

VII-5. 低温物性グループ

助教授 福山 寛,
講師 富永 昭,
助手 森下将史,
大学院生 (7名)

【1】吸着 ^3He 薄膜の2次元核磁性の研究

グラファイト表面に吸着したヘリウム3 (^3He) 薄膜の第2層目が示す核磁性を、昨年度完成した核断熱消磁冷凍機を用いて80 mKから300 μK までの超低温度域で比熱測定を行うことにより研究した。この系は原子配列の2次元性が非常に良く、核スピン ($S=1/2$) 間の交換相互作用 ($J \sim 2 \text{ mK}$) が完全に等方的かつ双極子-双極子相互作用に比べ3桁以上と大きい。そのためこの系は、ほぼ理想的な2次元量子スピン系のモデル物質として最近注目されている。また、 ^3He の吸着面密度 (ρ) を変えることにより相互作用の大きさ (さらに符合も) が容易に広い範囲で可変であるという特徴をもつ。

図1に $\rho=0.23 \text{ \AA}^{-2}$ のときの比熱測定の結果を示す。この面密度はスタンフォード大学と共同で行った磁化測定から判断して、2次元三角格子上的強磁性ハイゼンベルグ模型で良く記述できる強磁性相と、それに比べて磁化のずっと小さな恐らくは反強磁性相との混晶試料に対応する。比熱は3 mK付近に緩やかなピークをもち、高温では $1/T^2$ に漸近する。この辺りの振舞いはGreywall (1990) による測定と良く一致する。一方、ピークより低温域では T に比例して比熱が減少することがこの実験から初めて明らかになった。緩やかな比熱のピーク付近ではスピン配列の短距離秩序が成長していると考えられるが、 J の1/10の低温まで長距離秩序状態への相転移を示す異常は観測されない。これは有限温度の相転移が揺らぎのために禁制されている2次元系特有の現象として理解できる。低温側の T に比例する振舞いは2次元強磁性スピン波理論とよく一致するので、この面密度で強磁性相と共存する相の比熱すなわち J の大きさはかなり小さいと考えられる。

以上のように、グラファイト表面に吸着した面密度 0.23 \AA^{-2} 以上の ^3He 薄膜の第2層目は、現在実験的に得られる最も理想的な三角格子上的2次元ハイゼンベルグ強磁性体の一つであることが分かった。今後、強磁性相だけでなく低密度領域に存在する反強磁性相の単相試料についても同様な比熱測定を行い、幾何学的なフラストレーションのある2次元反強磁性相の基底状態と素励起について研究する予定である。

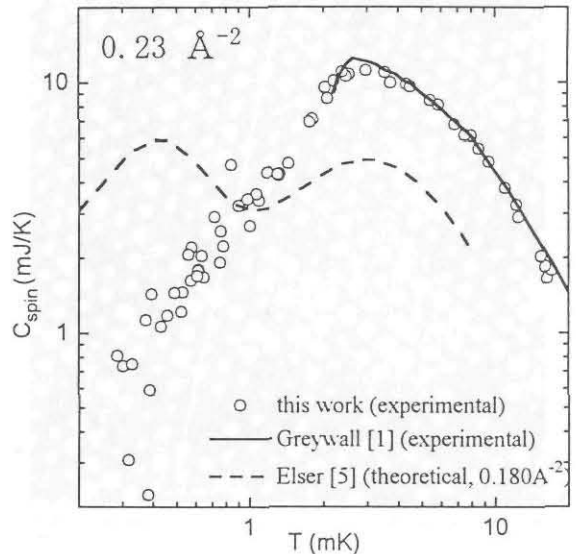


図1. グラファイト上に吸着したヘリウム3薄膜の強磁性相の比熱. 点線は反強磁性相に対する理論曲線 (カゴメ格子を仮定) .

【2】2次元フェルミ流体の研究

平坦な基盤上に物理吸着した膜厚100 \AA 以下のヘリウム4 (^4He) 薄膜に少量のヘリウム3 (^3He)

を混入すると、零点エネルギーの違いにより ^3He が ^4He の上に分離して浮かび、 ^3He の単原子層膜を形成する。この系は十分低温ではほぼ理想的な2次元フェルミ液体として振舞うと考えられ、2次元の ^3He 超流動状態への相転移といった新しい物理現象の発現が期待されている。

本研究では下地の超流動 ^4He 薄膜に特有の表面励起である第3音波を媒介とする ^3He 準粒子間相互作用の詳細を明らかにするために、共鳴法による第3音波の音速とダンピングの精密測定に取り組んでいる。昨年度までに、3端子法キャパシタンスブリッジに2段のロックイン検波法を組み合わせることにより、膜厚約100Åの超流動 ^4He 薄膜の第3音波の定在波を約2Åの膜厚変化の測定感度で観測することができた。しかし、この感度は超流動探索など1 mK以下の超低温度域での実験を行うにはまだ十分な値ではない。そこで、今年度はさらに二つの異なる検出法の開発を行った結果、0.1Å程度の高感度測定に目処をつけることができた。新しい検出法の一つはトンネルダイオードを用いたLC共鳴法で、他はダブルバランストミキサーを用いた3端子キャパシタンスブリッジ法である。

このほか本研究に必要な冷却装置として、故障していた低温センターのOxford社製TL-200型希釈冷凍機の修理に着手した。現状では250 mKの最低温度に留まっているが、今後30 mK程度の極低温を発生できるよう修理・改造作業を続行中である。平成8年度はこれらの実験装置を組み合わせ、 ^4He 薄膜に ^3He を混入したときの音速とダンピング測定の本実験を行い、2次元液体 ^3He における準粒子間相互作用について詳細な研究を行う予定である。

【3】 超低温走査型トンネル顕微鏡の開発研究

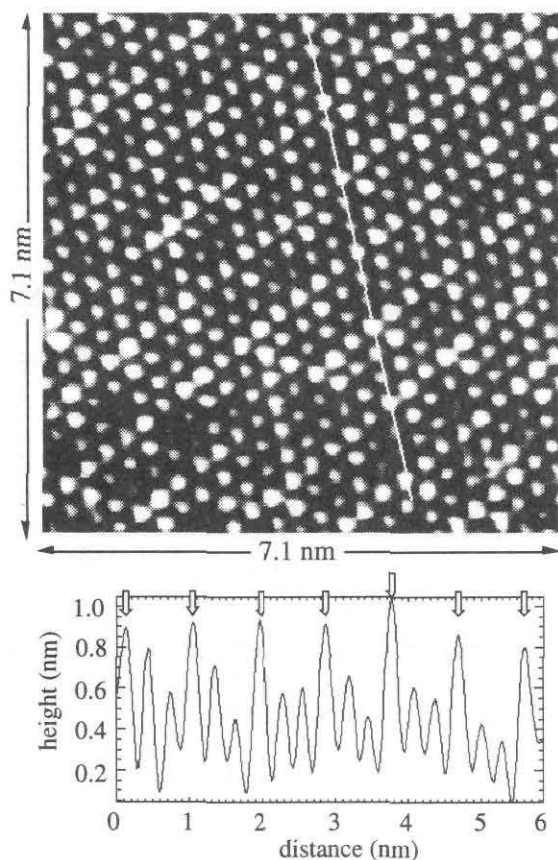


図2. $T = 90 \text{ mK}$ における2H-TaSe₂のSTM像(上図). 下図は白線(上図)に沿った断面図.

過去3年間にわたり開発研究を行ってきた超低温走査トンネル顕微鏡(ULT-STM)が完成し、層状物質であるグラファイトおよびTaSe₂表面をテスト試料として希釈冷凍機温度($T < 0.5 \text{ K}$)で性能評価実験を行った。その結果、90 mKから300 Kという3桁以上にわたる広い温度範囲で原子分解能を有し、原子サイトを特定したトンネル分光が可能であることが分かった。図2は1 K以下の超低温度域で個々の表面原子像をSTMで捉えた世界で最初の例である。

超低温発生装置である希釈冷凍機にSTMを組み合わせた本装置を開発する上で一番の技術的困難は、固体試料を希釈冷凍機の混合器に対して良好に熱接触させると同時に、外部の振動発生源(主に真空ポンプなど)からの振動伝達を遮断した環境に置くという相反する要求を満たさなければならない点である。我々は図3に示したような徹底した除振および防音処理を施すことにより、希釈冷凍機を連続運転した状態で安定して表面原子のSTM像を得ることに成功した。最低温度における水平方向の像のドリフトは0.2 nm/hrと安定度しており、1時間近くに渡り単一原子上に探針を保持することができる。こうした安定性は試料表面上

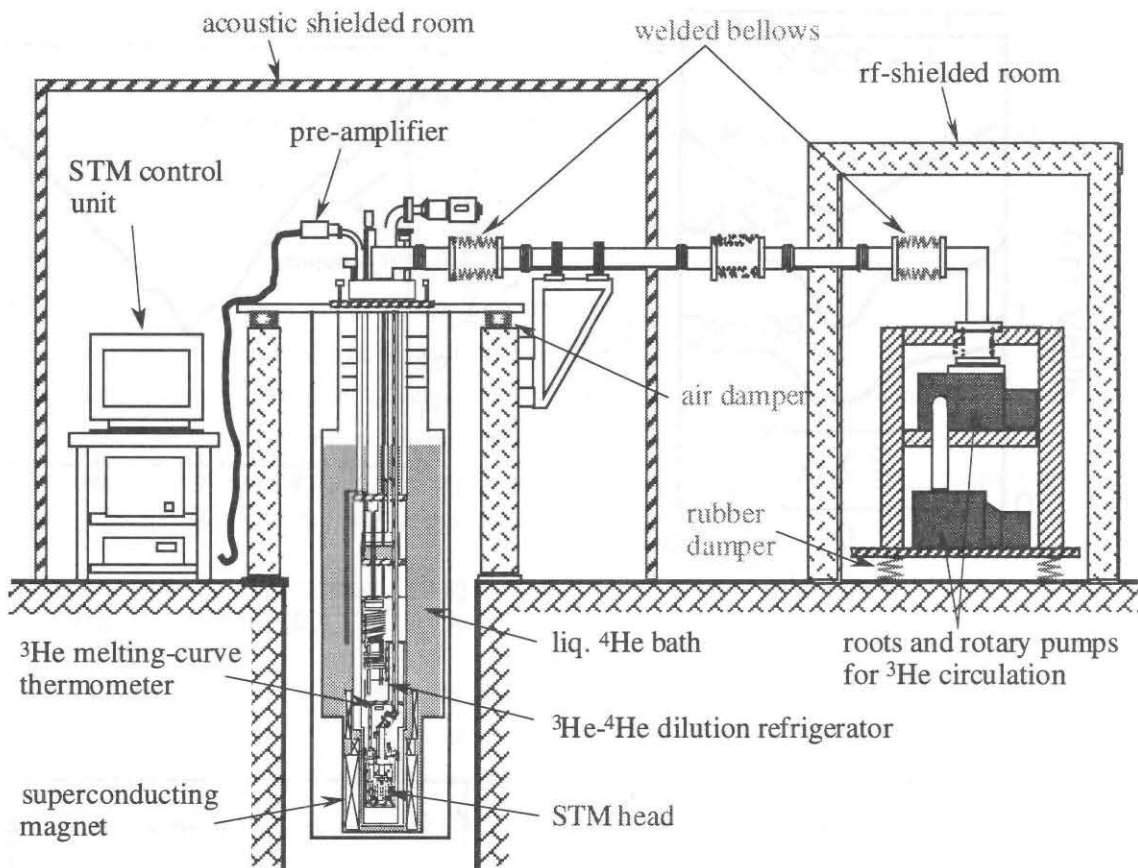


図3. 超低温走査トンネル顕微鏡の全体図。

で個々の原子位置を制御するいわゆる原子制御技法を用いた先端技術開発や新しい表面物性研究の開拓に不可欠のものである。

ULT-STMを用いて今後さまざまな研究を予定している。特にグラファイトおよび金属表面上に物理吸着したヘリウムを含む希ガス原子の2次元量子固体の原子配列および原子空孔の研究や、基盤表面と探針間の量子トンネル現象の研究は興味深い。また、本装置を4.5 テスラの磁場中実験ができるよう改造し、 UPt_3 など重い電子系超伝導体のエネルギーギャップ、量子渦糸格子、渦糸芯の研究も行う計画である。

【4】 $TaSe_2$ の電荷密度波および超伝導の研究

図2は MX_2 型 (M: 遷移金属原子, X: カルコゲン原子) の層状物質 $2H-TaSe_2$ の劈開面であるSe原子面 (三角格子を組む) のSTM像をULT-STMを用いて一定電流モードで観測したものである。液体窒素温度以下では個々の原子の corrugation (凹凸) に重複して 3×3 の超格子構造が見られる。こうした超格子構造は、表面より1原子層下のTa原子面 (疑2次元的な電気伝導性をもつ) に電荷密度波 (CDW) が形成するよることによって生ずることがバンド計算から予測されており、我々の観測はそれを裏付けるものである。

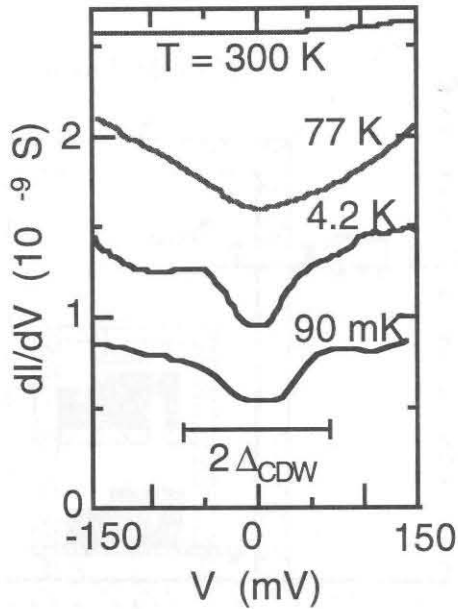


図4. TaSe₂の微分トンネルコンダクタンスのバイアス電圧依存性（高温域）.

CDW状態が形成されてゆく様子は、図4に示したトンネル分光の温度変化の測定結果を見るとより明確になる。転移温度（90 K）以下でフェルミ面付近に±80 meV巾のパイエルスギャップが開いてゆくのが分かる。さらに高精度の分光を行うと、図5に示したようにフェルミ面のごく近傍にさらに微細なギャップ構造が存在することが分かった。この微細構造の原因はまだ明かでないが、1 K以下の極低温域でも図5に示したように温度変化することが観測されている。

一方、2H-TaSe₂の電気抵抗を測定した結果、90 KにおけるCDW整合相への相転移に対応する抵抗の温度依存性の変化の他に、それよりずっと低温の300 mK付近で急激な抵抗の減少が観測された（図6）。これは超伝導転移によるものと考えられ、今後ULT-STMを用いたBCSギャップの測定を試みる予定である。

【5】熱音響現象の研究

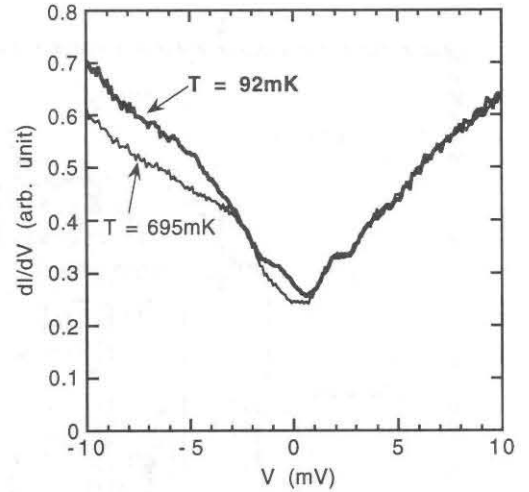


図5. TaSe₂の微分トンネルコンダクタンスのバイアス電圧依存性（低温域）.

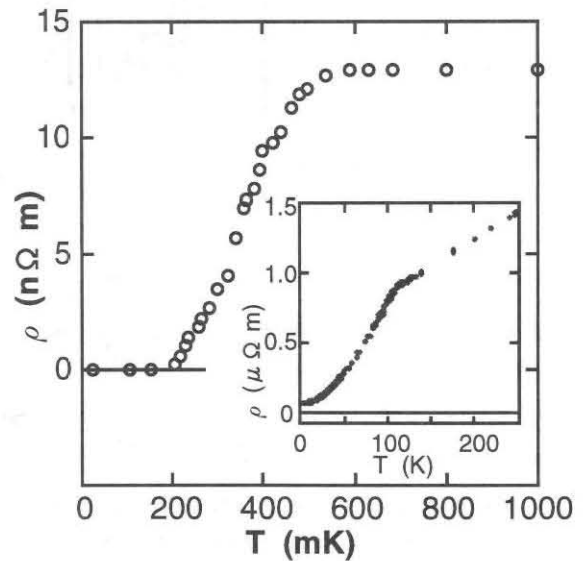


図6. 2H-TaSe₂の電気抵抗の温度変化.

<論文>

1. 福山 寛：ヘリウム3融解圧温度計の製作と使用法，*固体物理* **30**, 938-951 (1995).
2. M. Morishita, K. Ishida, K. Yawata and Hiroshi Fukuyama: "Low Temperature Heat Capacities of ^3He Thin Films", *Czech. J. of Phys.* **46** Suppl. S1 (*Proceedings of the 21th International Conference on Low Temperature Physics*), 409-410 (1996).
3. Hiroshi Fukuyama, H. Tan, T. Handa, T. Kumakura and M. Morishita: "Construction of an Ultra-low Temperature Scanning Tunneling Microscope", *Czech. J. of Phys.* **46** Suppl. S5 (*Proceedings of the 21th International Conference on Low Temperature Physics*), 2847-2848 (1996).
4. T. Kumakura, H. Tan, T. Handa, M. Morishita and Hiroshi Fukuyama: "Charge Density Waves and Superconductivity in 2H-TaSe_2 ", *Czech. J. of Phys.* **46** Suppl. S5 (*Proceedings of the 21th International Conference on Low Temperature Physics*), 2611-2612 (1996).
5. A. Tominaga: "Thermodynamic aspects of thermoacoustic theory", *Cryogenics* **35**, 427-440 (1995).
6. 富永 昭：多段冷凍機の解析にあらわれる接続条件，*低温工学* **31**, 112-115 (1996).

<学位論文>

- 八幡和志：「固体ヘリウム3薄膜の低温比熱」，（修士論文，1996年3月）。
- 徳留 修：「超流動ヘリウム薄膜における第3音波の研究」，（修士論文，1996年3月）。
- 丹 博樹：「走査トンネル顕微法の低温物理研究への応用」，（修士論文，1996年3月）。
- 半田哲也：「超低温走査トンネル顕微鏡の開発研究」，（修士論文，1996年3月）。

<講演>

1. 八幡和志，石田一貴，森下将史，福山 寛：「吸着ヘリウム3薄膜の低温比熱」，日本物理学会秋の分科会（大阪府立大学，1995年9月）。
2. 森下将史，石田一貴，八幡和志，福山 寛：「吸着ヘリウム3薄膜の低温比熱II」，日本物理学会第51回年会（金沢大学，1996年3月）。
3. 福山 寛：「グラファイト上に吸着したヘリウム3薄膜の2次元物性」，物性研短期研究会—マイクロポラス系における原子・分子の挙動（東京大学物性研究所，1995年6月）。
4. Hiroshi Fukuyama, "Magnetic Phase Diagram of bcc ^3He and Direct Demagnetization Cooling of hcp ^3He ", invited talk at Second Emil Warburg Symposium on Ultralow Temperature Physics (University of Bayreuth, October 1995).
5. 富永 昭：「さまざまな熱音響現象」，96年度第1回波動熱輸送研究会（筑波研究交流センター，4月）。
6. 富永 昭：「流体が振動運動する配管の等価回路」1995年度春季低温工学超電導学会（中央大学駿河台記念館，5月）。
7. 国友靖明，後藤昌英，矢崎太一，富永昭：「パルス管内部の流体の動的挙動の直接観測II—可視化」1995年度春季低温工学超電導学会（中央大学駿河台記念館，5月）。
8. 富永 昭：「熱と仕事の流れ：定常流の場合」96年度第2回波動熱輸送研究会（大阪市大文化交流センター，6月）。
9. 富永 昭：「熱と仕事の流れ：振動流の場合」96年度第3回波動熱輸送研究会（箱根青雲荘，8月）。

10. 富永 昭：「流体力学の基礎方程式」96年度第4回波動熱輸送研究会（東京工業大学百年記念館，10月）。
11. 富永 昭：「熱音響現象にあらわれる対称性の破れ」1995年度秋季低温工学超電導学会（秋出大学，11月）。
12. 富永 昭：「管内流体のエントロピー変動」96年度第5回波動熱輸送研究会（大阪市大文化交流センター，12月）。
13. 富永 昭：「因呆律一原因は結果よりも進んでいる一」96年度第6回波動熱輸送研究会（三河ハイツ，3月）。