

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	超流動ヘリウム3の表面束縛状態の磁気応答
Title(English)	Magnetic response of the surface bound state of superfluid 3He
著者(和文)	和才将大
Author(English)	masahiro wasai
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9604号, 授与年月日:2014年9月25日, 学位の種類:課程博士, 審査員:奥田 雄一,田中 秀数,大熊 哲,村上 修一,井澤 公一
Citation(English)	Degree:., Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9604号, Conferred date:2014/9/25, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

(博士課程)

## 論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	和才 将大	
論文審査 審査員		氏名	職名	氏名	職名
	主査	奥田 雄一	教授	井澤 公一	准教授
	審査員	田中 秀数	教授		
		大熊 哲	教授		
		村上 修一	教授		

### 論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は、超流動  $^3\text{He-B}$  の表面に形成される表面アンドレーフ束縛状態の外部磁場に対する応答を、横波音響インピーダンスの手法によって調べたものであり、磁場を表面に垂直に印加したとき、音響インピーダンスの虚部に小さいながら明確なドロップが現れることを見出している。本論文は「Magnetic response of Surface Andreev Bound State of superfluid  $^3\text{He-B}$ 」と題し、以下の7章から構成されている。

第1章「Introduction」では、超流動  $^3\text{He}$  が数ミリケルビンの超低温において P 波の超流動状態に相転移することについて概観し、等方的にギャップの開く B 相の表面に、表面アンドレーフ束縛状態が形成されることを述べている。また、超流体に接している壁の横波音響インピーダンスを測定することで、この表面束縛状態が実験的に観測できることを述べている。横波音響インピーダンスの磁場に対する応答を調べることで、表面束縛状態をより深く理解するという本研究の目的が述べられている。

第2章「Superfluid  $^3\text{He}$  theoretical background」では、P 波超流動体の一般論を簡単に紹介し、超流動  $^3\text{He}$  では B 相が BW-state と A 相が ABM-state として実現していることを解説している。特にギャップが等方的に開く B 相の表面に、バルクのギャップ・エネルギー以下の低エネルギー領域に P 波超流動体固有の準粒子状態が存在すること、また、その表面束縛状態が表面での準粒子散乱条件に敏感に依存する理論的進展について紹介している。また、最近の topological superfluid の考え方から、表面束縛状態を見通しよく理解されること、さらには、この表面状態の準粒子が、粒子と反粒子の区別のない Majorana fermion の性質を有していることなどをレビューしている。

第3章「Review of previous experiments」では、横波音響インピーダンスによる表面束縛状態の先行研究のレビューを行っている。水晶振動子を横波モードで共振させ、その複素インピーダンスを測定することで束縛状態を捉えることができたこと、また、共鳴振動数を超流動  $^3\text{He}$  のギャップ・エネルギーに相当する値に設定することで、束縛状態を分光学的に調べることができることを述べ、実際に実験が進展してきた成果について紹介し、本研究の重要な実験的背景となっていることを強調している。

第4章「Experimental setup」では、超流動  $^3\text{He}$  の実験を遂行するための具体的実験方法について述べている。転移温度がミリケルビンの超低温であるため、銅の原子核を使った断熱消磁法を

用いたこと、磁場中実験のために新たにサンプルセルを考案したこと、サンプルセルへのヒートリンクに工夫を凝らしたこと、磁場中の温度測定の校正に苦心したことなど、いくつかの焦点を絞って述べられている。

第5章「**Experimental results**」では、今回初めて外部磁場を表面に垂直に印加して測定した、横波音響インピーダンスの実験結果について述べている。トランスデューサーの表面に特別な処理を施さない *diffusive* 散乱での実験であり、磁場は 190mT まで、30~50 mT 間隔で変化させて行っている。100mT までの低い磁場での結果は、複素インピーダンスの虚部のピーク構造が磁場とともに潰れていく微妙な変化を示している。一方、100mT 以上の高い磁場の結果では、A 相から B 相へ移る AB 転移が明瞭に虚部のジャンプとして観測されている。さらに、その AB 転移温度以下の温度で、それぞれ磁場に依じた小さなドロップが同じく虚部に観測されている。このドロップの起こる温度は磁場が大きくなるにしたがって、低温へシフトしていることが示された。これは本研究の中心的な結果である。

第6章「**Discussion**」では、第5章での実験結果を、現存する理論をもとに解析している。横波音響インピーダンスは、壁が横方向の運動量を表面束縛状態の準粒子に受け渡し、それによって準粒子が励起されるプロセスを反映しており、表面束縛状態の状態密度の *singularity* を反映した異常がインピーダンスに現れることが分かっている。この点に注目して虚部の小さなドロップの磁場依存性と表面状態密度の形から、ゼロエネルギー近傍の状態密度が外部磁場により消失したことを推論している。また、表面状態の *Majorana* 的性質による内部磁場のエンハンスメントが起こっていることも同時に推定している。

第7章「**Conclusion**」では、本研究で得られた実験結果およびその解析から得られた知見について結論としてまとめている。

以上を要するに、本論文は、超低温における超流動  $^3\text{He}$  の B 相の表面束縛状態の磁場効果を音響インピーダンスで初めて見出したもので、表面束縛状態のゼロエネルギー近傍の状態が消失している可能性を実験的に指摘している。外部磁場により時間反転対称性が破れ、その結果ゼロエネルギー近傍の状態が消失したという、*topological superfluid* の立場からの重要な結果である。困難な実験を遂行し、興味深い実験結果を見出し、また理論的解析もきちんと行うことで  $^3\text{He}$ -B の表面状態の理解を深めたもので、これは申請者の研究能力の高さと学識の深さを表しており、本論文は博士（理学）の学位論文に十分値すると判断される。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。