

氏 名	おかもとよしこ 岡 本 佳 子
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	論 理 博 第 1476 号
学位授与の日付	平 成 19 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学 位 論 文 題 目	Spin Wave and Sound in High-Field Phase of Solid Helium-3 (固体ヘリウム 3 の高磁場相におけるスピン波と音波)
論文調査委員	(主 査) 助教授 池 田 隆 介 教 授 山 本 潤 教 授 前 野 悦 輝

論 文 内 容 の 要 旨

この研究では、極低温かつ高圧下で実現する固体ヘリウム 3 の物理的性質を探る目的で行われた超音波実験に解釈を与えるための理論の提出が主な目的となっている。固体ヘリウム 3 は、量子効果が顕著に強く原子の遍歴性があらわに残った状態で実現している固体で、しかも原子間の短距離斥力が主役となって固化しているアドラー固体の一種である。そのため、原子間の交換も通常の 2 体交換ばかりでなく、2 体以上の多体交換プロセスも無視できないため、体系的な理論研究が難しく、これまで十分に進んでいなかった。特に、固体に固有な弾性を探るための超音波測定に関する理論は全く整備されておらず、そのための微視的な側面からの理論研究が今回この研究で行われた。

バルクの固体ヘリウム 3 の相には、U2D2 相、まだスピン配列などが十分同定されていない高磁場相 (HFP) とがあるが、この研究ではまだ未知の部分が多い HFP を主な対象としている。HFP のスピン配列はまだ確認されていないものの、海外の数値研究の予想に基づきキャントした反強磁性相になっていると考えられるため、このスピン配列に関する理解の確立も意図した上でそのスピン波の特性について調べられた。原子の遍歴性を微妙に保ったこの系では、固体の弾性 (密度変化) と磁性とが強くカップルし、スピン波の特性がそのまま音波という固体の弾性に関わってくる可能性があるため、スピン波特性の調査も重要視された。スピンの 4 体交換相互作用まで含むスピンハミルトニアンをモデルとして、ホルシュタイン・プリマコフ法によりスピン波モードに関し対角化し、さらにスピン波の 3 体・4 体相互作用項を用いて、スピン波の速度への有限温度補正及びスピン波の寿命を計算した。前者は超音波速度変化に反映される可能性があり、後者はスピン波 (マグノン) の線幅として超音波吸収に寄与する可能性がある。解析方法はスピン波というゴールドストーンモードに関するダイアグラム計算を用いた。

本研究の中核をなすのがマグノン励起の数と固体の密度変化をカップルさせた問題の定式化とその解析である。ヘリウム 4 超流体における音波モードの運動学をボーズ粒子に関するボルツマン方程式として定式化された例を参考に、ここでは固体中のマグノンというボーズ粒子を同様な方法で固体の密度変化とカップルさせて、密度揺らぎを微視的に取り扱った。ここでは、ボルツマン方程式の衝突項を保存則を満たすように緩和近似で取り入れるという、精密な方法の援用が以下に述べる物理的結果を導くのに重要な役割を果たした。超音波測定で得られる物理量は基本的に、音速と音波吸収率であるが、吸収係数という動的な量は実際の系では本研究のような微視的な側面に焦点を当てた研究では視野の外にある、サンプル中の欠陥や不純物による散乱過程が主役を演じる場合が多く、事実本研究においても吸収係数に関する結果はオーダーが実測値とは全く異なり、サンプル中の欠陥を考慮すれば良く説明できるという結論に至っている。一方、音速の変化に関しては本研究で重要視した磁性と結晶密度変化とのカップリングが主要な役割を演じ、音速変化の温度あるいは磁場依存性がマグノンがもたらす寄与によりよく説明され、殊にその磁場変化は定量的なレベルで実験結果を説明することに成功した。本研究は、固体ヘリウム 3 の HFP の理解を微視的な立場から試みるほぼ最初の理論研究であり、今後この系の実験事実の解析への足がかりになる研究と期待される。

論文審査の結果の要旨

この学位論文は、まず実験事実及び対象とする系についての背景を説明する導入部から始まり、その後詳細な理論解析の説明に紙数が割かれている。学位申請者は、本研究科大学院在籍時より固体ヘリウム3の理論研究に触れており、この系に関するその豊富な知識を導入部で示している。公聴会の場での試問においても、ヘリウム3固体の構造と一般の固体との比較について審査員が尋ねる場面があったが、的確な回答ができており、基本的な物理の素養については十分備わっていると判断した。

理論解析においてはまず、スピン波間の相互作用による速度変化や減衰の計算において、非常にデリケートでかつ大量の積分計算が必要であった。スピン波というゴールドストーンモード間の相互作用の取り扱いにはゼロモードという特徴を損なわない注意深い計算が必要で、申請者は理論的に難しいこの作業を無難にクリアしている。これは、申請者が本研究に必要であった場の理論的な素養を十分身につけていると判断できる一つの根拠と審査員一同判断した。

次に、音波とスピン波というボーズ励起とのカップリングを理論的に取り入れる手法として、申請者はボーズ励起に対するボルツマン方程式の線形近似を用いている。量子流体、量子固体の動的な挙動については十分低温であるため、素励起の緩和時間より短い時間スケールも問題になるので、古典系でのボルツマン方程式に対する近似に単に立脚するだけでは不十分である。そのため、申請者は超流動ヘリウム4という歴史の長い研究分野でのフォノン励起に対する取り扱いを現在のスピン波励起に対して応用した。超流動ヘリウム4における動的な問題をボルツマン方程式に立脚して解析を進める方法も理論的には高級な問題であり、その予備知識を吸収して現在の問題に応用したことから考えても、凝縮系理論に関する申請者の高い素養をみることができる。そして、実際この応用を通して固体ヘリウム3の音速の温度変化や磁場変化がスピン波と密度変化とのカップリングにより決まっている、という明確な理論結果を得た。

この固体ヘリウム3という系は単純そうに思えるが量子効果が強い一方で原子間相互作用も複雑で理解が難しいので、研究の蓄積が少なく、比較的地味な研究対象であった。そのため、現象論的な研究に留まりがちな系である。こういった地味な対象を題材として選び、スピン波という微視的な自由度の寄与を詳しく考察し、それがもたらす固体の密度変化への寄与を検討し、実験との一致につながる理論を仕上げたことは、理論研究として独創性の高いものと評価できる。

以上により、本論文は博士（理学）の学位論文として十分に価値あるものと判断し、論文内容とそれに関連した口頭試問の結果、合格として認めたものである。