

超流動³He 薄膜系における境界効果

山本 幹雄

広島大学大学院生物圏科学研究科

Boundary Effects on Superfluid ³He Film

Mikio Yamamoto

*Graduated School of Biosphere Sciences, Hiroshima University,
Higashi-Hiroshima 739-8521, Japan*

要 旨

典型的な強相関フェルミ流体である液体³Heは、1 ~ 2 mKの超低温で、パラマグノンを媒介とした相互作用によりBCS転移を起こして超流動状態になる。³Heの超流動状態は、金属中の電子の超伝導状態と同様に³He原子がクーパー対を形成し凝縮した状態であるが、原子間に働く強い短距離斥力のために有限の角運動量を有する異方的クーパー対を形成する。このように対の角運動量が有限であるBCS状態を異方的BCS状態と呼ぶ。1972年の³Heの超流動状態発見以降、重い電子系超伝導体や銅酸化物高温超伝導体、またごく最近SrRuO₄において、異方的BCS状態の可能性が次々と指摘されており、異方的対形成に起因する現象の研究が盛んに行われている。異方的BCS状態の物性を研究する上で、超流動³Heは、極めて純粋な系であり理論と実験の定量的比較が可能であること、またクーパー対の対称性(p波3重項)が特定されていること等から、理想的な研究対象であるといえる。事実、超流動³Heの研究を通じて明らかにされた物理概念は、その後発展した銅酸化物超伝導体、重い電子系物質等の強相関電子系の理解に大きな役割を果たしてきた。

これら異方的BCS状態の特徴として、境界や不純物などによる散乱に敏感であることが挙げられる。超流動³Heのこれまでの研究により、異方的BCS状態では、境界近傍においてクーパー対の異方性を反映した対破壊効果が現れ、それに伴い界面近傍の秩序パラメータや準粒子状態に大きな変化が生じることが明らかにされてきた。秩序パラメータは、境界近傍で押さえられ、境界から遠ざかるとコヒーレンス長のスケールでバルク系の値に回復していく。従って、境界を有する異方的BCS状態は必然的に非均一状態になっている。有限サイズの系では、境界近傍における対破壊効果の帰結として、転移温度の抑制、超流動密度の減少、バルクでは安定化し得ない低温低圧領域におけるA相の安定化等、様々なサイズ効果がみられる。

³He薄膜の超流動物性を探る新たなプローブとして、第三音波の観測が注目を浴びている。第三音波は、ヘリウム薄膜の超流動成分だけが動くことにより伝わる表面波で、最近、Schechterらにより初めてその観測が報告された。第三音波の音速測定から得られる重要な情報として、超流動密度があり、そのサイズ効果も同時に報告された。

本論文では、Schechterらの実験に注目し、境界効果が顕著に現れるコヒーレンス長程度の厚さの ^3He 薄膜系における超流動物性の理論的研究を行った。

境界効果に由来する非均一状態に関する従来の理論は、転移点近傍で有効なGinzburg-Landau理論に拠るものが大部分で、重要な境界条件も現象論的な仮定に基づくものが多かった。また、低温領域でも有効な理論的方法として、準古典的グリーン関数法があるが、その境界条件も、現象論的モデルに基づくものが多く、それぞれに難点が指摘されていた。従って、超流動状態の全温度領域に涉って実験との定量的比較に耐える理論は無かったといつてよい。

本研究の目的は、準古典的グリーン関数の境界条件を微視的立場から与え、非均一状態を定量的に記述できる理論的方法を確立して、対振幅(秩序パラメータ)の空間変動や、転移温度、超流動密度のサイズ効果について論じることにある。準古典的グリーン関数の境界条件については、境界散乱が鏡面的極限(specular limit)の場合はこれまで比較的良好に調べられているが、境界の粗さによる散漫的散乱(diffuse scattering)を含む任意の境界散乱を扱える理論は十分に展開されてはいない。実際の試料では、原子スケールでの界面の制御は事実上不可能であり、実験との検証という点でも、一般的な理論が必要である。最近、長登らは、Random S-matrix Theory と呼ばれる理論を提案した。まず、表面散乱のS-matrixを含む準古典的グリーン関数の形式解を求める。表面の乱雑さをS-matrixの統計的分布で表し、形式解の統計的平均を取ることで、散漫散乱による効果を取り入れることに成功した。この方法に拠れば、境界散乱の効果をspecular limitからdiffusive limitまで統一的に扱うことが可能になる。しかし、長登らの理論は、超流動の流れの無い場合に限られており、超流動密度を議論することはできない。本研究では、長登らによる準古典的グリーン関数の境界理論を超流動流のある場合に拡張し、境界効果を系統的に取り扱える形で薄膜系における線形応答理論の定式化を行い、超流動 ^3He の対振幅の空間的変動、転移温度や超流動密度のサイズ依存性、および境界散乱依存性について議論した。

本論文は以下のように構成されている。

第一章 Introduction

超流動 ^3He 薄膜系における実験と理論の現状を概観し、本研究の動機となった第三音波の実験等の紹介を行い、本研究の目的と意義を明らかにした。

第二章 Anisotropic Superfluid ^3He

ここではバルク系における液体 ^3He の超流動状態について概観するとともに、それを記述する一般化されたBCS theoryをBogoliubov-de Gennes方程式から出発する方法で導入した。

Bogoliubov-de Gennes方程式の解を用いて、様々な物理量を計算する上で非常に有効であるGor'kovグリーン関数を導入し、それが従うGor'kov方程式を導出した。次にこのGor'kov方程式を出発点とし、 ^3He の超流動状態で実現しているP波三重項状態を取り上げ、バルクで安定化している二つの状態、常圧下で現れるBW状態(B相)と高温高圧領域で安定化するABM状態(A相)について概観した。最後に薄膜系でこれらの状態がどのように変化するか簡単に触れ、対振幅が境界効果により空間変化する超流動状態のモデルとしてmodified-BW状態、modified-ABM状態の導入を行った。

第三章 Quasi-Classical Theory

第二章で導出したGor'kov方程式は空間に関する2階の微分方程式であり一般には解くことが難しい。実際は何らかの近似を行い計算されるわけであるが、一つの方法としてGinzburg-Landau近似(GL理論)がある。この理論は比較的、解析的な取り扱いが容易であるためよく取り上げられており、本研究で対象とする薄膜系の議論もGLによる理論が多い。しかしこの理論では相転移点近傍しか議論が出来ない。そこで本研究では全温度領域を取り扱え、空間的非一様な系を記述するのに極めて有効である準古典近似を採用した。秩序パラメータなどの空間変化のスケールはコヒーレンス長程度であり、Fermi波長に比べると十分大きい。この場合、Fermi波長程度の細かい空間変化を粗視化する準古典近似(Andreev近似)が許される。

また、準古典的近似を適用した空間変化が緩やかな解を用いて、準古典的グリーン関数を導出することが出来ることを示した。また空間変化を記述するのに便利な空間発展演算子の導入を行った。

第四章 Quasi-Classical Theory of Boundary Effect

ここでは長登らにより考案された準古典的グリーン関数法による境界理論であるRandom S-matrix Theoryに従い、任意の境界散乱条件を満足する形で薄膜構造における準古典的グリーン関数の形式解を導出した。

第五章 Transition Temperature and Order Parameter

第三音波の実験での超流動³He薄膜は膜厚が十分薄く、実現している状態は空間変化するABM状態であると考えられる。そこで具体的計算はABM状態を対象として行った。

対振幅が空間変化する場合、その空間依存性をセルフコンシステントに決めることが実験との定量的比較において重要である。ここでは第四章で導出した準古典的グリーン関数を用いて、対振幅が従うギャップ方程式を導出し、数値的にセルフコンシステントな解を求め、秩序パラメーターの空間変化のプロファイルをspecularからdiffusive limitまで系統的に示した。

また線型ギャップ方程式を用いて転移温度のサイズ依存性をspecularからdiffusive limitまで系統的に議論し、境界散乱がdiffusiveである場合は常に臨界膜厚が存在することを明らかにした。

第六章 Superflow in ³He Film

超流動密度は、超流動速度場 v_s の存在下での質量流を v_s の1次までを線形応答理論で計算することで求めることができる。しかしながら、薄膜系において境界散乱効果に対振幅の空間依存性まできちんと議論した線形応答理論はこれまで報告されていない。

本研究では、全温度領域を議論するため準古典的Green関数法に基づく線形応答理論を境界散乱を系統的に取り扱える形で定式化した。ここで定式化した線形応答理論を用いて、超流動流がある場合のギャップ方程式をセルフコンシステントに解き、対振幅に対する超流動流の影響を議論した。その結果、セルフコンシステントな対振幅には、ABM状態に対してPolar状態的な対称性をもった補正が現れることを示した。こうして求めた秩序パラメーターを用いて超流動密度の温度依存性における境界効果とサイズ効果について議論した。また上記の第三音波の実験に注目し本研究の理論との比

較検討を行った。結果、境界散乱を diffusive limit に仮定すると、膜厚が薄い場合 (92nm ~ 174nm) の実験結果を良く再現するが、膜厚が厚い場合 (252nm ~ 281nm) では低温領域での大きなズレが見られた。また非線型効果が現れる領域についての議論も行った。

第七章 Discussion

本研究では、第三音波の実験に注目し、コヒーレンス長程度の薄膜超流動³Heにおける境界効果を理論的に議論した。Random S-matrix Theory を拡張適用し、超流動流の存在する超流動薄膜系の境界効果を系統的に取り扱える理論の定式化を行った。また定量的議論を行うために、ギャップ方程式を数値的に解き、セルフコンシステントな対振幅を基に、超流動密度の議論を行った。

超流動密度は、境界散乱を diffusive limit に仮定すると、膜厚が薄い場合 (92nm ~ 174nm) の実験結果を良く再現するが、膜厚が厚い場合 (252nm ~ 281nm) では低温領域での大きなズレが見られた。このズレの要因として AB 転移 (膜厚が厚い実験では B 相が安定化する) が考えられるが、境界効果の議論では、281nm は十分薄くやはり A 相が安定化すると見るのが妥当である。したがって境界効果のみではこのズレは理解されない。今後⁴He のコーティングなどによる、境界散乱の性質を変えた実験が行われる事が望まれる。

参考文献

- (1) M. R. Freeman and R. C. Richardson: Phys. Rev. B 41, 11011 (1990)
- (2) A. M. R. Schechter, R. W. Simmonds, R. E. Packard and J. C. Davis: Nature, 396, 554 (1998)
- (3) Y. Nagato, S. Higashitani, K. Yamada, K. Nagai : J. Low Temp. Phys. 103, 1 (1996)
- (4) M. Yamamoto, S. Higashitani, Y. Nagato and K. Nagai: Physica B 284-288 271 (2000)