

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03460

研究課題名(和文) 超流動ヘリウム3の表面状態の量子アンドレーエフ反射の角度及び表面依存性

研究課題名(英文) Angle and surface dependence of Andreev reflection at surface of superfluid helium three

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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は1 mK程度の超低温で実現する超流動ヘリウム3の表面状態の性質を明らかにすることを目的としている。その目的のため、測定セルの作成、および核断熱消磁冷凍機の修繕を行い、実験を行った。

測定セルはピンホールが開いている黒体輻射体を回転させる機構を持ち、それにより表面に様々な角度で準粒子を打ち込む構造になっている。このセルを核断熱消磁冷凍機に搭載し、100mK以下の極低温で動作させたところ、発熱などの問題はなく動作した。また、測定セル内の液体ヘリウムは黒体輻射体の内外ともに0.3mK程度の超低温まで冷却でき、ヒーターを作動させることで内外の温度差を生じさせ、準粒子を発射させることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非従来型超流動・超伝導体の表面状態はさまざまな興味深い現象と関連付けられている。近年、中でもトポロジカル物質が大きな興味を引いているが、超流動 $^3\text{He}$ はトポロジカル超流動体であると理論で指摘されている。トポロジカル物質はその境界に特徴的な物性が現れるため、バルクな性質の詳細が明らかである非常にクリーンな超流動 $^3\text{He-B}$ 相で表面状態の研究を行うことは理論と比較するうえで非常に優れた試料である。その表面状態は、粒子と反粒子が同一であるマヨラナ状態であるといわれており、本研究によってトポロジカル物質の表面状態の詳細を明らかになることで、応用面の発展も期待できる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to clarify the nature of the surface state of superfluid helium-3, which is realized at ultra-low temperatures about 1 mK. For this purpose, an experimental cell was constructed and a nuclear adiabatic demagnetization refrigerator was repaired, and experiments were conducted.

The cell has a mechanism to rotate a blackbody radiator with pinholes, and it launches quasiparticles at various angles onto the surface. The cell was installed in a nuclear adiabatic demagnetization refrigerator and operated at very low temperatures below 100 mK without any heat generation problems. The liquid helium in the cell can be cooled to about 0.3 mK both inside and outside the blackbody radiator, and by operating the heater, a temperature difference between the inside and outside can be generated to launch quasiparticles.

研究分野：低温実験物理

キーワード：量子液体 超流動ヘリウム3 トポロジカル物質 マヨラナ状態 表面物性

### 1. 研究開始当初の背景

超流動ヘリウム  $^3\text{He}$  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、そのバルクの性質は非常に精密に調べられており、クーパー対の対称性が p 波スピン 3 重項であることが明確であ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 A 相、B 相と呼ばれる二つの相が実現しているうえに、表面状態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]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。

近年、トポロジカル物質が物性物理学分野の中で大きな興味を引いているが、超流動  $^3\text{He}$  はトポロジカル超流動体であると理論で指摘され、理論分野を中心に活発に議論されている[4]。トポロジカル物質はその境界に特徴的な物性が現れるが、超流動  $^3\text{He}$ -B 相(BW 状態)はバルクの表面に、超流動  $^3\text{He}$ -A 相(ABM 状態)は薄膜の端がその表面に当たる。特に超流動  $^3\text{He}$ -B 相の表面状態は粒子と反粒子が同一であるマヨラナ状態であり、バルクでは完全に開いている超流動エネルギーギャップ内に低エネルギー状態が出現し、そのエネルギー分散関係はエネルギーが壁に平行な運動量に比例するコーン型の線型分散(マヨラナコーン)になることが指摘されている[1,2,4]。この表面状態は準粒子の散乱条件に依存する。図 1 に理論計算によって得られた表面状態密度の散乱条件依存性を示す[5]。図 1(a)のように鏡面散乱極限においてはマヨラナコーン構造が見られるが、拡散散乱条件極限では完全に崩れてしまう(図 1(c))。しかし、鏡面散乱確率が半分程度であれば、コーン状の構造が明瞭に見えている(図 1(b))。また、全入射角度にわたり積分して得られる全表面状態密度を図 1(d)に示す。鏡面散乱の場合、全状態密度はフェルミエネルギーにおいて非常に小さくなるが、そのことはエネルギー分散関係がコーン型の線型分散であることを反映している。

しかし、今まで実験によって得られた情報は全運動量を積分した全表面状態密度であり、表面に平行な運動量に依存した状態密度つまり分散関係自体はいまだ超流動ヘリウムにおいては観測されていない。

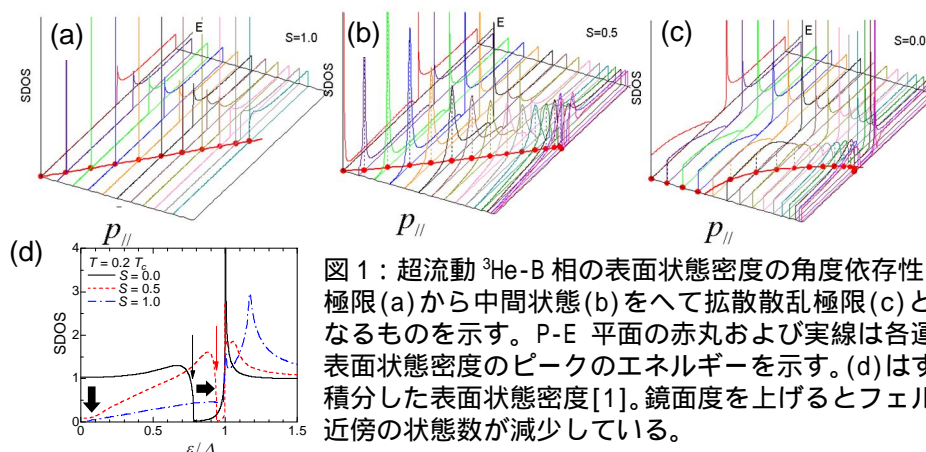


図 1: 超流動  $^3\text{He}$ -B 相の表面状態密度の角度依存性[5]。鏡面散乱極限(a)から中間状態(b)へて拡散散乱極限(c)と散乱条件の異なるものを示す。 $P$ - $E$  平面の赤丸および実線は各運動量における表面状態密度のピークのエネルギーを示す。(d)はすべての角度で積分した表面状態密度[1]。鏡面度を上げるとフェルミエネルギー近傍の状態数が減少している。

### 2. 研究の目的

本研究の目的はいまだに得られていない超流動ヘリウム B 相の表面状態の分散関係に関する情報を得ることである。トポロジカル物質の特性が顕著に現れるのは表面であり、バルクの状態の詳細が明らかになっているクリーンな系である超流動  $^3\text{He}$ -B 相を対象にすることは表面状態の本質を理解するうえで非常に有用である。物性物理学の分野でトポロジカル物性は、量子ホール効果の現れるトポロジカル絶縁体から始まり、超伝導、超流体へと興味を広がってきている。超流動  $^3\text{He}$  は明らかにトポロジカル超伝導、超流体と理論的・実験的に示されている物質であり、研究対象としては最適である。本研究で超流動  $^3\text{He}$ -B 相表面状態密度のコーン型分散関係(マヨラナコーン)が明らかになれば、理論が先行しがちな当該分野で大きな実験的な一歩になり、他の超流動・超伝導体に研究を進めるにあたり大きなモチベーションになる。

より具体的な目的は超流動ヘリウム  $^3$  の表面に準粒子を打ち込むことで表面状態の表面に平行な運動量に対する依存性を明らかにすることである。この理論計算はすでに行われており[1]、実験結果が得られれば、この理論計算の妥当性が検証できる。この理論計算は根源を同一としてマヨラナコーンを再現しているので、計算の妥当性はそのまま超流動  $^3\text{He}$  の表面状態の分散関係がマヨラナコーンであることの妥当性が検証できる。

### 3. 研究の方法

本研究では、準粒子の表面における散乱を観測する。図2に示すように、超流体の境界との反射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対特有の反射が存在する。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を観測する。この反射確率は理論計算がなされており(図3)[1]、得られた結果と比較することで、表面状態の分散関係の情報を引き出す。

準粒子ビームは、黒体放射の方法を用いて作成する[6]。液体<sup>3</sup>He容器内にもう一つ小さな穴をもつ容器を用意し、その内部に設置したヒーターにより容器の内部と外部に温度差を作成する。それにより、準粒子の密度の差が生じるため、準粒子が内側から外側に放出される。本研究では、圧力で伸び縮する溶接ベローズを液体ヘリウム4を用いて動作させ、その伸縮を歯車を用いて回転運動に変え、輻射体を傾け、準粒子ビームの表面への入射角を正確に制御する(図4)。これにより、入射角を変えた測定ができるようになる。この方法は表面への入射角度以外のパラメータを変えらることなくできるので解析する際に比較が容易になることも利点である。

準粒子検出およびヒーターには音叉型水晶振動子を用いる[7]。これは、磁場など新たな外場を必要とせず、素子に付けられた端子に電圧をかけるだけで動作することが大きな利点である。近年、液体ヘリウム研究において広く用いられるようになってきているものである。超流動転移温度より十分低温では、振動子のエネルギー散逸は周囲の準粒子の数に比例する。よって、振動子の共鳴曲線を測定し、その共鳴線幅を測定することにより準粒子の数を見積ることができ、量子アンドレーエフ反射によって黒体放射体に戻ってくる準粒子を観測できる。準粒子の数は温度にも依存するため、この振動子を用いることで超流動<sup>3</sup>Heの温度も測定することができ、そのことから、準粒子ビームのエネルギー分布を決定する。また、液体中で振動体が存在することになるので、大きく振動させることで発熱をさせることができるため、ヒーターとしても使用できる。

### 4. 研究成果

本研究に使用する核断熱消磁冷凍機は本学理学系研究科物理学専攻から低温科学研究センターに移設したものであるが、希釈冷凍機部分に多くの問題が発生し、修繕作業を行った。修繕作業は未だ完全に完了しているわけではないが、修繕の結果、核断熱消磁冷凍が成功し、飽和蒸気圧の<sup>3</sup>He試料が超流動転移するところまで冷却できることが確認できた。

実験セルは図3に示すように上部に溶接ベローズを組み込み、これの伸縮をギヤで回転運動に変え、下部にある黒体放射体を回転させる。実験セル下部には、液体<sup>3</sup>Heを効率よく冷却するための熱交換器として銀を焼結したものを用意した。ビームの入射角の決定方法は、以下のとおりである。1/4円状の電極を二枚用意し、それを対向させ、片方を固定、もう片方を黒体放射体と同一に動くようにし、その二枚の電極間のキャパシタンスを測定することでその重なる面積を導く。その面積は角度に比例するのでそこから角度を決定する。図5に角度とキャパシタンスの関係を示す。冷凍機に設置し、動作させたところ、圧力を減少させる方向の回転に関しては、希釈冷凍機温度でも大きな発熱などは生じず、実験に使用できることが確認できた。

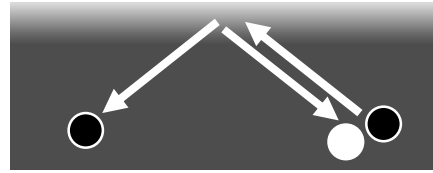


図2: 表面状態に<sup>3</sup>He準粒子を入射する様子。上面が表面で、右下から準粒子(黒丸)を入射し、一部は通常反射し(左下)、一部はアンドレーエフ反射しホール(白丸)が戻ってくる。

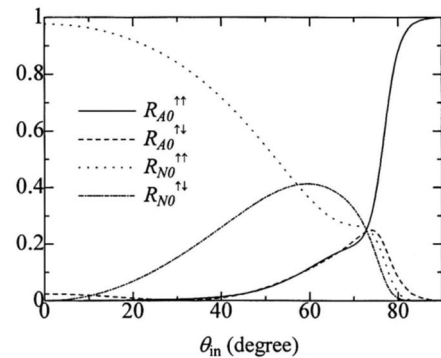


図3: 量子アンドレーエフ反射率( $R_A$ )と通常反射率( $R_N$ )の入射角依存性。0°が表面に垂直に入射する場合。それぞれスピン保存と非保存の場合が示されている[1]。

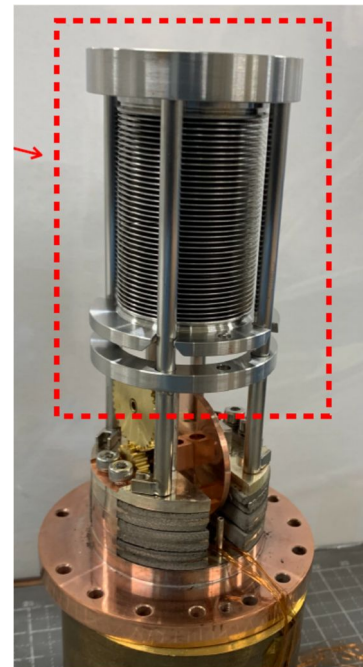


図4: 実験セルの写真。上部の赤い点線に囲まれた部分が溶接ベローズでここが伸び縮みする。

その面積は角度に比例するのでそこから角度を決定する。図5に角度とキャパシタンスの関係を示す。冷凍機に設置し、動作させたところ、圧力を減少させる方向の回転に関しては、希釈冷凍機温度でも大きな発熱などは生じず、実験に使用できることが確認できた。



実際の測定の前に、数値計算によるシミュレーションを行った。考え方は以下のとおりである。小容器から飛び出す準粒子は細い孔を通じて射出される。もし無限の長さの穴であれば、すべて孔と平行の方向に飛び出す。しかしながら、孔は有限の長さを持っているため、平行方向以外の方向に飛び出す準粒子も存在する。その分布を数値計算で求めた。結果を図6に示す。計算によると全粒子の20%程度しか孔を通過することはなく、およそ±45度の範囲に射出した粒子は分布していることが分かる。本研究では入射角に対する依存性を調べるために分布はなるべく細いほうがよいために、この先に絞りを追加し直進性を向上させている。また、このシミュレーションは実際の実験結果と比較することにより量子アンドレーエフ反射率を求める際にも利用できるものである。

実験セル内に搭載した音叉型水晶振動子は黒体輻射体の内側外側ともに低温でも動作し、常流動状態のところでは、フェルミ縮退した液体<sup>3</sup>Heの粘性( $\propto 1/T^2$ )から求まる共鳴線幅が得られている。超低温で動作する他の温度計の不具合のために超流動状態では校正ができないが、この情報をもとに超流動<sup>3</sup>Heの温度を見積もることができる。ヒーターの振動子を共鳴振動させたところ、温度計の温度が変化したことが観測されたため、準粒子ビームの射出ができていたことが確認できた。

今後、詳細な理論計算と実験結果を比較することで、超流動<sup>3</sup>HeB相の表面状態が明らかになる。クリーンな系である超流動<sup>3</sup>HeB相の結果は理想的な系であるために、他のトポロジカル物質への波及も期待できる。トポロジカル物質の表面状態のマヨラナ状態、特にマヨラナゼロモードは特殊な統計性を持つために応用の面からも発展が期待されている。

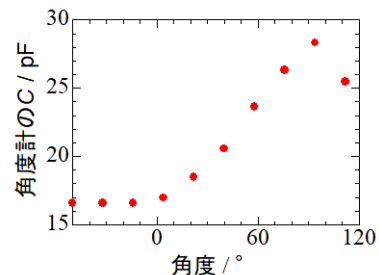


図5：黒体輻射体の角度と角度計のキャパシタンス。0度より左側は極板が全く重なっていないため、変化がない。また、90度以上では、極板の大きさが90度のために、重なる部分の面積が減少することがみられている。

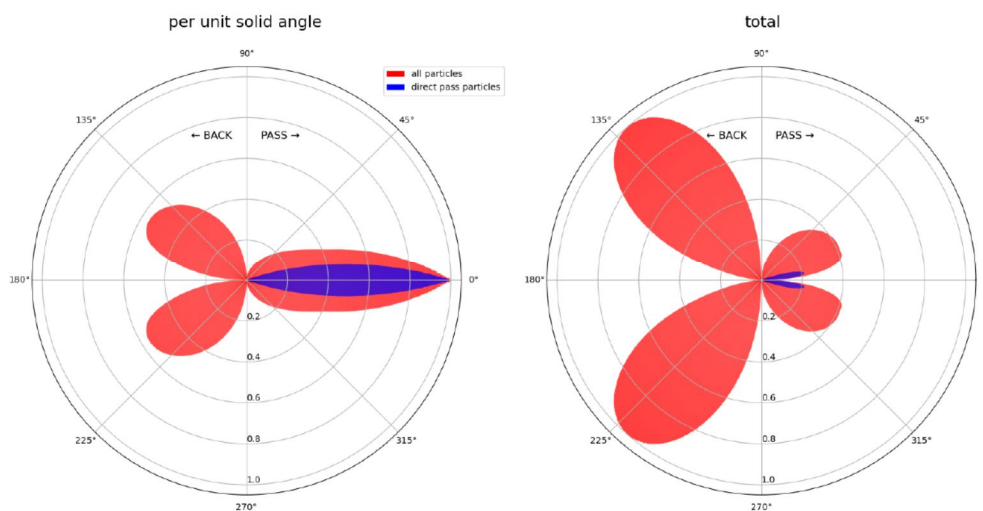


図6：射出される準粒子数の角度分布。青色は孔の入り口から直接出口に到達する粒子。赤色は一回以上孔中の壁で散乱した粒子。

左図：単位立体角当たりの粒子数 右図：同じ角度のものを積算したもの

- [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. N. Fisher et al., Phys. Rev. Lett. **69**, 1073 (1992); T. Okuda et al., Phys. Rev. Lett. **80**, 2857 (1998)等
- [7] R. Blaauwgeers et al., J. Low Temp. Phys, **146**, 537 (2007).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 吉田 研介
2. 発表標題 超流動ヘリウム 3-B 相表面における Andreev 反射の角度依存性測定
3. 学会等名 第15回低温科学研究センター研究交流会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 荒井 滉
2. 発表標題 超流動ヘリウム 3 における拡散的な表面の観測装置の開発
3. 学会等名 第15回低温科学研究センター研究交流会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 吉田研介, 村川智
2. 発表標題 角度分解型量子Andreev反射観測装置を用いた超流動ヘリウム3-B相表面状態の研究
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kensuke Yoshida and Satoshi Murakawa
2. 発表標題 Study of Surface States in Superfluid Helium 3-B Phase by Using an Angle Resolved Quantum Andreev Reflection Detector
3. 学会等名 International Conference on Ultra Low Temperature Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kensuke Yoshida, Tomoya Miyase, Satoshi Murakawa
2. 発表標題 Development of Angle Resolved Quantum Andreev Reflection Detector in Superfluid Helium 3
3. 学会等名 The 29th International Conference on Low Temperature Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田研介, 宮瀬知也, 村川智
2. 発表標題 角度分解型量子Andreev反射観測装置の開発
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田研介, 宮瀬知也, 村川智
2. 発表標題 超流動ヘリウム 3 角度分解型量子 Andreev 反射観測装置の開発
3. 学会等名 第13回低温科学研究センター研究交流会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村川智
2. 発表標題 量子アンドレーエフ反射測定による超流動ヘリウム 3 B相の表面状態の研究
3. 学会等名 ヘリウム・オンラインセミナー (招待講演)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

2022年発行の低温科学研究センター年報に解説記事 「超流動ヘリウム3の表面状態」

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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------