

論文審査の結果の要旨

氏名 エッゲル・トーマス・エミル

ヘリウム4の超流動性や相図に対する相関効果の理解の確立は、電子物性における高温超伝導、高エネルギー物理におけるクオーク・グルーオンプラズマなどと並んで、強い相関を持つ多粒子系の解決すべき難問の一つである。ナノ多孔体に閉じ込めたヘリウム4の物性については近年、国内の実験研究者らにより明らかになりつつある。多孔体による閉じ込めの効果は、粒子間の相関をより強める働きがあり、これらの実験結果に対応する理論を構築し解釈を与えることは、強相関係超流動の理解をより深めていくために不可欠である。本研究は、それらの実験的成果を背景に、一次元多孔体中の超流動と3次元多孔体中の超流動についてなされた理論的研究である。

本論文は3部14章と4つの付録からなる。

第1部(1, 2章)は導入部であり、第1章、2章ではそれぞれ、ボースアインシュタイン凝縮と超流動についての概説と相転移と臨界現象についての概説が与えられている。

第2部(3章から9章まで)には一次元超流動について研究の背景とエッゲル氏とその共同研究者による研究成果が述べられている。その構成は以下の通りである。従来の理論・実験の概観(第3章)、超流動の動的な定義(第4章)、ボソン化の方法(第5章)、記憶関数の方法(第6章)についての記述の後、朝永・ラッティンジャー液体の運動量応答関数の記憶関数形式での定式化(第7章)、運動量応答の具体的な結果と実験との比較(第8章)のあと、ウムクラップ散乱があるときの自己エネルギーの計算の詳細(第9章)について記述されている。

第3部(10章から14章まで)では、3次元ナノ多孔体中の超流動についての研究の背景とエッゲル氏らの研究成果が述べられている。第3部の構成は以下のとおりである。第10章では3次元多孔体についての実験のランダム系の理論についての概説、第11章では、ボースハバード模型についてこれまで知られていた性質について、第12章ではボースハバード模型における各固定点周りのスケーリング則とくりこみ群解析の結果、第13章ではジェルシル(GelSil)多孔体におけるヘリウム4の相図と理論との比較、第14章ではボースハバード模型と関連したXY模型についてのモンテカルロ計算の結果について述べられている。

第3部に続いてこれまでの研究全体をまとめた結論が述べられている。4つの付録ではそれぞれ、静的感受率の表式(Appendix A)、森公式における記憶関数の低周波数展開(Appendix B)、高充填率極限におけるボースハバード模型(Appendix C)、量子回転子模型からXY模型への写像(Appendix D)についての説明が与えられている。

第2部に述べられている本研究の成果の新しい点は以下のとおりである[1] 捩じり振

子でみられる一次元ナノ多孔体の超流動的応答特性は、ヘリシティーモデュラスと呼ばれる静的な超流動密度で記述されるのではなく、動的特性として記述するべきであり、質量流、エネルギー流などが散乱体の存在下でも疑似的な保存量となる朝永・ラッティンジャー液体の特徴に由来するものとする見解を与えた点、[2]また記憶関数の方法または射影演算子の方法（いわゆる森公式）を用いて複数のスローモード（疑似保存量）の効果を取り入れた応答量の定式化、[3]そして複数の疑似保存量から起因する散逸的応答量の温度依存性における複数ピークの可能性も本研究によって新たに得られた成果である。

第3部において得られた新たな成果は、[1]ジェルシル中のヘリウム4について、粒子正孔対称性の破れは、実験条件の温度ではほとんど無視することができ、量子臨界点が実質的に4次元XY模型の固定点で記述されることを示し、[2]それに対応したスケールリング則が超流動転移温度や超流動密度の圧力依存性についての実験結果を定量的に再現することを示した点にある。

本論文の成果の意義は、有効理論（朝永ラッティンジャー液体、ギンツブルグ・ランダウ・ウィルソン型有効理論）によって相関の強いボース系であるヘリウム4を適切に記述し、超流動特性や相図に対する基本的理解の枠組みを与えた点に認められる。

本研究における3章から9章の成果については **Physical Review Letters** 誌に既に投稿済みであり、10章から13章までの成果については **Physical Review B Rapid communication** として既に掲載が決まっている。

なお、本論文で述べられている結果は、3章から9章については M. A. Cazalilla 氏、押川正毅氏との共同研究の成果であり、10章から13章までの成果については、押川正毅氏、白濱圭也氏との共同研究の成果である。しかし論文提出者が主体となって分析および検証を行ったもので、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。