

論文内容の要旨

論文題目 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

氏名 栢富 龍一

【研究動機】

グラファイト上の2次元 ^3He は面密度が下地層の $4/7$ に達したとき三角格子を組み、 $4/7$ 整合相と呼ばれる層を形成して固体になる。 $4/7$ 整合相での ^3He 間の相互作用は反強磁性的であることから幾何学的なフラストレーションが生じる。また、 ^3He 間には剛体球的な相互作用が働くため3体以上の高次の直接交換相互作用が重要になってくる。偶数体の交換は反強磁性的、奇数体の交換は強磁性的な相互作用が働くため交換相互作用が競合した系である。このことは電子系と大きく異なる点であり、2次元 ^3He の物理をユニークにすると同時に興味深いものになっている。

このような系において厳密対角化を用いた理論計算の結果、基底状態はスピナー重項のスピン液体状態であり、励起状態($\text{spin}=1$)と基底状態($\text{spin}=0$)の間にスピギャップ(mK程度)が存在することが報告されている。実験的には $100\mu\text{K}$ 程度までの磁化測定からのスピギャップ($100\mu\text{K}$ 程度)が存在すると見られている。しかしながら、比熱測定からはスピギャップの存在を確認することは出来ず、むしろ基底状態と励起状態の間に多数の低励起状態が存在していて、基底状態はフラストレートした量子的に乱れた状態(frustrated disordered ground state)であると考えられている。

この2つの異なる主張に決着を付け2次元反強磁性固体 ^3He の基底状態を解明するため、今回我々は2次元反強磁性固体 ^3He の直接核断熱消磁を用いて $100\mu\text{K}$ 以下の前人未到の温度領域まで冷却し核磁気共鳴による磁化測定を行う。

【実験装置】

2次元固体 ^3He の直接核断熱消磁に用いた実験セルを図1に示す。吸着基盤にはグラブオイル($9\text{mm}\times 9\text{mm}$)を100枚程度使用しており(c), 表面積は 13m^2 程度である。実験手順

は初めに希釈冷凍機と銅の核断熱消磁(1 段目磁場中有効モル数約 30 mol)を用いて 2 段目である ^3He (約 $150 \mu\text{mol}$) 及び Cu(有効モル数約 38 mmol) に初期磁場(B_i)5500 Gauss が印加された状態で初期温度(T_i)200 μK 程度まで予冷する. その後, 超伝導熱スイッチ(g)を用い断熱状態を実現した上で 2 段目の磁石 (a) を最終磁場 (B_f)50 Gauss(25 Gauss)まで 17 時間程度かけてゆっくりと消磁する. 消磁終了直後から最終磁場を利用して核磁気共鳴(CW 法)を繰り返しながら自然な温度昇温過程で磁化測定を行う.

初めに 2 段目の核断熱消磁が順調に行われているかを判断するため, グラフオイルと融着されている銅フォイル中の銅の核スピンのグラフォイルに含まれる 1% の ^{13}C の核スピンの磁化を測定した. $B_i = 5500 \text{ Gauss}$, $T_i = 280 \mu\text{K}$ から $B_f = 150 \text{ Gauss}$ の直接核断熱消磁の結果, 150 Gauss までは Cu も ^{13}C も理想的に冷却されている.

[常磁性固体 ^3He]

このようなスタイルでの核断熱消磁では ^3He 自身の温度を決めることは非常に困難である. そこでまず磁化測定を行うことで ^3He 自身が温度計になる常磁性固体 ^3He (面密度 9 nm^{-2}) の直接核断熱消磁を行った(図 2 a). ブリルアン関数を用いてスピン偏極を温度に変換したものが図 2 b である. 消磁終了直後の ^3He の温度は $B_i = 5500 \text{ Gauss}$, $T_i = 240 \mu\text{K}$ から $B_f = 50 \text{ Gauss}$ までの消磁で $T_f = 12 \mu\text{K}$, $T_i = 250 \mu\text{K}$, $B_f = 25 \text{ Gauss}$ の消磁で $T_f = 8 \mu\text{K}$ であり ^3He は良く冷却されている.

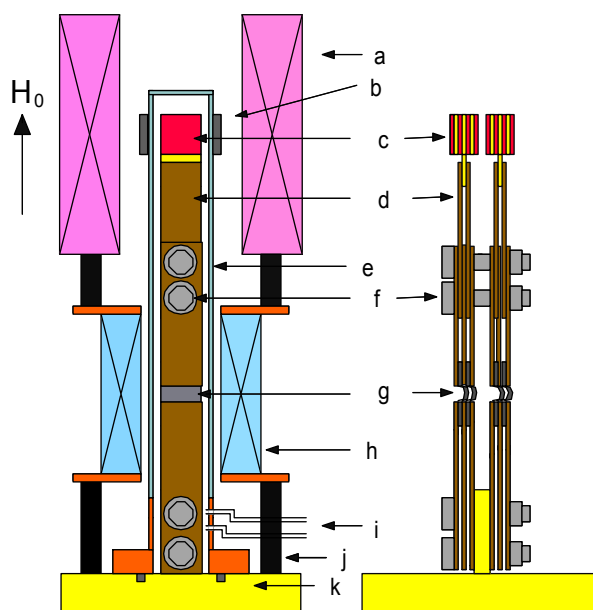


図 1 : 実験セル.

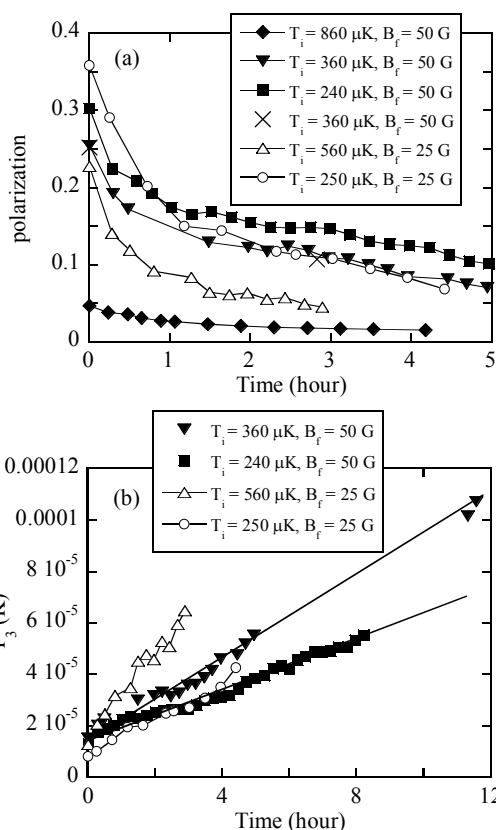


図 2 : 常磁性固体 ^3He の直接核断熱消磁.
初期磁場 5500 Gauss.

[固体 ^4He 上の反強磁性固体 ^3He]

実験結果

試料は 1 層目に非磁性の固体 ^4He を用い、2 層目には ^3He のみで固体になる量より少なめの ^3He と少量の ^4He を入れることにより 4/7 整合固体 ^3He を形成している。1 段目の核ステージと熱平衡状態での磁化測定の結果をキュリー-ワイス則で解析を行った結果、ワイス温度 θ は -0.9 mK であった(図 3)。さらに、6 体の交換まで考慮した高温展開で解析した結果、多体交換パラメータは $J_2^{\text{eff}}/J_4 = -2.0$ ($J_5/J_4 = 0.35$, $J_6/J_4 = 1$ は仮定)であり、厳密対角化を用いた理論計算から導かれる基底状態はスピン液体の領域に属している(図 3 挿入図)。

次に $B_i = 5500 \text{ Gauss}$, $T_i = 190 \mu \text{ K}$ から $B_f = 50 \text{ Gauss}$ まで直接核断熱消磁を行った結果を図 4 に示す。温度は常磁性固体 ^3He の結果を参考にして構築した熱フローモデルにより評価したものであるが $10 \mu \text{ K}$ 程度まで冷却できていると思われる。

考察

$10 \mu \text{ K}$ ($T/J \sim 1/30$) まで磁化は緩やかに増加し、スピングャップの存在を示唆するような異常な振舞いは観測されなかった。したがって、もしスピングャップが存在しても $10 \mu \text{ K}$ 以下であろう。この低温での磁化の緩やかな増加は $\text{Spin}=1$ の低励起状態が多数存在していることを強く示唆している。このことより AF/FM の境界に近い領域ではスピングャップが急速に減少していると考えられる。

$100 \mu \text{ K}$ 程度まで 4/7 整合相の比熱測定の結果からはスピングャップは観測されておらず、むしろ 2 つ目のピークより低温で比熱が温度に比例することから多くの低励起状態の存在を強く示唆している。このことは我々の測定結果とコンシステントである。

また、 T/J で比較すると今回の実験は交換相互作用を増強させた HD2 層上、HD3 層上の実

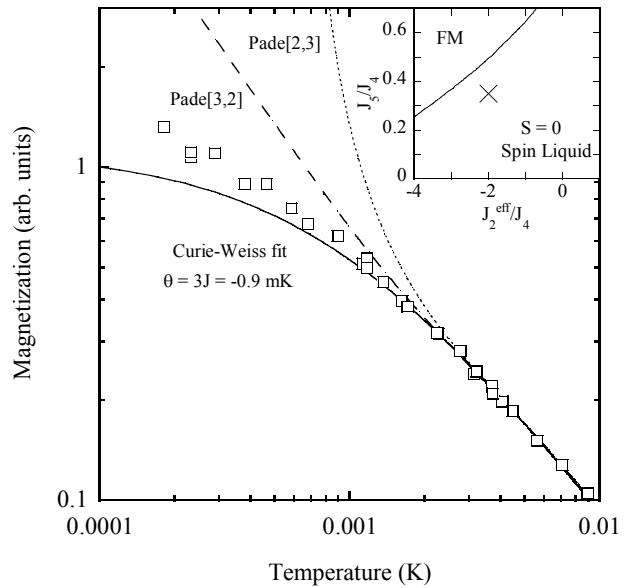


図 3 : 熱平衡状態での 4/7 整合固体の磁化。

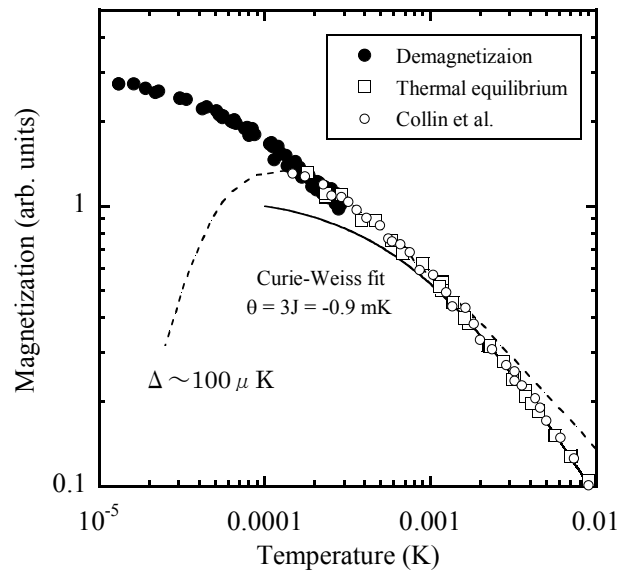


図 4 : 固体 ^4He 上の反強磁性固体 ^3He の直接核断熱消磁。

験と同程度まで冷却されていることになる($T/J \sim 1/30$). HD 上の系でも同様にスピングャップは観測されておらずコンシステントな結果である.

次に我々と同じ系である Collin らの 4/7 整合相の磁化測定の結果(図 4 ○印)との比較を示す. 測定された磁化の温度依存性は $100 \mu\text{K}$ まで非常に一致している. Collin らは低温部を解析することにより $100 \mu\text{K}$ 程度のスピングャップ Δ が存在すると主張している. しかし, 今回の我々の実験から見て彼らの主張には無理がありスピングャップは非常に小さいかほとんどゼロと思われる.

[HD 2 層上の反強磁性固体 ^3He]

固体 ^4He より格子間隔の大きい HD 2 層上の反強磁性固体 ^3He の直接核断熱消磁について述べる. HD 2 層上の ^3He は低密度固体が実現するため大きな交換相互作用が得られる. このことは T/J を考えれば相対的に低温まで冷却出来たことになり, 基底状態の探索に関して有利である. 13.5 K で等温吸着圧測定を行うことにより, グラファイト上に 2.05 層の HD を準備した. 1.5 mK 以下の熱平衡状態での温度依存性(図 5 ○印)は池上ら結果(図 5 菱形)を再現しておりワイス温度 θ は -10 mK 程度である.

$B_i = 5500 \text{ Gauss}$, $T_i = 200 \mu\text{K}$ から $B_f = 50 \text{ Gauss}$ まで直接核断熱消磁を行った結果を図 5 に示す. 温度は上述の固体 ^4He 上の実験と同様に熱フローモデルにより評価したものである.

HD 2 層上の反強磁性固体 ^3He については測定精度上厳密な議論は出来ないが, 磁化は低温になるに従い緩やかに増加している. 温度で $10 \mu\text{K}$, T/J で $1/300$ 程度までスピングャップの存在を示唆するような異常な振舞いは見られなかった.

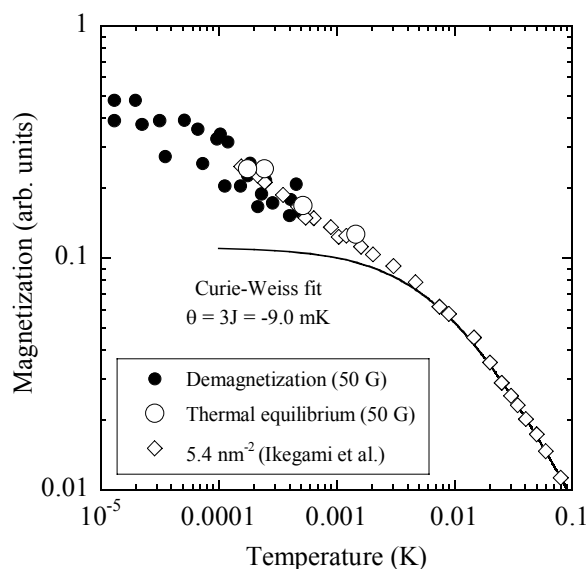


図 5 : HD 2 層上の反強磁性固体 ^3He の直接核断熱消磁.

[結論]

直接核断熱消磁法を用いグラファイト上の 1 層目の常磁性固体 ^3He , 固体 ^4He 上の反強磁性固体 ^3He , HD2 層上の反強磁性固体 ^3He を $10 \mu\text{K}$ 程度まで冷却することに世界で初めて成功した. 2 次元反強磁性固体 ^3He の磁化は緩やかな増加を続け厳密対角化を用いた理論計算から示唆されるようなスピングャップの存在を確認することはできなかった. この実験から $10 \mu\text{K}$ の温度領域においても長距離秩序は観測されず, スピングャップはほとんどゼロか存在しても $10 \mu\text{K}$ あるいは $J/300$ 以下である. 以上の結果からこの系の基底状態としてはスピングャップのないスピン液体である可能性が非常に強い.