

氏名	やま ぐち ま すみ 山 口 真 澄
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2586 号
学位授与の日付	平成 15 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	理学研究科物理学・宇宙物理学専攻
学位論文題目	核整列固体 ^3He -U2D2 相における核スピン弾性定数の決定と超音波減衰機構の研究
論文調査委員	(主査) 教授 水崎隆雄 教授 大見哲巨 教授 藪崎 努

論 文 内 容 の 要 旨

35気圧以上の加圧下で存在する固体 ^3He は量子固体といわれ、量子効果によって結晶中で ^3He 原子の波動関数が重なり合い、原子が 10^{-7} 秒に 1 回ぐらいの割合で相互に位置を交換している。その結果、核スピン間に大きな交換相互作用が働き、融解圧下の固体 ^3He では $T_N=0.93$ mK 以下の超低温で核スピンの整列する。約 4 KG 以下の低磁場下では U2D2 といわれる一軸異方性を持つ反強磁性磁気構造、4 KG 以上の高磁場下では Normal-Canted 反強磁性磁気構造が出現する。交換相互作用は原子間距離に強く依存するので、核スピン系と格子系は強く結合している。従って、超音波によって格子を変形させると核スピン系が変化するので、超音波は核整列秩序状態の詳細を調べる上で極めて有力な手段である。

本研究は融解曲線上の核整列 U2D2 固体 ^3He において超音波物性（音速と減衰係数）を測定した。核整列固体 ^3He の超音波測定には磁氣的に単磁区からなる比較的大きな単結晶（数 mm 角）を作り、その大きな試料をサブ mK の超低温に冷却することが必要である。種結晶は多磁区結晶であるが、それを細長い試料室の中で成長させると、単磁区結晶固体 ^3He が出来る。良質試料では内部熱伝導が良く、それを超流動 ^3He に熱接触させると固体と液体の界面熱抵抗が小さいので固体の温度をサブ mK の超低温まで冷却することができる。このようにして作った種々の結晶方位を持つ約 15 個の単磁区 U2D2 固体 ^3He の試料に対して縦波と横波の超音波で、周波数は 3 MHz から 50 MHz、 $T/T_N=0.45$ から 1.0 の温度域で、音速 ($\Delta v/v$ で 10^{-5} の分解能) と超音波の減衰係数を測定した。結晶の温度とその結晶の方位は NMR を同時に行って決定した。

1) 音速の温度変化：

音速の周波数依存性はなく、音速の温度変化は縦波、横波ともに T^4 に比例した。サブ mK の温度域ではファノンによる音速の温度変化はないので、 T^4 に比例した温度変化は核スピンからの寄与である。融解圧曲線に沿った測定であるので、固体試料の密度が温度とともに変化するのでその補正（約 10%）を行い、核スピンの寄与からくる音速変化を求めた。結晶構造は bcc であるが、低磁場核整列固体 ^3He は 1 軸性異方性を持つ磁気構造を持ち、磁氣的には正方晶である。音速の異方性から正方晶に対応する核スピンの寄与する弾性テンソルの 6 つの定数を決定した。 $C_{11}=3.4$, $C_{33}=7.4$, $C_{12}=4.7$, $C_{13}=8.8$, $C_{44}=2.5$, $C_{66}=2.9x(T/T_N)^4[10^4 \text{ g/cm}^2]$ であった。大きさは $T \sim T_N$ においても、格子の寄与の 10^4 程度である。固体 ^3He の核磁性で用いられている 2 体、3 体、4 体交換を取り入れた多体交換相互作用モデルを用いて核スピンの寄与した弾性定数テンソルと解析し、各々の交換相互作用のグルナイゼン定数を推定した。今後、固体 ^3He の核磁性、特に波動関数の重なりから来る多重交換相互作用モデルの詳細な検証を行う上で重要なデータになるであろう。

2) 超音波減衰定数の測定：減衰は比較的小さく、低周波（例えば 7.5 MHz の縦波）においては超音波のエコーが 100 個程観測される。超音波減衰率 α は温度と周波数に強く依存し、 $\alpha \propto f^n \cdot T^m$ (f は周波数) であり、 $n=2 \sim 3$, $m=8 \sim 10$ である。また、減衰係数の結晶方位依存性に関しては、縦波においては方位依存性は弱く、ほぼ等方的であった。横波においては、減衰に異方性があり、磁気異方性軸と超音波伝搬方向が平行の場合のほうが、垂直方向よりも減衰係数が大きかった。

た。超音波減衰機構に核スピン（マグノン）が関与していることは確かであるが、核スピンによる超音波減衰機構を議論した理論的なモデルがなく、マグノン—ファノン結合による機構か、格子欠陥や磁気欠陥を通したマグノン散乱が減衰機構になっているのか結論づけられない。

論文審査の結果の要旨

固体 ^3He の核磁性は、大きな量子効果による ^3He の核スピン間の大きな交換相互作用に起因している。固体 ^3He の核磁性は、理論的にも交換相互作用が第一原理から計算されており、また良質の試料が得られることや高精度で良く制御された実験が可能であることから、磁性の基礎研究として重要な位置を占めている。今までに核整列固体 ^3He の磁性研究に関して多彩な磁気的性質の研究が行われて来た。融解圧下の固体 ^3He では低磁場下（4 KG 以下）では $T_N=0.93\text{ mK}$ で U2D2 相と言われる反強磁性核整列状態に、高磁場下では Normal-Canted 反強磁性核整列状態に核スピンの整列する。

交換相互作用は原子間距離に強く依存するので、核スピン系と格子系（超音波）は強く結合していることに注目して、本論文以前に超音波の音速測定が行われて、超音波の音速に核スピンの寄与していることが示された。本論文では以前の超音波の実験を進展させて、音速の測定精度を向上させ ($\Delta v/v=10^{-5}$)、周波数域を 5 MHz から 50 MHz の広い範囲に拡張し、縦波と横波を同時に観測し、15個の良質の単磁区単結晶試料の結晶方位に対して音速と減衰率を系統的に調べたものである。

本研究は融解曲線上の核整列 U2D2 固体 ^3He において超音波物性（音速と減衰係数）を測定した。磁気的に単磁区からなる単結晶試料を、種結晶を細長い試料室の中で成長させることにより作成した。 $T/T_N=0.45$ から 1.0 の温度域で、音速と超音波の減衰係数を測定した。核整列固体の音速の温度変化がサブ mK の温度域では縦波、横波ともに T^4 に比例することから、核スピンの寄与からくる音速変化を求めた。低磁場核整列固体 ^3He は 1 軸性異方性を持つ正方晶であることから、音速の方位依存性から正方晶に対応する核スピンの寄与する弾性テンソルの 6 つの定数を決定した。 $C_{11}=3.4$, $C_{33}=7.4$, $C_{12}=4.7$, $C_{13}=8.8$, $C_{44}=2.5$, $C_{66}=2.9x(T/T_N)^4[10^4\text{ g/cms}^2]$ であった。正方晶の核スピン弾性テンソルの決定は初めてのものであり、弾性テンソルの解析から超音波の種々の変位に対する交換相互作用のグルナイゼン定数は初めて測定された物理量であり、磁性研究において重要である。

超音波減衰率 α は低周波数域においては減衰は比較的小さく、本論文で 50 MHz 域にまで測定域を拡張することによって初めて測定された。 α は温度と周波数に強く依存し、 $\alpha \propto f^n \cdot T^m$ (f は周波数) であり、 $n=2\sim 3$, $m=8\sim 10$ である。核整列固体において超音波減衰機構に核スピン（マグノン）が関与していること示した初めての実験結果である。核スピンによる超音波減衰機構を議論した理論的なモデルがなく減衰機構を決定するに至っていないが、本実験結果は今後重要な問題を提起した。

これらの研究成果により、核整列固体 ^3He の超音波物性（音速と減衰率の測定）に関する本論文は博士（理学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

尚、本論文に報告された研究業績を中心に、参考論文の内容ならびに、これらに関連した研究分野について口頭試問を行った結果、合格と認めた。