



東邦大学

平成25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26年2月13日（木）・14日（金）

修士・博士論文発表会

平成26年2月20日（木）・21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.....	- 2 -
卒業論文要旨	- 5 -
修士・博士論文発表会プログラム.....	- 19 -
修士論文要旨.....	- 20 -

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 26 年 2 月 13 日 (木)

開会

9:00 ~ 9:05

物性物理.....

	前半	9:05 ~ 10:05
1. 分子性ディラック電子系におけるフェルミ速度の圧力効果	早坂 一成	
2. 分子性ディラック電子系における $N=0$ ランダウ準位のスピン分裂	木暮 佑太	
3. 分子性ディラック電子系への正孔注入と量子磁気抵抗効果	平田 拓也	
4. $\text{Et}_2\text{Me}_2\text{Sb}[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$ の圧力下におけるゼーベック係数測定	曾根 真智子	
5. $\text{Et}_2\text{Me}_2\text{Sb}[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$ の圧力下における抵抗測定	横山 拓矢	
	後半	10:10 ~ 11:10
6. $\kappa\text{-(BETS)}_2\text{FeBr}_4$ の磁場下での比熱測定	渡邊 和真	
7. $\pi\text{-d}$ 系 $\kappa\text{-(BETS)}$ 塩の磁氣的・電氣的性質	林 大介	
8. 有機伝導体 $\lambda\text{-(BETS)}_2\text{FeCl}_4$ の抵抗測定による磁場誘起絶縁体—金属転移の観測	菅沢 正	
9. $\lambda\text{-(BETS)}_2\text{FeCl}_4$ の強磁場下の磁化測定と磁化測定装置の開発	上遠野 貴	
10. $\lambda\text{-(BETS)}_2\text{Fe}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Cl}_4$ の常磁性金属—反強磁性絶縁体転移における熱力学的な考察	實方 博規	

表面物理.....

	11:20 ~ 12:08
11. 昇温脱離法による石英ガラスへの水の吸着・吸蔵状態の観察	永吉 恵
12. 電解イオン顕微鏡による W ティップの観察	入船 あゆ
13. 原子間力顕微鏡(AFM)によるゲータイト(FeOOH)劈開面と Cd 蒸着面の観察	川島 悠司
14. 電子衝撃脱離(ESD)法によるステンレス隔膜の水素透過特性	平田 健一郎

基礎物理.....

	13:00 ~ 14:00
15. エアロジェルチェレンコフカウンターの基礎特性	清水 健志
16. ダブルハイパー核探索のための全面探索法の開発	川口 翔
17. 大角度最小電離粒子における銀粒子密度の測定	花井 義正
18. 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	酒井 美幸
19. 宇宙線を用いたミュー粒子の磁気モーメントの測定	庵 翔太

コアサイエンス.....

	14:05 ~ 14:41
20. 音に関する演示実験・工作・体験ができる教材の開発	米川 雅大

- | | |
|---------------------------------|-------|
| 21. YY 式簡易 GM 計数管を活用した放射線教育 | 中井 洋輔 |
| 22. 学校での普及を目指した放射線教材としての拡散霧箱の開発 | 井上 大佑 |

数学教室（野田研究室）

- | | |
|---------------------------------------|---------------|
| | 14:50 ~ 15:02 |
| 23. 結晶格子の幾何学的構造と格子上ランダム・ウォークのシミュレーション | 中村 昂輝 |

宇宙・素粒子

- | | |
|------------------------------------|---------------|
| | 15:07 ~ 16:19 |
| 24. ダークマターの速度分布の時間発展 | 渡貫 雄矢 |
| 25. 銀河団密度分布の時間発展 | 山本 滉 |
| 26. 重力レンズ効果を用いた質量測定の密度分布依存性 | 富永 浩太 |
| 27. 強い重力レンズ効果を用いたハッブル定数の推定 | 甘浦 稜介 |
| 28. 相対論的効果による補正の有無による GPS の測定位置の違い | 富張 貴敏 |
| 29. GPS の相対論的補正 | 志村 龍二 |

平成 26 年 2 月 14 日（金）

生命圏環境創成科学（佐藤研究室）

- | | |
|------------------------|-------------|
| | 9:00 ~ 9:12 |
| 30. 小型容器内における可燃性気の爆発現象 | 茂手木 昭太 |

量子エレクトロニクス

- | | | |
|--|--------|---------------|
| | 前半 | 9:20 ~ 10:20 |
| 31. ガラスキャピラリー外壁への真空蒸着による透過率及び回折縞の影響 | 北崎 俊光 | |
| 32. ガラスキャピラリーの回折縞の光強度分布及び拡がり角の測定 | 吹屋 快羽 | |
| 33. ガラスキャピラリーの透過光による回折縞及び光強度分布の研究 | 伊藤 有矢 | |
| 34. Ba 原子の $6s5d\ ^3D_2 \rightarrow 5d6p\ ^3F_2$ 遷移におけるゼーマン効果の測定 | 縄谷 友哉 | |
| 35. Ba 原子の高励起状態におけるゼーマン効果の測定 | 伊東 大海 | |
| | 後半 | 10:25 ~ 11:37 |
| 36. レーザー誘起蛍光(LIF)法分光装置の製作 | 山田 紘太郎 | |
| 37. 半導体レーザーを用いた LIF 法による分光装置の製作 | 豊田 智大 | |
| 38. 炭素線の照射野効果におけるレンジシフター依存性についての研究 | 篠崎 真里 | |
| 39. プロペラ型モジュレータを用いた炭素ビームの線質と生物効果の評価 | 三上 集 | |
| 40. 動的光散乱法による温度の測定 | 赤松 直樹 | |
| 41. 動的光散乱法による温度の測定 | 兼本 春希 | |

物性理論.....

- | | |
|--|---------------|
| | 12:30 ~ 13:42 |
| 42. 磁性多層膜を用いたスピントルク発振の数値的研究 | 北島 治城 |
| 43. 電場誘起磁化反転に対する数値的研究 | 手塚 貴之 |
| 44. Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用を有する強磁性体中のスピントルク効果 | 渡辺 広紀 |
| 45. ホップフィールドモデルにおけるパターン想起の研究 | 岡田 和也 |
| 46. 厳密対角化による2次元六角格子模型の状態密度計算 | 中川 和也 |
| 47. ケクレ型ボンド秩序があるグラフェンのドメイン境界における局所状態密度 | 井上 裕哉 |

磁気物性.....

- | | |
|--|---------------|
| | 13:50 ~ 15:02 |
| 48. スピネル化合物 $\text{Co}(\text{Al}_{1-x}\text{Rh}_x)_2\text{O}_4$ の B サイトの乱れがスピン液体状態に与える効果 | 井出 優佑 |
| 49. アモルファス GdSi の作製と金属絶縁体転移近傍でのスピングラス転移の性質 | 酒井 晶 |
| 50. Fe 単層膜の残留磁化におけるスローダイナミクス | 松本 賢人 |
| 51. 磁性誘電体 EuTiO_3 の Ti サイト置換が磁性に与える効果 | 高橋 和之 |
| 52. A サイト秩序型ペロブスカイト酸化物 $\text{REBaMn}_2\text{O}_6$ ($\text{RE} = \text{希土類}$) の RE サイトの乱れが磁性に与える効果 | 佐藤 里砂 |
| 53. ハニカム型格子を持つ $\text{Co}_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ の合成と逐次磁気相転移 | 藤井 沙織 |

原子過程.....

- | | |
|---|---------------|
| | 15:10 ~ 16:10 |
| 54. イオン付着飛行時間型質量分析装置における第三体ガスの流れのシミュレーション | 山口 優大 |
| 55. イオン付着飛行時間質量分析装置の安定性の向上 | 笠川 勝昭 |
| 56. 電子衝撃による窒素分子の崩壊過程 | 高橋 七都子 |
| 57. Ar^+ イオンビーム照射によりタンゲステン表面からスパッタリングされた励起原子の発光スペクトル | 加賀 暁子 |
| 58. 蛍光 X 線測定による ^{239}Pu 放射能決定法の検討 | 栗野 嗣史 |

[平成 26 年 2 月 13 日(木)]

物性物理

1. 分子性ディラック電子系におけるフェルミ速度の圧力効果

早坂 一成

質量ゼロの電子が主役であるディラック電子系が有機伝導体 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ の高圧力下で実現した。グラフェンと異なり、これは最初バルクな(多層)ディラック電子系である。本研究では、バルクである特徴を見出すことを目的に、フェルミ速度の圧力効果を層間抵抗の磁場下測定から調べた。この系は、磁場下で特殊なランダウ準位構造を形成するために、低温では比較的弱い磁場で量子極限になる。フェルミ速度は系が量子極限へクロスオーバーする磁場と温度の関係から評価出来るのである。その結果、圧力の印加に伴いフェルミ速度は増大することがわかった。

2. 分子性ディラック電子系における $N=0$ ランダウ準位のスピン分裂

木暮 佑太

高圧力下にある有機伝導体 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ は世界最初のバルクな(多層)ディラック電子系である。磁場下におけるこの系のランダウ準位は特異である。それは通常導体のものと異なり磁場の $1/2$ 乗に比例するのである。最も特徴的なのは、常にディラック点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。本研究ではゼロモードの性質とそのスピン分裂を調べることを目的に、層間抵抗を測定した。その結果、この系は低温で異常なスピン分裂を示すことがわかった。有効 g 因子は 2K 以上の温度域で約 2 だが、それ以下の温度域では急激に減少するのである。

3. 分子性ディラック電子系への正孔注入と量子磁気抵抗効果

平田 拓也

高圧力下にある有機伝導体 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ でディラック電子系が実現した。磁場下では、常にディラック点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が特徴の 1 つである。最近この系の低温で、ゼロモードの特異なスピン分裂状態が見出された。本研究では、他のランダウ準位のスピン分裂を調べることを目的に、接触帯電法でこの物質へ正孔を注入して量子磁気抵抗振動効果を調べた。その結果、 $N=-1$ と -2 のランダウ準位のスピン分裂を観測することに成功した。有効 g 因子はどちらも 2 よりも非常に小さい。さらに、 10T 以上の磁場下でバレー対称性の破れを観測した。

4. $\text{Et}_2\text{Me}_2\text{Sb}[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$ の圧力下におけるゼーベック係数測定

曾根 真智子

表題物質は、Mott 絶縁体、金属、電荷分離状態の三相が競合する特異な物質である。低圧では冷却に伴い Mott 絶縁体状態から電荷分離状態への転移が、高圧では金属状態から電荷分離状態への転移が観測される。本研究では、圧力下におけるゼーベック係数の測定により Mott 絶縁体-金属転移に伴う電子状態の変化を観測する事を目的とした。測定の結果、相転移に伴いゼーベック係数は減少し Mott 絶縁体-金属転移を観測した。

5. $\text{Et}_2\text{Me}_2\text{Sb}[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$ の圧力下における抵抗測定

横山 拓矢

有機伝導体 $\text{Et}_2\text{Me}_2\text{Sb}[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$ は、圧力と温度の変化に対して Mott 絶縁体相－電荷整列相－金属相の三相が競合する特異な系となっている。これらの相転移の機構を調べるため、圧力下での抵抗測定を行った。本研究では 4 端子法を用いて抵抗測定を行った。その結果、高温低圧状態では半導体、高温高圧状態では金属、低温状態では絶縁体であることが明らかとなった。転移温度については、10.5 kbar までは上昇するが、それ以降は下降した。

6. $\kappa\text{-(BETS)}_2\text{FeBr}_4$ の磁場下での比熱測定

渡邊 和真

表題物質は局在 d スピンによる反強磁性相と伝導 π 電子の超伝導相が共存する磁性有機超伝導体であり、磁場をかけると両相とも一旦抑制され常磁性金属相となる。さらに強い磁場では π 電子と d スピン間の相互作用により強磁場下で磁場誘起超伝導が観測される。本研究では中間磁場下で出現する常磁性金属相の π 電子および d スピンの状態を明らかにするため、磁場の影響の及ぶ高温領域まで精度を高めた比熱測定（熱緩和法）をおこなった。その結果、磁場下で d 電子間相互作用が働いたときに期待される比熱とは異なる磁気比熱を観測した。

7. π -d 系 $\kappa\text{-(BETS)}$ 塩の磁氣的・電氣的性質

林 大介

扱う試料は $\kappa\text{-(BETS)}_2\text{FeCl}_4$ 、 $\kappa\text{-(BETS)}_2\text{FeBr}_4$ であり、これらは極低温において超伝導と反強磁性が共存する磁性有機超伝導体である。本研究では主に高磁場中における常磁性金属相の電子状態を調べることを目的に、ホール効果、磁気抵抗の測定を行い、Cl においては角度依存性の測定も行った。7 T まで外部磁場を増加させた場合、Br では観測されなかったが、Cl においてキャリア濃度の上昇、または有効磁場が減少していると見られる現象が観測された。

8. 有機伝導体 $\lambda\text{-(BETS)}_2\text{FeCl}_4$ の抵抗測定による磁場誘起絶縁体－金属転移の観測

菅沢 正

$\lambda\text{-(BETS)}_2\text{FeCl}_4$ は温度の低下により、金属から絶縁体へと転移すると同時に反強磁性秩序を形成する反強磁性絶縁相へ転移をおこす。この絶縁体相に磁場を印加すると金属相へ、さらに強磁場では超伝導相への転移を示す物質である。近年 5T 以上の磁場領域で余剰比熱に異常が現れることが明らかになった。この起源を知るために $\lambda\text{-(BETS)}_2\text{FeCl}_4$ における電気抵抗の磁場依存性を測定した。その結果、磁場による抵抗の変化が段階的に起こっていることがわかった。このことからこの相転移は新規な逐次相転移である可能性が明らかになった。

9. $\lambda\text{-(BETS)}_2\text{FeCl}_4$ の強磁場下の磁化測定と磁化測定装置の開発

上遠野 貴

有機伝導体 $\lambda\text{-(BETS)}_2\text{FeCl}_4$ は 8 K 以下の低温では反強磁性絶縁体であるが、磁場を二次元伝導面に平行に印加すると金属相へ、さらに強磁場下で超伝導相へ転移する。最近、6 T 以上の磁場下における絶縁体領域と磁場下金属相で異常な比熱の振る舞いが観測された。この物質は伝導電子と局在スピントが共存・競合した特異な系である。従って、この系の磁場下における磁氣的性質を明らかにするこ

とは大変重要である。本研究では、強磁場下で磁化測定を行うことを目的にホール素子を利用した測定システムを構築した。システムの評価には Nb を用い、その明瞭な超伝導転移現象を観測した。

10. λ -(BETS) $_2$ Fe $_{0.8}$ Ga $_{0.2}$ Cl $_4$ の常磁性金属－反強磁性絶縁体転移における熱力学的な考察

實方 博規

表題物質は零磁場、低温で Fe の 3d スピンが原因と思われる反強磁性絶縁体転移を起こすが、その転移機構は不明である。本研究ではこの原因を探るため Fe を Ga で置換することで局在 3d スピンを薄めた混晶系を用いて、転移および磁場中で観測される磁場誘起金属相を磁場の影響が及ぶ広い温度範囲で測定可能な比熱測定装置を構築し調べた。その結果、 π スピンの磁場を感じた 3d スピン起源の余剰比熱より転移温度、 π が作る内部磁場が Fe 濃度に対して増大することを確認し、磁場誘起金属相近傍の強磁場下で温度に比例する異常比熱を観測した。

表面物理

11. 昇温脱離法による石英ガラスへの水の吸着・吸蔵状態の観察

永吉 恵

ガラスの水の吸着、吸蔵状態を観察するため、石英ガラスの TPD(Temperature Programmed Desorption)スペクトルを測定した。試料は三菱ユニテック社製の粒径約 0.1mm の粉状石英ガラスを使用した。設定した試料温度変化を行うため、熱電対出力をフィードバックし試料昇温電源を制御するシステムを製作した。本実験では一定昇温速度 (10°C/min) で行い、二次電子増倍管により信号を増幅し四重極型質量分析計で分析 ($1 \leq m/e \leq 60$) した。排出された主なガスは質量電荷比で 1, 2, 17, 18, 44 であり、これらの TPD スペクトルを測定した。質量電荷比 18 の TPD スペクトルには約 300, 800°C にピークが現れた。

12. 電解イオン顕微鏡による W ティップの観察

入船 あゆ

電解イオン顕微鏡(FIM)により、W ティップ先端の(011)面付近の原子配列を観察した。W ティップを 800°C で 120 秒加熱し、その直後液体窒素で冷却した。結像ガスとして、ヘリウム(He)またはネオン(Ne)を使用し、ティップ電圧は 18~25 kV で 1 kV ずつ電圧を上げていき FIM 像の撮影を行った。観察したスクリーンには、リング状に配列した結晶面が観察され、結晶面の距離とティップ - スクリーン間の距離及び各面方位のなす角度より、観測された結晶面では(011)と{012}の1つであると分かった。

13. 原子間力顕微鏡 (AFM) によるゲータイト (FeOOH) 劈開面と Cd 蒸着面の観察

川島 悠司

真空中における AFM 観察の際、排気装置の音と振動が画質を低下させる。本研究では、油回転ポンプの音と振動を防ぐため、遮音壁を作成し、AFM 画像の画質向上に成功した。土壌鉱物の一種であるゲータイトを大気中で劈開し、真空中 (10^{-3} Pa) で AFM 観察を行った。また、劈開面に Cd を蒸着し、AFM 観察を行った。AFM の走査条件は、コンタクトモード、走査範囲 15nm×15nm、走査速度 0.033clock/ms で行った。ゲータイト劈開面は主に (010) 面により構成されていることが明らかとなった。ゲータイト劈開面一層目の O^{2-} と二層目の O^{2-} に Cd が吸着した画像が得られた。

14. 電子衝撃脱離(ESD)法によるステンレス隔膜の水素透過特性

平田 健一郎

金属中における水素挙動を調べるため、ステンレス隔膜の背面側を 0.05MPa の水素雰囲気中に曝し、観察面に拡散・透過する水素の表面水素濃度分布を、走査型電子顕微鏡を用い、ESD イオン像として二次元的に観察をした。隔膜試料は、厚さ 200 μm 、結晶粒径約 100 μm のオーステナイトステンレス鋼(SUS304)を用いた。観察は、室温から 300 $^{\circ}\text{C}$ まで試料を段階的に加熱し、行われた。以前行った厚さ 100 μm (結晶粒径と同程度)の試料と異なり、残留水素の寄与が大きく、また、表面濃度の増分が低いことから、試料を横断する結晶粒界が水素拡散に影響する可能性を示した。

基礎物理学

15. エアロジェルチェレンコフカウンターの基礎特性

清水 健志

エアロジェルチェレンコフカウンターは CP 対称性の破れを実証する Belle 実験で使用された検出器である。このエアロジェルは体積のおよそ 90%以上が空気から構成されているので密度が 0.02~0.32g/cm³ととても軽いうえに優れた耐熱性を併せ持ち、なおかつ屈折率が 1.01~1.06 と気体と液体の間の値を持つ特殊な固体である。本研究では、エアロジェルチェレンコフカウンターの基礎特性を調べ、宇宙線を検出する実験を行い、しきい値型検出器としての動作の確認を行った。

16. ダブルハイパー核探索のための全面探索法の開発

川口 翔

E373 実験において製作された原子核乾板には、大量の素粒子反応がミクロン精度で記録されている。これらを全て目視で解析するのは膨大な時間がかかるため、コンピューターを使ったオートスキャンを使用し、素粒子反応を抽出して解析を行う。乾板の 5.0mm × 2.5mm の領域の素粒子反応を目視で数え、素粒子反応の密度は 1mm² あたり 11.2 個と測定できた。同じ領域に対してオートスキャンを行い、目視で見つけた反応数との比をとったものを検出効率とすると、42.1%である。このことからオートスキャンはまだ改良が必要であることがわかった。

17. 大角度最小電離粒子における銀粒子密度の測定

花井 義正

原子核乾板に写る荷電粒子飛跡の銀粒子は、荷電粒子が乾板中を通過するときの電離作用により生じた潜像核がもととなり、現像処理によって形成される。電離損失は荷電粒子の電荷や速度に依存するので、銀粒子密度(単位長さあたりの銀粒子数)の違いから荷電粒子の識別が出来る。本研究では、乾板の垂線に対する傾きが $\tan\theta = 0.8 \sim 3.5$ までの大角度飛跡の銀粒子密度を測定した。傾き $\tan\theta = 0.8, 1.0, 2.2, 3.5$ の飛跡に対して、銀粒子密度の平均値は、それぞれ 43.4 ± 0.5 , 42.5 ± 0.5 , 33.4 ± 0.7 , 29.2 ± 0.9 銀粒子/100 $\square\text{m}$ と測定でき、大角度飛跡でも銀粒子密度の測定が可能であることがわかった。

18. 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

酒井 美幸

OPERA 実験はニュートリノ振動を観測することによりニュートリノに質量があることを示す出現型の国

際共同実験である。スイスの CERN からイタリアの Gran Sasso 研究所にミューニュートリノビームを打ち込み、ミューニュートリノからタウニュートリノへの変化を原子核乾板で観測して検証する。そのためにはまずニュートリノ反応点を見つけ出さねばならない。私は 13 事象の反応点探索を行い、9 事象においてニュートリノ反応点を確定させた。3 事象は再解析が必要であると結論した。最後にミュー粒子の見つかっていない事象について、大角度飛跡読取装置を用いて詳細解析を行った。

19. 宇宙線を用いたミュー粒子の磁気モーメントの測定

庵 翔太

一様な磁場中においてミュー粒子のスピンは歳差運動を行う。本実験では約 36 G の磁場中で宇宙線由来の正の電荷を持つミュー粒子を崩壊させる。その崩壊により陽電子が生成され、放出方向はミュー粒子のスピンの方向とほぼ同じである。陽電子をシンチレーションカウンタで検出し、陽電子の検出数の時間変化から歳差運動の角速度が求められる。25 日間のデータ収集により、19193 個のミュー粒子崩壊が観測でき、歳差運動の角速度からミュー粒子の磁気モーメントを測定した。その結果、ミュー粒子の g 因子の値が 1.73 ± 0.29 と算出できた。

コアサイエンス

20. 音に関する演示実験・工作・体験ができる教材の開発

米川 雅大

本研究では、音に関する演示実験・工作・体験ができる教材の開発をした。音の実験・工作の教材は、振動が分かるもの、干渉が分かるもの、伝搬するもの、高低が分かるものを計 10 つ作り、小学校、科学館、大学で実践をした。その結果、音に関する知識の乏しい小学生でも、楽器など身近な例に結びつけて考え、興味関心をもって教材を体験できた。音の振動、伝わり方に一定の理解が得られ、家で作りたいという意見もあった。また、教職を目指す大学生からは、これまで見たことがなかったという意見や教材に対する肯定的な意見も得られた。

21. YY 式簡易 GM 計数管を活用した放射線教育

中井 洋輔

現行の中学校では、中学 3 年生において放射線の学習が入り、放射線教育が重視されてきている。本研究では、まず YY 式簡易 GM 計数管を製作した。電圧の安定化を図り、センサー部分の固定の工夫を施し、安定して動作する条件を探った。また GM 管を活用した放射線に関する実践を、小学校・大学生・科学館の入場者を対象に実施した。質問紙により児童・生徒の放射線に関する意識の変容と教材としての有効性を調査した。その結果、児童の放射線に対するイメージは肯定的に変化し、大学生からは GM 管は放射線実験教材として良いという指摘を得られた。

22. 学校での普及を目指した放射線教材としての拡散霧箱の開発

井上 大佑

本研究では、大学生、小学生を対象に放射線教材としての霧箱の教材の可能性を検討した。その結果、学習者は放射線に対して怖いや人工的なもの、医療で使われる等の限られた知識しか持っていないが、霧箱を用いることで興味を持って放射線について学ぶことができた。そこで、霧箱を学校でさらに普及させ

るため、費用を抑えながら霧箱製作を行った。蒸発させる液体にエタノールやエチレングリコールを用いること、下部の冷媒に寒剤を用いること、上部を電熱線で加熱することを行い、霧箱での放射線観察の適正条件を探った。

数学教室（野田研）

23. 結晶格子の幾何学的構造と格子上ランダム・ウォークのシミュレーション

中村 昂輝

本研究では、抽象的グラフとして定義される結晶格子の幾何学的構造について、対称性と最小原理の観点から考察を行った。対称性は結晶格子を不変にする合同変換の群によって特徴付けられる。最小原理は結晶に対してのポテンシャル・エネルギーに関するものである。以上 2 つの観点から、平面では蜂の巣格子、空間ではダイヤモンド格子が最大対称性をもち、かつエネルギーを最小にするような結晶格子であることが分かった。また、結晶格子上のランダム・ウォークの推移確率は最小原理を反映していることが知られている。これに関して Mathematica を使ってシミュレーションを行って確認した。

宇宙・素粒子

24. ダークマターの速度分布の時間発展

渡貫 雄矢

現在みられるような宇宙の大規模構造等の形成には、ダークマターが重要な役割を果たしていると考えられている。本研究では、銀河団程度の大きさの天体中でのダークマターの速度分布の時間発展を、重力多体シミュレーションを用いて数値的に計算した。それにより、銀河団に付随するダークマターの速度分布は時間と共にマクスウェル分布に近づきはするが、現在の宇宙年齢に達してもずれることが分かった。さらに、銀河団の内縁・外縁部で分けて計算した結果、ずれの原因は外縁部における物質の降着によるものであることが分かった。

25. 銀河団密度分布の時間発展

山本 滉

ダークマターが支配的な宇宙では、銀河団は普遍的な密度分布をとることが大規模数値計算により示唆されている。しかし、その物理的根拠については十分に明らかになってない。そこで本研究では、数値計算を用いて銀河団の密度分布の時間発展を調べた。その結果、銀河団内縁部は早い段階で一定の密度分布に落ち着くが、外縁部ではその後も降着が続き密度分布が変化することがわかった。現時点では銀河団内縁部のデータ量が少なく誤差が大きいため、数値計算の粒子数を増やすことで銀河団のより内側の領域を確認できるようにしていく。

26. 重力レンズ効果を用いた質量測定の密度分布依存性

富永 浩太

重力レンズ効果は、天体の質量を測定する上で有用な手段であるが、天体の密度分布により得られる質量に違いが生じる。本研究では銀河団を対象とし、密度分布が質量測定に与える影響について調べた。密度分布は特異等温球と、大規模数値計算から示唆される密度分布の 2 つを用いた。その結果、同一のアイシュタイン半径を持つ密度分布に対してビリアル半径内の質量を比較すると、約 2 倍の違いが生じるこ

とがわかった。また、天球面上に射影された質量と、球対称を仮定した質量を比較すると、数十%の違いが生じることがわかった。

27. 強い重力レンズ効果を用いたハッブル定数の推定

廿浦 稜介

一般相対論から導かれる重力レンズ効果によって、遠方の天体が複数の像を形成する場合、形成されたそれぞれの像からの光が観測者に到達する時間は異なる。その時間差は、観測者、レンズ天体、光源天体の間の宇宙論的距離とレンズ天体の密度分布に依存する。本研究では、2つの像が現れている系について、質点、特異等温球、大規模数値シミュレーションによって導かれた密度分布の3つのモデルを仮定してハッブル定数を推定した。そして、それらの結果を、セファイド変光星の距離測定結果から導かれたハッブル定数の値と比較することで、レンズ天体の密度分布にはどのモデルが適するのかを考察する。

28. 相対論的效果による補正の有無による GPS の測定位置の違い

富張 貴敏

GPS は米国が軍事用に開発した位置測定システムで、現在では一般向けとして、カーナビ等のナビゲーションシステムや、携帯電話等で位置を知るために使われている。GPS で知る事が出来る位置情報は数mから数十mの精度で知る事が出来る。しかし相対論的效果を考慮せずに GPS を運用した場合は正確な位置情報が得られないといわれていて、そのずれは一日当たり約 12km になる。この論文ではこの相対論的效果によるずれの大きさを計算より求め、一日当たり約 12km になることを確認し、GPS の運用には、相対論的效果の補正が不可欠であることをみる。

29. GPS の相対論的補正

志村 龍二

GPS は人工衛星から発信された電波を地球上で受信し自分の位置を正確に割り出すシステムで、カーナビや携帯電話などに使用され、現代社会において必要不可欠なものである。GPS は時間補正をしなければ1日に約 12km 測定位置がずれることが知られおり、正確な位置を割り出すことができない。本論ではニュートン力学のケプラー問題を相対性理論に拡張し、摂動を用いて計算する。その結果、特殊相対性理論の効果は人工衛星の時間を地球上の時計と比べ遅らせ、重力の影響は衛星の時計を早める効果があることが確認できた。

[平成 26 年 2 月 14 日(金)]

生命圏環境創成科学教室（佐藤研）

30. 小型容器内における可燃性気の爆発現象

茂手木 昭太

本実験では、過去に制作された内部の一辺が 160 mm の立方体でできた爆発容器を使用した。この容器の一对の側面には容器の内部を観察するために光学ガラスがはめ込まれている。残りの側面の片側の中央には直径 60mm の開口があり、この開口部に円形型の穴をあけたアルミ板とゴムパッキンで、脆弱部材料となるトレーシングペーパー及びアルミホイルを挟んだものを取り付けて脆弱部とした。実験は、純空気とメタンガスの当量比、着火位置、脆弱部の直径、脆弱部の強度それぞれを変化させた。結果、実験条件変えたことで容器内における火炎の形状及び圧力波形に変化がみられた。

量子エレクトロニクス

31. ガラスキャピラリー外壁への真空蒸着による透過率及び回折縞の影響

北崎 俊光

本研究ではガラスキャピラリーを製作し、ガラスキャピラリーにレーザーを照射し、透過率と Beam Divergence を測定した。また、レンズで一度集光させてからキャピラリーに照射させ同様に測定した。レーザーはアルゴンイオンレーザー(488nm)と He-Ne レーザー(633nm)の二種類を使用した。また、ガラスキャピラリーの外壁に金属を蒸着させ、同様に測定を行った。金属を蒸着すると、レンズありレンズなしどちらも透過率に変化はみられないが、余分な光が取り除かれて、回折縞が鮮明になった。

32. ガラスキャピラリーの回折縞の光強度分布及び拡がり角の測定

吹屋 快羽

本研究ではガラスキャピラリーの透過光による回折縞の研究を行った。出口径が 40 $\mu\text{m}\phi$ から 10 $\mu\text{m}\phi$ 間隔で 100 $\mu\text{m}\phi$ までの計 7 本のガラスキャピラリーを 2 セット作製し、ガラスキャピラリーの回折縞の光強度分布、拡がり角の測定及び円形開口の光強度分布の測定を行った。回折縞は 1 次、0 次、2 次... の順で光強度が高くなり、円形開口の光強度分布と異なることが観測された。拡がり角は高次の回折縞においては出口径が大きくなるほど大きくなることがわかった。

33. ガラスキャピラリーの透過光による回折縞及び光強度分布の研究

伊藤 有矢

本研究の目的は、細胞照射におけるマイクロ光ビームの生成において、ガラスキャピラリーの回折縞の光強度及び、拡がり角の測定である。出口径 40 μm から 100 μm までのガラスキャピラリーを作製、回折縞を観測し、次数ごとの光強度、透過率及び拡がり角を測定した。1 次の回折縞の光強度は、0 次よりも高く、全体強度の 60% 程度を占めている事が分かった。一方、拡がり角は、0 次を除いて出口径が高くなるにつれて、増加した。

34. Ba 原子の $6s5d\ ^3D_2 \rightarrow 5d6p\ ^3F_2$ 遷移におけるゼーマン効果の測定

縄谷 友哉

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、高励起状態における Ba 原子のゼーマン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 $6s5d\ ^3D_2$ に占有させ、 $6s5d\ ^3D_2 \rightarrow 5d6p\ ^3F_2(778.0\text{nm})$ 遷移のゼーマンスpekトルを観測した。強さ 28G から 122G までの磁場をかけ、ゼーマンスpekトルを詳しく測定した。下準位 $6s5d\ ^3D_2$ の g 因子を 1.1477(85)、上準位 $5d6p\ ^3F_2$ の g 因子を 0.7746(51)と決定できた。

35. Ba 原子の高励起状態におけるゼーマン効果の測定

伊東 大海

高励起状態における Ba 原子のゼーマン効果の研究を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行った。蒸気化した Ba 原子に電気放電を用いて基底状態 $6s^2\ ^1S_0$ から準安定状態 $6s5d\ ^3D_2$ に占有させ、 $6s5d\ ^3D_2 \rightarrow 5d6p\ ^3F_2(778.0\text{nm})$ 遷移のゼーマンスpekトルを観測した。磁場を 28G から 114G まで印加し、ゼーマンスpekトルを詳しく測定した。下準位 $6s5d\ ^3D_2$ の g 因子を 1.1477(85)と決定し文献値 1.18 とほぼ一致した。さらに、上準位 $5d6p\ ^3F_2$ の g 因子を 0.7746(51)と初めて求めた。

36. レーザー誘起蛍光(LIF)法分光装置の製作

山田 紘太郎

本研究では、光源として半導体レーザーを用いたレーザー誘起蛍光 (Laser-induced fluorescence: LIF) 法による分光装置を製作した。また、より効率的に実験を行うために、Visual Basic 6 を用いた、波長掃引を微細に制御し経過を可視化するプログラムを作成した。さらに製作した分光装置を用いて、セル内の気圧が約 0.025torr の状態で LIF 法によりヨウ素の蛍光spekトルを観測した。セル内の気圧が一気圧の状態でも同様の実験を行った結果、蛍光spekトルを観測することはできなかった。

37. 半導体レーザーを用いた LIF 法による分光装置の製作

豊田 智大

原子の蛍光spekトルを観測し超微細構造や同位体シフトの研究を行うため、半導体レーザーによる分光装置を製作した。分光装置は、ヨウ素セル、真空ポンプ、外部共振器型半導体レーザー、DC電源、デジタルマルチメーター、光電子増倍管、ロックインアンプ、およびPCなどにより構成されている。PCにはVB6によって書かれたアプリケーションが組み込まれており、このアプリケーションのために、ヨウ素spekトル測定に適したコードを作成した。この装置を使ってヨウ素の LIF spekトルを測定した。

38. 炭素線の照射野効果におけるレンジシフター依存性についての研究

篠崎 真里

がん治療の有効な治療法の一つとして重粒子線（炭素線）治療が使用されている。治療にあたってこれまで、患者に照射する前に必ず治療と同様の体系で照射線量の校正定数を測定で求めなければならなかった。校正定数を測定によらず計算で求めるには照射野効果の正確な導出が必要である。本研究では、重粒子線治療におけるこの照射野効果を 2 つのガウス関数でビームを記述することにより再現した。この関数のレンジシフター依存性を調べ、パラメータの物理的な意味を求めることを目的とする。

39. プロペラ型モジュレータを用いた炭素ビームの線質と生物効果の評価

三上 集

異なるエネルギーのイオンビームを同時に照射した際の細胞生存率を予測した。厚さ 9cm アルミ板からなる 2 枚羽根のプロペラ型モジュレータを用い、これにがん治療用の 290MeV/n 炭素ビームを通して、エネルギーの混合状態を実現した。通過後のビームの線量・線質について、電離箱線量計、組織等価比例計数管での実測と GEANT4 によるシミュレーションとの比較を通じて評価した。その結果から細胞生存率を予測し、混合エネルギーの生物効果を評価した。

40. 動的光散乱法による温度の測定

赤松 直樹

溶液中に分散した微粒子は、通常ブラウン運動をしており、その動きは大きな粒子では遅く、小さな粒子になるほど速くなる。動的光散乱法では、ブラウン運動をしている粒子にレーザー光を照射し、その散乱光を光電子増倍管で観測する。測定結果から温度が上がると拡散係数が増え、粒子が速く動くことがわかった。また、散乱光変動の振る舞いを周波数分析した結果温度に対する依存性が、水の粘性係数の温度依存性とほぼ一致することから、拡散係数は粘性による影響が大きいと考えられる。よって基準となる温度が分かれば粘性係数との比から温度推定が可能になる。

41. 動的光散乱法による温度の測定

兼本 春希

溶液中に分散した微粒子はブラウン運動をしていて、その動きは大きな粒子では遅くなり、小さな粒子では速くなる。動的光散乱法では、ブラウン運動をしている粒子にレーザー光を照射し、その散乱光を光電子増倍管で観測を行う。測定の結果から、温度が上がると拡散係数が増加するので粒子が速く動くことがわかった。この動きをフーリエ変換した結果、周波数成分の温度依存性が確認された。よって、基準となる温度と比較すれば温度推定が可能になると考えられる。

物性理論

42. 磁性多層膜を用いたスピントルク発振の数値的研究

北島 治城

強磁性体に電流を流すことで、磁化の空間的構造を変化させることが知られており、これはスピントルク効果と呼ばれている。本研究では、強磁性多層膜に交流電流を印可したときのスピントルク効果について理論的な研究を行った。特に、ある周波数で磁化が大きく歳差運動をするスピントルク発振について研究を行った。研究では、2 層系と 3 層系のスピントルク発振について研究を行い、より大きな発振が得られる条件について調べた。

43. 電場誘起磁化反転に対する数値的研究

手塚 貴之

強磁性薄膜に電場を印加することで、磁気異方性を変化させることができる。この電場を制御することで、強磁性体中の磁化の向きを反転させることが可能である。この磁化スイッチングについて理論的に研究を行った。具体的には、磁気異方性を取り込んだ Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式を数値的に解いた。研究

の結果、磁化の歳差運動の周期の約半分の時間のパルス電場を印加することで、磁化スイッチングが可能であることが明らかになった。

44. Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用を有する強磁性体中のスピントルク効果

渡辺 広紀

空間的な磁化構造を有する強磁性体中に電流を流すと、伝導電子のスピンと磁化の交換相互作用により、磁化構造を変化させることが出来る。このスピントルク効果と呼ばれる現象を用いると、電流によって磁壁を移動させることが可能になる。本研究では Dzyaloshinskii-Moriya(DM)相互作用を有する強磁性体中のスピントルク効果について数値的に調べた。具体的には、磁化のダイナミクスを表す Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式にDM相互作用やスピントルクの効果を組み込み、4次の Runge-Kutta 法を用いて、磁壁の移動を調べた。計算によってDM相互作用を増加させると磁壁の移動速度が減少することが分かった。

45. ホップフィールドモデルにおけるパターン想起の研究

岡田 和也

ニューラルネットワークにおけるホップフィールドモデルを用いて人間の記憶したものを想起する過程を数値的に調べる。思い出す過程で陥ってしまう偽記憶（ローカルミニマム）から脱するために反学習という作業を行い、想起性能を高めることを試み、反学習の有無による想起成功確率、偽記憶到達確率の比較を行った。そして、想起性能が高いプログラムを用いて初期状態に数パターンのノイズを与えることで想起成功確率にどのような影響を及ぼすか、反学習の有無でどのような違いが現れるのか調べた。

46. 厳密対角化による2次元六角格子模型の状態密度計算

中川 和也

グラフェンの電子状態を調べるためのモデルとして、2次元六角格子上の強束縛模型を考え、その電子状態を厳密対角化の手法により調べた。特に、数値的に得られたエネルギー固有値から状態密度を求めた。2次元六角格子模型にケクレ型のボンド秩序が存在するとき、フェルミ面上にエネルギーギャップが生じることが知られているが、こうしたギャップの生成の確認、および不純物によるランダムネスの効果などについて定量的に調べた。

47. ケクレ型ボンド秩序があるグラフェンのドメイン境界における局所状態密度

井上 裕哉

グラフェンにケクレ型のボンド秩序があると、フェルミ面上にエネルギー・ギャップが生じ、ゼロエネルギー・ランダウ準位も分裂を起こす。このようなボンド秩序にドメイン境界があると、境界付近に局在した状態がエネルギー・ギャップ中に存在することが知られている。今回、3つのドメイン境界が交わる系の局所状態密度を数値的に調べた。計算の結果、境界の交わる点において、蜂の巣格子の片方の副格子上にゼロエネルギーの状態が存在することが確認できた。このドメイン境界に現れるゼロエネルギー状態の性質について議論する。

磁気物性

48. スピネル化合物 $\text{Co}(\text{Al}_{1-x}\text{Rh}_x)_2\text{O}_4$ の B サイトの乱れがスピン液体状態に与える効果

井出 優佑

本研究では B サイト元素の Al のみを Rh で置換したスピネル化合物 $\text{Co}(\text{Al}_{1-x}\text{Rh}_x)_2\text{O}_4$ ($x = 0.0 \sim 0.15$) を固相反応法で作製し、その x - T 磁気相図を実験的に得た。その結果、 $x \sim 0.1$ の B サイトの乱れでスピン液体(SL)状態からスピングラス(SG)状態へ転移することがわかった。しかし、 CoAl_2O_4 の A、B 両サイト間の乱れの研究でみられた SL と SG の中間状態は現れなかった。また、A、B 両サイト間の乱れの場合より大きい x で SG に転移した。

49. アモルファス GdSi の作製と金属絶縁体転移近傍でのスピングラス転移の性質

酒井 晶

スピングラス (SG) であるアモルファス (a-) GdSi をスパッタリング法により、最適な条件を探り作製した。MPMS で交流磁化率 χ_{ac} 、直流磁化率の測定を行った。その結果から H - T 相図を作成し、理論的に示された SG の基準となるカノニカル (c-) SG の性質と比較した。 $\text{Gd}_{0.155}\text{Si}_{0.845}$ は投入電力が 40 W、Ar 流圧が 10 mTorr の条件下でアモルファス構造が得られ、 χ_{ac} でのカスプの存在、磁場中での二段階の磁氣的凍結、 H - T 相図内の臨界曲線など c- SG で得られる特徴が観測された。これは a- GdSi が金属絶縁体転移近傍で c- SG 的な SG 転移を起こしている事を示している。

50. Fe 単層膜の残留磁化におけるスローダイナミクス

松本 賢人

薄膜での強磁性体のスローダイナミクス(磁気余効)はこれまであまり詳細に研究されていない。そこで、MBE 装置によって厚さ 40 Å の Fe 薄膜を基板温度 $T_s = 300$ °C と 400 °C の条件で MgO 基板上にエピタキシャルに成長させ、熱残留磁化の時間変化を調べた。この結果、 10^4 秒の間に 5 % 程度の残留磁化が変化した。また、縦軸を熱残留磁化、横軸を時間の対数でプロットした時のグラフの傾き(磁気粘性 S)は結晶性の高い $T_s = 300$ °C で作製した時の方が小さくなった。これは、磁壁が格子欠陥や不純物によって妨げられながら移動する事が原因と考えられる。

51. 磁性誘電体 EuTiO_3 の Ti サイト置換が磁性に与える効果

高橋 和之

EuTiO_3 は反強磁性常誘電体であるが、 Ti^{4+} を価数の異なる Al^{3+} 、 Ga^{3+} で 10 % 程度置換すると強磁性絶縁体に変化する。本研究ではその起源を明らかにするために、 Al^{3+} 、 Ga^{3+} と同じ電子配置を持つが価数の異なる Si^{4+} 、 Ge^{4+} で Ti^{4+} を置換した試料を固相反応法により作製し、その磁氣的性質を直流磁化測定により調べた。その結果、 $\text{EuTi}_{1-x}\text{Si}_x\text{O}_3$ 、 $\text{EuTi}_{1-x}\text{Ge}_x\text{O}_3$ ($x \approx 0.1$) においては、強磁性相は現れなかった。この結果は、 Eu^{2+} 、 Eu^{3+} の混合原子価が強磁性相の出現に重要であることを示唆している。

52. A サイト秩序型ペロブスカイト酸化物 $\text{REBaMn}_2\text{O}_6$ ($\text{RE} = \text{希土類}$) の RE サイトの乱れが磁性に与える効果

佐藤 里砂

A サイト秩序型ペロブスカイト酸化物 $\text{REBaMn}_2\text{O}_6$ ($\text{RE} = \text{希土類}$) は室温で超巨大磁気抵抗効果の発現が期待されている。本研究では $\text{REBaMn}_2\text{O}_6$ の RE サイトに、イオン半径に差のある La^{3+} と Eu^{3+} を固溶させた試料を固相反応法で作製した。この試料の磁化測定を行い RE サイトに導入された適度な大きさの乱れが

(1) 電荷・軌道秩序絶縁体相、強磁性金属相及び A 型反強磁性相に与える効果、(2) これらの電子相が形成する多重臨界点に与える効果、を調べた。その結果、多重臨界点は予想よりも RE サイトの平均イオン半径が大きい方へと移動することが分かった。

53. ハニカム型格子を持つ $\text{Co}_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ の合成と逐次磁気相転移

藤井 沙織

$\text{M}_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ ($M = \text{Fe}, \text{Zn}, \text{Mn}, \text{Co}, \text{Ni}$) は神岡鉱型構造を持っており、 M サイトはハニカム型格子を形成している。しかしその磁性の詳細は $\text{M}_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ 単相試料を得ることが困難であるため明らかではない。本研究では、 CoO , MoO_3 , Mo を所定のモル比になるように秤量・混合し、石英管に Zr とともに真空封入した状態で焼成を数回繰り返すことで、不純物相の少ない $\text{Co}_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ を作製することに成功した。磁化測定の結果、40 K と 10 K 付近に磁気転移が観測された。40 K 付近ではハニカム型格子面内で磁気秩序が生じ、10 K 付近ではハニカム型格子面間の磁気秩序が生じているものと考えられる。

原子過程

54. イオン付着飛行時間型質量分析装置における第三体ガスの流れのシミュレーション

山口 優大

イオン付着飛行時間型質量分析装置は、イオン化にフラグメンテーションを極めて起こしにくいイオン付着法を使用しているため、イオン源の真空度は 100Pa 程度でイオンの平均自由行程が非常に短く、電子レンズによるイオンの輸送は難しい。実際にはイオン源では、ガスの流れによってイオン輸送が行われていると考え、本研究ではガスの流れのシミュレーションを行った。その結果、イオンはガスの流れによってイオン源の外へと出ていくことがわかった。

55. イオン付着飛行時間質量分析装置の安定性の向上

笠川 勝昭

本研究室はイオン付着法を用いた飛行時間質量分析装置を開発し、呼気分析に応用することを目指してきた。イオン付着法はフラグメンテーションを極めて起こしにくく、気体試料を壊さずにイオン化することができるため未知試料の同定を容易に行うことができる。しかし、これまでの研究では時間とともに最適な条件が変化してしまい、マススペクトルをうまく観測できなくなってしまうことが指摘されていた。そこで本研究では、イオンを導くレンズの電圧設定を変える等、様々な条件下での測定を行い、装置の安定性について検討した。

56. 電子衝撃による窒素分子の崩壊過程

高橋 七都子

分子に電子を入射しエネルギーを与えると、分子は励起やイオン化し、解離を起こすこともある。本研究室では数 100eV の電子衝撃を用いて、窒素分子などの分子の崩壊過程を研究してきた。本実験では、入射エネルギー 200eV のパルス化の調整を行い、窒素分子から生じるフラグメントイオン N^+ を飛行時間型質量分析計で測定し、窒素分子が解離する際に生じる余剰エネルギーを算出した。将来的には窒素分子のイオン化収率を導出することで、窒素分子の光学的禁制な超励起状態の存在の解明を目的としている。

57. Ar⁺イオンビーム照射によりタングステン表面からスパッタリングされた励起原子の発光スペクトル**加賀 暁子**

イオンビームを固体表面に照射すると入射イオンは固体内部でカスケード衝突を繰り返し、固体表面を構成する原子が真空方向に弾き出されることがある。このことをスパッタリングといい、核融合ではスパッタリングされた原子が核融合プラズマ内に混入することが問題となっている。本実験では入射イオンビームとしてAr⁺イオンを選び、入射エネルギーを 15、23、25、30keV と変えた場合の発光スペクトルから入射エネルギー依存性の測定を行った。その結果スペクトルの形状に大きな変化は無いことがわかった。

58. 蛍光 X 線測定による ²³⁹Pu 放射能決定法の検討**栗野 嗣史**

長半減期の放射性核種（たとえば ²³⁹Pu）は単位放射能あたりの原子数が多いので、蛍光 X 線（試料に照射させることにより放出される特性 X 線）の測定によって放射能の定量が可能であると予想される。特に単色化された X 線を照射するモノクロモードでは試料に対する放射線量を軽減できると期待されている。本研究では、²³⁹Pu からの蛍光 X 線（L α ）の測定を試み、²³⁹Pu 放射能決定法を検討した。また、放射能と蛍光 X 線の信号強度は比例関係であると考えられるので、それを用いて検出下限放射能を 6.6 kBq と求めた。

修士・博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。

修士課程（講演 20 分、質疑 5 分）

平成 25 年 2 月 20 日（木）

[表面物理]	9:00 ~ 9:50
1. ステンレス表面上の透過水素分布の観察	鈴木 真司
2. XPS による goethite 表面におけるカドミウム吸着形態の観察	丹羽 響太
[量子エレクトロニクス]	10:00 ~ 10:25
3. テーパー型ガラスキャピラリーを用いたマイクロ光ビームの研究	加藤 恭平
[宇宙・素粒子]	10:35 ~ 11:25
4. 電弱統一理論におけるヒッグス粒子の役割とその質量	齋藤 敬介
5. AD/DA 変換器を使用したサブミリ波カメラの読み出し回路計測システムの開発	渡辺 動太
[物性物理]	12:30 ~ 14:10
6. $\text{Et}_2\text{Me}_2\text{Sb}[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$ のゼーベック係数、電気抵抗の圧力下測定	栗竹 広大
7. 有機導体 $\kappa\text{-(BETS)}_2\text{FeX}_4$ ($\text{X}=\text{Br}, \text{Cl}$) の磁場下での電子状態	奥澤 唯
8. $\lambda\text{-(BETS)}_2\text{Fe}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Cl}_4$ の常磁性金属-反強磁性絶縁体転移における Fe の役割と強磁場下での比熱の振る舞い	山本 友介
9. 分子性ディラック電子系への正孔注入効果と量子伝導現象	山内 貴弘
[物性理論]	14:20 ~ 15:10
10. ディラック電子系の $n=0$ ランダウ準位における量子ホール転移の臨界指数	馬場 広大
11. 3 層グラフェンのゼロエネルギー・ランダウ準位のランダムネスに対する安定性	坂本 紘樹

平成 25 年 2 月 21 日（金）

[基礎物理]	9:00 ~ 11:05
12. Ashra 実験用光ファイバー伝送系と評価装置の開発	安彦 ちほ
13. Ashra 望遠鏡を用いた大気発光現象による宇宙線観測	鹿子畑千也子
14. Ashra-1 実験におけるトリガー観測装置開発	高田 巧磨
15. Belle II 実験に使用する粒子識別用光検出器 HAPD の放射線耐性評価	浜田 尚
16. OPERA 型エマルション検出器を用いたニュートリノ反応の基礎研究	牧野 隆起
[磁気物性]	11:15 ~ 12:30
17. エピタキシャル Fe/Cr 界面でのフラストレーションによる残留磁化のスローダイナミクスの機構	橋本 拓馬
18. アモルファススピングラス $\text{Gd}_{15.5}\text{Si}_{84.5}$ の臨界現象に与えるランダム一軸異方性の効果	池田 勇人
19. B サイトに乱れを導入したスピネル化合物 $\text{Co}(\text{Al}_{1-x}\text{M}_x)_2\text{O}_4$ ($\text{M} = \text{Rh}, \text{Ga}$) においてスピ液体より生じるスピングラスの臨界曲線の変化	大熊 雄貴

修士論文予稿

1.

ステンレス表面上の透過水素分布の観察

鈴木 真司（表面物理）

近年、金属中の水素の挙動は、水素による金属材料の劣化、水素貯蔵及び超高真空材料の観点から重要な問題となっている。また、核融合炉材料において、燃料である重水素や生成物であるトリチウム回収の観点からも重要な問題となっており、金属中での水素の挙動を直接的・定量的に観察し、水素の存在位置・含有量を明らかにすることが求められている。しかし、金属中の水素の挙動を直接観察することは困難であるため、これまで報告されている研究では、ステンレスの水素脆化を観察するにあたり、ステンレス鋼を電極として用いた電気分解により水素をステンレス鋼中にチャージし、引張試験等で破面の観察をする手法や、臭化銀を用いて水素をマッピングし電子顕微鏡で観察するという手法により行われていた。しかし、それではステンレスに水素が吸蔵・拡散されていく過程が観察できない。そこで我々は、バルクから固体表面に湧出した水素の表面濃度分布を、試料表面のグレイン構造と比較対照することにより、金属中の水素の挙動を解明することを目指す。

本研究では、走査電子線を電子源とした電子衝撃脱離(Electron Stimulated Desorption;以下 ESD)法により表面水素濃度分布を観察している。実験にあたり、試料背面から水素曝露を可能にする試料台を製作し、既存の電子顕微鏡(JEOL JAMP-10)の試料台と取り換えた。試料として冷間加工率が異なる2種類のオーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)を使用した。1つの試料(試料1)は20%、他の試料(試料2)は10%であり、オーステナイト相にマルテンサイト転位が入った構造である。試料1, 2の厚さはそれぞれ $100\mu\text{m}$ と $200\mu\text{m}$ である。超高真空容器(電子顕微鏡試料室)内に試料が取り付けられた水素溜めを設置し、試料背面から供給された水素が、試料に溶解、拡散し、反対側の試料観察面に透過する水素分布を実時間で測定する。試料室の到達圧力は $2.6\times 10^{-7}\text{Pa}$ 、水素室はターボ分子ポンプで排気したのち、 0.05MPa の水素ガスを供給した。試料は背面からハロゲンランプを用いて室温($\sim 300\text{K}$)から 573K まで段階的に加熱し、薄板に直接スポット溶接したT熱電対で温度測定した。表面の幾何学的構造と表面水素濃度分布を調べるために、二次電子像とESDイオン像による観察を行った。加熱の際に起こる熱ドリフトを補正するため、昇温毎に二次電子像をESDイオン像とともに交互に撮影し、測定位置の調整を行った。電子線は試料垂直方向から照射され、ESDイオンは試料法線方向から 45° の位置に設置されたイオン検出器によって検出された。電子線入射時に発生する光や散乱電子はイオン検出器の前に置いた同軸円筒鏡型のフィルターで除去し、ESDイオンのみを検出した。また、ESD実験中の試料室の残留ガスを四重極型質量分析器(QMS)で分析し、ガス放出の99%以上が水素であることを確認している。この結果から試料表面からのESDイオンは、水素イオンと考えて議論する。ESDイオン像は定められた温度に対して10枚連続で撮影し、ESDイオンの累積、および平均で結果を解釈した。試料1における水素の透過測定では、一次元拡散方程式を用いたオーステナイト系ステンレスの水素透過シミュレーションとの比較から、オーステナイト以外の拡散パスの存在が確認された。試料2における水素と重水素の透過測定では、 523K から重水素の透過が確認された。QMSによる試料室の分圧の変化から水素の方が重水素より拡散・透過しやすい可能性が示唆された。また、水素と重水素について、拡散パスに明確な違いは確認されなかった。

2.

XPS による goethite 表面におけるカドミウム吸着形態の観察

丹羽 響太 (表面物理)

土壌は主として岩石や砂などによって構成され、生物活動の影響を受けた地球表面を覆う層のことを指す。

土壌汚染は、この土壌が人間の生産活動により排出された廃液や廃棄物に含まれる重金属・廃油・有機溶剤・農薬などの有害物質によって汚染され、人の健康あるいは環境の保護を考える上で望ましくないレベルを超過した状態である。土壌汚染は大気汚染や水質汚濁に比べて拡散・移動しにくいいため、長期にわたって土壌に有害物質が蓄積される。こうして土壌を汚染した有害物質は健康被害を引き起こす。中でも最も多いのが「経口摂取」で、有害物質を吸収した農作物や有害物質を含有する地下水を摂取することによって健康被害を起こす。こうした被害の代表的なものに、カドミウムの土壌汚染を原因とする公害病として有名な富山県のイタイイタイ病が挙げられる。重金属による土壌汚染は人体への悪影響から幅広く研究されており、土壌物質表面における重金属の吸着形態の解明は汚染土壌の浄化のための基礎研究として重要である。そこで本研究では、土壌鉱物の一種である goethite(α -FeOOH)にカドミウム(Cd)を真空蒸着させ、X 線光電子分光法(XPS)を用いて酸素の光電子のエネルギースペクトル(O1s スペクトル)を観測し、カドミウムの吸着様態に関する知見を得ることを目指し、研究を行った。

土壌を構成する goethite は通常 $1\ \mu\text{m}$ 以下の土壌粘土鉱物であるが、本研究では天然に結晶成長した $10\ \text{mm}$ 四方のものを使用した。goethite の結晶構造は斜方晶であり、1 つの Fe^{3+} に 6 つの配位子(三つずつの O^{2-} と OH^-)が配位結合した $\text{FeO}_3(\text{OH})_3$ の八面体であり、それぞれが繋がる事でシートを形成している。劈開面は主に(010)面があらわれる。

実験は goethite を空気中で劈開した後、試料準備室にセット・真空蒸着・XPS 観察の手順で行った。試料準備室から XPS 観察まではすべて真空中で行った。試料を大気に曝すことで大気成分(特に酸素と水)とカドミウムとの反応による影響が考えられるので、それを避けるためにこれらを真空中で行った。試料準備室と XPS 観察室はゲートバルブにより繋がっており、真空蒸着を行う時は試料準備室、XPS 観察を行う時は XPS 観察室で行うことができる。到達真空はいずれも $10^{-6}\ \text{Pa}$ であった。カドミウムの蒸着量は水晶振動子法を用いて 1, 3, 5 原子層と徐々に増やしていきそれぞれの原子層で XPS 観察を行い、goethite におけるカドミウムの吸着様態を観察した。

XPS 観察において X 線源には $\text{MgK}\alpha$ 線($1253.6\ \text{eV}$)を使用した。結合エネルギーは $\text{Au}4f_{7/2}$ ピーク($83.8\ \text{eV}$)、帯電補正は $\text{C}1s$ ピーク($284.6\ \text{eV}$)を用いた。ピーク形状(peak profile)は Origin 9.0 を用いてガウスフィッティングを行った。観測された O1s スペクトルは goethite を構成する O^{2-} ($530.7\ \text{eV}$)と OH^- ($531.8\ \text{eV}$)のピークで分解できる。これらの強度は O^{2-} のスペクトルの方が大きく、これは酸素が劈開面(010)面を占めていることと一致する。カドミウムを蒸着させると、O1s スペクトルのピークシフトが見られた。これは goethite 表面において構成する O^{2-} と OH^- がカドミウムと結合し、 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ や CdO になったからだと考えられる。1, 3, 5 原子層のカドミウムを蒸着した goethite 表面の O1s スペクトルは O^{2-} , OH^- , CdO , $\text{Cd}(\text{OH})_2$ の 4 つの異なる状態の酸素原子からの O1s スペクトルで分解することができ、その結合エネルギーはそれぞれ $530.7\ \text{eV}$, $531.8\ \text{eV}$, $530.5\ \text{eV}$, $532.6\ \text{eV}$ である。これらのピークを用いて、蒸着量の変化における goethite 表面のカドミウム吸着形態の考察を行った。

3.

テーパー型ガラスキャピラリーを用いたマイクロ光ビームの研究

加藤 恭平（量子エレクトロニクス）

マイクロ光ビームは単一細胞への照射や操作には不可欠である。テーパー型ガラスキャピラリーを用いたマイクロビームは従来の光学レンズと比べ、安価、任意のビームサイズ、照射位置の正確性といったメリットがある。これまでに、ガラスキャピラリーを用いた MeV のイオンマイクロビームの研究は盛んに行われていたがマイクロ光ビームの研究はほとんど報告されていない。東邦大学では、数年前からガラスキャピラリーによるマイクロ光ビームの研究を始め、数%の透過率を得ており、ガラスキャピラリーが高い集光性を持っていることが分かった。しかし、透過率や集光率に影響する要因は全く分かっていなく、透過率による回折光の測定もまだ行われていない。これらの研究は透過率の向上、最適なマイクロ光ビームの生成には必要である。また、透過光の回折縞の研究は光の波動性の理解に役に立ち、物理的にも興味深い。

本研究では、単一細胞に向けてテーパー型ガラスキャピラリーを用いたマイクロ光ビームの生成を目的としている。特に、透過率や集光率に影響する要因、すなわち、キャピラリー形状の影響等を調べ、キャピラリー外壁への金属蒸着を試みてより高い集光率を目指す。また、透過光の回折縞を測定し、従来の円形開口と比べ、キャピラリーにおける光の伝搬の理解に貢献する。

波長 411nm、488 nm、633 nm、670nm の可視光領域でのレーザー源を使用し、ガラスキャピラリーを透過したレーザー光の透過率を測定した。2mmφと 3mmφのガラス管を用いて異なる形状（テーパー角）のキャピラリーを作製し、透過率を測定した。ガラスキャピラリーの形状解析を行った結果、形状によって透過率に影響を与えることが分かった。

ガラスキャピラリー外壁を Ag,Al で蒸着させ、透過率の影響を調べた。蒸着させた場合、透過率への影響はほとんど見られなかったが、透過光の余分な散乱光を取り除けることが出来た。

様々な出口径のキャピラリーに対し、透過光の回折縞を観測した。次数ごとの回折光の強度と広がり角を測定し、円形開口と比較した。回折光の強度は 1 次の方が 0 次より高く、全体強度の 60%程度を占めていることがわかった。回折縞の広がり方は 1 次については、円形開口と同様に出口径が大きいほど小さくなるが、2 次以降では円形開口と異なり、出口径が大きいほど大きくなる結果が得られた。

また、ガラスキャピラリーにおける光の伝搬を理解する為、透過率のシミュレーションを行った。

4.

電弱統一理論におけるヒッグス粒子の役割とその質量

齋藤 敬介（宇宙・素粒子）

現在の素粒子現象のほとんどをほぼ矛盾なく説明する標準模型において、ヒッグス機構は素粒子の質量生成という重要な役割をもっている。この機構で予言されるヒッグス粒子の存在が CERN の加速器 LHC での ATLAS・CMS 実験において確認されたことで、素粒子の質量の起源の理解に貢献した Englert と Higgs に 2013 年度のノーベル物理学賞が授与された。

素粒子の標準模型とは、自然界に存在する 4 つの力のうち、重力を除く 3 つの力（強い力、電磁気力、弱い力）に対する素粒子現象を記述する理論である。また、標準模型はこれら 3 つの力に対する場の理論の組み合わせにより構成される。強い力に対しては $SU(3)$ ゲージ理論である量子色力学、電磁気力と弱い力に対しては $SU(2)_L \times U(1)_Y$ ゲージ理論である電弱統一理論（Weinberg-Salam 理論）で記述される。電磁気力と弱い力が統一されるのは、弱い力のゲージ理論が $SU(2)$ のみでは構築できないことによる。電磁気力に対する理論は、 $U(1)_{em}$ ゲージ理論の量子電磁気学であり、朝永、Schwinger、Feynman らによりつくられた。長距離力である電磁気力を媒介するゲージ粒子は光子であり、質量をもたない。一方、弱い力は短距離力であり、それを媒介するゲージ粒子は非常に重たいと考えられていた。弱い力に対するゲージ理論は $SU(2)$ のみでは実験事実と一致せず、 $SU(2)_L \times U(1)_Y$ ゲージ理論という形で電弱統一理論として、Glashow により試みがなされた。その後 Weinberg と Salam により独立に、ヒッグス機構が導入され、電弱統一理論がつくられた。この理論では $SU(2)_L \times U(1)_Y$ 対称性がヒッグス粒子によって $U(1)_{em}$ に破れることで、ゲージ場が質量を獲得することとなる。

本論文の前半では電弱統一理論において、ヒッグス機構が果たす役割をレビューし、理論のパラメータと実験値との関係を整理する。また、ヒッグス粒子の存在が確認された LHC での ATLAS・CMS 実験では、陽子・陽子衝突により生み出されるヒッグス粒子が崩壊（ $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ ）した先の粒子（ $4l$ ）をとらえ、その有効質量からヒッグス粒子の質量をきめている。本論文の後半ではアップクォークの衝突によるヒッグス粒子の生成から 2 つの Z ボソンに崩壊する過程を考え、その散乱断面積の計算を摂動論を用いて行い、ヒッグス粒子の質量がこの反応からどのように決定されるかを検証する。

5.

AD/DA 変換器を使用したサブミリ波カメラの読み出し回路計測システムの開発

渡辺 動太（宇宙・素粒子）

我々はサブミリ波カメラ開発のため、SIS(Superconductor-Insulator-Superconductor)光子検出器および、ガリウム砒素半導体を用いた読み出し回路の検証を進めてきた。読み出し回路は、電荷積分型アンプ、マルチプレクサおよびデジタル回路、電圧分配器から構成されており、これらを組み合わせて 32 チャンネルモジュールとしている。32 チャンネルモジュールは検出器 32 素子の同時読み出しモジュールである。

ガリウム砒素半導体を用いた集積回路はこれまで 3 回試作を行ってきた。過去に回路素子の FET(Field Effect Transistor)の特性の測定は行われてきたが、第 3 次試作で FET の特性評価は行われていないため、測定を行った。この測定で第三次試作 FET の動作電圧範囲を確認することができた。

32 チャンネルモジュールの評価試験では、モジュールへのデジタル信号出力とモジュールからの信号の記録に別々の機器を使用していた。これらの機器は同期が取られていないため観測に使用するには適さない。この事を解決するために最大動作周波数 100kHz の 24bitAD/DA(Analog to Digital/ Digital to Analog)変換器を用いた 32 チャンネルモジュールの動作システムを開発した。AD 変換器でモジュールからの信号の記録をし、DA 変換器に同期したデジタル信号でタイミング制御を行っている。また、計算機上から C 言語を用いて制御するので AD、DA 間でフィードバックをすることが容易である。このシステムでの試験の結果、正常に 32 チャンネルモジュールを動作させることができた。

32 チャンネルモジュールは電圧分配器により 32 個ある電荷積分型アンプの個々に別々の制御電圧を送る事ができ、電荷積分型アンプの個体差を小さくすることができる。しかし、今までは調整電圧について試験が行われる事は無かった。そのため今回初めて導入した DA 変換器を使用し、制御電圧を変化させながら 32 チャンネルモジュールを動作する試験を行った。その結果、電荷積分型アンプの調整電圧は出力電圧のオフセットおよび、積分波形の傾きに作用することが判明した。この結果を受け、シミュレーションで検証を行ったところ、実験と同様の変化をすることが確認できた。また、調整電圧を変化させることで電荷積分型アンプが 32 チャンネルのうち 29 個まで動作することが確認できた。これは、変化させなかった場合の約 2 倍である。

今回の研究では調整電圧によって電荷積分型アンプがどのように振る舞うかがわかった。AD/DA 変換器で調整電圧の自動制御を行い、さらに 32 チャンネル個別に最適な調整電圧にする事でサブミリ波カメラのシステムに組み込むことが可能となる。

6.

Et₂Me₂Sb[Pd(dmit)₂]₂のゼーベック係数、電気抵抗の圧力下測定

栗竹 広大（物性物理）

Et₂Me₂Sb[Pd(dmit)₂]₂は、常圧下では電子相関により Mott 絶縁体となっている。また伝導層内において二量体[Pd(dmit)₂]₂は擬二次元三角格子を形成している。各二量体にはスピン 1/2 を持つ電子が局在している。そのためスピン間に働く反強磁性相互作用により幾何学的スピンプラストレーションが生じている。フラストレーション解消のために、常圧において、Et₂Me₂Sb[Pd(dmit)₂]₂は温度を下げていくと約 70 K で電荷分離転移(charge separation)を起こす。圧力を印加していくとこの電荷分離の転移温度は上昇しある圧力で転移温度最大となった後に下降することが知られている。また高温部では加圧により金属化(Mott 転移)することがわかっている。このように Et₂Me₂Sb[Pd(dmit)₂]₂は圧力と温度を制御することによって Mott 絶縁体、金属、電荷分離の三相が競合した興味深い物質である。

本研究の目的としては、Et₂Me₂Sb[Pd(dmit)₂]₂の詳細な圧力依存性、温度依存性を解明することである。そのために、圧力下での測定が容易に行えるゼーベック係数と電気抵抗の測定を行った。また圧力媒体内での測定データが信頼できるかを調べるためにゼーベック係数の測定に関しては、圧力下での測定を行う前に無加圧状態において結晶軸方向を変えてゼーベック係数の測定を行った。

無加圧下での測定では、高温部では温度に反比例して上昇し電荷分離転移によって大きく変化するゼーベック係数を観測した。また a-b, a+b, b 軸方向で同様のゼーベック係数を観測したが、前駆現象が観測されている温度領域(70 K ~ 100 K)では b 軸方向で電荷の偏りが起きていると考えられる大きな異方性を観測した。圧力下ゼーベック係数の測定では低圧領域では無加圧のときと同様の温度依存性を観測した。また加圧による Mott 絶縁体-金属転移による温度依存性の変化を観測した。金属領域においてゼーベック係数は温度に比例した振る舞いを見せるが、約 9 kbar 加圧すると急激な転移温度の上昇とともに温度に比例した振る舞いは見られなくなった。電気抵抗の測定結果では低圧領域では半導体的振る舞いを観測し、加圧による活性化エネルギーの減少を観測した。また Mott 絶縁体-金属転移を起こす圧力領域において電気抵抗が山を持つような特徴的な電気抵抗の温度依存性が観測された。

7.

有機導体 κ -(BETS)₂FeX₄ (X=Br, Cl) の磁場下での電子状態

奥澤 唯 (物性物理)

κ -(BETS)₂FeX₄ (X=Br, Cl) は、極低温において常磁性-反強磁性転移と金属-超伝導転移を起こす擬2次元有機超伝導体である。BETS分子が構成する伝導層とFeX₄分子が構成する絶縁層が交互に積層しており、伝導層の π 電子と絶縁層の3dスピンの間に強い π -d相互作用が存在する。極低温で反強磁性と超伝導が共存するという性質を持つこの系は、磁場の印加に伴い反強磁性転移温度と超伝導転移温度が共に抑制されていく。そして強磁場中では超伝導が再度出現する磁場誘起超伝導が見られる。近年この物質の中間磁場中 ($3T < H$) では、大きな異常比熱が観測され、 π 電子とd電子が関係した電子状態が期待されている。

本研究ではこの特異な2電子系の振る舞いを調べるために、中間磁場下での比熱、磁化率、ホール効果、磁気抵抗の測定、解析を行った。比熱と磁化率は主に π 電子が3dスピンに与える影響を、ホール効果と磁気抵抗は主に3dスピンの π 電子におよぼす効果を探るために行う。全ての測定結果を合わせることで、 π 電子と3dスピンの関係を解明していく。

磁気抵抗の磁場依存性は、 κ -(BETS)₂FeBr₄の低温低磁場で負の磁気抵抗が観測され、 κ -(BETS)₂FeCl₄の低磁場で通常のローレンツ力では考えられない正の磁気抵抗が観測された。形は違うものの、どちらの物質でも3dスピン系が π 電子におよぼすスピン散乱による大きな磁気抵抗が示された。通常、磁場の大きさに比例して大きくなるホール効果は、磁場により転移が抑制される中間磁場下で傾きが緩やかになり値が一定となり、さらに強磁場を印加すると、逆に減少を示した。この結果は、磁気抵抗の結果から推察されるスピン散乱の影響を、3dスピン系が π 電子におよぼす内部磁場として考えられるとすると、この内部磁場は外部磁場とは逆方向にかかっており、 π -d相互作用が負の磁気相互作用であることを表している。

比熱および磁化率では、単純な外部磁場下に存在する局在スピンとして、その温度依存性を説明することができず、表題物質のスピン状態の特徴を示す結果となった。このスピン状態は π -d相互作用による有効磁場の変化が原因であると思われ、本研究では有効磁場が一定ではなく分布していると仮定して解析を行った。ガウス分布を用いることで、両測定における実験結果をうまく説明することができた。また、どの磁場の測定結果でも有効磁場は全体的に外部磁場よりも低い値であることがわかった。これにより π 電子が3dスピンにおよぼす影響が、ホール効果でも説明された π -d間の負の磁気相互作用による内部磁場であることがわかった。

全ての測定から、 π -d 相互作用による特異な電子状態が存在していると思われる結果が得られた。3d スピンからの内部磁場は π 電子に大きな影響を与え、同時に π 電子は 3d スピン系へ異常な磁気的影響を与えている。

8.

 λ -(BETS) $_2$ Fe $_x$ Ga $_{1-x}$ Cl $_4$ の常磁性金属-反強磁性絶縁体転移における Fe の役割と強磁場下での比熱の振る舞い

山本 友介（物性物理）

有機伝導体はその多様性から様々な研究が行われてきたが、磁性と伝導性を合わせ持つ有機伝導体として合成されたのが λ -(BETS) $_2$ FeCl $_4$ である。 λ -(BETS) $_2$ FeCl $_4$ は伝導を担っている BETS 分子と磁性イオンである FeCl $_4$ からなっている。BETS 分子が伝導層、FeCl $_4$ が絶縁層の役割を担い、これら 2 次元的な層が交互に積層した形になっている。伝導を担う π 電子と Fe に含まれる 3d スピンの π -d 相互作用を通じた相関により、外部磁場 18T 以上での磁場誘起超伝導や、約 8.3 K での常磁性金属-反強磁性絶縁体転移などの特有の性質が実現していると考えられている。また、 λ -(BETS) $_2$ FeCl $_4$ の Fe の濃度を任意に変えた λ -(BETS) $_2$ Fe $_x$ Ga $_{1-x}$ Cl $_4$ においては Fe の濃度を薄めるに従い、常磁性金属-反強磁性絶縁体転移が抑制されることから、この相転移では Fe が重要な役割を果たすと考えられている。

これまでの秋葉、嶋田（東邦大）等の研究から λ -(BETS) $_2$ FeCl $_4$ の大きな特徴である常磁性金属-反強磁性絶縁体転移温度以下の温度領域で、磁気比熱を観測し、その磁気比熱のエントロピーの大きさと温度依存性から、この転移では Fe が主体となって磁気秩序を形成するのではなく、 π 伝導電子が局在化し、反強磁性秩序を形作っていることを示唆する実験結果を得てきた。本研究では λ -(BETS) $_2$ FeCl $_4$ の主に常磁性金属-反強磁性絶縁体転移の機構における Fe の役割に焦点をあて、 λ -(BETS) $_2$ Fe $_x$ Ga $_{1-x}$ Cl $_4$ を使って Fe の役割を熱力学的に理解すると共に、 λ -(BETS) $_2$ FeCl $_4$, λ -(BETS) $_2$ Fe $_x$ Ga $_{1-x}$ Cl $_4$ の強磁場下での磁場誘起金属相、磁場誘起超伝導相について理解するために熱力学的な振る舞いと Fe の関係性について議論する。

本研究では熱力学的観点からこの物質の Fe の役割を探るために比熱の測定を行った。測定温度領域は 0.2 K ~ 10 数 K と比較的低温から 2 ケタ近くの広い温度領域に及ぶので ^3He - ^4He 希釈冷凍機を使いスタイキャストと呼ばれる樹脂で断熱したセル中で行った。また、試料が数十 μg と非常に小さいため、微小な 2 素子の抵抗器を使って自作した装置で熱緩和法を用いて比熱の測定を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- ① ゼロ磁場での内部磁場を用いた磁気秩序の評価： λ -(BETS) $_2$ FeCl $_4$ 及び λ -(BETS) $_2$ Fe $_x$ Ga $_{1-x}$ Cl $_4$ の反強磁性絶縁体転移温度以下の温度領域で、磁気比熱を観測し、3d スピン系で期待されるスピン 5 / 2 の 6 準位ショットキー比熱で 3d スピン系が感じる内部磁場の大きさとその温度依存性を評価した。その結果が、相転移温度や内部磁場は Fe 濃度 x にほぼ比例して増大することを確認した。また内部磁場の温度依存性は Fe 濃度によらず転移温度近傍まではほぼ一定の値をとり、2 次元イジング的な磁気秩序の形成を示していた。
- ② 磁場下でのスピン系の状態の評価： λ -(BETS) $_2$ Fe $_x$ Ga $_{1-x}$ Cl $_4$ の反強磁性転移の残る弱磁場領域で磁気比熱の磁場依存性を測定し、3d スピンの感じる磁場を評価した。反強磁性絶縁状態が破壊されない磁場領域では、外部磁場を印加するに従って相転移が抑制され、磁気比熱はわずかに高温側にシフトするが、外部磁場に対してあまり応答しないことを確認した。また、反強磁性状態の破壊される強磁場領域で比熱の磁場依存性では、温度に比例して増加する新たなタイプの比熱異常が見つかった。また、この大きさは Fe の濃度に比例していることがわかった。

本研究では、3d スピンをプローブとして使うことで内部の磁気秩序を観測してきた結果、Fe の役割が見えてきた。常磁性金属-反強磁性絶縁体転移では内部磁場の温度依存性が Fe 濃度に依存しないことから π 電子の 2 次元性が強く現れた転移だとわかった。しかし Fe なしでは相転移は起きず、転移温度は Fe の濃度によりが決まることから、Fe は π 電子の磁気秩序化を助ける役割を果たすことがわかった。また、外部磁場を印加した場合には π スピンによる外部磁場を補償する働きにより、結果的に 3d スピンは外部磁場の影響をあまり受けないことがわかった。さらに強い磁場を印加した新たな比熱異常が観測された領域では、 π スピンと 3d スピンが外部磁場と複雑に絡み合った新奇な状態が実現しているものと期待している。このように λ -(BETS) $_2$ FeCl $_4$ 及び λ -(BETS) $_2$ Fe $_x$ Ga $_{1-x}$ Cl $_4$ では π スピンと 3d スピンの絶妙な相関のためにこのような多彩な物性が現れることがわかった。

9.

分子性ディラック電子系への正孔注入効果と量子伝導現象

山内 貴弘（物性物理）

ゼロギャップ伝導体は 2004 年にグラフェンで実現され大変注目を集めてきた。理由は、素粒子のニュートリノと同様、質量ゼロの電子（ディラック電子）が固体中に存在し、電子伝導の主役となって、通常の金属や半導体では見られない電気伝導特性や新奇の量子効果を示すためである。一方、グラフェンの発見とほぼ同時期に高圧下にある有機導体 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ で世界最初のバルクなディラック電子系が発見された。

ディラック電子系の特徴の 1 つは磁場下に現れる。通常の導体とは異なる特別なランダウ準位構造を取り得るのである。特に、 $n = 0$ のランダウ準位がエネルギーゼロの位置に磁場下で常に現れる。 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ ではフェルミ準位が常にエネルギーゼロに位置しているので、これまで $n = 0$ のランダウ準位に起因した特徴的な輸送現象が見出されてきた。一方で、他のランダウ準位観測はこの物質へのキャリア注入方法がまだ確立していないこと等の理由から実現困難であった。

ところが最近、プラスチック基板に厚さ 100 nm 程度の薄片単結晶試料を固定するだけで正孔キャリアを注入することに初めて成功し、低温で $n = -5, -4, -3, -2$ のランダウ準位に伴うディラック電子系特有の量子磁気抵抗振動と量子ホール効果が観測された。

本研究では、有機導体で実現したディラック電子の特徴を見出すことを目的に、この正孔注入法を利用してこの物質の量子伝導現象を調べた。さらに、測定対象物質を類縁物質である θ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ まで広げた。以下が本研究の主な成果である。

最初の成果は、0.5 K の極低温、14 T までの高磁場下でこの系の $n = -4, -3, -2, -1$ のランダウ準位による量子磁気抵抗振動と量子ホール効果を観測することに成功したことである。さらに、 $n = -2$ と $n = -1$ のランダウ準位については明瞭なスピン分裂を検出した。このスピン分裂は非常に特異である。有効 g -因子を見積もると、通常は約 2 であるが、この系では 2 よりも非常に小さい。例えば、 $n = -2$ では $g \sim 1.1$ と見積もられる。一方、グラフェンではスカーミオン励起により非常に大きな g -因子を示すことが報告されている。 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ は高磁場下でグラフェンとは異なるスピントキスチャを持つと推察される。

次に、高圧下にある θ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ もディラック電子系であることを直接説明したことは大変重要な成果である。この物質は、常圧力下では非常に大きなフェルミ面を有する典型的な擬 2 次元金属であるが、圧力をかけると約 0.5 GPa でディラック電子系へと相転移する。高圧下でこの物質は α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ と全く同じ電気伝導特性を示すのである。そういった意味で高圧下のこの物質はディラック電子系であると結論されているが、そのことを直接証明した例はない。そこで本研究では接触帯電法で正孔を注入し、ランダウ準位の観測からその実証を試みた。その結果、試料への正孔注入に成功して量子磁気抵抗振動を観測した。ディラック電子はベリー位相 π を持つので、その効果は量子磁気抵抗振動の位相に表れる。位相の解析結果は、高圧下にある θ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ もディラック電子であることを直接実証した。

10.

ディラック電子系の $n=0$ ランダウ準位における量子ホール転移の臨界指数

馬場 広大（物性理論）

通常、2次元平面に垂直に磁場を印加すると電子の運動エネルギーが調和振動子のように等間隔に量子化されランダウ準位が縮退する。このランダウ準位は不純物ポテンシャルを入れることにより縮退が解けランダウバンドに広がる。

そして、この電子状態はバンドの中心の一部を除いてアンダーソン局在を起こす。ここでエネルギー E を持つ電子の空間的な広がりである局在長 ξ は臨界指数 ν を用いて、 $\xi = |E - E_c|^{-\nu}$ と記述される。量子ホール系においてはこれまで $\nu = 2.34 \pm 0.04$ [1] 等、 $\nu \approx 2.3$ と報告されてきた。しかし、近年ネットワークモデルを用いた数値的研究において、 $\nu = 2.593$ [2.587, 2.598] [2] 等、 $\nu \approx 2.6$ という報告がなされ、量子ホール系の臨界指数の値の見積もりが変わってきた。また、臨界指数は対称性と次元にのみ影響されるユニバーサルな量である。そこで、ネットワークモデルではなく格子モデル、通常の2次元電子系ではなくディラック電子系において、臨界指数の見積もりを行うことを試みた。

[1] B. Huckestein and B. Kramer, Physical Review Letters **64**, 1437 (1990).

[2] K. Slevin and T. Ohtsuki, Physical Review B **80**, 041304(R) (2009)

11.

3層グラフェンのゼロエネルギー・ランダウ準位のランダムネスに対する安定性

坂本 紘樹（物性理論）

これまで、カイラル対称性を保存するようなボンドのランダムネスをもつグラフェンの $n=0$ ランダウ準位において、ランダムネスに空間相関が存在することにより 2 つのディラック点 (K と K') 間の散乱が抑制されるような領域で、 δ 関数的な異常性が現れることが示されてきた。またカイラル対称性が保存されていても、ディラック点間の散乱が無視できないような空間相関の場合には、 $n=0$ ランダウ準位の異常性は現れないことも示された。このことから、カイラル対称性と 2 つのディラック点間の散乱の抑制が $n=0$ ランダウ準位の異常性に重要であると示唆されてきた[1]。また、2 層グラフェンでも、カイラル対称性を系が満たしていれば、ゼロエネルギーランダウ準位の異常性が示されている[2]。

本研究では、3 層グラフェンのゼロエネルギーランダウ準位のランダムネスに対する安定性を調べた。3 層の場合、積層の仕方に 2 種類のパターンがあり (ABA 積層および ABC 積層)、それによりバンド構造が異なる。本研究ではこれら両方の積層について厳密対角化法を用いて調べた。どちらの場合も、強磁場下ではボンドのランダムネスに対して、ディラック点間の散乱が抑制される領域でゼロエネルギーランダウ準位に異常性が現れることを示した。さらに、3 層グラフェンにいろいろな層間 hopping を加えてその効果を調べた結果、カイラル対称性が保存している系のほうが、保存しない系よりも、よりはっきりとゼロエネルギーランダウ準位の異常性を示すことがわかった。このことは、カイラル対称性とディラック点間散乱の抑制の両方がゼロエネルギーランダウ準位の異常性に重要であることを示唆している。

さらに、厳密対角化法では扱いづらい、弱磁場を、kernel polynomial method (KPM) を用いて、3 層グラフェンのゼロエネルギーランダウ準位が積層の違いによって違いが現れるかを調べた。結果、弱磁場で、現実的な層間 hopping の値を用いた場合、ABA 積層よりも ABC 積層のほうが、ゼロエネルギーランダウ準位の異常性がより残ることがわかった。

[1] T. Kawarabayashi, Y. Hatsugai, and H. Aoki,

Phys. Rev. Lett. 103, 156804(2009); Physca E 42 759(2010).

[2] T. Kawarabayashi, Y. Hatsugai, H. Aoki, Phys. Rev. B 85, 165410(2012).

12.

Ashra 実験用光ファイバー伝送系と評価装置の開発

安彦 ちほ（基礎物理）

1987 年、南半球で発生した超新星爆発(SN1987A) 由来のニュートリノがカミオカンデで検出された。ここ半世紀では加速器実験により素粒子の性質は精密に解明され、超高エネルギー素粒子天文学は創世の期を迎えている。しかし、いまだ宇宙から飛来する宇宙線の起源やその機構の解明には至っていない。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し、我々全天監視高精度宇宙線観測実験：All sky survey high resolution air shower detector (Ashra)は、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のガンマ線やニュートリノの観測を行っている。42 度の視野かつ分角の高分解能を持つ Ashra 検出器は撮像系と撮像の制御を行うトリガー系から成り、トリガー系は光ファイバー束、トリガーセンサ、トリガー判定回路から構成されている。このトリガー系で発光現象の検出を行い、ある閾値を越えた光量が検出されたとき撮像系へ信号が送られ、発光時間に合わせた露光制御が行われる。私は、2012 年 5 月より 2 か月にわたりハワイ島マウナロア山の Ashra 実験観測サイトにて実際にトリガー観測を行い、明野試験観測所においても試験観測を行った。トリガー系では検出器に入射した光を低損失で伝送するために、伝送系の一部に光ファイバー束(光ファイバーを格子状にならべて束にしたもの)を使用している。Ashra 実験の観測では、視野内に入った光が信号としてトリガー判定回路に伝送されるまでに、いかにその損失を抑え高速に伝送するかが求められる。光ファイバー束は縦横 64×64 に格子状に並べた 4096 本の光ファイバーから成り、観測においてはその 4096 本の光ファイバーがすべて安定に光を伝送していることが望ましい。本研究ではその光ファイバー束の性能評価装置としてトリガー観測に使用する光学装置(集光レンズ系)を導入した新たな光ファイバー束の伝送性能評価装置の構築を行い、Ashra 実験における要求を十分に満たした評価装置の調整手法の確立を行った。ここでの要求とは、Ashra 望遠鏡の分解能である分角の精度で調整が可能であること、観測時と同等の条件下で評価することである。この要求を満たすために、評価装置の光軸調整方法を画像ピクセルを使用して行うことで $\theta = 1.5\text{mrad}$ の精度で調整し、Ashra 検出器の分角の分解能内での調整を可能にした。また、観測と同等の条件下にするために検出器と同じ光学レンズの導入、光源を点源にして入射させることで、より実観測に近い条件での観測を可能にした。従来の光ファイバー束の性能評価は光電子増倍管(Photomultiplier:PMT)を使用して、通過光量によりその光伝送効率を評価していたが、新たに輝度によって評価する方法を提案し、安定した伝送性能評価を行うための指標を示した。これにより、光ファイバー伝送系としての光伝送を効率的にし、撮像した発光現象の光像を正確にトリガー判定回路まで伝送することが可能となる。観測した発光現象に対してより精度が高いトリガー判定ができることから、検出器の検出精度向上が期待できる。

13.

Ashra 望遠鏡を用いた大気発光現象による宇宙線観測

鹿子畑 千也子 (基礎物理)

宇宙空間での高エネルギー放射機構は現在未解明であり、宇宙空間から到来してきた高エネルギーの粒子を観測することにより、その謎を解明しようとしている。高エネルギーの粒子ほど地上への単位面積当たりの到来頻度は少なくなるため、検出面積を拡大する必要がある。

全天監視型高精度宇宙線望遠鏡 (All-sky Survey High Resolution Air-shower detector、Ashra) 実験は、突発的高エネルギー天体から放出される高エネルギー宇宙線を観測し、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 は、42度の広視野かつ数分角の位置分解能の検出器を複数台用いて、全天の77%を常時観測する望遠鏡である。高エネルギー宇宙線と空気中の原子核との相互作用によって発生する空気シャワーに伴って生じる大気チェレンコフ光と大気蛍光の2つの大気発光現象を検出する。Ashra は、視野中心を30度にもつ空向きの検出器と視野中心を75度にもつ山向きの検出器が複数台用いられており、視野中心を75度にもつ検出器では、空気シャワーからの大気チェレンコフ光により、ペタ電子ボルト以上の宇宙線の観測が可能である。2011年1月11日から2013年3月25日には山かすりタウニュートリノ探査及び光学閃光探査の本観測を行った。私は、2012年10月4日から2011年11月25日まで実際に現地に行き、合計291.98hになる観測を行った。

大気チェレンコフ光だけでなく、大気蛍光を同時観測することにより、高エネルギー宇宙線に対する有効検出面積が向上する。現在 Ashra 実験では、空気シャワーに伴って生じる大気発光現象の本観測化に向け、大気蛍光トリガーシステムの導入に向けた統合試験を進めている。大気蛍光の発光時間は、 10^{20}eV の高エネルギー宇宙線で $30\mu\text{s}$ 程度とされており、今まで観測を行ってきた大気チェレンコフ光とは発光時間が異なるため、観測には新たなトリガーシステムの導入が必要である。

本研究では、モンテカルロシミュレータ CORSIKA を用いて宇宙線研計算機でテラ電子ボルト以上の空気シャワーによる大気チェレンコフ光の伝搬シミュレーションを行った。その結果、1つの空気シャワーで100nsec 程度の発光継続時間となり、特に約10nsec の間に強く発光することが分かった。さらに観測イベント数の見積もりを行うため、今まで未知数であった集光器とシャワー軸との距離を求めた。その結果、 10^{15}eV 付近の陽子シャワーのシャワー軸との距離は3250m で集光器への光子の入射がなくなるのを確認し、3250m をパラメータ値に設定した。

大気蛍光トリガー観測を実現するために、山梨県の明野観測所でトリガーシステムの統合試験の準備として統合試験用の集光器の組み立て、試験用の電子回路の作製、動作試験を行った。明野観測所では、新たなトリガーシステムで大気蛍光による発光現象を撮像するための試験を行うため、疑似的に大気蛍光相当の光を発生させて行う。設置した集光器に隣接した建物からレーザーを打ち、レイリー散乱を発生させて大気蛍光相当の光量を発生させた。発生させた光を集光器及び光電子増倍管で検出し、測定した信号からレーザーからの光の道筋と各光電子増倍管でのレーザーからの光量を 10^4 程度と見積もり、 10^{15}eV 付近の空気シャワーの再現が可能であることを示した。

以上により、トリガーシステムの統合試験の環境設定が整い、大気蛍光トリガーシステムの導入に向けた統合試験が可能になった。大気蛍光トリガーシステムの導入により、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に一步前進した。

14.

Ashra-1 実験におけるトリガー観測装置開発

高田 巧磨（基礎物理）

現代の宇宙線観測実験では、可視光やガンマ線、赤外線を利用した多波長天文学が一般的であるが、近年では超高エネルギーニュートリノをプローブとした宇宙線観測や新天体の発見を狙う研究が盛んになってきた。全天監視高精度宇宙望遠鏡(All-Sky Survey High Resolution Air-shower detector)Ashra-1 もその実験の1つであり、広視野高分解能で全天の77%を常時監視し、超高エネルギー宇宙線や高エネルギーニュートリノの観測を目指している。高エネルギー宇宙線が大気と相互作用することにより生じる空気シャワー現象に伴う大気蛍光、並びに大気チェレンコフ光を複数台の望遠鏡を用いてステレオ観測することで、宇宙線スペクトルの観測や超高エネルギー宇宙線の起源、新天体の発見などをAshra-1では狙っている。Ashra-1の検出器は、広視野高分解能を実現するための修正 Baker-Nunn 光学系、画像圧縮と位置情報伝達のための20inch 光電レンズ撮像管(PLI)と64×64pixの光ファイバー束から成る伝送系、PMTアレイとトリガーLSI並びにトリガーFPGAボードから成る露光制御を行うためのトリガー系によって主に構成される。Ashra-1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3期に渡って(第1期:2008年6月28日～2009年6月5日、第2期:2009年10月7日～2011年1月4日、第3期:2012年1月11日～2013年3月25日)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を行ってきた。これまでの観測の中で、PLIに入射してからトリガー系、撮像センサーに到達する間(撮像パイプライン)において、数%のゲイン時間変動を持つことがわかってきた。トリガー観測におけるトリガーレベルはパイプラインゲインにより決定されるため、この揺らぎを定量的に把握しゲイン変動を較正することは、トリガーレベルを安定させ定常的なトリガー観測を行う上で非常に重要な意味を持つ。

本研究では、Ashra-1トリガー読み出しにおける撮像パイプラインゲインの較正を目的とした光源装置の開発と、トリガーシステム統合テストに向けたトリガーセンサーの試験を行った。本装置の光源には、大気チェレンコフ光の典型的な波長に近い405nmの波長のLEDを使用した。LEDは半導体素子であるため周囲温度の変化や、経年劣化等により光量の変動が懸念される。そこで、ハーフミラーを導入し他方を半導体光検出素子に入射させ、光源自体の光量変動を測定できるような構造にすることで、光源の光量変動の絶対較正も可能にした。また、センサー1ピクセル毎の位置較正も可能にするため、PLIの全面にできるだけ様な光を照射できるようにレンズを取り付け、放射非一様性を1%未満に抑えることに成功した。PLIの代わりにPMTを使用したゲイン時間較正のデモンストレーションでは、時間変動は9%未満の統計誤差でPMT自体の持つゲイン変動と一致し、ゲイン時間較正を実現できる装置の開発に成功した。

トリガーシステム統合試験に向けたトリガーセンサーの試験では、トリガーセンサーが観測サイトにおける夜光ノイズに対して $+3\sigma$ でトリガーをかけられるかどうかを、チェレンコフ光と大気蛍光を想定した場合について検証している。現状では、夜光ノイズ下においてセンサーの最大定格値を超えてしまうことから、ゲインは 10^4 以上上げることが出来ないことがわかった。そのため、トリガーLSIでトリガー可能にするにはセンサーの後段で信号増幅回路が必要ということになり、現在はその回路開発を行っている。これにより、トリガーシステムの大気蛍光撮像試験の本格的な始動となり、較正用LED光源装置の実用化と共にさらなるAshra-1実験のトリガー観測精度の向上が期待できる。

15.

Belle II 実験に使用する粒子識別用光検出器 HAPD の放射線耐性評価

浜田 尚（基礎物理）

今日、素粒子物理学では物理学の基本となる理論の枠組み（標準模型）の詳細な検証および、それを超える新しい物理の検証をするために世界各国で実験がおこなわれている。そのひとつである Belle 実験は小林・益川理論の検証を目指し、その理論の予言する CP 対称性の破れを検証するため、1998 年に茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構で開始された。この実験は電子・陽電子非対称衝突型エネルギー衝突型円形加速器 KEKB で大量の B 中間子・反 B 中間子を生成し、その崩壊過程を Belle 検出器で観測するものであった。2001 年の夏、 $B^0 \rightarrow J/\psi K_s$ 崩壊過程において測定された CP 非対称性度は標準模型で予測される値と極めてよく一致し、CP 対称性の破れが小林・益川理論により説明できることが証明された。Belle 実験はその後データを蓄積し、その結果新物理に關与する稀崩壊や興味深い現象も発見されたが、統計精度が不十分であり、新物理や新現象発見に決着をつけることは困難であった。そこで一桁以上の統計向上を目的とした Belle II 実験が 2015 年より開始される。現在、測定精度もより向上させるために、加速器・検出器ともにアップグレードが行われている。その狙いの一つが B 中間子の崩壊生成物である K 中間子と π 中間子の識別能力向上である。Belle II 実験でこの識別を担うのがチェレンコフ光検出器の A-RICH(Aerogel Ring Imaging Cherenkov counter)である。Belle 実験では識別できる運動量が $0.5\text{GeV} < p < 2.0\text{GeV}/c$ であったのに対し、上限を 4.0GeV まで拡大できるよう開発が進められている。A-RICH 検出器は粒子が輻射体を通じた時に発生するチェレンコフ光によるリングイメージを検出し、そのリング半径から輻射角度を測定する。輻射体には Aerogel、リングイメージ観測のための光検出器には、Hybrid Avalanche Photo Detector(HAPD)を用いる。

HAPD は新型のマルチアノード型光検出器で、2002 年より浜松ホトニクス（株）と共同開発を行っている。 $4.9 \times 4.9\text{mm}^2$ の APD が 144ch 内蔵された真空管で、2 段増幅型の検出器である。「十分な有効面積」「5mm 以下の位置分解能」「単光子検出が可能」「1.5T の磁場中での動作」「十分な放射線耐性」が求められる。現在は特に放射線耐性が問題となっており、Belle II 10 年間の稼働でガンマ線は 1000Gy 、中性子線は $1.0 \times 10^{12}\text{neutron}/\text{cm}^2$ の積算線量が予想されているため、HAPD がこの線量に対して耐性を持つように開発することが必要となる。これまでの研究で中性子線に対しては APD 内の P 層を薄くすること、また読み出し回路の波形整形時間を短くすることによって耐性向上につながることがわかっている。ガンマ線に関しては、照射されると強い影響を受け、通常では考えられない急激な電流増加が起きるが、APD 表面膜の帯電の影響により引き起こされていることが確認できている。

本研究ではこれまでの放射線耐性試験の総まとめとして最終仕様の HAPD に中性子線・ガンマ線を複合的に照射し、その影響を確認する試験を行った。APD への放射線に対する影響はそれぞれ独立であり、またガンマ線に関して HAPD は数百から 1000Gy までの範囲で耐性を持ち、HAPD についてばらつきがあることがわかった。また、より高い利得が得られるよう APD 内部の膜質や膜厚についての違いも詳細に調べた。その結果、Belle II 実験で使用する HAPD の仕様を確定でき、10 年間の稼働でも放射線耐性を持つ HAPD の開発に成功した。

16.

OPERA 型エマルジョン検出器を用いたニュートリノ反応の基礎研究

牧野 隆起 (基礎物理)

近年、ニュートリノ物理は大きく進展した。1998 年のスーパーカミオカンデによる大気ミューニュートリノ欠損の発見に端を発したニュートリノ振動の研究は加速器ニュートリノを用いた検証を経て、3 種のニュートリノには混合があること、そして異なった質量をもつことが明らかになった。そのうち2つの混合角 θ_{12} と θ_{23} はそれぞれ太陽ニュートリノ振動と大気ニュートリノ振動から決定できた。さらに世界中で様々なニュートリノ振動実験が行われ、2012 年、T2K 実験と原子炉実験により、第3の混合角 θ_{13} も発見された。この値が予想以上に大きかったことから、レプトンセクターにおける CP 対称性の破れ検証に向けて実験準備を始める機運が高まっている。それには 1 GeV 前後の低エネルギーニュートリノを用いた実験が最適である。しかし、低エネルギー領域でのニュートリノ反応は、高エネルギー領域の深部非弾性散乱のように単純ではなく、準弾性散乱や共鳴反応などを含み、それぞれの反応断面積も正確には測定できていない。標準的な3つのフレーバーのニュートリノ振動の枠組みを越えた別種のニュートリノの存在を示唆する現象も報告されている。したがって、これらの問題を解決し、放出粒子を全て精密測定できる実験が強く望まれている。

長基線ニュートリノ振動実験 OPERA は、ミューニュートリノからタウニュートリノへのニュートリノ振動を出現モードで観測することを目的としている。欧州原子核研究機構 CERN から平均 17 GeV のミューニュートリノビームを 730 km 離れたグランサッソ研究所内に建設された OPERA 検出器に照射し、ニュートリノ振動により出現するタウニュートリノの反応で生成されたタウ粒子飛跡の折れ曲がりや原子核乾板で直接検出する。現在までに3例のタウニュートリノ反応候補が検出された。この実験の解析で新たなタウニュートリノ反応事象検出を目指すとともにニュートリノ反応事象の基礎データを蓄積することは将来計画の低エネルギー実験の参考となる。我々はニュートリノ反応由来の飛跡を下流からエマルジョン検出器 (ECC) 中を逆追跡する仕事を 272 事象担当した。この 272 事象の逆追跡作業の経過を事象ごとに調査し、ニュートリノ反応を検出できる割合やできない原因を考察した。181 事象は検出器中で飛跡が止まり、反応点探索を行った 130 事象の内、21 事象はデータ取得範囲外に反応点があり、再度飛跡データを取得することになった。86 事象に対してはタウ崩壊探索を行った。飛跡の角度変化を分析し、電磁散乱で説明できない角度・位置変化がある飛跡はカットし、ニュートリノ反応点との最近接距離が 500 μm 以内の飛跡を選別して目視確認を行った。荷電カレント反応から放出されるミューオンの源が不明な事象は、タウまたはチャーム崩壊の可能性があるので、大角度飛跡読取装置 (FTS) で特別な探索を行い、4 事象中2個のミューオンの源を突き止めることができた。

さらに、ECC 構造での低エネルギー電子の振る舞いの研究も進めた。将来計画のニュートリノ実験では振動後の電子ニュートリノ反応により生成される電子を ECC 中で捉える必要があるが、制動放射、電子対生成、多重電磁散乱が複雑に絡み合い、低エネルギー電子の同定は困難な課題である。そこで、大型放射光施設 (SPring-8) のレーザー電子光実験施設 (LEPS) において、2GeV/c、1GeV/c、0.5GeV/c、0.25GeV/c の電子ビームを照射した原子核乾板を用いて分析した。まず、各ビームの照射位置を中心に 1.6cm $\times$ 1.2cm の範囲の飛跡を高速自動飛跡読取装置 (UTS) で測定した。過去の経験から 90% 以上の効率で認識できる5枚のデータを用いて再構成した飛跡について、FTS で特別探索を実施し、その飛跡を目視で確認した。その結果、大角度電子を含めて再構成した場合、角度範囲を広げるにつれて検出率が上がることが確認できた。

17.

エピタキシャル Fe/Cr 界面でのフラストレーションによる残留磁化のスローダイナミクスの機構

橋本 拓馬（磁気物性）

Fe/Cr(001)および(011)界面には磁気的な相互作用のつじつまが合わなくなる、いわゆるフラストレーションが存在することが知られている。Jiko らの界面モデルによると、理想的に平坦な Fe/Cr(001)界面ではフラストレーションは存在しないが、界面が乱れるほどフラストレーションは大きくなる。一方で Fe/Cr(011)界面では、界面が平坦な場合でも大きなフラストレーションを持つ。しかし、この界面フラストレーションが磁気ダイナミクスに与える影響を直接観測した報告はこれまでなかったため、本研究室ではエピタキシャル Fe/Cr 二層膜を MBE 法で作製し、熱残留磁化(TRM)の緩和(時間変化)を詳細に調べてきた。その結果、Fe/Cr(001)二層膜の場合、界面の乱れた試料では、熱平衡まで何日もかかるようなスローダイナミクスが観測され、界面の乱れが大きいほど緩和の遅さを示す磁気粘性(S)の値が大きくなった。一方、Fe/Cr(011)二層膜の場合は界面が平坦な試料でもスローダイナミクスが観測された。これらの結果は Jiko らの Fe/Cr 界面モデルと矛盾しない。この試料は室温で強磁性であり、バルク的な乱れはほとんどないため、局所的な界面でのフラストレーションが試料全体の磁化緩和に影響していることを示している。しかしながら、このメカニズムについてはよくわかっていない。そこで、これを実験的に調べるのが本研究の目的である。

まず、我々は Fe/Cr 二層膜において、磁場を切った後に生じる磁壁の移動の仕方がスローダイナミクスを引き起こすというモデルを仮定した。このとき、Fe や Cr 層の厚さにより磁壁形成のしやすさが異なるため、試料の膜厚を変化させたならば、スローダイナミクスに変化が観測されると考えた。また、Cr は温度や膜厚によってスピン密度波(SDW)の構造が変化することが知られているため、その時にスローダイナミクスに変化はあるかにも注目した。そこで、本研究ではエピタキシャル Fe/Cr(001)および(011)二層膜の界面の乱れは変えずに Fe と Cr の膜厚のみを変えた試料を MBE 法で作製し、TRM の緩和をカンタムデザイン社の MPMS(磁気特性測定装置)を使い、磁場 500[Oe]、温度 2 ~ 250 [K]で測定した。その結果、Fe/Cr(001)の場合、Fe の膜厚増加に伴って S が大きく減少した。Cr の膜厚変化では S に大きな変化は見られなかったが、 S のピークが現れる温度が変化した。一方、Fe/Cr(011)二層膜の場合、Fe と Cr のどちらの膜厚増加でも S の減少が見られた。

これらの結果は、(001)と(011)のどちらでも Fe 層の磁壁の移動によってスローダイナミクスが起きていることを示唆している。(001)界面の場合、Fe 層が薄い時には磁場を切った後、磁壁が移動することによって界面フラストレーションを解消し、エネルギーが下がる。しかし、界面フラストレーションはランダムに存在するため、多数の準安定状態が存在する。よってエネルギーは複雑な多谷構造を持ち、緩和時間が長くなる。一方、Fe/Cr(011)界面の場合、Fe 層内の磁壁が移動するたびに、縮退している Cr のスピン全体が反転することによって緩和していくため、スローダイナミクスが観測されると考えた。また、Fe/Cr(001)二層膜では、Cr 層の SDW の転移温度付近でのゆらぎにより、 S にピークが生じたと考えられる。

18.

アモルファススピングラス $\text{Gd}_{15.5}\text{Si}_{84.5}$ の臨界現象に与えるランダム一軸異方性の効果

池田 勇人 (磁気物性)

スピングラス (SG) 研究の歴史は, 1972 年の Cannella と Mydosh らの希薄磁性合金 AuFe における交流磁化率の実験に始まり, 今日に至るまでに理論, 実験の両面から様々な研究が続いている.

希薄磁性合金における支配的な磁氣的相互作用は RKKY 相互作用である. そのため系には, 隣接スピンを平行に向けようとする強磁性的な相互作用と反平行に向けようとする反強磁性的な相互作用が混在, 競合した状態が実現する. このようなスピン系においては, スピン秩序化に際し強い競合効果 (フラストレーション) が起こる. その結果, スピンはできるだけ相互作用を満たそうとしてランダムな方向を向いて凍結する.

SG 研究の発端となった RKKY 型 SG は SG の雛形としてカノニカル SG (C-SG) と呼ばれているが, 特にその臨界現象については長い間精力的な研究が続いている. C-SG は 3 次元 Heisenberg SG と考えられているが, SG に対する代表的モデルである EA モデルの数値的な研究では, Heisenberg SG の下部臨界次元が現実の世界の 3 次元以下であるかどうかまだ決着がついていない. そのため, 実験的に観測されている C-SG の臨界現象をどのように理解したらいいのかが大きな問題となっている. 現在考えられている描像は,

1. 系に存在する不純物に起因する Dzyaloshinskii-Moriya (DM) 相互作用によるランダムな一方向異方性 (DM 異方性) によって Ising SG の性格 (3 次元で相転移を起こすとされる) に近くなり, 相転移が起きる,
 2. カイラリティと呼ばれるスピン配位の右・左を表す自由度が相転移を起こし, その際に磁気異方性を通じてスピン系の相転移を誘発する,
- といった磁気異方性が大きな役割を果たしている, というものである. 現在, C-SG に与えるランダム DM 異方性の影響について実験的な研究が進められている. ところでこのシナリオは, 「ランダム一方向異方性」ではなく「ランダム一軸異方性」でも成り立つという議論があるが, その実験的研究は我々が知る限りない.

そこで我々は, ランダム一軸異方性の大きさを制御し変化させることで SG 転移がどのような影響を受けるのか, また, DM 異方性の効果とどのように異なるのかを精密に観察することを目的とした. 母体試料には, C-SG に性質が近いと考えられているアモルファス SG の $\text{Gd}_{15.5}\text{Si}_{84.5}$ を選んだ. 試料は高周波マグネトロンスパッタリング法によって作製し, 磁気異方性をもたない希土類である Gd を他の磁気異方性をもつ希土類 (本実験では Nd, Dy) で置換することでランダム一軸異方性の導入と制御を行った.

その結果, $\text{Gd}_{15.5}\text{Si}_{84.5}$ では, SG 転移温度の磁場依存性を表した HT 相図において, C-SG と同様に高温側 T_w で弱いスピン凍結, 低温側 T_s で強いスピン凍結, の二段階の凍結を示し, いわゆる Heisenberg SG で考えられているような GT line と AT line が現れた. また, Nd を 11% 置換した $(\text{Gd}_{0.89}\text{Nd}_{0.11})_{15.5}\text{Si}_{84.5}$ では, T_w がつくる臨界曲線に GT line 的な振る舞いがみられ, Nd を 33% 置換した際は, GT line 的だった臨界曲線が AT line 的に変化した. これは, ランダム一軸異方性によって系の Ising 性が強まったためだと考えられる. ただし, Nd 11% 置換において, GT line 的な振る舞いが残っていることから, これらのランダム一軸異方性による臨界曲線への影響は, ランダム DM 異方性のそれと比べて小さいためと考えられる.

19.

Bサイトに乱れを導入したスピネル化合物 $\text{Co}(\text{Al}_{1-x}\text{M}_x)_2\text{O}_4$ ($\text{M} = \text{Rh}, \text{Ga}$) においてスピン液体より生じるスピングラスの臨界曲線の変化

大熊 雄貴 (磁気物性)

幾何学的磁気フラストレーションとは原子の幾何学的な構造が原因となり, すべての磁気相互作用を同時に満たすことの出来ない状態である. スピネル酸化物 CoAl_2O_4 の A サイト (ダイヤモンド格子) において強い幾何学的フラストレーションが報告されている. 実際, CoAl_2O_4 (キュリーワイス温度: $\Theta = -89 \text{ K}$) は $T = 2 \text{ K}$ まで明確な磁気転移を示さずスピン間に強い反強磁性的な相関を持ちながら揺らいでいるスピン液体状態を示す. このフラストレーションは, スピン間に次近接相互作用まで考慮する事により説明されている. 最近, Hanashima らによって, A サイトと B サイト間のイオンのアンチサイトを制御した CoAl_2O_4 が作製され, そのアンチサイトによる乱れが大きくなるとスピン液体 (SL) からスピングラス (SG) が出現するという報告がされている. さらに, B サイトのみを, Rh で一部置換した場合にも SL から SG まで大きく変化することが示されている. これは, A サイト間の超交換相互作用が B サイトイオンを経由していることに起因している.

本研究では, 上で述べた Rh 置換による B サイトの乱れの効果の詳細を調べると共に, ほとんど Rh と同じイオン半径をもつ Ga で B サイト置換した場合についても実験を行った. これにより, B サイトのみの乱れが SL 状態にどのような影響を与えるのかを調べた. 更に, SL から SG が現れる過程を調べ, 従来型のカノニカル SG との比較を行った. 試料は, 固相反応法を用いて作製した. その際, B サイトのみの乱れの効果を見るため, 長時間徐冷を行い, アンチサイトの乱れを出来る限り少なくした. 作製した試料は, $\text{Co}(\text{Al}_{1-x}\text{M}_x)_2\text{O}_4$ の $\text{M} = \text{Ga}$ の場合, $x = 0.01 \sim 0.08$, $\text{M} = \text{Rh}$ の場合, $x = 0.01 \sim 0.15$ である. 構造解析は粉末 X 線回折を用いて行った. また, 磁化測定は磁気特性測定システム (MPMS) を用いて行った. この結果, Rh 置換, Ga 置換のすべての試料に対して, アンチサイトの割合が 6 % 以下の試料を得ることが出来た. 磁化測定の結果, Ga 置換の場合, $x \geq 0.05$ で, Rh 置換では $x \geq 0.1$ で SG に転移することがわかった. ここで現れる SG は, アンチサイトの乱れや Al^{3+} とイオン半径の異なる元素での置換に起因する交換相互作用のランダムネスによって生じると考えられる. しかし Rh はほとんど B サイトのみを占有するのに対し, Ga は A サイトにも占有できる, すなわち Ga の場合は B サイトに加えて A サイトの乱れも生じさせており, 全体の乱れが Rh よりも大きいので, SG の出現する x が小さくなると考えられる. ところで, この Rh 置換の SG 転移は, 他の幾何学的フラストレーション系であるパイロクロア酸化物 $\text{Y}_2\text{Mo}_2\text{O}_6$ や CoAl_2O_4 に現れる SG と似た振る舞いを示し, H - T 相図上の臨界曲線の係数は, カノニカル SG よりも一桁ほど大きく, むしろ SG 分子場理論である SK モデルの値に近かった. また, 置換量 (乱れ) を増加することで臨界指数が分子場理論の値に近づくという結果も得られた.