

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H06014

研究課題名（和文）超流動ヘリウム3B相表面状態密度の角度依存性測定

研究課題名（英文）Measurement for angle resolved surface density of state at Superfluid Helium Three B Phase

研究代表者

村川 智（Murakawa, Satoshi）

東京大学・低温科学研究センター・准教授

研究者番号：90432004

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 18,500,000円

研究成果の概要（和文）：超流動ヘリウム3はトポロジカル超流動体であるのが知られているため、超流動ヘリウム3の表面状態の研究を行うことは非常に興味深い。しかし、超流動ヘリウム3は超低温でしか実現しないことや電荷をもたないため実験は非常に困難である。本研究で超低温の小型で簡便な作成方法を確立し、超流動ヘリウム3の表面に準粒子を入射させることで表面状態を明らかにする手法について検討を行い、最適な実験手法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超低温環境は、物質の本質を明らかにするために必須な環境であり、本研究で確立した技術を用いた冷凍機により、多くの物性研究者に最先端の低温環境を提供できるようになった。さらに、宇宙実験など他の分野にも応用が利くため、非常に有益である。

また、超流動ヘリウム3の表面状態の研究の目的がたったことで、この分野の研究が進み、多大な興味を持たれているトポロジカル物質の性質がより深く理解できる環境になった。

研究成果の概要（英文）：Since superfluid helium-3 is known to be a topological superfluid, it is very interesting to study the surface state of superfluid helium-3. However, experiments are extremely difficult because superfluid helium-3 can be realized only at ultralow temperatures and has no electric charge. In this study, we established a compact and an easy-to-handle method for producing ultra-low temperature, and investigated the method of clarifying the surface state by injecting quasi-particles on the surface of superfluid helium 3.

研究分野：超低温実験物理

キーワード：低温物性 物性実験 量子凝縮系 超流動 ヘリウム3 表面状態 低温技術 冷凍機

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。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超流動ヘリウム 3( $^3\text{He}$ )は、超低温(数 mK)でフェルミ粒子がクーパー対となることで実現する超流動である。電荷をもたない中性の超流動であるために、核磁気共鳴法によりクーパー対の対称性が詳細に調べられており、超流動ヘリウム 3はクーパー対の対称性は p 波スピン 3 重項であることが明確になっている。p 波スピン 3 重項である超伝導物質の候補はいくつかあるものの、超流動ヘリウム 3 はそれが確定している唯一の物質である。クーパー対が p 波スピン 3 重項状態であることは、スピン角運動量  $S = 1$  および軌道角運動量  $L = 1$  と内部自由度があることを意味する。そのため、多彩な状態が存在し、実際にバルク状態においても図 1 の相図に示すようにゼロ磁場下においても A 相、B 相と呼ばれる二つの相が実現しているうえ、磁場中においては新たに相( $A_1$  相)が現れることが知られている。

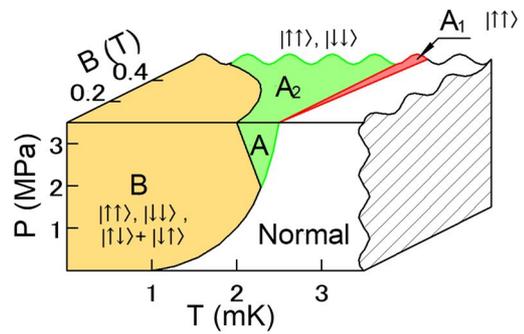


図 1: 超流動ヘリウム 3 の温度圧力磁場相図

このように、超流動ヘリウム 3 は多様相が存在するが、それらの相におけるクーパー対の対称性も明らかになっている。そのため、表面状態の理論研究も大きく進展し、それはアンドレーエフ束縛状態[1,2]、奇周波数クーパー対状態[3]、トポロジカル物質の表面状態[4]など、さまざまな興味深い現象と関連付けられて研究が行われている。さらには、超流動ヘリウム 3 は電子系と異なり母物質が必要ないことから、格子欠陥や不純物のような系を乱すものが非常に少ないクリーンな系である。そのため、理論の検証の舞台としても、非常に理想的なものとなっている。

しかしながら、超流動ヘリウム 3 は数 mK という非常に低温にならないと実現しない。その温度域までバルクの物質を冷却する方法として、現在では大型の希釈冷凍機と銅の核スピンを利用した核断熱消磁冷凍機を組み合わせた方法が確立しているが、装置が長大になること、ワンショット型の冷凍法であることなどから、一般化されているとは言い難い。また、ヘリウム 3 は中性粒子であるために、測定方法が電子系と比べて限られてしまうことが、研究が進まない原因となっている。

2. 研究の目的

近年盛んに研究がおこなわれているトポロジカル物質であるが、超流動ヘリウム 3 もトポロジカル物質であり、その中でも B 相は 3 次元のトポロジカル物質で表面状態がマヨラナフェルミオンであることが指摘されている。そのエネルギー分散関係は、理論の予測では、図 2 に示されるように運動量に比例するもの(マヨラナコーン)になることが示されており[5]、近年の実験結果はそれを支持している。しかし、従来の実験では入射角度全部にわたって積分した表面状態密度が観測されているだけであり、直接マヨラナコーンを観測しているわけではない。本研究では、光電子分光法における角度分解型光電子分光法に対応するヘリウム 3 準粒子を表面にさまざまな角度およびエネルギーで入射させ、その反射の測定を行い、状態密度の角度依存性、つまりマヨラナコーンの直接観測を行うことを目指す。

また、この研究を行うにあたり必要な核断熱消磁冷凍機の開発を行う。その際、従来型の大型装置ではなく、より小型で連続的に運転できる冷凍機を作成し、物性物理だけでなく、幅広い研究において簡単に利用できる冷凍機を目指す。

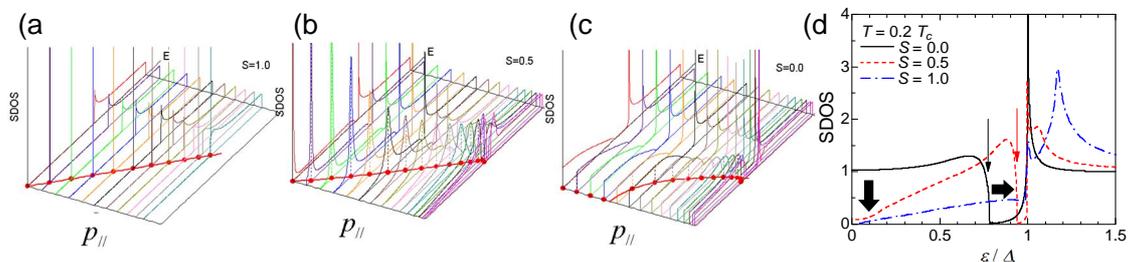


図 2: 超流動  $^3\text{He}$ -B 相の表面状態密度の角度依存性[5]。鏡面散乱極限(a)から中間状態(b)へて拡散散乱極限(c)と散乱条件の異なるものを示す。P-E 平面の黒丸および実線は各運動量における表面状態密度のピークのエネルギーを示す。(d)はすべての角度で積分した表面状態密度[1]。鏡面度を上げるとフェルミエネルギー近傍の状態数が減少している。

3. 研究の方法

本研究では、電荷の無い超流動ヘリウム 3B 相の表面状態の研究を行うために、準粒子の表面における散乱を観測することを目指す。図 3 にヘリウム 3 準粒子が表面に入射する際の散乱過程を示す。超流体の表面において準粒子は通常反射の他にアンドレーエフ反射と呼ばれるクー

パー対特有の反射をする。アンドレーエフ反射では、準粒子が入射したときはホールが、ホールが入射したときには準粒子が群速度を反転させ同じ経路を戻ってくる。通常のアンドレーエフ反射は常流動から超流動へ入射するとき起こるが、バルク中の励起された準粒子がギャップ内に構造のある表面状態に入射するときには同様の現象である量子アンドレーエフ反射が起きる。本研究ではこの量子アンドレーエフ反射と通常の反射の確率の観測を目指す。本研究の場合では、透過というものはないことから、二つの反射率を足すと1になるため、相補的な測定となり、測定感度を上げることができる。これらの反射確率は理論計算がなされており(図4)[1]、得られた結果と比較することで、表面状態の分散関係を明らかにすることができる。

準粒子ビームの生成は黒体輻射セルを用いることで行う。黒体輻射セルは内部において外部より少し温度の高い状態を作り、内部と外部とで準粒子密度が異なることを利用し、準粒子ビームを取り出す装置である。これを動かし、様々な角度で表面に準粒子を打ち込み、準粒子の反射確立を明らかにすることを目指す。

また、核断熱消磁冷凍機は、小型かつ連続的に冷却できるものを開発する。そのために、核スピン系に銅の代わりに増強核磁性体であるPrNi<sub>5</sub>を用いることで必要磁場を小さくすることで超伝導磁石の小型を図る。また、これを二組用意し、直列につなぎ、交互に断熱消磁を繰り返すことで連続的に冷却可能なものにする。連続冷却にすることで核スピンの数を多くする必然性がなくなるため、小型化にも貢献できる。

#### 4. 研究成果

黒体輻射セルは入射角を変えるために、動かす必要がある。その動作機構として低温用ステッピングモーターと低温用ベアリングを選定し、低温でも動作することを確認した。また、セルのデザインも当初は黒体輻射体は動かさず、黒体輻射体からでるビームの角度をのみを変更させるものであった。しかし、この場合、ビームの走行距離が入射角度によって変わってしまうことでデータの解析において考慮することが増えてしまうことや試料としての高額なヘリウム3が大量に必要であるという欠点があったため、セル全体を傾けることで、入射角度を制御することにした。この変更により、試料を少なくすることができた上に、液面までの距離を一定に保つことができるようになったため、より精密な測定ができることになった。また、黒体輻射セルにはヒーターと温度計が必要である。数mKである超低温では、熱接触抵抗が非常に大きくなってしまいうため、比較的高温で使われる電気抵抗を用いるものでは実用に向かない。そこで、超流動中に設置した振動体を温度計及びヒーターに用いる。従来この用途では超伝導線を用いたバイブレイティングワイヤーが主流であったが、これには磁場が必要なため、超流動ヘリウム3の性質を変化させてしまうことがある。そのため、振動体として磁場の必要ない音叉型水晶振動子を導入する。市販の水晶振動子においても低温において問題なく挙動することが確認できた。これらの成果から超流動ヘリウム3を用いたトポロジカル物質の表面状態の研究の端緒が開けたと考えられ、今後詳細な測定を行うことで新たな知見が得られることにより、他物質との比較を行うことで、トポロジカル物質の性質がより明らかになることが期待できる。

核断熱消磁冷凍機の建設に関してはまず超伝導マグネットの開発から行う

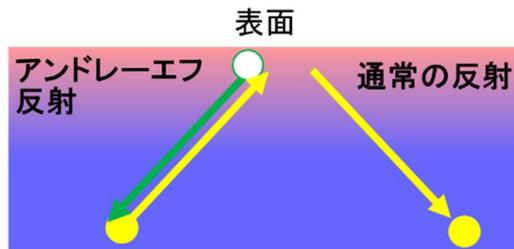


図3: 超流動ヘリウム3表面にヘリウム3準粒子を入射する様子。左下から準粒子(黄丸)を入射し、一部は通常反射し(右下)、一部はアンドレーエフ反射しホール(緑白丸)が戻ってくる。

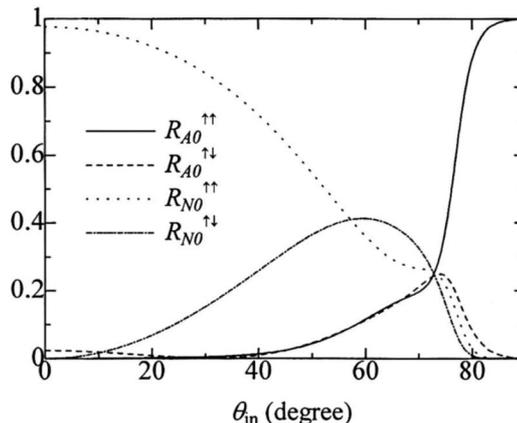


図4: 量子アンドレーエフ反射率( $R_A$ )と通常反射率( $R_N$ )の入射角依存性。0°が表面に垂直に入射する場合。それぞれスピン保存と非保存の場合が示されている[1]。



図5: ヒーター及び温度計として使う音叉型水晶振動子。

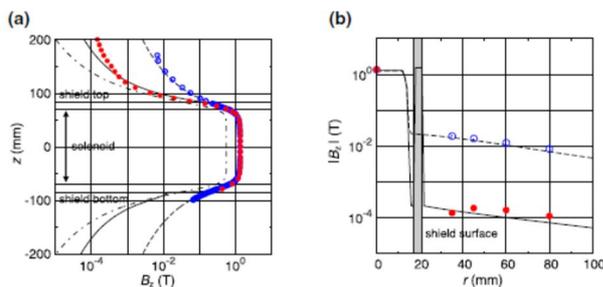


図6: 超伝導マグネットの漏れ磁場測定の結果[6]。青丸がシールドなし、赤丸はシールドあり。左図はコイル軸方向、右図はコイル径方向である。

た。スピン系としてPrNi<sub>5</sub>を用いることで、従来よりも小さな磁場つまりマグネットで断熱消磁ができる。真空容器の中に設置するため、あまり大電流を流すことができない。設計では6 Aで1.2 Tの磁場が出せるものとした。実際、作成したものはほぼ設計通りのコイル定数であった。実験スペースに置かれるマグネットは他に影響を及ぼさないように漏れ磁場対策を行うのが通常である。今回の設計ではコイル定数が小さくならないように強磁性体をシールドとして用いた。様々な強磁性体の透磁率や飽和磁化を用いて数値シミュレーションを行い、材料はFeCoV、厚さ4 mmにすれば、漏れ磁場は100分の1程度まで低減できることが分かった。実際作成したマグネットを用いて漏れ磁場の測定を行ったところ、シミュレーションと非常によく一致した。

しかし、この測定の際に、超伝導マグネットの磁場掃引を行うと非常に大きな発熱を伴うことが判明した。発熱があることは認識されていたがマグネット本体が原因とは考えられておらず、原因は明らかでなかったが、本研究でこの発熱は超伝導体のヒステリシス発熱であることを突き止めた。実際に超伝導線の磁気ヒステリシスを測定し、それをもとに計算された発熱量と測定された発熱量を比較したところ、ほぼ一致したものが得られた。この発熱は超伝導体を使う際には避けられないものと判明したため、当初の予定より希釈冷凍機の高温で冷却能力の大きい箇所に熱を逃がす設計に変更した。この変更により、問題なく使用できることとなった。

もう一つの重要部品である熱スイッチは亜鉛の熱融着で作成した。亜鉛と銀の熱融着は過去に例がないため温度圧力などの最適条件を調べ、接触電気抵抗として14 nΩ·cm<sup>2</sup>が得られた。この値は、過去の他の異種金属同士の接触抵抗と比較しても遜色のない値であり、十分熱スイッチとして使用できるものを作成することができた。

このように核断熱消磁冷凍機の主要パーツにおいて新たな知見が得られたため、今後よりコンパクトで簡便な冷凍機の建設に道筋をつけることができた。今後、様々な分野で核断熱消磁冷凍機が利用されることでより超低温という極限環境が身近になり、より研究の進展が見込まれる。

#### 参考文献

- [1] Y. Nagato, M. Yamamoto, and K. Nagai, *J. Low Temp. Phys.*, **110**, 1135 (1998).
- [2] A. B. Vorontsov, J. A. Sauls, *Phys. Rev. B* **68**, 064508 (2003).
- [3] S. Higashitani *et al.*, *Phys. Rev. B* **85**, 024524 (2012).
- [4] A. P. Schnyder *et al.*, *Phys. Rev. B* **78**, 195125 (2008);  
X. L. Qi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 187001 (2009)他、多数.
- [5] S. Murakawa *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **80**, 013602 (2011);  
Y. Wada *et al.*, *Phys. Rev. B* **78**, 214516 (2008)
- [6] S. Takimoto *et al.*, *J Low Temp Phys* doi:10.1007/s10909-019-02331-2

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Takimoto S., Toda R., Murakawa S., Fukuyama Hiroshi	4. 巻 -
2. 論文標題 Performances of a Compact Shielded Superconducting Magnet for Continuous Nuclear Demagnetization Refrigerator	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10909-019-02331-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 0件／うち国際学会 7件）

1. 発表者名 S. Takimoto, R. Toda, S. Murakawa, Hiroshi Fukuyama
2. 発表標題 Performances of a Compact Shielded Superconducting Magnet for Continuous Nuclear Demagnetization Refrigerator
3. 学会等名 The International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 戸田亮, 瀧本翔平, 村川智, 福山寛
2. 発表標題 小型連続核断熱消磁冷凍機用超伝導熱スイッチの開発
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 瀧本翔平, 戸田亮, 村川智, 福山寛
2. 発表標題 亜鉛はんだを用いたPrNi5核ステージの製作
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Yoshida, S. Yamazaki, and S. Murakawa
2. 発表標題 Development of Equipment to Observe Majorana Cone at the Surface of Superfluid Helium Three B phase
3. 学会等名 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Takimoto, R. Toda, S. Murakawa, and Hiroshi Fukuyama
2. 発表標題 Development of a Compact and Low Heat-dissipation Shielded Superconducting Magnet Usable at Sub-mK Temperature
3. 学会等名 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 瀧本翔平, 戸田亮, 村川智, 福山寛
2. 発表標題 小型連続核断熱消磁冷凍機用超伝導マグネットの開発
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山崎翔太, 村川智
2. 発表標題 超低温で用いるヘリウム3融解圧力温度計の開発
3. 学会等名 第十回低温センター研究交流会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Murakawa, Kensuke Yoshida
2. 発表標題 Preparation of experiment for direct observation of Majorana cone at surface of superfluid helium three B phase
3. 学会等名 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Murakawa, K. Yoshida, S. Yamazaki, T. Suzuki
2. 発表標題 Black Body Radiator with Various Angle Quasiparticle Beam Emitting Port in Superfluid Helium
3. 学会等名 International Conference on Ultra Low Temperature Physics (ULT2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 超流動ヘリウム3における量子アンドレーエフ反射角度依存性観測装置の開発
2. 発表標題 吉田研介、村川智
3. 学会等名 第9回低温センター研究交流会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Murakawa, and K. Yoshida
2. 発表標題 Development of Experiment for Direct Observation of Majorana Cone at Surface of Superfluid Helium Three B Phase
3. 学会等名 International Conference on Quantum Fluids and Solids (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 吉田研介、村川智
2. 発表標題 低温における音叉型水晶振動子の共鳴特性の温度依存性
3. 学会等名 第8 回低温センター研究交流会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----