

審査結果の要旨

論文提出者氏名 池上 弘樹

本論文は”超低温における単原子層固体ヘリウム3の核磁性”と題し、0.1mKに至る超低温領域において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、グラファイト表面あるいは2層HDを吸着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層および2層のHD上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のべられている。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。これらの多体交換相互作用のWKB近似による大きさとその面密度依存性の理論的計算の結果が紹介されている。さらにこの多体交換相互作用ハミルトニアンから予想される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示されている。実験的には、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、実験装置が詳しく述べられている。まず試料を0.1 mKの温度領域に冷却するための効率的な核磁気冷凍機やNMRセルの詳細が紹介されている。次に具体的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。

第5章は、吸着第1層の固体ヘリウム3についての実験結果とその考察である。0.1mKまでの低磁場磁化のワイス温度から交換相互作用(J)の大きさと符号の面密度変化が初

めて実験的に求められている。その結果、有名な $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 整合相が強磁性的であり、面密度の増加とともに狭い反強磁性領域を経て、大きな強磁性ピークを示した後第1層完結時には常磁性になることが明らかにされた。高密度側の非整合相のJの符号の変化は、第3章で述べられたWKB近似により、競合する面内の2体と3体の多体交換の密度変化で説明できることが判った。一方低密度の $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 整合相での原子交換では、ヘリウム3原子間ポテンシャルの他にグラファイト基盤からの皺状吸着ポテンシャルがトンネル障壁となるため、構造的に3体交換が有利となり強磁性的になることを指摘した。さらに吸着第1層と2層の高密度でのJの面密度依存性の類似から、吸着第2層の固体ヘリウム3の磁性について、第3層に存在する液体を介在したRKKY相互作用の寄与が小さいことを指摘している。

第6章は、2層のHD上の単原子層ヘリウム3についての実験結果と考察である。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、この寄与を除いた反強磁性固相の磁化が求められた。その振る舞いは、交換相互作用の約 $1/20$ の温度まで冷却してもゆるやかに増加し、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的高温展開式にフィットして、多体交換の大きさを評価すると、4体交換と有効2体交換の比の面密度依存性が小さいことが判った。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、強磁性相の境界に近く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種類の単原子層固体ヘリウム3に関する新しい知見が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0.1mK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・物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。