

## 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,  
学振外国人研究員 Christopher Bäuerle  
大学院生 (6名)

### [1] 単原子層固体 $^3\text{He}$ の2次元核磁性の研究【福山, 森下】

グラファイト表面に吸着したヘリウム3 ( $^3\text{He}$ ) 薄膜が示す核磁性を, 100  $\mu\text{K}$ に至る超低温度域で熱容量 (C) 測定を行うことにより研究している. この核スピン系は現在実験的に得られる最も理想的な2次元量子スピン系のモデル物質とされている. 昨年度までは吸着2層目の核磁性を中心に調べ, (1) 低密度領域の反強磁性相が, 6体程度までの多体交換相互作用の競合と2次元三角格子という幾何学的フラストレーションのために絶対零度でも長距離秩序をもたない恐らくは“量子スピン液体”的な基底状態をもつこと, (2) 高密度になるにつれて3体交換が支配的になり, 単純な2次元ハイゼンベルグ強磁性体に移行してゆくこと, などを明らかにした.

今年度は, 核スピン間の交換相互作用のミクロな機構の解明を目指して, 構造的により単純な吸着第1層のサブモノレーヤー固層の2次元核磁性を研究した. その結果,  $0.1 \text{ mK} < T < 80 \text{ mK}$ の2桁以上にわたる広い範囲にわたって  $C \propto 1/T$ の奇妙な温度依存性が観測された. これは, 同じ面密度をもつ2層目の反強磁性相について観測された高温域の比熱異常と酷似しており, その起源は大変興味深い. どちらの固相も下地に対する整合固相であることから, 空格子点の非局在化に伴う磁気ポーラロン効果が関係しているのかもしれない. 同じ面密度にも拘らず1層目の方が2層目より1桁以上交換相互作用の大きさが小さいのは, 基盤からの引力ポテンシャルがより大きいために, 原子のトンネル経路がより強く2次元面内に制限されているためであろう.

2層目の反強磁性相と比熱の振舞いが少なくとも高温域では良く似ているにも拘わらず, 同じ密度のサブモノレーヤー固相 ( $6.4 \text{ nm}^2$ ) が逆に強磁性的であることが, 最近の物性研の石本グループによる帯磁率測定から分かってきた. この矛盾は, 基盤ポテンシャルのcorrugationの幾何学効果の相違か, 熱励起した空格子点の磁気ポーラロン効果の何れかで説明できる可能性がある.

### [2] $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ 薄膜における2次元フェルミ流体の研究【福山, 森下】

膜厚数ナノメートル程度の超流動ヘリウム4 ( $^4\text{He}$ ) 薄膜に少量の $^3\text{He}$ を混入させると, 零点振動エネルギーの差から $^3\text{He}$ 原子は $^4\text{He}$ 薄膜上に浮かんで単原子層を形成する. この系は, 単に理想的な2次元フェルミ流体と言うだけでなく,  $^3\text{He}$ 面密度 ( $\rho_3$ ) や $^4\text{He}$ 膜厚 ( $d_4$ ) を変えることによりフェルミ温度や第3音波を媒介とする準粒子間相互作用の大きさを自在にコントロールできるというユニークな特質をもつ. また, 低温で2次元凝集 (puddling) や, 最高数mK程度での2次元超流動転移の可能性も指摘されている.

我々は, グラファイト上に吸着した約5原子層 ( $44.1 \text{ nm}^2$ ) の膜厚の $^4\text{He}$ 薄膜について,  $^3\text{He}$ 面密度を  $\rho_3 = 0.37, 0.48, 1.00 \text{ nm}^{-2}$ と変えて, その比熱を  $1 \text{ mK} < T < 80 \text{ mK}$ の温度範囲で測定した. 実験データは全温度領域にわたって, 準粒子有効質量 ( $m_3^*$ ) を $^3\text{He}$ 原子質量 ( $m_3$ ) の約1.3倍としたときの2次元フェルミ気体の表式で良く表され, 特に約20 mK以下の低温では比熱は温度に比例して減少し, その傾きは密度に依存しないことが分かった. これは吸着基盤表面に一様に分布した2次元フェルミ流体の比熱の特徴であり, puddlingは生じていないことを示している.

一方、グラファイト上に直接吸着した第2層目の2次元 $^3\text{He}$ 流体（第1層は固体 $^3\text{He}$ ）の場合に観測された温度に依存しない比熱の寄与は、 $^4\text{He}$ 薄膜上では一切観測されなかった。これは基盤の不均一部分に吸着した2層目の局在 $^3\text{He}$ スピンの非磁性の $^4\text{He}$ で置換されたためと結論される。

### 〔3〕 超低温・高磁場中におけるヘリウム3融解圧曲線の研究 【福山，森下】

0.5 mK  $\leq$  T  $\leq$  250 mK, 0  $\leq$  B  $\leq$  15 Tという超低温・高磁場中での $^3\text{He}$ 融解圧曲線（P-T関係式）を精密に測定する実験を開始した。これは、mK域の温度スケールとして現在広く用いられている $^3\text{He}$ 融解圧温度スケールを高磁場下まで拡張しようとするものである。一方、T  $\leq$  3 mKの温度域になると、bcc固体 $^3\text{He}$ の核磁気相転移現象に伴う比較的大きな融解圧力の温度および磁場変化が期待できる。そこで本研究では、融解密度（24.21 cm<sup>3</sup>/mol）の固体 $^3\text{He}$ の磁気相図（B-T相図）をB  $\leq$  15 Tまで決定し、すでに明らかにされている高密度bcc相（22.69 cm<sup>3</sup>/mol）の磁気相図との比較を通じ、核スピン間の多体交換相互作用の密度依存性について定量的な情報を得ることも目指している。

今年度は、融解圧力の磁場変化を1 Pa以下の精度で測定し、零磁場下に置いた複数の温度計で強磁場中 $^3\text{He}$ 試料の温度を10  $\mu\text{K}$ 以内の温度差で決定することができる装置を完成させ、平成10年2月に東京大学物性研究所の極限環境物性研究部門の大型核断熱消磁冷凍機に搭載した。現在、実験データの取得中である。

### 〔4〕 超低温走査トンネル顕微鏡を用いた2次元量子固体の研究【福山，Bauerle】

固体表面に物理吸着した希ガス原子の2次元固体は、低次元系特有の物理現象を研究する上で興味深い対象である。この種の研究には、これまで比熱や等温吸着実験などの熱力学的測定、LEEDや中性子散乱などの散乱実験の手法がもっぱら用いられてきた。しかし、これら方法では格子欠陥やdomain wall構造など2次元固体の局所的な情報を得ることは難しい。そこで我々は、試料温度を80 mKまで冷却することのできる超低温走査トンネル顕微鏡（ULT-STM）を用い、二次元固体の局所情報を実空間で、しかも原子スケールの位置分解能をもって解明する実験を行っている。

これまでの研究で、グラファイト表面に $^4\text{He}$ 単原子固層を吸着させたことによって生じた $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ 超格子構造の観察と、2次元 $^4\text{He}$ ナノ結晶と思われる構造の融解現象を観測した。今年度は、より重いKr原子の単原子固層についても同様に $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ 整合固相をSTM観測することに成功した（T = 77K）。一方、トンネル電流（I）の変化をSTM探針の移動距離（Z）の関数として様々な探針について調べたところ、探針-試料間距離が遠い時  $I \propto \exp(1/Z)$  の正常なZ依存性を示すが、同距離が近づくとこの振舞いからずれて、Iが飽和する様子が明瞭に観測された。すなわち、グラファイト表面が探針との間の原子間斥力で局所的に変形する（凹む）、というこれまでの推論がほぼ実証された訳である。HeやKrなどの希ガス原子がSTM観測できる機構も、「グラファイト-希ガス原子-探針の間の原子間力によってグラファイト表面が局所変形し、実効的に探針-表面距離が増してIが減少する」という局所変形モデルの妥当性が高まったといえる。

なお、 $^4\text{He}$ 原子を吸着させたときの上記のI-Z曲線には、特徴的なヒステリシスループが観測されるが、これは $^4\text{He}$ 原子一個のトンネル運動が観測された可能性もあり、今後この現象をより詳細に研究して行きたい。

### 〔5〕 超低温走査トンネル顕微鏡の分光性能評価と2H-TaSe<sub>2</sub>の超伝導【福山】

2H-NbSe<sub>2</sub>（転移温度：T<sub>c</sub> = 7.2 K）と2H-TaSe<sub>2</sub>（T<sub>c</sub> = 133 mK）という二つの超伝導物質のトンネル分光実験を通じて、我々の開発したULT-STM装置の性能評価を行った。異方性まで考慮したBCS理論に基づく解析から、1) 同装置のエネルギー分解能が0.07~0.4 meVであること、2) 2H-NbSe<sub>2</sub>の

$T=0$ のBCSギャップが1.2 meVであることが分かった。さらに3)  $T=90$  mKでのトンネル分光測定において $2H-TaSe_2$ のBCSギャップ ( $\approx 30 \mu\text{eV}$ ) に相当するトンネルコンダクタンスの減少を観測することができた。なお、 $2H-TaSe_2$ の超伝導転移については以前、電気抵抗測定から $T_c \approx 200$  mKと報告したが、今回帯磁率の精密測定を行い、マイスナー効果の明瞭な観測を通じて、この物質の超伝導転移温度を $133 \pm 2$  mKと決定した。

また、ULT-STMに装着して $T < 4$  Kの極低温下で試料表面を劈開し、その場でSTM観測できる低温劈開装置を開発した。現在、液体窒素温度における動作テスト中であるが、この装置の完成によって今後、ULT-STMを応用できる物質範囲が大きく広がるものと期待している。

#### 【6】低温微小素子の試作と磁場特性の評価【福山，森下】

試料サイズが数 $\mu\text{m}$ 以下のメソスコピック系における電子波干渉現象の研究は、最近の物理学の新しい潮流の一つである。我々は、この種の研究に不可欠な表面微細加工技術と極低温下での輸送現象の測定技術の確立を目指して、正常金属の微小リングを電子ビーム描画法で作成し、希釈冷凍機温度で伝導電子系の量子干渉効果の測定を行った。

今年度は電子ビーム描画装置のデジタルノイズの除去とプロセスの条件出しの見直しを行い、線幅をこれまでの $0.2 \mu\text{m}$ から $0.1 \mu\text{m}$ へと半減することに成功した。こうして作成した高純度銀の矩形微小リング（一辺の長さが $1 \mu\text{m}$ ，線幅 $0.1 \mu\text{m}$ ）を希釈冷凍機で $20 \sim 30$  mKまで冷却し、電気抵抗の磁場変化を交流4端子ブリッジ法で精密に測定した。その結果、 $20 < B < 70$  mTの磁場領域でAharonov-Bohm効果による $\Delta B = \phi_0/S$  ( $\phi_0 \equiv h/e$ : 磁束量子,  $S$ : リングの囲む面積) 周期の抵抗の磁場振動を、 $10$  mT以下の低磁場でAltshuler-Aronov-Spivak効果による $\Delta B = \phi_0/2S$ 周期の振動を、いずれもこれまで以上の精度で観測することができた。今後は、これらの実験技術を超伝導マイクロドットにおける磁束量子の振舞いの研究など独創性ある基礎研究に応用してゆきたい。

なお、ここ数年来我々の研究室では、本学低温センターのOxford社の希釈冷凍機の修理、改良を手掛けてきたが、今年度はほぼその作業を終え、本来の最低到達温度 ( $30$  mK) を少なくとも2週間以上にわたって維持できることを確認した。本研究は、この希釈冷凍機を用いて行った。

#### 【7】熱音響理論の普及活動【富永】

昨年度までに一段落した熱音響理論の具体的適用例を調べた。

#### <論文>

1. "Low Temperature Heat-Capacity Anomalies in Two-Dimensional Solid  $^3\text{He}$ ",  
K. Ishida, M. Morishita, K. Yawata and Hiroshi Fukuyama,  
Phys. Rev. Lett. **79**, 3451-3454 (1997).
2. "Low Temperature Heat Capacities of Liquid  $^3\text{He}$  Thin Films",  
M. Morishita, K. Ishida, K. Yawata and Hiroshi Fukuyama,  
J. Low Temp. Phys. **110**, 351-356 (1998).
3. "STM Observations of Helium Atoms Adsorbed on Graphite Surfaces",  
N. Mori, C. Bäuerle, T. Kumakura, M. Morishita and Hiroshi Fukuyama,  
J. Low Temp. Phys. **110**, 641-646 (1998).
4. Akira Tominaga and Taichi Yazaki: "Spontaneous Oscillations of Gas in a Glass Resonator: Observation of the Local Velocity and the Simulation", Proc. of 16th Int. Cryog. Engineering Conf.

(Kitakyushu, 1996) p. 243-246 (Elsevier Science, 1997).

- 富永 昭：「熱音響理論の熱力学的基礎」，伝熱研究 36, 31-38 (1997)。
- Akira Tominaga and Taichi Yazaki: "Radial distributions of oscillating temperature of fluid in a tube induced by the pressure oscillation", Proc.5th Japanese-Sino Joint Seminar on Cryocooler and its Applications (Osaka, 1997) p. 235-240.
- S. Shinohara and A.Tominaga: "A conceptual design of space borne multi-stage pulse-tube cryocooler", Proc.5th Japanese-Sino Joint Seminar on Cryocooler and its Applications (Osaka, 1997) p. 289-294.
- 富永 昭：「蓄冷器損失を減らすための最適位相差」，低温工学32, 448-451 (1997).
- 富永 昭, 矢崎太一：「管内流体の圧力変動による温度変動の径方向の分布」，低温工学33, 90-95 (1998).

#### <学位論文>

- 森 憲久：「走査トンネル顕微鏡を用いた低温物性研究」，（修士論文，1998年3月）。
- 坏 浩行：「低温微小素子の磁場特性」，（修士論文，1998年3月）。

#### <講演>

- 熊倉知央、森 憲久、森下将史、福山 寛：「超低温STMによる電荷密度波および超伝導の研究」，日本物理学会第52回年会（名城大学，1997年4月）。
- Hiroshi Fukuyama, M. Morishita, K. Ishida and K. Yawata: "2D Nuclear Magnetism in Helium Three Thin Films", International Symposium on Quantum Fluids and Solids, (Paris, July 1997) *invited talk*.
- M. Morishita, K. Ishida, K. Yawata and Hiroshi Fukuyama: "Low Temperature Heat Capacities of Liquid  $^3\text{He}$  Thin Films", International Symposium on Quantum Fluids and Solids, (Paris, July 1997).
- N. Mori, T. Kumakura, M. Morishita and Hiroshi Fukuyama: "STM Observations of Helium Atoms Adsorbed on Graphite Surfaces", International Symposium on Quantum Fluids and Solids, (Paris, July 1997).
- Christopher Bäuerle, "Vortex Creation in Superfluid  $^3\text{He}$  After a Rapid Phase Transition", 日本物理学会秋の分科会—低温シンポジウム（神戸大学，1997年10月）。
- 森 憲久, Christopher Bäuerle, 森下将史, 福山 寛：「グラファイト表面に吸着したヘリウム原子のSTM観察」，日本物理学会秋の分科会（神戸大学，1997年10月）。
- 森下将史, 古谷 雅, 長谷博史, 福山 寛：「超流動ヘリウム4 薄膜上ヘリウム3 単原子層膜の比熱」，日本物理学会秋の分科会（神戸大学，1997年10月）。
- 長谷博史, 森下将史, 古谷 雅, 福山 寛：「サブモノレイヤー $^3\text{He}$ 固相の磁気比熱」，日本物理学会秋の分科会（神戸大学，1997年10月）。
- 八幡和志, 森下将史, 石本英彦, 福山 寛：「超低温・高磁場中におけるヘリウム3融解圧曲線の研究」，日本物理学会秋の分科会（神戸大学，1997年10月）。
- 福山 寛：「単原子層 $^3\text{He}$ の核磁性」，文部省科学研究費総合研究（A）研究会「低次元フェルミ流体の物理」（浜松，1997年10月）。
- 森下将史, 長谷博史, 古谷 雅, 福山 寛：「超流動 $^4\text{He}$ 薄膜上の $^3\text{He}$ 単原子層の比熱」，文部省科学研究費総合研究（A）研究会「マイクロケルビン温度の物性—電子および核—」（山中

温泉, 1997年11月) .

12. Hiroshi Fukuyama: "2D Properties of Helium Three Thin Films and STM Studies at Millikelvin Temperatures", NEDO International Workshop on Quantum Fluids and Solids, (Honolulu, January 1998).
13. Hiroshi Fukuyama: "Future Prospect of International Collaboration with NEDO Members", NEDO International Workshop on Quantum Fluids and Solids, (Honolulu, January 1998).
14. 森下将史: 「液体ヘリウム4 薄膜上ヘリウム3 単原子層膜の2次元凝集現象における量子効果」, 文部省科学研究費重点領域研究第3回研究会「多自由度系としての原子集団及び原子のトンネル現象」(賢島研修センター, 1997年12月) .
15. 坏 浩行, 倉田剛大, 森下将史, 福山 寛: 「低温微小素子の磁場効果」, ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー研究発表会(筑波大学, 1998年3月) .
16. 森 憲久, Christopher Bäuerle, 倉田剛大, 森下将史, 福山 寛: 「グラファイト表面に物理吸着した二次元固体のSTM観察」, 日本物理学会第53回年会(東邦大学, 1998年3月) .
17. 八幡和志, 安原隆俊, 森下将史, 石本英彦, 福山 寛: 「超低温・高磁場中におけるヘリウム3融解圧曲線の研究(II)」, 日本物理学会第53回年会(東邦大学, 1998年3月) .
18. 長谷博史, 森下将史, 古谷 雅, 福山 寛: 「サブモノレイヤー<sup>3</sup>He固相の磁気比熱II」, 日本物理学会第53回年会(東邦大学, 1998年3月) .
19. 森下将史, 古谷 雅, 長谷博史, 福山 寛: 「超流動ヘリウム4 薄膜上ヘリウム3 単原子層膜の比熱」, 日本物理学会第53回年会(東邦大学, 1998年3月) .
20. 富永 昭: 「GM冷凍機のバルブタイミング」(大阪市立大学, 学術情報センター, 6月) .
21. Akira Tominaga and Taichi Yazaki, "Radial distributions of oscillating temperature of fluid in a tube induced by the pressure oscillation", Proc.5th Japanese-Sino Joint Seminar on Cryocooler and its Applications (Osaka, 1997) p. 235-240.
22. S.Shinohara and A.Tominaga, "A conceptual design of space borne multi-stage pulse-tube cryocooler", Proc.5th Japanese-Sino Joint Seminar on Cryocooler and its Applications (Osaka, 1997) p. 289-294.
23. 富永 昭: 「熱音響理論と伝統的視点との相異」, バルスチューブ研究会(宇宙研, 10月) .
24. 浜口和洋, 恩田邦夫, 富永 昭, 松原洋一: 「熱音響発振器の基本特性」, スターリングサイクルシンポジウム(東京電機大学, 10月) .
25. 富永 昭: 「可変長音波共鳴管の吸収曲線」, 秋期低温工学会(香川, 11月) .
26. 富永 昭: 「蓄冷器の冷凍能力」, 熱音響工学研究会(デンソー浜名湖研修所, 3月) .