

令和元年6月7日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05169

研究課題名(和文) 回転冷凍機を用いた超流動 $^3\text{He-A}$ 相中の量子渦格子の観測研究課題名(英文) Study on Vortex Lattice in Superfluid $^3\text{He-A}$ phase with Rotating Cryostat

研究代表者

松原 明 (Akira, Matsubara)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：00229519

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では回転下における異方的超流動 $^3\text{He-A}$ 相に生じる量子渦を観測し、その構造や散逸メカニズム等についての知見を得たいと考えている。今回、回転希釈冷凍機測定系の構築を行い、毎秒1回転下において希釈冷凍機として稼働できる状態を達成した。無回転時の最低到達温度は約9mKで、冷凍能力は100mKにおいて100 μW であった。回転下では最低温度が上昇したが、1回転/sで13mK程度であり、核断熱消磁冷却冷凍機として使用可能であることが確認できた。回転冷凍機評価のための第2音波測定の予備実験を行い、音速と減衰係数の温度依存性を得た。今後、回転冷凍機上で測定を行い、回転の効果を調べたいと考えている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高磁場超低温回転冷凍機へ向けた回転冷凍機の完成は未だ解明されていない超流動ヘリウム3における渦のダイナミクスの研究の大きな足がかりとなる。超流動ヘリウム3の渦のダイナミクスの理解が進めば、量子流体全体の統一的な理解へとつながると期待される。これにより、自然を構成する物質の理解をより一層深めていくことにつながる。

研究成果の概要(英文)：In this research, we planned to observe the quantum vortices and the vortex lattices generated in the anisotropic superfluid $^3\text{He-A}$ phase under rotation. We aimed to study the structure and dissipation mechanism of the quantum vortices. In this study, we constructed a rotary dilution refrigerator measurement system, and achieved the condition that it could be operated as a dilution refrigerator under one rotation per second. The lowest temperature reached without rotation was about 9 mK, the circulating amount of $^3\text{He-}^4\text{He}$ mixed gas was 200 $\mu\text{mol/s}$, and the freezing capacity was 100 μW at 100 mK. Although the minimum temperature rises under rotation, around 13 mK, and it has been confirmed that it can be used as a nuclear adiabatic demagnetization cooling refrigerator. Moreover, the preliminary experiment of the second sound wave measurement for rotary refrigerator evaluation was done, and the temperature dependence of the sound velocity and the attenuation coefficient could be obtained.

研究分野：低温物理学

キーワード：超流動ヘリウム3 量子渦 第2音波 NMR MRI

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超流動 ^3He は巨視的凝縮系であり、その状態は巨視的な波動関数(オーダーパラメータ)によって記述される。超流動 ^3He のような超流体を対象とした流体力学(量子流体力学)では、流体の速度が巨視的波動関数のグラディエントで表され、トポロジカルな欠陥としての量子渦が存在することや流れの量子干渉効果など、大変興味深い研究対象となっている。近年、絶対零度近傍の常流動成分を持たない完全流体での渦の切りちがい機構や渦の生成・消滅機構の問題など、量子流体力学の問題に留まらず宇宙論とも関連する興味深い問題(Kibble-Zurik機構)として大きな注目を集めている。

これまで主に量子流体力学で研究の対象となってきた系は、超流動 ^4He やアルカリ原子気体、 s 波超伝導体などであり、生じる量子渦は渦芯で超流体の密度がゼロとなるsingularvortex(SV)が主流である。そこでは、回転流体中にできる渦や乱流中に発生する渦のダイナミクスの研究などが数多く行われている。一方、超流動 ^3He は p 波三重項超流動であり、オーダーパラメータが内部自由度を持つため多彩な超流動状態が可能であり、そこに生じる量子渦も多彩な渦構造が可能となっている。超流動 ^3He の静的な性質についてはこれまでも精密で広範な研究がある一方で、量子流体としての超流動 ^3He の研究はあまり進んでいない。特に、超流動 ^3He の量子渦に関しては、その構造やダイナミクスに関してまだ解明されていない点が多い。

2. 研究の目的

我々のグループは以前、東京大学物性研究所と共同で、回転する超低温核断熱消磁冷凍機を建設し、1回転/秒の高速回転下で ^3He を $100\ \mu\text{K}$ に冷却することに成功した。その装置を用いて、回転超流動 ^3He 中に生じる量子渦のダイナミクスについてNMRを用いた研究を行ってきた。本研究では、上記の超低温回転冷凍機を発展させ、高均一度・高磁場中で測定ができる回転核断熱冷凍機を製作し、強磁場と超低温冷凍機を組み合わせた回転多重極限環境を構築することで、回転超流動 ^3He 研究に新しい展開を切り開くことを目的としている。

本研究では、上記の高均一度・高磁場回転核断熱冷凍機に我々の研究室が開発した超低温磁気共鳴映像法(MRI)を組み合わせ、超流動 ^3He -A相の量子渦が回転下で作る渦格子の直接観測を目指す。超流動 ^3He -A相は一軸性の異方的超流動であり、渦中心で超流体密度がゼロとならない(特異点とならない)non-singularな渦が存在するが、その動的な性質はまだはっきりとは解明されていない。我々は超低温核磁気共鳴映像法(MRI)を回転超流動 ^3He に応用し、量子渦系の生成の機構や、渦が流れから受ける力、渦のピン止め効果、渦格子の安定性などについての知見を得たいと考えている。

3. 研究の方法

本研究では、超流動 ^3He -A相の量子渦による渦格子の可視化を行うために、建設中の高均一度超伝導磁石を備えた回転核断熱消磁冷凍機を用い、超低温核磁気共鳴映像法(MRI)を用いた実験的を行う。MRIの測定器(NMRの測定器)は既存のパルスNMRの装置を用い、磁場勾配は専用のコイルを製作して超低温MRIを実現する。まず、回転する希釈冷凍機系のセットアップと、その冷凍能力の確認をおこない、外部からの熱侵入量の測定とその削減をおこなう。その上で回転冷凍機の評価を行うために第2音波の減衰係数の温度依存性を調べる。第2音波の減衰は量子渦との相互作用で変化するとされており、その測定からノイズや回転自体など、回転冷凍機の測定への評価を行う。その後、MRI測定の基礎となる物理量の測定などを経て、回転下での超流動 ^3He -A相のMRI測定を行う。また、測定結果の解析のためには理論によるバックアップが不可欠であり、解析のために必要に応じて理論的なシミュレーションを行う。

4. 研究成果

我々は、回転冷凍機システムと測定系の構築と試料セルの作成、テスト等を行うべく作業を行ってきた。一昨年度希釈冷凍機システムで真空ジャケットの漏れが、また ^3He - ^4He 混合ガス

循環系にトラブルが発生した。真空ジャケットの漏れに関しては In シールを用いた治具を製作して対処した。希釈冷凍機の循環系のトラブルは、回転冷凍機システムで回転と 3He ガス循環を両立させるための磁気シールユニットを通して、3He-4He 混合気体に 4He 気体が混入したためであった。幸い 3He ガスが減ることがなかったため、希釈冷凍機のシングルショット運転で分留作業を行い、過剰となった 4He ガスの引き抜き作業を行った。

これらの後、希釈冷凍機として稼働できる状態を達成した。無回転時の最低到達温度は約 9mK であり、希釈冷凍機として十分な性能を持つ。3He-4He 混合気体の循環量は $200 \mu\text{mol/s}$ 、冷凍能力は 100mK において $100 \mu\text{W}$ を達成した。これも希釈冷凍機として正常に動作していることを示している。図 1 にあるように、冷凍能力の温度依存性は高温寄りでは混合器 (Mixing Chamber) の温度の 2 次に比例しており、低温側での 2 次関数からのズレ具合から、混合器に対して約 $1 \mu\text{W}$ 程度の熱が侵入していることが判明した。

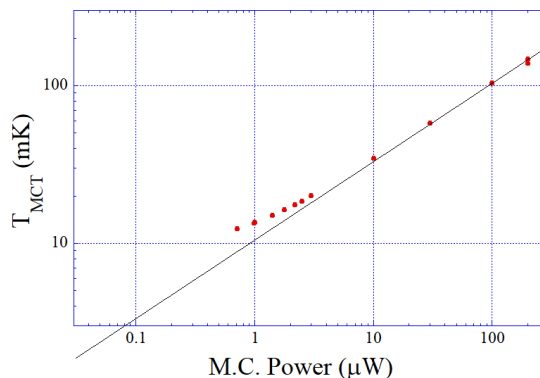


図 1 希釈冷凍機の冷凍能力

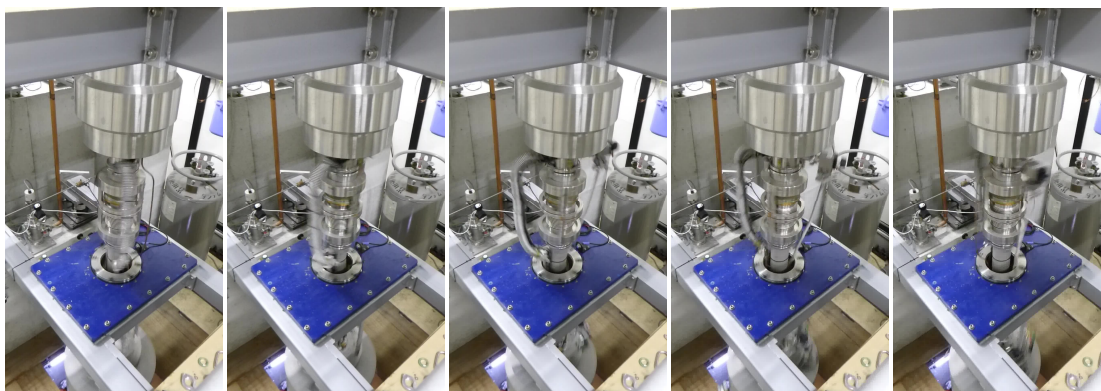


図 2 回転冷凍機の回転の様子 (左から 0.1 秒刻みで撮影)

その結果を踏まえ、回転下での希釈冷凍機としての性能の評価を行った。このシステムでは、交流サーボモーターを用いて希釈冷凍機本体と測定器の載った台を回転させている。希釈冷凍機に必須のガス制御系は非回転であり、回転とガス循環の両立のために磁気シールユニットを用いている。図 2 に回転の様子を示す。希釈冷凍機の回転テストでは、回転速度は無回転から毎秒 1 回転までの範囲で行った。その結果、回転時には回転系のサーボモーターのコントローラーからの

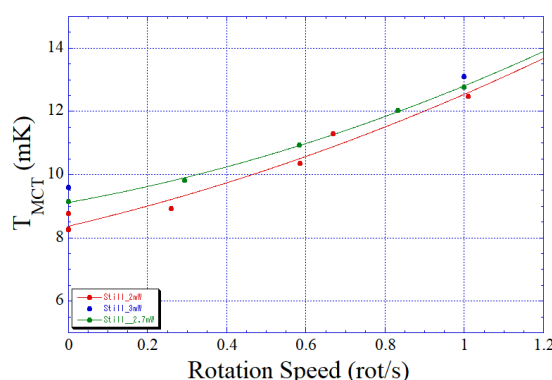


図 3 回転速度による最低温度の変化

ノイズによる影響が大きく、最低温度が約 30mK となった。これは低温部に希釈冷凍機の制御用ヒーターのラインを通して多大な熱が侵入したためであった。改善のため、回転コントローラー及び希釈冷凍機制御ヒーターのラインに強力なフィルターを入れ、発熱を抑えることに成功した。そのうえで希釈冷凍機に対する回転の影響を調べた結果、上記図 3 にあるように回転時には最低到達温度の上昇が見られたが、13mK 程度までで抑えることができた。回転時、無回転時の最低到達温度がいずれも 10mK 前後となったことから、無回転時に核断熱消磁冷却の予冷を行い、核断熱消磁冷却を開始後に希釈冷凍機を回転させれば問題なく冷却できることが判明し

た。これらにより、核断熱消磁可能な回転希釈冷凍機を完成させた。その上で核断熱消磁冷却用の核ステージの準備を開始した。

また、回転冷凍機の効果を確認するべく超流動 4He の第 2 音波の測定系を構築し、そのテストを行った。テストは 4He クライオスタットを用いた。当初、タイムオブフライト法を用いた音速の測定を試みたが、ノイズが多く十分な感度を得られなかった。そこで気柱共鳴法に切り替えた結果、基本波と複数の高調波で共鳴周波数と線幅の温度依存性を測定することができた。そこから、第 2 音波の音速と減衰係数の温度依存性を得ることができた。

図 4 に示すように、音速の温度依存性はほぼ先行研究の音速の測定結果と一致する結果が得られた。最低温度付近での振る舞いにずれがあるが、これは測定時に励起パワーの兼ね合いで試料セル内の温度が外部よりも高くなっていることを示唆している。

図 5 に示す減衰係数の温度依存性は、多少ばらつきが大きくなっているが、1.9 K 付近で最小値を取る結果となった。第 2 音波の減衰係数の変化は、熱伝導による減衰と、粘性による減衰の和と考えられるが、我々の結果は図中の直線で示した熱伝導による減衰の寄与を示す理論とよい一致を示した。このことから、第 2 音波の減衰は主に熱伝導によって生じることが

わかった。回転冷凍機でも同様の測定を行い、回転による影響を調べたいと考えている。

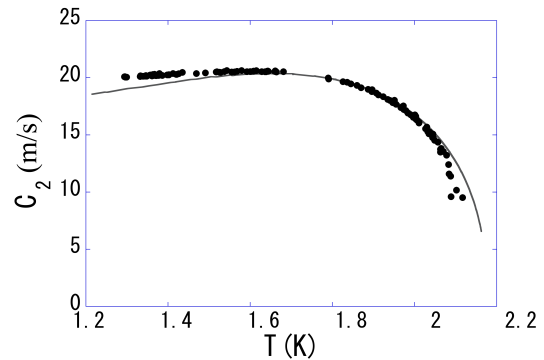


図 4 第 2 音波の音速の温度変化

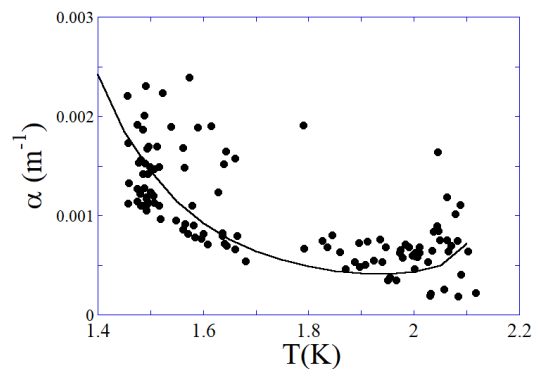


図 5 第 2 音波の減衰係数の温度変化

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：

取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：上野智弘
ローマ字氏名：TomohiroUeno
所属研究機関名：京都大学
部局名：医学研究科
職名：助教
研究者番号(8桁)：10379034

研究分担者氏名：高木丈夫
ローマ字氏名：TakeoTakagi
所属研究機関名：福井大学
部局名：工学研究科
職名：教授
研究者番号(8桁)：00206723

(2)研究協力者

研究協力者氏名：
ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。