



東邦大学

平成28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・修士論文予稿集

卒業論文発表会

平成29年2月14日（火）・15日（水）

修士論文発表会

平成29年2月23日（木）

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.....	- 3 -
卒業論文要旨	- 6 -
修士・博士論文発表会プログラム.....	- 20-
修士論文要旨.....	- 21 -

卒業論文発表会プログラム (講演9分、質疑3分)

※ 状況により時間変更の場合があります。

場所：理学部 IV 号館大学院セミナー室

平成28年2月14日(火)

開会

9:00 ~ 9:05

物性理論.....

9:05 ~ 11:05

- | | |
|---|--------|
| 1. グラフェンにおける Berry 位相の数値的研究 | 花田 裕大 |
| 2. グラフェンのランダウ準位に対するランダムネスの効果 | 森 一将 |
| 3. Kernel Polynomial Method を用いたグラフェンの状態密度の数値計算 | 平坂 真央 |
| 4. ディラック電子を持つ格子模型の電子状態 | 清水 貴大 |
| 5. トポロジカル絶縁体の電子状態の数値的研究 | 藤澤 周平 |
| 6. 1次元量子ポンピングの数値的研究 | 八木澤 優介 |
| 7. Thouless pumping の強束縛模型に基づく数値的研究 | 後藤 郁己 |
| 8. 反強磁性体中のスピン波輸送に関する理論的研究 | 三上 勝武 |
| 9. ホップフィールドモデルを用いた想起と反学習の研究 | 安蒜 裕樹 |
| 10. ニューラルネットワークにおける想起と学習の研究 | 桑 阿羅士 |

表面物理.....

11:15 ~ 11:51

- | | |
|----------------------------|--------|
| 11. 電界研磨による対称的な W-Tip の製作 | 神崎 A 純 |
| 12. Goethite と Cs の吸着形態の観察 | 山崎 徹 |
| 13. ステンレス鋼の表面元素に対する重水素透過 | 中村 颯月 |

量子エレクトロニクス.....

13:00 ~ 15:12

- | | |
|--|--------|
| 14. 紫外線による植物の生長阻害・形状変化 | 飯塚 直樹 |
| 15. 紫外線による植物の生長阻害・形態変化 | 菊池 祐佳 |
| 16. 大気の観測のための LIDAR 装置の開発 | 植田 基紀 |
| 17. LIDAR を用いた大気エアロゾルの観測 | 荻野 拓哉 |
| 18. LIDAR を用いた散乱回数の区別による雲の消散係数の推定 | 辰澤 和哉 |
| 19. テーパー型ガラスキャピラリーにおける光の透過率 | 松原 充芳 |
| 20. ガラスキャピラリーによる細胞照射用レーザーマイクロスポット生成法の開発 | 幸島 美輝子 |
| 21. Ba の安定同位体を用いた高励起状態における $6s5d^3D_2-5d6p^3F_3$ 遷移の分極率の測定 | 野尻 裕紀 |
| 22. Ba 原子の $6s5d^3D_2-5d6p^3F_3$ 遷移におけるシュタルク効果の研究 | 伊藤 純 |
| 23. Ba 原子の $6s5d^3D_2-5d6p^3F_3$ (728.030 nm) 遷移のシュタルク効果 | 森 信之 |
| 24. 不安定核 ^{132}Sn の陽子弾性散乱 | 原田 知也 |

素粒子物理.....

	15:20 ~ 17:32
25. シンチレーションカウンターの信号読出し回路の試験	坂田 尚弥
26. FPGA ボードを用いたミュー粒子の寿命測定	岡 直也
27. KEK-PS E373 実験における全面探索法を用いたハイパー核探索	新川 駿輔
28. KEK-PS E373 実験における多重電磁散乱を用いた吸収事象の識別	田村 龍太郎
29. OPERA 実験の Background 研究 -4GeV/c π 中間子・鉛反応での核破碎粒子探索-	大平 潤一
30. OPERA 実験のためのハドロン反応から放出された核破碎粒子のバックグラウンド解析	畠山 萌花
31. J-PARC T60 実験におけるニュートリノ反応の探索	奥山 康介
32. シミュレーションを用いた反ニュートリノ反応の精密解析方法の検証	丸山 めぐ
33. エマルシヨンスペクトロメーターのための原子核乾板製作とその性能評価	河野 歩実
34. 宇宙線テストによる ARICH 検出器のチェレンコフ角分解能評価	内山 和貴
35. 宇宙線ミュー粒子を用いた ARICH の検出信号数評価	小峯 順太

平成 28 年 2 月 15 日 (水)

原子過程.....

	9:00 ~ 10:00
36. 水素イオン照射の際にタングステン表面から反跳された励起水素原子の研究	山崎 幸弥
37. 反射型飛行時間質量分析装置の呼気分析への利用に向けた立ち上げ	森 千陽
38. 四フッ化炭素 (CF_4) 分子の電子エネルギー損失スペクトル	大森 祥太
39. 散乱電子-イオン同時計測で探る重水素化水素分子の二電子励起状態の崩壊過程	本間 謙太郎
40. ウランの蛍光 X 線分析における最適な一次 X 線フィルターの探索	石井 康太

物性物理.....

	10:05 ~ 12:05
41. 有機超伝導体 β -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ における超伝導ゆらぎと層間磁気抵抗効果	坂本 勇樹
42. 分子性ディラック電子系におけるベリー位相のスイッチング現象	坪井 瑛里紗
43. α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ が有するディラック電子の質量制御	五島 大樹
44. α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ の電荷秩序とゼロギャップ相の比熱	高須 康弘
45. κ -(BEDT-TTF) $_2$ Cu[N(CN) $_2$]Br のグラス転移と超伝導	志田 勇氣
46. 有機導体 θ -ET 塩のグラス状態と電荷秩序の成長	小川 光
47. λ -(BETS) $_2$ FeCl $_4$ の磁気秩序を伴った金属-絶縁体転移の制御	峯沢 文弥
48. κ -(BETS) $_2$ FeCl $_4$ の磁場下での熱的性質	三津谷 幸丸
49. κ -(BETS) $_2$ FeBr $_4$ 及び Ga 混晶系の反強磁性転移と電子輸送現象	倉西 崇文
50. κ -(BETS) $_2$ FexGa $_{1-x}$ Br $_4$ 混晶系の比熱測定	岡村 知晃

宇宙物理.....

	13:00 ~ 14:24	
51. 重力レンズ効果による超新星の多重像の発生	和泉 博文	
52. 重力レンズ効果を受けた超新星爆発を用いたハッブル定数の推定	江森 颯大	
53. 移流方程式の数値解法：物理及び数値的考察	井口 貴史	
54. 移流方程式の数値解析	牧野 貴也	
55. 衝撃波管問題に対する数値解析	山崎 健介	
56. Hawking radiation	樋山 拓朗	
57. 光子計数型 THz 干渉計の開発に向けた 0.8K 冷凍器の評価	下向 怜歩	

磁気物性.....

	14:35 ~ 16:23	
58. 高周波マグネトロンスパッタリング法を用いた $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.67, 0.81$) 薄膜の作製	中野 航海	
59. 高周波マグネトロンスパッタリング法を用いた $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.67, 0.81$) 薄膜の磁性	高田 悠生	
60. A サイト秩序型 RBaMn_2O_6 ($R = \text{希土類}$) の酸素欠損・Ti 置換による乱れが物性に与える効果	高田 寛己	
61. $(\text{Fe}_{1-y}\text{Zn}_y)_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ の磁氣的性質	遠坂 直紀	
62. ハイゼンベルグ型スピングラスアモルファス $\text{Gd}_x\text{Si}_{100-x}$ の H - T 面内の臨界曲線	中澤 和也	
63. ランダム一軸磁気異方性を付与したアモルファススピングラス $\text{Gd}_{27-x}\text{Dy}_x\text{Si}_{73}$ の H - T 面内の臨界曲線	小林 洋史	
64. エピタキシャル $\text{Fe}/\text{Ag}/\text{Cr}$ 三層膜における Ag/Cr 界面フラストレーションの成長温度依存性	加藤 健人	
65. スピネル化合物 $(\text{Co}_{0.8}\text{Zn}_{0.2})\text{Al}_2\text{O}_4$ のスピングラス転移に及ぼす B サイト Rh 置換の効果	田甫 陸人	
66. A サイトを非磁性元素置換したスピナイス化合物 $(\text{Dy}_{2-x}\text{La}_x)\text{Ti}_2\text{O}_7$ の磁気緩和	東 政輝	

物性理論

1. グラフェンにおける Berry 位相の数値的研究

花田 裕大

グラフェンにケクレ型ボンド秩序が存在する場合に、幾何学的位相の Berry 位相を数値的に研究する。ボンドの強弱によって Berry 位相がどのように現れるのかを調べた。また、格子欠損を与えた場合も考えた。その結果、Berry 位相はボンドの強い場所では π 、ボンドの弱い場所では 0 ということがわかった。格子を2つ欠損させた場合も同様の結果を得ることができた。

2. グラフェンのランダウ準位に対するランダムネスの効果

森 一将

グラフェンの電子状態について厳密対角化法を用いて計算し、磁場を印加することでどのようなランダウ準位構造が生じるのか調べた。さらに、ボンドランダムネスや staggered ポテンシャルを導入した場合にランダウ準位にどのような効果があるのかを調べたところ、ディラック点近傍でのランダウ準位の幅に他のランダウ準位の幅とは異なる性質が確認できた。staggered ポテンシャルを大きくしたところ、ディラック点近傍でのランダウ準位の幅にのみ大きな減衰が見られた。

3. Kernel Polynomial Method を用いたグラフェンの状態密度の数値計算

平坂 真央

グラフェンの強束縛型模型の状態密度を Kernel Polynomial Method (KPM)を用いて対角化では扱えないような大きな系で局所状態密度、平均状態密度、ポテンシャルが空間相関を持つ場合を精度良く計算した。結果、バンド中心($E=0$)で状態密度が 0 となる性質はポテンシャルが無相関な場合は弱いランダムネスがあっても保たれるが、相関がある場合は少しでもランダムネスがあると壊れてしまう事、また、サイト数が一定以上の場合には KPM が安定した結果を与えることが分かった。

4. ディラック電子を持つ格子模型の電子状態

清水 貴大

ディラック電子を持つ格子模型の1つである π -flux 模型のバンド構造、状態密度などをハミルトニアンの数値的対角化法を用いて解析した。これを六角格子のグラフェンのバンド構造と状態密度と比較した。特に π -flux 模型にボンド秩序を導入した時の波動関数の幾何学的性質である Berry 位相を半充填の場合に計算した。その結果 Berry 位相の値はホッピングの値が弱いボンドで 0、強いボンドで π の値をとる事がわかった。

5. トポロジカル絶縁体の電子状態の数値的研究

藤澤 周平

トポロジカル絶縁体とは、バルク(内部)はエネルギーギャップを持つ絶縁体であり、表面では金属的な状態が存在する物質である。本研究では Wilson-Dirac 模型を用いてトポロジカル絶縁体がどのような仕組みで機能しているのかを厳密対角化法を用いて数値的計算を行うことで明らかにし、Wilson-Dirac 模型にディラックコーンを傾けるような演算子を作用させたときにエッジ状態がどのように振舞うのかを数値的に解析した。

6. 1次元量子ポンピングの数値的研究

八木澤 優介

量子ポンピングとは、物理学者 D.J.Thouless により考案された電子を輸送するシステム。空間的に周期的なポテンシャルを時間的にも周期的に変化させることで、1周期あたり決まった数の電子を輸送できる。本研究では時間発展させた波動関数で粒子がどのように移動していくのかを粒子の位置の期待値を求めることにより数値計算した。粒子は1周期ごとに1サイトずつ輸送されていることが確認できた。

7. Thouless pumping の強束縛模型に基づく数値的研究

後藤 郁己

1983年にD.J.Thoulessによって理論提唱されたサウレスポンプ(Thouless pump)は空間的に周期的な結晶構造中の原子のポテンシャルを時間に対して周期的に変化させることによって電子を輸送するというシステムである。近年までは実験的に観測されていなかった。しかし、2016年に京都大学のグループは光格子を用いてFermi粒子におけるThouless pumpを初めて実験的に観測した。本研究では、京都大学のグループの実験を強束縛模型、Chebyshev伝搬関数を用いて数値的に再現をし、粒子のポンピングのトポロジカルな性質などについて確認することが出来た。

8. 反強磁性体中のスピン波輸送に関する理論的研究

三上 勝武

近年のスピンエレクトロニクス分野では、スピン波をデバイス中で活用することが求められている。本研究では、反強磁性体中のスピン波の透過について、数値計算を用いて解析を行った。特に磁性状態の相転移前後でスピン波の透過がどのように変化するかを求めた。具体的には、磁化の運動方程式であるLandau-Lifshitz-Gilbert方程式を4次Runge-Kutta法を用いて数値的に解析した。その結果、転移点付近でスピン波の輸送が大きくなることを確かめた。

9. ホップフィールドモデルを用いた想起と反学習の研究

安藤 裕樹

ホップフィールドモデルにおける想起と反学習の研究を行った。想起においては、記憶できるターン数での想起成功率の変化を計算した。結果として記憶できるパターン数はニューロンの数毎に変化することが分かった。反学習では、偽記憶に達した時に反学習を行い想起成功率の向上を目指した。反学習を行うと想起成功率は上がるが、大幅な向上には繋がらなかった。

10. ニューラルネットワークにおける想起と学習の研究

桑 阿羅士

ニューラルネットワークにおける想起と学習の研究を行った。想起についてはパターン数1における想起を行い、学習については2次元平面上での線形分離可能な課題を取りあげ、学習させた回数を変化させたときの正答率のパラメーター依存性を調べた。その結果、学習に必要な時間は入力信号と結合するパラメーターの初期値に依存すること、また、正答率は学習率の増加に伴って早く100%に近づくことなどがわかった。

表面物理

11. 電界研磨による対称的なW-Tipの製作

神崎 A 純

W-Tipは電界イオン顕微鏡(FIM)の針状金属試料として使用されており、先端の対称性と曲率半径はFIM観察の重要な要因である。Tipの非対称性は先端の電場を偏向させイオン放射角に影響を与え、曲率半径の拡大は電場の低下をまねき、FIM観察を困難にする。Tipは電解研磨によって製作され、KOH水溶液中で、Tipとその周辺を覆う円筒型ステンレス電極の間に電圧を印加し行う。本研究は製作器を改良し、対称的なTip製作を目標にした。改良点は円筒電極の中心にTipを配置した点である。改良の結果、対称的なTip製作率が1割以上増加した。

12. Goethite と Cs の吸着形態の観察

山崎 徹

これまで Goethite (010) 劈開面の Cs 蒸着形態について AFM を用いた観察が行われ、劈開面の結晶段差付近に Cs が結晶成長することが示唆された。オージェ電子分光分析法を用い Cs が蒸着しやすいエリアを把握し、AFM で観察を試みた。蒸着装置の改良を行い Cs 蒸着試料作製の効率化を図り、作製した試料の Cs 蒸着面のオージェ像 (Cs、O、Fe) を撮影した。蒸着面全体ではなく、一定のエリアに Cs 分布が偏っている結果を得た。Cs オージェ像と SEM 像を照査し段差に蒸着しやすいことが示唆された。ケミカルシフトにより Fe は外殻電子より電子結合していくことが示唆された。

13. ステンレス鋼の表面元素に対する重水素透過

中村 颯月

本研究室では、ステンレス鋼の結晶粒及び結晶構造と水素透過の関連性について研究を行ってきた。本研究では、ステンレス鋼の表面元素が水素透過に及ぼす影響を調べた。オージェ分光法によりステンレス鋼表面に存在する元素を同定し、C、O、S、Fe、Cr、Ni の表面濃度分布を測定した。重水素を試料背面に曝露し、表面に湧出する重水素濃度分布を走査電子照射により誘起された脱離水素イオンにより測定した。各元素と重水素の表面分布の比較により、重水素透過に及ぼす影響は表面元素よりも結晶構造が顕著である事が分かった。

量子エレクトロニクス

14. 紫外線による植物の生長阻害・形状変化

飯塚 直樹

小松菜に紫外線を照射して、照射していない小松菜に比べて、生長にどのような影響が出るかを研究した。分光器を用いたクロロフィルの測定、電気泳動を用いた小松菜の塩基対への影響の測定も行った。小松菜の全長、根の長さ、葉の全面積を尺度として測定したところ、それぞれで値が減少しており、生長の阻害が確認できた。クロロフィル比の測定では、紫外線を当てた小松菜はそれが低くなる事が確認できた。

15. 紫外線による植物の生長阻害・形態変化

菊地 祐佳

植物に物理的なストレスを与えると生長が促進・阻害されることがある。また、近年オゾン層の減少により、短波長の紫外線が地上に届く危険性が懸念される。レーザーを用い、小松菜の種子に照射エネルギー密度 $64\sim71\text{ mJ/cm}^2$ 前後の波長 355 nm の紫外線を照射したところ、根の長さ・全長・葉の面積の生長阻害が見られた。同様に、小松菜のクロロフィル比は紫外線を照射することで、照射していない小松菜のクロロフィル比の半分以下となった。

16. 大気の観測のための LIDAR 装置の開発

植田 基紀

本研究の LIDAR 装置では回転鏡、YAG レーザーにより対象物までの距離と散乱光の強度の測定が可能である。モーターを変更し、背景光を軽減するための回転鏡とメカニカルシャッターの同期を簡易にした。また背景光がより強い時間でも測定を可能にするために干渉フィルターを取り付け撮影した。対象物に向けたレーザーの観測により大気エアロゾル粒子の高度分布、一定時間ごとの撮影を行うことで大気エアロゾル粒子の分布の時間変化を調べた。また雲の消散係数を調べた。

17. LIDAR を用いた大気エアロゾルの観測

荻野 拓哉

本研究では回転鏡を用いた距離測定可能な LIDAR の改良を進め、大気の研究を行った。LIDAR は散乱光強度と対象物までの距離の関係を知らることができる。背景光を軽減するため、回転鏡と同期するメカニカルシャッターを、ステッピングモーターを用いて製作した。それに伴い、ステッピングモーターを駆動するための駆動回路も製作した。さらに、回転鏡にも同様のモーターを用いることで測定準備時間を短縮した。その装置で上空に照射したレーザー光の後方散乱光を撮影し、解析することでエアロゾル分布の時間変化の様子と雲の消散係数を調べた。

18. LIDAR を用いた散乱回数の区別による雲の消散係数の推定

辰澤 和哉

光が物質中を通過するとき、散乱や吸収のために、伝搬にともなって光強度は減衰する。その減衰の度合いは消散係数と呼ばれ、その物質の密度や粒子の大きさにより決定される。本研究で用いる LIDAR 装置では YAG レーザーと回転鏡により、対象物までの距離と散乱光強度を測定することができる。レーザー光を雲に照射し、後方散乱光を撮影、散乱光の相対強度を解析することで雲の消散係数の推定を行った。この結果、2016 年 11 月 21 日 16:16:09 の東邦大学上空の雲の消散係数は 0.02721 cm^{-1} 、水粒子の数密度は $1.62 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ と得た。

19. テーパー型ガラスキャピラリーにおける光の透過率

松原 充芳

本研究は、マイクロ光ビームの生成において、ガラスキャピラリーにおける光の伝播及び、透過特性の解明を目的としている。ガラス管から同時に作製された down と up の 2 個のテーパー型ガラスキャピラリーを用いて、光の透過率を調べた。出口内径 $9.8 \mu\text{m}$ から $106.8 \mu\text{m}$ のガラスキャピラリーを作製し、 633 nm のレーザー光の透過率を測定した。また、down と up のガラスキャピラリーの形状を測定、解析し、形状解析の結果を用いて透過率を計算した。さらに、down と up のガラスキャピラリーの形状や透過率の比較・考察を行った。

20. ガラスキャピラリーによる細胞照射用レーザーマイクロスポット生成法の開発

幸島 美輝子

ガラスキャピラリーと呼ばれる先端の穴径が数 μm のガラス製注射針にレーザー光を通し、単一培養細胞内の蛍光タンパク質ピンポイント励起法、特にスポット形状の評価方法を開発した。蛍光ビーズ ($2 \sim 70 \mu\text{m}$ 径) を配することでキャピラリー先端との距離の精度を確保したスポットの可視化、入射ビームに対するキャピラリーの設置精度の改善 ($\sim 0.2 \text{ mrad}$)、測定データと理論モデルを比較するソフトウェア開発を行い、標的単一細胞上でのスポット径、レーザーパワー密度、隣接細胞への悪影響となるビーム拡がり構造を調べた。

21. Ba の安定同位体を用いた高励起状態における $6s5d^3D_2 - 5d6p^3F_3$ 遷移の分極率の測定

野尻 裕紀

約 57.14 kV/cm の高電場の印加を可能にし、高分解能レーザー分光法を用いて Ba 原子の高励起状態における $6s5d^3D_2 - 5d6p^3F_3$ (728.030 nm) 遷移のシュタルク効果を測定した。測定したシュタルクスペクトルから同位体ごとの分極率を求めることにより精度の高い同遷移の分極率を決定した。同位体 ^{135}Ba , ^{136}Ba , ^{137}Ba , ^{138}Ba の上準位 3F_3 のテンソル分極率はそれぞれ $-86.3(14)$, $-94.5(13)$, $-89.0(12)$, $-92.2(11) \text{ kHz/(kV/cm)}^2$ 、スカラー分極は、それぞれ $-148.1(31)$, $-151.5(30)$, $-148.3(29)$, $-149.4(29) \text{ kHz/(kV/cm)}^2$ となった。

22. Ba 原子の $6s5d^3D_2 - 5d6p^3F_3$ 遷移におけるシュタルク効果の研究

伊藤 純

本実験では Ba 原子の分極率を決めるべく、 ^{135}Ba , ^{136}Ba , ^{137}Ba , ^{138}Ba を用いて、 $6s5d^3D_2 - 5d6p^3F_3$ (728.030 nm) 遷移におけるシュタルク効果の研究を行った。高分解能レーザー分光装置を用いて、同遷移におけるシ

シュタルクスペクトルを測定した。また、測定において昨年より電極板間の距離を小さくして、より高電場を作ること成功した。シュタルクスペクトルの観測結果を用い、スカラー分極率を $-150.2(42)$ kHz/(kV/cm)²、上準位 3F_3 のテンソル分極率を、 $-93.4(17)$ kHz/(kV/cm)²と決定した。

23. Ba 原子の $6s5d\ ^3D_2 - 5d6p\ ^3F_3$ (728.030 nm) 遷移のシュタルク効果

森 信之

本実験では、波長可変半導体レーザーを用いて Ba 原子の $6s5d\ ^3D_2 - 5d6p\ ^3F_3$ (728.030 nm) 遷移のシュタルク効果の測定を行った。約 57.1 kV/cm という高電場まで印加することで、詳細なシュタルクスペクトルを観測することができ、正確なピークの同定を行うことができた。本実験では $^{136}\text{Ba} \cdot ^{138}\text{Ba} \cdot ^{135}\text{Ba} \cdot ^{137}\text{Ba}$ の4つの同位体で解析を行った。その分岐から上準位 3F_3 のテンソル分極率 $\alpha_t(^3F_3)$ を、またシフトからスカラー分極率 $\alpha_s(^3F_3) - \alpha_s(^3D_2)$ をそれぞれの同位体毎に決定し、その結果から上準位 3F_3 のテンソル分極率 $\alpha_t(^3F_3)$ を $-93.4(17)$ kHz/(kV/cm)²、スカラー分極率 $\alpha_s(^3F_3) - \alpha_s(^3D_2)$ を $-150.2(42)$ kHz/(kV/cm)² と決定した。

24. 不安定核 ^{132}Sn の陽子弾性散乱

原田 知也

我々のグループでは、逆運動学弾性散乱測定装置を開発し、中性子過剰核の持つ中性子スキン厚を測定することにより、核物質の状態方程式 (EOS) の対称エネルギーの傾きを決定することを目標としている。本研究では、理化学研究所仁科センターRI ビームファクトリーにおいて ^{132}Sn の逆運動学陽子弾性散乱測定を行った。200MeV/A の ^{132}Sn を 1mm 厚の固体水素標的に照射し、標的からの反跳陽子を Recoil Proton Spectrometer (RPS) と呼ばれる検出器群を用いて測定した。測定データの解析を行い、ビームと反跳陽子の情報から励起エネルギー分布を求め、弾性散乱現象を選別した。

素粒子物理

25. シンチレーションカウンターの信号読出し回路の試験

坂田 尚弥

本研究で使用する Cosmo-Z は1つの基板に 8ch の ADC を搭載した FPGA ボードである。本研究では、Cosmo-Z を素粒子の測定に用いるために、FPGA 上にミューオンの寿命を測定するプログラムを開発して実装する。ミューオンの寿命は $2.2\ \mu\text{s}$ と知られている。FPGA ボードは最大 125MHz のクロックで動作させることができ、ミューオンの寿命を測定することが可能である。第一段階の試験として、しきい値回路を実装し、計数回路とチャンネル間のタイミング情報の読出しを行った。

26. FPGA ボードを用いたミュー粒子の寿命測定

岡 直也

Cosmo-Z は最新の FPGA, ADC, CPU を搭載した計測ボードである。この FPGA は 100MHz のクロック信号で動作している。このクロック信号は周期が 10ns であるため、これを用いることで平均寿命が $2.2\ \mu\text{s}$ として知られるミュー粒子の寿命を測定できると考えた。本研究では寿命測定の論理プログラムを FPGA に組み込むことでミュー粒子の寿命測定が可能になった。またミュー粒子の信号をデータ化し、詳しい解析も行う。

27. KEK-PS E373 実験における全面探索法を用いたハイパー核探索

新川 駿輔

KEK-PS E373 実験は $\Lambda\Lambda$ ハイパー核の崩壊を観測して $\Lambda\Lambda$ 相互作用を研究することを目的としたハイブリッドエマルジョン実験である。K⁻中間子ビームをダイヤモンド標的に照射し、放出された K⁺中間子を識別することで Ξ 粒子生成反応を選び出し、その Ξ 粒子を原子核乾板中で静止吸収させ、 $\Lambda\Lambda$ ハイパー核崩壊の観測を目指す。すでに、いくつかの $\Lambda\Lambda$ ハイパー核崩壊の観測に成功しているが、さらに、観測例を増やすため、全面探索法と呼ばれる CCD カメラで撮像した画像を反応点抽出プログラムによって分類し、自動的にハイパー核を検出する方法で解析を続けている。本研究では 293,036 枚の画像を確認し、ハイパー核候補 74 個を選び出してその原子核乾板中の事象を、実際に顕微鏡光学系を通して確認した。

28. KEK-PS E373 実験における多重電磁散乱を用いた吸収事象の識別

田村 龍太郎

KEK-PS E373 実験はダブル Λ ハイパー核を検出し、 $\Lambda\Lambda$ 相互作用等のストレンジネスが-2 の原子核の理解を深めることを目的としている。本研究では 45mm×45mm×0.5mm の領域の乳剤層を全面探索法でスキャンし、画像処理プログラムによりバーテックスを構成する事象候補を 237,501 枚取得する事ができた。PC 画面上の目視でバーテックス事象の選別をし、さらに顕微鏡下で吸収事象候補を確認した。観測した吸収事象の内、4 例に対して多重電磁散乱を測定して、 π 中間子吸収事象を同定できた。

29. OPERA 実験の Background 研究 -4GeV/c π 中間子・鉛反応での核破碎粒子探索-

大平 潤一

OPERA 実験での τ 粒子崩壊の特徴と ν_μ 由来の hadron 反応の飛跡は幾何学的に類似しているため、区別しなければならない。そこで background である hadron 衝突で放出される核破碎粒子に着目し、 τ 粒子崩壊の識別を行う。我々の研究室では π 中間子の運動量 2, 3, 4, 5, 6 GeV/c において、モンテカルロ・シミュレーション(MC)と実験値との比較を行っているが、私は特に運動量 4GeV/c の場合について核破碎粒子の測定を担当した。その結果、4GeV/c π 粒子・鉛反応において、核破碎粒子の付随率は MC が 54.9±0.4% に対して実験値が 61.3(+5.7,-6.5)% であり、1 σ の範囲で一致していることがわかった。

30. OPERA 実験のためのハドロン反応から放出された核破碎粒子のバックグラウンド解析

畠山 萌花

ニュートリノ振動の検証を行う OPERA 実験は、荷電カレント反応から放出されるタウレプトンの崩壊を検出してタウニュートリノ出現の証拠とする。このとき、反応点から放出されたハドロンが二次反応を起こすとタウ崩壊と同様の折れ曲がり飛跡となるため、バックグラウンドとなりうる。これらを区別する基準の一つに核破碎粒子がある。本研究では核破碎粒子探索のときに無関係の飛跡が紛れ込む割合を実際に乾板中でスキャンを行い、測定した。その結果、無関係の飛跡が入ってくる期待値は 1 反応あたり最大で 0.054 本であり、核破碎粒子探索への影響はほぼ無いことがわかった。

31. J-PARC T60 実験における反ニュートリノ反応の探索

奥山 康介

T60 実験は J-PARC においてニュートリノ振動実験で重要となる Sub GeV~Multi GeV エネルギー領域のニュートリノ反応を原子核乾板検出器で検出する。鉄板と原子核乾板からなる検出器に反ニュートリノビーム照射を 2016 年 1 月から 4 月にかけて行った。原子核乾板を現像した後、自動飛跡読み取り装置を用いて荷電粒子飛跡のデータを取得した。本研究ではこの膨大な数の飛跡群から、検出器の中で 3 本の荷電粒

子飛跡が交わる事象の候補を選別することにより、反ニュートリノ反応の探索を行った。その結果、5個の反応候補を検出することに成功し、その詳細な解析を行った。

32. シミュレーションを用いた反ニュートリノ反応の精密解析方法の検証

丸山 めぐ

ステライルニュートリノの検証実験を目標とした試験研究 T60 では、原子核乾板検出器を用いて J-PARC で生成されたニュートリノビームと原子核の反応を詳細に測定する。現在 60kg 鉄標的を用いた昨年の照射実験の解析が進行中で、反ニュートリノ・鉄反応候補を探索している。本研究ではモンテカルロシミュレーション GENIE を用いて反ニュートリノ・鉄反応を生成し、実験データから荷電カレント反応と中性カレント反応を識別し、さらにそれぞれの反応過程を分類する方法を検討した。その結果をもとに T60 実験で検出された反ニュートリノ・鉄反応候補の精密解析を行った。

33. エマルシヨンスペクトロメーターのための原子核乾板製作とその性能評価

河野 歩実

エマルシヨンスペクトロメーターは原子核乾板と低密度の支持体を交互に配置する構造で、磁場中での荷電粒子飛跡のサジッタを測定することにより、運動量と電荷符号を測定できるコンパクトな検出器である。そのため、複数の将来計画の実験で使用される予定である。平面性を保つのに有利なアクリルベースに新型乳剤を塗布し、支持体として用いる発泡体の候補との接触テストと位置測定の基準となるフォトマスクの焼き付けテストを実施した。その結果、2週間程度の接触では特に問題はなく、また焼き付けに最適な露光量を得ることができた。

34. 宇宙線テストによる ARICH 検出器のチェレンコフ角分解能評価

内山 和貴

Belle II 実験において、ARICH 検出器は輻射体 Aerogel から円錐状に放出されるチェレンコフ光を光検出器の HAPD で検出し、リングイメージを捉えることで $0.5 \sim 4 \text{ GeV}/c$ の K/π 識別を行う。Belle II 検出器への設置前に ARICH 検出器本来の粒子識別能力並びに、検出器のデータ収集システムが正常に機能するかを確認する必要がある。宇宙線を用いたテストを行っている。本研究では、宇宙線が Aerogel を通過した際に放出されるチェレンコフ光を HAPD 6 台で検出し、ヒットしたチャンネルから楕円によるフィッティングを行い、チェレンコフ角とその分解能を評価した。

35. 宇宙線ミュオン粒子を用いた ARICH の検出信号数評価

小峯 順太

Aerogel Ring Image Cherenkov counter (ARICH) は Belle II 実験において、Cherenkov 光の検出を介して粒子識別を行う検出器である。ARICH は垂直電子ビームによる試作段階の性能評価で荷電粒子 1 個あたりの検出光子数 10.5 ± 0.1 個と確認された。ARICH グループはインストール直前の ARICH について 420 台の光検出器の動作確認と性能評価、データ収集システムの開発を目的に宇宙線ミュオン粒子によるデータを収集している。本研究では 6 台の検出器で収集したデータから検出光子数を評価し 11.9 ± 0.2 個を得た。インストール直前の検出器の量子効率を用いて検出光子数の原理計算も行い、 12 ± 3 個を得た。

原子過程科学

36. 水素イオン照射の際にタングステン表面から反跳された励起水素原子の研究

山崎 幸弥

核融合炉では電磁場でプラズマを閉じ込め反応を起こさせるが、その磁場から逃れたプラズマが炉壁に衝突することがある。イオンが炉壁に衝突すると、表面原子との電荷移行反応によって中性粒子となり反跳され、プラズマ冷却の原因となる。そこで本研究では、プラズマと壁相互作用の解明を目的として、水素イオン(H^+)をタングステンの板に 35 keV で照射し、得られた反跳励起 H 原子の $H\alpha$ 線の 2 次元発光強度分布から反跳速度と方向を見積もり、TRIM 解析と比較した。両者の差異は、測定におけるカスケードの影響であると考えられる。

37. 反射型飛行時間質量分析装置の呼気分析への利用に向けた立ち上げ

森 千陽

本研究室では未知気体試料を分析するための質量分析装置の研究開発を続けている。昨年度までは、イオン付着法と飛行時間分析法を組み合わせた装置を用い、その改良を中心に研究を進めていた。本研究では新たに高い分解能をもつ反射型飛行時間質量分析計を導入し、大気圧化学イオン化法と組み合わせ、液体試料も分析可能な装置の立ち上げを行った。現在この装置を本格的に稼働させるには至っていないが、窒素と一酸化炭素を分離できるほどの高分解能装置としての力を秘めているため、イオン検出に至らない原因を解決する努力を続けている。

38. 四フッ化炭素 (CF_4) 分子の電子エネルギー損失スペクトル

大森 祥太

これまで本研究室では、さまざまな原子や分子の微分断面積を混合ガス法を用いて行ってきた。昨年度より、半導体製造過程のプロセスガスとして用いられる四フッ化炭素(CF_4)の微分断面積測定に取り掛かったが、その第一段階である電子エネルギー損失スペクトルを高分解能で得ることができなかった。 CF_4 はフッ素を含むため、検出器や電子レンズなどに悪影響を与える。そこで本研究では、分析器を洗浄し、実験中も分析器を加熱することで汚れを防ぎ、入射電子エネルギー 200 eV、散乱角 3.7 deg の条件でスペクトルを得ることに成功した。

39. 散乱電子 - イオン同時計測で探る重水素化水素分子の二電子励起状態の崩壊過程

本間 謙太郎

分子の軌道内電子が、二つ同時に励起した状態を二電子励起状態と呼ぶ。この状態は不安定であり、分子イオンを生成する自動イオン化過程、解離を伴う解離性自動イオン化過程、あるいは中性解離過程により崩壊する。本研究ではこれらの崩壊過程の解明を目的として、重水素化水素 (HD) を対象に散乱電子-イオン同時計測を行った。本研究室ではこれまでに、水素や重水素を標的とした実験を行っており、本実験の結果はそれらと比較された。その結果、 HD^+ の生成量を表すスペクトルから二電子励起状態に起因すると考えられる構造を確認した。

40. ウランの蛍光 X 線分析における最適な一次 X 線フィルターの探索

石井 康太

蛍光 X 線分析法では、一般に入射 X 線の経路上に金属箔（一次 X 線フィルター）を置く。これは、入射 X 線のスペクトルを変化させて、蛍光 X 線スペクトル中に現れる散乱線を削減するためである。しかし、

U (ウラン) を含有する試料の蛍光 X 線分析において、装置付属のフィルターでは U の励起光も同時に低減させてしまうので、U に対する十分な蛍光 X 線信号強度が得られない。そこで本研究では、U の検出に最適なフィルターの材質と厚さを探索した。その結果、厚さ 80 μm の Ni (ニッケル) または Cu (銅) が有効であることがわかった。

物性物理

41. 有機超伝導体 β -(BEDT-TTF) $_2\text{I}_3$ における超伝導ゆらぎと層間磁気抵抗効果

坂本 勇樹

強相間系超伝導体では、超伝導転移よりも高温から短距離の超伝導状態が生じる超伝導ゆらぎ現象が起きるが、この理解が超伝導機構解明の手掛かりの1つとなるといわれている。これまで、NMR等から超伝導ゆらぎは準粒子の状態密度を減少させることが明らかにされてきた。一方、超伝導ゆらぎによる電気伝導性の小さな変化を検出した報告例は多数あるが、どの物理量の主な変化が状態密度の減少に関与しているか等の具体的な報告例はない。本研究では、有機超伝導体 β -(BEDT-TTF) $_2\text{I}_3$ の層間磁気抵抗効果から超伝導ゆらぎを検出した。結果、この物質の超伝導ゆらぎは層間方向の有効ホッピングエネルギーを減少させることを示唆する結果を得た。

42. 分子性ディラック電子系におけるベリー位相のスイッチング現象

坪井 瑛里紗

高圧下にある α -(BEDT-TTF) $_2\text{I}_3$ で質量ゼロのディラック電子系が実現した。ディラック点近傍のハミルトニアンはスピンと同様のパウリ行列を用いて記述できるが、そのことが電子の周回軌道に π ベリー位相をもたらす。 π ベリー位相がディラック電子系を特徴付ける最も重要な物理量であるが、これは低温で量子磁気抵抗振動に検出できる。本研究では、ベリー位相を制御することを目的にこの系の量子磁気抵抗振動の磁場方位依存性を調べた。結果、ある磁場方位において、ゼーマン分裂したそれぞれのランダウ準位が交差するが、その交差付近でベリー位相が π から0へ突然変化することがわかった。

43. α -(BEDT-TTF) $_2\text{I}_3$ が有するディラック電子の質量制御

五島 大樹

高圧下にある α -(BEDT-TTF) $_2\text{I}_3$ は電荷秩序絶縁相に隣接して質量ゼロのディラック電子系である。このように強相関電子系に隣接したディラック電子系はこの物質が初めてであり、この物質を舞台に強相関ディラック電子の物理展開が期待できる。本研究では、正孔注入した薄片試料で相境界近傍の電荷秩序絶縁相で量子磁気抵抗振動と量子ホール効果を調べた。結果、この系は圧力で「質量をもつディラック電子系」と「質量が無いディラック電子系」を行き来することを見出した。さらに、電荷秩序絶縁相では質量を持つディラック電子と通常の電子とが共存していることが判明した。

44. α -(BEDT-TTF) $_2\text{I}_3$ の電荷秩序とゼロギャップ相の比熱

高須 康弘

有機導体 α -(BEDT-TTF) $_2\text{I}_3$ は135Kで電荷秩序を伴う金属-絶縁体転移を起こすが、圧力の印加により転移温度が低温へ移動し、15 kbar以上ではDirac電子系を形成する。しかし電荷秩序転移における電荷の偏りおよびDirac電子系の電子比熱の定量的評価は圧力下であるため行われていない。本研究では、加圧に伴って通常の電子系からDirac電子系へどのように移行していくかを明らかにするために、AC法および参照試料を用いて、比熱の絶対値を定量的に評価した。その結果、転移温度近傍では大きな電子比熱の消滅と小さな電荷の偏りの変化を観測した。

45. κ -(BEDT-TTF) $_2$ Cu[N(CN) $_2$]Br のガラス転移と超伝導

志田 勇気

有機伝導体 κ -(BEDT-TTF) $_2$ Cu[N(CN) $_2$]Br は約 80K でガラス転移を起こすが、11K と比較的高い超伝導転移温度を示す。BEDT-TTF 分子の重水素置換量によって超伝導相から反強磁性モット絶縁体相へ転移させることが可能である。本研究では重水素置換量およびガラス転移が超伝導転相へ与える効果を調べるため、温度掃引時での比熱測定が可能な DTA 法を用いて比熱測定を行った。その結果、絶縁体相領域と考えられた重水素置換量の多い試料でもガラス化を抑えることで超伝導転移によるとみられるピークが出現し、超伝導体相にある試料でも超伝導転移温度の上昇が明らかになった。

46. 有機導体 θ -ET 塩のガラス状態と電荷秩序の成長

小川 光

有機伝導体 θ -(BEDT-TTF) $_2$ TlZn(SCN) $_4$ は低温域で伝導層内に対角型の電荷秩序が形成されるが、水平型の電荷秩序とエネルギーが拮抗するため、冷却の速度により電荷のガラス状態が実現すると考えられてきたが、この定量的な議論は未だ行われてこなかった。本研究ではどの温度領域でガラスの実現および電荷秩序の形成が進むのか明らかにするため、温度掃引速度と転移を促進するため保持温度、保持時間を変えながら比熱を測定した。その結果急冷の速度を上げるとガラス化する温度が上昇し、転移温度領域近傍で長時間保持すると電荷の秩序が急激に進みことが分かった。

47. λ -(BETS) $_2$ FeCl $_4$ の磁気秩序を伴った金属-絶縁体転移の制御

峯沢 文弥

有機導体の λ -(BETS) $_2$ FeCl $_4$ は 8.3K で磁気秩序を伴う金属-絶縁体転移が観測されている。しかし、絶縁体化する機構が未だ解明されていない。この磁性がどのように絶縁体化に影響を及ぼすのか明らかにすることを目的とし、試料の固定法および温度掃引速度を変えることにより、冷却時の熱収縮（疑似的な圧力）をコントロールしながら転移温度周辺の比熱測定を詳細に行った。その結果、熱収縮を抑制すると転移に伴う比熱のピークは広がり、転移温度が低下した。局在スピンを有する絶縁層と伝導層の収縮がこの転移に大きな影響を与えることが分かった。

48. κ -(BETS) $_2$ FeCl $_4$ の磁場下での熱的性質

三津谷 幸丸

磁性有機超伝導体 κ -(BETS) $_2$ FeX $_4$ (X = Br, Cl) は低温、低磁場下において 3d スピンによる反強磁性と π 電子による超伝導が共存し、外部磁場の増大に伴い両相とも消失する。X = Br の場合では、強磁場下で π -d 相互作用に起因した磁場誘起超伝導を示す。X = Cl では π -d 相互作用が X = Br の場合よりも弱く、より低温まで常磁性である。本研究では、この π -d 相互作用のメカニズムを調べるために、より低温まで常磁性状態である κ -(BETS) $_2$ FeCl $_4$ を用いて、磁場下での比熱および磁気熱量効果の測定を行った。その結果、 π -d 相互作用により発現する内部磁場を定量的に見積もることができた。

49. κ -(BETS) $_2$ FeBr $_4$ 及び Ga 混晶系の反強磁性転移と電子輸送現象

倉西 崇文

κ -(BETS) $_2$ FeBr $_4$ は反強磁性状態と超伝導状態が共存し、BETS が持つ π 電子と磁性アニオンの FeBr $_4$ が持つ d 電子間の相互作用によって磁場有機超伝導体などの特異な物性を発現させる。本研究では、Fe 濃度を希薄化した Ga 混晶系において、反強磁性転移が π 伝導電子系にあたえる影響を調べるため、反強磁性転移前後の電気抵抗の温度依存性及び磁気抵抗を測定した。測定の結果、反強磁性転移温度近傍で磁気秩序形成に伴う電気抵抗の減少とフェルミ面の変化を反映した磁気抵抗の角度依存性を観測し、Fe 濃度の希薄化に対して大きく変わらないことがわかった。

50. κ -(BETS) $_2$ Fe $_x$ Ga $_{1-x}$ Br $_4$ 混晶系の比熱測定

岡村 知晃

κ -(BETS) $_2$ FeBr $_4$ は反強磁性状態と超伝導状態が共存する磁性有機超伝導体であり、伝導電子 π と Fe の局在磁性 3d スピンの相互作用を経て磁場誘起超伝導など特異な性質を示す。本研究は 3d スピンが及ぼす磁気秩序への影響を調べるため、Fe を非磁性 Ga に置換し 3d スピン濃度を制御した κ -(BETS) $_2$ Fe $_x$ Ga $_{1-x}$ Br $_4$ 混晶系試料に於いて比熱測定を行い、エントロピーや臨界現象から反強磁性の性格について考察・検討した。その結果、d スピンの割合が 2 次元的磁気秩序と密接に関わっている点や、反強磁性転移を担う d 電子系以外に π 伝導電子が反強磁性秩序化に深くかかわっていることが明らかとなった。

宇宙物理

51. 重力レンズ効果による超新星の多重像の発生

和泉 博文

銀河団 MACSJ1149.6+2223 において重力レンズ効果による超新星 Refsdal の多重像が初めて観測された。重力レンズ効果によるそれぞれの像の出現には時間差が存在する。その時間差により未来に現れる像の出現位置を予想して観測することは、超新星爆発の理解に役立つ可能性がある。そこで本研究では同銀河団をレンズ天体とし、超新星と見立てた点光源を赤方偏移を固定した上でランダムに配置し、現れる多重像の位置や時間遅延等の性質について調べた。多重像は配置した質量モデルの近傍の臨界曲線に沿った領域にのみ確認された。

52. 重力レンズ効果を受けた超新星爆発を用いたハッブル定数の推定

江森 颯大

一般相対論で説明される重力レンズ効果により複数の像が観測された場合、それぞれの像からの光が我々に到達するまでの時間は異なり、これを時間遅延という。本研究では、銀河団 MACS J1149.6+2223 内の銀河による強い重力レンズ効果を受けてその像が複数に分離された超新星「Refsdal」に着目した。時間遅延はハッブル定数およびレンズ天体の質量分布に依存するため、この系について実際に議論されている質量分布と観測されている時間遅延を用いてハッブル定数の推定を行った。

53. 移流方程式の数値解法：物理及び数値的考察

井口 貴史

本研究では流体方程式の数値解について物理的・数値的解析を行い、その振る舞いを調べるところを目的とする。時間前進差分、空間中心差分を用いたスキームでは数値不安定により解を正しく得ることが出来なかった。物理的考察の結果これは差分方程式に負の拡散項と分散項が含まれる為であることが分かった。数値解析的にも von Neumann による安定性解析で不安定になることが確かめられた。同様の解析を Lax スキームおよび風上スキームの場合についても行い数値解の振る舞いを調べた結果、風上スキームが最も性能のよい数値解法であることが分かった。

54. 移流方程式の数値解析

牧野 貴也

宇宙の天体現象は流体力学で記述できる。流体方程式は非線形な偏微分方程式であり、解析解を得ることは一般に困難であるため、数値解析が必要である。代表的な有限差分法は、テイラー展開に基づくため、不連続な衝撃波が発生する場合に適用できるか非自明である。本研究ではまず、1 次元移流方程式を数値的に解き、差分スキームへの依存性をみた。さらに Godunov の定理を満足するように MUSCL 法で高次精度化を行った。次に非線形の移流方程式である、バーガース方程式に対して、保存形式といくつかの差分スキームの精度比較を行った。

55. 衝撃波管問題に対する数値解析

山崎 健介

超新星爆発における衝撃波や、銀河風などの高速の流れに起因する膨張波などの天体現象は、流体方程式で記述できる。しかし、流体方程式は連立非線形偏微分方程式であるため、多くの場合解析的に解くことは難しい。そこで、数値解析が必要となる。本論文では、衝撃波管問題に対して、Roe法をMUSCL法を用いて高次精度化したコードを開発し数値解析を行った。この問題は解析解が存在するため、開発したコードのチェックを行える点で重要である。得られた結果を比較し、誤差を評価した。

56. Hawking radiation

樋山 拓朗

場の量子論に基づいてHawking放射を調べた。Hawking放射を調べる上で、同じ概念から導かれるUnruh効果も調べた。Hawking放射とは、ブラックホールの事象の地平線付近での粒子生成により、ブラックホールから熱的放射を観測する現象である。Hawking放射における粒子生成は、事象の地平線付近の過去における基底での真空と観測者がいる未来における基底での真空が異なることにより起こる。ここで、2つの基底はBogliubov変換で結びつけられる。粒子のエネルギースペクトルを計算するとプランク分布になることが分かった。このように熱的放射になる理由も考察した。

57. 光子計数型 THz 干渉計の開発に向けた 0.8K 冷凍器の評価

下向 怜歩

天体観測において光子計数型 THz 干渉計の SIS 検出器を運用するためには、0.8[K]以下の極低温を維持しなくてはならない。本実験では超小型の 0.8K 冷凍器の開発を目的として 2 つの吸着冷凍器の評価を行った。1 つ目は 2015 年に試作した冷凍器であり、小型で交互運用できるものであるかを調べた。2 つ目は 2016 年に試作した冷凍器であり、1 つ目の冷凍器では変えられなかったパラメータを変えて評価することができる。この冷凍器ではあるパラメータで実験を行い、保持時間と到達温度を再現することができた。

磁気物性

58. 高周波マグネトロンスパッタリング法を用いた $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.67, 0.81$) 薄膜の作製

中野 航海

$\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ (NSMO) の高ドープ域 ($x > 0.5$) では、 $x^2 - y^2$ 軌道秩序・A 型反強磁性相と $3z^2 - r^2$ 軌道秩序・C 型反強磁性相が競合している。NSMO の物性はエピタキシャル歪みを利用して制御することが可能である。これまでに我々は NSMO ($x = 0.37 - 0.61$) の薄膜試料を作製し、エピタキシャル歪みが磁性に与える影響を調べてきた。今回、我々は新たに $x > 0.61$ の NSMO ($x = 0.67, 0.81$) の薄膜試料を RF マグネトロンスパッタリング装置で作製した。当研究室の先行研究で作製した NSMO 薄膜においては Mn が 16% 程度過剰に含まれていたが、今回の研究では Mn の組成が理想に近い薄膜試料を作製することができた。

59. 高周波マグネトロンスパッタリング法を用いた $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.67, 0.81$) 薄膜の磁性

高田 悠生

多彩な物性を示すペロブスカイト型 Mn 酸化物 $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ (NSMO) は $x > 0.5$ の高ドープ域で $3z^2 - r^2$ 軌道秩序 C 型反強磁性相と $x^2 - y^2$ 軌道秩序 A 型反強磁性相が出現する。当研究室の先行研究では NSMO $0.37 \leq x \leq 0.61$ の薄膜試料を作製し、磁性にエピタキシャル歪みがもたらす効果を調べた。本研究では新たに $x > 0.61$ の組成を持つ NSMO 薄膜試料を作製し、その磁性にエピタキシャル歪みが与える効果を調べた。NSMO 薄膜 ($x = 0.67, 0.81$) 試料は高周波マグネトロンスパッタリング法で作製した。その結果

より高ドーピング域では、強磁性相の出現は $3z^2 - r^2$ 軌道と $x^2 - y^2$ 軌道の混成の度合いが強い領域に狭められたことが分かった。

60. A サイト秩序型 RBaMn_2O_6 (R = 希土類) の酸素欠損・Ti 置換による乱れが物性に与える効果

高田 寛己

RBaMn_2O_6 (R = 希土類) は室温付近で多彩な電子相が形成する多重臨界点を持つため、室温で超巨大磁気抵抗効果(磁場印加により抵抗が数桁以上減少する効果)を示す物質として期待されている。本研究では、酸素欠損・Mn サイトへの Ti 置換に伴う Mn の $3d$ 電子数の変化や構造の乱れが RBaMn_2O_6 の多重臨界点付近の物性に与える効果を調べた。その結果、酸素欠損は A 型反強磁性相、強磁性金属相を抑制することがわかった。一方、Ti 置換は A 型反強磁性相を著しく不安定化する。その結果、A 型反強磁性相から強磁性金属相への磁場誘起相転移が観測された。

61. $(\text{Fe}_{1-y}\text{Zn}_y)_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ の磁氣的性質

遠坂 直紀

$\text{Fe}_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ の磁性はハニカム格子を形成している Fe^{2+} が担っている。 Fe^{2+} を Zn^{2+} で置換した $(\text{Fe}_{1-y}\text{Zn}_y)_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ は様々な磁気転移を示すことが報告されているが、その詳細は分かっていない。本実験ではハニカム格子の周期性に着目し、 $y = n/6$ (n は整数) の試料を作製し、その磁気特性を調べた。その結果、 $y = 1/6, 2/6$ ではハニカム格子面内で Fe^{2+} はフェリ磁性的な秩序を示し、フェリ磁性面は反強磁性的に結合している。 $y = 3/6$ ではハニカム格子面内で Fe^{2+} は強磁性的な秩序を示し、強磁性面は反強磁性的に結合している。温度変化に伴い面間反強磁性から面間強磁性に転移する。

62. ハイゼンベルグ型スピングラスアモルファス $\text{Gd}_x\text{Si}_{100-x}$ の H-T 面内の臨界曲線

中澤 和也

アモルファス磁性体 $\text{Gd}_x\text{Si}_{100-x}$ は RKKY 型 Heisenberg スピングラス(SG)とされている。しかし SG の相転移を特徴づける H-T 面内での臨界曲線の振る舞いについてはよくわかっていない。そこで薄膜試料を RF マグネトロンスパッタリング装置を用いて作製し、磁化測定から $x=10\sim31$ に対して H-T 相図を作成した。この結果 $x \geq 17$ で低磁場領域で Ising 的な振る舞いが出現した。さらに Gd 濃度が増えると臨界磁場は高磁場側へシフトし、カノニカル SG の CuMn 等の H-T 相図と似た形となった。これは何らかの異方性の影響が現れたと考えられる。

63. ランダム一軸磁気異方性を付与したアモルファススピングラス $\text{Gd}_{27-x}\text{Dy}_x\text{Si}_{73}$ の H-T 面内の臨界曲線

小林 洋史

ランダム一軸磁気異方性がスピングラス相転移に与える影響はいまだ詳しく調べられていない。そこで本実験では、RF マグネトロンスパッタリング法でアモルファス(a-) $\text{Gd}_{27}\text{Si}_{73}$ 薄膜の Gd の一部を Dy に置換した a- $\text{Gd}_{27-x}\text{Dy}_x\text{Si}_{73}$ 薄膜を作製しランダム一軸磁気異方性を付与した。そして、磁化測定から H-T 相図を作製しその影響を調べた。その結果、 $x = 1$ では Ising 性が消える臨界磁場が下がった。 $x = 3$ では臨界曲線の間の距離が開き $H \rightarrow 0$ でも相転移が 2 回生じた。これらのようにランダム一方向磁気異方性とは異なる振る舞いが得られた。

64. エピタキシャル Fe/Ag/Cr 三層膜における Ag/Cr 界面フラストレーションの成長温度依存性

加藤 健人

当研究室の先行研究では成長温度(T_s) 100°C で作製した Fe/Ag/Cr(001)三層膜で磁気粘性(S)の大きさが Ag 膜厚に対して振動する様子が観測された。これは、Ag 中に量子井戸が形成され、Ag がスピン分極し、Ag/Cr 界面でのフラストレーションが起きたためと考えられる。本研究では、 T_s を 50°C に変えて Fe/Ag/Cr(001)三層膜を作製し、RHEED 像と残留磁化の時間変化を調べた。その結果、 T_s が 50°C の方が界面の乱れが少なく結晶性が良かった。また、 $T_s=100^\circ\text{C}$ に比べて S の振動の振幅が小さくなった。このことは界面の乱れが小さい時 Ag/Cr 界面のフラストレーションが小さいというモデルを支持する。

65. スピネル化合物($\text{Co}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}$) Al_2O_4 のスピングラス転移に及ぼす B サイト Rh 置換の効果

田甫 陸人

本研究では幾何学的フラストレーションを持つ CoAl_2O_4 の A サイト(Co^{2+})をイオン半径の異なる非磁性イオン Zn^{2+} を 0.2 で置換して A サイトに乱れを導入した上で、B サイト(Al^{3+})をイオン半径の異なる Rh^{3+} で置換し、B サイトにも乱れを導入することで SL 状態がどう SG 状態に変化するかを調べた。Rh も置換した場合は Zn のみを置換した時の SG 状態への転移温度 T_g より大きくなり、 T_g が Rh の置換量に伴い上昇した。しかし、Rh のみを置換したときの T_g と比べて低い温度となった。これは T_g を決めているのが乱れだけではなく歪みによる効果もあることを示唆する。

66. A サイトを非磁性元素置換したスピナイス化合物 ($\text{Dy}_{2-x}\text{La}_x$) Ti_2O_7 の磁気緩和

東 政輝

本研究ではスピナイス化合物 $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ の A サイトの Dy^{3+} をイオン半径が大きい非磁性元素の La^{3+} で置換してスピナイスの磁気緩和にどのような影響を与えるのか調べた。交流磁化率の周波数変化を緩和解析した結果、緩和時間 τ_c は置換量 x が増加すると短くなった。しかし、先行研究である Y^{3+} 置換と Ho^{3+} 置換の場合と同様、 $x = 0.00 \sim 0.2$ の範囲において緩和モデルは変化せずスピナイス状態は維持されていた。これはスピナイス状態がネットワークとして存在するからだと思われる。

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）

※ 状況により時間変更の場合があります。

平成 28 年 2 月 23 日（木）

修士課程（講演 20 分、質疑 5 分）

[量子エレクトロニクス]

9:00 ~ 10:15

1. 炭素線治療における照射野効果に関する研究
2. ペンタセン誘導体を用いた時間分解 ESR
3. Measurement of the Electric Polarizability of the Ba Highly Excited State $5d6p\ ^3F_3$

下山 薫
山田 紘太郎
李 程

[磁気物性]

10:20 ~ 11:10

4. Heisenberg スピングラス α -GdSi の臨界現象に対するランダム異方性の効果
5. $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$ (R = 希土類) の構造の乱れが物性に与える効果

加藤 光樹
谷川 統久

[宇宙物理]

11:15 ~ 11:40

6. 銀河団ガスの運動と共鳴散乱

田久保 耀子

[物性理論]

11:45 ~ 12:10

7. 二次元ディラック電子系の vortex に付随する電子状態の数値的研究

板垣 諒

[素粒子]

13:00 ~ 13:50

8. ハイパー核生成実験における多重電磁散乱測定を用いた粒子識別
9. タウ崩壊事象におけるハドロンバックグラウンドの高統計解析

稲生 恒明
水沢 萌

[原子過程]

13:55 ~ 15:10

10. 電子衝撃実験による重水素分子の解離過程における同位体効果
11. イオン付着飛行時間型質量分析装置の装置改良 ～線型から直交型へ～
12. アルファ線エネルギースペクトルの解析によるろ紙内プルトニウム分布の推定

長谷川 徹
茂木 善行
右田 豊紀恵

[物性物理]

15:15 ~ 16:55

13. 有機超伝導体 κ -(BETS) $_2\text{Fe}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Br}_4$ の磁気転移近傍の電子状態
14. κ -(BETS) $_2\text{FeX}_4$ ($X = \text{Br}, \text{Cl}$) の磁場下での熱的性質
15. 有機伝導体 α -(BEDT-TTF) $_2\text{I}_3$ の電荷秩序とゼロギャップ状態の熱的研究
16. 分子性ディラック電子系におけるクーロン相互作用

佐藤 俊
宇都宮 一広
大嶋 一樹
林 頌也

修士論文予稿

1.

炭素線治療における照射野効果に関する研究

下山 薫（量子エレクトロニクス）

ワブラ法を用いた炭素線治療では処方線量を決定するために、患者毎に設定される機器条件においてモニターユニット値（MU 値）をあらかじめ求める必要がある。HIMAC では、多層型電離箱を用いた測定により MU 値を決定していたが、2012 年より実験値を基にした推計計算法を導入し、現在では約 90%が推計計算法により行われている。この方法では、ビームエネルギー、SOBP 幅、照射野サイズ（10, 15, 20 cm ϕ ）毎に、複数のレンジシフター（RSF）厚、複数の MLC 形状に対する実測値を取得する必要があるため、多くの労力と時間が掛かってしまう。そのため本推計計算に必要な実測条件数を減らすことが課題として考えられる。本研究では、上記の課題に対して、線量推計法に必要な実験値を、汎用モンテカルロコード：PHITS を用いたシミュレーション計算で補完可能かどうかを検討した。

また、MLC 形状が MU 値に与える影響は照射野効果と呼ばれ、MU 値を患者毎に求めなければならない要因になっている。本研究では、その照射効果のさらなる理解のために、モンテカルロシミュレーションを用いて二次粒子毎の照射野効果への影響を調べた。さらには、組織等価ガス比例係数管（TEPC）を用いた測定により線質の照射野依存性を調べた。

実測とモンテカルロシミュレーションの比較検証の結果、モンテカルロシミュレーションは実験値をよく再現し、線量推計法のための実測を補完できることを明らかにした。また PHITS コードの Dump 機能を用いることで計算時間を大幅に短縮することを示した。

線質の照射野依存性については照射野が小さくなるにつれてリニアエネルギー（y）の小さい粒子の数が減少するため、結果として、線量平均 y が大きくなる傾向が観測された。線量平均 y の増加は相対的生物効果比（RBE）を増加させるため、吸収線量のみならず照射野による線質の依存性についても考慮する必要があることが示唆された。

2.

ペンタセン誘導体を用いた時間分解 ESR

山田 紘太郎（量子エレクトロニクス）

核磁気共鳴（Nuclear magnetic resonance: NMR）は非破壊、非侵入で分子の構造や運動状態などの性質を調べることができる分光法である。しかし、核スピンの磁気エネルギーが非常に小さいために他の分光法と比べて検出感度が低いことがしばしば問題とされてきた。この問題を解決する方法として、レーザとマイクロ波照射によって核スピンの偏極率を飛躍的に向上することができる「光励起三重項電子スピンを用いた動的核偏極（Triplet-DNP）が注目されている。

Triplet-DNP とは、試料に偏極源分子をドーブし、レーザ照射によって電子スピンを三重項状態に励起し、マイクロ波でその偏極状態を目的の核スピんに移行する手法である。Triplet-DNP によって得られる偏極状態は通常の DNP とは異なり温度・磁場に依存せず、室温や高磁場という環境下でも高い偏極率を実現することが可能である。従来、Triplet-DNP に用いる三重項電子スピンは主にペンタセン分子がドーブされた p-タフェニルやナフタレンが利用されてきたが、ペンタセンの化学的不安定性や多くの有機溶媒に不溶であるという特性が、化学や生物分野などにおける新たな応用の可能性を妨げていた。

本研究では Triplet-DNP の汎用性をさらに高めることを目的として、新たな偏極源である「ペンタセン誘導体」の時間分解電子スピン共鳴（Time-resolved ESR）に取り組んだ。ペンタセン誘導体とはペンタセンの欠点である化学的不安定性や低い可溶性を解消するために合成された、ペンタセン分子の一部が他の原子や官能基で置換された分子である。光励起三重項電子スピンの時間分解 ESR によって、ペンタセン誘導体の ZFS パラメータや励起三重項状態での寿命、スピン格子緩和時間を調べることで、Triplet-DNP の偏極源としての適性を見極めることができる。

今回、570~745 mT、120 K という条件下で 15 種類のペンタセン誘導体の時間分解 ESR を行った。電子スピンの光励起に使用したレーザの波長は 589 nm、繰り返し周波数は 30 Hz である。試料はペンタセン誘導体とトルエン溶液を濃度 2 mM となるように混ぜ合わせ、冷却室素ガスで急冷しガラス転移させた。実験の結果、9 種類のペンタセン誘導体の ESR 信号を観測することに成功し、励起三重項状態での寿命や特徴的なスペクトルの形状について検証を行った。また、100 K、120 K、140 K、160 K でジフェニルペンタセンとテトラクロロテトラペンタセンの時間分解 ESR を行い、光励起三重項電子スピンの温度依存性を調べた。

3.

Measurement of the Electric Polarizability of the Ba Highly Excited State $5d6p\ ^3F_3$

Cheng Li (李 程) (量子エレクトロニクス)

The electric scalar and tensor polarizabilities, related to the Stark effect, are fundamental properties in broad areas of physics and chemistry. Furthermore, theoretical calculations of electric polarizabilities have also achieved a remarkable development, by using various methods such as many body perturbation theory (MBPT), multi-configuration Hartree-Fock (MCHF), and relativistic coupled-cluster (RCC) methods. Agreements with experimental values have been obtained for one-electron atoms and it is a challenge to test such calculations for many-electron atoms particularly in highly excited states. Therefore, precise experimental data of electric polarizabilities for many-electron atoms are urgently required.

The experimental electric polarizabilities of many-electron, including two-electron, atoms at highly excited states are rarely reported. This is due to the difficulties of generating high electric field and performing high resolution spectroscopy. Ba, with an atomic number 56, is a typical two-electron atom. Compared with one-electron atoms, strong configuration mixing exists in its atomic levels. Up to now, for the configuration of $5d6p$, electric polarizabilities of 3D_J and 3P_J have been measured. But there are no data determined for 3F_J . Our lab started the research of Ba atom several years ago, and the data for 3F_2 have been obtained. This paper reports measurement of the electric polarizabilities of 3F_3 .

High-resolution laser spectroscopy of the Ba highly excited state $5d6p\ ^3F_3$ has been performed by using the transition from the metastable $6s5d\ ^3D_2$ state. A compact electrode apparatus has been developed to produce a stable and strong electric field. High-resolution measurements have been achieved by using a diode laser together with a highly collimated atomic beam with a collimation ratio of about 1:300. An electric discharge has been used to populate the metastable state $6s5d\ ^3D_2$. Stark spectra of the transition from $6s5d\ ^3D_2$ to $5d6p\ ^3F_3$ at 728.030 nm have been observed and analyzed not only for the even isotopes of ^{138}Ba and ^{136}Ba but for the odd isotopes of ^{137}Ba and ^{135}Ba .

The Stark shifts as well as the splittings of the excited state 3F_3 have been measured at various electric fields. The scalar polarizability of the 728.030 nm transition and the tensor polarizability of the 3F_3 level have been determined to be $\alpha_s(^3F_3) = -93.6(5) \text{ kHz}/(\text{kV}/\text{cm})^2$ and $\alpha_s(^3F_3) - \alpha_s(^3D_2) = -149.2(15) \text{ kHz}/(\text{kV}/\text{cm})^2$, respectively. The electric polarizabilities of the highly excited state $5d6p\ ^3F_3$ were determined for the first time, and they will provide a benchmark test for the theoretical calculation and contribute to the study of two-electron atoms.

4.

Heisenberg スピングラス a-GdSi の臨界現象に対するランダム異方性の効果

加藤 光樹（磁気物性）

スピングラス(SG)とは強磁性相互作用と反強磁性相互作用が混在、競合することで部分的にフラストレーションを持つランダム磁性体の事を指す。これはランダム系にもかかわらず理論が確立しつつある分野であり、最適化問題やニューラルネットワーク系への応用が期待されている。典型的な SG の薄例としては AuFe や CuMn のような希磁性合金系が存在し、これらはカノニカル SG と呼ばれている。これらの系では Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用に起因する「ランダム一方向異方性」が Heisenberg SG の相転移に大きな影響を与え、Ising 性をもたらすことは古くから知られている。我々はここで、これまでほとんど調べられてこなかった「一方向」とは異なる異方性、すなわち「ランダム一軸異方性」に注目した。ここで、純粋にランダム異方性が SG 相転移に与える効果を調べるためには異方性を持たない母体試料が必要である。我々はこの候補の 1 つとしてアモルファス(a-)GdSi を選び RF マグネトロンスパッタリング法で作製、直流磁化測定から SG の相転移を特徴づける H - T 相図を調べた。さらに、これに異方性を持つ Dy 置換をすることで「ランダム一軸異方性」の効果を観測する事を試みた。

その結果、 $a\text{-Gd}_x\text{Si}_{100-x}$ において、 $x = 13, 15$ では分子場理論で得られた Heisenberg SG の相図に近い H - T 相図が得られた。ランダム異方性の影響がほとんどない Heisenberg SG の H - T 相図を実験的に得られたのは我々の知る限り初めての事である。これは異方性の効果を純粋に調べるための標準試料となり得る。また、更に Gd 濃度を増やしていくと相図に系統的な変化が現れた。これは Gd の増加に伴い付与した何らかのランダム異方性の効果であると考えられる。次に、 $x = 13, 27$ に Dy を置換していった所、 H - T 面内の臨界曲線がランダム一方向異方性の影響とは大きく異なる変化を示した。これがランダム一軸異方性によるものか、あるいは薄膜作製時に付与したコヒーレントな異方性によるものかはさらなる検討が必要と思われる。

5.

 $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$ (R = 希土類)の構造の乱れが物性に与える効果

谷川 統久 (磁気物性)

ペロブスカイト Mn 酸化物は磁場の印加で電気抵抗が数桁以上減少する超巨大磁気抵抗(CMR)効果を示すことで知られている。本研究対象は R^{3+} (R = 希土類)と Ba^{2+} が層状に規則配列した構造を持つ秩序型 $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$ である。この物質は $R = \text{Nd}$ において、電荷・軌道秩序絶縁体(CO/OO)相、強磁性金属(FM)相、A 型反強磁性(AF(A))相が競合し、室温付近で多重臨界点を形成している。そのため、 $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$ は CMR 効果を利用した磁性材料の候補物質として期待される。一般的に多重臨界点付近は結晶構造の乱れや遷移金属の d 電子数の変化によって物性が大きく変化することが知られている。そこで本研究では、 $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$ に結晶構造へのわずかな乱れの導入や Mn の $3d$ 電子数制御をすることで、多重臨界点付近の物性に与える効果を調べることを目的にした。本研究における結晶構造のわずかな乱れとは、

(1) R サイトの乱れ(イオン半径の大きく異なる 2 種類の R^{3+} を R サイトに固溶)

(2) A サイトのわずかな乱れ(R^{3+} と Ba^{2+} の相互固溶)

であり、電子数制御とは

(3) Mn サイトへの Ti 置換(電子ドープ)をすることである。 $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$ の Mn サイト($\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$)に Ti^{4+} (Ti は +4 価で非常に安定)を置換すると、 Mn^{4+} が Ti^{4+} で置き換わるため、Mn イオンの総数に対する Mn^{3+} の割合が増加し、電子ドープした形となる。

本研究から得られた結果について述べる。

(1) $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$ に R サイトの乱れを導入すると、FM, AF(A)相領域を抑制し、CO/OO 相領域を広げることがわかった。一般的に、結晶構造の乱れは CO/OO 相間を弱めるが、 R サイトの乱れは CO/OO 相を安定化させるという興味深い結果となった。これは、 R サイトの乱れが Mn^{3+} の e_g 電子の伝導を妨げた結果として FM, AF(A)相が抑えられ、CO/OO 相が安定化されたためと考えられる。

(2) $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$ の A サイトにわずかな乱れを導入すると、 R サイトの乱れの効果とは逆に、FM 相関を強め AF(A), CO/OO 相関を弱める効果を示すという結果が得られた。

(3) $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$ の Mn サイトへの Ti 置換(電子ドープ)は、AF(A)相を不安定化させる効果を示し、 $\text{NdBaMn}_{2-x}\text{Ti}_x\text{O}_6$ ($x = 0.12$)に磁場を印加すると AF(A)相が壊れ、FM 相が出現する磁場誘起相転移が起こるという結果が得られた。

6.

銀河団ガスの運動と共鳴散乱

田久保 耀子（宇宙物理）

銀河団は大きさが数百万光年にも及ぶ宇宙最大の天体で、その構成要素の一つに 10^7 - 10^8 K 程度の高階電離ガスがある。ガスからは X 線が放射され、その放射過程は主に、制動放射と重元素イオンによる輝線放射である。また銀河団内では、ガス粒子による運動が起きていると考えられているが、過去の観測装置のエネルギー分解能が足りないことから、ガス運動の大きさについてはよくわかっていなかった。2016 年に打ち上げられた X 線観測衛星ひとみにより、初めて重元素イオンの輝線幅とドップラーシフトから、直接ガス運動の情報が得られた(The Hitomi collaboration, 2016, Nature, 535 117-121)。ただし、このデータはペルセウス銀河団中心部に対するのものであり、外縁部の直接観測は行われていない。しかし、輝線に対する共鳴散乱の効果を考えることで、中心部以外のガス運動の情報も引き出せる可能性がある。通常銀河団ガスは光学的に薄い、ヘリウム型の鉄イオンの共鳴線に対しては厚くなりうる。この光学的厚さは、視線上に存在するガスの速度に依存し変化する。したがって、輝線に対する共鳴散乱の影響を利用することで、銀河団中心部から視線上にかけてのガス運動の情報を得られる可能性がある。

そこで本研究では、ひとみ衛星の観測結果をもとに、銀河団中心部から視線上にかけて存在するガスの運動について、共鳴散乱を考慮しつつ調べることを目的とする。そのために、ヘリウム型の鉄イオンの共鳴線に対して、共鳴散乱の影響を考えた輻射輸送方程式を解いた。その中でガス運動について、バルク運動はドップラーシフトを、熱運動と乱流運動は輝線が広がりをもつように与えた。さらにペルセウス銀河団に対して観測されているガス密度、温度、重元素量の空間分布を考慮した上で、ヘリウム型の鉄イオンの輝線のうち、共鳴散乱の影響を受ける共鳴線と、影響を無視できる禁制線とのフラックス比を調べた。以上の各ガス運動の与える共鳴散乱への影響から、ひとみ衛星で得られた共鳴線と禁制線とのフラックス比 2.48 ± 0.16 を満たす、ガス運動の大きさとその生じている領域について考えた。

ガス運動が熱運動のみであった場合には共鳴散乱の影響は顕著に輝線に現れるが、そこに乱流運動の効果を加えることによって、影響は小さくなる。これは、ガスの乱流運動によってエネルギーがずれることで、散乱が起これにくい状態になっているためである。共鳴線と禁制線のフラックス比は、まず共鳴散乱を無視した場合は 3.10 となり、ひとみ衛星の結果とは合わない。一方で共鳴散乱を考慮した場合は、ガスの熱運動のみを考えるとフラックス比は 2.07 となり、ひとみ衛星の結果を下回る。つまりひとみ衛星の結果を満たすには、銀河団内では熱運動以外のガス運動により共鳴散乱が起これにくい状態であると考えられる。ここでひとみ衛星ではガス中心部に 164km/s 程度の乱流運動が生じていることが示唆されている。仮に銀河団全体に 164km/s の乱流運動が生じている場合を考えるとフラックス比は 2.51 となり、ひとみ衛星での結果を満たすようになる。つまり 164km/s 程の乱流が銀河団全体に発生している可能性も考えられることがわかった。さらにガス速度が空間依存性をもつ場合でのフラックス比を調べた。

7.

二次元ディラック電子系の vortex に付随する電子状態の数値的研究

板垣 諒 (物性理論)

グラフェンのケクレ型ボンダ秩序の構造欠陥である vortex 構造に伴うゼロモードは、分数電荷をもつこと、またグラフェンのディラック点近傍の抵抗が磁場に指数関数的に増加する振る舞いに対して本質的であると思われることなどから、興味を持たれている。この vortex 構造の特徴として、渦度を定義することができ、渦度の数だけギャップ中に状態が現れる。

これまで、 $n=1$ の場合の vortex 構造についてのゼロモードが現れる事、分数電荷についてなど、数値的に調べられてきたが、 n 次の高次の vortex 構造に対しては大きな系での計算が必要となるため、数値的研究は行われてこなかった。 $n=2$ 以上の高次の渦度を持つ vortex 構造については、二つ以上状態が現れるため、ゼロモードが現れるかは、対称性からだけでは、わからない。実際、 $n=2$ に似た構造として、 $n=1$ の vortex 構造と $n=-1$ の anti-vortex 構造の両方がある場合の構造があるが、ゼロモードが分裂する事が数値計算によって確認されている。また、この vortex 構造は、staggered potential という、A と B の副格子に対して、符号のみが違う on-site potential を入れることで、素電荷に 2 つの整数比では表せない非分数をかけた電荷が現れることが理論的に知られているが、これも、 $n=1$ の場合のみに限られていた。

そこで、本研究では、高次の vortex 構造のギャップ中にゼロモードが現れるかを明らかにするため、 $n=2$ から $n=4$ までの vortex 構造の局所状態密度、非分数電荷の数値的評価を行った。数値計算手法としては、行列を使わないことで、厳密対角化法ではできない、非常に大きな系について Kernel polynomial 法(KPM)という手法を用いた。

この結果、渦度が高次の場合の vortex 構造では、vortex 構造と anti-vortex 構造の時とは対照的に、 n の数だけゼロモードが現れること、非分数電荷が理論値と非常によく合う、妥当な結果が現れること、カイラル対称性を破らない、ボンドランダムネスに対して、安定性を示すことも明らかになった。

8.

ハイパー核生成実験における多重電磁散乱測定を用いた粒子識別

稲生 恒明（素粒子物理）

KEK-PS E373 実験はハイブリッドエマルション法を用いたダブルラムダハイパー核探索実験であり、 $\Lambda\Lambda$ (ラムダラムダ)相互作用, S (ストレンジネス)-2 の世界を深く理解していくことを目的とした実験である。

1998-2000 年に高エネルギー加速器研究機構(KEK)でビーム照射が行われた。 Ξ 粒子を生成し、原子核乾板内で静止させることで、ダブルラムダハイパー核のイベントを生成出来る。 $p(K^-, K^+)\Xi$ 反応から他の飛跡検出器を併用し、 Ξ 粒子を追跡して静止吸収点を検出する手法をハイブリッドエマルション法と呼ぶ。この実験によって $\Lambda\Lambda$ 相互作用が弱い引力であると判明した。新しく E373 実験の 10 倍の統計を目指す J-PARC E07 実験ではこの手法と並行して原子核乾板の全面探索を行うことが計画されている。これは原子核乾板を CCD カメラでスキャンし、 Ξ 粒子吸収点候補を直接検出するものである。

この全面探索法では、各事象で静止吸収される粒子の識別が非常に重要である。そこで、本研究はエマルション中の電磁散乱測定による Ξ 粒子識別法に着目した。多重電磁散乱では位置変位の期待値は運動量の反比例し、飛程は質量に依存する。飛程を固定すれば運動量の差異から質量分析が可能になる識別法である。これを用いることで事象ごとに静止吸収される粒子の同定が可能になり、 Ξ 粒子が入射したことの保証になる。

エマルションはサブミクロンの高い分解能を持つ検出器である。電磁散乱測定には位置の測定精度が重要であり、最大限この精度を活用する必要がある。これまでに歪みの補正や飛跡読み取り装置の読み取り誤差、座標系の回転等の誤差の低減を行い、新しく飛跡測定時の視野移動に伴う補正をパターンマッチに変更したことで、視野移動時の補正值の標準偏差が最大で $1.61 \pm 0.23 \mu\text{m}$ から $0.33 \pm 0.05 \mu\text{m}$ に改善した。これにより散乱の測定値（二次変位）の誤差が $0.76 \pm 0.05 \mu\text{m}$ から $0.60 \pm 0.05 \mu\text{m}$ にまで測定精度が向上した。

この結果を利用して、シミュレーターの“Geant4”を用いて尤度比識別を行ったところ、尤度比の平均値が向上し、fake rate の改善を確認し、重い原子核に吸収されたダブルハイパー核である Heavy Double 事象の入射粒子が Ξ/K の尤度比 1.00, fake rate 0.9%となり、 Ξ であると識別出来た。そして E373 実験の乾板に対して全面探索法を用いた解析を行い、得られたイベントにこの手法を適用させた。これによって入射粒子が π 粒子らしいイベントは全て π 粒子と識別することが出来た。また、Geant4 の数値計算法を参考にすることで任意の質量値での尤度を出し、最尤推定を行った。これにより各事象の吸収粒子に対して質量値を与えることが出来るようになった。

9.

タウ崩壊事象におけるハドロンバックグラウンドの高統計解析

水沢 萌（素粒子物理）

素粒子標準理論においてニュートリノは、質量をもたない粒子として扱われる。しかし、1998 年のスーパーカミオカンデでの大気ニュートリノ欠損の発見等、多くの実験にてニュートリノが有限の質量を持つ際に起こるニュートリノ振動の存在が発見された。これらの実験では、ミューニュートリノからタウニュートリノへの振動を測定するが、振動の結果出現するタウニュートリノの反応で生成されるタウ粒子は短寿命で崩壊するために検出が難しく、振動前のミューニュートリノの減少を捉えている。

そこで OPERA 実験では、振動により出現したタウニュートリノから生成されるタウ粒子をサブミクロンの位置分解能を有する原子核乾板を用いた検出器で直接検出し、ニュートリノ振動を直接測定する。タウ粒子は質量が大きく、短寿命で質量の小さな他の粒子へと崩壊するため、崩壊前後で飛跡は大きな幾何学的折れ曲がりを示す。OPERA 実験ではこの折れ曲がりを用いてタウ粒子の崩壊事象を同定するため、ハドロンなどのタウ粒子ではない粒子が似た飛跡を残す場合にバックグラウンドとなり得る。OPERA 実験では主要なバックグラウンドであるハドロン衝突事象の期待値の見積もりにモンテカルロシミュレーション (MC) を用いており、先行研究によりその系統誤差が 30% であると見積もった。現在、OPERA 実験では 5 例のタウ崩壊候補事象を発見し、5.1 シグマの有意度でタウニュートリノへのニュートリノ振動を立証した。今後はニュートリノ振動パラメータの精密測定を行うため、現在より多くのタウ崩壊候補事象の統計が必要となる。そのためにはバックグラウンドとの分離のために厳しく課している条件を緩和する必要があるが、緩和によってより多くのバックグラウンドが混入するため、より精密なハドロンバックグラウンドの推定が課題となった。

先行研究では検出器に使用した原子核乾板の枚数が少なく、十分な統計量での MC の評価ができなかった。そこで本研究では、より多くの原子核乾板を使用した検出器に 2, 3, 4, 5, 6 GeV/c のハドロンビームを照射し、より高統計での解析を行った。各運動量の照射ビームを抽出し、それらのビームを追い下げて衝突反応点を特定し、平均自由行程を求める。次に各反応点から放出される二次粒子の探索を行ってその運動量と横運動量を測定し、MC と比較し、不定性の評価を行う。また、タウ崩壊では放出されない核破砕粒子の探索も行い、バックグラウンドとの分離の指標を得る。

その比較の結果、MC との系統誤差はほぼ実験データの統計誤差で説明でき、MC に計上すべき誤差を約 20% 程度にまで低減することに成功した。

10.

電子衝撃実験による重水素分子の解離過程における同位体効果

長谷川 徹（原子過程）

分子が光または電子の衝突によりエネルギーを受け取ると、基底状態の電子が様々な準位へ遷移する。このうち、二つの電子が同時に励起する二電子励起状態は、第一イオン化しきい値以上の内部エネルギーをもつ電氣的に中性な状態である。二電子励起状態は電子相関により起こると考えられ、平均場近似や独立粒子モデルが破綻する代表例として知られている。二電子励起状態の崩壊過程は、主にイオン化を伴う自動イオン化、基底または励起状態の原子に解離する中性解離である。自動イオン化では、解離を伴うこともありこれは解離性自動イオン化と呼ばれている。自動イオン化の寿命と分子の解離の時間スケールは、共にピコ秒からフェムト秒と考えられているため、自動イオン化と中性解離は競争過程となり、その分岐比は興味深い。

これまで我々の研究室では、散乱電子・イオン同時計測実験により水素分子 (H_2)、窒素分子 (N_2)、アンモニア (NH_3)、メタン (CH_4) といった分子の二電子励起状態の解離過程の研究を行ってきた。散乱電子・イオン同時計測実験は、二電子励起状態やそこから自動イオン化過程あるいは解離性自動イオン化過程を経て崩壊する崩壊過程を研究するのに有用なツールである。特に、電子衝撃実験では光学的許容遷移に加え光学的禁制遷移の情報も得ることができる。また近年、核融合炉内でのダイバータ領域における H_2 や重水素分子 (D_2) などの同位体による二電子励起状態から生成される解離イオンや励起原子の基礎データのニーズも高まっていることから、 D_2 を標的とした実験は基礎、応用の両面で大きな意義がある。 D_2 の質量は H_2 より 2 倍重く、ポテンシャル曲線の零点エネルギーがわずかに小さくなり、 D_2 の Franck-Condon 領域は H_2 より約 16 % 狭くなる。質量と Franck-Condon 領域の違いは、解離過程に大きな影響を与え、同位体効果が見出されることが期待できる。本研究は、 H_2 の結果に加え、 D_2 を対象に散乱電子・イオン同時計測実験を行うことで、二電子励起状態からの解離過程における同位体効果を探ることを目的として行った。

散乱電子・イオン同時計測実験では、励起エネルギーに対応する散乱電子のエネルギー損失値と、そのエネルギーで生成されるイオンの強度を測定する。したがって、励起エネルギーを関数としたイオン種ごとの生成量が得られる。さらに、混合ガス法を用いることで、二重微分断面積 (Double Differential Cross Section : DDCS)、さらには一般化振動子強度分布 (Generalized Oscillator Strength Distribution : GOSD) を絶対値として得ることができる。入射エネルギー 200 eV、散乱角 6 deg の条件下の実験では、二電子励起状態 $\text{Q}_1^1\Sigma_g^+(1)$ 状態からの D^+ の GOSD は H^+ より小さく、およそ 1/4 と見積もられた。反発型のポテンシャル曲線をもつ $\text{Q}_1^1\Sigma_g^+(1)$ 状態に遷移した D_2 と H_2 は、エネルギーの低い方へポテンシャル曲線を移動し、移動した距離は核間の相対エネルギーに分配される。質量の重い D_2 は、 H_2 に比べ解離速度が遅く移動する距離が短くなることから、 D_2 の解離が抑制されたと考えられる。さらに、イオン化と中性解離の割合を示すイオン化収率曲線において、光学的禁制な二電子励起状態である $\text{Q}_1^1\Sigma_g^+(1)$ 状態からの中性解離の寄与を確認し、中性解離においても D_2 の方が H_2 に比べ生成量が少ないことがわかった。

11.

イオン付着飛行時間型質量分析装置の装置改良 ～線型から直交型へ～

茂木 善行（原子過程）

本研究室ではイオン化解離（フラグメンテーション）を起こさないイオン付着法と線型の飛行時間質量分析計を組み合わせたイオン付着飛行時間型質量分析装置を用いて、ヒトの呼気分析への応用に向けた装置開発に力を注いできた。呼気分析とは、呼気中に含まれる成分を分析することで疑われる疾患の診断や健康管理を行うものである。

これまでに、イオン付着飛行時間型質量分析装置をフラグメントフリーな質量分析装置として開発することには基本的に成功(Takaya et.al, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **53**, 106602(2014)ほか)している。しかしながら、装置としての質量分解能は200に満たなかった。また、化学物質にもよるが数 ppm オーダーの濃度の物質を検出するのに少なくとも600秒程度かかってしまう。分解能の問題は、これまでの線型の飛行時間質量分析計の代わりに反射型のそれを導入すれば解決する。しかし、検出時間に関しては、原理的にマイナーなイオン化手法を用いている関係から劇的な改善は期待できず、イオンビームのパルス化を再考するほかはない。現在の装置は、飛行時間型質量分析計に不可欠であるイオンビームのパルス化に偏向法を用いているために、パルス化されたイオンビームの直進性が低く、これがイオンの検出効率に悪影響を及ぼしていると考えられるからである。

そこで本研究では、呼気に含まれる窒素分子(N_2)と一酸化炭素(CO)の質量分離を可能にする5000以上の質量分解能が期待できる反射型の飛行時間質量分析計の導入を目指すために装置の改造を行った。具体的には、イオンビームの進行方向に対して直角にイオンビームをパルスのように引き込んで飛行させる直交型の飛行時間質量分析計へと装置改良を行うことにした。

直交型の飛行時間質量分析計の導入への挑戦は以前にも一度行われている(小川俊輔、平成2007年度東邦大学修士論文)が、その結果は呼気分析への応用が難しいほど、イオンの検出効率の低下を招いてしまうものだった。この結果を踏まえて、本研究では直交型を取り入れたときにイオンの検出効率の低下を防ぐことを最優先の目的として、イオンビームを直交型の飛行時間質量分析計に引き込ませる領域まで輸送する静電レンズ設計と、イオンビームを直交方向に引き込む電場強度の設定を行った。これらの設計・設定は荷電粒子軌道計算シミュレーション「SIMION7.0」を用いて行われた。

その結果、静電レンズ設計では3 eV ~ 6 eVの初期運動エネルギーをもつイオンの8割以上を直交型の飛行時間質量分析計のイオン引き込み部まで輸送できる設計に成功した。また、イオン引き込み部においては、線型方向の速度が大きくても9割以上のイオンを直交方向に引き込むことが可能である。例えば、40 eVのイオンを引き込む場合、その引き込み電場強度は100 V/cmほどである。つまり、直交部に引き込むことによるイオンの検出効率の低下は十分に防げるものであることが見出され、新たに装置改良された直交型の完成に近づくことができた。近い将来、反射型の飛行時間質量分析計と組み合わせた高効率高分解能質量分析装置としての完成が期待される。

12.

アルファ線エネルギースペクトルの解析によるろ紙内プルトニウム分布の推定

右田 豊紀恵(原子過程)

アルファ線(以下 α 線)は空中飛程が数 cm 程度と極めて短く、物品が α 線放出核種に汚染されている疑いがある場合も隙間などに入り込んだ核種から放出される α 線を α サーベイメータで検出することは難しい。そこでプルトニウム(Pu)などの α 線放出核種を扱う核燃料取扱施設において、物品などがこれらの核種に汚染されているかどうかを検査する際、一般に、ろ紙で対象の表面を拭き取り、そのろ紙表面から放出される α 線を検出する拭き取り法が採用されている。しかし、表面汚染をもたらしている物質が溶液状である場合、溶液はろ紙に浸透し、そのうち表層付近に分布した核種からの α 線のみが検出されるので、検出された α 線の計数から汚染物質の放射能を算出すると過小評価となる。このため、ろ紙内にある α 線放出核種の全量を知るためには、ろ紙内における α 線放出核種の分布を明らかにする必要がある。そこで本研究では、ろ紙内に分布するPuから放出される α 線のエネルギースペクトルを解析することにより、ろ紙内におけるPuの分布を明らかにする手法の開発を行った。

α 線放出核種を含む溶液を拭き取ったことを想定し、10 μL と 2 μL の硝酸 Pu 溶液 ($8.53 \pm 0.14 \text{ Bq}/\mu\text{L}$) をろ紙にそれぞれ滴下した。さらに汚染防止のため、両面をマイラー膜で挟み、試料を作成した。ここで、硝酸 Pu 溶液が滴下された面を表面、その反対側を裏面と呼ぶことにする。まず、この試料の表面と裏面のイメージングプレートによる 2 次元放射線強度分布の計測を行った。この結果、10 μL 、2 μL 滴下試料のどちらとも表面と裏面の Pu 分布直径に大きな違いはなかった。さらに α スペクトロメータによる α 線エネルギースペクトルの測定を行った。また、モンテカルロシミュレーションソフト AASI (advanced alpha- spectrometric simulation) を使用し、初期設定としてろ紙内の Pu 分布を様々に変化させながら、その分布における α 線エネルギースペクトルを推定し、実験で得られた α 線エネルギースペクトルを最もよく再現する分布条件の探索を行った。この結果、Pu 分布直径はろ紙の表面から中程までは減少していくが、中程から裏面にかけては徐々に増大することが示された。紙に液滴が付着すると、液滴は水平方向に広がってから紙に浸透していくことが知られている。このとき、溶液の量は中央部分が最も多く、外側に向かうにつれて少なくなる。このため中心部分では溶液が紙の奥まで浸透することができるのに対し、外側部分では溶液が奥まで浸透することができず、浸透するに当たって分布直径が減少する。そしてろ紙裏面に到達した溶液は行き場を失い、横方向に広がる現象が起きていると考えられる。この現象は溶液の滴下量によらずに起きることも確認された。分布面積が滴下量にほぼ比例しているので、滴下量が少ない場合も狭い分布面積の中で同じ現象が起きているためと考えられる。

13.

有機超伝導体 κ -(BETS)₂Fe_xGa_{1-x}Br₄ の磁気転移近傍の電子状態

佐藤 俊 (物性物理)

分子性伝導体 κ -(BETS)₂FeBr₄ は擬二次元系構造を持つ磁性有機超伝導体である。その分子構造は BETS 分子から成る伝導層とそれに付随した磁性 Anion 分子から成る絶縁層が **b** 軸方向へ積層したものである。 κ -(BETS)₂FeBr₄ は $T_N = 2.5(\text{K})$ で **a** 軸を容易軸とする反強磁性相へ転移し、 $T_C = 1.0(\text{K})$ で超伝導相への転移を示す。このように伝導層の遍歴電子(π 電子)と絶縁層の磁性スピン(3d スピン)の電子間相互作用によって、反強磁性と超伝導の共存や磁場有機超伝導などの特異な性質を示すことが知られているが、伝導 π 電子と局在 3d スピンがどのようにしてこの特異な物性を発現しているのかは不明である。

本研究では κ -(BETS)₂FeBr₄ を用いて磁気転移近傍の比熱のピークより転移の性質を、電気抵抗、磁気抵抗からは磁気転移が電子状態へ与える影響を調べた。次に κ -(BETS)₂FeBr₄ の Anion 分子の Fe を非磁性の Ga で置換し、Fe の組成比を 100%, 94%, 89%, 79% と段階的に変化させた。この 3d スピンの希釈化により、転移の性質、 π 電子系への影響がどのように変化するのか定量的に評価し、3d スピンと伝導 π 電子が担うそれぞれの役割を解明し、 π -d 電子系についての知見を得ることを本研究の目的とした。

比熱測定ではいずれの試料においても 2K から 3K の範囲で鋭いピークが得られ、磁気転移温度とピークの大きさが Ga 置換によって系統的に抑制されていく様子が得られた。特に比熱のピーク近傍は 2 次元磁性体が見せる対数発散的な振る舞いを示しており、同一の Anion 層内での 2 次元的な秩序化を強く反映したものであると考えられる。さらに 20% 程度の Ga 置換を行っても磁気秩序が消失せず、比熱から見積もられたエントロピーが Fe 濃度を反映した値となっていることから、3d スピン間の磁気相互作用は π 伝導電子を媒介とすることで長距離に及んでいるものと考えられる。伝導電子を介して働く代表的な RKKY 相互作用を仮定したところ、反強磁性的な相互作用が働く周期と Anion 面内の 3d スピン間の距離がほぼ一致し、3d スピンの欠損に対しても反強磁性的な秩序を維持し得ることが明らかとなった。また超伝導転移温度である 1K 近傍では比熱には大きな異常は観測されなかったことから、いずれの組成の試料でも 3d スピン系の秩序化が変わらないまま超伝導状態へ転移しているものと考えられる。

電気抵抗測定では各試料に対してそれぞれの比熱のピーク近傍の温度でステップ型の抵抗減少が観測され、1.0K 近傍では超伝導転移が観測された。また 3d スピン系の転移温度は Ga 置換によって系統的に低温側へ抑制されていく傾向があるものの、超伝導転移温度には大きな変動は見られなかった。次に、**ac** 面内で磁場を回転させながら **b** 軸方向に電気抵抗を測定すると 2K 以下の温度では磁気抵抗の振動が観測された。このことから 3d スピンの秩序化によってフェルミ面の形状が変化していくことが示唆され、ステップ型の抵抗減少はフェルミ面の形状変化とそれによる状態密度の増大などの機構によって生じるものであると予想される。しかし比熱の場合と比べると、抵抗の異常そのものには大きな変動は見られなかったことから d スピン系が π 電子の伝導性に直接的に及ぼす影響は十分小さいものであると考えられる。さらに磁気抵抗の磁場依存性や角度依存性から、混晶系のフェルミ面も κ -(BETS)₂FeBr₄ と同様の異方性を持つことが予想される。

以上の混晶系の研究から κ 型 BETS 結晶の磁気転移では π 電子を媒介として 3d スピンが秩序化しており、 π -d 間相互作用が磁気秩序化の重要な役割を担うことが明らかとなった。

14.

 κ -(BETS)₂FeX₄ (X = Br, Cl) の磁場下での熱的性質

宇都宮 一広 (物性物理)

κ -(BETS)₂FeX₄ (X = Br, Cl) は擬2次元有機超伝導体であり、BETS分子からなる伝導層と磁性アニオン FeX₄ からなる絶縁層が交互に積層している。伝導層では π 電子 (スピン 1/2) が電気伝導を、絶縁層では 3d スピン (スピン 5/2) が磁性をそれぞれ担う。温度の低下に伴い、 κ -(BETS)₂FeX₄ の絶縁層は常磁性から反強磁性へ、伝導層は金属状態から超伝導状態へ転移する。極低温においては反強磁性と超伝導が共存する。この反強磁性秩序を担うのは、 π -d 相互作用を介した d-d 相互作用である。また、 κ -(BETS)₂FeBr₄ では、およそ 11 T から 14 T の強磁場下で、 π -d 相互作用に起因して超伝導が再度出現する磁場誘起超伝導が確認されている。さらに転移温度の比較から、 κ -(BETS)₂FeCl₄ の π -d および d-d 相互作用は κ -(BETS)₂FeBr₄ のおよそ 1/5 であると考えられている。加えて、磁化率についての先行研究からは、 κ -(BETS)₂FeBr₄ が磁化容易軸方向に 1 軸異方性を持つことがわかっている。

本研究では、 π -d 相互作用の温度と磁場に対する振る舞いを調べる目的で、 κ -(BETS)₂FeX₄ の磁場下における比熱と、磁気熱量効果の測定を行った。比熱の測定からエントロピーの温度依存性が、磁気熱量効果の測定からエントロピーの磁場依存性が見積もられた。これらのエントロピーについて、特に常磁性領域において理論値とのフィッティングを行い、その結果から 3d スピン系にかかる内部磁場の大きさを見積もった。また、 κ -(BETS)₂FeBr₄ の磁気熱量効果について層間方向に磁場を回転させて行った測定から、反強磁性-常磁性転移磁場の角度依存性について調べた。なお、測定は κ -(BETS)₂FeCl₄ については反強磁性転移温度の 5 倍程度の温度領域で、 κ -(BETS)₂FeBr₄ については反強磁性転移点を含む領域で行われた。

エントロピーの解析から、 κ -(BETS)₂FeCl₄ の 3d スピン系にかかる内部磁場は、温度の上昇に対しては減少し、また、外部磁場の増大に対してはスピン 1/2 のブリルアン関数に従って増大することがわかった。一方で κ -(BETS)₂FeBr₄ においては、温度の上昇に対しては同じく減少傾向を示すが、反強磁性転移磁場の近傍では κ -(BETS)₂FeCl₄ の場合よりも急激に増大することがわかった。測定の行われた温度領域も考慮すると、3d スピン系にかかる内部磁場は、転移点近傍の常磁性領域では 3d スピン系の相転移の影響を受けて急激な変化を示すが、転移点から遠い領域では緩やかに変化すると考えられる。転移点から遠い領域での内部磁場の磁場依存性がスピン 1/2 のブリルアン関数に従うことから、このような領域での内部磁場は、d-d スピン間の直接的な相互作用ではなく、主に π 伝導電子を介した相互作用、すなわち π -d 相互作用によって作られたものであると考えることができる。また、層間方向に磁場を回転させた実験の結果からは、磁化容易軸から離れるにつれて反強磁性秩序がより強い磁場まで残るようになることがわかった。さらに、層間方向に平行に磁場をかけた際の転移磁場と、層内方向に平行に磁場をかけて行われた先行研究の転移磁場が一致した。よって、 κ -(BETS)₂FeBr₄ は磁化容易軸方向に 1 軸異方性を持つことが磁気熱量効果の測定からも確認された。

以上のように本研究では、 κ -(BETS)₂FeX₄ 系での π -d 相互作用の温度と磁場に対する振る舞いを調べる目的で、比熱と磁気熱量効果の測定から、常磁性領域における内部磁場の大きさの見積もりを行った。その結果、常磁性領域で内部磁場の従う関数を予測することができた。また、内部磁場を作る相互作用が温度領域によって異なる可能性があること、その相互作用に磁化容易軸方向の 1 軸異方性があることがわかった。

15.

有機伝導体 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ の電荷秩序とゼロギャップ状態の熱的研究

大嶋 一樹 (物性物理)

有機伝導体 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ は 135 K で電荷秩序の変化を伴う金属-絶縁体転移を起こす。圧力の印加によってこの転移が抑圧され、転移温度が低温側へ移動する。さらに 15 kbar 以上の高圧力下でゼロギャップ伝導状態が実現していることがわかってきた。ゼロギャップ状態では通常の金属とは大きく異なり、電子系は質量のない系でみられる線形分散関係を示す。このような特異な電子系は温度に比例する通常の電子比熱とは異なる振る舞いが期待される。このようなゼロギャップにおける電子状態の熱的研究は始まったばかりであり、詳細な研究が望まれている。本研究では DTA 法を用いて α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ 、および類縁物質である α -(BEDT-TSF) $_2$ I $_3$ 、 α -(BEDT-STF) $_2$ I $_3$ の比熱を測定し、常圧下における相転移現象を観測した。続いて、AC 法を用いて α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ に 2.0~13.5 kbar の圧力を印加して比熱の測定を行い、相転移の圧力依存性を調べた。 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ では 135 K 近傍でピークを観測し、相転移前後におけるエントロピー変化量と比熱差について考察した。

常圧下における比熱測定の結果、135 K に於いて鋭い電荷秩序転移に伴う比熱のピークを観測し、エントロピー変化量を見積もったところ約 1.14 J/mol K という結果が得られた。完全な電荷分離が起こる電荷秩序転移における電子系への寄与である $R \ln 2$ (5.7 J/mol K) の 1/5 程度であった。また、格子系への寄与も小さく、相転移の際格子変形によるエントロピー変化はほとんど観測されなかった。これに対し相転移前後では比熱曲線に約 20 J/mol K にも及ぶ比熱の大きな段差が生じた。表題物質は金属絶縁体転移を経験するので電子比熱が段差の分だけ減少したと考えられる。これは一般的な BEDT-TTF 系の電子比熱と比べ約 10 倍大きいものである。このため表題物質はフェルミ準位近傍に大きな状態密度を持っており、相転移の際その状態密度が消失したのではないかと考えられる。室温のホール効果測定より 10^{21}cm^{-3} にも及ぶ多数のキャリア濃度を報告されており、このフェルミ準位の近傍の大きな状態密度はフェルミ準位の下方に存在する 1 次元的な電子状態から期待されるものであると考えられる。

圧力下における比熱測定からは、圧力の増加に伴いこの転移に伴う比熱の段差が 3.0 kbar では約 19 J/mol K となる。それ以降、転移を反映した比熱が急激に低下する温度が低温側へ移動するとともに比熱の段差も減少する。同時に常圧下で見えていた電荷秩序形成に伴うピークが完全につぶれ、転移の前後で比熱曲線の傾きが変化するのみであった。そして 10.0 kbar 以上の圧力下では傾き変化も見えなくなった。これから 10.0 kbar 以上では電荷秩序転移が消滅するかごく一部の領域に限定されていると考えられる。これに対し、類似物質である α -(BEDT-TSF) $_2$ I $_3$ 、 α -(BEDT-STF) $_2$ I $_3$ に関しては電気抵抗率測定で転移が見られた温度付近では比熱による大きな異常は観測されなかった。この転移に伴う比熱のピークは伝導層内の電荷秩序の偏りの変化の大きさに反映しており、これが無加圧下の DTA 法による比熱測定からも小さいことを前述した。この偏りの変化が加圧に伴い転移が抑制されてより小さなものになっていくと考えられ、 α -(BEDT-TSF) $_2$ I $_3$ 、 α -(BEDT-STF) $_2$ I $_3$ の二つの系では顕著なシグナルが見えない原因となっていると考えられる。このように今まで不明であった電荷秩序からゼロギャップ状態への移行領域において比熱からそれぞれの自由度がどのように変わっていくのか定量的な議論が可能となった。

16.

分子性ディラック電子系におけるクーロン相互作用

林 頌也 (物性物理)

グラファイトを1層だけにしたグラフェンで質量ゼロのディラック電子系が実現されて以来、固体中のディラック電子系の物理が発展してきた。その中で、高圧力下における有機導体 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ はバルク (多層状構造) な物質として初めて質量ゼロのディラック電子系となることが実証された。高圧力下の α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ で実現した質量ゼロのディラック電子系は温度-圧力相図において電荷秩序絶縁体相に隣接しており、この物質を舞台に強相関ディラック電子系の物理展開が期待される。本研究ではその第一ステップとして、この系のクーロン相互作用効果を調べることを目的とした。

2次元ディラック電子系は通常の伝導体とは異なり、 $E_{nLL} \propto \pm\sqrt{|n||B|}$ で表される特別なランダウ準位を形成する。最も注目すべきは、ディラック点を周回する軌道がベリ一位相 π を持つために、常にディラック点の位置にゼロモードと呼ばれる $n=0$ のランダウ準位が形成されることである。 $n=\pm 1$ と $n=0$ の準位のエネルギー差が熱エネルギーよりも大きくなる低温・磁場領域ではゼロモードキャリアが伝導の主役となる。このような状況を量子極限と呼び、この効果は層間磁気抵抗測定で検出されてきた。本研究では、層間磁気抵抗測定に検出したゼロモードキャリアからこの系のクーロン相互作用効果を明らかにした。以下がその手法である。

この系は第一ブリルアンゾーン内に2つのバレー (ディラック点まわりの電子状態) を持ち、ディラック点においてスピンとバレー、計4重に縮退している。クーロン相互作用効果は磁場によるバレー分裂として検出できる。なお、磁場中ではスピンの縮退もゼーマン効果により破られる。2次元伝導面に垂直な磁場下ではどちらの分裂幅も磁場強度に比例するために2つの効果を区別できないが、磁場を傾けることで区別できる。ゼーマン分裂は磁場方位に依存しない (g 因子に異方性がないと仮定) のに対し、バレー分裂は磁場の面垂直成分のみに依るのである。本研究では、磁場を伝導面に垂直な方向から傾けた層間磁気抵抗測定から、ゼロモード分裂の主効果を調べた。

本研究では、2つの現象に着目しゼロモードの分裂を調べた。1つは量子極限へ移行するときに現れる層間抵抗のピーク構造である。もう1つは磁場増大に伴いゼロモードの分裂幅がゼロモードの広がりとはほぼ等しくなるときに層間抵抗が作る極小である。どちらもランダウ準位間の重なり方を反映した現象である。それぞれの磁場角度依存性を調べることからゼロモード分裂の主起源を知ることができる。その結果、5 K以上の高温ではゼーマン分裂が主であることがわかった。ところが4 K以下の低温ではバレー分裂が起きていることが実験と簡単なモデル計算から明らかになった。

このような状況では、抵抗極小からクーロン相互作用効果の強度 a を大雑把にだが知ることが可能である。結果、温度の低下に伴い a は増大することがわかった。重要なのは、この増大が $a \propto (1 - T^2/T_0^2)$ に従うという実験事実である。これから、この系は $T_0 \sim 5$ K で何かバレー対称性を破るような相転移が起きたことが示唆される。しかし、この相転移の可能性についてはさらなる実験と理論サポートが必要である。

以上、磁場を傾けての層間抵抗測定から、この系のクーロン相互作用効果を明らかにした。高温ではクーロン相互作用によるバレー分裂の効果はほとんど見られないが、4 K以下の低温ではバレー分裂の効果が検出され、低温でバレー対称性を破るような相転移が起こる可能性が示唆された。