

氏名	いし かわ おさ む 石 川 修 六
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理 博 第 1148 号
学位授与の日付	平 成 元 年 1 月 23 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	平 行 平 板 中 の 超 流 動 ヘ リ ウ ム - 3 の B 相 の ス ピ ン 動 力 学

(主 査)  
論文調査委員 教授 恒藤敏彦 教授 端 恒夫 教授 遠藤裕久

### 論 文 内 容 の 要 旨

本申請論文は、狭い間隔を持った平行平板の中に閉じ込められた超流動ヘリウム-3のB相のスピンダイナミックスに関するものである。

液体  $^3\text{He}$  の超流動状態は、フェルミ粒子である  $^3\text{He}$  原子が  $^3\text{P}$  のクーパー対を作って、いわゆる BCS 状態に対凝縮した状態である。この中で、B-相というのは、 $^3\text{P}$  のクーパー対についてその全スピン角運動量と全軌道角運動量が反平行の状態から出発して、そのどちらか一方を単位ベクトル、 $\mathbf{n}$ 、のまわりに角度、 $\theta$ 、だけ回転したすべての状態を言う。超流動  $^3\text{He}$  の B 相の秩序パラメーターを記述するパラメーターとしてこの  $(\mathbf{n}, \theta)$  が用いられる。凝縮エネルギーだけ考えれば、すべての  $(\mathbf{n}, \theta)$  についてそのエネルギーは縮退している。クーパー対間の双極子-双極子相互作用を考慮すれば、 $\theta$  は Leggett 角と呼ばれる  $\theta_L=104^\circ$  に固定されるが、 $\mathbf{n}$  の方向は、もっと小さい異方性エネルギーにより定まる。今、壁があり、その壁に平行に磁場  $\mathbf{H}_\theta$  がかけられている場合には  $\mathbf{n}$  は壁の所で  $\mathbf{H}_\theta$  と  $63^\circ$  の角度をなす。このような秩序パラメーターの空間分布を秩序パラメーターのテクスチャーと呼ぶ。申請者は、テクスチャーを制御するため 0.35 mm の間隔をもった一枚だけの平行平板の間に液体ヘリウムを閉じ込め、壁に平行に磁場をかけた。このなかでは、 $\mathbf{n}$  は一様で  $\mathbf{H}_\theta$  と  $63^\circ$  の角をなしていると考えられる。これは非 Leggett 配置と呼んでいる。 $(\mathbf{n}$  と  $\mathbf{H}_\theta$  が平行の配置は Leggett 配置と呼ばれている。) このようにして、申請者はよく制御された秩序パラメーターのテクスチャーのもとで超流動  $^3\text{He}$  の B 相でのスピンダイナミックスとスピン緩和に関する実験を行い、現在までに得られている理論との比較を行っている。

まず cwNMR において、非 Leggett 配置に対応して、ラーマー周波数から離れた所に一本だけの共鳴線を観測し、種々の外部磁場のもとでその幅を測定し、それが外部磁場の 2 乗に逆比例することを見だしている。これは、超流動  $^3\text{He}$  のスピンダイナミックスの基礎方程式として提唱されている Leggett-Takagi の方程式 (LT 方程式) の予言するところである。従って、この解析より LT 方程式に含まれる緩和パラメーターを決定している。

次に、パルス NMR の実験を行っている。強さ  $\beta_p$  の共鳴する高周波パルスを加え、その後続く FID 信号の周波数の時間変化を追跡し、その結果を LT 方程式の数値解析の結果と比較し、よい一致を得ている。この際、緩和パラメーターとして上記 cwNMR で得たものを用いている。このことは、スピン系が平衡状態から大きく外れた状態でも LT 方程式が成立していること、又上で求めた緩和パラメーターの値が妥当であることを示している。

実験の結果も、LT 方程式の数値積分の結果も示している所であるが、強さ  $\beta_p$  の十分大きいパルスを加えるとスピン系は Brinkman-Smith 状態 (BS 状態) といわれている安定状態に向かって緩和する。申請者は、2 パルス法 (第一の大きなパルスでスピン系を BS 状態に導き、第二の小さなパルス後の FID 信号の周波数でスピン系の状態をモニターする。) を用いて、BS 状態から初期の非 Leggett 配置への緩和過程を観測することに成功した。その結果、スピン系は BS 状態に沿ってゆっくりと Leggett 配置に向かって緩和していき、ある位置で BS 状態からはずれ急速に初期の非 Leggett 配置に向かって緩和した。理論的には、元の LT 方程式はこの緩和を説明していないが、大見・恒藤等により壁の表面磁気エネルギーに基づくトルクの項を LT 方程式に付け加えればこのような緩和が説明されることが示された。一般には、この結果はスピン系が空間的に一様ではなくなるので、定量的な解析は難しいが、申請者は上記表面磁気エネルギーによるトルクを平均して一様にならして LT 方程式を修正し、その数値解析により実験結果が説明されることを示した。

cwNMR の実験において、殆どの場合 1 本だけの共鳴線が観測されたが、時にはそれにサテライトが観測された。これは、平行平板の間では縮退した可能な  $\mathbf{n}$  ベクトルの方向が 4 つあり、このサテライトはこれらのドメイン構造によるものであることを示した。

### 論文審査の結果の要旨

2.5 mK 以下の超低温度において液体  $^3\text{He}$  は超流動状態になる。この超流動状態には、零磁場で 2 つの相があり、それぞれ A-相、B-相と呼ばれている。申請者の研究は、この超流動  $^3\text{He}$  の B-相に対して行われている。B-相の状態を指定するパラメーターは  $(\mathbf{n}, \theta)$  であるが、現在までの超流動  $^3\text{He}$  のスピンドYNAMIXS に関する多くの実験は核磁化  $\mathbf{S}$  と  $\mathbf{n}$  が平行で  $\mathbf{H}_\theta$  の方向を向いた状態、(Leggett 配置) に対してなされてきた。申請者は 0.35 mm の間隔をもった一枚だけの平行平板の間に液体  $^3\text{He}$  を閉じ込め、壁に平行に磁場  $\mathbf{H}_\theta$  をかけ、壁の所で  $\mathbf{n}$  を  $\mathbf{H}_\theta$  と  $63^\circ$  の角度をなす方向に向かせている。 $\mathbf{n}$  は空間的には healing length といわれる長さ程度で変化しうが、超流動  $^3\text{He}$ -B ではその長さは 0.1 mm 程度と充分長い。このため、申請者の実験に於ては、 $\mathbf{n}$  は一様で  $\mathbf{H}_\theta$  と  $63^\circ$  の角をなしている。このように、非 Leggett 配置の一様でよく制御された  $(\mathbf{n}, \theta)$  の状態で実験していることが申請者の研究の大きな特色の一つとなっている。

実験結果においても、一様な非 Leggett 配置に対応したラーマー周波数からずれた一本の NMR 共鳴線を検出している。その共鳴線の幅から LT 方程式における緩和パラメーターを決定している。超流動  $^3\text{He}$  のスピンドYNAMIXS とその緩和過程を記述する基礎方程式は Leggett-Takagi の方程式 (LT 方程式) であると考えられている。現在までに行われてきた Leggett 配置での実験においては LT 方程式に従えば

その共鳴線の幅は零であり、LT 方程式に含まれる緩和パラメーターを決定することはできない。他の実験によるその値の報告はあったが、申請者は非 Leggett 配置での NMR の幅の磁場変化が LT 方程式に従うことを示し、緩和パラメーターの値を広い温度範囲にわたって初めて測定したものである。

次に、申請者はパルス後の FID 信号の周波数変化を測定し LT 方程式で説明されることを示しているが、このような実験結果は一枚だけの平行平板の中でよく制御された ( $\mathbf{n}$ ,  $\theta$ ) のもとで初めて得られた実験結果である。

更に、申請者は BS 状態から最初の非 Leggett 配置への緩和過程を測定しているが、このような測定は申請者が初めて行ったものである。所で、バルクの LT 方程式に従えば一度 BS 状態に入ったスピンはもはや全く緩和しない。そこで、LT 方程式に表面磁気エネルギーによるトルクの項を付け加えて修正すれば、実験結果を説明できることを示している。最後に、NMR のサテライト信号が試料中でのドメイン構造に依るものであることを示しているが、この結果も、超流動  $^3\text{He-B}$  相中での  $\mathbf{n}$  のテクスチャーの研究上興味深いものである。

参考論文はいずれも超低温での固体および液体ヘリウムの NMR に関するものであって意義あるものである。

以上を要するに、1 枚の平行平板の中に超流動  $^3\text{He-B}$  を閉じ込め、よく制御された秩序パラメーターのもとで、スピンドYNAMIX と緩和過程を調べたもので、量子凝縮相の研究に重要な貢献をなしたものと言える。

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。

なお、主論文及び参考論文に報告されている研究業績を中心とし、これに関連した研究分野について試問した結果、合格と認めた。