

論文審査の結果の要旨

氏名 松本洋介

本学位論文は6章からなり、1章は強相関フェルミオン系についての序論、2章は2次元液体ヘリウムの研究の背景、3章は実験装置の設計と製作、4章は実験方法、5章は実験結果と考察、6章は結論を述べている。

液体ヘリウムの物理は、量子効果が本質的である量子液体状態として、さらに超流動という著しい現象を示す物質として、物性物理学における基本的な分野の一つをなし発展してきている。また、ヘリウムには ^4He と ^3He という二種類の同位体があり、前者はボゾン、後者はフェルミオンであり、その統計性の違いが表れるという点でも顕著な物質である。

通常の3次元空間における液体ヘリウムに対しては、実験・理論ともに長年の歴史があり、概ね理解されている。一方、空間次元を変えた場合、特に低次元にした場合に、一般に量子系における量子効果が著しくなることが期待され、最近の物性物理学の中心的なテーマとなっている。ヘリウム原子においても、グラファイト等原子レベルで平坦な基板の表面上に吸着させることにより、2次元ヘリウム系を実現でき、これも精力的に調べられている。

この2次元ヘリウム系における興味は二つある。第一は、ヘリウム原子は典型的な希ガス元素であり、原子は硬いボールのようなハードコアと呼ばれる強い相互作用をしている。一般に、強い相互作用している系を強相関系と呼ぶが、銅酸化物高温超伝導体を典型とする固体は強相関電子系であるのに対して、ヘリウム系は強相関原子系である。このような系を低次元に閉じ込めたときに、相関効果がどのように効くのか、というのが第一の興味である。

第二の、より物質に即した興味は次の点である。基板に吸着されたヘリウムは、吸着量の増加とともに一層毎に成長することが知られているが、特に第2層は、強く吸着力をもつ基板ではなく同じヘリウム層の上に乗っているために、第2層のヘリウム面密度を増やすにつれて、流体相、整合相（第1層目に対して簡単な整数比をもつような格子定数をもつ結晶格子の相）、不整合相が順次生じ、超低温において数々の興味深い量子多体現象を示す。

本学位論文の研究目的は、強い相互作用と低次元性のために量子効果が大きいと期待される2次元ヘリウム系に対して、特にフェルミ流体相から整合相にかけての状態を実験的に、極低温に

至るまで測定することである。流体相から整合相にかけての状態が興味深い理由は以下の通りである。まず、整合相は三角格子を形成していると考えられ、幾何学的なフラストレーションをもつ三角格子上の多体交換相互作用のために、Heのもつ核スピンの、特徴ある多体交換相互作用をもつ2次元量子スピン系をなす。本学位論文の指導教官である福山のグループにより数年前に明らかにされたように、熱容量測定から見たこのスピン系は極低温 ($90 \mu\text{K}$) まで相転移を示さず、熱容量に二重ピーク構造をもち、この系が、量子効果のために磁気秩序を阻まれた量子スピン液体と呼ばれる状態であることが提案されていた。

他方、流体相は低密度での理想的な2次元フェルミ気体から、密度の増加とともに、粒子の有効質量が増大したような、強く相互作用するフェルミ流体へ変化することが知られている。最近、HDの上に吸着した流体相に対する熱容量測定が1 mKの低温まで行われ、流体相から整合相への転移が、相関効果による相転移 (Mott - Hubbard 転移と呼ばれる) として記述できるとする主張がなされた。

本研究では、フェルミ流体相から整合相への移行を、熱容量をより低温で (詳しくは、 $100 \mu\text{K} < T < 80 \text{mK}$ という、約3桁におよぶ広い温度範囲で) 観測することにより、この転移の物理的性質を明らかにした。このような低温実験を可能とするために、本学位請求者は銅の核断熱消磁冷凍機を設計・製作し、世界的にも有数の装置を実現した。具体的に、 $200 \mu\text{K}$ 以下の超低温度を保ちつつ、1週間以上にわたって熱容量測定や核磁気共鳴測定などの物性実験を行うことが可能である。用いた試料としては、上記のように低温ではスピン自由度が重要であると期待されるので、グラファイトを1層の ^4He で覆った上に吸着した2次元 ^3He である。この系を選んだ理由は、 ^3He やHDの上の系にくらべて、原子間距離が短く、そのためにスピン交換相互作用のエネルギー・スケールが小さくなるので、他の自由度との分離が明確になることが期待されるためである。熱容量は断熱ヒートパルス法および緩和法によって測定した。

実験結果は以下の通り。低密度域では、熱容量は温度に比例し、フェルミ縮退しているが、その比例係数 (\propto 粒子有効質量 m^*) は密度の増加とともに6倍まで大きくなる。つまり密度とともに相互作用の強い (m^* の大きな) フェルミ流体へと移行する。整合相に近づくと、30 mK以上の温度での熱容量は急速に減少するものの整合相近傍まで存続し、一方 $T < 1 \text{mK}$ に緩やかなピークが成長してくることが見出された。1 mKというのはスピン交換相互作用程度の温度である。従来この領域は、詳しい密度依存性が調べられておらず、フェルミ流体相と整合相が共存する (相分離) と漠然と考えられていた。しかし、本結果では熱容量が両相の足し算では表せないのが、単純な2相共存では説明できない。従って、ここで示唆されるのは、相分離はしていないが、熱容量に二重のピーク構造を与えるような相の存在である。

本学位論文の考察の部分では、以上の実験結果を、三角格子に対する Hubbard 模型や t-J 模型 (相関電子系の模型) のスピン状態の理論計算と比較して、部分的に説明される箇所はあるが、より詳しい理論が待たれる、と結論した。

以上のように、本学位論文で新に得られた知見として、2次元 ^3He 系において、流体相から結晶相に至る領域で、強く相互作用したフェルミ液体相から、スピン自由度に絡むと思われる特徴ある熱容量の振る舞いをもつ相が、下地の詳細に依らず存在することが明らかになった。これは、

博士学位論文に十分値する重要な結果といえる。さらに、強く相互作用するフェルミオン系の物理学は銅酸化物高温超伝導体により発展をとげている一方で、フェルミオンであるという点で電子と ^3He は共通しているので、電子系とヘリウム系の類似点、相違点を探ることは興味深い。He系の特徴は、ここで示されたように、不規則性を導入すること無く粒子密度を変えることができる点や、温度を極低温に至るまで何桁にも亘って測定できる点にあり、これにより相関粒子系の物理の発展に今後も寄与することが期待される。

なお、本論文の一部は福山寛助教授、村川智、Christopher Bäuerle、辻太輔、本蔵耕平、神原浩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研究したものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、審査員全員により、博士（理学）を授与できると認める。