

氏 名	平 良 豊 ひら よし ゆたか
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理 博 第 530 号
学位授与の日付	昭 和 53 年 7 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 5 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 物 理 学 第 一 専 攻
学位論文題目	NMR による He^3 - He^4 混合量子固体中の He^3 - He^3 と He^3 - He^4 トンネリング運動の研究

論文調査委員 (主 査) 教 授 端 恒 夫 教 授 富 田 和 久 教 授 恒 藤 敏 彦

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、 He^3 - He^4 混合体中での He^3 核スピン緩和時間を約 0.5 K の温度で測定し、このような量子固体における He^3 - He^3 トンネリング運動と He^3 - He^4 トンネリング運動について調べたものである。

固体ヘリウム中のヘリウム原子は、質量が軽く且つ原子間の相互作用が弱いために大きな零点振動エネルギーを持っている。その原子の波動関数は各格子点で大きく広がって隣接原子間で重なり合い、原子間に直接の交換相互作用を生じさせる。これにより、ヘリウム原子は隣接原子とトンネリングによりその位置を交換しあい固体内を動き回ることができる。このような量子力学的なトンネリング運動は他の固体では殆んどみられない固体ヘリウムの特徴であって、固体ヘリウムは「量子固体」といわれている。

申請者は He^3 の核スピン緩和時間の測定によってこの固体ヘリウム中のヘリウム原子のトンネリング運動を調べている。対象とした固体ヘリウムの試料は hcp 相の固体 He^4 の中に僅かに He^3 が入った He^3 - He^4 混合固体である。その He^3 の濃度 (x_3) が 7.2% から 0.22% の間の 6 種類のものについて実験をおこなっている。又、モル体積は $19.0 \text{ cm}^3/\text{mole}$ から $20.9 \text{ cm}^3/\text{mole}$ 迄変化させている。このような試料に対して、スピン格子緩和時間 T_1 の温度変化を測定すると、融解点から約 1 K 迄の間は、 T_1 は熱励起空格子点の運動による典型的な温度変化を示しているが、1 K 以下の温度になると T_1 は温度に依存しなくなる。この領域では、熱励起空格子点の数が少なくなり T_1 はヘリウム原子のトンネリング運動によって決定されている。申請者は、このような「Exchange plateau 領域」(実際には、 He^3 クライオスタットを用いた 0.5 K) で、 He^3 の T_1 、スピン・スピン緩和時間 T_2 及び回転系におけるスピン格子緩和時間 $T_{1\rho}$ を測定し、その解析から双極子場の振動のスペクトル密度 $J(\omega)$ を広い周波数範囲にわたって決定し、それより He^3 - He^3 及び He^3 - He^4 トンネリング運動を論じている。

得られたスペクトル密度 $J(\omega)$ は、 He^3 - He^3 トンネリング運動からの寄与 $J(\omega)|_{3-3}$ と He^3 - He^4 トンネリング運動からの寄与 $J(\omega)|_{3-4}$ の和として表わされている。即ち

$$J(\omega) = c \cdot J(\omega)|_{3-4} + (1-c)J(\omega)|_{3-3}$$

である。ここで、 $c=(1-x_3)^{12}$ で、これはある特定の He^3 に着目したとき、それが最隣接に1つも He^3 原子を持たない確率である。 $J(\omega)|_{3-3}$ については、その関数形は純粋固体 He^3 の場合と同じモディファイされたガウス型であり、そのトンネリング周波数も純粋固体 He^3 の場合と同じ値であった。 $J(\omega)|_{3-4}$ については、その関数形はガウス型ではなくて、 He^3 原子が次々と格子点を酔歩的に動きまわるとして計算された Torrey 関数で表わされることを示した。そして、この Torrey 関数の中に現われる相関時間 τ_c (或いは、相関周波数 $1/\tau_c$) を $T_{1\rho}$ の高周波磁場強度依存性より正確に決定した。このようにして求められた相関周波数 $1/\tau_c$ は、純粋のトンネリング運動のみで期待される He^3 - He^4 トンネリング周波数に比べて約2桁程小さい値であった。これらは、 He^3 - He^3 原子間に長距離弾性的な相互作用が働いており、このために固有のトンネリング運動が抑圧されているとする「相互作用モデル」で説明されることを示した。更に、この相関周波数の分子容及び He^3 濃度依存性を測定し、これらは上記「相互作用モデル」に基いて計算された Landisman の理論と一致することを見出した。最後に、 T_1 、 T_2 、 $T_{1\rho}$ 等の濃度依存性より、「相互作用モデル」の適用限界を調べ、 He^3 濃度が0.3%以下の試料に対しては新しい緩和機構の必要性を示唆している。

参考論文1は、 He^3 - He^4 混合液中の He^3 のスピン拡散係数の温度変化を測定し、その解析から混合液の超流動状態におけるロトン・ギャップ・エネルギーの温度変化を論じたもの、参考論文2は、 He^3 - He^4 混合固体中の He^3 の T_1 の温度変化を融解点近傍で測定し、熱励起空格子点と融解との関連を論じたもの、参考論文3は、低温実験の基礎となるヘリウム温度域での電子回路について概説であり、参考論文4は、本論文の基礎となった固体ヘリウム中の $T_{1\rho}$ 測定に関する報告である。

論文審査の結果の要旨

ヘリウム原子は質量が小さく、原子間の相互作用が極めて弱く、零点振動が大きいため、約25気圧の下で初めて固体となる。又僅かの圧力の変化でその分子容を大巾に変化させることができる。固体ヘリウム内においては、ヘリウム原子は量子力学的なトンネリング運動によってその位置を交換しあっており、このため固体ヘリウムは他の固体とは異った特異な性質を有し、「量子固体」と呼ばれ多くの研究者の興味を集めている。

申請者は、この固体ヘリウム中のヘリウム原子のトンネリング運動を He^3 NMR 緩和時間の測定によって調べている。一般に、NMR 緩和時間の測定は原子の運動についての知見を得る最もよい方法の一つであり、既に純粋固体 He^3 中の He^3 - He^3 トンネリング運動については此の種の研究は多くなされているが、 He^3 - He^4 混合固体に対しては、未だ研究の数は少なく、特に、精密な定量的研究は皆無の状態である。

申請者は、hcp 相の固体 He^4 の中に僅かに He^3 が入った He^3 - He^4 混合固体について、スピン格子緩和時間 T_1 の周波数依存性のみならず、回転系におけるスピン格子緩和時間 $T_{1\rho}$ の高周波磁場強度依存性を調べて、双極子場の振動のスペクトル密度 $J(\omega)$ を広い周波数範囲 ($10^3/\text{秒}$ から $10^7/\text{秒}$) にわたって求めている。得られたスペクトル密度は He^3 - He^3 トンネリング運動からの寄与と He^3 - He^4 トンネリング運動からの寄与に分けられ、その各々のスペクトル密度の関数形が決定されている。特に、 He^3 - He^4 ト

トンネリング運動については、その双極子場の振動のスペクトル密度が、 He^3 原子が次々と格子点を酔歩的に動きまわるとして計算された Torrey 関数によって表わされることを示し、且つその相関時間 (τ_c) を正確に決定している。更に、この相関時間の分子容及び He^3 濃度依存性をも測定し、上記の結果は、 He^3 - He^3 間の長距離弾性的相互作用のもとで抑圧された He^3 - He^4 トンネリング運動によって生じているとする所謂「相互作用モデル」によって説明されるという興味深い結論を得ている。又、この「相互作用モデル」の適用範囲が He^3 濃度 0.3%以上であることを確かめている。

一般に相関時間の長い遅い運動の研究には $T_{1\rho}$ の測定が有効であることはよく知られているが、固体ヘリウムに対して $T_{1\rho}$ の測定を行ない、これより He 原子のトンネリング運動に関する知見を得たのは申請者が最初である。本論文はこれらの結果と T_1 の測定結果を総合して、 He^3 - He^4 量子固体中の He^3 - He^3 及び He^3 - He^4 トンネリング運動に関して明確な定量的結論を得たもので、極低温物理学、固体物理学の分野の発展に貴重な寄与をなしたものと言える。

参考論文は、本論文の基礎となる液体及び固体ヘリウムの NMR 及び極低温実験技術に関するもので、いずれも価値のあるものである。

よって、本論文は理学博士の学位論文として価値あるものと認める。