

計画研究 B01

「スピン三重項超流動体の新奇界面現象」の最近のトピックス

石川 修六 / 大阪市立大学大学院理学研究科 教授

B01 班では、スピン三重項超流動体である超流動 ^3He を主な研究対象とし、液体界面での新奇現象や秩序変数の制御により発現する現象の探索と物理的解釈、また同じスピン三重項状態であるカイラル超伝導物質で起こる現象との類似性・普遍性の探求、さらにボース-アインシュタイン凝縮状態や冷却原子系の研究を通して、トポロジカル量子現象の研究を進めています。今年度は2年目であり、いくつかの成果が得られ始めています。以下に最近の研究の中からいくつかのトピックをまとめました。

1. エアロジェル界面での新奇近接効果

超流動 ^3He B 相中にエアロジェルという物質を浸すとエアロジェル内の液体 ^3He の超流動性が抑制される。エアロジェル界面を挟んで超流動 ^3He B 相と常流動相が接するとき、常流動相側に奇周波数クーパーペアが出現することが東谷等によって予想されている [1]。これは田仲等によるカイラル p 波超伝導と拡散正常金属との接合と同じである [2]。奇周波数クーパーペアに起因する界面での帯磁率の増大が予想されているので [3]、石川等はこの奇周波数クーパーペア探索の実験を NMR 法を用いて行った。現時点では帯磁率の増大は観測されていないが、興味深い現象を観測している。圧力が 25 気圧程度では、エアロジェル内の超流動転移はバルク液体の転移温度よりかなり低い温度で起こる。このときバルク液体は B 相である。磁場勾配下での測定が示したことは、エアロジェル内でエアロジェル界面に接する付近の液体は超流動に転移しにくいことである。一方、界面に接するバルク側液体は完全に超流動転移している。何が原因で超流動転移しないのかを明らかにするための実験を継続中である。

2. 回転する超流動 ^3He A 相のテクスチャー

細い円筒容器内での超流動 ^3He -A 相では、円筒容器界面の影響を受け、特徴的な秩序変数の織目構造 (テクスチャー) が出現する。いくつかの可能なテクスチャーのうち Mermin-Ho(hyperbolic) 型のテクスチャーを利用した回転実験を行うことにより、超流動発見以来の A 相での固有角運動量の問題を解決できると考えている。石川、國松、久保田等は、その前段階での実験として、東大物性研究所の回転冷凍機 (久保田研究室) に 0.1mm の直径の一本の円筒容器からなる試料セルを設置し、テクスチャーの同定を cw-NMR 法で行なった。NMR 測定では、テクスチャーのために双極子相互作用ポテンシャルが空間的に歪み、そこにトラップされたスピン波をサテライト信号として観測する。その共鳴周波数は、双極子相互作用ポテンシャルの空間歪み、すなわちテクスチャーの構造を反映している [4]。現在、A 相の形成過程の違い (昇温過程 or 冷却過程・静止下 or 回転下での相転移) から、3 種類の異なる NMR スペクトルの確認が出来た。最近の高木によるスピン波共鳴周波数の数値計算結果

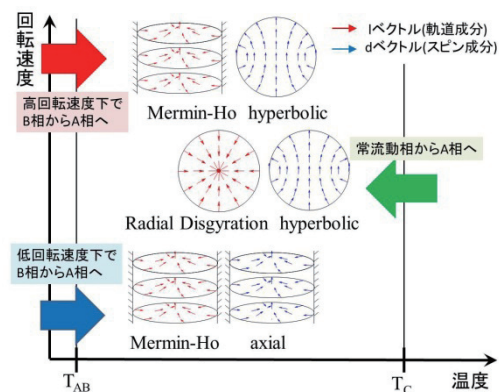


図 1 : 円筒容器内超流動 ^3He A 相のテクスチャー

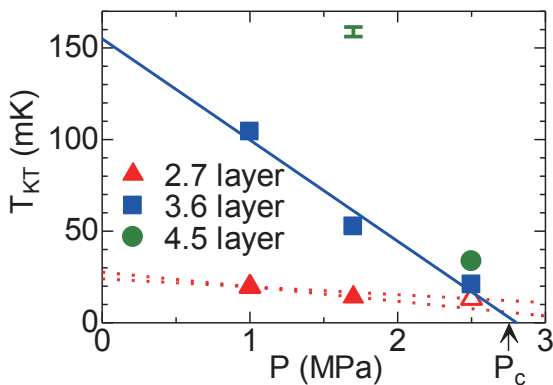


図 2 : ^4He 薄膜の超流動転移温度の圧力変化

[5] と観測されたサテライト信号の共鳴周波数と比較して、対応する 3 種類のテクスチャー構造を明らかにした (図 1)。常流動相から超流動への転移で Radial Disgyration (hyperbolic) 型のテクスチャーが出現する測定結果は、堤らの自由エネルギーの数値計算結果と合致するものである [6]。

3. 強相関 ^4He 薄膜における Kosterlitz-Thouless 転移の抑制と量子臨界性

これまで ^4He 薄膜の超流動転移の研究は精力的に進められてきたが、弱相関領域と見なせる飽和蒸気圧下での研究が主であった。この超流動転移は、量子渦 - 反渦の対形成にともなうトポロジカル相転移 (Kosterlitz-Thouless 転移、KT 転移) であることが確立している。しかし、強相関効果は明らかにされて来ず、また ^4He 薄膜中で粒子相関を強める方法も知られていなかった。野村等はバルク ^3He 液体で加圧された ^4He 薄膜が、強相関効果を示すのではないかと考え実験を行った。加圧下で超流動薄膜が超流動転移する温度は、観測する周波数に依存し、その周波数依存性は動的 KT 転移理論で良く説明できることがわかった。これは加圧下においても超流動転移が KT 転移であることを示している。一方で、転移温度は飽和蒸気圧下に比べて大きく抑制されることを見出した (図 2)。この転移温度の抑制は、高压で粒子密度が増大し、相関が強くなったことに起因すると考えられる。

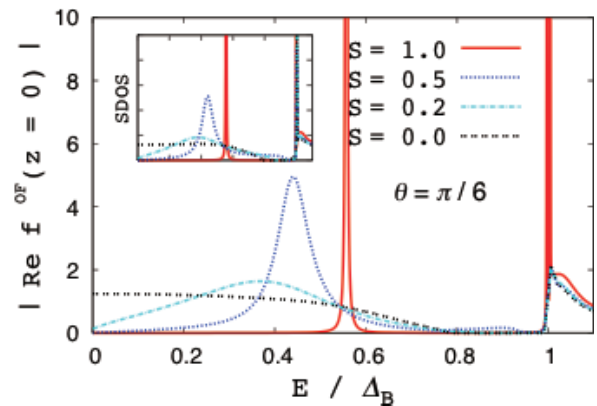


図 3 : 奇周波数ペア振幅とギャップ内状態密度

転移温度が圧力に比例して減少し、約 27.5 気圧において消失する量子臨界的な振る舞いを発見した [7]。バルク ^4He の結晶化圧力は 25 気圧であり、臨界圧力付近の ^4He 薄膜の固体 - 常流動 - 超流動相図の詳細や乱れの効果を明らかにするのは今後の課題である。

4. 奇周波数クーパーペアとアンドレーエフ束縛状態密度との対応

東谷等の最近の理論研究から、アンドレーエフ束縛状態と奇周波数クーパーペアの間に密接な関係があること、超流動ヘリウム 3 B 相の界面に奇周波数クーパーペアが形成されることが明らかになってきた [8]。図 3 に、超流動ヘリウム 3 B 相界面の奇周波数クーパーペア振幅と表面状態密度 (SDOS) のエネルギー依存性を示した。SDOS に見られるギャップ内状態密度は、アンドレーエフ束縛状態に起因する。バルクのエネルギーギャップ以下の低エネルギー領域で、奇周波数ペア振幅とギャップ内状態密度は同様なエネルギー依存性をもつことがわかる。(界面垂直向きから測った角度 $\theta = \pi / 6$ の散乱であり、 S は鏡面散乱の度合いを表し、 $S = 1$ が完全鏡面散乱である。) また、ゼロエネルギー極限で両者の値は厳密に一致する。超流動ヘリウム 3 B 相の SDOS にギャップ内状態密度が存在することは、東工大の実験グループによる横波音響インピーダンス測定によって観測されている。この実験は、超流動ヘリウム 3 B 相の界面には、アン



ドレーエフ束縛状態とともに、奇周波数クーパーペアが存在していることを実証していると言える。

5. 奇周波数超伝導

三宅等は奇周波数超伝導の開闢以来の病理とも言うべき「負マイスナー効果の問題」を解決した。これは、特筆すべき成果である。そのポイントは、奇周波数超伝導が通常の偶周波数超伝導に勝って実現するためには異常な遅延効果が必要となるが、そのような状況を量子統計力学的に正しく記述するにはハミルトニアンではなくラグランジアンにもとづく経路積分の方法による記述が不可欠であったことである [9]。もう一つの発展は、奇周波数超伝導は特殊な現象ではなく、ギャップレスなスピン波（南部モード）をもつ反強磁性と共存する超伝導状態でかなり普遍的に実現していることが分かってきたことである。多層系銅酸化物高温超伝導体でこのような状態が確認されたのは今後の大きな発展を予想させる。

6. カイラル p 波超伝導体の固有磁気モーメント

三宅等はカイラル p 波超伝導体 Sr_2RuO_4 を念頭に次近接に位置する電子に引力が働く 2 次元正方タイトバインディングモデル（サイト数 $13 \times 13 = 169$ ）に対して Bogolubov-de Gennes 方程式を解いて固有磁気モーメントの大きさを求め、 $M \sim \mu_B N$ であることを示した。更に、マイスナーカレントからの磁気モーメントへの寄与を独立に計算したところ、計算精度の範囲で固有磁気モーメントをほぼ打ち消すことが分かった。系のサイズを小さくするとその打ち消しは不完全となり自発的な磁気モーメントは観測可能になると考えられる。

7. その他の成果

他の研究活動として、東條（B01 班公募研究者）等は、スピン自由度を有するボース凝縮（スピノルボース凝縮）での研究のために、スピンの操作が可能な光トラップ中で原子気体ボース凝縮体を光スプーンでかき混ぜて、量子渦の生成・観測に成功した。今後、低磁場スピノル状態での新奇量子渦生成を目指す研究を進めている。

- [1] "Proximity Effect between a Dirty Fermi Liquid and Superfluid ^3He "
S. Higashitani *et al.*, JLTTP 155 83 (2009).
- [2] "Anomalous Josephson Effect between Even- and Odd-Frequency Superconductors"
Y. Tanaka *et al.*, PRL 99 037005 (2007).
- [3] S. Higashitani, private communication.
- [4] "Mermin-Ho Texture and Its Transverse NMR Spectrum in a Rotating Cylinder"
T. Takagi, JPSJ 65 1722 (1996)
- [5] T. Takagi, private communication.
- [6] "Singular Vortex in Narrow Cylinders of Superfluid ^3He -A Phase"
Y. Tsutsumi and K. Machida, JPSJ 78 114606 (2009).
- [7] "Strong Suppression of the Kosterlitz-Thouless Transition in a ^4He Film under High Pressure"
S. Murakawa, *et al.* PRL 108, 025302 (2012)
- [8] "Odd-frequency Cooper pairs and zero-energy surface bound states in superfluid ^3He "
S. Higashitani *et al.*, PRB 85, 024524 (2012)
- [9] "On the Puzzle of Odd-Frequency Superconductivity"
H. Kusunose *et al.*, JPSJ 80 054702 (2011).