

# 論文審査の結果の要旨

氏名 齋藤政通

本論文は 4 章からなり、第 1 章はこの研究の背景、第 2 章は研究に用いた実験装置と実験方法、第 3 章は実験結果とその解釈、第 4 章は全体のまとめが述べられている。

p 波スピン三重項のクーパー対からなる BCS 状態であるバルクの超流動  $^3\text{He}$  では、低温で Balian-Werthamer (BW) 相が、高温高圧下で Anderson-Brinkman-Morel (ABM) 相が現れることが知られている。これをコヒーレンス長と同程度の長さスケールの制限された空間に閉じ込めると、異方的 BCS 状態特有の秩序変数構造の豊かさを反映して、バルクとは異なる複雑な様相を呈することが期待できる (サイズ効果)。理論的には、隙間  $2d$  の平行平板に挟まれたスラブ状空間に制限されたとき、(1) 隙間が  $\pi\xi(0)$  より狭いと絶対零度でも超流動相が不安定になること、(2)  $\pi\xi(0) \leq 2d \leq 7\xi(0)$  のときは絶対零度まで ABM 相が安定となり、超流動転移温度 ( $T_c^f$ ) が  $2d/\xi(T_c^f) = \pi$  の関係式で決まること、(3) それ以上の隙間のときは  $2d/\xi(T_c^f) \approx 7$  で決まる温度以下で BW 相が安定となること (A-B 転移)、などが予測されている。ここで、 $\xi(T) = \xi(0)(1 - T/T_c)^{-1/2}$  は温度に依存するコヒーレンス長で、 $\xi(0) = 65 \text{ nm}$  である。本研究は、よく制御された膜厚 ( $d$ ) の薄膜試料について  $T_c^f$  と臨界流を観測することにより、上記の理論予測を検証すると共に、制限された空間内での超流動  $^3\text{He}$  の流れの性質を実験的に調べる目的で行われた。

本研究で最も独創的かつ評価できる点の一つは、電子ビーム描画法によってガラス基盤上に微細加工した平面展開型の金の「くし形」コンデンサーを巧みに使って、超流動  $^3\text{He}$  薄膜の膜厚を  $0.2 \leq d \leq 7 \mu\text{m}$  というこれまで作成が難しかった範囲で自在にコントロールし、その流速を精度よく測定する実験技術を確立したことである。具体的には上下 2 組のくし形コンデンサーを  $^3\text{He}$  液面上に垂直に立て、それぞれに印可する直流電圧を調節して、上側コンデンサーが流れの駆動、下側コンデンサーが膜厚の制御を行う仕組みになっている。流量は上側コンデンサーのキャパシタン

スを同時測定することで分かる。過去に行われたフィルムフロー現象を利用した実験では、膜厚範囲が  $0.1 \leq d \leq 0.3 \mu\text{m}$  の領域に限られており、膜厚も均一ではなかった。また、スラブ構造の実験ではサイズを自在にコントロールすることは不可能である。

$T_c^f$  の決定は、上側コンデンサーへ印可した矩形波の駆動電圧に対する流量の追従性を観測することで行っている。実験では、ゆっくりした温度掃引の途中で温度が  $T_c^f$  を越えると追従性が劇的に変化することで、超流動転移が明瞭に捉えられている。また、これとは多少異なる方法でも  $T_c^f$  の決定を試みている。まず、 $T_c^f$  以下温度一定のもとで上側コンデンサーへの印可電圧を時間に対して直線的あるいは 2 次関数的に掃引し、これに流量変化が追従できなくなる、つまり流れが散逸的となる時の流速（臨界流速： $J_c^f(T)$ ）を測定する。次に同様の測定をさまざまな温度で行い、 $J_c^f$  がゼロでなくなる時の温度として  $T_c^f$  を決定するというものである。これら二つの方法から求めた  $T_c^f$  は比較的良好に一致しており、膜厚の薄い領域では  $2d/\xi(T_c^f) = \pi$  に近い結果が得られ、過去の膜厚  $0.3 \mu\text{m}$  以下の実験とスムーズにつながっている。ところが、それより膜厚が厚い領域では  $2d/\xi(T_c^f) \approx 7$  の振る舞いに近い結果が得られた。この結果は、膜厚の厚い領域で A-B 転移が流れの散逸度の変化として本実験で観測されたことを示す可能性がある。これは、 $2d = 1.1 \mu\text{m}$  のスラブ構造に  $P = 1.0 \text{ MPa}$  の超流動  $^3\text{He}$  を閉じ込めたときの NMR 実験で、A-B 転移が報告されていることと符合するように見える。

本研究では、 $J_c^f(T)$  の温度依存性も精度よく観測され、Ginzburg-Landau 理論から期待される温度依存性  $J_c^f(T) \propto (1 - T/T_c^f)^{3/2}$  が確認された。ところが、その係数は理論から期待される大きさよりずっと小さく（10～20 %）、その比は膜厚に対して一次関数的に増加することが判明した。この振る舞いも  $T_c^f$  同様、過去のより薄い膜厚の実験結果に漸近するように見える。これについては、対破壊よりずっと低エネルギーの散逸機構が働いていることを実験的に示す証拠として、今後、理論も含めたさらなる解明が待たれる。

以上のように、本研究は超流動  $^3\text{He}$  のサイズ効果に関し、重要かつ新しい実験的知見をもたらしただけでなく、自由表面をもつ薄膜の膜厚と流れを超低温域で自在

かつ精密に制御する新しい実験手法を開発した点で、独創的であり高く評価できる。  
なお、本論文の研究は河野公俊、椋田秀和、池上弘樹の各氏との共同研究であるが、  
論文提出者が主体となって実験の遂行、解析及び解釈を行ったものであり、論文提  
出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。