

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19540361

研究課題名（和文） 超流動ヘリウム3の横波超音波分光による表面束縛状態の研究

研究課題名（英文） Transverse acoustic wave spectroscopy of surface bound states in superfluid helium 3

研究代表者

野村 竜司 (NOMURA RYUJI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：00323783

研究成果の概要：

超流動ヘリウム3のB相における表面状態密度には、超流動ギャップエネルギー以下に束縛状態バンドが現れる。このバンド幅が、壁の鏡面度が大きくなるに従い広くなることを見出した。また音響インピーダンスの温度依存性に新たな異常が表れることを観測した。この異常は有限の鏡面度の際、表面状態密度のゼロエネルギー状態が強く抑制されることによって説明された。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：低温物理学

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：超流動ヘリウム3、表面束縛状態、表面状態密度、超音波分光、P波超流動

1. 研究開始当初の背景

横波超音波分光法を利用して、我々が最近発見した超流動ヘリウム3の表面アンドレーエフ束縛状態の系統的研究を行う。アンドレーエフ束縛状態は異方的BCS状態一般の普遍的性質であることが認識されつつある。しかし異方的超伝導物質の研究は現在も進行中であり、相の対称性でさえ完全に同定されているものは非常に少ない。一方超流動ヘリ

ウム3は、その単純さと試料の質に影響されない精密な実験とによってバルクの性質は良く理解されており、表面状態を研究する上での基礎が明確である。物質定数の不確定性や不純物の影響などに議論の余地を残さず、理論と実験の比較が可能な理想的物質である。また超流動ヘリウム3の持つ相の多様性や境界条件の制御可能性などを駆使した多彩な条件下での表面状態研究は、異方的BCS

状態の研究に新たな知見をもたらすと期待できる。

2. 研究の目的

(1) 表面状態密度は表面散乱の鏡面度 S に非常に敏感であるとの予想がある。鏡面度が増すにつれて束縛状態バンドのバンド幅が広がり、ある臨界値以上でギャップレスになるというのである。超流動ヘリウム3の壁での鏡面度は、壁を数原子層のヘリウム4でコートする事により系統的に変化させることが可能であり、表面アンドレーエフ束縛状態 (SABS) の境界条件依存性を明らかにしたい。

(2) 超流動ヘリウム3はスピン3重項状態であり、磁場によってバルクの相の安定性を変えることが出来る。磁場中での測定によりB相とは異なる対称性をもつA相、 A_1 相の表面状態を調べることは、異方的BCS状態の表面効果を真に理解する上で重要な知見をもたらすと期待できる。

3. 研究の方法

図1は長登らによるB相におけるSDOSの計算結果である。 $S=0$ が拡散的散乱、 $S=1$ が鏡面散乱の極限である。拡散的な場合 Δ 以下にSABSに起因する束縛状態バンドが現れ、その上端 Δ^* (図の↓)が非常にシャープ

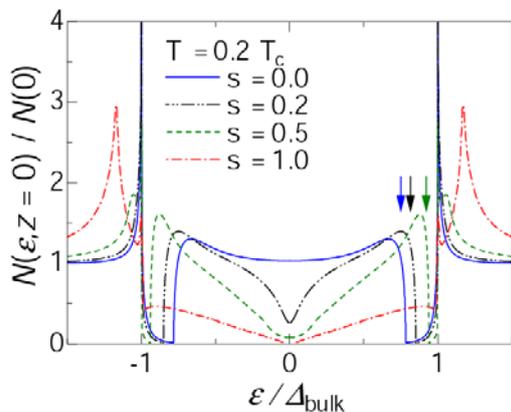


図1

であるという特徴がある。鏡面度を増していくと、バンド幅が広がり Δ^* が Δ に近づいていく。

図2はヘリウム4コート無しの場合に、我々が測定した Z の実部(Z')と虚部(Z'')の温度依存性である。点線で示した対破壊温度 T_{pb} ($2\Delta(T_{pb}) = \omega$ より決まり、これ以下の温度では $2\Delta > \omega$ のためバルクの対破壊は起こらない)以下のある温度 T^* (図の実線)で Z' にキック、 Z'' にピークが見られること、 Z' が低温で周波数に依存した値に飽和することなどの特徴がある。SABSを考慮せずバルクの寄与のみの計算では、 T_{pb} 以下の温度では常流動成分の減少に伴い Z'' が周波数に依存しない値に向かって単調に減少するのみで、このような構造は現れない。実験結果は Δ 以下の低エネルギー準粒子励起が存在することを示すものである。

長登らは図1のSDOSのもとでの Z の計算を行い、実験の特徴をほぼ再現する結果を得た。これにより Z' のキックと Z'' のピークは、 $\Delta^* + \Delta = \omega$ を満たす温度 T^* で現れる弱い特異性と分かった。B相のSDOSが図1のような構造を持つことが実験的に示されたことになる。またこのことを利用して、バンド幅を実験的に決定できる。

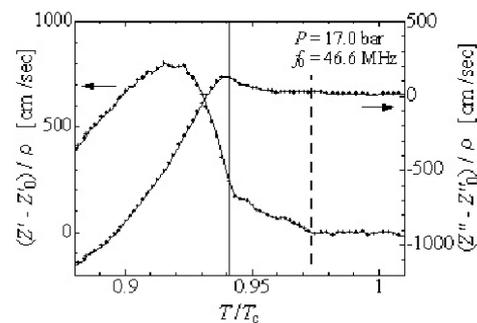


図2

4. 研究成果

図3は壁を2.7層、3.6層の ^4He でコートした場合との比較である。コート無しの場合と比較して、変化量が減少し、温度依存性が

高温側へシフトしていることが分かる。過去のねじれ振子の実験などによって、 ^4He コートが壁の鏡面度を増加させることが知られており、変化量の減少はそのためと考えられる。鏡面散乱した準粒子は壁に平行な運動量を保存し、 Z に寄与しないためである。一方、高温へのシフトは状態密度の変化を意味する。コートによって変化するのは表面状態のみで、バルクの状態密度は全く影響を受けない。温度依存性のシフトは Z の測定が SDOS の変化を捉えていることの更なる証拠と言える。図 1 によると鏡面度が増加すると Δ^* が増加するため、 $\Delta^* + \Delta = \omega$ を満たす温

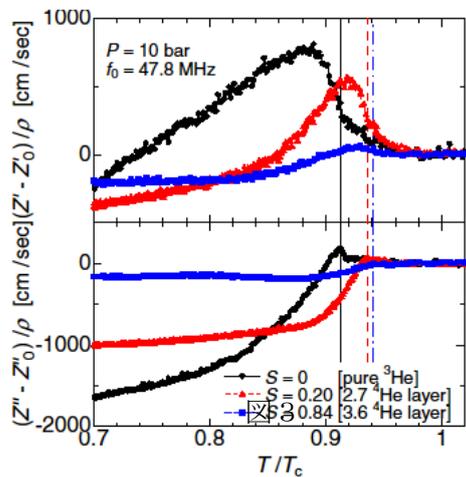


図 3

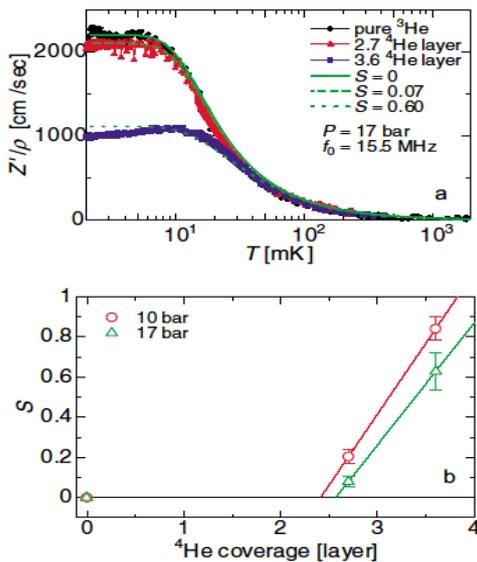


図 4

度は高温にシフトするので、実験結果を定性的に理解することが出来る。

コートによって S がどのように変化するかは、常流動ヘリウム 3 での音響インピーダンスの測定から求めることが出来る。図 4 はヘリウム 4 コートしたときの温度変化をフェルミ流体理論でフィットした結果と、得られた S の値である。膜厚が厚いほど、圧力が低いほど鏡面度が大きくなった。

図 5 は異なる S における Δ^* の温度依存性である。 S が大きくなるほど、バンド幅が広がっているのが分かる。図 6 は 0.88Te における Δ^* の S 依存性である。 S が小さいときは Δ^* は S にほぼ比例して大きくなり、臨界値 $S_c \sim 0.4$ 以上で、束縛状態バンドが超流動ギャップを埋めることが分かる。

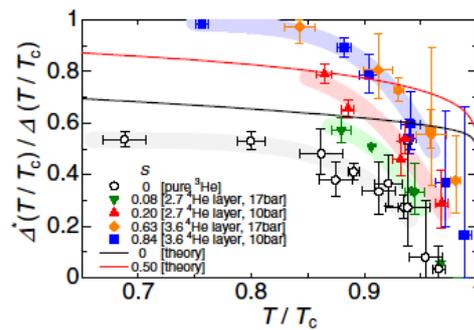


図 5

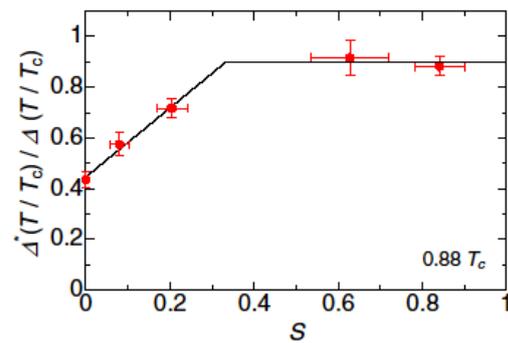


図 6

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 4 件)

①Y. Tamura, S. Murakawa, Y. Wada, M.

Wasai, M. Saitoh, Y. Aoki, R. Nomura and Y. Okuda, Transverse Acoustic Impedance of Normal Liquid ^3He with ^4He Coating,

Journal of Physics: Conference Series, **150**, 032106-1-4 (2009) 査読あり

②S. Murakawa, Y. Wada, Y. Tamura, M. Saitoh, Y. Aoki, R. Nomura, Y. Okuda, Y. Nagato, M. Yamamoto, S. Higashitani and K. Nagai, Surface condition dependence of transverse acoustic impedance in superfluid ^3He , Journal of Physics: Conference Series, **150**, 032070-1-4 (2009)

査読あり

③Y. Wada, S. Murakawa, Y. Tamura, M. Saitoh, Y. Aoki, R. Nomura and Y. Okuda, Broadening of the surface Andreev bound states band of superfluid $^3\text{He-B}$ on a partially specular wall, Phys. Rev. B **78**, 214516-1-5 (2008) 査読あり

④ The Surface Density of States of Superfluid ^3He for Different Surface Boundary Conditions, S. Murakawa, Y. Wada, Y. Tamura, M. Saitoh, Y. Aoki, R. Nomura, and Y. Okuda, J. Low Temp. Phys. **150**, 154-159 (2008) 査読あり

[学会発表] (計 14 件)

①和才将大, 村川智, 田村雄太, 和田雄一郎, 野村竜司, 奥田雄一, 高圧 bulk ^3He 中における薄膜 ^4He の KT 転移について、日本物理学会第 64 回年次大会、2009 年 3 月 30 日、立教学院池袋キャンパス

②村川智, 山口明, 荒井美穂, 田村雄太, 和才将大, 青木悠樹, 石本英彦, 野村竜司, 奥田雄一, 強磁場中における超流動 ^3He の横波音響応答 II、日本物理学会第 64 回年次大会、2009 年 3 月 30 日、立教学院池袋キャンパス

③村川智, 山口明, 田村雄太, 和才将大, 青木悠樹, 石本英彦, 野村竜司, 奥田雄一, 強

磁場中における超流動 ^3He の横波音響応答、日本物理学会 2008 年秋季大会、2008 年 9 月 22 日、岩手大学上田キャンパス

④田村雄太, 村川智, 和才将大, 和田雄一郎, 齋藤政通, 青木悠樹, 野村竜司, 奥田雄一, ^4He コートをした常流動 ^3He の横波音響応答 III、日本物理学会 2008 年秋季大会、2008 年 9 月 22 日、岩手大学上田キャンパス

⑤村川智, 和田雄一郎, 田村雄太, 和才将大, 齋藤政通, 青木悠樹, 野村竜司, 奥田雄一, ^4He をコートした超流動 ^3He の横波音響応答、日本物理学会 2008 年秋季大会、2008 年 9 月 22 日、岩手大学上田キャンパス

⑥S. Murakawa, Y. Wada, Y. Tamura, M. Wasai, M. Saitoh, Y. Aoki, R. Nomura, Y. Okud, Y. Nagato, M. Yamamoto, S. Higashitani and K. Nagai, Surface Condition Dependence of the Surface Andreev Bound States of Superfluid $^3\text{He-B}$ Measured by Transverse Acoustic Impedance, ULT2008; Frontiers of Low Temperature Physics, 2008/08/14 Royal Holloway University of London, England

⑦S. Murakawa, A. Yamaguchi, Y. Tamura, M. Wasai, Y. Aoki, H. Ishimoto, R. Nomura and Y. Okuda, Transverse Acoustic Impedance Measurements in Superfluid ^3He A_1 and A_2 Phases, ULT2008; Frontiers of Low Temperature Physics, 2008/08/14, Royal Holloway University of London, England

⑧S. Murakawa, Y. Wada, Y. Tamura, M. Saitoh, Y. Aoki, R. Nomura, Y. Okuda, Y. Nagato, M. Yamamoto, S. Higashitani, and K. Nagai, Surface condition dependence of Transverse Acoustic Impedance in Superfluid ^3He , 25th international conference on Low Temperature Physics

(LT25), 2008/08/13, RAI Conference Center, Amsterdam, Netherlands

⑨ R. Nomura, S. Murakawa, Y. Wada, Y. Tamura, M. Saitoh, Y. Aoki, Y. Okuda, Y. Nagato, M. Yamamoto, S. Higashitani, and K. Nagai, Surface Andreev bound states of superfluid ^3He on a specularly-controlled wall, 25th international conference on Low Temperature Physics (LT25), 2008/8/8, RAI Conference Center, Amsterdam,

Netherlands

⑩ 田村雄太, 和田雄一郎, 村川智, 斎藤政通, 青木悠樹, 野村竜司, 奥田雄一, ^4He コートをした常流動 ^3He の横音響応答 II、日本物理学会第 6 3 回年会、2008 年 3 月 26 日、近畿大学

⑪ 村川智, 和田雄一郎, 田村雄太, 斎藤政通, 青木悠樹, 野村竜司, 奥田雄一, ^4He をコートした超流動 ^3He の表面束縛状態 II、日本物理学会第 6 3 回年会、2008 年 3 月 26 日、近畿大学

⑫ 田村雄太, 和田雄一郎, 村川智, 斎藤政通, 青木悠樹, 野村竜司, 奥田雄一, ^4He コートをした常流動 ^3He の横波音響応答、日本物理学会第 6 2 回年会、2007 年 9 月 24 日、北海道大学

⑬ 村川智, 和田雄一郎, 田村雄太, 斎藤政通, 青木悠樹, 野村竜司, 奥田雄一, ^4He をコートした超流動 ^3He の表面束縛状態、日本物理学会第 6 2 回年会、2007 年 9 月 24 日、北海道大学

⑭ S. Murakawa, Y. Wada, Y. Tamura, M. Saitoh, Y. Aoki, R. Nomura, and Y. Okuda, The Surface Density of States of Superfluid ^3He for Different Surface Boundary Conditions, International symposium on quantum fluids and solids (QFS2007), 2007/08/01 Kazan State University, Kazan,

Russia

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野村 竜司 (NOMURA RYUJI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号：00323783

(2) 研究分担者

奥田 雄一 (OKUDA YUICHI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：50135670

(3) 連携研究者

該当なし