



東邦大学

平成23年度

東邦大学理学部物理学科

東邦大学大学院理学研究科物理学専攻

卒業・修士・博士論文予稿集

卒業論文発表会

平成24年2月16日（木）・17日（金）

修士・博士論文発表会

平成24年2月23日（木）・24日（金）

発表会場 理学部IV号館大学院セミナー室

目次

卒業論文発表会プログラム	- 7 -
磁気物性.....	- 8 -
1. 焼結雰囲気を変化させて作製したスピネル化合物 MAl_2O_4 ($M = Fe, Mn$) の構造と磁性の変化 大熊 雄貴	8 -
2. パイロクロア酸化物 $Dy_2(Ti_{1-x}Zr_x)_2O_7$ のスピナイス状態に対する B サイトの乱れ効果 鶴田 宏輔	8 -
3. ランダム異方性が Heisenberg スピングラス a -GdAl の磁気相転移に及ぼす影響 池田 勇人	8 -
4. ランダム一軸磁気異方性がハイゼンベルグ型 SG アモルファス GdAl の磁気相転移に及ぼす影響 渡辺 誠	8 -
5. 界面フラストレーションを持つエピタキシャル Fe/Cr(001) 二層膜における Fe の膜厚とスローダイナミクス 橋本 拓馬	9 -
6. エピタキシャル Fe/Cr(001) 二層膜において界面フラストレーション効果が引き起こすスローダイナミクスの Cr 膜厚依存性 中村 洋文	9 -
7. A サイト欠損型ペロブスカイト酸化物の構造・物性制御 納谷 麻衣子	9 -
8. ペロブスカイト型構造を有する磁性誘電体 $EuTiO_3$ の B サイト置換効果~ $Eu(Ti_{1-x}M_x)O_3$ ($M = Al, Zr$)~ 堀江 弘樹	9 -
9. 高周波マグネトロンスパッタリング法による A サイト秩序型 $Nd_{0.5}Ba_{0.5}MnO_3$ 薄膜作製と磁化測定 横須賀 伸	10 -
10. A サイト秩序型ペロブスカイト $Sm_{0.5}Ba_{0.5}MnO_3$ 薄膜の作製と磁気特性評価 天田 祥太	10 -
表面物理.....	- 11 -
1. 二相ステンレス鋼中への水素の拡散・透過の観察 鈴木 真司	11 -
2. 電子衝撃脱離法による MgO(100) 表面へのメタノール吸着の観察 齋藤 陽子	11 -
3. 昇温浄化した MgO(100) 表面からの電子衝撃脱離イオンの放出角度分布測定 中西 祐太郎	11 -
4. 電子顕微鏡の改造及びステンレス表面の観察 田中 俊祐	11 -

5. 電界イオン顕微鏡(FIM)を用いた電界蒸発による W の構造変化の観察	江沢 利恵- 12 -
6. X 線光電子分光法によるゲータイト(α -FeOOH)の O(1s)結合状態の観察	丹羽 響太- 12 -
基礎物理.....	- 13 -
1. Ashra 実験用 64 層光ファイバー束の製作と新たな積層方法の開発	鈴木 渚沙- 13 -
2. 光ファイバー束の透過率測定	安彦 ちほ- 13 -
3. シミュレーションを用いたチェレンコフ光による宇宙線観測の研究	鹿子畑 千也子- 13 -
4. ミュー粒子寿命測定のため FPGA を用いた TDC の開発研究	高田 巧磨- 13 -
5. 半導体検出器 MPPC を用いたファイバー光検出器の研究	川合 歩- 13 -
6. シリコン検出器読み出し回路の性能評価	鬼頭 升- 14 -
7. 40cm ドリフトチェンバーによる宇宙線の観測	浜田 尚- 14 -
8. ガンマ線探索カメラの開発を目指した多素子半導体検出器 Medipix の基礎研究	大島 仁- 14 -
9. 原子核乾板における自動飛跡検出装置の基礎開発	福永 匠吾- 14 -
10. タウ崩壊事象信頼性の向上を目的とした核破砕粒子の研究	上蘭 広晃- 14 -
11. 長基線ニュートリノ振動実験 OPERA におけるタウニュートリノ反応探索	牧野 隆起- 15 -
量子エレクトロニクス.....	- 16 -
1. ドップラー効果による K 原子線の速度の測定	足利 太地- 16 -
2. K 原子の D_2 線のゼーマン効果	村上 裕太郎- 16 -
3. Ba の $6s5d^3D_1 \rightarrow 5d6p^3F_2$ 遷移におけるシュタルク効果の測定	鈴木 翔- 16 -
4. Ba 原子の高励起状態のシュタルク効果	神谷 義一- 16 -
5. マイクロ光ビームに向けたガラスキャピラリーにおける光の透過	加藤 恭平- 16 -

6. 金属表面への二酸化チタンコーティングについて	土屋 奨護- 17 -
7. ラマン散乱を用いた大気リモートセンシング	大波 健太- 17 -
8. ラマン散乱を用いた大気のリモートセンシング	飯塚 隼仁- 17 -
9. 過熱液滴型検出器内の生成気泡に対する X 線ラジオグラフィーの研究	山本 治- 17 -
10. オプトガルバニック分光法による緩和時間の測定	鈴木 健太- 17 -
物性物理.....	- 18 -
1. λ -(BETS) ₂ FeBr _x Cl _{4-x} における π - d 相互作用と常磁性金属-反強磁性絶縁体転移	黒土 裕加- 18 -
2. 一軸圧縮による λ -(BETS) ₂ FeCl ₄ の相転移制御	吉澤 大輔- 18 -
3. 磁場下の λ -(BETS) ₂ FeCl ₄ の反強磁性絶縁体相と強磁場金属相	廣瀬 桃子- 18 -
4. λ -(BETS) ₂ Fe _x Ga _{1-x} Cl ₄ における余剰比熱の磁場依存性	山本 友介- 18 -
5. Et ₂ Me ₂ Sb[Pd(dmit) ₂] ₂ の圧力下における熱的性質	奥澤 唯- 18 -
6. Et ₂ Me ₂ Sb[Pd(dmit) ₂] ₂ のゼーベック係数の圧力・方向依存性	栗竹 広大- 19 -
7. 微小試料の圧力下における比熱の測定	山内 貴弘- 19 -
8. (Me-3,5-DIP)[Ni(dmit) ₂] ₂ における異常ホール効果	下田 将大- 19 -
9. 低温・高磁場下のゼロギャップ伝導体 $\sim\alpha$ -(BEDT-TTF) ₂ I ₃ \sim	黒坂 悠平- 19 -
10. 薄板結晶の分子性ディラック電子系	山口 達也- 20 -
11. 有機ゼロギャップ伝導体 α -(BEDT-TTF) ₂ I ₃ における化学ポテンシャルの温度依存性	寺島 拓- 20 -
12. α' -(BEDT-TTF) ₂ IBr ₂ の非線形伝導の研究	野崎 大輔- 20 -
学内外研.....	- 21 -
1. 水素-メタン火炎中のイオン電流測定による火炎の形状の測定	田町 英紀- 21 -

2. 熱の概念を形成する実験教材の開発と実践	柴田 貴大- 21 -
3. 科学史の事例を取り入れた授業の効果と課題の解明	竹村 恵介- 21 -
原子過程科学.....	- 22 -
1. RF カーペットによるイオン付着飛行時間質量分析装置の改良	鈴木 雅之- 22 -
2. 混合ガス法を用いた NO の一般化振動子強度の測定	各務 聡一郎- 22 -
3. 散乱電子 - イオン同時計測による水素分子の二電子励起状態の探求	酒田 遥祐- 22 -
宇宙・素粒子.....	- 23 -
1. ニュートリノ振動とニュートリノの質量	笠井 健司- 23 -
2. 量子電磁力学による電子の異常磁気能率	齋藤 敬介- 23 -
3. 視線速度法による太陽系外衛星の探査	皆川 航- 23 -
4. 重力マイクロレンズ効果を用いた太陽系外衛星探査	桜井 準也- 23 -
5. モノポール場中の荷電粒子の運動	上條 裕基- 24 -
6. 場の量子論の概要, 特に Feynman ダイアグラムの数式的対応について	西園 裕之- 24 -
7. SIS フォトン検出器の実験環境の整備と性能評価	渡邊 動太- 24 -
8. 極低温環境における多素子読み出しシステムの動作評価	関口 繁之- 24 -
9. サブミリ波カメラにおける 32 素子読み出し回路の自動制御	鳥居 大亮- 24 -
物性理論.....	- 25 -
1. 最適化問題に対するボルツマンマシンの応用	西原 彰- 25 -
2. スピン起電力に対する数値解析- 25 -	今野 雄太- 25 -
3. スピン 1 反強磁性ハイゼンベルグ鎖における Berry 位相	土井 健司- 25 -

4. 傾いたディラックコーンをもつ相対論的電子のトンネル効果	坂本 紘樹 - 25 -
5. 電子波束の量子ダイナミクスの数値的研究	馬場 広大 - 25 -
6. 不規則一次元電子系におけるエネルギー準位統計の解析	和田 孝一郎 - 26 -
博士・修士論文発表会プログラム	- 27 -
博士論文予稿	- 28 -
1. タウニュートリノ反応のハドロンバックグラウンドの研究	松尾 友和 (基礎物理) - 28 -
2. λ -BETS ₂ FeCl ₄ の π -d 系が示す常磁性金属-反強磁性絶縁体転移～熱力学的研究を中心として～	秋葉 宙 (物性物理) - 30 -
3. 簡単な分子の光学的禁制二電子励起状態の探索とその解離過程の研究	山本 果林 (原子過程科学) - 32 -
修士論文予稿	- 33 -
1. λ -(BETS) ₂ Fe _x Ga _{1-x} Cl ₄ における常磁性金属-反強磁性絶縁体転移	登 健人 (物性物理) - 33 -
2. Et ₂ Me ₂ Sb[Pd(dmit) ₂] ₂ の電荷分離転移における圧力下熱的研究	田中 友樹 (物性物理) - 35 -
3. 有機伝導体 α -(BETS) ₂ I ₃ の伝導特性とゼロギャップ性	遠藤 里実 (物性物理) - 37 -
4. Goethite 表面における Cd 吸着形態の観察	手塚 純 (表面物理) - 38 -
5. 混合ガス法を用いた一酸化窒素の価電子励起状態の一般化振動子強度の測定	鈴木 宗宜 (原子過程科学) - 39 -
6. イオン付着飛行時間分析法を用いた呼気分析装置～実用化に向けての性能評価～	出口 裕理 (原子過程科学) - 40 -
7. デジタルカメラを用いた大気リモートセンシング	清家 和貴 (量子エレクトロニクス) - 41 -
8. 高分解能レーザー分光法を用いた 2 電子原子 Ba と Yb のシュタルク効果の研究	小林 二千翔 (量子エレクトロニクス) - 42 -
9. 常温における p-ターフェニル中の陽子偏極	澁澤 杏奈 (量子エレクトロニクス) - 43 -
10. イオンの乱れがスピネル化合物 CoAl ₂ O ₄ のスピン液体状態に与える効果	花島 健太郎 (磁気物性) - 44 -
11. 高周波スパッタリング法を用いた A サイト秩序型ペロブスカイト Mn 酸化物の薄膜作製	三橋 賢 (磁気物性) - 46 -

12. Ashra 実験に用いるトリガー系の開発
辻川 弘規 (基礎物理) - 48 -
13. Ashra 望遠鏡を用いたチェレンコフ光による宇宙線観測
小暮 大輔 (基礎物理) - 49 -
14. B ファクトリー実験で使用する新型光検出器の放射線耐性
森 和香奈 (基礎物理) - 50 -
15. 格子ゲージ理論を用いたクォーク閉じ込めの解析
鈴木 博登 (宇宙・素粒子) - 51 -
16. ASTE 望遠鏡搭載サブミリ波観測装置 SISCAM の性能向上
大川 泰史 (宇宙・素粒子) - 52 -

卒業論文発表会プログラム（講演9分、質疑3分）

理学部 IV 号館 2F 大学院セミナー室

平成24年2月16日（木）

開会	9:00 ~ 9:05
磁気物性	9:05 ~ 10:17 10:22 ~ 11:10
表面物理	11:20 ~ 12:32
休憩	12:32 ~ 13:15
基礎物理	13:15 ~ 14:15 14:20 ~ 15:32
量子エレクトロニクス	15:42 ~ 16:42 16:47 ~ 17:47

平成24年2月17日（金）

物性物理	9:00 ~ 10:24 10:29 ~ 11:29
学内外研	
生命圏環境科学科	11:39 ~ 11:51
教育学教室	11:51 ~ 12:15
休憩	12:15 ~ 13:15
原子過程科学	13:15 ~ 13:51
宇宙・素粒子	14:01 ~ 14:49 14:54 ~ 15:54
物性理論	16:04 ~ 17:16
閉会	

磁気物性 9:05 ~ 11:10

前半 9:05 ~ 10:17

1. 焼結雰囲気を変化させて作製したスピネル化合物 MAI_2O_4 ($M = Fe, Mn$) の構造と磁性の変化

大熊 雄貴

幾何学的フラストレーションを持つスピネル化合物 $CoAl_2O_4$ のスピン液体状態は、 A - B サイト間のイオンの乱れによりスピングラス (SG) へ秩序化をすることが知られている。そこで、本実験ではまだサイト間の乱れが調べられていない MAI_2O_4 ($M = Fe, Mn$) の試料を単相で作製することを目的として、 Ar 、 $Ar-H_2$ 、及び真空封入の焼結雰囲気で作製を試みた。その結果、真空封入し $1100\text{ }^\circ\text{C}$ で 5 時間焼結する事で単相の試料が作製できた。また、磁化測定においては $M = Fe$ で SG 転移が観測された。

2. パイロクロア酸化物 $Dy_2(Ti_{1-x}Zr_x)_2O_7$ のスピンアイス状態に対する B サイトの乱れ効果

鶴田 宏輔

本研究では、低温でスピンアイス状態を示すパイロクロア酸化物 $Dy_2Ti_2O_7$ の B サイトを Zr で置換した $Dy_2(Ti_{1-x}Zr_x)_2O_7$ を固相反応法により製作した。単相が得られた試料に対する 2 [K] までの磁化測定では、 $x = 0.01$ から $x = 0.10$ へと増加するにつれて、スピンアイスに特徴的な磁化の温度変化の山が消えていき、交流磁化率の周波数依存性が減少した。このことから、一軸異方性と有効強磁性相互作用の競合によるスピンアイス状態は、 B サイトによる乱れにより、融解したと考えられる。

3. ランダム異方性が Heisenberg スピングラス $a\text{-GdAl}$ の磁気相転移に及ぼす影響

池田 勇人

Heisenberg スピングラス (SG) であるアモルファス $(Gd_{1-x}R_x)_{36}Al_{64}$ ($x = 0.00, 0.10, 1.00$; $R = Nd, Sm, Dy$) をスパッタリング法により作製し、 x でランダム一軸異方性 D の制御を行った。MPMS で磁化測定をした結果から H - T 相図を作製し D が SG の臨界曲線に与える影響を調べた。その結果、実験的に定義した GT line が x の増加に伴い AT line 的に変化した。これは、 D によって系の Ising 性が強くなったためと考えられる。

4. ランダム一軸磁気異方性がハイゼンベルグ型 SG アモルファス $GdAl$ の磁気相転移に及ぼす影響

渡辺 誠

ハイゼンベルグ型 SG として知られている $a\text{-GdAl}$ にランダム一軸磁気異方性 (D) を導入した時の、磁気相転移に及ぼす影響を調べる為、 D をもつアモルファス磁性体 $a\text{-(Gd}_{1-x}\text{Nd}_x)_{36}\text{Al}_{64}$ ($x = 0, 0.1, 1.0$) をマグネトロンスパッタリング法で作製し、MPMS による磁化測定を行った。その結果から H - T 相図を作成すると、 D の割合 (x に比例) が大きくなるにつれてイジング性が強まり、低磁場での磁化のピークの温度から決めた臨界曲線のふるまいが、熱履歴の始まる温度を示す臨界曲線に近づくことがわかった。

5. 界面フラストレーションを持つエピタキシャル Fe/Cr(001)二層膜における Fe の膜厚とスローダイナミクスの関係

橋本 拓馬

界面でのフラストレーションがどのように全体の磁化緩和に影響し、スローダイナミクスを引き起こすのかを調べるため、Fe/Cr(001)二層膜の界面フラストレーションの大きさは変えずに、Fe の膜厚のみを 20 Å ~ 80 Å の範囲で変えた試料を分子線エピタキシー法で作製し、熱残留磁化の緩和を測定した。その結果、対数的な緩和の係数である磁気粘性が Fe の膜厚増加に伴い Cr の場合と比較して大きく減少した。膜厚が薄いほど界面フラストレーションを解消しようとして Fe 層内に磁壁ができやすいため、この磁壁の移動がスローダイナミクスの原因と考えられる。

6. エピタキシャル Fe/Cr(001)二層膜において界面フラストレーション効果が引き起こすスローダイナミクスの Cr 膜厚依存性

中村 洋文

界面フラストレーションを持つ Fe/Cr 二層膜では対数的な磁化緩和（スローダイナミクス）が観測される。磁壁形成で界面フラストレーションを解消するモデルから磁化の緩和は磁壁の移動によるものと仮定し、これを確かめるため Cr の膜厚を 50 ~ 100 Å と変化させた試料を MBE 法で作製した。その結果、磁化緩和の仕方に Cr の膜厚による大きな違いは無く、Cr のスピン密度波の構造が変化する境界付近で顕著な緩和の変化が見られた。よって Cr 層には磁壁が形成されず、その磁気構造の変化が磁化の緩和に影響を及ぼす事が分かった。

----- 休憩 -----

後半 10:22 ~11:10

7. A サイト欠損型ペロブスカイト酸化物の構造・物性制御

納谷 麻衣子

A サイト欠損型ペロブスカイト酸化物 $Lm_{1-x}TiO_3$ (Ln は希土類) には欠損量 $x = 1/3$ の組成に対して、A サイト欠損が規則化した秩序型構造をとるものがある事が報告されている。本研究では固相反応法で作製した $Lm_{1-x}TiO_3$ ($Ln = La, Pr, Nd, Sm$) の A サイトの欠損量 x 、および B サイトの平均イオン半径を変化させた時に欠損の規則構造にどのような影響が現れるのかを調べた。その結果、イオン半径の比や熱処理条件によって規則化の度合いが変わる事がわかった。また、磁化測定により欠損構造の変化に対する磁性の変化を調べ、物性制御が出来ないか検討した。

8. ペロブスカイト型構造を有する磁性誘電体 $EuTiO_3$ の B サイト置換効果 ~ $Eu(Ti_{1-x}M_x)O_3$ ($M = Al, Zr$) ~

堀江 弘樹

$EuTiO_3$ は 1.5 T の磁場で、強磁性的な振舞に変化すると共に約 7% の誘電率変化を示す。本研究はこの物質の Ti^{4+} を一部 Al^{3+} に置換して新規磁性誘電体の創製を目指し、その磁性を調べた。結果、 Eu^{2+} 、 Eu^{3+} の混合原子価状態を実現し、置換量 5% 以上では 0.01 T の磁場でも強磁性的な振舞を見せた。一方、比較の為作製した Eu^{2+} の希釈がない Zr^{4+} 置換の試料では反強磁性のままであった。これらの結果は、Eu の混合原子価状態が誘電率の磁場感度上昇、価数差による誘電率増大の可能性を示唆している。

9. 高周波マグネトロンスパッタリング法によるAサイト秩序型Nd_{0.5}Ba_{0.5}MnO₃薄膜作製と磁化測定

横須賀 伸

室温での超巨大磁気抵抗効果 (CMR) を目標としてAサイト秩序型ペロブスカイトNd_{0.5}Ba_{0.5}MnO₃薄膜をSrTiO₃基板、LaAlO₃基板、Si基板上に作製し、エピタキシャル歪みが多重臨界点近傍の物性に与える効果について調べた。作製した薄膜はAr、空气中でアニール処理 ($T_a = 500^\circ\text{C} \sim 850^\circ\text{C}$) を施した。その結果、どの基板でもペロブスカイト構造を持ち、 T_a を上げていくとAサイトの秩序化に伴い室温付近で強磁性的な相関が見られた。特にSi基板上ではA型反強磁性相が抑制する傾向がみられた。

10. Aサイト秩序型ペロブスカイトSm_{0.5}Ba_{0.5}MnO₃薄膜の作製と磁気特性評価

天田 祥太

Aサイト秩序型RE_{0.5}Ba_{0.5}MnO₃薄膜 (RE=希土類) は基板とのエピタキシャル歪みを利用する事により室温での超巨大磁気抵抗 (CMR) 効果が期待される。本研究では、高周波マグネトロンスパッタリング法により、RE = Sm (SBMO) 薄膜をSrTiO₃基板上に作製した。アニール温度 (T_a) が500~900°Cの場合、磁化測定では無秩序型SBMO特有のスピングラス相が観測された。一方、 $T_a = 950^\circ\text{C}$ の場合、室温CMR効果に必要なAサイトの秩序化の傾向が見られ、290 Kにおいて反強磁性相が観測された。

表面物理 11:20 ~ 12:32

1. 二相ステンレス鋼中への水素の拡散・透過の観察

鈴木 真司

金属中の水素の挙動を観察するため、ステンレス板の片側を水素雰囲気にし、他方の側に拡散・透過してくる水素を走査型電子顕微鏡によりESDイオン像として2次元的に観察をした。試料はオーステナイトにマルテンサイト相が生じた二相ステンレスとなっている。実験は、室温から300°Cまで約20時間かけて試料を昇温した。その際10分置きに脱離イオン像を撮影し、表面水素濃度の変化を観察した。昇温とともに約230°Cから、透過してきた水素の表面への拡散が、イオン像に特徴的な構造はなく一様に観察された。

2. 電子衝撃脱離法によるMgO(100)表面へのメタノール吸着の観察

齋藤 陽子

大気中劈開したMgO(100)表面を加熱清浄化し、メタノール蒸気を曝露した。吸着状態を調べるために電子線を照射し、四重極質量分析計を用いて脱離イオンの質量スペクトルを測定した。表面清浄化は超高真空中で700°C 6時間加熱することにより行われた。メタノール曝露量を10、100、1000、10000Lに設定し、実験を行った。メタノール由来の脱離イオンとして H^+ 、 H_2^+ 、 CH^+ 、 CH_2^+ 、 CH_3^+ 、 O^+ 、 OH^+ 、 F^+ 、 CO^+ 、 COH^+ 、 CH_3OH^+ が検出された。脱離イオン量は、曝露量が増えるとともに増加した。また、メタノール吸着表面を再度700°Cで加熱すると、吸着前と同じ清浄化された表面を得る事ができた。

3. 昇温清浄化したMgO(100)表面からの電子衝撃脱離イオンの放出角度分布測定

中西 祐太郎

大気中劈開により得られたMgO(100)面の昇温による表面清浄化過程とその表面へのメタノール吸着形態を電子衝撃脱離イオンの放出角度分布により調べた。脱離イオンの質量分析には飛行時間法を用いた。パルス電子線のエネルギーは300(eV)、試料への入射角は表面法線方向から45度である。バックグラウンドとなるイオンを差引くと、600°Cまでの昇温により H^+ 以外の脱離イオンはほぼ消失する。メタノール曝露後、電子線の結晶へのイオンの放出角度分布を測定した結果、メタノール由来の吸着子は表面ステップサイトやテラスサイトに吸着する事が分かった。

4. 電子顕微鏡の改造及びステンレス表面の観察

田中 俊祐

以前物性物理学研究室にあった電子描画装置を、表面物理学研究室に運び、再構築した。その際、電子顕微鏡試料室をさらに高真空にし、かつオイルフリーにするため、油拡散ポンプからターボ分子ポンプに交換するため排気系の改造を行った。また、二次電子像を撮影するためにポラロイドを使用せずにデジタル一眼レフを使用し画像を取り込むため画像取り込み部の改造も併せて行った。装置の試験を兼ねて、SUS304 ステンレス表面の結晶粒界を見るために、サンドペーパー等で研磨した後、電解研磨した。その後結晶粒界を電子顕微鏡で観察した。

5. 電界イオン顕微鏡(FIM)を用いた電界蒸発による W の構造変化の観察

江沢 利恵

FIM 像の空間分解能はティップ先端の曲率半径に大きく依存する。そのため、タングステンティップの製作において、W線が電界研磨により切断されると同時に電流が遮断される自動電流遮断回路を用いて作成した。本研究において、ティップ先端に現れた結晶面からの電界蒸発による原子配列変化を観察した。高電場となる最先端面上の原子及びステップサイトの原子が電界蒸発により消失する過程を観察した。

6. X 線光電子分光法によるゲータイト(α -FeOOH)の O(1s)結合状態の観察

丹羽 響太

土壌粘土の主成分の1つである Goethite へのカドミウム (Cd) 吸着様態について知見を得るために、大気中で劈開した天然の Goethite と Cd を吸着させた Goethite を X 線光電子分光法(XPS)で観察した。Goethite の酸素 (O) は O^{2-} と OH^- で構成されている。観測された O1s ピークの形状はこの2種類の化学状態の酸素 (O) に分解できる。Cd の蒸着により、これらの酸素の結合エネルギーはともに低エネルギー側にシフトし、Cd は O^{2-} と OH^- に化学結合することが明らかになった。

基礎物理 13:15 ~ 15:32

前半 13:15 ~14:15

1. Ashra 実験用 64 層光ファイバー束の製作と新たな積層方法の開発

鈴木 渚沙

Ashra 望遠鏡では、イメージ伝送系に直径500 μm の光ファイバーを64 \times 64本の格子状に束ねた光ファイバー束が使われる。本研究では正方格子からのずれが200 μm 以内に入力面と出力面の両方が収まる光ファイバー束の製作を行った。従来の方法では正確な目視調整が行えていなかったため、積層前に個々のファイバーのずれ方を調べることにした。また、出力面は入力面と同じように積層するとずれが大きくなる傾向があったが、端を剥がし付け直すことによりずれを小さくすることが可能になった。

2. 光ファイバー束の透過率測定

安彦 ちほ

Ashra 実験のトリガー系に使われている光ファイバー束の光伝送性能は、透過率によって評価されてきた。トリガー系の伝送効率、光ファイバー束自体の透過率に加え、レンズの開口数や光ファイバーの開口数、ファイバーの端面の状態などに依存する。本研究では、装置の改良を行い、光源の安定性、光電子増倍管への電源供給の不安定性、被写界深度と透過率の影響を調べた。レンズの開口数についてはレンズの絞りと透過率の関係を調べた。今後は、実際に使われる集光レンズ系を導入し、伝送効率測定の標準化を行う。

3. シミュレーションを用いたチェレンコフ光による宇宙線観測の研究

鹿子畑 千也子

Ashra 実験では、高エネルギー核子による空気シャワーを検出することにより、地球かすりニュートリノ事象による初めての超高エネルギーニュートリノの検出を狙っている。本研究では、空気シャワーの生成様式、光の伝播および検出方法を理解するため、シミュレーションを用いて高エネルギー核子による空気シャワーを発生させ、チェレンコフ光による観測地点での光子数や光子の角度分布等を調べた。さらに Ashra 実験における2009年の試験観測で得られたペタ電子ボルトからエクサ電子ボルトの宇宙線スペクトラムの再現を行い、Ashra 望遠鏡によって観測された実データと比較した。

4. ミュー粒子寿命測定のため FPGA を用いた TDC の開発研究

高田 巧磨

ミュー粒子は弱い相互作用によって約2.2 μs の寿命で崩壊し電子を生成する。このミュー粒子の崩壊事象を捉え、その平均寿命を測定するためには数 ns、数十 ns の時間分解能を持つ時間計測器が必要である。本研究では FPGA (Field Programmable Gate Array) と呼ばれる、回路の書き換えが可能な LSI を使用する。この FPGA の最大動作周波数はおよそ数百 MHz であることから、要求される時間分解能を持つ TDC を設計することが可能である。そのなかでも今回は、50MHz のクロックジェネレータを搭載した FPGA 評価ボードを用いることで時間分解能20ns/count の TDC の設計を行い、その性能を評価した。

5. 半導体検出器 MPPC を用いたファイバー光検出器の研究

川合 歩

MPPC (Multi Pixel Photon Counter) は、浜松ホトニクス社が開発した新しいタイプの半導体光検出器である。優れたフォトンカウンティング能力、コンパクト、常温・低バイアスで作動するなどの性能の良さから将来的に様々な分野において光電子増倍管などの従来の光検出器に代わる存在になると注目を浴びている。本研究では MPPC の性能評価のために、読み出し回路や MPPC の信号を増幅するアンプの作製を行った。光電子増倍管の代わりに光ファイバー読み出しに使用することを想定し、簡易モデルの開発と基礎特性を調べた。

----- 休憩 -----

後半 14:20 ~ 15:32

6. シリコン検出器読み出し回路の性能評価

鬼頭 升

シリコン検出器は Belle 実験などの高エネルギー実験において、反応点検出のための飛跡検出器として広く使用されている。シリコン検出器からの電気信号は数千電子程度で、読み出すチャンネル数も数百~数千となり、信号雑音比が高く、高集積度の増幅器で読み出す必要がある。本研究では、ASIC 技術で製作されたシリコン検出器読み出し回路の動作試験と性能の評価を行った。さらに、実際にシリコン検出器に接続して性能試験を行った。

7. 40cm ドリフトチェンバーによる宇宙線の観測

浜田 尚

ドリフトチェンバーは高エネルギー物理分野において広く使用されているガス飛跡検出器である。構造が簡単なことから大きな空間を覆うことが可能である。本研究では宇宙線に対して有感領域30 cm × 30 cm で、3次的に飛跡を観測できる検出器を、40 cm ドリフトチェンバーで構成した。その検出器の基礎特性を調べ、宇宙線を観測し、性能評価を行なった。

8. ガンマ線探索カメラの開発を目指した多素子半導体検出器 Medipix の基礎研究

大島 仁

ガンマ線探索カメラへの応用を目指し、256 × 256 個のピクセルを持つ多素子半導体検出器 Medipix の基礎研究を行った。先ず、様々な角度に設置した Medipix に数百 MeV/u の陽子、鉄、シリコンビームを照射し、エネルギー損失を計測するとともにそのデータパターンから入射角を求めた。さらに、数十 keV のガンマ線や特性 X 線を照射し、各ピクセル毎にエネルギー損失と Medipix の応答との関係を示す校正曲線を得た。これらは放射線の入射方向及びエネルギーを測定するために必要な基礎データで、ガンマ線探索カメラ開発への第一歩である。

9. 原子核乾板における自動飛跡検出装置の基礎開発

福永 匠吾

原子核乾板は原子核、素粒子の振る舞いを1 μm 以下の高い位置精度で観測できる固体飛跡検出器である。その構造はプラスチックの基板の両面に乳剤(検出部)を塗布したもので、乳剤中の飛跡を CCD カメラ等で読み取ることができる。現在、本研究室では大角度の飛跡の認識とその高速化を視野に入れた自動飛跡検出装置を新たに開発中である。本研究では、比較的検出が困難な最小電離粒子飛跡の画像取得法と解析法を検討し、改善した。その結果、最小電離粒子飛跡の検出効率を向上させることができた。

10. タウ崩壊事象信頼性の向上を目的とした核破砕粒子の研究

上蘭 広晃

OPERA 実験はタウ粒子直接検出によりニュートリノ振動を証明する実験である。タウ粒子検出の判断には、折れ曲がったようにみえる特徴的な幾何学的な形状が用いられるが、それに類似した背景事象のひとつにハドロンの二次散乱がある。これらは核破砕粒子の有無によりタウ崩壊事象と分離することができる。本研究では10 GeV/c のパイ中間子ビームを照射した原子核乾板を使い、 $\tan \theta < 3$ までの範囲で核破砕粒子の探索を行ない、核破砕粒子の放出本数および放出角度の測定を行った。

11. 長基線ニュートリノ振動実験 OPERA におけるタウニュートリノ反応探索

牧野 隆起

OPERA 実験は、ニュートリノに質量がある事を示すニュートリノ振動現象を出現型で確認するために、タウニュートリノ反応の観測を目的としている。検出器には空間分解能が優れ、タウ粒子崩壊検出に適した原子核乾板を用いている。2008年から本格照射実験が始まり、日本と欧州のスキランニングステーションでニュートリノ反応の検出を進めている。基礎物理学教室で荷電粒子飛跡を逆追跡した事象のうち、24例のニュートリノ反応事象の再構成を行った。その結果、1例の興味深い事象が検出できたので詳細な解析を行った。

量子エレクトロニクス 15:42 ~ 17:47

前半 15:42 ~ 16:42

1. ドップラー効果による K 原子線の速度の測定

足利 太地

K原子線に 30°及び 90°方向から半導体レーザーからのレーザー光を照射し、レーザー誘起蛍光分光法を用いて蛍光スペクトルを観測した。また、原子線源の温度を数回変え、同様の実験を繰り返した。そのスペクトルを解析し、K原子線の速度を直接測定した。また、速度から温度を計算し、クロメル・アルメル熱電対の測定値と比較した。その結果、原子線源を 483 K から 893 K まで加熱した時、最確速度を 664.3 (53) - 823.0 (36) m/s と、原子線の温度を 690 (11) - 1059 (9) K と得た。

2. K 原子の D2 線のゼーマン効果

村上 裕太郎

K 原子の D2 線($4s^2S_{1/2} - 4p^2P_{3/2}$)のゼーマン効果を調べるために、高分解能原子線レーザー分光を行った。K 原子の超微細構造スペクトルを観測するとともに、強さ 46G から 173G までの磁場をかけ K 原子のゼーマンスペクトルを観測した。また直線偏光、 σ^+ 、 σ^- 円偏光を用いスペクトルの $\Delta m = +1, -1$ の成分を選択的に観測した。K 原子のゼーマンスペクトルを観測した結果、基底状態 $4s^2S_{1/2}$ と上準位 $4p^2P_{3/2}$ の g 因子をそれぞれ 1.84 ± 0.16 、 1.14 ± 0.05 と決定した。

3. Ba の $6s5d^3D_1 \rightarrow 5d6p^3F_2$ 遷移におけるシュタルク効果の測定

鈴木 翔

高分解能レーザー分光法を用いて、高励起状態における Ba 原子のシュタルク効果の研究を行った。電気放電を用いて Ba 原子を基底状態 $6s^2^1S_0$ から準安定状態 $6s5d^3D_1$ に占有させ、 $6s5d^3D_1 \rightarrow 5d6p^3F_2$ (767.2nm) 遷移のシュタルクスペクトルを観測した。強さ 41kV/cm まで電場をかけシュタルクシフトや分岐を詳しく測定した。上準位 3F_2 のテンソル分極率 α_t を -111.5 ± 2.4 kHz/(kV/cm)²、下準位 3D_1 のテンソル分極率 α_t を -14.67 ± 0.50 kHz/(kV/cm)²、スカラー分極率 α_s を -89.2 ± 3.0 kHz/(kV/cm)² と求めた。

4. Ba 原子の高励起状態のシュタルク効果

神谷 義一

今までは、単電子と 2 電子原子の基底状態からの遷移におけるシュタルク効果の観測をしてきた。本研究は高励起状態におけるシュタルク効果を調べることを目的とする。高電場を作り、Ba 原子の準安定状態 $6s5d^3D_1$ から高励起状態 $5d6p^3F_2$ への 767.2nm 遷移のシュタルクスペクトルを測定した。既存の原子線源を改良し、Ba 原子を基底状態 $6s^2^1S_0$ から準安定状態 $6s5d^3D_1$ へ励起するという電気放電方法を用いた。その結果、スカラー分極率を -89.2 ± 3.0 kHz/(kV/cm)² と、上、下準位のテンソル分極率を -111.5 ± 2.4 kHz/(kV/cm)²、 -14.67 ± 0.50 kHz/(kV/cm)² と求めた。

5. マイクロ光ビームに向けたガラスキャピラリーにおける光の透過

加藤 恭平

本研究ではガラスキャピラリーによるマイクロ光ビームの生成に向けた基礎的な研究を行った。ガラスキャピラリーにレーザー光を透過させ、透過率を測定し、レーザー光の伝搬を調べた。得られたデータから出口径の増加と共に透過率が約 1% から 5% まで増加することが分かった。また、光学レンズとガラスキャピラリーを組み合わせることで光学レンズの焦点位置による透過率の変化を詳しく測定した。その結果、最大で 98% の透過率が得られた。光学レンズとの組み合わせによりガラスキャピラリーにおける光ビームが収束でき、高い透過率で透過することが分かった。

----- 休憩 -----

後半 16:47 ~ 17:47

6. 金属表面への二酸化チタンコーティングについて

土屋 奨護

光触媒による分解反応を前提とした、金属表面への二酸化チタンのコーティングに関する研究を行った。建材用のアルミ板上でコーティング剤を風乾させた場合は著しい二酸化チタンの剥離が見られ、市販のアルミ箔で風乾させた場合は緻密な薄膜を形成した。また、ガラスに蒸着させたアルミニウム上でコーティング剤を風乾させた場合は、蒸着させたアルミニウムとともにコーティング剤が流れ落ちてしまった。最後に、均一的な薄膜を得るために、アルミ箔にスピンドルコーティングを行った。

7. ラマン散乱を用いた大気リモートセンシング

大波 健太

YAG レーザーとデジタルカメラ、メカニカルシャッターを用いて地表面付近に存在する大気中物質 N_2 、 O_2 、 H_2O のラマン散乱光を観測し、その分極率を測定することを目的とした実験を行った。屋外で撮影をする準備として背景光を減少させるための装置のレーザーパルス同期メカニカルシャッターを作成した。実験の結果、屋内では N_2 と O_2 と H_2O のラマン散乱光、屋外では N_2 と O_2 のラマン散乱光をそれぞれ観測することに成功し、得られた画像から N_2 の分極率を求めることができた。

8. ラマン散乱を用いた大気のリモートセンシング

飯塚 隼仁

本研究はライダーという装置を利用し、大気中の N_2 、 O_2 、 H_2O 等の様子についてデジタルカメラとレーザーを利用して観測することが主な目的である。今年度はこれらの分子によるラマン散乱でストークス光と呼ばれる光をデジタルカメラで撮影し、そのエネルギーを計算し、そこから分子の分極率を求めた。また背景光を抑える為、メカニカルシャッターを製作した。そして、大気中の N_2 と O_2 のストークス光を観測した。

9. 過熱液滴型検出器内の生成気泡に対する X 線ラジオグラフィーの研究

山本 治

過熱液滴型検出器とは主に中性子に対して感度を有する積算型線量計である。その気泡生成原理には放射線の生物効果との類似性が指摘されており、放射線の生物・臨床効果を簡便に評価するツールとして用いることが出来る可能性がある。本実験では、過熱液滴型検出器内に生じた泡の3次元分布を取得することを目的として、X線による過熱液滴型検出器内の泡のラジオグラフィー計測を試みた。放射線治療時の位置決め用いられる100kV領域のX線による過熱液滴型検出器の透過像を撮像装置であるフラットパネルディテクターで測定し、過熱液滴型検出器内におけるX線の散乱特性を評価すると同時に、気泡の形状や鮮明度を指標として計数に最適な条件を検討した。

10. オプトガルバニック分光法による緩和時間の測定

鈴木 健太

前年度の改良された遅延パルス制御装置を使用し、オプトガルバニック分光法を用いた Mo 、 Na の寿命の測定を行った。第一励起レーザー光、及び、第二励起レーザー光を照射して Mo 、 Na を励起し、オプトガルバニック分光法による測定をした。その結果、 Mo の $4d^55d^7D_3$ 準位の励起寿命は $\tau = 15.3(1.2)$ ns、 Na の $5s^2S_{1/2}$ 準位の励起寿命は $\tau = 17.0(1.3)$ ns となった。

物性物理 9:00 ~ 11:29

前半 9:00 ~ 10:24

1. λ -(BETS)₂FeBr_xCl_{4-x}における π - d 相互作用と常磁性金属-反強磁性絶縁体転移

黒土 裕加

λ -(BETS)₂FeCl₄では伝導電子 π と局在 d スピンの間の相互作用が 8.3 K で金属 - 絶縁体転移と磁気秩序が結合した常磁性金属 - 反強磁性絶縁体転移を引き起こすと考えられてきた。この系では FeCl₄ の一部をイオン半径の大きな Br に置換することで π - d 相互作用の増強が期待される。本研究では、Br 置換し比熱測定することで π - d 相互作用の大きさを評価し相転移との関係を調べた。その結果、 π - d 相互作用が大きくなると転移温度が上昇することが明らかとなった。

2. 一軸圧縮による λ -(BETS)₂FeCl₄ の相転移制御

吉澤 大輔

λ -(BETS)₂FeCl₄ は常磁性金属-反強磁性絶縁体転移(PM-AFI 転移)を示す特異な有機伝導体であり、静水圧を加えることによってその転移が抑制され、超伝導転移(PM-SC 転移)が観測される。本研究ではその機構を探るため、BETS 分子間の結びつきを強め、相対的に π - d 相互作用を弱めると思われる方向に圧力をかけた。その結果常圧下で見られた鋭い PM-AFI 転移が小さな圧力で抑制されることがわかった。さらに加圧すると金属状態にも変化が見られ、この物質は圧力に敏感であることがわかった。

3. 磁場下の λ -(BETS)₂FeCl₄ の反強磁性絶縁体相と強磁場金属相

廣瀬 桃子

λ -(BETS)₂FeCl₄は約 8 K で金属-絶縁体転移と磁気秩序が結合した常磁性金属-反強磁性絶縁体転移を示す。この系は磁場の増大に伴って強磁場金属状態、さらに磁場誘起超伝導状態へと移行する。本研究では spin 系及び電子系の状態を探るために、磁場下での比熱測定を行った。その結果、弱磁場では反強磁性に特徴的なスピントロップおよびキャントの効果が見られ、磁場の増大に伴い2種の磁場を感じた spin 系へ移行し、強磁場金属相ではこれまで考えられていた spin・電子状態としては説明できないような温度に比例した比熱異常が観測された。

4. λ -(BETS)₂Fe_xGa_{1-x}Cl₄における余剰比熱の磁場依存性

山本 友介

λ -(BETS)₂Fe_xGa_{1-x}Cl₄は Fe 濃度の希薄化および磁場の印加により、その基底状態を反強磁性絶縁体相から超伝導相あるいは金属相へ大きく変える。本研究では Fe 濃度を変えた λ -(BETS)₂Fe_xGa_{1-x}Cl₄ の比熱の磁場依存性を測定することにより、絶縁相から金属相あるいは超伝導相への転移の際、Fe の 3d スピン濃度及び磁場変化がどのように π 電子の状態を変えるのか探った。その結果、Fe の濃度及び磁場に依存する大きな余剰比熱を観測し、強磁場では温度に比例する特異な振舞をすることがわかった。

5. Et₂Me₂Sb[Pd(dmit)₂]₂の圧力下における熱的性質

奥澤 唯

表題物質は、温度の低下に伴い Mott 絶縁体-電荷分離転移を起こす。高温域では加圧に伴い Mott 絶縁体相から金属相へ移行するため、三相が競合する特異な系である。本研究では、比熱及びゼーベック係数の熱測定により三相の相転移に伴うエントロピー変化及び電子状態を観測する事を目的とした。測定の結果、転移付近でスピン、電子、格子系の自由度の減少による比熱のピークを、状態密度の消滅に伴うゼーベック係数の急激な減少を観測した。また Mott 絶縁体相ではキャリア数の減少に伴うゼーベック係数の緩やかな増加を観測した。

6. $\text{Et}_2\text{Me}_2\text{Sb}[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$ のゼーベック係数の圧力・方向依存性

栗竹 広大

表題物質は低圧域($P < 6$ kbar)では冷却に伴い Mott 絶縁状態から電荷分離状態へ転移し、また高圧域($P > 6$ kbar)では金属状態から電荷分離状態へと転移する。すなわち Mott 絶縁相、金属層、電荷分離層の三相が競合する特異な系である。本研究では熱起電力を測定した。低圧側では Mott 状態で等方的な熱起電力を観測し、転移温度近傍でヒステリシスを伴った Mott 絶縁体から電荷分離状態へ転移時に急激な減少を、また電荷分離状態に入り異方的な起電力を観測した。

7. 微小試料の圧力下における比熱の測定

山内 貴弘

α -(BEDT-TTF) $_2\text{I}_3$ は 135K で金属-絶縁体転移を示すが、静水圧の印加により絶縁体化が抑えられ、15kbar 以上の圧力下でゼロギャップ伝導体に移行する。本研究では圧力下での相転移に伴うエントロピーの変化を調べるため、単結晶で測定可能な測定システムの開発を行った。標準物質として $\text{Et}_2\text{Me}_2\text{Sb}[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$ を用いて圧力セル内で比熱測定を行い、圧力下での電荷秩序に伴うエントロピー変化を観測した。これにより、微小試料(0.2mg 程度)による圧力下での比熱測定が可能であることがわかった。

----- 休憩 -----

後半 10:29 ~ 11:29

8. (Me-3,5-DIP)[Ni(dmit) $_2$] $_2$ における異常ホール効果

下田 将大

分子性導体(Me-3,5-DIP)[Ni(dmit) $_2$] $_2$ は大きなフェルミ面を有する金属層と Mott 絶縁化による局在スピンを有する層とが単一結晶内に共存するデュアル機能電子系である。磁氣的・熱的研究から、局在スピんと伝導電子の相互作用が確認されている。本研究では、局在スピスが電気伝導性へ与える影響を調べるためにホール効果を測定した。その結果、磁化率の温度変化とよく似たキュリーワイス的な異常ホール効果が観測された。ホール係数の温度変化からワイス温度が約 5K と見積もられ、磁化率の結果とよく一致した。

9. 低温・高磁場下のゼロギャップ伝導体 $\sim\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2\text{I}_3\sim$

黒坂 悠平

α -(BEDT-TTF) $_2\text{I}_3$ は、高圧下において唯一バルクで実現したゼロギャップ伝導体である。このようなゼロギャップ伝導体の特徴の 1 つは、磁場中でディラック点の位置に常に $n=0$ のランダウ準位が形成されることである。本研究では低温高磁場で $n=0$ のランダウ準位のスピン分裂を調べた。その結果、この系のスピン分裂はゼーマンエネルギーよりも磁場中のクーロンエネルギーが大きく反映していることを明らかにした。さらに磁場中のクーロンエネルギーが磁場増大と共にランダウ準位のエネルギーの幅を広げていることを示唆する結果が得られた。

10. 薄板結晶の分子性ディラック電子系

山口 達也

α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ は高圧下でゼロギャップ伝導体となる物質である。ゼロギャップ伝導体の特徴の1つは磁場下で見られる特別なランダウ準位であるが α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ では直接観測できていない。本研究では、この特徴的なランダウ準位の観測を目的としプラスチック基板上の薄板結晶に電界キャリア注入を試みた。その結果、0T~7T の磁場下・低温で-70V から 70V のゲート電圧の範囲において数%程度の電気抵抗とホール抵抗の変化を得た。この小さな変化の中に $n=0$ のランダウ準位とそのスピン分裂が関与した電気抵抗とホール抵抗のゲート電圧依存性を観測することに成功した。

11. 有機ゼロギャップ伝導体 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ における化学ポテンシャルの温度依存性

寺島 拓

有機伝導体 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ で線形分散型のエネルギー構造を持つゼロギャップ電子系が実現した。グラフェンと異なり、電子-正孔対称性が良くないことが特徴の1つである。従って、化学ポテンシャル μ の温度変化がこの系の電気伝導性に大変重要な役割を果たす。本研究では、電子ドープ型試料のホール効果測定から μ の温度依存性を調べた。その結果、 μ の温度依存性は磁場強度で変化することがわかった。この磁場強度による変化は、電子-正孔対称性が関与するランダウ準位構造から定性的に理解できる。

12. α' -(BEDT-TTF) $_2$ IBr $_2$ の非線形伝導の研究

野崎 大輔

電荷秩序系分子性結晶の電圧印加による特異な物性発現を目指し、 α' -(BEDT-TTF) $_2$ IBr $_2$ の単結晶を製作し、抵抗率の温度依存性、 I - V 特性、および X 線測定を行った。その結果、電気抵抗率で、電荷秩序転移に起因する半導体-半導体転移を確認後、転移温度以下 200 K で I - V 特性を測定したところ、巨大な非線形伝導が見られ、低抵抗状態に転移するのを観測した。この電場誘起低抵抗状態は2週間以上維持される程、緩和時間が長いこと、また X 線測定により電場印加後も結晶性が保たれていることを見出した。

学内外研 11:39 ~ 12:15

11:39 ~ 11:51

1. 水素-メタン火炎中のイオン電流測定による火炎の形状の測定

生命圏環境科学科佐藤研究室 田町 英紀

水素をエネルギーとして利用している物は近年増えつつあるが、他の可燃性気体に比べ爆ごうを起こしやすく、また火炎も目視できないため危険である。本実験では水素-メタンの混合気を平面状の火炎面を持つバーナーで燃焼させ、メタンが水素から受ける影響を、微細複針型イオンプローブを用いて調べ、水素火炎がどのような広がりを持つかを結果から予想する。高い分解能を得るため、探針部は直径0.1mm長さ3mmとした。過去の実験では考慮しなかった選択拡散の影響を調べる必要があるため、本実験では燃料中のメタンの割合を大きくして行う。

11:51 ~ 12:15

2. 熱の概念を形成する実験教材の開発と実践

教育学教室 柴田 貴大

小中学校までは、熱の伝わり方や天気などに含まれる形で、熱に関する学習が扱われている。しかし熱の概念の形成には、熱と運動、熱と体積変化、熱と日常生活との関係などの学習が重要である。本研究では、小学校において、熱に関する実験教材を開発し実践した。小学4年生を対象とした実験教室により、児童の熱に関する学習への興味・関心、学習する意欲を高めることができた。また熱と運動、熱と体積変化について理解が深まった。一方、熱と環境との結びつきを理解するには課題が残った。

3. 科学史の事例を取り入れた授業の効果と課題の解明

教育学教室 竹村 恵介

電磁気に関連する科学史は、欧州での研究が中心であり、単位に人物名が多く使われており、ここ200年以内の研究の成果が多いなど、興味深い。本研究では、小学校5年生の電流の働きの単元で、科学者の名前や研究等の紹介を含めた授業の実践を行い、効果と課題を解明した。結果、授業で科学史の事例を紹介すると、児童は強い興味を持ち、関心や意欲を引き出せる事がわかった。また、時間毎に提示する方が、単元の最初に紹介するより効果が高い傾向があった。一方、知識理解の面では効果を上げられなかった。

原子過程科学 13:15 ~ 13:51

1. RF カーペットによるイオン付着飛行時間質量分析装置の改良

鈴木 雅之

本研究では、イオン付着飛行時間分析装置を呼気分析のために使うことを目指している。この装置は、イオン化の際に気体試料を壊すことが極めて少なく、未知試料の同定に適しているが、呼気分析装置のためには検出感度を向上させる必要がある。本装置ではイオン化室内が 100 Pa と高いため、イオン輸送の点に問題がある。そこで本研究では、近年理化学研究所で考案された RF イオンガイド法を取り入れ、その効果を探るためにシミュレーションと実験を行った。その結果、ほぼ計画通りに検出感度を向上させることができた。

2. 混合ガス法を用いた NO の一般化振動子強度の測定

各務 聡一郎

本研究では NO の価電子励起状態の一般化振動子強度の測定を行った。一般化振動子強度は、電子を標的に衝突させ励起させたとき、ある状態へと遷移する確率を表した物理量である。NO の価電子励起状態の一般化振動子強度は非常に小さく、これまでに信頼性の高い測定は行われていない。そこで本研究では、混合ガスを用いてエネルギー損失を測定し、以前の研究結果と比較した。その結果から、混合ガス法により絶対値化を行った今回の測定は信頼性が高いものであることがわかった。

3. 散乱電子 - イオン同時計測による水素分子の二電子励起状態の探求

酒田 遥祐

水素分子 (H_2) の光学的禁制な二電子励起状態を探るために、入射エネルギー 200 eV、散乱角 6 deg の電子衝撃実験による散乱電子-イオン同時計測を行った。この条件での電子衝撃実験では、光では観測できない光学的禁制遷移の情報を得ることができる。実験では、 H_2 に対する全てのイベントと、 H_2^+ 及び H^+ が生成される一般化振動子強度分布を導出し、それらの差から中性解離の情報をもつ非イオン化の一般化振動子強度分布を求めた。これより、励起エネルギー 28 eV と 35 eV 付近に、光学的禁制な二電子励起状態を経由した中性解離の寄与を見出した。

宇宙・素粒子 14:01 ~ 15:54

前半 14:01 ~ 14:49

1. ニュートリノ振動とニュートリノの質量

笠井 健司

u、c、tクォークと二重項を作る d、s、bクォークがこれらの線形結合である d'、s'、b'クォークだと考えるクォーク混合からニュートリノにも混合された状態を考え、飛行中にニュートリノの世代が転換するニュートリノ振動が起こることを示し、3世代間での混合状態における具体的なニュートリノ間の遷移確率を導いた。ニュートリノに質量があることでニュートリノ振動は起こるが、その固有状態である3世代のニュートリノの質量の固有値とそれらが混合された状態のニュートリノの質量の期待値の関係を導いた。

2. 量子電磁力学による電子の異常磁気能率

齋藤 敬介

電子はスピンをもつことにより磁気能率を持っている。磁気能率はスピン角運動量や g 因子によって表わされる。電子の g 因子は Dirac 方程式から 2 であることが知られているが、実験によって 2 からのずれが確認された。このずれを異常磁気能率と呼ぶ。本論文では量子力学を相対論的に拡張した Dirac 方程式から電子の g 因子が 2 となることを示し、異常磁気能率の原因が量子電磁力学(QED)の電子と光子の相互作用で説明されることを理解する。そして摂動計算において異常磁気能率がどのように計算されるかを学ぶ。

3. 視線速度法による太陽系外衛星の探査

皆川 航

太陽系外惑星は数多く発見されているが、衛星の観測は非常に難しい。太陽系外惑星の探索方法はいくつかあるが、本論文ではその中の最も広く用いられている視線速度法に着目した。視線速度法とは恒星のスペクトルに現れるドップラー効果から惑星を探す手法である。視線速度法を用いるために、まず太陽系外にある恒星と、その周りを回る惑星、さらにその惑星の周りを回る衛星の軌道を三体問題として数値的に解く。次にこの結果を用いて、衛星の存在が恒星の運動に及ぼす影響がどのように検出されるかを考察する。

4. 重力マイクロレンズ効果を用いた太陽系外衛星探査

桜井 準也

一般相対論から導かれる重力マイクロレンズ効果は、背景にある恒星の手前を別の天体が通過するときに恒星の光度が急激に増加する現象であり、この効果によって惑星などの暗い天体を発見することができる。特に、手前を通過する天体が連星系の場合には特徴的な光度変化を示す。本論文では、手前を通過する天体が3体系の場合に、どのような光度変化を示すか考察した。その結果、特に主星、惑星、衛星からなる3体系を考えたとき、背景にある恒星の主星に対する衝突パラメーターが小さい場合には、光度変化に衛星の寄与が表れ、衛星を発見できる可能性があることがわかった。

----- 休憩 -----

後半 14:54 ~ 15:54

5. モノポール場中の荷電粒子の運動

上條 裕基

この論文では、ディラック (P. A. M. Dirac) によって提唱された磁気の源としての素粒子であるモノポール (磁気単極子) の周りの荷電粒子の運動を考察した。その結果モノポール場中の荷電粒子は初期条件で決まる角度 θ のコーン上を巡回したり巡回運動をしながら双曲的にモノポールに近づいたり、遠ざかっていったりする運動をすることがわかった。この結果より上のように特異な運動をする荷電粒子を観測できれば間接的にモノポールの存在を確かめることが出来る。

6. 場の量子論の概要, 特に Feynman ダイアグラムの数式的対応について

西園 裕之

伝播関数 (Green 関数) と Feynman ダイアグラムの関係を明らかにすることが本論の最大の目的である。Feynman ダイアグラムが伝播関数と数式的対応をもつということは、すなわち Feynman ダイアグラムが単なる図以上のものであることを意味する。本論では、その様子を計算過程をできる限り省略することなしにみていくことになる。また、本論では場の量子論がそもそも何であるかということを経史的経緯も踏まえて概観していく章や場の理論から得られる様々な帰結を紹介する章などを設けている。

7. SIS フォトン検出器の実験環境の整備と性能評価

渡邊 動太

2011 年まで国立天文台サブミリ波カメラグループでは、SIS フォトン検出器と AC-CTIA 回路は個別に評価が行われてきた。この2つを組み合わせる評価が本研究の目的であり、その準備として SIS 素子の I-V 特性の測定を再度行う必要がある。この検出器は 0.8K 以下の動作のため、2 段式 0.3K 冷凍器を用いての 0.38K の環境を実現した。また、極低温環境の持続時間を延ばすために保冷器への熱流入を減らし、4.2K で 28 時間、0.38K で 10 時間の持続を実現した。I-V 特性の測定に使用する TIA 回路を 1 素子測定から 3 素子同時測定が可能な改良を行い、ダミー抵抗や SIS 素子の I-V 特性の測定を行っている。

8. 極低温環境における多素子読み出しシステムの動作評価

関口 繁之

本研究ではカメラの電荷積分型読み出し回路 (AC-CTIA) を 0.8K 以下の極低温環境下で動作させることと、検出器と組み合わせる評価することを目標としている。実験では、冷却システムの立ち上げから始め 0.45K 環境の実現に成功した。AC-CTIA 回路は 0.47K において 4.2K 環境下での動作と同様な積分動作をした。また、回路シミュレーターの PSpice を用いて回路の動作の検証も行い、SIS 検出器の信号を積分波形として読み出すための実験を進めている。

9. サブミリ波カメラにおける 32 素子読み出し回路の自動制御

鳥居 大亮

本研究は 32 素子サブミリ波読み出し回路の自動制御を目的としている。32 素子読み出し回路とは 32 素子の電流信号を多重化し、1 つの時系列電圧信号に変換する機能を持った回路である。本研究では 4.2K 下において Dasbox (DA/AD 変換器) を用い各チャンネルへのパラメータをプログラミングによって自動制御し、32 素子読み出し回路を駆動させ各チャンネルで電圧を取得する実験を行った。実験結果から読み出し回路が正常に動作していることが確認でき、DASBOX を用いた 32 素子読み出し回路の自動制御による実験システムの立ち上げに成功した。

物性理論 16:04 ~ 17:16

1. 最適化問題に対するボルツマンマシンの応用

西原 彰

脳の機能を模した情報処理システムであるニューラルネットワークの物理的モデルの一つである、ボルツマンマシンを組合せ最適化問題に応用した。本研究ではその中でも **Knapsack** 問題に対して、相互結合型ネットワークであるボルツマンマシンを応用して最適解を探索し、最適解が求まる効率が結合の強さにどのように依存するか調べた。

2. スピン起電力に対する数値解析

今野 雄太

磁性金属中の磁化のダイナミクスから誘起されるスピンの依存した起電力「スピン起電力」について数値解析を行った。スピン起電力を計算するために、磁化のダイナミクスを記述する **LLG** 方程式を、4次のルンゲ・クッタ法を用いて解いた。今回は強磁性共鳴 (**FMR**) の条件下での1次元パーマロイ細線中に発生するスピン起電力を計算した。計算の結果、局所的に交流磁場を印加すると系の両端に電圧が発生することが明らかになった。得られた直流電圧はナノボルトのオーダーであり、実験的にも検出可能である。

3. スピン1反強磁性ハイゼンベルグ鎖におけるBerry位相

土井 健司

スピンの大きさが $S=1$ の反強磁性ハイゼンベルグ鎖の基底状態におけるBerry位相を求め、基底状態の性質について調べた。Berry位相とは、ハミルトニアンをあるパラメータ空間上の閉経路で断熱的に変化させた時に生じる幾何学的位相因子である。その結果によると、スピンの大きさが1の場合、スピン間の相互作用が一様であっても各ボンドに対応するBerry相の値は π となることが分かった。これは各ボンドにスピン $1/2$ のシングレットが現れるValence Bond Solidと呼ばれる状態が基底状態となっている描像と整合している。

4. 傾いたディラックコーンをもつ相対論的電子のトンネル効果

坂本 紘樹

電子が相対論的粒子として記述される物質が発見されている今日、その一つとして α -(BEDT-TTF)₂I₃が傾いたディラックコーンをもっていることが分かった。本研究では電子状態が傾いたディラックコーンで記述されるような2次元物質での1次元ポテンシャルバリアに対する電子の透過率の角度依存性を解析的に求め、コーンの傾きが透過率の角度依存性にどのように現れるかを具体的に調べた。また、コーンが傾いていない時にバリアの厚さを大きくしていくと透過率1となる角度が多く現れるという特性が、傾いていても確認できた。

5. 電子波束の量子ダイナミクスの数値的研究

馬場 広大

本研究ではポテンシャル障壁に電子波束を衝突させた時の波動関数の時間発展に対するシミュレーションを行い、電子波束のダイナミクスについて調べた。特に一次元の実空間上にガウス型の波束を作り階段型ポテンシャルに入射した場合を考えた。初期の波束に時間発展演算子を作用させ波動関数の時間発展を具体的に追う作成するプログラムを作成し、透過率などの算出を行った。時間依存のシュレディンガー方程式を数値的に解く手法としては大きな系が扱えるように指数演算子の Trotter 分解などを用いた。

6. 不規則一次元電子系におけるエネルギー準位統計の解析

和田 孝一郎

本研究では、不規則一次元電子に対する格子模型を考え、長距離ホッピングを加えていくと、エネルギー準位統計にどのような変化が現れるのかについて調べた。一般的に、不規則電子系においては、局在状態ではエネルギー準位間隔の分布がポアソン分布、非局在状態ではウィグナー分布を示す性質が知られており、長距離ホッピングの性質がどのように電子状態の局在性に影響を与えるかについて解析を行った。

博士・修士論文発表会プログラム

理学部 IV 号館大学院セミナー室

平成24年2月23日（木）

博士課程（講演30分、質疑10分）

1. 松尾 友和（基礎物理）
2. 秋葉 宙（物性物理）
3. 山本 果林（原子過程科学）

修士課程（講演20分、質疑5分）

物性物理 11:20 ~ 12:35

1. 登 健人
2. 田中 友樹
3. 遠藤 里実

表面物理 12:40 ~ 13:05

4. 手塚 純

原子過程科学 15:30 ~ 16:20

5. 鈴木 宗宜
6. 出口 裕理

量子エレクトロニクス 16:30 ~ 17:45

7. 清家 和貴
8. 小林 二千翔
9. 澁澤 杏奈

平成24年2月24日（金）

修士課程（講演20分、質疑5分）

磁気物性 14:00 ~ 14:50

10. 花島 健太郎
11. 三橋 賢

基礎物理 15:00 ~ 16:15

12. 辻川 弘規
13. 小暮 大輔
14. 森 和香奈

宇宙・素粒子 16:25 ~ 17:15

15. 鈴木 博登
16. 大川 泰史

博士論文予稿

1. タウニュートリノ反応のハドロンバックグラウンドの研究

松尾 友和 (基礎物理)

ニュートリノ振動とは、ニュートリノのフレーバー固有状態と質量固有状態が異なり、かつ質量固有状態の質量が同一でない時、ニュートリノの飛行に伴いフレーバーの観測確率が変化する現象である。標準理論では質量0とされているニュートリノだが、もしニュートリノ振動が発見されれば、ニュートリノが質量を持っていることが示される。ニュートリノ振動を強く示唆する現象は、1998年にスーパーカミオカンデで生成したニュートリノが減少する『消滅モード』で発見され、世界中の様々な実験で確認がなされてきた。しかし、消滅モードと対になる、振動によって別種ニュートリノが現れる『出現モード』の確認はニュートリノ振動の検証で重要であるにもかかわらず世界のどの実験も、ニュートリノに対応するレプトンの出現を確認することには成功していない。そこで、日欧国際共同長基線ニュートリノ振動実験OPERAは、欧州合同原子核研究機構(CERN、スイス)のスーパー陽子シンクロトロン加速器(SPS)で作られたミューニュートリノを、730km離れたイタリアのグランサッソ研究所に照射し、振動により現れるタウニュートリノを検出することにより $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ へのニュートリノ振動を『出現モード』で検証する事を目指す。反応で発生したタウ粒子は反応断面積が非常に小さいだけでなく、寿命も短く殆どが飛距離数百 μm 以下で崩壊するため、OPERAでは、世界で唯一タウニュートリノの検出に成功している標的兼飛跡検出器(ECC、鉛板56枚と原子核乾板57枚の交互積層体)を約15万個、有感質量 $1.25 \times 10^6 \text{kg}$ を用い、タウの出現によりタウニュートリノの存在を確認する。OPERA実験は2008年から2012年までの5年間の照射を計画している。照射は順調に進んでおり、2010年5月31日に世界で初めてとなるタウニュートリノ出現候補事象を有意度95%で検出したと発表した。

OPERA 実験では、タウニュートリノの荷電カレント反応によって生成するタウ粒子が崩壊する際の飛跡の幾何学的な折れ曲がり、および運動学的な性質に基く選別を用いてタウ粒子を識別している。タウ粒子の崩壊のほかにも、 ν_{μ} が荷電カレント反応を起こした時に生成したチャームを含むハドロンの崩壊や、 ν_{μ} が中性カレント反応を起こした時に生成したハドロンの崩壊とほぼ同じ距離内で原子核と衝突し飛跡が折れ曲がる事象(ハドロンバックグラウンド)がタウ崩壊と類似の幾何学的描像を持つため、これらのバックグラウンドとタウ崩壊を十分な精度で識別し、バックグラウンドと十分に分離しないとタウニュートリノの判定が出来ない。そこでOPERAでは、モンテカルロシミュレーションにより、タウ崩壊の候補事象のシグナル領域として、崩壊二次粒子の運動量 $P > 2.0 \text{GeV}/c$ かつ横運動量 $PT > 0.6 \text{GeV}/c$ を定めている。この結果からハドロンバックグラウンドは、 $(1.9 \pm 0.1) \times 10^{-4}/\text{NC event}$ と見積もられている。この見積の精度を実験的に確認する事は、推定の検証や正当性の確認に直接結び付くにもかかわらず、極めて作業量が多いためこれまで行われて来なかった。代わりに、ハドロンバックグラウンドについては、モデルの系統誤差等を考慮して、50%の誤差を計上している。そこで本研究では、OPERA実験とは独立した実験であるKEK PS 4 GeV/c π^{-} ビームのECCへの照射実験によって、ハドロンバックグラウンドを実験的に測定して解析、モンテカルロシミュレーションと体系的に比較した。シグナル判定には、個々の粒子の運動量を測定することが必要である。そこで、多重電磁散乱による角度変化を使用して運動量を計算する角度法と呼ばれる手法を使用して同照射乾板を用いて評価し、粒子の運動量を統計誤差50%以下、系統誤差24%で、かつ各単一の粒子単位で測定できる事を確認した。

また、乾板上の 2.2cm^2 の範囲からビーム飛跡を抽出し、下流に向かって追跡することにより反応点を検出し、反応点に収束する二次粒子の本数および運動量を用いて、バックグラウンドとなるハドロン反応の頻度を測定した。その結果、353 反応を検出し、ハドロンバックグラウンドとなる、荷電二次粒子多

重度1 の反応の中から、運動量を誤差50 % 以下で測定する事のできる33反応について二次粒子の運動量および横運動量を計算した結果、OPERA のシグナル領域に入った事象は2回であった。以上の結果から、シグナル領域に入る事象は、本実験条件下の値として、反応点に対する割合は $(2 \pm 2) \times 10^{-2}$ となった。また、OPERAのハドロンバックグラウンドを見積もるために使用されているモンテカルロシミュレーションで本照射実験を再現した。その結果、発生させた1387反応の中から、運動量を誤差50%以下で測定する事のできる98反応について二次粒子の運動量および横運動量を計算した結果、OPERAのシグナル領域に入った事象数は 9 となった。以上の結果から、シグナル領域に入る事象は、本解析条件下の値として、反応点に対する割合は $(4.0 \pm 1.4) \pm 10^{-2}$ となった。この結果、4 GeV/c のハドロンにおいて、OPERA でのバックグラウンドの見積もりが誤差範囲内で一致している事が示された。このことは、OPERA が発表した最初のタウニュートリノ反応候補事象をも含め、その有意度が95%またはそれを上回ることを実験データに基づき初めて確認した。今後本研究で確立した解析手法を用いる事により、本研究では対象となっていなかった3-prong ハドロン崩壊のバックグラウンドの検証や、複数のエネルギーでバックグラウンドを解析し多エネルギーで比較によるシミュレーションコード自体の精度向上等へ応用が期待される。

2. λ -BETS₂FeCl₄ の π -d 系が示す常磁性金属-反強磁性絶縁体転移

～熱力学的研究を中心として～

秋葉 宙 (物性物理)

本研究では磁場誘起超伝導体 λ -BETS₂FeCl₄ のゼロ磁場で起こる常磁性金属(PM)-反強磁性絶縁体(AFI)転移の熱力学的研究を行い、分子磁性体特有の低次元性と π -d 相互作用を鍵としたまったく新しい相転移機構の可能性を見出した。

■ 導入

λ -, κ -(BETS)₂FeX₄ は有機分子 BETS から成る伝導層と磁性イオン FeX₄ から成る絶縁層が交互に積み重なった擬2次元構造を形成している。Fe 3d スピンを含む対イオンは BETS 分子の π 電子系にキャリアーを発生させるだけでなく、伝導電子と局在スピンの間に磁氣的相互作用(π -d 相互作用)をこの系に導入するといった重要な役割を果たしている。この相互作用を起源とした代表的な現象が磁場誘起超伝導である。10 T 以上もの磁場中で安定する超伝導の機構は大変注目され、これまで精力的に行われてきた高磁場実験から極めて明快地説明されている。一方、ゼロ磁場領域の基底状態は π -d 相互作用の強さによって大きく異なる。強い π -d 相互作用をもつ λ 型は、常磁性金属-反強磁性絶縁体転移 (PM-AFI 転移) を経てできる AF 絶縁体状態と超伝導状態が競合した系である。一方の κ 型は、局在スピンの反強磁性秩序と超伝導状態が共存した系である。このような基底状態における物性の違いに π -d 相互作用が果たす役割は大きいと言われているが、そのメカニズムに関しての十分な理解はない。そこで近年、我々は λ 型 BETS₂FeCl₄ の AFI 基底状態において比熱測定を行ったところ、Fe スピンに由来する大きな自由度が観測され、PM-AFI 転移で実際に Fe スピンが反強磁性秩序化するのか疑問をもった。本研究では先ず λ -BETS₂FeCl₄ の AFI 基底状態、PM-AFI 転移における π 電子と 3d スピンのそれぞれの役割を明らかにするため、低温比熱、磁化率測定を行った。

■ AFI 状態における新たな描像

低温比熱測定から λ -(BETS)₂FeCl₄ では AFI 相形成後も大きな自由度が凍結せずに残っていることを発見した。これは従来考えられてきた π スピンと 3d スピンが結合して反強磁性転移を起こす描像からは説明できないものであった。その残留エントロピーは Fe 3d スピン ($s_d = 5/2$) の自由度 $R \ln 6$ [J/molK] に一致することがわかった。この Fe スピン自由度からくる低温の磁気比熱の温度依存性は 6 準位の Schottky 型比熱で理解できる。これは固定された内部磁場下に $s_d = 5/2$ の常磁性スピンの置かれて Zeeman 分裂したときの比熱の期待値であり、Fe スピンは PM-AFI 転移後直ちに AF 秩序化して自由度を失うのではなく、最低温度まで大きな自由度を維持していることが明らかになった。一方、 π 電子系は金属-絶縁体転移と同時に反強磁性秩序を形成し、これが作る内部磁場が隣接する Fe 3d スピンを 6 準位に Zeeman 分裂させる。 λ -BETS₂FeCl₄ の AFI 基底状態において従来とは異なる新しい描像を明らかにした。

磁化率温度依存性は AFI 相で異常な肩を示す。我々はこの磁化率の異常を Schottky 比熱異常と関連付けて考えることにより、比熱から提案される π d スピンモデルで磁化率の実験結果まで矛盾なく説明することができた。

■ PM-AFI 転移におけるエントロピー変化と自発磁化過程

π 電子系が主導する常磁性金属-反強磁性絶縁体転移においては、通常の $s = 1/2$ の磁性体が示すような常磁性-反強磁性転移におけるスピンの凍結で期待される $R \ln 2$ [J/molK] のエントロピー変化は観測されなかった。 π 電子系が AFI 相を形成するときの自発磁化に関する情報は Schottky 比熱の内部磁場によるエネルギー分裂幅から定量的に見積もられた。その内部磁場の臨界現象を詳細に調べた結果、2次元 Ising の磁気秩序が形成されたときのような急激な内部磁場の成長過程が観測された。 π 電子系は伝導の低次

元性をそのまま低温の磁気秩序相に反映して常磁性金属-2次元 Ising 反強磁性絶縁体転移を引き起こしている可能性が示唆された。

■ PM-AFI 転移における π -d 相互作用の役割

Fe を非磁性 Ga に置換した系 λ -BETS₂Fe_xGa_{1-x}Cl₄ で PM-AFI 転移と AFI 相の Fe 濃度依存性を調べた。混晶系で観測された低温の Schottky 比熱や転移温度での鋭い比熱ピーク（エントロピー変化）は全て Fe 濃度と $J_{\pi d}$ を起源とする内部磁場によってスケールされる。この結果は PM-AFI 転移は π 電子系で独立に (Fe スピン系や $J_{\pi d}$ とは無関係に) 引き起こされているように思えるが、驚くことに λ -BETS₂Fe_xGa_{1-x}Cl₄ の AFI 状態における内部磁場や異方性エネルギー（スピンプロップ磁場）はどちらも Fe スピン濃度 (π -d 相互作用の導入) に対して強められていることが明らかとなった。

本物質のような低次元系で PM-AFI 相転移が実現するためには磁性の低次元ゆらぎを抑制するための磁気異方性が重要なパラメータと成り得る。 λ 型における π -d 相互作用の役割は本来等方的な Heisenberg π スピン系に磁気異方性を持ち込むことであり、これにより 2 次元系での長距離秩序を可能にしていると考えている。このときの磁気秩序状態は異方性を系に導入する Fe 濃度に対して強く依存するはずである。

一方、低次元磁気秩序を安定にする π -d 相互作用が弱い κ 型、あるいは圧力を印加して π 電子系の移動積分を高めた圧力下の λ 型のように磁気秩序絶縁体よりも金属や超伝導状態が優勢になると、 π -d 相互作用の役割は伝導 π 電子を介した d-d 間の間接相互作用を担うようになり、そこでは Fe スピン系の反強磁性転移が観測される。逆に言えば PM-AFI 転移による π 電子系の絶縁化が抑制されたため、d-d 間の協力現象を促す間接相互作用が低温まで切られずに済んだとも考えられる。

基底状態における λ 型の PM-AFI 転移と κ 型の AF 転移はそれぞれ反強磁性秩序化する役者が異なり、転移における π -d 相互作用の役割も全く異なる。このように π -d 相互作用がはたらいだ有機伝導体で引き起こる多彩な相転移の根底には伝導電子と局在スピンの作る低次元構造という共通の舞台があり、それらは磁気相互作用と伝導の僅かなパラメータの違いによってよく説明できるのである。

3. 簡単な分子の光学的禁制二電子励起状態の探索とその解離過程の研究

山本 果林（原子過程科学）

分子は、光の吸収や電子との衝突によりエネルギーを受け取ると、基底状態からさまざまな励起状態へ遷移することができる。二電子励起状態はその中でまれに生成される状態で、二つの電子が励起軌道を占有している状態とみることができる。この状態は、電子間の相互作用によって生成されると考えられ、有限な寿命で崩壊する。原子の場合は自動イオン化が重要な崩壊過程となるが、分子の場合は、核のダイナミカルな運動である解離も起こりうるので、自動イオン化に解離を伴うイオン化解離や、イオン化を伴わない中性解離を引き起す。イオン化解離と中性解離は、崩壊に関わる表と裏の過程で、電子相関が主役となる過程の代表的なものとして理論的、実験的に注目されている。しかし、分子の二電子励起状態の中でも、光学的禁制な状態に対する研究は乏しく、未だに水素分子でさえその起こりやすさや崩壊過程は謎に包まれている。本研究の目的は、このような分子の二電子励起状態を探索し、どのような解離を伴うかという一連の過程を明らかにすることである。

本研究のために、私たちは、散乱電子のエネルギー分析を行う電子エネルギー損失分光法と、生成されたイオンの質量分析を行う飛行時間分析法の両方を用いた、散乱電子-イオン同時計測法を確立した。電子のエネルギー損失値を横軸に、散乱電子強度を縦軸にとった電子エネルギー損失スペクトルは、本質的に光吸収スペクトルに対応し、私たちはそこから重要な物理量として一般化振動子強度分布を得ることができる。二電子励起状態は第一イオン化エネルギー以上の領域に存在し、原子の場合は、連続スペクトル中のピークやディップといった構造として現れるが、分子の場合は、解離を伴うためにその構造は全く現れない。そこで、本研究では生成イオンを同時に観測することで、埋もれた二電子励起状態をあぶり出すことを試みた。

光学的禁制二電子励起状態の研究の先駆者は Odagiri ら(Odagiri *et al. J. Phys. B*, **28**, L465 (2004).)で、散乱電子-蛍光同時計測法を用いて、光学的禁制二電子励起状態の情報を得た。彼らの研究は、二電子励起状態からの中性解離過程に着目したものであり、私たちが確立した散乱電子-イオン同時計測実験とは、相補的な関係であるが得られる情報が若干異なる。本研究では、生成イオンをすべて検出できるので、解離生成したイオンの観測から得られる自動イオン化の情報と共に、全イベントからイオン化のイベントを引いた量から中性解離に対する情報を得ることができる。双方の崩壊過程を抑えることができるため、その崩壊の分岐比を決定することも可能である。また、この方法で得た中性解離の情報は、蛍光分光では捕らえられない解離断片がすべて基底状態である場合の情報も含む。そのため、新たな二電子励起状態の情報を得ることが期待できる研究といえる。さらに、混合ガス法を用いた一般化振動子強度分布の絶対値化を行い、二電子励起状態に対する一般化振動子強度分布を初めて決定した。このようなことから、本研究は、分子の光学的禁制な二電子励起状態の知見を得られる有力な新しい実験手法であるといえる。

本研究では、簡単な分子として水素分子、アンモニア、メタンを選び散乱電子-イオン同時計測実験を行った。水素分子に対する測定では、解離イオンの捕集効率向上のために新たに製作した飛行時間型質量分析計を用い、入射エネルギー200 eV、散乱角 6 deg の条件で得られたイオン化および非イオン化の一般化振動子強度分布から、28 eV で新たな光学的禁制二電子励起状態による寄与を発見し、その状態の自動イオン化過程と中性解離過程の分岐比を決定した。アンモニアとメタンについても同様な手法によりそれぞれ 35 と 30 eV で新しい光学的禁制二電子励起状態を明らかにした。

修士論文予稿

1. λ -(BETS)₂Fe_xGa_{1-x}Cl₄における常磁性金属-反強磁性絶縁体転移

登 健人 (物性物理)

磁場誘起有機超伝導体 λ -(BETS)₂FeCl₄ はゼロ磁場下の約 8.3 K において、反強磁性秩序化を伴う金属-絶縁体転移を示す物質である。この物質は、有機 BETS 分子からなる伝導層と、磁性アニオン FeCl₄ 分子からなる絶縁層が交互に積み重なった積層構造をしている。BETS 分子の π 電子($s=1/2$)と FeCl₄ の 3d 電子($s=5/2$)の間に働く π -d 相互作用が、この特異な相転移に深く関わっていると考えられている。また、磁性アニオンである FeCl₄ を、結晶構造がほとんど変わらず非磁性である GaCl₄ に部分的に徐々に置換していくと λ -(BETS)₂Fe_xGa_{1-x}Cl₄ の PM-AFI 転移温度が下がっていき、Fe 濃度 x が 0.3 から 0.5 においては常磁性金属(PM)-超伝導(SC)-反強磁性絶縁体(AFI)の 3 つの相が競合する非常に稀有な系となる。さらに Fe 濃度 x を下げて行くと PM-SC 転移のみを示し転移温度も上昇していく。 λ -(BETS)₂FeCl₄ の比熱測定から、この系における AFI 相では 6 準位の Schottky 比熱が観測されたため、 π スピンが反強磁性秩序を形成し、3d スピンは π スピンからの内部磁場 $H_{\pi-d}$ を感じて Zeeman 分裂をした常磁性状態であると示唆された。

本研究では、3d スピンがこの転移においてどのような役割を担っているのかを解明することを目的に、Fe 濃度を希薄化させることによって、3d スピンを制御した系である λ -(BETS)₂Fe_xGa_{1-x}Cl₄ の比熱測定から得られた情報を定量的に評価した。

この系における AFI 相においても 6 準位の Schottky 比熱が観測され、Fe 濃度 x の減少に伴う PM-AFI 転移温度 T_{M-I} の減少が確認できた。この試料内における FeCl₄ と GaCl₄ の分布にはかなりの偏りがあるのだが、 λ -(BETS)₂Fe_xGa_{1-x}Cl₄ における比熱のピークは非常に鋭いものとなっており、結晶全体で PM-AFI 転移が同時に起きているということになる。3d スピンの分布は不均一ではあるが、非常に強い π - π 相互作用などによって試料全体に互る反強磁性秩序を形成するため、3d スピンの影響が π 電子系全体に均一的に広がったのではないかと考えられる。

まず、この余剰比熱から見積もった余剰エントロピーの総量が、スピン 5/2 のエントロピーの総量である $R \ln 6$ にそれぞれの Fe 濃度 x を掛け合わせた $x \times R \ln 6$ に一致することから、この系における余剰比熱は 3d スピンの寄与がほとんどであることが示唆される。さらに、観測された 6 準位の Schottky 比熱から見積もった 3d スピンの Zeeman 分裂幅の狭まっていることがわかった。つまり、Fe 濃度 x の減少に伴った内部磁場 $H_{\pi-d}$ の減少が起きている。このことは、3d スピンによる何らかの影響が π スピンの反強磁性秩序の安定化を促したため、3d スピンにかかる内部磁場 $H_{\pi-d}$ の強化に繋がったことを示唆している。

また、PM-AFI 転移のみを示す Fe 濃度 ($x > 0.5$) における余剰比熱及び余剰エントロピーは、Fe 濃度 x と内部磁場 $H_{\pi-d}$ で規格化が可能である。つまり、転移温度 T_{M-I} と内部磁場 $H_{\pi-d}$ が比例関係であることがわかる。この結果から、内部磁場 $H_{\pi-d}$ の大きさが PM-AFI 転移を支配していること示していると考えられる。また、PM-AFI 転移の際における内部エネルギーの変化量をギブスの自由エネルギーを用いて見積ると、体積変化 ΔV は非常に小さいので無視できると仮定し、 $\Delta U = T_{M-I} \Delta S$ となる。転移温度 T_{M-I} 及び余剰エントロピー ΔS は、Fe 濃度 x と比例関係にあるので $\Delta U \propto x^2$ となり、急激にエネルギーの利得が減少し、AFI 相が消失するのではないかと考えられる。

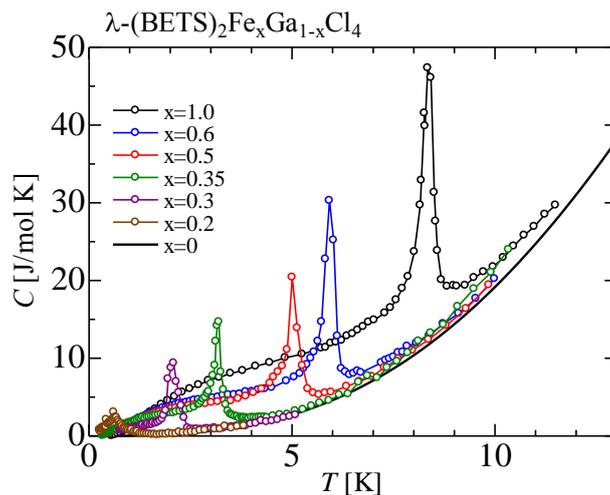


Fig.1 λ -(BETS) $_2$ Fe $_x$ Ga $_{1-x}$ Cl $_4$ の比熱

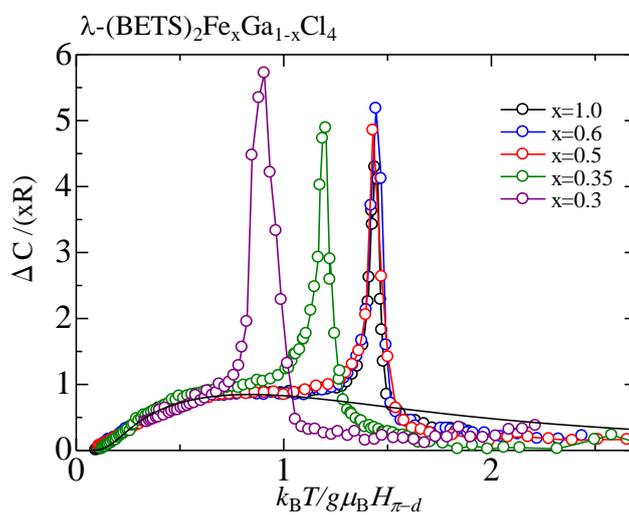


Fig.2 規格化した λ -(BETS) $_2$ Fe $_x$ Ga $_{1-x}$ Cl $_4$ の磁気比熱

2. $\text{Et}_2\text{Me}_2\text{Sb}[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$ の電荷分離転移における圧力下熱的研究

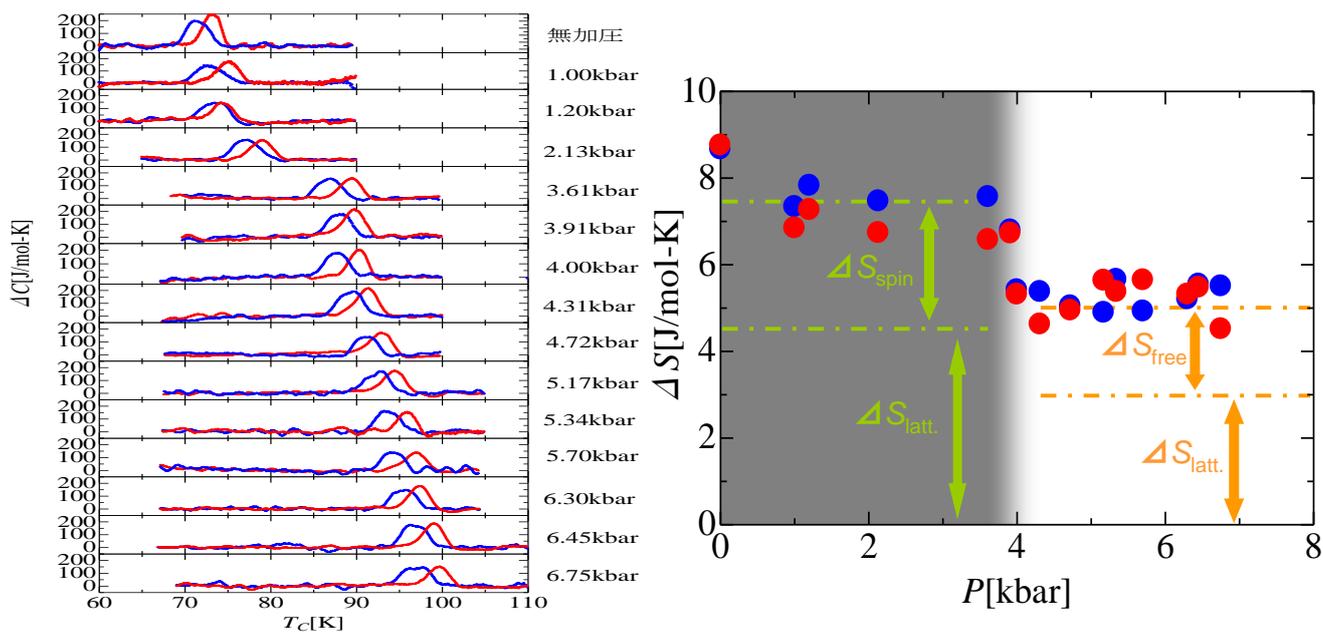
田中 友樹 (物性物理)

$\text{Pd}(\text{dmit})_2$ シリーズ塩は、物理的な圧力印加により、格子・電子・スピン系が複雑に絡まった様々な相転移をする特異な有機伝導体である。特に表題物質は $\text{Pd}(\text{dmit})_2$ が強く二量体化を形成し、各二量体上に $1/2$ スピンを有し、二次元三角格子を形成している。この二量体間には反強磁性作用が働く為、磁気的なフラストレーションを起こし、これを解消する為に常圧下において、約 70K で Mott 絶縁体相 (MI) から電荷分離相 (CS) へと相転移を起こす。この相転移は、電気抵抗率の測定や帯磁率の測定、常圧下比熱測定からも確認されており、やはり約 70K を境に電気抵抗率の上昇と、常磁性体から非磁性体へと変化がみられた。さらに比熱測定では、温度上昇、下降の両過程においてヒステリシスを伴うことから、この相転移が一次的であると明らかにされた。また相転移温度は圧力印加に伴い上昇し、約 6kbar を境に下降へと転じる。約 6kbar を境に低圧側と高圧側に分けると、前者では温度上昇に伴い、電荷分離相 (CS) から Mott 絶縁体相 (MI) への転移であるのに対し、後者では Mott 絶縁相 (MI) の代わりに金属相 (M) へと転移する。このように表題物質は、圧力印加と温度変化により、MI-CS-M の三相が競合する特殊な系である。

我々は、圧力印加による相転移の抑制と相転移近傍の比熱から得られる情報を元に、この系の相転移の機構を熱的に明らかにする試みを行った。その為に相転移近傍に特化した DTA 法を応用し、高精度に改良された静水圧力下における比熱測定を、0 kbar から約 6.75kbar まで行った。さらに別のアプローチとして、新たに開発した圧力下におけるゼーベック係数測定を行い、相転移近傍およびその前駆現象、さらに転移前後の電子状態を明らかにする為に、幅広い温度領域で測定を行った。そして、2つのアプローチによって系全体の機構を熱的に議論することを目的とした。

典型的反強磁性体である MnF_2 を標準試料として測定系の精度評価を行った後、表題試料の測定を行った。比熱測定の結果は、図 1 (a) のような一次相転移特有のヒステリシスを伴う鋭いピークが観測され、この鋭いピークは圧力印加と共に高温側へとシフトしていった。比熱測定より得られた余剰エントロピーは図 1(b) となり、約 0~3.6kbar までは約 $7.5\text{J/mol}\cdot\text{K}$ となり、急激な減少の後に約 4~6.75kbar では約 $5\text{J/mol}\cdot\text{K}$ となった。これらの内訳は MI-CS 過程において、スピン自由度の消失と、格子系の変形によるエントロピーの大きな放出。M-CS 過程においては、自由電子の消失と、格子系の変形による小さなエントロピーの放出を見積もる事が出来た。これらの見積もりは Elstner や Underhill らの測定を用いたものである。そして、我々はクラウジウス・クラペイロンの関係式に着目し、MI-CS 過程では体積の収縮が起こり、MI-M 過程では体積の収縮が起こり、M-CS 過程では体積の膨張が起こっていると考えた。これは、MI-M 転移の際に体積の収縮により、飛び移り積分が増大するといった現象を定量的に結論付けるものである。以上より低圧領域と高圧領域における電荷分離転移における機構と格子系の変形の違いが明らかとなった。

次に図 2 にゼーベック係数測定の結果を示す。室温からキャリア密度の減少によるゼーベック係数の増大が見られ、転移温度より高い約 100 K 辺りには転移の前駆現象によると思われるゼーベック係数の増加の傾きが変わり、比熱測定同様 70 K 付近において温度上昇、下降の両過程でヒステリシスを伴った急激な減少が見られた。これは電子状態の急激な状態密度の消失を意味するものと考えられる。このようにゼーベック係数測定により転移前の Mott 状態と電荷分離形成による電子状態の詳細な変化を観測できた。



(a) 余剰比熱の圧力依存性

(b) エントロピー変化の圧力依存性

図 1: 比熱測定による結果 (青: 温度降下過程, 赤: 温度上昇過程)

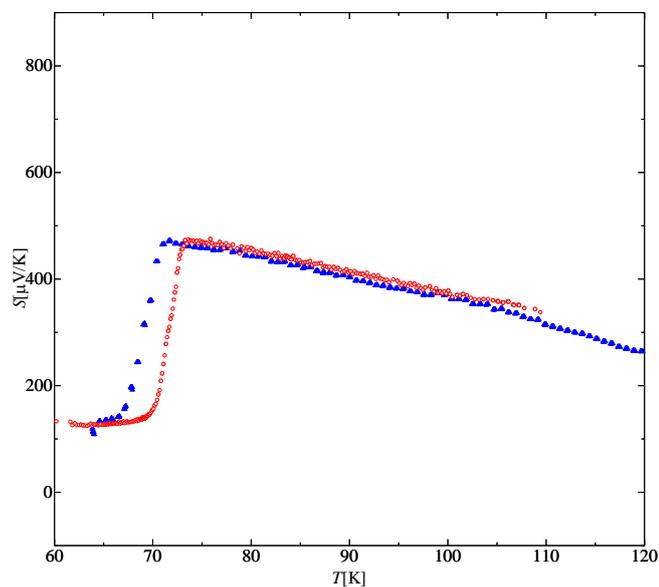


図 2: ゼーベック係数の温度依存性 (青: 温度降下過程, 赤: 温度上昇過程)

3. 有機伝導体 α -(BETS)₂I₃ の伝導特性とゼロギャップ性

遠藤 里実 (物性物理)

α -(BEDT-TTF)₂I₃ は伝導層と絶縁層が交互に積層した二次元性の強い構造を持つ分子性伝導体であり、高圧力下ではゼロギャップ伝導体になることが知られている。本研究で取り上げた α -(BETS)₂I₃ は α -(BEDT-TTF)₂I₃ の類縁物質である。高圧下の α -(BETS)₂I₃ はゼロ磁場での電気伝導などが α -(BEDT-TTF)₂I₃ と似た振る舞いを示すことから、ゼロギャップ伝導体になることが期待されている。しかし一方で、バンド計算の結果から α -(BETS)₂I₃ は半金属であるとの報告もある。本研究の目的は、このような α -(BETS)₂I₃ の低温・高圧下での伝導現象を詳しく調べ、この物質がゼロギャップ伝導体であるかどうかを検討することである。実験は大きく分けて2つ行った。

第一の実験では、静水圧 25kbar・温度 4.2K での α -(BETS)₂I₃ の伝導度テンソルの磁場依存性を調べた。その結果、高圧力下の α -(BETS)₂I₃ は α -(BEDT-TTF)₂I₃ と同様にゼロギャップ伝導体特有の振る舞いを示すことがわかった。例えば、ホール伝導度 σ_{xy} の磁場依存性の結果を図1に示す。このグラフは縦軸がホール伝導率 σ_{xy} 、横軸が磁場 B の垂直成分 B_{\perp} を表している。 α -(BETS)₂I₃ の場合、 B_{\perp} が 2.0T 以下の領域では伝導度が B_{\perp} に比例しており、2.0T より強い磁場では伝導度の減少が起こる。このような2段階の振る舞いは α -(BEDT-TTF)₂I₃ にもみられる。後者の場合、伝導度は 0.5T でピークを持った後、減少に転ずる。0.5T 以上の磁場下で伝導度の減少は系が量子極限状態と呼ばれる特別な状態になったことを示すと解釈されている。このことから、 α -(BETS)₂I₃ は 4.2K、2.0T の条件下で量子極限状態になると推察される。実験結果を長田による量子極限状態における伝導度テンソルの量子論的な理論計算と比較した。長田による解析式は実験結果をよく説明することがわかった。以上の結果は、高圧下の α -(BETS)₂I₃ がゼロギャップ伝導体であることを強く示唆する。

第二の実験では、高温 (10K 以上) における ρ_{xy} の温度依存性を調べた。ゼロギャップ伝導体中の電子とホールとの密度は温度によって大きく変化する。この温度変化は電子系のエネルギー分散によって異なるので、 ρ_{xy} の温度依存性から分散関係を推察することができる。そこで静水圧 15kbar 下でのホール抵抗の温度依存性を測定した。 α -(BETS)₂I₃ の測定結果を図2に示す。このグラフは縦軸がホール抵抗率 ρ_{xy} を、横軸は温度 T を表している。図ではわかりにくいですが、高温で ρ_{xy} は小さな正の値を持っている。高温から温度を下げていくと、ホール抵抗は緩やかに減少し、ゼロをよぎって負の値を持つようになる。ゼロをよぎった後、抵抗の負の値は急増する。20K 以下の低温では再び ρ_{xy} の温度依存性は緩やかになる。こうした ρ_{xy} の温度依存性を理解するために、実験結果を古典的な伝導理論で解析した。ゼロギャップ伝導体特有の直線形のエネルギー分散関係を取り入れた計算を行ったが、理論は実験結果を定量的に再現することがわかった。この実験は α -(BETS)₂I₃ の電子系が直線形のエネルギー分散関係を持つことを明らかにした。

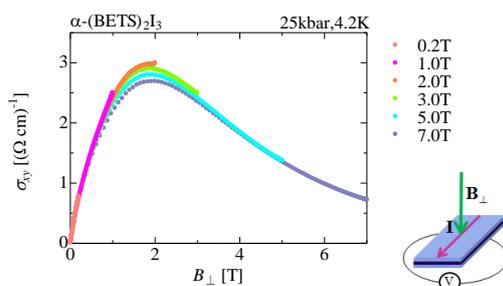


図1. ホール伝導度の磁場依存性

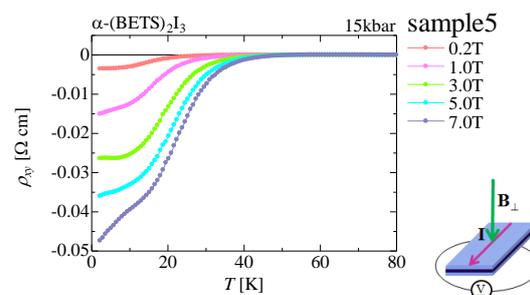


図2. ホール抵抗の温度依存性

4. Goethite 表面における Cd 吸着形態の観察

手塚 純 (表面物理)

粘土鉱物表面上への重金属の吸着は、人体への経路の点から幅広く研究されて来た。吸着メカニズムへの理解は汚染土壌の改善の為の基礎研究として重要となる。我々は粘土鉱物の一種であるゲータイト(α -FeOOH)にカドミウム (Cd) を吸着させ、原子間力顕微鏡(AFM)、X線光電子分光法(XPS)による実験を行った。本実験では真空蒸着によりゲータイト表面に Cd を吸着させた。蒸着量を水晶振動子で制御し、決められた被服率まで蒸着させ、AFM, XPS で観察・測定を行った。原子の表面に均等に吸着すると仮定すると、1Hz で約1原子層吸着する。

AFM 実験では真空中(10^{-3} Pa)にてコンタクトモードを使用し観察を行った。サンプル表面の帯電を抑制するためにカンチレバは Au でコーティングした物を使用し、金属板上に導電性の接着剤であるドータイト用いて、試料台に固定した。サンプルには天然に成長した針状ゲータイト、板状ゲータイト、Cd を蒸着した針状ゲータイトを使用した。

XPS 実験において X 線源には MgK α (1253.6[eV])を使用した。結合エネルギーの帯電補正には 284.6eV の C1s ピークを用いた。ピーク位置を求める為に直線法により、バックグラウンドを差引き、ピーク形状(peak profile)をガウス関数でフィッティングをした。サンプルは板状ゲータイト、Cd を蒸着した板状ゲータイトを使用した。サンプルホルダーに取り付けられる大きさに壁開し、表面帯電を抑える為にステンレス板状に導電性の接着剤を用いて固定し XPS 試料室へと設置し、それぞれの O1s ピークを測定し分解を行った。

天然の針状ゲータイトの AFM 観察では比較的ノイズの少ない(110)と思われる面が確認出来た。またステップと思われる微斜面を確認した。

Cd 蒸着したゲータイトでは吸着した Cd を画像で確認出来た。また、Cd 膜の成長過程は画像から吸着 Cd 原子の表面拡散により、アイランドを形成し 3 次元方向に成長している事が蒸着量別の AFM 画像から明らかになった。

板状ゲータイト壁開面の AFM 画像からゲータイトの 8 面体ユニットが規則的に配列した 110 面の原子像と思われる画像を得る事が出来た。

板状ゲータイト壁開面の O1s ピークの分析からゲータイトの OH⁻と O²⁻の O が確認され、その強度比は 1:1 となった。これは AFM で確認されたように様々な面が含まれている可能性がある為だと思われる。

Cd を蒸着した板状ゲータイトの O1s ピークでも Cd がない時に比べ Cd が原因と思われる低エネルギー側へのピークシフトが起きた。また強度比を 1:1 に固定し、ピークの分解を行ったところ OH⁻と O²⁻それぞれにピークのシフトが確認出来た。さらに OH⁻と O²⁻のピークを Fe・Cd 成分に分解し、吸着状態の考察を行った。

5. 混合ガス法を用いた一酸化窒素の価電子励起状態の一般化振動子強度の測定

鈴木 宗宜 (原子過程科学)

分子は、光を吸収したり電子や他の粒子と衝突することでエネルギーを受け取り、励起状態へ遷移することがある。そのような励起状態への遷移のしやすさを表す指標の一つに、断面積や振動子強度と言われる物理量があり、多くの原子分子のさまざまな励起状態について測定されている。しかし、本研究で着目した一酸化窒素(NO)の価電子励起状態の断面積や振動子強度はとても小さく、研究例は非常に少ない。そこで我々は、電子衝撃による NO の価電子励起状態の一般化振動子強度の測定を行った。

振動子強度とは、ある状態からある状態への遷移確率に比例した無次元の物理量なので、電子-原子・分子衝突の際、原子・分子の振る舞い(励起、解離、イオン化など)が起こる確率を表す断面積と比例関係にある。ここで言う遷移確率が電気双極子遷移の確率である場合、振動子強度は、光学的振動子強度である。荷電粒子との相互作用によるものとしては、Bethe によって導入された一般化振動子強度があり、衝突電子エネルギーが標的ポテンシャルに比べ十分に高いとき、すなわち Born 近似が成り立つ場合、それは、運動量移行 K^2 のみの関数となり、衝突エネルギーによらない。ゆえに、一般化振動子強度が決まれば、測定を行わずとも、高エネルギー領域での断面積を知ることができ、高層大気や宇宙空間などの荷電粒子が関与する電子分子衝突過程の理解に役立つ。また、一般化振動強度は、 K^2 が 0 の極限で光学的振動子強度に一致するため、電子衝撃と光衝撃実験は、互いに相補的な関係をもつ。

NO の価電子励起状態の一般化振動子強度の測定は今回が初めてではない、NO の価電子励起状態への遷移には、3つの系列があり、その $X^2\Pi\text{A}^2\Sigma^+$ (γ 系列)、 $X^2\Pi\text{C}^2\Pi$ (δ 系列)、 $X^2\Pi\text{D}^2\Sigma^+$ (ϵ 系列) の微分断面積及び一般化振動子強度の測定が 2004 年に行われた。その結果、 γ 系列において、一般化振動子強度が光学的禁制遷移のように極大をもつ振る舞いが見られた。NO は一つの価電子を持つ異核二原子分子で、測定した γ 系列、 δ 系列、 ϵ 系列の遷移は全て光学的許容遷移にあたるが、等核二原子分子として考えると、 γ 系列のみパリティの保存則から、光学的禁制遷移になる。よって、対称に近い異核二原子分子に禁制則が関与することで、光学的許容遷移でも光学的禁制遷移の特徴が現れたと解釈を与え、これを擬似対称性と名付けた。同様の振る舞いは、一酸化炭素(CO)でも報告されていたが、それと比較すると極大を持つ運動量移行の大きさが異なる、光学的振動子強度を超えるデータが 2 点しかないことなどから、その振る舞いと絶対値について、いくつかの問題点が指摘されていた。前述の研究では、一般化振動子強度の絶対値化は、 $K^2 \rightarrow 0$ でそれが光学的振動子強度と一致するという性質を元に絶対値化を行っていたので、外挿曲線の誤差も大きい。そこで、異なる絶対値化のアプローチとして混合ガス法を用い、各励起状態についての一般化振動子強度を求めた。

はじめに、 $N_2\text{-He}$ 、 $Ar\text{-He}$ の混合ガスを用いて得られたエネルギー損失スペクトルを解析し、混合ガス法による絶対値化についての議論を行った。その結果を踏まえて、100 ~ 700 eV の衝突エネルギーのもとでの微分断面積及び一般化振動子強度を決定した。その結果、本研究で取得した一般化振動子強度の絶対値は、2004 年に測定したデータと比較すると幾分小さな値を示す。 γ 系列の一般化振動子強度の振る舞いは K^2 が小さくなるにつれ、単調に増加し、 $K^2=0.2$ 付近でピークを形作った後、減少するという傾向を示した。 $K^2 \rightarrow 0$ で光学的振動子強度に一致することを考えると、 K^2 の極めて小さな領域で再び上昇することが要請され、CO と同様の振る舞いであるといえる。また、衝突エネルギーごとに比較すると 100 eV のデータの振る舞いのみ他の衝突エネルギーと多少異なるが、これは、Born 近似が成立しない為と考えられる。

6. イオン付着飛行時間分析法を用いた呼気分析装置～実用化に向けての性能評価～

出口 裕理（原子過程科学）

質量分析は、試料を適切な方法でイオン化し、生成したイオンを電気的あるいは磁氣的相互作用により質量ごとに分離して質量と電荷の比を求める分析法である。イオン化の方法にはいくつかの種類があるが、一般の質量分析計によく用いられている電子イオン化法では、70 eV 程度の加速された熱電子によりイオン化を行うので、イオン化の際に解離を伴うフラグメンテーションと呼ばれる過程を起しやす。このため、特に大きな分子の質量分析では、分子イオンピークが現れにくく、得られるマススペクトル上のピークのほとんどはフラグメントピークとなり複雑である。これは、多種の未知試料を対象とする、呼気分析にとって都合の良いことではない。そこで、本研究室ではイオン付着法をイオン化法に採用した質量分析装置の開発を行ってきた。イオン付着法は 100 Pa 程度の圧力下において、試料分子にアルカリ金属イオンを付着させてイオン化を行う手法である。イオン化の際の余剰エネルギーは第三体ガスを導入することにより除去し、また同時に第三体ガスはアルカリ金属イオンの減速にも寄与する。この方法では余剰エネルギーがほとんどなくフラグメンテーションを極めて起こしにくいため、各分子イオンピークの質量数から物質の同定が直接可能となる。このように、未知試料の分析が可能であるというイオン付着法の特徴を生かし、本研究では質量分析計を呼気分析に応用することを目的とし、その性能評価を行った。

呼気中には、よく知られている水、窒素、二酸化炭素等の他にも非常に多くの揮発性有機化合物が含まれている。その中でも生体情報をもつ呼気ガスの存在が多く報告されていて、呼気分析は比較的簡単に生体情報を得ることができるため、新しい病気の診断法として近年医療分野において注目されている。また、呼気分析は肉体的・精神的に負担が少なく、現段階では呼気の採集を行う側は資格等を必要とせずに検査をすることができるといった利点があるため、呼気分析に対する社会的期待は非常に大きい。

本研究で使用している質量分析計は、イオン化部にイオン付着法を、分析部には飛行時間質量分析法を採用しているイオン付着飛行時間型質量分析装置で、**TOFIA (Time-Of-Flight combined with Ion Attachment)**装置と名付けられている。TOFIA 装置を医療分野で使用するには、信頼性という観点から高感度で定性・定量的な分析かつ安定性が求められる。そこで、様々な実験条件の元で測定の安定性を調べた。試料の導入方法や測定時間を変えた実験を行った結果、測定の安定性は、窒素の検出効率と関係があることがわかった。また、測定時間については、90 分間の測定を行うことで測定値のばらつきを 10 % 以内に収めることに成功した。次に、TOFIA 装置の検出限界を確認するため、糖尿病と関連性のあるアセトンを導入した実験を行った。呼気中のアセトンの濃度レベルは 0.2~15 ppm なので、TOFIA 装置での検出限界は ppb オーダーが望ましい。しかし、実験の結果、検出限界は 1 ppm となり多少物足りない。そこで、TOFIA 装置の実用化に向けてさらなる感度の向上のために RF イオンガイド法を取り入れた。この方法を用いて呼気を測定し、今まで検出限界以下であった呼気ガス成分であるアンモニアとイソプレンを検出することに成功した。

さらに呼気の測定では、成分中に含まれる水蒸気が他成分の検出感度に悪影響を及ぼすため、本研究では、水蒸気の除去方法についても考え、呼気を冷却することによって、呼気中の水蒸気の強度変化を調べた。その結果、呼気中の水蒸気以外の成分が減少することなく水蒸気だけを除去することに成功した。以上により、イオン付着飛行時間分析法を用いた呼気分析装置の実用化に向けての性能評価を行うことができ、十分に期待できるとわかった。

7. デジタルカメラを用いた大気リモートセンシング

清家 和貴 (量子エレクトロニクス)

現在さまざまな地球環境問題が世界各地に影響を与え、大きな関心を集めている。大気汚染、地球温暖化、オゾン層の破壊、酸性雨、異常気象などである。これらの現象は原因が局地的にあったとしても気流などによって、世界全体に広がってしまう。このため世界各地でネットワークが組み立てられ、共同で調査をおこなったりしている。これらの問題を効率的に観測し解析する手法の中にライダーリモートセンシングがある。

ライダー (LIDAR : Light Detection And Ranging) とはレーザー光を観測対象物であるターゲットに照射し、その時の反応現象を利用して観測するという手法である。ここで反応現象とは光の散乱・吸収である。この時に生じた散乱光をデジタルカメラで観測する。リモートセンシングとは、離れた場所にある観測対象物と非接触で情報を集めることができる計測技術の事である。つまり、ライダーリモートセンシングとは、遠方にある観測対象物(大気分子、エアゾルなど)にレーザー光を照射し、その対象物との反応により生じた散乱光を観測し対象物の物理的な性質を遠隔測定する技術のことである。パルスレーザー光を利用することで、より高精度の観測が可能である。

本研究ではライダーリモートセンシングにより空気中の N_2 、 O_2 、 H_2O のストークス光の観測を行った。観測は望遠鏡と光電子増倍管を用いず、かわりにデジタルカメラを使用した。測定においてラマン散乱による光の偏光という性質を利用して対象物の観測を行う偏光ライダーという手法を用いた。本実験で使用したライダーについて説明する。光源として Nd:YAG レーザーの第二高調波(532nm)を、受信望遠鏡としてデジタルカメラの CANON EOS7D を使用した。室内実験では照射されたレーザー光の前方散乱光を作成したレーザー同期メカニカルシャッターを通し、背景光を抑え、干渉フィルターで分光し、デジタルカメラで N_2 のストークス光を撮影した。 H_2O の撮影では加湿器を用い、室内の湿度を調整してから撮影を行った。 O_2 の撮影ではレーザー光の前方散乱光をメカニカルシャッターを通し、干渉フィルターと可視域ダイクロイックフィルターを 45° に傾けたもので分光し、デジタルカメラで撮影した。

屋外実験ではレーザー光を鉛直方向に照射した。照射されたレーザー光の後方散乱光を本学屋上で室内実験と同様にメカニカルシャッターを通し、背景光を抑え、干渉フィルターで分光し、デジタルカメラで N_2 と H_2O のストークス光を撮影した。また、 O_2 の観測ではメカニカルシャッターと干渉フィルターとの間に 45° に傾けた可視域ダイクロイックフィルターを設置しデジタルカメラで撮影した。

また、室内実験では平行して N_2 、 O_2 、 H_2O の分極率の1次の微分係数を測定した。結果、分極率の1次の微分係数は N_2 が $6.29 \times 10^{-32} \text{ m}^3$ 、 O_2 が $5.22 \times 10^{-32} \text{ m}^3$ 、 H_2O が $7.21 \times 10^{-32} \text{ m}^3$ という結果が求められた。

8. 高分解能レーザー分光法を用いた2電子原子 Ba と Yb のシュタルク効果の研究

小林 二千翔 (量子エレクトロニクス)

原子や分子に外部電場を印加すると電子のエネルギー準位が変化し、その原子や分子が持つ固有の蛍光スペクトルのシフトや分岐が見られる。この現象はシュタルク効果と呼ばれ、原子の基本的な性質を理解するために重要な基礎研究である。

近年、パリティ非保存に関する測定や、原子の永久電気双極子モーメント(EDM)の探索が行われている。これらの研究では、シュタルク効果を用いた実験が行われているため、分極率などの原子の基礎データが高い精度で導かれることが必要とされている。また、分極率は原子の波動関数に密接に関連し、理論計算を有効に検証することができる。しかしながら、シュタルク効果の研究は、超微細構造やゼーマン効果と比べ、これまでにあまり行われていなかった。強電場の生成が実験的に困難なためである。そのため、多くの原子に対してシュタルク効果が分かっていないのが現状である。

以上の理由から、我々は現在系統的なシュタルク効果の研究を行っている。これまでは、単電子のアルカリ金属原子のシュタルク効果を調べて来た。2電子原子は単電子原子より電子配置が多様化で、電子準位が複雑になっている。シュタルク効果は異なるパリティの準位間の *mixing* によって起源しているため、2電子原子の研究は分光実験のみならず、理論計算にも興味深い。

本研究では、外部共振器型波長可変半導体レーザーと原子線を用いて、高分解能レーザー分光により最外殻に電子を2つ保有している2電子原子 Ba と Yb のシュタルク分光を行った。Ba 原子と Yb 原子は共に基底状態で $6s$ 軌道に2個電子が配置し、 $5d, 6s, 6p, 6d$ 等の *open-shell* を持つ。また、Yb 原子は f 殻に14個の電子が *closed-shell* をつくっている。

Ba の測定では、電気放電を用いて原子を準安定状態 $6s5d^3D_1$ に占有させ、 $6s5d^3D_1-5d6p^3F_2$ 遷移(波長 767.2nm) の分光を行った。観測したスペクトルから偶質量数の同位体は上下準位の分岐によって4本のピークに分岐していることが確認できた。電場を変えて詳細な測定を行い、同遷移のスカラー分極率を $-89.2 \pm 3.0 \text{ kHz}(\text{kV}/\text{cm})^2$ 、上準位 3F_2 のテンソル分極率を $-111.5 \pm 2.4 \text{ kHz}(\text{kV}/\text{cm})^2$ 、及び下準位 3D_1 のテンソル分極率を $-14.67 \pm 0.50 \text{ kHz}(\text{kV}/\text{cm})^2$ と決定した。

Yb の測定では、 $4f^{14} 6s^2 1S_0-4f^{14} 6s6p^1P_1$ 遷移(波長 398.8nm) を使用した。この遷移波長は紫外領域にあるため、二倍波発生装置を用いた。観測したスペクトルから、偶質量数の同位体は $4f^{14} 6s6p^1P_1$ 準位の分岐によって2本ピークに分岐していることが確認できた。さらに、様々な電場で詳細な測定を行い、同遷移のスカラー分極率を $56.6 \pm 1.3 \text{ kHz}(\text{kV}/\text{cm})^2$ 、及び上準位 1P_1 のテンソル分極率を $-19.49 \pm 0.43 \text{ kHz}(\text{kV}/\text{cm})^2$ と決定した。また、同遷移の超微細構造定数と同位体シフトも求めた。

9. 常温における p-ターフェニル中の陽子偏極

澁澤 杏奈（量子エレクトロニクス）

我々は、これまで原子核物理学分野における散乱実験に用いるための偏極標的の開発を行ってきた。そこで培ってきた偏極技術と研究成果をさらに活用していく場として、医療分野における核磁気共鳴映像法（MRI）への貢献が期待できる。

原子核物理学分野で有効であった高温(100K)かつ低磁場な環境下での偏極手法を用いて、常温(300K)かつ低磁場な環境下でも陽子偏極を生成できるということは、医療分野への応用の第一段階となる。さらには、将来的に生体中に含まれる糖分子などに対しての偏極を目標としている。そこで本研究では、まず常温かつ低磁場での陽子偏極を行った。次に、第二段階として p-ターフェニル中の炭素 13 への常温偏極について検討した。

本研究では、結晶試料に芳香族分子を用いている。今回、常温偏極を可能にするために結晶試料の変更をした。低温(~100K)で用いてきたホスト分子であるナフタレンに代わって、p-ターフェニルを採用した。この結晶試料はゲスト分子としてペンタセンを少量ドープしたものである。p-ターフェニルは、ナフタレンに比べて常温での偏極緩和率が低く、ホスト分子中のペンタセン濃度が高いということから常温偏極に向いている。このような試料を用いて、p-ターフェニル分子中の陽子の偏極生成を行った。我々が用いている芳香族分子光励起法では、レーザーを照射することで起こるペンタセン中の電子の光励起三重項状態を偏極の種としている。つまり、レーザーによる光励起によって電子を偏極させ、それを陽子へと移行していくことで p-ターフェニル中の陽子偏極を得ている。今後、炭素 13 への偏極移行を行う時、移行前の陽子の偏極をいかに大きくできるかが重要となる。そこで、まずは p-ターフェニル中の陽子偏極を大きくするための最適化を行った。しかし実験の結果、想定していたように偏極は大きくならないことがわかった。検討の結果、レーザー照射による結晶の温度上昇が原因であるという結論を得た。そこで、この温度の問題を考慮したうえでレーザーのパワー等を変更しながら測定を行ったところ、十分な偏極が得られることができた。今後は、チェンバー内を0℃付近まで冷却することで結晶の温度上昇の問題を解決し、偏極生成及び測定を行う。

炭素 13 の偏極は、さらに陽子から偏極を移行することで得ることができる。そこで次に、炭素 13 への偏極移行のための装置および回路の変更をした。偏極移行の際には、2つのスピンのゼーマンエネルギーを一致させる必要がある。我々は陽子と炭素 13 に対して、二重共鳴法を用いる。そこで二重共鳴用に回路を改良し、整合を確認した。その後、移行条件の最適化を行い、陽子から炭素 13 への偏極移行について検討した。

10. イオンの乱れがスピネル化合物 CoAl_2O_4 のスピン液体状態に与える効果

花島 健太郎 (磁気物性)

最近、固体物理学において幾何学的フラストレーションという現象が注目を集めている。幾何学的フラストレーションとは、スピン間の相互作用が同時に満たされない状況を指す。フラストレーション系の基底状態では巨視的な縮退が生じ、スピン液体(SL)状態になるとされている。スピネル化合物 AB_2X_4 ($X=O, S$ 等) は、フラストレーションを研究する上で特に重要な系の1つである。スピネル化合物の B -site はパイロクロア格子を形成し、一般的にフラストレーションを持つ格子として知られている。これに対し、 A -site の副格子はダイヤモンド格子を形成し、この格子は最近接相互作用(J_1)のみを考慮した場合フラストレーションが起きない。しかし、実験的には CoAl_2O_4 など A -site にのみ磁性イオンを持つ場合でもフラストレーションが報告されている^[1,2]。この A -site フラストレーションはダイヤモンド格子の J_1 と次近接相互作用(J_2)の競合により引き起こされる^[3]。

CoAl_2O_4 は $J_2/J_1 \sim 1/8$ に位置しており、“Spiral spin liquid” といった特殊な SL 状態が理論的に期待されている^[3]。実際、Suzuki^[1] *et al.* は磁化や比熱の実験から 2 K まで長距離磁気秩序を起こさず CoAl_2O_4 は SL 的であるとした。しかし、Tristan^[2] *et al.* の実験では、5 K 付近でスピングラス(SG)に転移するとしている。これらの相違は、 A -site と B -site 間のイオンの乱れにより一部フラストレーションが解消する、いわゆる“order by disorder” が原因の一つとして考えられるが、これまではっきりとその事を示した実験はなされていない。また、出現する SG の性質についても良くわかっていない。

そこで、本研究では、固相反応法による試料作製時の熱処理条件を系統的に変えることで A -site と B -site 間の乱れを表すインバージョンパラメーター η を制御し、イオンのサイト間の乱れが CoAl_2O_4 の基底状態に与える影響を調べた。ここで、 η は $(\text{Co}_{1-\eta}\text{Al}_\eta)[\text{Al}_{2-\eta}\text{Co}_\eta]\text{O}_4$ で定義され、本来 A -site に入る Co がどれだけ B -site に入るか、あるいはその逆で決まる。作製した試料は X 線回折から構造解析し、磁気特性測定システム(MPMS)を用いて磁化測定を行った。

この結果、 $\eta = 0.0467 \sim 0.153$ の CoAl_2O_4 を得ることができた。磁化測定の結果から、 CoAl_2O_4 の磁気状態は η によって大きな影響を受けることがわかった。図 1 に $(\text{Co}_{1-\eta}\text{Al}_\eta)[\text{Al}_{2-\eta}\text{Co}_\eta]\text{O}_4$ の η - T 相図を示す。本来、Curie-Weiss 温度の絶対値 $|\Theta_{\text{CW}}|$ 付近で常磁性から磁気秩序を持つ状態に相転移するはずだが、フラストレーションによって妨げられ SL 相が出現する。 $\eta < 0.0643$ の時は $T^* \sim 10$ K で ZFC と FC が分かれるが、少なくとも 2 K まで長距離秩序を示さない SL 的な振る舞いをし、 $\eta > 0.101$ の時は 5 K 付近で SG に転移した。これらの中間の η では、SL と SG が混在した状態になっていると考えられる。この SG 転移は、イオンのサイト間の乱れによって一部フラストレーションが解消され、秩序が引き起こされたと考えられる。これより、Suzuki *et al.* と Tristan *et al.* によって報告された CoAl_2O_4 の磁気状態が異なる原因が η の違いにあることがわかった。

更に、上で得られた SG 転移温度 T_g には 2 つの特徴がある。1 つ目は、 T_g が 5 K 付近に急に出現すること、2 つ目は T_g が乱れにほとんど依存しないことである。これらの特徴は通常の SG における交換相互作用の乱れだけでは説明できず、局所的な格子の乱れを考慮した“spin lattice coupling”の効果^[4] などを取り入れる必要があると考えられる。

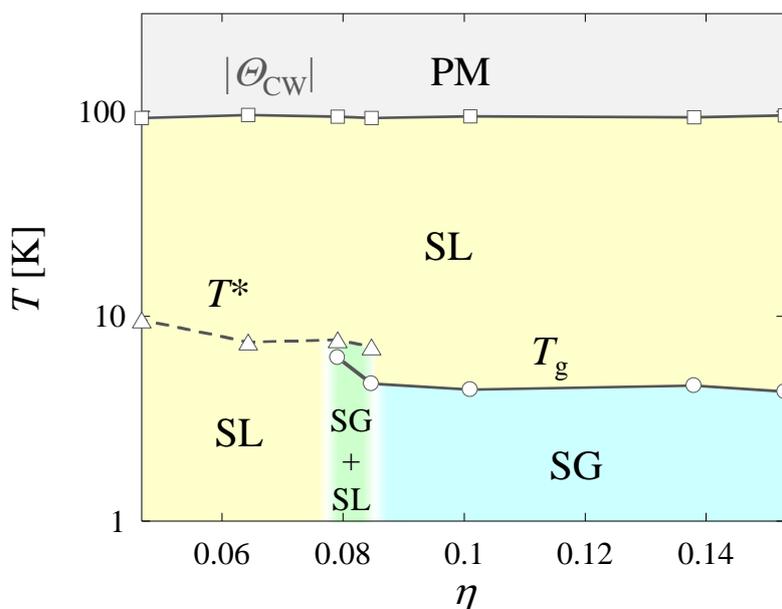


図1 : $(\text{Co}_{1-\eta}\text{Al}_{\eta})[\text{Al}_{2-\eta}\text{Co}_{\eta}]\text{O}_4$ の η - T 相図. 常磁性(PM), スピン液体相(SL), スピングラス相(SG), Curie-Weiss 温度の絶対値($|\Theta_{CW}|$), ZFC と FC の分かれ目の温度(T^*), スピングラス転移温度(T_g).

- [1] T. Suzuki, N. Nagai, M. Nohara, and H. Takagi, *J. Phys.: Condens. Matter* **19** (2007) 145265.
- [2] N. Tristan, V. Zestrea, G. Behr, R. Klingeler, B. Buchner, H. A. Krug von Nidda, A. Loidl, and V. Tsurkan, *Phys. Rev. B* **77** (2008) 094412.
- [3] D. Bergman, J. Alicea, E. Gull, S. Trebst, and L. Balents, *Nat. Phys.* **3** (2007) 487.
- [4] H. Shinaoka, Y. Tomita, and Y. Motome, *Phys. Rev. Lett.* **107** (2011) 047204.

11. 高周波スパッタリング法を用いたAサイト秩序型ペロブスカイト Mn 酸化物の薄膜作製

三橋 賢 (磁気物性)

ペロブスカイト型 Mn 酸化物は超巨大磁気抵抗(Colossal Magnetoresistance: CMR)効果を示す物質として知られている。CMR 効果とは磁場を印加することで電気抵抗が数桁の減少を示す現象である。CMR 効果は電荷軌道秩序絶縁体(COOI)相と強磁性金属(FM)相が二重臨界的に競合し、その二重臨界点近傍で磁場を印加することで、COOI-FM 相転移が引き起こされることに起因している。この CMR 効果は電気磁気変換素子や次々世代の高密度磁気記録への利用などが期待されている。CMR 効果を応用化する際の問題の一つとして、CMR 効果が発現する温度が室温よりも低いことが挙げられる。これは、COOI 相、FM 相に相転移する温度と COOI-FM が形成する二重臨界点が室温よりも低いためである。そこで我々は A サイト秩序型ペロブスカイト $RE_{0.5}Ba_{0.5}MnO_3$ (RE は希土類を示す)に着目した。この系は $RE = Nd$ において、室温以上に COOI 相、FM 相、A 型反強磁性(AF(A))相が多重臨界点を形成する。そのため室温での CMR 効果の実現が期待される。しかし、AF(A)相が COOI と FM 相の間に存在するため CMR 効果が実現しない^[1]。従って室温 CMR 効果の実現のためには AF(A)相を取り除くことが必要である。AF(A)相を取り除く方法の一つとして、薄膜化による基板との格子ミスマッチ(エピタキシャル歪み)を利用する方法^[2]がある。一方で、CMR 効果を示す Mn 酸化物を将来的にエレクトロニクス材料として利用するためには、試料の耐久性や生産の効率化から薄膜化することが求められる。

本研究では高周波スパッタリング法を用いて秩序型 $Nd_{0.5}Ba_{0.5}MnO_3$ (NBMO)の薄膜作製を試みた。 55ϕ の無秩序型 NBMO のターゲットを固相反応法によって作製した。成膜は様々な基板の上に、投入電力 20 W、Ar ガス圧 1.6×10^{-2} Torr で 16 時間行った。この時、基板温度は $350\text{ }^\circ\text{C}$ にした。作られた膜の厚さは $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 程であった。成膜後、薄膜に対して $500\text{ }^\circ\text{C} \sim 900\text{ }^\circ\text{C}$ でアニール(雰囲気は空气中またはアルゴン中)を施し、結晶化と A サイト原子の秩序化を促した。基板には、MgO 基板(-7.48 %)、SrTiO₃ 基板(-0.02 %)、Si 基板(1.67 %)、LaAlO₃ 基板 (2.95 %)を用いることでエピタキシャル歪みが磁性にどの様に影響するかを調べた(())中の値は秩序型 NBMO との格子ミスマッチを示す)。磁化測定は磁気特性測定装置(MPMS)にて行った。

磁化測定の結果から、アルゴン中でアニールしたすべての薄膜試料において、低温で零磁場冷却の磁化と磁場中冷却の磁化が分かれるスピングラス(SG)の振る舞い、室温付近での磁化の立ち上がりが観測された。低温での SG 的振る舞いは無秩序型の成分を示唆する。これに対し室温付近での磁化の立ち上がりは秩序型 NBMO の FM 相の特性を示唆している。特に、Si 基板に堆積させた薄膜試料では室温から磁化が大きく立ち上がり、低温まで強磁性的な磁化を持った。これはエピタキシャル歪みにより AF(A)相が抑制され、FM 相が安定化していると考えられる。一方、MgO 基板、LaAlO₃ 基板に作製した薄膜では、室温付近からの磁化の立ち上がりが見られるものの、その大きさが磁化の最大値と比べ小さく、低温での磁化の増大が抑えられた。この理由として薄膜に与える歪みが大き過ぎて AF(A)または C 型反強磁性が安定化したことが考えられる。SrTiO₃ 基板に作製した薄膜では、室温付近の磁化の立ち上がりは磁化の最大値と比べ小さいが、150K 付近から磁化が大きく立ち上がる。これは SrTiO₃ 基板と秩序型 NBMO の格子ミスマッチが 0.02 % と小さいため歪みの効果が弱く、低温での A サイト無秩序型 NBMO が支配的になったと考えられる。

以上の結果より、A サイト秩序型ペロブスカイト NBMO における AF(A)相の抑制には NBMO との格子ミスマッチが 1.67 % の Si 基板を用いることが最も有効であるとわかった。しかし低温でガラス的な振る舞いが見られたことから、A サイトの原子配列に乱れが存在していると考えられる。

- [1] D. Akahoshi, Y. Okimoto, M. Kubota, R. Kumai, T. Arima, Y. Tomioka, and Y. Tokura, *Phys. Rev. B* **70** (2004) 064418.
- [2] Y. Konishi, Z. Fang, M. Izumi, T. Manako, M. Kasai, H. Kuwahara, M. Kawasaki, K. Terakura, and Y. Tokura, *J. Phys. Soc. Jpn.* **68** (1999) 3790.

12. Ashra 実験に用いるトリガー系の開発

辻川 弘規 (基礎物理)

全天監視高精度素粒子望遠鏡 (All-sky Survey High Resolution Air-shower detector: Ashra) は、42 度の広視野かつ数分角の解像度を持つ複数の検出器群で全天の約 80% を常時監視する。これにより 高エネルギー天体からの素粒子による空気シャワー現象が起こす大気発光現象を捕らえ、その起源やメカニズムを探ることで、新たな超高エネルギー天文学の開拓を目指すプロジェクトである。Ashra の宇宙線検出器には、大気チェレンコフ光や大気蛍光などの大気発光現象を制御露光しながら同時独立して撮像するためにトリガーシステムが装備されている。トリガーシステムの一部を担う光ファイバー伝送系は、直径 500 μm の光ファイバーを 64 \times 64 本の格子状に束ねた光ファイバーバンドルからなり、これら複数の集光器から得た光像を結合し、2 種類の大気発光現象用のトリガー系に分配して伝送する役割を果たす。また Ashra のトリガー系は、光ファイバーバンドル、閾値判定を行うトリガーセンサ LSI、論理判定を行い撮像系へトリガー信号を送るトリガー FPGA ボードからなる。これまで 天頂角 75 $^\circ$ の方向を向いたマウナケア山向きの検出器を用いて山かすりタウニュートリノを観測対象としたトリガー試験観測を行ってきた。

本研究では、光ファイバー伝送系に使用される光ファイバーバンドルの作製と性能評価を行った。光ファイバーバンドルは、光ファイバー64本を並べて成形したシートを2層、4層、8層と段階的に積層して製作する。シート同士の位置を目視調整しながら積層し、各ファイバーの位置が基準となる 500 μm 正方格子より、ずれの σ が 35 μm 以内、すべてのファイバーのずれがほぼ $\pm 100\mu\text{m}$ に収まるバンドルの製作を目指した。また、光ファイバーシートを大量生産する上での、歩留まり及び制度の向上のための製法への改善を行った。光ファイバーを巻き取る際に途中で止まってしまうと、巻き取っていたファイバーがたるんでしまい失敗の要因の一部にもなっていた。そこで常に一定のテンションをかけながら光ファイバーを巻き取れるように、ファイバーリールにモーターを取り付ける事でバックテンションをかけられるように改良を加えた。その結果、誰でも一定のテンションで光ファイバーを巻き取る事が可能となり歩留まり率は高くなった。

更に、ファイバーシートの積層時の位置ずれをスキャナーで精密に測定するために、フォトマスクを使うことを試みた。その結果、スキャナーで読み込んだ画像の補正を行い十分な精度で位置ずれを測定出来る事が解った。

また 今回タウニュートリノ点源のトリガー閾値を下げたチェレンコフ光観測を行う為に、トリガーモジュールのアップグレードを行い、その性能試験も行った。性能試験では チェレンコフ光に対応した疑似信号を LED で発生させ PMT を光らせた後トリガーモジュールに信号を入力する。隣り合う 2 画素で閾値以上の信号が来た時にトリガー信号を発生させる論理判定の元、入力電子数を変化させながらトリガー効率の測定を行った。その結果、以前試験観測に使用したトリガーモジュールのエネルギー閾値より約 1/10 以下でトリガー効率が 100% となり感度が向上した事が実証された。2011 年 1 月よりタウニュートリノ点探査及び光学閃光探査の本観測が開始された。エネルギー閾値を一桁以上下げる事が可能となる事で特に低エネルギー側での感度が向上した為、世界最高感度での 10 PeV 以上のタウニュートリノ点源探査が可能となる。

13. Ashra 望遠鏡を用いたチェレンコフ光による宇宙線観測

小暮 大輔（基礎物理）

全天監視型高精度宇宙線観測実験:All-sky Survey High Resolution Air-shower detector (Ashra)は、広視野高分解能の検出器を複数台用いて、全天の77%を常時観測し、突発的高エネルギー天体から放出される紫外光及び、高エネルギーなガンマ線やニュートリノの観測を行い、突発的高エネルギー天体の発見や高エネルギー放射機構の解明を目指す実験である。Ashra 検出器内では光電撮像パイプラインと呼ばれる光伝送システムが搭載されており、この中で配光、露光時間の制御を行うことで空気シャワー由来の大気発光現象や高エネルギー天体からの可視光の閃光などを同時、独立に撮像を行うことが出来る。また複数台の検出器を用いてステレオ観測を行うことで、高精度に空気シャワーの到来方向やエネルギーを決めることが可能である。

光電撮像パイプラインの光伝送部分には光ファイバー束が用いられる。これは500 μm 径の光ファイバーを格子状に並べることで入射した光を粗画像として低損失でトリガー回路まで伝送することが出来る。本研究では64 \times 64本の光ファイバー束のシートの作製、積層作業を行うと共に、作製した光ファイバー束の評価を行った。これまで16層を2つ、8層を5つ作製し、格子点からのずれは精度目標となる200 μm 以下を達成した。透過率はそれぞれ70~78%の様な分布が得られ、これらを用いて64層光ファイバー束を作製すれば十分観測に実装可能である事が確認された。透過率の測定には基準光として青色LEDを用い、その光をレンズで集光させる。集光した光を2軸自動ステージを用いて光ファイバーに入射させ、光ファイバーからの出力光をPMTで測定する。光ファイバー入射前後の光量を測定し、その比を取ることで光ファイバーの「光の透過率」を計算している。測定過程のPMTのHVのON,OFFや光学条件の変化等で透過率は5%程度揺らぐことがわかった。

Ashraでは天頂角30°の方向を向いた1台の検出器を用いてこれまで2期(2008年6月28日~2009年6月5日、2009年10月7日~2011年1月4日)に渡って光学閃光観測を行うと共に、天頂角75°の方向を向いたマウナケア山向きの検出器を用いて山かすりタウニュートリノを観測対象としたトリガー試験観測(2008年10月28日~2008年12月10日)を行ってきた。2010年5月16日~8月1日には観測作業を行い、合計3526.5hになる光学閃光観測実績に貢献した。また2011年8月28日~10月25日、11月28日~12月28日にステレオ観測を実現するため高分解能で結像するように光を集光する分割鏡の調整を行うと共に、集光面に大口径光電レンズ撮像管、光電撮像パイプラインを取り付け、実際に夜空の撮像を行い観測可能であることを確認した。またトリガー観測を行うためにトリガー読み出し回路のインストール作業も行い、光ファイバー束から伝送された光に対してトリガー信号を撮像系に送り撮像を行う事が可能になった。2011年12月21日~12月28日には山かすりタウニュートリノを観測対象としたトリガー試験観測を行った。従来に比べ約10倍の高感度、低閾値でのトリガー観測を55時間にわたりを行った。これにより、長期定常観測が可能になり、世界最高感度での10PeV以上タウニュートリノ点源探査が可能である。2011年1月よりタウニュートリノ探査及び光学閃光探査の本観測が開始した。

14. B ファクトリー実験で使用する新型光検出器の放射線耐性

森 和香奈 (基礎物理)

B 中間子系に現れる CP 対称性の破れを発見し小林・益川理論を裏付けた Belle 実験は、2010 年 6 月に終了した。その後継となる Belle II 実験では、小林・益川理論の詳細な検証と標準理論を超える新しい物理の探索を目的に、Belle 実験からの加速器・検出器のアップグレードが行われている。B 中間子の崩壊の終状態に多く含まれる K 中間子と π 中間子の粒子識別は、B 中間子の CP 対称性の破れの観測において重要な課題である。Belle II 実験に向けて、高運動領域での粒子識別を行うことでより多くの B 中間子の稀有崩壊の観測を可能にするために、荷電粒子が輻射体を通じた時に円錐状に放出されるチェレンコフ光をリングイメージで捉えることにより 0.5~4GeV/c の運動量領域で K/ π 識別を行う新型粒子識別装置 Aerogel Ring Imaging Cherenkov counter (A-RICH) の開発が行われており、運動量 4GeV/c において 4σ 以上の信頼度で K/ π 識別を目指している。Belle II 実験の A-RICH 検出器は輻射体の Aerogel、光検出器の Hybrid Avalanche Photo Detector (HAPD)、読み出し回路の ASIC と FPGA で構成される。HAPD は 4.9mm \times 4.9mm のピクセルを 144ch 持つ APD (Avalanche photo diode: Avalanche 増幅を利用した受光ダイオードの一種) を、高電圧が印加できる真空管内部に封入したのち、真空管部の入射窓にアルカリ金属を蒸着させ光电面を作成した新型のマルチアノード型光検出器である。アルカリ金属蒸着による APD 破損を防ぐため、APD 表面にはアルカリ耐性膜 (アルカリ保護膜) が塗布されている。HAPD は十分な有効面積・位置分解能・一光子検出・1.5T 磁場中での安定動作・放射線耐性などの 5 つの条件を満たす検出器として浜松ホトニクス(株)と共同開発している。これまでに、放射線耐性以外の 4 つの要求はすでに達成が確認されており、現在は放射線耐性についての研究をすすめている。A-RICH を Belle II 実験で安定的に 10 年間稼働させるために、最大 1000Gy 程度と試算されるガンマ線を受けた後でも、S/N \sim 7 以上の精度で一光子検出が可能な HAPD の開発を目標にしている。

本研究では、HAPD のガンマ線耐性を調べるため、名古屋大学 60Co 照射室で 2010 年 3 月に 1 週間、同 6 月に 2 週間、同 10 月に 2 週間の 3 回にわたりガンマ線照射試験を行った。試験前 HAPD がガンマ線によって受ける影響は小さいと考えられていたが、実際に HAPD にガンマ線を照射し照射中電流のモニターや、照射前後での電流・ノイズ測定を行った結果、わずかな Bias 電圧の変化で急激に APD に流れる暗電流が増加するブレイクダウンという現象が発生することが分かった。ブレイクダウン発生前までは、HAPD がガンマ線によって受ける影響は小さく十分 Belle II 実験で使用可能であるが、ブレイクダウンが発生すると、電流上昇に伴いノイズの上昇がおき、Belle II 実験での使用が不可能である程度まで HAPD の精度が悪化することが分かった。ブレイクダウンは、はじめは高い Bias 電圧で発生するが、ガンマ線照射を続けることで徐々に発生する Bias 電圧が低下していき、現行品では累積線量が 1000Gy に達する前に Belle II 実験で印加予定の Bias 電圧以下まで低下する。照射後の電流測定によってブレイクダウンは照射終了後時間経過で回復することが分かったが、現行品では回復効果も十分でなく Belle II 実験で印加予定の Bias 電圧までの回復は見られなかった。そこで浜松ホトニクスと議論を行い複数の APD 構造や表面膜等を変更したサンプルを作成し試験した結果、ブレイクダウンは、APD 最表面にアルカリ保護膜があるときに発生することが分かった。そのため、アルカリ耐性を保ちつつブレイクダウンの発生を抑えるため、新たなアルカリ耐性膜 (アルカリコーティング) を導入したところ、ブレイクダウンの発生を抑制することができた。また、アルカリコーティングとアルカリ保護膜の相違点から、ブレイクダウンの程度は膜の厚さによる影響を受ける可能性が示された。今後は膜厚とブレイクダウンの関係を求める為の照射試験を行い、最表面膜とブレイクダウンの関係を解明することができれば、ガンマ線耐性を持った HAPD を作成することができる。この HAPD を用いることで Belle II 実験において 0.5~4GeV/c の運動量領域での K/ π 識別が可能になる。

15. 格子ゲージ理論を用いたクォーク閉じ込めの解析

鈴木 博登 (宇宙・素粒子)

本論文は非摂動的手法によるクォーク閉じ込めの解析を目的とし、現在最有力候補とされる格子ゲージ理論を用い、高エネルギー領域においての物質場の粒子クォークとゲージ場の粒子グルーオンの振る舞いを明らかにするものである。

クォーク閉じ込めとは、物質を構成する粒子であるクォークは実験的には単体で存在せず、複数個の集まりとなって陽子・中性子内に閉じ込められている物理現象である。クォークがハドロンを構成する粒子として存在することは、共鳴や深非弾性衝突などの実験から疑う余地は無い。しかし、実際にクォークが単独で観測されたことはない。これは何らかの理由によってクォークが閉じ込められていることを示唆している。

このクォーク閉じ込め問題にはいくつかの推論があり、現在理論の発展によりクォーク間に働く相互作用には漸近自由性と呼ばれる、高エネルギー状態（近距離）では相互作用が弱くなり、低エネルギー状態（遠距離）ではその力が強くなるという性質によって閉じ込めが起きていると考えられる。場の量子論では、電子と光子を記述する QED (Quantum Electro Dynamics 量子電磁力学) により、この2種類の粒子の性質が非漸近自由性を持つことが確認されている。その手順はファインマン経路積分を用い正則化を行い、無限に発散してしまう問題をくりこみという操作によって対処する。しかしクォークと相互作用力であるグルーオンを記述する QCD (Quantum Chromo Dynamics 量子色力学) では、非摂動領域においての計算が必要となる。

そこで非摂動的な計算が可能な格子ゲージ理論がある。これは連続時空を正方形の格子状に切り、その格子上に場の理論を定義するという方法である。これにより場の自由度が非可算無限から可算無限になり、格子間隔 a により紫外発散がカットオフされ、発散の困難がなくなるというメリットがある。そして最後に $a \rightarrow 0$ の極限をとり、もとの連続時空に戻せれば格子理論は数学的厳密な定義を失うことなく場の量子論を与えることができる。

また格子ゲージ理論の基本的な観測量であるウィルソンループは閉じ込め・非閉じ込めを区別する一種の秩序変数であり、この振る舞いを調べることによって閉じ込めを理解することができる。

しかしこの格子ゲージ理論には非常にやっかいな問題がある。それはフェルミオン場を格子上で定義する際にフェルミオンの自由度が2倍現れてしまうダブリング問題である。ニールセン - 二宮の定理によると、ダブリングの回避とカイラル対称性の両方を成立させることは出来ない。つまりこれは格子間隔を $a \rightarrow 0$ としても連続時空での理論を正しく記述することはできないことを意味している。

これについて現在いくつかの対処法があるが、その1つとしてギンスバーグ - ウィルソン関係式を満たす、ドメインウォール・フェルミオンから構成したオーバーラップ演算子を用いた方法がある。これはカイラル対称性の性質を満たす対称性を施すことによってダブリング問題を回避する方法である。

格子ゲージ理論の残された問題として低エネルギー領域を研究し、高エネルギー領域から低エネルギー領域までにおいて相転移がないことを示し、連続極限においてもクォークの閉じ込めが成り立つことを証明する必要がある。

本論文では格子ゲージ理論の基本的な連続時空からの格子化の手順を解説し、ウィルソンループによる閉じ込めの証明と、フェルミオンのダブリング問題をギンスバーグ - ウィルソン関係式を満たすドメインウォール・フェルミオンから構成したオーバーラップ演算子を用いて回避する方法について議論し、クォーク閉じ込めを理解することまでを総説する。

16. ASTE 望遠鏡搭載サブミリ波観測装置 SISCAM の性能向上

大川 泰史 (宇宙・素粒子)

近年世界では次世代サブミリ波観測装置の高感度化・広帯域化・大規模アレイ化が進められている。国立天文台テラヘルツ研究グループではSIS(Superconductor Insulator Superconductor)フォトン検出器を用いた素子数9、視野 $10' \times 10'$ 、中心周波数650GHz、帯域幅60GHzのカメラを開発し、2006年には南米チリのアタカマ砂漠(標高4800m)に建設されたASTE(Atacama Submillimeter Telescope Experiment)望遠鏡へ搭載し、試験観測を行っている。現在は素子数を増加させるために性能の向上に努めている。

SISフォトン検出器は約0.8K以下という極低温で高感度化されるが、SISCAMにも搭載されているGM(Gifford McMahon)冷凍機では4K付近までしか冷却はされず、SISフォトン検出器を高感度化させる事は出来ない。したがって、4K付近の低温からさらに温度を低下させて極低温にする吸着式0.3K冷凍器が必要となる。この0.3K冷凍器を構成するパーツとしてガスギャップ型ヒートスイッチが有る。検出器や極低温回路の実験をする際も0.3K冷凍器を使用するため、ヒートスイッチは極低温には必要不可欠な部品である。このヒートスイッチが過去にON、OFFでスイッチをしないという報告が有り、テラヘルツ研究グループでも調査を行う事になった。また、0.3K冷凍器を1台使用するには3つのヒートスイッチが必要となるが、これまでは8つしかヒートスイッチが無く、その内の1つはON、OFFでスイッチをしないため、故障した物と判明している。この状況下で0.3K冷凍器を使用してSISフォトン検出器の評価を行うため、新たなヒートスイッチが4つ作成され、そのON時、OFF時熱コンダクタンスの測定を行った。その結果、旧ヒートスイッチについては7つの内3つの再現性の確認が終了し、残り4つも再現性の確認が取れ次第使用可能になる。

また新ヒートスイッチについては、ON状態へ移行した後、OFF状態へ移行する時間が旧ヒートスイッチの1分以内と比較して、最速でも10分以上かかる事が4つ全てのヒートスイッチで確認された。この原因はヒートスイッチ本体と活性炭ポンプを繋ぐ、キュープロニックルのパイプの長さが旧ヒートスイッチの2倍以上の長さであり、活性炭ポンプ部が冷えるのに時間がかかった事が原因と考えられる。この対策として駆動電流を最適化することによりOFFへの移行時間を短縮することが出来た。新ヒートスイッチの熱コンダクタンスについては4つの内3つの再現性の確認が済んでおり、現在0.3K冷凍器に使用されている。残りの1つは他のヒートスイッチと比較して、熱伝導をさせるON時の熱コンダクタンスの値が低く、断熱をさせるOFF時の熱コンダクタンスの値が高かった。これは、活性炭が劣化しており、ON時には活性炭から十分Heガスが放出されず、OFF時には十分Heガスが吸着されていないためと考えられる。

また2006年に行われた試験観測の際の問題点の一つには、望遠鏡の主鏡・副鏡が駆動する際、そしてGM冷凍機を使用する際の交流磁場によって、検出器部分にノイズが過剰に乗ってしまうという問題があった。サブミリ波観測時の光電流1nAによるショットノイズは $18\text{fA}/\text{Hz}^{1/2}$ であるが、試験観測時ではその数千倍の過剰ノイズが乗っていた。この過剰ノイズをショットノイズ以下まで低減しなければ観測は困難である。一昨年度までの研究により、交流磁場ノイズを生み出す原因、及びそのノイズを防ぐためのシールドの開発がなされた。それらの調査の後を継ぎ、300Kには磁性体であるファインメットの間にスーパーインシュレーションを入れることで空間距離を空けたものを、Alである50Kシールドには高電気伝導材である純Al(A1050)を、同じくAlである4Kシールドには同じく高電気伝導材である無酸素銅(4N)を用いて新しく製作された磁場シールドと、100巻きの磁場センサーコイルを用いて磁場の測定を行い、その性能を確かめている。