

氏 名	いし ぐろ りょう すけ 石 黒 亮 輔
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2576 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	円筒容器内の回転超流動ヘリウム 3 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

超流動 He の流体の速度場は巨視的な波動関数（オーダーパラメーター）によって記述されるところに特徴がある。その結果、トポロジカルな欠陥として明確に定義された渦度が量子化された量子渦が存在するなど、超流動 He の流体力学は巨視的量子凝縮系特有の性質によって支配される。また流体の運動には波動関数のコヒーレンス長にわたる空間の平均化操作が働き、流体としての自由度も通常の流体に比べて強い拘束をうけ、理論的な取り扱いも厳密に出来る所にもう一つの特徴がある。本論文では流体として最もクリーンな流れである回転する超流動 ^3He の流体力学の研究を行った。1) この実験に必要な回転する超低温核断熱消磁冷凍機の建設と、2) 円筒容器中の超流動 ^3He のオーダーパラメーターの作る織目構造 (texture) の制御と回転の影響、量子渦生成・消滅の研究を行った。

1) 回転する超低温冷凍機の開発：本研究においては、サブ mK 温度域生成のための回転超低温冷凍機の開発は不可欠のものである。東京大学物性研との共同研究を行い、久保田等が開発したジュール・トムソン効果を利用した 1K ポットの新しい希釈冷凍機に、回転下で運転出来る核断熱冷凍機を京大で制作し、物性研で両者を結合させ回転超低温冷凍機を完成させた。この冷凍機は、地球磁場中での回転による渦電流加熱を防ぐために冷凍機的设计上の工夫をし、地磁気キャンセル・システムを用いた。また、測定装置を回転冷凍機上に載せることが必要であり、小型・一体化した cw-NMR や核断熱消磁用磁場の影響を避けるため超伝導で磁気シールドした高均一度 NMR マグネットの制作、回転系と研究室を結ぶデータ転送システムの構築などを行った。回転する超低温冷凍機は、毎秒 1 回転の世界最高速度で回転した状態でサブ mK 温度を達成し、1 回の断熱消磁を行うことにより回転下で連続して超低温度を 1 ヶ月維持出来る高性能のものである。回転断熱消磁冷凍機は日本では最初のものであり、世界でも運転中のものは 3 ヶ所である。

2) 回転下の円筒中の超流動 ^3He -A 相の実験：超流動 ^3He には A 相と B 相の 2 種類（磁場中では A1 相がある）があるが、本論文では圧力 31.5 気圧下の異方的超流動である A 相を中心に研究した。測定した円筒容器の大きさは、A 相のオーダーパラメーターの空間的变化のスケールである双極子コヒーレンス長（約 $10\mu\text{m}$ ）の数倍程度とし、 $0.1\text{mm}\Phi$ と $0.2\text{mm}\Phi$ の 2 種類（各々の円筒試料を約 150 本束ねたもの）を用意した。回転下の超流動 ^3He の観測は cw-NMR で行った。

$0.1\text{mm}\Phi$ の試料においては冷却条件によって 3 種類の異なる texture（常流動から A 相へ冷却した場合、B 相から A 相にした場合、熱流下や熱パルスを与えたときに出来る texture）を見い出した。前 2 者の texture は、熱パルスや振動によって 3 番目の texture（SA と呼ぶ）に転移することがあり、SA が最も安定な texture である。これらの texture は回転に対する応答が異なり、特に SA texture の回転に対する応答は回転方向に対して非対称であった。このことは、SA texture が回転軸方向に巨視的角運動量をもつ構造（例えば、Mermin-Ho texture）であることを示唆するものである。

$0.2\text{mm}\Phi$ の試料においても 3 種類の texture が観測された。この 3 種類の texture は超流動転移点 T_c を通過する時の冷却条件によって制御される。冷却速度が早い場合 ($100\mu\text{K}/\text{min}$) に出現する texture と、遅い場合 ($10\mu\text{K}/\text{min}$) には回転方向と磁場の方向の組み合わせによって出現する 2 種類の texture が見い出された。 $0.2\text{mm}\Phi$ の試料の 3 種類の texture に

において回転速度を上げて行くと、量子渦の生成が観測された。生成後に回転を減速させていくと渦の消滅が観測されるが、生成と消滅の臨界速度が異なり、大きなヒステリシスを持つ。回転に対する応答はそれぞれの texture によって異なり、特に徐冷時に出現する磁場と回転の相互の組み合わせで出現する 2 種類の texture においては、1 つは生成と消滅が回転方向に対して対称であるのに対して、他の texture では生成の臨界速度が回転の向きに対して異なり、非対称性を示した。本論文では、渦の生成・消滅が円筒容器中の回転超流動の流体的安定性の問題と関連させて議論し、生成の臨界速度は渦状態が流体的に安定になる速度、消滅は円筒容器の中心に渦を拘束するエネルギー障壁が消滅する角速度として説明している。但し、これらの計算には超流動 ^3He 固有の大きなソフトコアをもつ渦構造は取り入れられているが、texture の影響は考慮されていない。臨界速度の大きさ、温度依存性、 T_c 通過時の渦生成の考察などから、上記モデルは半定量的に実験結果を説明している。

論文審査の結果の要旨

本論文は回転する超流動 ^3He の流体力学の研究を行っているが、業績を次の 2 つの項目に大別することができる。1) この実験に必要な回転する超低温核断熱消磁冷凍機(1)の制作と最適化の研究と、2) 回転超低温冷凍機を用いた円筒容器中の超流動 ^3He のオーダーパラメーターの作る織目構造(texture)の制御と回転の影響そして、量子渦生成・消滅の研究である。

1) 回転する超低温冷凍機の開発: 本研究においては、サブ mK 温度域生成のための回転超低温冷凍機(2)の開発は不可欠のものである。この研究の初期の段階は京大とカリフォルニア大学—バークレー校の間で日米科学協力事業として始まったものであり、バークレーの回転冷凍機を使って行われた。その後日本での回転超低温冷凍機建設の気運がたかまり、京大と東京大学物性研との共同研究として、久保田等が開発したジュール・トムソン効果を利用した 1K ボットのない希釈冷凍機に、回転下で運転出来る核断熱冷凍機を京大で制作し、物性研で両者を結合させ回転超低温冷凍機を完成させた。石黒は計画の中心的役割を果たし、本論文に成果を纏めている。この回転する超低温冷凍機は、日本で唯一のものであり、毎秒 1 回転の世界最高速度で回転した状態でサブ mK 温度を達成し、それを 1 回の断熱消磁を行うことにより回転下で連続して 1 ヶ月維持出来る。世界でも運転中のものは 3 ヶ所であるが、本装置は世界最高性能を持つものである。また回転装置に測定器を全部載せて高感度測定を行うシステムの開発を行った。今後の日本はもとより世界の超低温における回転ヘリウムの研究に大きく貢献する成果である。

2) 回転下の円筒中の超流動 ^3He -A 相の実験: 本論文では回転する異方的超流動である A 相を中心に研究が行われた。従来から回転超流動 ^3He の研究は行われているが、全てバルクの超流動を対象に行われたものであり、試料室の大きさを A 相のオーダーパラメーター空間的变化のスケールである双極子コヒレンス長(約 $10\mu\text{m}$)の数倍程度に選ぶことにより、texture を制御した状態で回転下の超流動 ^3He の実験を行なっている事が、本論文の特徴である。

$0.1\text{mm}\Phi$ の試料においては冷却条件によって 3 種類の異なる texture を見つけた。また各々の texture の回転応答を調べた。特に 3 種類の内の 1 つの texture の回転応答の結果より、この texture は回転軸方向に巨視的角運動量をもつ構造(例えば、Mermin-Ho texture)であることを示唆しているのは、興味深い結果である。

$0.2\text{mm}\Phi$ の試料においても冷却条件が異なると 3 種類の texture が見い出された。その内の 2 種類は共に回転下の磁場中で T_c を通過させると生成される texture であるが、回転軸(方向)と磁場の相対的な方向によって制御されるところが興味深い。各々の texture において回転速度を上げて行くと、量子渦の生成が観測された。生成後に回転数を減速させていくと渦の消滅が観測されるが、生成と消滅の臨界速度が異なり、大きなヒステリシスを持つ。回転に対する応答はそれぞれの texture によって異なる。本論文では、渦の生成・消滅が円筒容器中の回転超流動の流体的安定性の問題と関連させて議論しているが、生成の臨界速度は渦状態が流体的に安定になる速度、消滅は円筒容器の中心に渦を拘束するエネルギー障壁が消滅する速度として説明されている。但し、これらの計算には超流動 ^3He 固有の大きなソフトコアをもつ渦構造は取り入れられているが、texture の影響は考慮されていない。臨界速度の大きさ、温度依存性、 T_c 通過時の渦生成の考察などから、上記モデルは半定量的に実験結果を説明している。

これらの実験結果は texture を制御した状態での量子流体力学の初めての実験であり、重要な成果である。実験結果の詳細な解析には texture の構造とそれを考慮した流体力学の理論的な考察が必要である。本論文が今後の超流動の実験的、理

論的研究に与えたインパクトは大きい。

これら 1), 2) の研究成果により, 回転超流動 ^3He の量子流体力学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。