

## VII-5. 低温物性グループ

教授 大塚 洋一 (平成10年9月着任)  
講師 富永 昭  
助手 森下 将史  
大学院生 1名

### 【1】メソスコピック系の電気伝導 (大塚 洋一)

サイズを約1  $\mu\text{m}$ 以下にまで小さくした導体は巨視的な導体とは異なるさまざまな新奇な現象を示す。当研究室ではそのような「メソスコピック系」の伝導現象を研究テーマの一つにしている。

#### (1) 微小トンネル接合系の伝導

接合サイズが0.1  $\mu\text{m}$ 四方ほどの小さなトンネル接合では、接合に付随する静電容量Cは約1fFになり、1つの電子のトンネルに伴って発生する静電エネルギーの変化  $E_c = e^2/2C$  は0.1 meV = 1 Kほどの大きさになる。従って1 K以下の極低温においては素電荷を単位として起きる電子のトンネルはエネルギー的に抑制される(クーロンブロッケイド)。これを利用すると、電子を1個単位で制御する究極の電子デバイスが実現できると考えられる。大塚は、東大低温センター、東大理学系研究科、横浜国立大工学部、NEC基礎研究所、理化学研究所、東大総合文化研究科と共同して微小トンネル接合に関連した新しい物理現象の解明と応用に向けた基礎研究を進めている。

#### (2) 強磁性微小トンネル接合

強磁性金属を用いた単一電子トランジスタ(Single Electron Transistor, SET)において見いだした磁気クーロン振動に関して理論的考察を行い、非ゼロのスピンの偏極率を持つ金属ではゼーマン効果によってフェルミエネルギーが磁場中で変化することによって磁気クーロン振動が引き起こされることを明らかにした。このモデルは様々な強磁性体SETの磁気クーロン振動を矛盾なく説明する。一方、非磁性金属SETでは磁気クーロン振動はないと考えられる。この対照実験をアルミニウムを用いたSETを使って行い、予測通りの結果を得た。

磁気クーロン振動は、強磁性体のスピンの偏極率の決定という新しい磁性測定手段を与える。ここで求まるスピンの偏極率は、スピンの偏極トンネル実験などで得られる同名の量とは異なり、トンネル接合の性質によらない物質固有の物性である。様々な磁性体についてスピンの偏極率を決定するために、これに向けた実験を行いつつある。

### 【2】Ge : Ga の金属絶縁体転移 (大塚 洋一)

同位体濃縮と中性子照射によって作製した $^{70}\text{Ge} : \text{Ga}$ の電気伝導を、この系の金属-絶縁体転移濃度のごく近傍( $N/N_c - 1 > 4 \times 10^{-4}$ )まで精密に測定した。この系は不純物補償がないこと、不純物濃度の一様性に優れることを特徴とする。実験結果は、絶対零度における伝導度に関する臨界指数 $\nu$ が  $\nu = 0.50 \pm 0.04$  であることを示した。不純物補償のない不純物半導体においては従来約0.5と1以上の2通りの値が報告されているが、後者は不純物濃度の巨視的な不均一性による誤った結果であると結論した。

さらに8Tまでの磁場中での測定を行い、磁場中での臨界指数が、可変パラメータとして不純物濃度と磁場のいずれをとった場合においても、1.0であることを見いだした。外部磁場によって系の属するユニバーサルティークラスが変わることによって臨界指数が変わることを示す。

### 【3】極低温粒子検出器（大塚 洋一）

東京大学大学院理学系研究科養輪眞研究室と共同で極低温を利用した粒子検出器の開発を行っている。平成10年度は原子核研究所鋸山観測所において暗黒物質探索のための予備的実験を行った。

### 【4】熱音響理論の普及活動（富永 昭）

昨年度までに一段落した熱音響理論の具体的応用例を調べ始めた。また熱音響自励振動の研究を再開した。

### 【5】グラフォイル上吸着<sup>3</sup>Heの余剰比熱（森下 将史）

多孔質ガラスや焼結銀など不均一な基盤表面に物理吸着したヘリウム3(<sup>3</sup>He)は低温で温度にほとんど依存しない、ほぼ一定の比熱をもつことが知られている。これは不均一表面に交換相互作用の広い分布をもつアモルファス状<sup>3</sup>Heが生成するためと理解されている。一方、グラファイトを多数劈開したグラフォイル上に吸着した<sup>3</sup>He薄膜の系にも、温度にあまり依存しないブロードな余剰比熱( $C_{exc}$ )の寄与があることが、流体相の比熱測定などから知られている。これもグラフォイルを形成するgraphite単結晶子の境界付近に吸着したアモルファス<sup>3</sup>Heに依るものと考えられているが、これが面密度や温度ともどのように変化するのは、これまで明らかになっていない。

我々は、グラフォイル上<sup>3</sup>He薄膜について、吸着第1層流体相、第1層固相、第2層流体相の広い面密度範囲に渡り詳細な比熱測定を100  $\mu$ Kに至る超低温度域まで行い、得られた比熱から $C_{exc}$ を取り出して、その面密度・温度依存性を明らかにすることに成功した。

図1に示すように、 $C_{exc}$ は低温でほぼ一定の大きさを持ち、ある温度で急激に減少している。また、面密度の増大にとまらぬ、吸着第2相の形成開始の面密度(10.9  $\text{nm}^{-2}$ )の直前で高温域の比熱が増大している様子を見ることができる。以上の特徴は、余剰比熱がグラフォイル基盤の不均一表面上に形成されたアモルファス<sup>3</sup>He膜に起因しており、均一表面上で第2層が形成される直前に2層目のアモルファスが形成されるものとして非常によく説明できる。アモルファス<sup>3</sup>Heの比熱の温度・面密度依存性が明らかになった他、アモルファス<sup>3</sup>Heも層構造をとることも明らかとなった。

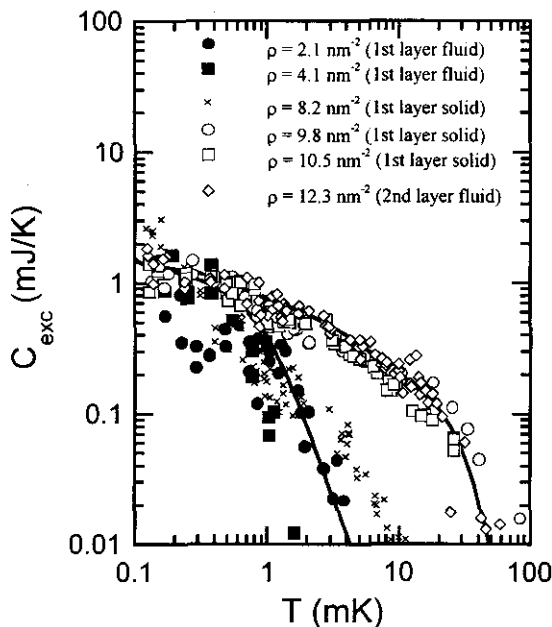


図1. グラフォイル上吸着<sup>3</sup>Heにおける余剰比熱の面密度依存性。実線はガイドライン。吸着第2層の形成が始まる面密度(10.9  $\text{nm}^{-2}$ )よりわずかに低い面密度で、高温域での値が急激に増大している。

【6】単原子層固体<sup>3</sup>Heの2次元核磁性の研究 (森下 将史)

原子レベルで平坦なグラファイト表面に物理吸着したヘリウム<sup>3</sup>(<sup>3</sup>He)薄膜において、吸着第1層及び第2層は固化して、ほぼ理想的な2次元量子スピン系を与える。この系の磁性は、<sup>3</sup>He原子の位置交換に由来する交換相互作用が支配するが、<sup>3</sup>He原子間の強いハードコア斥力のために、3個以上の原子が循環的に交換して生ずる多体交換相互作用が重要な役割を演ずる。

このうち、吸着第1層固相について、100 μK程度の超低温度まで比熱の測定を行った。その結果、広い面密度領域にわたり、2桁以上に及ぶ温度範囲で温度に反比例する比熱 ( $C \propto 1/T$ )が観測された。これは、局在スピン系の高温域で期待される、温度の自乗に反比例する比熱 ( $C \propto 1/T^2$ )と異なる異常な振る舞いである。同様の温度依存性は吸着第2層低面密度領域で現れる反強磁性固相においても観測されているが、第2層においては面密度の増大に伴う磁性の変化を反映して正常な依存性へと移行する(図2)。第1層においては、面密度や磁性に依らず、異常な温度依存性が観測されている点で2層目とは明らかな差異を示している(図3)。

異常な温度依存性の起源の可能性の1つとして、グラフォイル基盤の不均一な表面に吸着したアモルファス状の<sup>3</sup>Heからの寄与の影響が考えられる。しかし、吸着第1層液相から第2層液相までの広い面密度領域にわたる比熱測定により、アモルファス<sup>3</sup>Heの比熱は、均一な第2層ができ始める直前に増大し、異常比熱が問題になっている面密度領域では十分に小さいことが確認され、アモルファス<sup>3</sup>Heが異常比熱の原因である可能性は実験的に否定された。

Roger等により比熱・帯磁率を高温展開によりfittingして求められた第2層における多体交換相互作用パラメータのうち、4体以上の交換の重要性を示す"frustration parameter"  $\zeta$ (図2b)の面密度変化は、比熱のべきの変化と非常に良く似ており、比熱の異常な温度依存性は様々な多体交換相互作用の強い競合を反映している可能性が示唆される。1層目と2層目の大きな違いは、吸着ポテンシャルとその

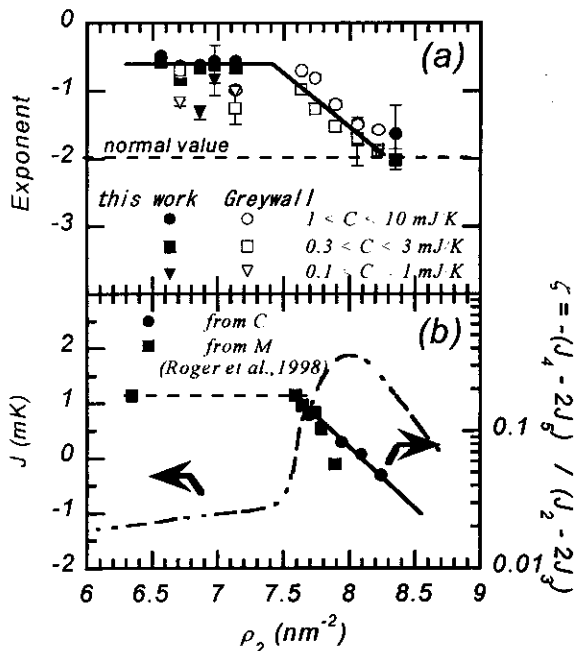


図2. グラファイト上<sup>3</sup>He薄膜吸着第2層における(a)比熱のべき、(b)交換相互作用の大きさ J と frustration parameter  $\zeta$ 、の面密度変化。べきは低面密度では異常値を示すが、面密度の増大による時勢の変化を反映して正常な値(-2)に近づく。この様子は、高次の多体交換相互作用の重要性を示す $\zeta$ の振る舞いに酷似している。

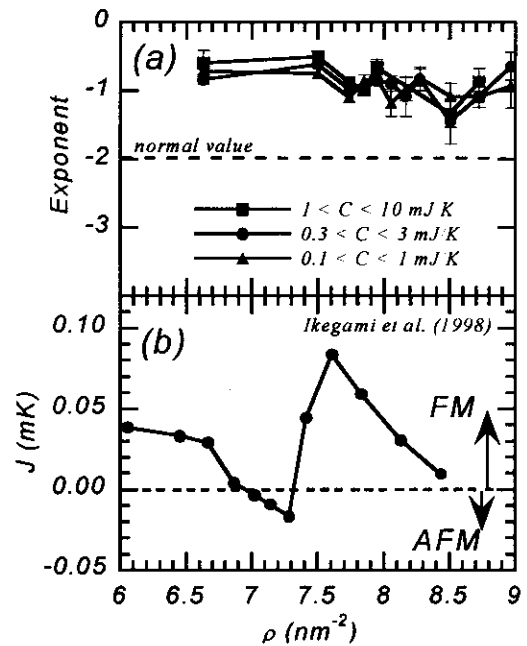


図3. グラファイト上<sup>3</sup>He薄膜吸着第1層における(a)比熱のべき、(b)交換相互作用の大きさの面密度変化。比熱のべきは面密度、磁性に依らず異常な値 -1 を示し、吸着第2層とは振る舞いが異なる。

corrugationの大きさであり、これらは低次の交換相互作用に影響を与えることにより、結果として多体交換相互作用の競合の強さに差を与えることが期待され、1層目と2層目の比熱の差を説明することができる。交換相互作用の競合が異常な比熱を生むメカニズムについては幾つかの可能性が指摘されるが、今後、理論・実験両面からのさらなる解明が必要である。

### 【7】 $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ 薄膜における2次元フェルミ流体の研究（森下 将史）

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いうだけでなく、 $^3\text{He}$ 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。

グラフォイルを吸着基盤に用い、約5原子層の $^4\text{He}$ 薄膜上の $^3\text{He}$ 単原子層膜の比熱を $1\text{ mK} < T < 80\text{ mK}$ で測定した。 $^3\text{He}$ の面密度は $0.38, 0.47, 1.0\text{ nm}^{-2}$ の3種類としたが、いずれも、 $^3\text{He}$ 準粒子の有効質量が裸の原子質量の約1.3倍であるとした理想フェルミ気体の比熱と良く一致し、puddlingを示すような異常は見られなかった。有効質量が重くなるのは $^4\text{He}$ のbackflowを伴っているためであり、最近の第一原理に基づくグラファイト基盤上での理論計算値1.29倍と非常に良い一致を示す。一方、グラファイト上に直接吸着した $^3\text{He}$ 薄膜の流体相に比べ、 $^3\text{He}$ 準粒子の有効質量の面密度依存性が非常に小さい。これは、 $^4\text{He}$ 上では膜厚方向での制限が、純粋な $^3\text{He}$ 膜に比べ弱いためと考えられる。また、グラファイト上に直接吸着 $^3\text{He}$ 薄膜において観測されている余剰比熱は、 $^4\text{He}$ 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 $^3\text{He}$ スピンが非磁性の $^4\text{He}$ で置換されたためと結論される。

<論文>

1. “Ferromagnetic Single Electron Transistor”,  
K. Ono, H. Shimada and Y. Ootuka, *Solid-State Electronics* **42**, 1407-1411 (1998).
2. “Magneto-Coulomb Oscillation in Ferromagnetic Single Electron Transistors”,  
H. Shimada, K. Ono and Y. Ootuka, *J. Phys. Soc. Jpn.* **67**, 1359-1370 (1998).
3. “Two-Dimensional Arrays of Small Josephson Junctions with Regular and Random Defects”,  
T. Yamaguchi, R. Yagi, S. Kobayashi and Y. Ootuka, *J. Phys. Soc. Jpn.* **67**, 729-731 (1998).
4. “強磁性体単電子トランジスタ”,  
大塚洋一, *日本物理学会誌* **53**, 342-345 (1998).
5. “Spin Polarization and Magneto-Coulomb Oscillations in Ferromagnetic Single Electron Devices”,  
K. Ono, H. Shimada and Y. Ootuka, *J. Phys. Soc. Jpn.* **67**, 2852-2856 (1998).
6. “Electrical Properties of Isotropically Enriched Neutron-Transmutation-Doped  $^{70}\text{Ge}:\text{Ga}$   
near the Metal-Insulator Transition,  
M. Watanabe, Y. Ootuka, K. M. Ito and E. E. Haller, *Phys. Rev. B* **58**, 9851-9857 (1998).
7. “可変長音波共鳴器の吸収曲線  
(Absorption Curve of a Variable Length Acoustical Resonator)”,  
富永 昭, *低温工学* **33**, 194-199 (1998).
8. “Measurement of Sound Generation in Thermoacoustic Oscillations”,  
T. Yazaki and A. Tominaga, *Proc. Roy. Soc. London* **A454**, 2113-2122 (1998).
9. “Traveling wave thermoacoustic engine in a looped tube”,  
T. Yazaki, A. Iwata, T. Maekawa and A. Tominaga, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 3128-3131 (1998).
10. “蓄冷器の冷凍能力と特性周波数: 熱音響理論の4 K G-M冷凍機への応用  
(Cooling Power of a Regenerator and its Characteristic Frequency :  
Application of Thermoacoustic Theory to 4 K G-M Cryocooler)”  
富永 昭, *低温工学* **34**, 117-124 (1999).
11. “Heat Capacities of Monolayer  $^3\text{He}$  Fluids Floated on a Superfluid  $^4\text{He}$  Thin Film”  
M. Morishita, H. Nagatani, and Hiroshi Fukuyama, *J. Low Temp. Phys.* **113**, 299-304 (1998).
12. “Low Temperature Heat Capacities of Submonolayer Solid  $^3\text{He}$ ”  
M. Morishita, H. Nagatani, and Hiroshi Fukuyama, *J. Low Temp. Phys.* **113**, 271-276 (1998).

## <著書>

1. 富永 昭、「熱音響工学の基礎」(内田老鶴圃, 1998年)

## <解説>

1. 富永 昭、  
「熱音響工学の進展と今後の展望  
(Progress in Thermoacoustical Engineering and its Prospects)」、  
*低温工学* **33**, 163-171 (1998)
2. 富永 昭、  
「熱音響理論と従来理論との基本的相異  
(Basic Differences between Thermoacoustic Theory and Traditional Theory)」、  
*低温工学* **33**, 172-182 (1998)

## <学位論文>

長谷 博史

「単原子層固体<sup>3</sup>Heの核磁性」

(筑波大学理工学研究科修士論文, 1999年3月)

## <講演>

1. Youiti Ootuka, Keiji Ono, Ryoji Matsuda and Hiroshi Shimada:  
“Magento-Coulomb Oscillations in Ferromagnetic Single Electron Transistors”,  
The fourth International Symposium on New Phenomena  
in Mesoscopic Structures (NPMS'98) (Kauai, December, 1998).
2. 大塚洋一, 大野圭司, 島田宏, 松田亮史:  
「強磁性3重微小トンネル接合系の磁気クーロン振動」,  
特定領域研究「微小領域の磁性と伝導」平成10年度第1回研究会(名古屋大学, 1998年7月).
3. 大塚洋一:  
「強磁性体単一電子トランジスタ」,  
日本電子工業振興会「スピニエレクトロニクス専門委員会」(東京, 1998年7月).
4. 伊藤公平, 武藤準一郎, 渡部道生, 島田宏, 大塚洋一:  
「Ge: GaのMI転移臨界領域における電気伝導」,  
日本物理学会1998年秋の分科会(沖縄国際・琉球大学, 1998年9月).
5. 渡部道生, 島田宏, 大塚洋一, 伊藤公平, 武藤準一郎:  
「磁場中における<sup>70</sup>Ge: Gaの金属-絶縁体転移」,  
日本物理学会1998年秋の分科会(沖縄国際・琉球大学, 1998年9月).

6. 松田亮史, 大野圭司, 島田宏, 大塚洋一:  
「微小2重トンネル接合系の磁気クーロン振動」,  
日本物理学会1998年秋の分科会(沖縄国際・琉球大学, 1998年9月).
7. 大川龍郎, 島田宏, 大塚洋一:  
「単一電子トランジスターを用いた走査型電荷計の開発」,  
日本物理学会1998年秋の分科会(沖縄国際・琉球大学, 1998年9月).
8. 石井裕司, 大木秀一, 島田宏, 大塚洋一:  
「常伝導細線の輸送現象における超伝導近接効果」,  
日本物理学会1998年秋の分科会(沖縄国際・琉球大学, 1998年9月).
9. 身内賢太郎, 大谷航, 渡邊隆行, 井上慶純, 伊藤寛, 竹田敦, 養輪眞, 大塚洋一:  
「鋸山に於ける暗黒物質探索実験III」,  
日本物理学会1998年秋の分科会(秋田大学, 1998年10月).
10. 大塚洋一:  
「金属微細トンネル接合システムの物理と素子応用の研究」,  
第2回「量子効果等の物理現象」シンポジウム(東京大手町, 1998年12月).
11. 大塚洋一, 松田亮史, 島田宏:  
「強磁性単電子トランジスタの磁気クーロン振動2」,  
特定領域研究「微小領域の磁性と伝導」平成10年度第2回研究会(京都大学, 1999年1月).
12. 大塚洋一:  
「強磁性体単一電子トランジスタ」,  
日本学術振興会 第131薄膜委員会第194回研究会(東北大学, 1999年2月).
13. 大塚洋一:  
「強磁性単一電子トランジスタ」,  
TARA公開セミナー「ナノロジー・アспект交流会」(筑波大学, 1999年3月).
14. 八木隆多, 小林俊一, 大塚洋一:  
「常伝導微小トンネル接合を付加した超伝導微小トンネル接合」,  
日本物理学会 第54回年会(広島大学, 1999年3月).
15. 渡部道生, 島田宏, 大塚洋一, 伊藤公平:  
「絶縁体  $^{79}\text{Ge}:\text{Ga}$  における局在長の臨界指数」,  
日本物理学会 第54回年会(広島大学, 1999年3月).
16. 富永 昭:  
「熱音響自励振動の実験から何が判ったか」,  
第二回熱音響工学研究会(名古屋, 1998年9月).

17. 富永 昭:  
「太陽電池の効率の熱力学的上限」,  
1998年度秋季低温工学・超電導学会(山口, 1998年10月).
  
18. M. Morishita, H. Nagatani, and Hiroshi Fukuyama:  
“Heat Capacities of Monolayer  $^3\text{He}$  Fluids Floated on a Superfluid  $^4\text{He}$  Thin Film”  
International Symposium on Quantum Fluids and Solids, (Massachusetts, June 1998).
  
19. M. Morishita, H. Nagatani, and Hiroshi Fukuyama:  
“Low Temperature Heat Capacities of Submonolayer Solid  $^3\text{He}$ ”  
International Symposium on Quantum Fluids and Solids, (Massachusetts, June 1998).
  
20. 森下 将史, 長谷 博史, 福山 寛:  
「サブモノレイヤー $^3\text{He}$ 固相の磁気比熱 III」,  
日本物理学会秋の分科会(沖縄国際大学, 1998年9月).
  
21. 森下 将史, 福山 寛:  
「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4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, 1998年12月).
  
22. 森下 将史, 長谷 博史, 福山 寛:  
「サブモノレイヤー固体 $^3\text{He}$ の異常比熱」,  
文部省科学研究費特定領域B研究会「低次元ヘリウム3の新物性」(伊豆高原, 1999年1月).
  
23. 森下 将史, 長谷 博史, 福山 寛:  
「サブモノレイヤー $^3\text{He}$ 固相の磁気比熱 IV」,  
日本物理学会第54回年会(広島大学, 1999年3月).

<受賞>

日本物理学会第4回論文賞

大野圭司、島田宏、大塚洋一:

“Enhanced Magnetic Valve Effect and Magneto-Coulomb Oscillations  
in Ferromagnetic Single Electron Transistor” (1999年3月).