

氏名	やま した みのる 山 下 穰
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2862 号
学位授与の日付	平成 17 年 3 月 23 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	エアロジェル中の回転超流動ヘリウム 3

(主査)
論文調査委員 教授 水崎隆雄 教授 大見哲巨 教授 田中耕一郎

論 文 内 容 の 要 旨

超流動 ^3He のクーバー対は P 波スピン三重項状態の対称性を持ち、その対称性から複数の秩序相(A 相, B 相, A1相)が存在し、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体である。この内部自由度による秩序変数の空間分布は、織目のような構造をなすことから織目構造(texture)と呼ばれる。この texture は、その秩序相の持つ内部自由度を反映し、双極子相互作用による相互作用や流れ、磁場、境界条件等の外部変数との相互作用によりその形を変え、多彩に変化する。超流動 ^3He は A 相, B 相によって異なる渦構造を持ち、各々の相で数種類の量子化された渦は見いだされている。

最近、エアロジェルといわれる多孔質物質中における超流動 ^3He の研究が盛んに行われており、エアロジェルは超流動 ^3He に対して不純物として働き、スピン三重項 P 波超流動の不純物効果の研究と位置づけられている。不純物効果により超流動は抑圧される。本研究は回転下でのエアロジェル中の超流動 ^3He を、核磁気共鳴(NMR)を用いて研究したものである。超流動に対する回転は、超伝導に対する磁場と等価な働きをするものである。エアロジェル中の超流動 ^3He は硬い第二種超伝導体(超流動体)に似た振る舞いをする。超流動の流れを回転により制御してその流れに対する texture の応答や、回転により導入された量子化渦の種類と渦のピン留め効果等を研究した。

東京大学物性研究所久保田研究室との共同で開発した回転超低温核断熱消磁冷凍機を用いてエアロジェル中の超流動 ^3He の NMR を測定した。試料の圧力は 3.0MPa と 3.4MPa, NMR 用の磁場は 21.6mT, 温度は試料室の外部につけた融解圧温度計を用いて測定した。回転速度は 1 回転/秒まで、また測定温度は回転下でエアロジェル中の超流動点移転 T_c から推定して 300 μK までである。エアロジェルの試料は空孔率 98% のものである(N. Mulders により製作されたもの)。

1) エアロジェル中の超流動 ^3He を冷却すると転移温度 T_c はバルクのもの比べて抑制された ($P=3.0\text{MPa}$ の場合は 2.06mK)。2 種類の超流動が観測され、各々は A-like 相, B-like 相と云う。この結果は従来報告されているものと一致していることを確認した。

2) A-like 相に関しては、

回転下の NMR スペクトラムはほとんど回転の影響を受けなかった。特に、 T_c を回転させながら通過させて常流動速度 v_n と超流動速度 v_s とを一致させて渦を入れた場合と回転なしの場合の NMR スペクトラムに変化が無いということは A-like 相の渦はスピン波をトラップするソフト・コアー(コアーの径が 10 μm)をもたない位相渦(コアー径は数 10nm)であると推測される。バルク液体で観測されたようなソフト・コアーを持つ渦が生成されず、texture もほとんど相対速度場 ($v=v_n-v_s$) に対して変化しない。これは A-like 相を特徴づける l ベクトルが強くピンされていることを示していると考えられる。回転変化によって NMR スペクトラムが極く少し高周波側に、単調にシフトする変化が観測された。回転による texture のアニーリング効果であると思われる。

3) B-like 相に関しては、

NMR スペクトラムは相対速度場に対して大きく変化した。ギャップの構造が等方的な B-like 相の方が異方的な A-like 相に比べて不純物があったときの秩序変数に対するピンングの効果は弱いと考えられる。

B-like 相がバルクの ^3He の B 相と同じ秩序変数を持ち、かつ v に対してバルクと同じように応答すると仮定することで、NMR スペクトラムの回転変化から v に関する情報を得る事ができた。 v が 0 から v_F (フェレデリック転移速度) までの間は texture は v に反応しないこと、 v_c でエアロジェル内に渦が入り始めること、その渦が非常に強くピンされ、静止下に戻した後も減衰の無い永久流が実現している事が観測された。局所的な v がある臨界値 v_c を超えると渦が導入されるというモデルを導入すると、測定した相対速度場に関する量を上手く説明することが出来た。このようにして求めた渦がエアロジェル内を動く (じつは増殖する) ために必要な臨界速度 v_c の温度依存性から、 v_c はピン留めが外れる機構で決まるのではなく、両端がピンされた渦の相対速度場に対する安定性で決まることが示された。この事から渦のピンングは約 $10\mu\text{m}$ の距離間隔で点状に存在する事が示唆されたが、なぜこのような距離スケールが現れるかは不明である。

論文審査の結果の要旨

本学位論文は回転下のエアロジェル中の三重項 P 波超流動ヘリウム 3 を研究についてのものである。

超流動ヘリウム 3 はスピン量子数 1、軌道量子数 1 の (3x3) の内部自由度をもつ超流動であり、異方的超流動である。内部自由度に関しては、流れ、磁場、境界条件、双極子相互作用などで縮退がとけ、巨視的波動関数である秩序変数は多彩な応答を示す。特に流体としての応答は、超流動の流れが巨視的波動関数の勾配で記述できることから、渦の量子化や流れによる秩序変数の空間的構造 (texture) の変化が起こる。一方、本論文は取り上げたエアロジェル中の超流動ヘリウム 3 の問題は、P 波超流動の不純物散乱効果の問題として最近研究されて来た。本論文においては、回転下でのエアロジェル中の超流動ヘリウム 3 の物性を研究した最初の研究である。超流動における回転は、超伝導における磁場と等価であり、超流動ヘリウムは回転に対しては第二種超伝導体と似た振る舞いをする。本研究では、不純物散乱のあるエアロジェル中の超流動の回転に対する応答を調べ、texture と流れの相互作用、量子渦の導入、ピン留め効果や渦のピン留めに伴う超流動の永久流の保持等を研究した。

実験は物性研との共同開発した毎秒 1 回転の回転したでサブ mK 温度域 (回転下での最低温度 $300\mu\text{K}$) に冷却可能な超低温冷凍機を用いて行った。これは世界最速の回転数を誇る高性能の超低温回転冷凍機である。一度の核断熱消磁で 1 ヶ月連続的に 2mK 以下の温度に保ち、実験を連続的に行うことができる。空孔率 98% のエアロジェルサンプル中の ^3He の圧力で 3.0MPa と 3.5MPa において、温度、回転速度の関数で cw-NMR の吸収スペクトルを測定した。cw-NMR のスペクトルから超流動の texture の様子を推定することができる。

回転下で初めてエアロジェル中の超流動ヘリウム 3 (A-like 相と B-like 相が存在する) を行い、以下の事を明らかにした。

1) A-like 相に関しては、秩序変数の軌道部分を特徴付ける l ベクトルがランダムにエアロジェルに強くピン留めされ、回転 (流れ) に対して変化しない事が見いだされた。またバルクで観測されているソフト・コアーを持つ量子渦のシグナルが観測されない事から、エアロジェル中に l ベクトルのランダムなピン留め効果により、位相渦が出来ていると推測している。

2) B-like 相では、試料に回転に伴う量子渦の導入が観測された。観測結果を説明する超流動の速度の分布から、超流動と常流動の相対速度がある臨界速度 v_c に達すると渦の増殖が起こるとするモデルを提唱した。このモデルは現象論的に導入されたものであるが、 v_c の温度依存性から「渦がピン留めされていて、それが流体的な不安定性 (Glaberson-Donnelly 不安定性) から増殖を始める」機構によることを明らかにした。これは超伝導の Flux creep と類似の現象である。

これらの研究成果によりエアロジェル中の回転超流動ヘリウム 3 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。