

低温・強磁場下における二次元固体 ^3He の磁化測定

石本研究室 46148 根間 裕史

【背景と目的】

2次元3角格子反強磁性体は、フラストレーションのある磁性体で disorderd ground state が実現する可能性があり、多くの研究がなされている。グラファイト上に吸着させて得られる2次元固体 ^3He の反強磁性整合相(4/7相)もフラストレーションが非常に強い典型的な例である。

3角格子を組んでいる整合固体4/7相では2つのフラストレーションが同時に起こる。1つは幾何学的フラストレーションである。 ^3He の核スピン1/2を担っており、非常に量子性が強く基底状態は一意的には決まらない。もう1つは多体交換の競合である。 ^3He は零点振動が大きく、固体中で隣接する ^3He 原子同士の位置交換により交換相互作用が生じる。このとき ^3He 原子はハードコアを持っているので、2体交換だけでなく3体交換や4体交換といった多体の交換も重要であり、偶数体交換による反強磁性相互作用と奇数体交換による強磁性相互作用が競合する。

少数系による厳密対角化によれば、4/7相の基底状態はギャップがある量子スピン液体状態であり、約1mKでテスラオーダーの磁場を印加した場合には4副格子のuuud相が現れ磁化過程に1/2プラトーが存在すると予測されている。しかし最近の低温での帯磁率測定[1]や比熱測定[2]の結果によると、基底状態はギャップレスの量子スピン液体状態であることがわかってきた。それでは、磁場を印加した場合に基底状態はどのようになっているか。実際に強磁場下で4/7相基底状態の磁化過程を測定することが本研究の目的である。

【実験】

温度1.1mK、最高磁場10Tの条件下でグラファイトに吸着させた2次元固体 ^3He の磁化測定を行った。試料を冷却するために、希釈冷凍機と核断熱消磁冷凍機を組み合わせ用いた。磁化は、ファラデー法で測定した。ファラデー法は勾配磁場中で試料に働く力を測定して試料の磁化を得る方法である。実際のセルでは2次元 ^3He の磁化より2桁以上大きいバックグラウンドの磁化を相殺するため、ダブルグラディエント方式を採用した。

測定はまずグラファイト上に ^3He をのみを吸着させて得られる試料($^3\text{He}/^3\text{He}/\text{Gr}$ 系と呼ぶこととする。)で行った。試料の ^3He 全密度と各層に形成される2次元 ^3He の面密度と相を表1に示す。正しく磁化を測定できているか確かめるため、4/7相以外に常磁性相や強磁性相でも測

^3He 全密度 (nm^{-2})	1層目 (nm^{-2})	2層目(nm^{-2})	3層目 (nm^{-2})
10.5	10.5 (常磁性相)	—	—
17.8	11.4 (常磁性相)	6.4 (4/7相)	—
24.0	11.4 (常磁性相)	8.2 (強磁性相)	4.4 (液体)

表 1: $^3\text{He}/^3\text{He}/\text{Gr}$ 系試料の各層の面密度

^3He の全密度 (nm^{-2})	1 層目 (nm^{-2})	2 層目 (nm^{-2})	3 層目 (nm^{-2})
6.0	12.0 (^4He)	6.85 (4/7 相) (その内 1.0 は ^4He)	0.15 (液体)
11.0	12.0 (^4He)	8.63 (強磁性相) (その内 1.0 は ^4He)	3.37 (液体)

表 2: $^3\text{He}/^4\text{He}/\text{Gr}$ 系試料の各層の面密度と相

定をした。その後、グラファイト上に ^4He を 13.0 nm^{-2} 吸着させた後 ^3He を吸着させて得られる試料 ($^3\text{He}/^4\text{He}/\text{Gr}$ 系と呼ぶことにする。1 層目は ^4He のみで覆われている。) で磁化測定を行った。試料の各層に形成される 2 次元 ^3He の相と面密度を表 2 に示す。この系の 4/7 相でも磁化測定を行うのは $^3\text{He}/^3\text{He}/\text{Gr}$ 系での測定結果の信憑性を確かめるためである。

【実験結果】

磁化測定を行った結果ダブルグラディエント方式によりバックグラウンドの磁化を 2 次元 ^3He 磁化と同じオーダーまで抑えることができた。 $^3\text{He}/^3\text{He}/\text{Gr}$ 系の測定結果を図 1 に示す。縦軸はバックグラウンドの磁化を除いた ^3He のみの磁化である。

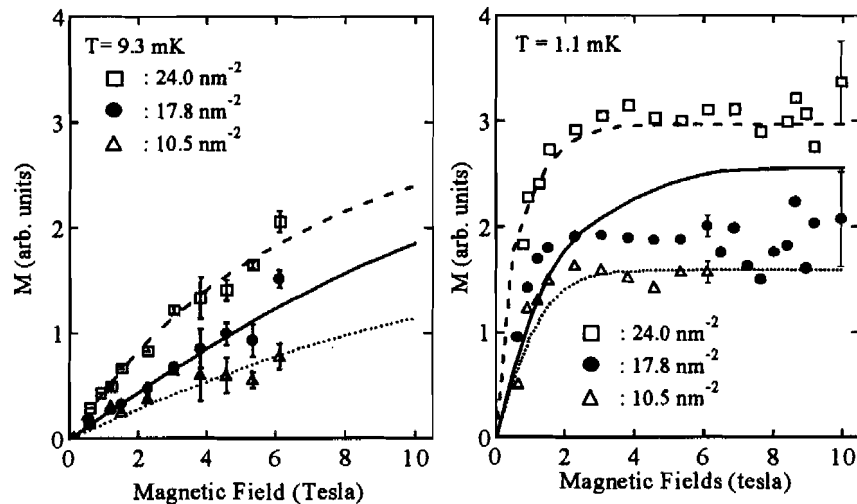


図 1: $^3\text{He}/^3\text{He}/\text{Gr}$ 系で測定した試料の磁化過程

測定結果が妥当なものか検討するために、分子場近似による計算値と比較する。分子場近似による計算値は飽和磁化の値と交換相互作用 J の値がわかれば求まる。図 1 中の点線は常磁性の 10.5 nm^{-2} に対するブリュアン関数による計算値である。この飽和磁化 1.59 が面密度に比例するとすると 17.8 nm^{-2} 及び 24.0 nm^{-2} に対する固相の飽和磁化を求まる。交換相互作用の値は 4/7 相では $J = -1 \text{ mK}$ 、強磁性相では $J = 2 \text{ mK}$ を用いると磁化の計算値は実線のようになる。実験値と計算値を比較すると、 24.0 nm^{-2} ではある程度一致しているので本実験セルで磁化測定が正しく行われているといえる。一方、4/7 相を含む 17.8 nm^{-2} については、 9.3 mK では実験値と計算値が一致するが 1.1 mK では一致せず、特に約 2 T 以上では計算値に比べて磁化が抑制されている。その原因は 2 層目の 4/7 相によるものと考えられる。

次に $^3\text{He}/^4\text{He}/\text{Gr}$ 系で磁化測定をした結果を図 2 に示す。計算値を求める際、飽和磁化は $^3\text{He}/^3\text{He}/\text{Gr}$ 系の 10.5 nm^{-2} の値 1.59 を用いた。交換相互作用は 4/7 相では $J = -1 \text{ mK}$ 、強磁性

相では ^3He の密度を考慮して $J = 2$ mK を用いた。実験値と計算値を比較すると ^3He の全面密度が 11.0 nm^{-2} のときはある程度一致しており、 $^3\text{He}/^4\text{He}/\text{Gr}$ 系でも正しく測定が行われていることがわかる。計算値の飽和磁化は共通の値を

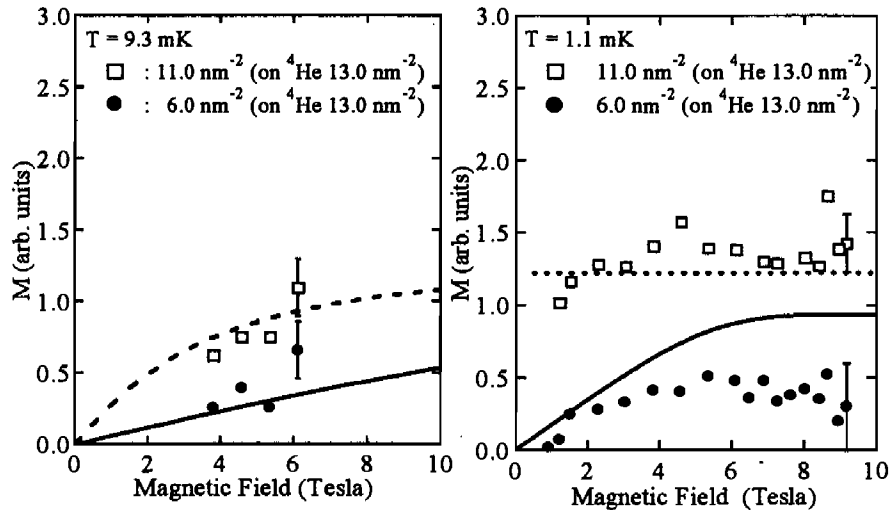


図 2: $^3\text{He}/^4\text{He}/\text{Gr}$ 系で測定した試料の磁化過程

もとに計算したので $^3\text{He}/^3\text{He}/\text{Gr}$ 系と $^3\text{He}/^3\text{He}/\text{Gr}$ 系の測定結果は矛盾しないといえる。 ^3He の全面密度が 6.0 nm^{-2} のとき実験値と計算値は 9.3 mK である程度一致しているが、 1.1 mK では計算値に比べて小さい。 $^3\text{He}/^3\text{He}/\text{Gr}$ 系と同様に $^3\text{He}/^4\text{He}/\text{Gr}$ 系でも 4/7 相の磁化が抑制されていることがわかった。磁化を偏極率に直したときの磁化過程を図 3 に示す。4/7 相の基底状態の偏極率は、温度 1.1 mK 、 10 T 程度の磁場中에서도約 $1/2$ 以下に抑えられており磁場中には安定な相が存在すると推測できる。

【今後の課題】

今回得られた測定結果から、温度 1.1 mK で 4/7 相の磁化過程にはおそらく磁化プラトーが存在すると考えられるが、測定時の誤差が大きいためプラトーの大きさを正確に知ることはできなかった。したがって磁場中の相が $uuud$ 相であるかどうかは判断できない。誤差の原因を解明し、より精度のよい測定を行う必要がある。

【参考文献】

[1] R. Masutomi et al., Phys. Rev. Lett. 92 025301 (2004)
 [2] K. Ishida et al., Phys. Rev. Lett. 79 3451 (1997)

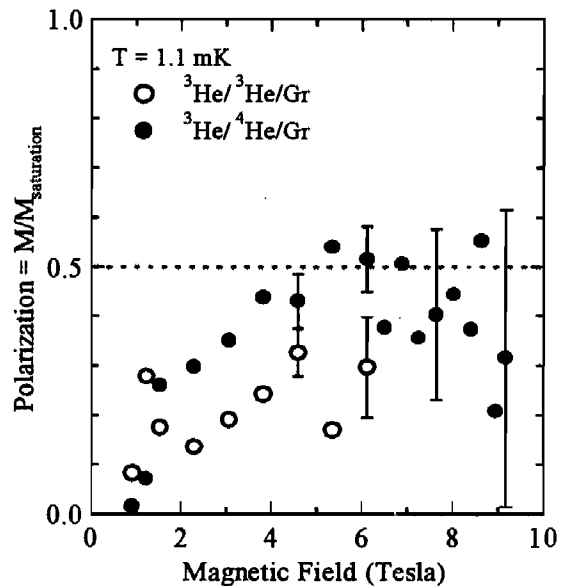


図 3: 4/7 相の磁化過程