

平成30年6月7日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400364

研究課題名(和文) 磁場下における超流動ヘリウム3の横波音響インピーダンスと特異な表面状態

研究課題名(英文) Acoustic impedance and surface bound states spectrum of Superfluid Helium3 under magnetic field

研究代表者

長登 康 (NAGATO, Yasushi)

広島大学・情報メディア教育研究センター・助教

研究者番号：60294477

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：超流動液体ヘリウム3の壁面近傍には、Andreev 束縛状態と呼ばれる特異な表面状態が形成されている。長らくこの表面状態を観測する手だてがなかったが、先の研究で横波音響インピーダンス測定によってこの表面状態を観測できることを示した。本研究では、この表面状態が磁氣的異方性を持つことに着目、乱雑な表面効果を取り入れ表面状態への磁場効果を明らかにし、磁場下における横波音響インピーダンスについて研究した。

研究成果の概要(英文)：The Andreev bound states that formed near a surface of the superfluid helium 3-B are recognized in Majorana-Weyl fermion. Experimental observation of the surface bound states in superfluid helium 3 was not performed because it is electrically neutral. Recently we have reported that the transverse acoustic impedance provides useful information on the surface bound states in the superfluid helium 3.

We first discussed the Andreev bound states of the superfluid helium 3-B with a rough surface and in a magnetic field using the quasi-classical Green function together with a random S-matrix model and clarified the subgap structure. We calculated the self-consistent order parameter, the spin-polarization density and the surface density of states numerically. And we also discussed the surface roughness dependence and the magnetic field dependence of the transverse acoustic impedance using the quasi-classical Keldysh Green function.

研究分野：物性II

キーワード：超流動ヘリウム3 Andreev束縛状態 音響インピーダンス 磁場効果 乱雑な境界

1. 研究開始当初の背景

近年、超流動液体ヘリウム 3 や超伝導体 Sr_2RuO_4 の表面に形成されている Andreev 束縛状態と、素粒子論で提案されていた Majorana-Weyl フェルミ粒子との密接な関係が指摘され、物性論・素粒子論の研究者の注目を集めている。

電荷を持たない超流動液体ヘリウム 3 では、超伝導トンネル接合のような分光学的手法が使えず、長らく Andreev 束縛状態を含む表面準粒子状態をヘリウム 3 表面の Andreev 束縛状態の観測測定することができなかった。近年、東京工業大の低温実験グループによって、超流動ヘリウム 3 の入った容器壁を横振動させ、その横波音響インピーダンスを測定する実験が行われた。この測定結果を準古典的 Keldysh Green 関数法を用い解析した結果、横波音響インピーダンス測定により Andreev 束縛状態を観測できることを実証した。超流動ヘリウム 3 において、Andreev 束縛状態を含めた表面準粒子状態を探索するには、この横波音響インピーダンス測定は最も強力な方法であり、それに対応した理論研究は極めて重要である。

液体ヘリウム 3 のような p 波超流動状態では、境界面と磁場の向きによって、Andreev 束縛状態の存在に関連した幾つかの特異な現象がみられることが理論的に指摘されている。

a. スピン密度 (帯磁率) の強い異方性

境界面に垂直な磁場を掛けると、表面に形成された Andreev 束縛状態の Pauli 常磁性に起因する巨大なスピン密度が現れる。この効果が顕著となる超流動液体ヘリウム 3 薄膜を理論的に解析し、帯磁率に大きな異方性が現れることが明らかになった。

b. トポロジカル相転移

超流動秩序パラメータは境界面や磁場によって大きく影響を受けることが古くから知られていた。バルクで安定であることが知られている BW 状態の超流動秩序パラメータはスピン-軌道空間の回転行列を用いて表され、回転軸ベクトル \mathbf{n} とその回転角 θ に関して縮退がある。1970 年代に Brinkman 等が行った GL 理論による研究で、境界ならびに磁場の掛かっている系ではそれらの相対的な向きに関して縮退が解けることが示された。近年水島等によって、理想的な鏡面境界を持つ系での議論を準古典的グリーン関数法を用いて行われ、境界面と外部磁場によって特異な超流動秩序転移(トポロジカル相転移)の可能性が示された。

横波音響インピーダンス測定では横振動する境界面と超流動体間の運動量交換が必要であり、境界面の乱雑さが重要な意味を持つ。乱雑な境界面を持つ系においても、水島らによって指摘された特異な超流動相転移(トポロジカル相転移)が起こるのか自明でないため、その相転移の有無・振る舞いを明らかにする必要があった。

2. 研究の目的

主に以下の点を明らかとすることを目的とした。

a. Andreev 束縛状態の磁氣的性質の効果

境界面に垂直な磁場を掛けた場合の横波音響インピーダンスを計算し、Andreev 束縛状態の磁氣的性質が音響インピーダンスにどのような影響を与えるのか明らかにする。音響インピーダンス測定における壁の振動によってどのような準粒子励起が働いているのか、表面状態密度や励起状態を調べることで明らかにする。

b. 特異な超流動相転移の測定

磁場を境界面に平行に掛けた場合を考え、現実の乱雑な境界面を持つ系においても特異な超流動相転移が起こるか明らかにする。得られた超流動秩序状態のもとで横波音響インピーダンスを計算し、超流動相転移がどのようにインピーダンス測定で観測されるのか明らかにする。

c. 実験との比較

実験グループによる測定環境に合わせたパラメータを用い、実験結果との比較を行う。その際、上記 a. b. の議論を元にして、測定結果に対する物理的解釈を与える。

3. 研究の方法

過去の研究で用いてきた準古典的 Keldysh グリーン関数法を応用し、磁場が i) 境界面に垂直な場合と ii) 平行な場合に分けて順次研究を進める。ii) のケースでは磁場による超流動相転移(トポロジカル相転移)の可能性について調べると共に、音響インピーダンスによって相転移がどのように観測されるか明らかにする。

いずれのケースも、与えられた条件(磁場の向き・強さ)で最も安定な超流動状態を求めた後に、横波音響インピーダンスを数値的に計算し、測定結果との比較を行う。スピン方向別の状態密度や境界面の横振動による励起状態を調べ、音響インピーダンスに対する Andreev 束縛状態の磁氣的性質の働きを明らかにする。

4. 研究成果

まず、境界面に垂直な磁場を想定し、Andreev 束縛状態による励起構造を含む音響インピーダンス測定にどのように磁場効果が現れるかを明らかにした。

音響インピーダンスを計算するにあたっては、境界面の乱雑さを正しく取り扱う必要がある。乱雑な境界面を持つ系を取り扱うことが可能な準古典的 Keldysh グリーン関数の形式解を導出し、数値計算によって垂直磁場下における超流動秩序パラメータ・フェルミ液体効果による有効磁場を自己無道着に決定した。これらの結果を用い、境界面の振動の一次で音響インピーダンスを様々なパラメータ(温度、振動数、境界乱雑さ)下で計算した。また、同じ秩序パラメータ・有効磁場

のもとで表面状態密度も計算し、音響インピーダンスとの比較を行った。

表面状態密度との比較の結果、磁場による低エネルギーの Zeeman ギャップエネルギー、Andreev 束縛状態の上限エネルギー、バルク領域で決定されるエネルギーといった量が特徴的なエネルギーとなっており、音響インピーダンスの結果に反映していることが明らかとなった。これらの特徴的なエネルギーが、様々なパラメータ下でどのように変化するかを導出した。

音響インピーダンス実験との比較も行い、あるパラメータ下では定性的に説明できる可能性を示したが、定量的な一致はみられていない。これを定量的に比較するためには、別の効果を取り入れる必要があると考えられる。

次に、境界面に並行な磁場が掛かった場合の音響インピーダンスを計算する前段階として、平行磁場下にある乱雑な境界面を持った半無限系においてどのような超流動秩序パラメータが安定であるかを決定しなくてはならない。そこでまずこの超流動秩序パラメータの対称性について調査した。

有限磁場下での境界を有する超流動液体ヘリウム 3-B の超流動秩序パラメータを求めるにあたっては、双極子相互作用を正しく考慮したギャップ方程式を扱う必要がある。準古典的グリーン関数を用いて、双極子相互作用も含めたギャップ方程式を定式化し、数値的解法によって自己無撞着な超流動秩序パラメータを計算した。また求めた解の安定性を判定するために、磁場下での自由エネルギー計算も行った。

スピン三重項超流動状態では 18 の自由度(軌道 $3 \times$ スピン $3 \times$ 複素数 2) を持つ秩序パラメータの空間依存性を取り扱う必要がある。数値計算時間が予想以上に長くなることがわかったため、BW 状態を仮定し秩序パラメータの自由度を 9 自由度(軌道 $3 \cdot$ スピン 3) に限定することとした。様々な計算の中で、境界面から幾らか離れた領域でコヒーレンス長程度のスケールで n ベクトルが空間的に回転するような、ドメイン壁を有する準安定解も得られた。システムサイズが有限の系であれば自由エネルギーの大きさを比較しやすいが、バルク領域を有する半無限系を取り扱っているため、より高い計算精度を必要としていることも数値計算の長時間化に繋がった。

この系では微小である双極子相互作用が重要な役割を果たしているが、数値的な取り扱いをするうえで困難を引き起こすものであり、それが旧来の GL 理論以降に理論研究が行われてこなかった理由の一つであった。準古典的グリーン関数法ならびに高速な計算機のおかげで、GL 理論の適用外領域の研究が可能となった。長時間にわたる膨大な数値計算の結果、ギャップ方程式を満たす幾つかの

解が得られ、それらの自由エネルギー比較から、1970 年代に行われた GL 理論による結果に類似する秩序パラメータ解が最も安定であることが明らかになった。その一方、自由エネルギー的にこの GL 的な解に近接した別の準安定解が存在することも分かっており、その解が準安定状態として実現する可能性も残されている。

また最も安定である GL 的な解の対称性を解析することにより、実はこの安定解が垂直に磁場が掛かった系での秩序パラメータに対してスピン空間の回転を行った解に相当していることが示された。その事実から音響インピーダンスの結果が磁場の向きに依存しないことも明らかとなった。

境界に平行に磁場を掛けた系が実質的に壁に垂直に磁場を掛けた系と等価であることが示されたことを踏まえ、壁に垂直な磁場が掛かった場合の Andreev 束縛状態の磁場効果、表面の乱雑さの効果について考察を行い、また横波音響インピーダンスの計算を精査した後、欧文学術論文誌 Journal of Low Temperature Physics 誌にて本論文としてまとめて発表した。

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 2 件)

1. Y. Nagato, S. Higashitani, and K. Nagai, Journal of Low Temperature Physic, 190, 277-301(2018) 査読あり
2. S. Murakawa, A. Yamaguchi, M. Arai, M. Wasai, Y. Aoki, H. Ishimoto, R. Nomura, Y. Okuda, Y. Nagato, S. Higashitani, and K. Nagai, Physical Review Letter 114 105304 (2015) 査読あり

[学会発表](計 6 件)

1. 長登康、東谷誠二、永井克彦：日本物理学会 2017 年 03 月 18 日大阪大学「境界面に平行な磁場下における超流動ヘリウム 3 の横波音響インピーダンス II」
2. 長登康、東谷誠二、永井克彦：日本物理学会 2016 年 09 月 15 日金沢大学「境界面に平行な磁場下における超流動ヘリウム 3 の横波音響インピーダンス」
3. 長登康、東谷誠二、永井克彦：日本物理学会 2016 年 03 月 21 日東北学院大学「強磁場下における乱雑な境界面近傍の液体ヘリウム 3 超流動状態」

4. 長登康、東谷誠二、永井克彦：日本物理学会 2015 年 09 月 18 日関西大学「磁場下における乱雑な境界面近傍の液体ヘリウム 3 超流動状態」
5. 長登康、東谷誠二、永井克彦：日本物理学会 2015 年 03 月 24 日早稲田大学「境界に垂直な磁場下における超流動ヘリウム 3 の横波音響インピーダンス II」
6. 長登康、東谷誠二、永井克彦：日本物理学会 2014 年 09 月 08 日中部大学「境界に垂直な磁場下における超流動ヘリウム 3 の横波音響インピーダンス」

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 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 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

長登 康 (NAGATO YASUSHI)
広島大学・情報メディア教育研究センター・助教
研究者番号： 60294477

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：

(4)研究協力者

()