

論文内容の要旨

論文題目

核磁気共鳴法による単原子層ヘリウム3の量子相転移の研究

(NMR Studies of Quantum Phase Transitions in Monolayer Helium Three)

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻

村川智

擬2次元系である高温銅酸化物超伝導体の発見以来2次元フェルミ粒子系は大きな関心をもたれている。その中でも本研究で用いているグラファイト上に吸着した単原子および数原子相のヘリウム3(^3He)は強く相互作用する2次元フェルミ粒子系の量子物性を研究する上で理想的な系である。この系は不純物を入れずに幅広く面密度、つまりは相互作用の大きさを変更させることができ、 ^3He の吸着第2層には低面密度から順にフェルミ流体、整合相、不整合固相が存在し、超低温で興味深い量子多体现象が現れることが知られている。

2次元 ^3He は ^3He の大きなハードコア斥力の影響で2体交換だけでなく、3体、4体等の高次の交換が重要であり、これがこの系に複雑な磁気的な性質を与えている。特に4/7整合相と呼ばれ、吸着第1層に対し4/7の密度比を持つ3角格子であるとされている吸着第2層 ^3He の整合相 [1]は、幾何学的な強いフラストレーションに加え、多体交換相互作用の競合により、きわめてフラストレーションの強い核スピン1/2の2次元スピン系である。過去の熱容量測定 [2]や磁化測定 [3]から4/7整合相は磁気的な基底状態として、ギャップレスの量子スピン液体状態であることを示している。さらに、面密度を増大させると強磁気的な磁化の振る舞いをみせはじめることが知られており、粒子間距離が変化することで、多体交換相互作用の競合具合が変化することで説明されている。

4/7整合相以下の面密度では、近年の熱容量測定から、面密度の増加とともに有効質量が発散的に増大するフェルミ流体的な振る舞い [4,5]から、特異な性質を持つ量子相を経て、4/7整合相へと連続的に相の性質を変えることが示唆された [5]。この領域は従来フェルミ流体相と4/7整合相との2相共存状態 [6]であると考えられてきたが、それではこの熱容量測定の結果は説明できない。そこで、この新たな相は、4/7整合相をMott局在相とし、それにホールドープした系であり、この流体相から4/7整合への相転移がMott-Hubbard型の量子相転移であるという主張がなされた。この考えは、Mott局在相にホールドープした銅酸化物高温超伝導体の物理と密接な関係があり非常に興味深い。本研究の系ではdisorderを一切導入することなく粒子密度を大きくしかも精密に変えることができる、

つまり理想的なフィリング制御ができるのが電子系の研究とは異なり、大きな利点として挙げられる。

本研究では ^4He を1層プレコートしたグラフィイト上に吸着した2次元 ^3He を核磁気共鳴の手法を用いて、70 μK の超低温から500 mKの約4桁にわたる広い温度範囲で、フェルミ流体的な振る舞いを見せる低面密度から強磁性的な振る舞いが現れる高面密度まで幅広い面密度範囲で磁気的性質を測定した。吸着第1層に ^4He を選択したのは、基盤の不均一な部分にアモルファス上に吸着した ^3He 原子や超低温までキュリー則に従う吸着第1層高面密度固体 ^3He を非磁性の ^4He に置換しその影響を除去するだけでなく、より高面密度な ^4He の吸着第1層による従来とは異なる整合相の面密度を得るためである。核磁気共鳴法による局所磁場に敏感な共鳴磁場やスピンスピン緩和時間と関連する共鳴線幅などの測定から、ミクロな性質がより明らかになることが期待される。過去に吸着第1層が ^3He の系でより面密度刻みの荒い数mKまでの測定があるが[7]、100 μK 以下の超低温まで、細かい面密度で測定を行ったのは本研究が初めてである。

磁化の温度依存性を図1に、等温曲線を図2に示す。これらより、本研究で測定した面密度領域において大きく四つの領域に分けられることが示された。また、全ての領域において共鳴磁場は磁化の成長とともに線型に移動した。これは核スピンの作る双極子場による反磁場の影響であり、これからスピンの局所的な配置について知見が得られる。その反磁場係数 D の逆数の面密度依存性を図3に示す。共鳴線幅は10 mK以上の高温では測定の誤差内で面密度依存および温度依存はなかった。温度 $T \leq 3\text{mK}$ では温度変化を示し、最低温度付近での共鳴線幅には密度依存性があった(図4)。温度変化を示し始める温度が、交換相互作用の大きさ($J \sim 1\text{mK}$)程度であることはその温度付近から短距離相関が成長するため、exchange narrowingの効果が抑制されてしまうためと考えることがで

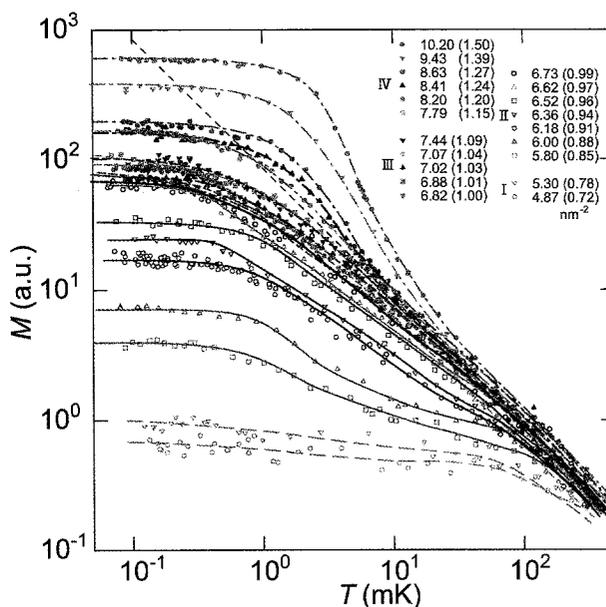


図1: 磁化の温度依存性。図中の点線は4/7整合相密度のものがキュリー則に従うときの磁化を示したものである。

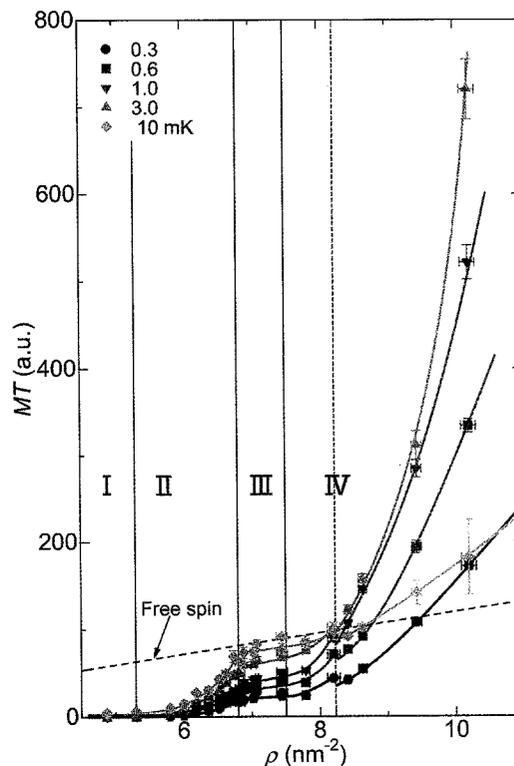


図2: 磁化と温度をかけたものの等温曲線。図中の実線は自由スピンのときの磁化の値である。

きる。共鳴線幅の密度依存性はその密度における ^3He 粒子の移動度を反映しており、構造を理解するのに重要な指標である。

5.30 nm^{-2} 以下の低面密度領域 (領域 I) では 100 mK 以下の超低温で磁化が温度依存しないパウリ常磁性を示し、フェルミ流体論でよく記述できる振る舞いをする。このフェルミ流体の相互作用を示すランダウパラメタは $F_0^0 \approx -3/4$ となり、スピンの向きは揃う方向に相互作用が働いていることが示される。

さらに面密度を増加させ、 $4/7$ 整合相 (6.8 nm^{-2}) 直下近傍の面密度領域 (領域 II) では、整合相面密度に近づくにつれ磁化が急速に大きくなっている。また、低温での共鳴線幅は面密度とともに増大している。これらの現象は流体相-整合相の 2 相共存では説明できず、この領域が面密度ともに一様に変化する相であることを示し、熱容量測定の結果を支持する。共鳴線幅の変化は、面密度が増大することで粒子の移動度が減少し、exchange narrowing 効果が抑制されることからであると考えられる。一方、反磁場係数 D は面密度によって変化しているのが観測された。核スピンの平均的に分布している一様相では面密度に対して D は変化することはない。このことから核スピンの分布は平均的ではなく、短距離での相関を考慮に入れる必要がわかる。測定結果は局所磁場がより大きくなる、つまり短距離では強磁性的な相関が強いことを示している。面密度が低いほうがより顕著に強磁性的な相関を示すことは領域 I のフェルミ流体が強磁性的な相互作用を示しているのと同符する。このことから、密度の上昇とともにフェルミ流体から反強磁性的な整合相に連続的に変化していることが改めて示された。しかしながら、現在のところ三角格子のホールドープでは強磁性的な相互作用は理解できない。よって、新たなモデルを考えなければならない。

整合相より面密度の大きい領域 (領域 III) では、磁化の密度変化も緩やかになる。反磁場係数 D の面密度依存性もなくなる。また低温における共鳴線幅は整合相の面密度の前後で不連続に小さくなる。共鳴線幅が小さくなるのは、整合相に足された粒子によって、再び粒子の移動度が増大したと考えることができる。この領域の整合相に対する磁化の増分は、低温までキュ

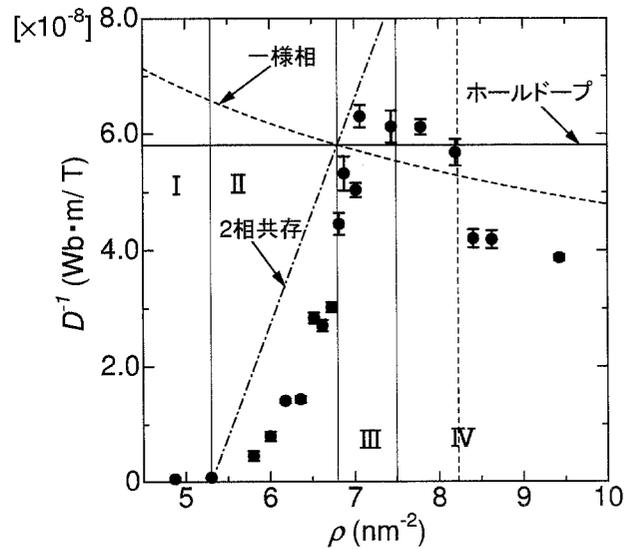


図 3: 反磁場係数 D の逆数の面密度依存性。図中の線はそれぞれ一様三角格子、ホールドープ三角格子、2 相共存を仮定したときの値。

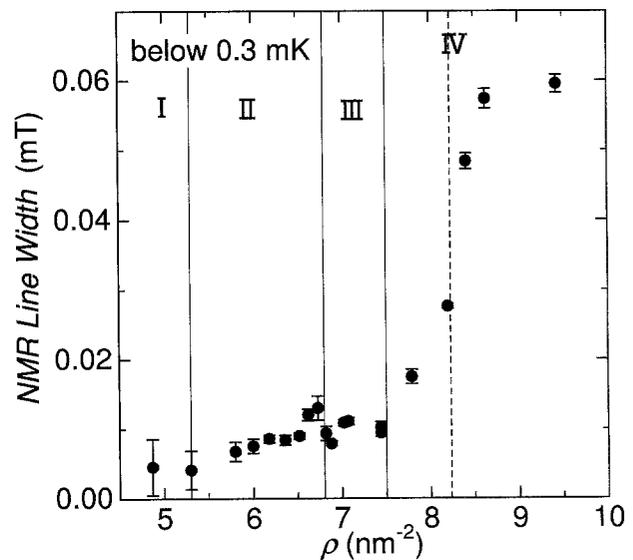


図 4: 共鳴線幅の面密度依存性。

リ一則的に増大している。よって追加された粒

子は非常に大きな有効質量を持つ流体もしくは小さな相互作用しかない局在相と考えられる。この領域において反磁場係数は平均場的に考えられるものよりも小さい。このことは、核スピンの分布が領域Ⅱのときとは異なり、短距離的には反強磁性的な分布がより実現していることが示される。磁化の増分は $500 \mu\text{K}$ 以下の低温で減少する振る舞いが現れる。この現象は磁化の増分が絶対零度で消失するように見られる。これは追加された粒子のみがスピン一重項的な秩序状態を作成していると考えられる。

さらに面密度をあげていく ($\rho/\rho_{4/7} > 1.1$) と強磁性的な振る舞いが現れる領域 (領域Ⅳ) に入る。磁化曲線からは零磁場に外挿した磁化も大きな有限の値を持ち、自発的な磁化であることが予測される。反磁場係数 D の密度依存性から、この領域はさらに二つ (領域Ⅳ-a、領域Ⅳ-b) に分けられ、それぞれは一様相であることを示している。この領域Ⅳ-bにおいて D は平均場的に考えられるものより大きい。よって、領域Ⅳ-bに入り再び短距離的な相互作用は強磁性的になることが考えられる。領域Ⅳ-aは、領域Ⅲでは相関の弱かった追加粒子が面密度を増すことで相互作用を持ち始め、その結果、強磁性を示していると考えられる。領域Ⅳ-bに入ると磁化の増分も大きくなり、追加した粒子の飽和磁化以上になる。よって、この領域では吸着第2層の整合相の性質が大きく変化していることを示している。つまり、追加された粒子が $4/7$ 整合相を破壊し、第2層が下地に不整合な固相へと変化していることが考えられる。この2次元 ^3He 系は多体交換の競合により、面密度によって交換相互作用の大きさが大きく変化することが知られており、整合相から不整合固相に移り変わることで第2層の磁氣的性質が大きく変化していると説明できる。

これらのように ^4He をプレコートしたグラファイト上に吸着した2次元 ^3He は低面密度のフェルミ流体から反強磁性的な整合相を経て、強磁性的な振る舞いが見られる高面密度までさまざまに変化することが確認された。短距離相互作用も強磁性的なものから、反強磁性的なものになり、再び強磁性的なものになる様子がみられた。特に、領域Ⅱにおいて短距離相互作用が強磁性的であるということは、従来考えられていたモデルでは説明が困難であり、新たな理論が必要である。また、領域Ⅲの磁化異常も初めての知見であり、この機構も実験的、理論的に更なる研究が望まれる。

参考文献

- [1] V. Elser, Phys. Rev. Lett. **62**, 2405 (1989).
- [2] K. Ishida, M. Morishita, K. Yawata, and H. Fukuyama, Phys. Rev. Lett. **79**, 3451 (1997).
- [3] R. Masutomi, Y. Karaki, and H. Ishimoto, Phys. Rev. Lett. **92**, 025301 (2004).
- [4] A. Casey, H. Patel, J. Nyéki, B. P. Cowan, and J. Saunders, Phys. Rev. Lett. **90**, 115301 (2003).
- [5] Y. Matsumoto, D. Tsuji, S. Murakawa, H. Akisato, H. Kambara, and H. Fukuyama, J. Low Temp. Phys. **138**, 271 (2005); 松本洋介、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 2003年度 博士論文.
- [6] D. S. Greywall, Phys. Rev. B **41**, 1842 (1990).
- [7] C. Bäuerle, Y. M. Bunkov, S. N. Fisher, and H. Godfrin, Czech. J. of Phys. **46**, 399 (1996).