

(論文内容の要旨)

申請者の青山和司氏の学位論文は、エアロジェルという多孔質の乱れた媒質中における超流動ヘリウム3のクーパー対状態について理論的に研究したものである。この系は、超流動ヘリウム3という異方的な軌道対称性を有するクーパー対状態への不純物効果を調べる目的で15年ほど前より超低温物理研究分野において国際的に実験的調査が進められてきた。クーパー対のボース・アインシュタイン凝縮という観点から、この系は異方的クーパー対対称性を持つ超伝導と多くの類似点を有し、そのため超伝導への不純物効果と類似な結果が得られるというのが当初の予想であった。ところが、得られた実験的相図において、A-like相と呼ばれる超流動高压相の性質、及び相図中でのその現れ方、がバルク液体の場合と顕著に異なることから判断して、A-like相のクーパー対状態が(不純物効果を一切持たない)バルク液体のA相のそれと異なっている可能性が指摘された。一方で、エアロジェルの乱れた構造による秩序パラメタのピンング効果は、A-like相出現に関するヒステリシスとして実験的に見られており、A-like相がバルクA相と同じスピン3重項の異方的対状態であることを示唆するものであり、上記の新たな対状態の可能性と矛盾した現象である。しかし、これらの注目すべき実験面の背景があったにもかかわらず、その系統的な説明を試みる理論はこれまで提出されていなかった。申請者の研究は、エアロジェル中超流動ヘリウム3に関する上記の未解明の問題を、乱れを含むBCSハミルトニアンから出発する微視的なモデル化から出発して系統的に説明することに成功している。

申請者の研究は、エアロジェルの乱れた構造の特徴に注目するところから始まる。超伝導の不純物効果の研究対象とは異なり、エアロジェルは短距離で明確な異方性を持つ。その相関長がクーパー対サイズと同じオーダーで、圧力を変えるとともに上記2つの特徴的な長さのスケールの大小関係が変わる。この事実を考慮し、まず、散乱が異方的極限になっている場合に着目した。バルクA相の対状態やポーラー対状態が安定化することを定性的に示し、得られる相図は実験的に得られた相図の特徴を良く捕らえていることを指摘した。この3次元系でポーラー対状態の実現可能な例を指摘したことは注目に値し、この提案に基づき現在、国内外の複数の実験グループでポーラー対状態の探索が試みられている。さらに、エアロジェル相関長がクーパー対サイズと同程度の場合を意識して、乱れを含む凝縮系の統計力学に使われるガウシアン変分法の手法にエアロジェルによる局所的な異方的散乱効果を取り入れることによって、自由エネルギー及び相図を調査した。乱れにより秩序パラメタの軌道成分の長距離秩序が消失することは以前から指摘されていたが、この研究で長距離秩序の消失が自由エネルギーの利得につながることを示された。上記の2つの場合に関する結果を踏まえて無矛盾な理論的相図を提案し、バルク液体のA相の特徴に比べ多重臨界圧が減少する一方でA-like相の存在する温度域が極端に狭められる、といった実験相図に見られる特徴の原因がエアロジェルの異方性に起因することを指摘した。さらに、バルク液体のA相を安定化させる原因である強結合効果(フェルミ粒子間の相関効果)がエアロジェル中では極端に弱められているとする、強磁場下の実験に基づいた説を検討するために、強結合効果への乱れの効果を詳細に調べ、エアロジェル中ではA-B転移温度の圧力勾配が符号を変えないという特徴を定性的に説明することに成功した。

エアロジェル中超流動ヘリウム3に関するこれらの一連の研究は、実験的相図の奇妙な特徴を見事に説明し、高压超流動相(A-like相)がバルク液体と同じ対状態に属するという見解を理論的に支持することにつながった。

氏 名	青山 和司
-----	-------

(論文審査の結果の要旨)

申請者の青山和司氏の学位論文は、バルクの超流動ヘリウム3に関するレビューから始まり、エアロジェル中超流動ヘリウム3の実験的背景のレビュー、異方性が局所的な場合のガウシアン変分法を用いた理論解析、異方性が大局的な場合の相図の平均場近似による解析、強結合効果への乱れの効果の解析、結果のまとめ、からなる。博士後期課程において申請者が最も時間を割いて取り組んだのが、強結合効果への乱れの効果の調査であるが、学位論文はエアロジェル中ヘリウム3の A-like 相の静的な側面に関する申請者による理論成果を総合的にまとめたものに仕上がっている。

本学位論文の研究には、BCS 理論に基づいたフェルミ超流動の平均場近似の理論、乱れた系の統計力学の理論、強結合効果の解析に必要なグリーン関数法やフェルミ液体論、といった量子凝縮系物理の理論に関する豊富な知識と手法が要求されているが、これらを確実に修得し、巧みに駆使することにより、系統的な理論にまとめあげるのに成功している。中でも強結合効果の研究では、グリーン関数を用いた多体系のダイアグラム計算と正常相における準粒子間相互作用を表すランダウパラメタの実験事実から評価された値を用いた数値解析を組み合わせた複雑な解析に取り組んでおり、理論手法の習熟度だけでなく辛抱強く実験との整合性を意識した解析を行った努力の跡もうかがえる。また、局所的異方性の場合の解析では、乱れた系に固有のレプリカ法に基づいた統計力学の手法を確実に身につけ、複雑な解析を見事な形にまとめ上げることに成功しており、理論研究者としての並々ならぬ力量がうかがえる。

公聴会での発表は、極めて明快であり、複雑な理論手法の説明には立ち入ることなく、物理について本質的な内容の説明に時間を割くことで、聴く側に立った発表となっていたと判断した。質問への受け答えも明快であった。

青山氏の研究は、超低温物理分野における超流動ヘリウム3の理論、実験研究に大きく貢献している。元来、液体ヘリウム3は不純物を含まない純粋な系であるため、乱れた系の統計力学の知見がこれまで発揮された分野ではなかった。おそらくその理由もあって、秩序パラメタの軌道成分の乱れによる長距離秩序の消失が自由エネルギーの利得につながるという申請者が示した結果は、A-like 相がバルク液体のA相と異なる対状態であるとする説を否定するのに十分な影響力があった。さらに大局的な異方性を含む場合の考察は、アイデア自体が新しく、ごくわずかなエアロジェルのゆがみが A-like 相の特徴までも変え得る、というその後の核磁気共鳴の実験で確認された事実を予言していたという点で国際的にも高く評価されている。また、強結合効果への乱れの効果の研究は、正反対の結論につながっていたそれまでの単純な解析結果を覆し、実験からの予想の正当化につながっただけでなく、ヘリウム3超流動相発現機構がスピン揺らぎによるとする説が不十分であることを再認識させた意味でも寄与が大きい。

以上のことから、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、論文内容とそれに関連した事項について試問を行い、博士として十分な学識、能力があることを確認したため、合格と認めた。