では投稿中であり未出版であるが、同成果は専門分野では極めて高い評価を得ており、専門分野の国際会議のみならず日本物理学会における招待講演へと繋がり、また 3 年に一度開催される今夏の低温物理学国際会議における招待講演としても採択されているなど、成果の重要性は明らかである。

#### 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 0 件)

[学会発表] (計 10 件) (登壇者<sup>○</sup>)

① “超流動  $^3\text{He-A}$  におけるドメインウォール構造”, 笠井純<sup>○</sup>, 西岡敬史, 高木丈夫, 佐々木豊, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 (大阪府・豊中市), 2017 年 3 月 18 日

② ‘Chiral Domain Structure in Superfluid  $^3\text{He}$ ’, Y. Sasaki<sup>○</sup>, International School on Topological Science and Topological Matters, 京都大学基礎物理学研究所 (京都府・京都市) (招待講演) 2017 年 2 月 17 日

③ ‘超流動ヘリウム 3 のカイラルドメイン構造’, 佐々木豊<sup>○</sup>, トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア第 2 回領域研究会、東北大学 (宮城県・仙台市) (招待講演) 2016 年 12 月 17 日

④ ‘磁気共鳴映像法によるカイラル超流動ヘリウム 3 中のドメインウォールの観測’, 佐々木豊<sup>○</sup>, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学 (石川県・金沢市) (招待講演) 2016 年 9 月 15 日

⑤ “超流動  $^3\text{He-A}$  相中に生じる位相欠陥の Tc 近傍での自発的消滅”, 笠井純<sup>○</sup>, 西岡敬史, 高木丈夫, 佐々木豊, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学 (石川県・金沢市), 2016 年 9 月 15 日

⑥ “Visualizing Textural Domain Walls in Superfluid  $^3\text{He}$  by Magnetic Resonance Imaging”, J. Kasai, Y. Okamoto, K. Nishioka, and Y. Sasaki<sup>○</sup>, International Conference on Quantum Fluids and Solids, Clarion Congress Hotel, Prague (Czech Republic) (招待講演) 2016年8月12日

⑦ “ Spontaneous annihilation of topological defects in  $^3\text{He-A}$  near  $T_c$ ”, J. Kasai<sup>○</sup>, Y. Okamoto, K. Nishioka, T. Takagi, and Y. Sasaki, International Conference on Quantum Fluids and Solids, Clarion Congress Hotel, Prague (Czech Republic) 2016年8月15日

⑧ “平行平板中  $^3\text{He-A}$  における Dipole-Locked Soliton の発見”, 笠井純<sup>○</sup>, 岡本耀平, 西岡敬史, 高木丈夫, 佐々木豊, 日本物理学会第71回年次大会, 東北学院大学 (宮城県・仙台市), 2016年3月21日

⑨ “MRSI 法による平行平板中  $^3\text{He-A}$  での面状欠陥の可視化”, 笠井純, 岡本耀平<sup>○</sup>, 西岡敬史, 佐々木豊, 日本物理学会第71回年次大会, 東北学院大学 (宮城県・仙台市), 2016年3月21日

⑩ “ Visualization of Superfluid  $^3\text{He}$  Textures by Magnetic Resonance Spectroscopic Imaging”, M. Kanemoto, J. Kasai, and Y. Sasaki<sup>○</sup>, International Symposium on Quantum Fluids and Solids, Niagara Falls (U.S.A.), (招待講演) 2015年8月11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〕  
ホームページ等

6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
佐々木 豊 (SASAKI, Yutaka)  
京都大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号： 60205870
- (2) 研究分担者  
なし
- (3) 連携研究者  
なし
- (4) 研究協力者  
笠井 純 (KASAI, Jun)  
京都大学・大学院理学研究科・大学院生  
木崎 泰英 (KIZAKI, Yasuhide)  
京都大学・大学院理学研究科・大学院生  
本田 弦 (HONDA, Gen)  
京都大学・大学院理学研究科・大学院生  
岡本 耀平 (OKAMOTO, Yohei)  
京都大学・大学院理学研究科・大学院生  
宮岡 慧 (MIYAOKA, Kei)  
京都大学・大学院理学研究科・大学院生  
西岡 敬史 (NISHIOKA, Keishi)  
京都大学・大学院理学研究科・大学院生  
大田 寛也 (OHTA, Hiroya)  
京都大学・大学院理学研究科・大学院生  
松原 明 (MATSUBARA, Akira)  
京都大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号： 00229519  
高木 丈夫 (TAKAGI, Takeo)  
福井大学・学術研究院工学系部門・教授  
研究者番号： 00206723