

論文内容の要旨

論文題目 一本の回転細円筒容器中の超流動ヘリウム 3
(Superfluid ^3He in a rotating small cylinder)

氏名 泉名 健

ヘリウム原子は希ガスであるために原子間の van der Waals 引力が弱く、加えて、質量が小さいために零点振動のエネルギーが大きい。このため、常圧下では絶対零度まで固化せず、量子液体と呼ばれる状態が実現されている。ヘリウム原子の安定同位体の 1 つであるヘリウム 3 原子は、核スピン $1/2$ を持つ Fermi 粒子であり、約 1 K で Fermi 縮退する。さらに、冷却すると 2 mK 程度の超低温下で Cooper 対を形成し超流動状態となる。ただし、その Cooper 対の対称性は、従来の s 波状態とは異なり p 波スピン 3 重項状態であるので、超流動ヘリウム 3 の状態を記述する秩序変数は軌道部分とスピン部分の自由度を持つ。このように、秩序変数が自由度を持つので、破れる対称性の異なった複数の秩序相 (A 相, B 相, A1 相) が存在し、さらに、それぞれの秩序変数の中にも自由度が残るという「内部自由度のある超流動」が実現している。その内部自由度の存在により、超流動状態を記述する秩序変数が空間構造を持つことが可能になり、その空間構造は、織目構造 (texture) と呼ばれている。この織目構造は、磁場・境界条件・速度場などの外部変数によって制御可能であり、実に多彩な物理をまさにその言葉どおり織り成している。そして、この織目構造を核磁気共鳴 (NMR) によって直接観測することが可能であることも、この系の持つ大きな特徴である。

近年、「伝導電子系の超伝導」や「原子気体 BEC」などの分野で、超流動ヘリウム 3 と同じ p 波状態の探索・研究が盛んに行われている。こうした中で、超流動ヘリウム 3 は、極低温まで液体状態を保つので高純度化が容易であり、さらに、系を形成する原子自体が超

流体となる複雑なポテンシャルの影響を考えなくてよい、という利点を持つ。このように、超流動ヘリウム 3 は、最も精密な測定が可能な物質の 1 つであり、超伝導系・原子気体 BEC 系を含んだ p 波 Cooper 対の物性研究において、モデル物質となることが期待される。

こうした背景の中で、回転下における超流動ヘリウム 3 の振舞いに興味を持たれてきた。一般的に、超流動体に回転を加えるということは、超伝導体に磁場を印加することに対応する。超伝導体でフラクソイドが量子化されるのに対し、超流動体では、回転流に関連する「循環」とよばれる物理量が量子化され、量子渦が形成される。超流動ヘリウム 3-A 相では、その豊富な内部自由度を反映して、「特異芯を持たない多種類の量子渦」の存在が確認されている[1]。回転下における超流動ヘリウム 3-A 相の実験は、1981 年以降、Helsinki 工科大学、Manchester 大学、California 大学 Berkeley 校、東京大学物性研究所で行われてきた[1-4]。しかし、境界条件・磁場などの外場を用いて織目構造を制御した上での量子渦観測には、毎秒 1 回転程度の高回転が必要であり、研究可能な施設に限られるため、その報告例は少ない。細円筒容器内における回転下の超流動ヘリウム 3-A 相という対象では、以前に、石黒らが東京大学物性研究所において回転下核磁気共鳴測定を行い、円筒容器内に侵入する量子渦の観測に成功した[4]。しかし、彼らの測定では信号強度を増やすために、150 本の円筒容器を用いたため、各円筒容器内における現象のばらつきを排除することができず、いくつかの問題が残ってしまった[5]。

本論文は、制限空間を用いることによって織目構造 (texture) を制御し、その制御された織目構造の中に侵入する量子渦について研究した報告である。具体的には、世界最高回転角速度を持つ回転核断熱消磁冷凍機を用いて、直径 230 μm の 1 本の細円筒容器内における超流動ヘリウム 3-A 相に対して回転下核磁気共鳴測定を行った。1 本の円筒容器を用いることで、本当にただ 1 本の量子渦、織目構造を観測することが可能になる。しかし、その反面、サンプルの絶対量を減らすことにつながるため、信号強度確保のために、「サンプル充填率の高い測定セルの設計」、「測定精度の向上」が必須となる。

以上に留意したセル作成の結果、

- ・以前と変わらない信号強度を持つ ($S/N \sim 130$)
- ・円筒容器内のみを観測している
- ・円筒容器内に大きな温度差のない ($T < 10 \mu\text{K}$)

という測定セルを作成できた。なお、以上の点はすべて、本研究における核磁気共鳴測定によって確認した。また、これらと並行して、回転核断熱冷凍機の最高角速度の改良も行った。直径 200 μm 程度の円筒容器では、毎秒 2/3 回転程度の回転角速度で 1 本目の量子渦が侵入することが知られているので[4,5]、最高回転角速度を以前の毎秒 1 回転から毎秒 2 回転に改良することによって、3 本程度の量子渦の侵入が期待される。そこで、高速用の回転駆動サーボモーターを用い、回転機構を改良することによって、最高回転角速度を 2 倍に伸ばすことに成功した。

以上に示した回転冷凍機と測定セルを用いて、回転下核磁気共鳴測定を行った。その結

果，1本の円筒容器内に3本の量子渦が順番に侵入していく様子を観測することができた．
 図1に核磁気共鳴スペクトルの回転依存性を示す．縦軸は吸収強度、横軸は Larmor 周波数からの周波数シフトを表す．

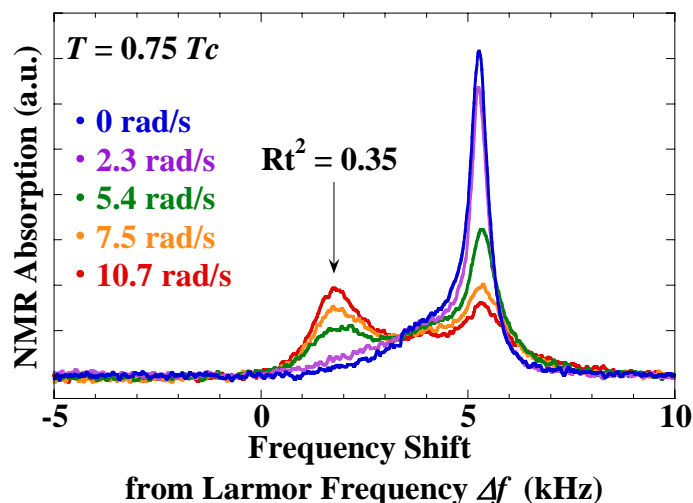


図1：核磁気共鳴スペクトルの回転依存性

図1より，角速度の上昇に伴って， $\Delta f = +5.5$ kHz 付近にあるメインピークが減少し，それと相補的に， $\Delta f = +1.8$ kHz 付近にサテライトピークが出現・増大していることが確認できる．このサテライトピークの回転依存性をより詳しく解析するために，図2にサテライト信号の積分強度の回転依存性をプロットする．縦軸はサテライトピークの積分強度を，横軸は回転角速度を示す．

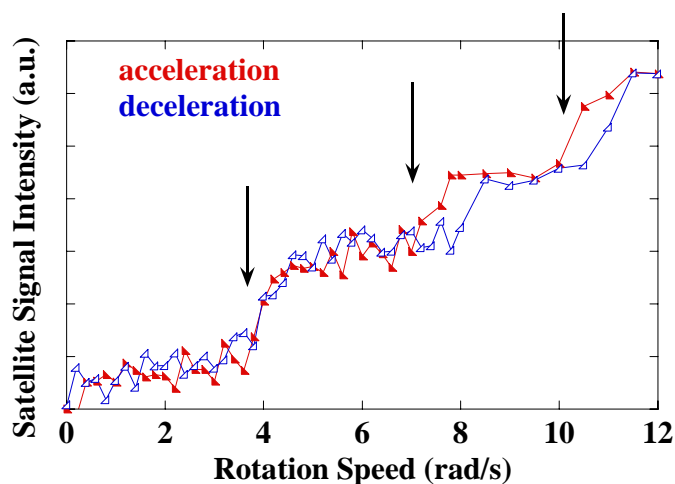


図2：サテライトピークの積分強度の回転依存性

図2から，サテライトピークの強度が回転に対して不連続に変化していることわかる（図

中矢印部分)。これは、円筒容器内に量子渦が3本、順に侵入していることに対応すると考えられる。このとき、積分強度の増分が約2倍、3倍となっていることも、これを裏付ける。さらに、数値計算との比較[6]により、3本の Continuous Unlocked Vortex と呼ばれる非等方的な渦心を持つ量子渦が侵入していることを確かめた。他にも、1本目の量子渦の侵入過程に着目し、円筒軸方向の1次の勾配磁場を用いた1次元核磁気共鳴画像法(1D-MRI)によって、渦端が円筒容器内を下から上へと、まさに進行する様子を観測した。

以上の測定から、よく制御された系に侵入する1本の量子渦の詳細な観測に成功したことがわかる。本研究は、1本の細円筒容器と高速回転冷凍機なくしては実現し得ない。これらの成果は、新たな量子渦研究の可能性を切り開いたと期待される。

[1] O.V.Lounasmaa and E.Thuneberg, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **96** (1999) 7760.

[2] T.D.bevan *et al.*, *J. Low Temp. phys.* **109** (1997) 423.

[3] R.J.Zieve *et al.*, *J. Low Temp. phys.* **91** (1993) 315.

[4] R.Ishiguro *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **93** (2004) 125301.

[5] R.Ishiguro, *Ph.D Thesis, Kyoto Univ.* (2004).

[6] T.Takagi, *JPS meeting and Private Communication* (2008).