

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：24402

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2010～2014

課題番号：22103003

研究課題名(和文) スピン三重項超流動体の新奇界面現象

研究課題名(英文) Novel Edge Phenomena in Spin-Triplet Superfluids

研究代表者

石川 修六(Ishikawa, Osamu)

大阪市立大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：90184473

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 143,400,000円

研究成果の概要(和文)：超流動 ^3He には、時間反転対称性が破れたA相と軌道スピン対称性が破れたB相の2つの相がある。界面・境界面で示すトポロジカル量子現象を探求し、以下の成果を得た。A相での巨視的固有軌道角運動量の存在とB相での表面束縛状態のマヨラナコーンの存在を初めて示した。A相カイラリティの局所的な観測に成功した。B相での表面アンドレーエフ束縛状態のゼロエネルギー表面状態密度と奇周波数対振幅とが厳密に対応することを理論的に導くことに成功した。遅延効果をもつペアリング相互作用を取り入れ、マイスナー効果を示すバルクな奇周波数超伝導体が存在できることを理論的に確立した。

研究成果の概要(英文)：Superfluid ^3He has two types of superfluid state, one is the time reversal symmetry breaking A phase and another is the orbit-spin symmetry breaking B phase. We have investigated the topological quantum phenomena at the interface or the boundary and obtained notable results as below. We showed the first evidence of the macroscopic angular momentum in the A phase and that of the Majorana cone of the surface bound state in the B phase. The local chirality of the A phase is also observed. We theoretically concluded that the density of state at the surface exactly corresponds to the amplitude of odd frequency pairing state. We also established new method of considering the odd frequency bulk superconductor, which includes the Meissner effect, by using the retarded pairing potential.

研究分野：超低温物理学・核磁気共鳴・流体物理学

キーワード：超流動 ^3He スピン三重項超流体 固有軌道角運動量 表面マヨラナ状態 奇周波数クーパ対 トポロジカル超流体 半整数量子渦 トポロジカル量子現象

1. 研究開始当初の背景

非常に純粋な試料である液体³Heの研究は長い歴史を持ち、1972年の米国での超流動³Heの発見以来、バルク状態の性質は実験的・理論的に非常に詳しく調べられ、BCS型の粒子対凝縮したスピン三重項p波超流動状態として確立していた(1996、2003年ノーベル物理学賞)。界面や制限空間内で現れるトポロジカル量子現象を研究する上で、基礎となるバルク状態の性質が明確であるという利点をもつ。また内部自由度のある超流動³Heの持つ相の多様性、容器形状と境界条件の制御可能性、磁場効果などを駆使した多彩な条件下での研究は、トポロジカル量子現象の系統的研究を可能にすると考えられていた。

2. 研究の目的

スピン三重項p波超流動³He(時間反転対称性が破れたA相とスピン軌道対称性が破れたB相)を制限空間内においたときに表面や界面で生じる新奇界面現象に注目し、多様な条件下で系統的測定・探求する。以下の具体的な研究を通してp波凝縮状態でのトポロジカル量子現象を発見し、トポロジーが共通である他の量子凝縮系との共通概念としての創出・発展・確立を目指した。

- (1) カイラルp波超流動³He-A相
超流動³He-A相の固有角運動量の検証
平行平板中の超流動³He-A相の半整数量子渦の観測
- (2) ヘリカルp波超流動³He-B相
超流動³He-B相の表面アンドレーエフ束縛状態の磁気効果の解明
- (3) B相に接するエアロジェル中での新奇超流動状態の解明
- (4) 超流動³Heの表面アンドレーエフ束縛状態と奇周波数状態の理論的解明

3. 研究の方法

- (1) 超流動³He-A相の固有角運動量の検証
カイラルp波のA相ではBCS型クーパー対の全てが1つの軌道角運動量を持つため液体として軌道自由度が角運動量を持つことになる。細い円筒容器内では円筒側面が界面としての重要な役割を果たし、バルク液体と異なる渦芯のない渦(Mermin-Ho渦)が実現する。この渦を用いて未解決問題である「固有角運動量の検出」を行う。回転冷凍機を用いたNMR(核磁気共鳴)実験を行い、その存在を議論する。

- (2) 平行平板中の超流動³He-A相の半整数量子渦の観測

狭い平行平板中で軌道角運動量の向きの揃ったA相を回転させて、p波特有の半整数量子渦の観測を試みる。半整数渦ではNMR信号に特徴的なスピン波励起が予想されている。このスピン波励起観測を試みるとともに、半整数量子渦の安定性に関する理論研究者と研究を進める。

- (3) 超流動³He-B相の表面アンドレーエフ束縛状態とそれに対する磁気効果の解明

ゼロ磁場下での壁の鏡面度依存性の横波音響インピーダンス測定を行うとともに、測定を磁場中へ拡張してマヨラナ型準粒子状態に対する磁気効果の解明を行う。壁の鏡面度を変るとともに壁に対する磁場の向きを変えた環境で、磁気応答の異方性、バンド幅分裂などを検出する。

- (4) B相に接するエアロジェル中での新奇超流動状態の解明

純粋な系である超流動³Heにエアロジェルという非常に高い空孔率の物質を導入すると、並進対称性が破れ、p波超流動に接する正常相内には、奇周波数スピン三重項s波粒子対が侵入することが予想されている。この新奇な粒子対の存在を帯磁率異常の観測より検出する。また近接効果誘起型の奇周波数超流動の観測可能性をさらに理論的に追求する。

- (5) 超流動³Heの表面アンドレーエフ束縛状態と奇周波数状態の理論的解明

質量流、スピン流、スピン磁化率等を解析し、超流動³Heの表面に形成されるアンドレーエフ束縛状態と超流動諸物性の関連を解明する。超伝導接合系でのマイスナー電流をも視野に入れた不均一超流動・超伝導系の質量流・スピン流の定式化を行う。また、バルク系での奇周波数粒子対形成の理論を展開し、電磁応答等に関して、近接効果誘起型の奇周波数状態との共通点・相違点を明らかにする。

4. 研究成果

研究期間での主な成果は以下のとおり。

- (1) スピン三重項超流体での「固有軌道角運動量(IAM)」の観測。(3-(1))に対応)

超流動³He-A相はすべてのクーパー対の軌道角運動量と同じ状態にある。軌道角運動量の大きさはクーパー対あたりプランク定数程度の微量であるが、全クーパー対(N/2個)の角運動量が巨視的量となるかどうかは超流動³Heに残された基礎的未解決問題「固有角運動量問題」である。東大物性研究所で行われた実験

では、磁場と回転および温度変化を組み合わせ、界面が重要となる細い円筒容器内に Mermin-Ho 型テクスチャーを安定に創出することに成功した。図1に示したようにスピン波の核磁気共鳴周波数の回転応答は計算結果と良い一致を示した。これは視的軌道角運動量が観測されたことを強く示す結果であり、積年の問題に終止符を打つものである。

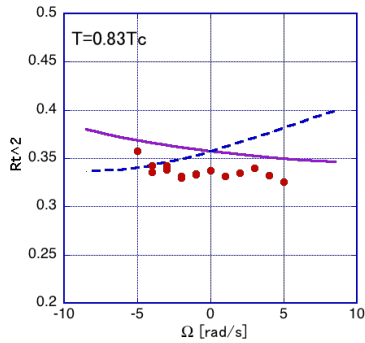


図1：スピン波共鳴周波数の回転角速度依存。赤丸は観測データ、実線はIAMの存在を示す数値計算結果。点線は存在を否定する計算結果。

(2) 超流動 ^3He - A 相の半整数量子渦探索 (3-(2)に対応)

A相は時間反転対称性が破られたカイラル超流体であり、軌道とスピンの自由度がそれぞれ π の位相回転を担う半整数量子渦が薄膜超流動状態で予想されている。半整数量子渦が安定となる条件が約1Tの磁場下、転移温度近傍で回転下であることと、渦格子が形成されること、および半整数渦格子の全体に広がるスピン波共鳴周波数の回転角速度依存性が計算された(図2)。高磁場下で回転しながら超流動転移させ実験を進めたが、半整数量子渦の検出には至っていない。

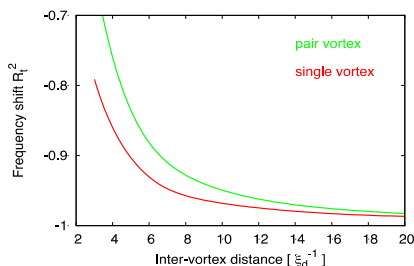


図2：スピン波共鳴周波数の半整数渦間距離依存性（共鳴周波数 回転角速度となる）

(3) 超流動 ^3He で表面マヨラナ型準粒子励起状態の実証とその磁気効果。(3-(3)に対応)

マヨラナ型準粒子励起状態は2次元分散関係では円錐状を示し表面マヨラナコーンと呼ばれる。超流動 ^3He -B 相が真にトポジカル超流動であることを示す表面マヨラナコーンの存在

を実験的に確立した。この成果は、トポジカル超流動体の重要な性質であるバルク・エッジ対応を初めて示すものである。

^4He 薄膜で壁をコートして鏡面度が約0.8の境界条件を実現し、超流動 ^3He -B 相の横波音響インピーダンスの低エネルギーピークを観測した(図3の矢印部)。このピークはマヨラナコーンに起因する特異性である。

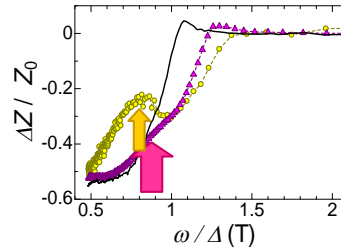


図3：音響インピーダンスのエネルギー依存性。実線・三角・丸印の順で壁の鏡面度が大きくなるにつれ、低エネルギーにピークが成長した。理論との比較から、このピークはマヨラナコーンの存在に起因する。

壁の鏡面度が小さい拡散的散乱の極限において、ゼロ磁場での温度依存性に表れたインピーダンスの虚部のピーク構造が、0.1 T 以下の低磁場で消失することが分った。またインピーダンスの虚部が0.13 T 以上の高磁場で、ある温度を境に低温側で急激に落ち込むことを見出した。磁場下では時間反転対称性が破れトポジカルに保護された表面マヨラナモードが消失し、ゼロエネルギーギャップが出現するトポジカル相転移現象と考えている。

(4) B 相に接するエアロジェル中での新奇超流動状態の解明(3-(4)に対応)

トポジカル超流動 ^3He -B 相内に導入されたエアロジェル界面に、並進対称性の破れに伴う奇周波数クーパ対状態が出現し帯磁率が增大することを予想された。この奇周波数クーパ対の出現を検出するために、核磁気共鳴法によりエアロジェル界面の帯磁率測定を行ったところ、非常に低温で帯磁率の増加を観測した(図4)。

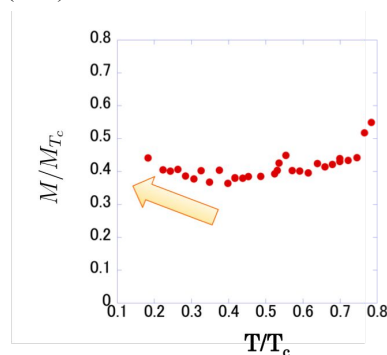


図4：エアロジェル界面磁化の温度変化(実験結果)

(5) 超流動 ^3He - A 相カイラリティの局所的符号の直接観測(公募研究)。(3-(1),(2)に関連)

カイラルp波超流動 ^3He - A相において、電子バブルの軌道がクーパー対の軌道角運動量の向きに対し垂直方向に曲がるという性質を利用し、軌道角運動量の向きを揃えた実験でA相カイラリティの局所的符号を初めて直接観測した。界面では図5に示すように軌道は2つの向きの自由度しかない(青矢印)。固有角運動量の実験で調べられる「全体の大きさ」ではなく、固有角運動量の「正負符号」が直接得られる実験である。これはクーパー対の内部自由度を局所的に直接観測できた画期的成果である。

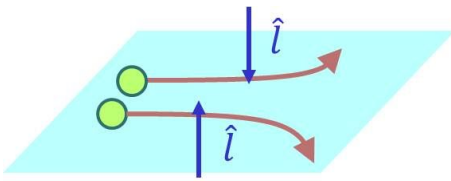


図5: 電子バブルの軌道(赤曲線)はクーパー対の回転に起因するマグナス効果によって曲がる。青矢印は軌道角運動量を示す。

(6) 超流動 ^3He の表面アンドレーエフ束縛状態と奇周波数状態およびバルクでの奇周波数状態の理論的説明(3-(6)に対応)

図6に示すようにゼロエネルギー状態密度と奇周波数対振幅との密接な対応関係を厳密に導いた。これは奇周波数状態の「負の超流動密度」に起因することが示された。奇周波数超伝導状態での「負のミスナー効果」と同じと考えられる。この対応関係に基づき、超流動 ^3He の表面に実際に奇周波数クーパー対が形成されていることを明らかにした。また、表面奇周波数状態と自発スピン流との関係を明らかにした。

エッジ、磁束芯などに局在する奇周波数クーパー対は遅延効果を必要とせず、このクーパー対と準粒子状態の共存が特徴となる。他方、バルクで奇周波数超伝導体となるために、遅延効果をもつペアリング相互作用を取り入れ

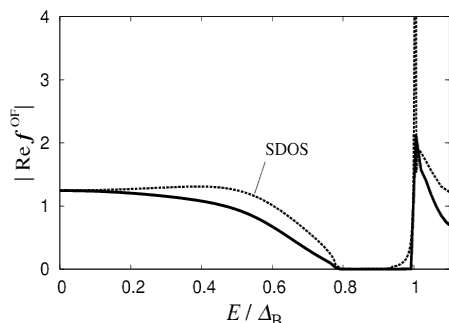


図6: 超流動 ^3He B相における表面奇周波数対振幅のエネルギー依存性。破線は表面状態密度。両者はゼロエネルギー極限で厳密に一致する。

るために、ラグランジンに基づくファイマンの経路積分の方法を用いることでミスナー効果を示す奇周波数超伝導体が存在できることを理論的に確立した。

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 53 件)

* 全ての論文に査読有。

N. Miyawaki, S. Higashitani, Fermi surface effect on spontaneous breaking of time-reversal symmetry in unconventional superconducting films, *Physical Review B* **91**, 09451-1-5(2015), DOI: 10.1103/PhysRevB.91.094511

Y. Fujimoto, K. Miyake, H. Matsuura, Deformation of the Fermi Surface and Anomalous Mass Renormalization by Critical Spin Fluctuations through Asymmetric Spin-Orbit Interaction, *Journal of Physical Society of Japan* **84**, 043702-1-6(2015), DOI: 10.7566/JPSJ.84.043702

S. Murakawa, A. Yamaguchi, M. Arai, M. Wasai, Y. Aoki, H. Ishimoto, R. Nomura, Y. Okuda, Y. Nagato, S. Higashitani, K. Nagai, Spin-Dependent Acoustic Response in the Nonunitary A1 and A2 Phases of Superfluid He-3 under High Magnetic Field, *Physical Review Letters* **114**, 105304-1-5(2015), DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.105304

T. Kunimatsu, H. Nema, R. Ishiguro, M. Kubota, T. Takagi, Y. Sasaki, and O. Ishikawa, Manipulating textures of rotating superfluid ^3He -A phase in a single narrow cylinder, *Physical Review B* **90**, 214525-1-6 (2014), DOI: 10.1103/PhysRevB.90.214525

S. Higashitani, Odd-frequency pairing effect on the superfluid density and the Pauli spin susceptibility in spatially nonuniform spin-singlet superconductors, *Physical Review B* **89**, 184505-1-9 (2014), DOI: 10.1103/PhysRevB.89.184505

K. Miyake, Theory of Pairing Assisted Spin Polarization in Spin-Triplet Equal Spin Pairing: Origin of Extra Magnetization in Sr_2RuO_4 in Superconducting State, *Journal of Physical Society of Japan* **83**, 05370-1-4 (2014), DOI: 10.7566/JPSJ.83.053701

M. Nakahara and T. Ohmi, Multiple half-quantum vortices in rotating superfluid ^3He , *Physical Review B* **89**, 104515-1-5 (2014) DOI: 10.1103/PhysRevB.89.104515

R. Nomura, S. Murakawa, M. Wasai, K. Akiyama, T. Nakao, and Y. Okuda, Surface Majorana Cone of the Topological Superfluid ^3He B phase, *Physics E* **55**, 42-47(2014), DOI: 10.1016/j.physe.2013.06.006

S. Higashitani, H. Takeuchi, S. Matsuo, Y. Nagato, and K. Nagai, Magnetic Response of Odd-Frequency s-Wave Cooper Pairs in a Superfluid Proximity System, *Physical Review Letters* **110**, 175301-1-5 (2013), DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.175301

H. Ikegami, Y. Tsutsumi, and K. Kono, Chiral symmetry breaking in superfluid $^3\text{He-A}$, *Science* **341**, 59-62 (2013), DOI: 10.1126/science.1236509

H. Ikegami, Suk Bum Chung, and K. Kono, Mobility of Ions Trapped Below a Free Surface of Superfluid ^3He , *Journal of Physical Society of Japan* **82**, 124607-1-12 (2013), DOI: 10.7566/JPSJ.82.124607

A. Fukui, K. Kondo, C. Kato, K. Obara, H. Yano, O. Ishikawa and T. Hata, Enhancement of magnetization in liquid ^3He at aerogel interface, *J. Low Temp. Phys.* **171**, 245-250 (2013), DOI 10.1007/s10909-012-0838-6

T. Kunitatsu, H. Nema, R. Ishiguro, M. Kubota, T. Takagi, Y. Sasaki and O. Ishikawa, Textures of Rotating Superfluid $^3\text{He-A}$ in a Single Narrow Cylinder, *J. Low Temp. Phys.* **171**, 280-286 (2013), DOI: 10.1007/s10909-012-0787-0

S. Higashitani, S. Matsuo, Y. Nagato, K. Nagai, S. Murakawa, R. Nomura, and Y. Okuda, Odd-frequency Cooper pairs and zero-energy surface bound states in superfluid ^3He , *Physical Review B* **85**, 024524-1-5 (2012), DOI: /10.1103/PhysRevB.85.024524

T. Harada, Y. Fuseya, and K. Miyake, Properties of Odd-frequency Superconductivity near Antiferromagnetic Quantum Critical Point, *Journal of Physical Society of Japan* **81**, SB015-1-4 (2012) SB015, DOI: 10.1143/JPSJ.81SB.SB015

S. Murakawa, M. Wasai, K. Akiyama, Y. Wada, Y. Tamura, R. Nomura, Y. Okuda, Strong Suppression of the Kosterlitz-Thouless Transition in a ^4He Film under High Pressure, *Physical Review Letters* **108**, 025302-1-4 (2012), DOI 10.1103/PhysRevLett.108.025302

H. Kusunose, Y. Fuseya, K. Miyake, On the Puzzle of Odd-Frequency Superconductivity, *Journal of Physical Society of Japan* **80**, 054702-1-7 (2011), DOI 10.7566/JPSJ.80.054702

K. Obara, C. Kato, S. Sasamoto, H. Yano, O. Ishikawa, T. Hata, Acoustic Resonance of Superfluid ^3He in Parallel Plates, *J. Low Temp. Phys.* **162**, 190-195, (2011), DOI: 10.1007/s10909-010-0298-9

R. Nomura, S. Murakawa, Y. Wada, Y. Tamura, M. Wasai, K. Akiyama, M. Saito, Y. Aoki, Y. Okuda, Surface Andreev bound states of Superfluid $^3\text{He-B}$ phase, *Physica E* **43**, 718-721 (2011), DOI: 10.1016/j.physe.2010.07.037

K. Obara, C. Kato, Y. Matsukura, Y. Nago, R. Kado, H. Yano, O. Ishikawa, T. Hata, S. Hagashitani, K. Nagai, Frictional motion of normal-fluid component of superfluid ^3He in aerogel, *Physical Review B* **82**, 054521-1-7 (2010), DOI: 10.1103/PhysRevB.82.054521

[学会発表] (計 57 件)

* 発表は全て招待講演

O. Ishikawa, Intrinsic Angular Momentum of Topological Superfluid $^3\text{He-A}$, International Conference on Topological Quantum Phenomena, 2014 年 12 月 20 日, 京都大学 (京都府京都市)

R. Nomura, Magnetic Field Effects on the Surface Majorana Bound States of Superfluid ^3He B-Phase, International Conference on Topological Quantum Phenomena, 2014 年 12 月 18 日, 京都大学 (京都府京都市)

H. Ikegami, Direct Detection of Chirality in Superfluid $^3\text{He-A}$, International Conference on Topological Quantum Phenomena, 2014 年 12 月 17 日, 京都大学 (京都府京都市)

R. Nomura, Magnetic field effects on surface Majorana fermions of superfluid $^3\text{He-B}$, 27th International Conference on Low Temperature Physics(LT27), 2014 年 8 月 12 日, Buenos Aires(Argentina)

K. Miyake, Spontaneous time reversal symmetry Breaking in spin-triplet superconductivity with equal spin pairing : Excess Knight shift in superconducting state of Sr_2RuO_4 , International Conference on Strongly Correlated Electron Systems, 2014 年 7 月 8 日, Grenoble(France)

H. Ikegami, Direct Detection of Chirality in Superfluid $^3\text{He-A}$, the International workshop "Higgs Modes in Condensed Matter and Quantum Gases", 2014 年 6 月 24 日, 京大基礎物理学研究所(京都府京都市)

M. Nakahara, Multiple Half-Quantum Vortices in Rotating Superfluid ^3He , Physics Seminar, 2013 年 11 月 5-6 日, Low Temperature Laboratory, Aalto University (Finland)

H. Ikegami, Direct Detection of Chirality in Superfluid $^3\text{He-A}$, International Workshop for Young Researchers on Topological Quantum Phenomena in Condensed Matter with Broken Symmetries, 2013 年 10 月 22-26 日, Culture Resort Festone (沖縄県宜野湾市)

O. Ishikawa, New Boundary Phenomena of Liquid ^3He in Aerogel Contacting with Superfluid $^3\text{He-B}$, International Conference on Quantum Fluids and Solids(QFS2013), 2013 年 8 月 5 日, くにびきメッセ(島根県松江市学園南)

H. Ikegami, Direct Detection of chirality in Superfluid $^3\text{He-A}$, International Conference on Quantum Fluids and Solids(QFS2013), 2013

年 8 月 5 日, くにびきメッセ(島根県松江市学園南)

R. Nomura, Surface Majorana cone of the topological superfluid ^3He B phase, American Physics Society March Meeting, Invited Session: Superfluids under Nanoscale Confinement, 2013 年 3 月 18-22 日, Baltimore (USA)

O. Ishikawa, Investigation of intrinsic angular momentum in rotating superfluid ^3He -A phase, International Conference on Quantum Fluids and Solids(QFS2012), 2012 年 8 月 15-21 日, Lancaster (UK)

R. Nomura, Andreev-Majorana bound states on the superfluid ^3He -B surface, Microkelvin workshop 2012, 2012 年 3 月 19-23 日, Smolenice (Slovakia)

H. Ikegami, Ultra-low Temperature Mobility of Electron Bubbles Formed below the Free Surface of Superfluid ^3He -B, International Workshop for Young Researchers on Topological Quantum Phenomena in Condensed Matter with Broken Symmetries, 2011 年 11 月 1-5 日, La Foret Biwako, (滋賀県守山市)

K. Obara, Aerogel and its Application to Ultra Low Temperature Physics, International Workshop for Young Researchers on Topological Quantum Phenomena in Condensed Matter with Broken Symmetries, 2011 年 11 月 1-5 日, La Foret Biwako, (滋賀県守山市)

R. Nomura, Surface Majorana, Cone of the Superfluid ^3He B Phase, ULT2011 the new frontiers of low temperature physics, 2011 年 8 月 19-22 日, Daejeon (Korea)

H. Ikegami, Ultra-low Temperature Mobility of Electron Bubbles Formed below the Free Surface of Superfluid ^3He -B, 26th International Conference on Low Temperature Physics(LT26) 2011 年 8 月 10-17 日, Beijing (China)

S. Higashitani, Drag Force on a High Porosity Aerogel in Liquid ^3He , 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26) 2011 年 8 月 10-17 日, Beijing (China)

O. Ishikawa, Proximity effect at the interface between ^3He -B and aerogel of 97.5% porosity, 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26) 2011 年 8 月 10-17 日, Beijing (China)

S. Higashitani, Proximity induced odd frequency pair in liquid ^3He in aerogel, International Conference on Quantum Fluids and Solids(QFS2010), 2010 年 8 月 1-7 日 Grenoble (France)

[その他]
ホームページ等
新学術領域「トポロジカル量子」ホームページ

日本語版 <http://www.topological-qp.jp>

英語版

<http://www.topological-qp.jp/english/index.html>

研究室ホームページ

<http://www.sci.osaka-cu.ac.jp/phys/ult/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石川 修六 (ISHIKAWA, Osamu)
大阪市立大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 90184473

(2) 研究分担者

野村 竜司 (NOMURA, Ryuji)
東京工業大学・大学院理工学研究科(理学系)・助教
研究者番号: 00323783

東谷 誠二 (HIGASHITANI, Seiji)
広島大学・総合科学研究科・准教授
研究者番号: 70304368

三宅 和正 (MIYAKE, Kazumasa)
公益財団法人豊田理化学研究所・常勤フェロ
ー
研究者番号: 90109265
(H24年度まで大阪大学・基礎工学研究科・教授)

高木 丈夫 (TAKAGI, Takeo) [H25-26]
(H23-24 年度は公募研究代表者)
福井大学・工学研究科・教授
研究者番号: 00206723

中原 幹夫 (NAKAHARA, Mikio) [H25-26]
(H22-24 年度は連携研究者)
近畿大学・理工学部・教授
研究者番号: 90189019

池上 弘樹 (IKEGAMI, Hiroki) [H25-26]
(H23-24 は公募研究代表者)
独立行政法人理化学研究所・主任研究員研究室・専任研究員
研究者番号: 70313161

(3) 連携研究者

小原 顕 (OBARA, Ken)
大阪市立大学・大学院理学研究科・講師
研究者番号: 50347481

松本 宏一 (MATSUMOTO, Koichi) [H25-26]
(H23-24 は公募研究代表者)
金沢大学・理工研究域・教授
研究者番号: 10219496

竹内 宏光 (TAKEUCHI, Hiromitsu) [H25-26]
大阪市立大学・大学院理学研究科・講師
研究者番号: 10587760

久保田 実 (KUBOTA, Minoru) [H22-24]
東京大学物性研究所・准教授
研究者番号: 50347481