

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 榎富 龍一

本論文は”2次元反強磁性固体ヘリウム3における基底状態の探索”と題し、試料自身の核断熱消磁を試み0.01mKに至る超低温領域において単原子層固体ヘリウム3の磁化をNMRにより初めて測定したものであり、全7章から構成されている。

第1章は序論であり、本研究で取り扱う単原子層固体ヘリウム3の低次元系としての特徴、位置づけ、論文全体の構成が述べられている。

第2章では、吸着基盤として用いられるグラファイトの構造と、吸着原子が感じる皺状吸着ポテンシャルについて述べられている。単層固体ヘリウム3は、①グラファイト表面②1層の固体 $^4\text{He}$ を被覆した表面③2層のHDを被覆した表面上にヘリウム3原子を物理吸着することにより実現されるが、いずれも2次元3角格子を形成している。この吸着第1層、第2層の単原子層ヘリウム3について、面密度と温度をパラメーターとする相図が示されている。

第3章では、これまでの理論的・実験的背景と本研究の目的が述べられている。固体ヘリウム3の磁性は、大きなゼロ点振動による原子自身の直接の位置交換から生ずる交換相互作用で記述される。ヘリウム3原子はハードコアを持っており、その位置交換のためには、周りの原子を押し退けねばならない。その結果、2体のみならず3体、4体などの多体交換相互作用が重要となる。さらに2体、4体、6体は反強磁性的、3体、5体は強磁性的であり異なる2種類の相互作用が競合している。このフラストレーションの大きな系の基底状態の理論的予想が4体交換の強さをパラメーターとして古典系および厳密対角化による量子系について示されている。実験的には、グラファイト表面上の吸着第1層、第2層および2層のHD上の単原子層ヘリウム3について、これまでの比熱、帯磁率の結果を示した上で、本研究の目的が簡潔に述べられている。

第4章では、実験装置が簡単に述べられている。まず試料を mK 以下の温度領域に冷却するための効率的な核磁気冷凍機と一般的な温度計が示されている。

第5章は、3層HD上の単原子層固体ヘリウム3の実験および結果とその考察である。まずNMRセルの詳細に続いて具体的NMR装置と得られた信号から磁化を求める手順に触れた後、基盤の吸着表面積を決める方法や所定の面密度を得るための試料ガスの導入システムが示されている。特にHDガスについては、含まれる微量のオルソ水素をパラ転換する方法が述べられている。実験結果と考察は大

きく2つの部分に分けられる。まず低密度液相での磁化測定から、グラファイト基盤の欠陥にトラップされたアモルファス固体ヘリウム3の大きさを評価し、これを非磁性のアモルファス固体ヘリウム4で置換してきれいな単原子層固体ヘリウム3を生成した。次に2種類の面密度の反強磁性固相の磁化が約0.1mKまでの温度域で求められた。その振る舞いは、交換相互作用の約1/30の温度までゆるやかに増加し、スピングャップの存在を示す大きな減少は観測されなかった。さらに高温領域の磁化を多体交換相互作用ハミルトニアンの高温度展開式にフィットして、多体交換の大きさを評価すると、2層HD上の単原子層固体ヘリウム3の大きさとほとんど変わらないことが判った。また求められた交換相互作用の大きさから、これまでの理論では基底状態としてスピン液体相が予想されるが、スピングャップが小さく観測されなかった可能性を指摘している。

第6章は単原子層固体ヘリウム3自身に対する初めての断熱消磁の試みが詳しく述べられている。まず実験セルの詳細と実験手順に触れた後、寒剤を構成する銅原子核とグラファイト基盤中の<sup>13</sup>C核の磁化測定により断熱消磁が予想通りに動作していることが示されている。実験結果と考察は①常磁性相 ②単層固体ヘリウム4上の反強磁性相 ③2層のHD上の反強磁性相の三つの部分から成っている。この実験において試料温度の決定は非常に重要である。①では常磁性相固体ヘリウム3および銅原子核の磁化がブリリュアン関数に従うことを用いて、試料はむしろ銅原子核により間接的に冷やされていることを示し、試料温度を決めるヒートバスモデルが提唱されている。②,③ではそのヒートバスモデルを用いて測定された銅原子核系の温度から試料温度を決めている。こうして得られた磁化の温度依存性は約0.01mKの温度までゆるやかに増加し、スピングャップの存在を示す大きな減少は観測されなかった。以上の結果、それぞれの反強磁性相の試料について交換相互作用の1/30 或いは1/300 という従来よりも約一桁も低い温度まで冷却されたにもかかわらず、相転移やスピングャップの存在が確認されなかった。これをもとに2次元反強磁性固体<sup>3</sup>Heの基底状態は、スピングャップの存在しないスピン液体であることが指摘されている。

第7章は本論文の総括であり、本研究で明らかにされた2種類の単原子層反強磁性固体ヘリウム3に関する新しい知見の要約とともに将来の展望が述べられている。

以上をまとめると、本論文では2種類の単原子層固体ヘリウム3の磁化をNMRにより初めて0.01mKの温度領域まで測定したものであり、低次元磁性の物理を理解する上に貴重な情報を提供しており、物理学・理工学への寄与は大きい。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。