東邦大学

平成２６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27年2月12日（木）・13日（金）

修士・博士論文発表会

平成27年2月19日（木）・20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　（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 27 年 2 月 12 日（木）

開会　9:00 ～ 9:05

量子エレクトロニクス………………………………　9:05 ～10:41

1. 交流・直流電流の植物の生長・発芽に対する作用　大胡　和輝
2. 植物の発芽・生長への電流の作用　長谷川　杏珠
3. Ba 原子の高励起状態$5d6p\ ^3F_3$におけるゼーマン効果の測定　成田　早也子
4. Ba 原子の$6s5d\ ^3D_2$ から$5d6p\ ^3F_3$ への遷移におけるゼーマン効果の測定　宮澤　正隆
5. 薄暮時の観測に向けた LIDAR の研究　石井　果歩
6. 薄暮時における回転鏡を用いた LIDAR の研究　鎌嵜　俊輔
7. テーパー型ガラスキャピラリーにおける光の透過率の測定及び計算　川村　崇
8. 小照射野線量計の炭素線に対する基礎特性　下山　薫

磁気物性………………………………　10:51 ～12:15

9. RKKY 型スピングラス a-GdSi 薄膜の作製とその磁気的性質の測定　加藤　光樹
10. MgO(001)基板上の Fe/Au/Cr(001)三層膜で観測された磁化のスローダイナミクス　床井　圭佑
11. 化学量論的組成からずれたスピネル酸化物 $Co_{1+x}Al_{2-x}O_4$ の磁気的性質　塚原　雅之
12. $(Co_{1-x}Fe_x)_2Mo_3O_8$, $LiCo_2Mo_3O_8$ の作製および磁気的性質の測定　内藤　充更
13. A サイト秩序型$R\mathrm{BaMn_2O_6}$(R = Pr, Y)のRサイトの乱れが磁性に与える効果　谷川　統久
14. A サイト秩序型 $SmBaMn_2O_{6-x}$ の酸素欠損にともなう結晶構造・磁性の変化　渡邉　槙一
15. $\mathrm{EuTi}_{1-x}M_x\mathrm{O}_3$ (M = Al^{3+} , Ga^{3+} , $0 \leq x \leq 1$)の試料作製及び磁気的性質の測定　長瀬　拓朗

物性理論………………………………　13:30 ～15:06

16. Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用を有する磁性多層膜を用いたスピントルクダイオード効果に対する数値的研究　高杉　美菜
17. 3次元立方格子模型でのアンダーソン局在とエネルギー準位統計　伊藤　駿利
18. 有限要素法によるシュレーディンガー方程式の数値解析　田中　映里
19. 境界要素法による散乱問題の量子解析　岩崎　渉
20. ニューラルネットワークを用いた誤り訂正符号の数値的研究　梅岡　雅人
21. ニューラルネットワークのダイナミクスの数値的研究　浦上　周平
22. Kernel Polynomial 法による格子模型の局所状態密度の解析　板垣　諒
23. グラフェンの Kekulé 型ボンド秩序の欠陥近傍の電子状態　國府田　桂介

[平成 27 年 2 月 12 日(木)]

量子エレクトロニクス

1. 交流・直流電流の植物の生長・発芽に対する作用

大胡　和輝

植物に対する作用を求めるのに最適な培地を決定する為、土ポット、土、吸水性ポリマー、水に小松菜種子を埋め一週間電流を流し続け経過観測をした。その結果、水が最も適していることが分かった。この予備実験を基に直流（2mA～22mA）・交流(15mA～45mA)を水に沈めた小松菜種子 30 個に一週間流し続け、種子の発芽率・生長率を調べた。その結果、交流電流の方が通常状態に比べ生長・発芽が早いことがわかった。直流電流の方は植物の生長・発芽率が低下することが分かった。

2. 植物の発芽・生長への電流の作用

長谷川　杏珠

小松菜種子を使用して培地に 1 週間電流を流し続け、発芽やその後の生長にどのような影響を与えるのか調べた。直流電流(5～25mA)を流した場合、電流密度が大きくなると発芽率が下がり、発芽した個体の平均全長は短くなった。交流電流(5～45mA)の場合は、電流密度に対して共にほぼ一定となったが、電流密度を一定にして周波数を 2～800Hz の間で上げていくと、発芽率は変わらず、平均全長が長くなった。したがって、全長は周波数が小さくなるにつれ短くなり、発芽率は一定方向に電流を流した場合のみ電流密度が大きくなるにつれ下がることが分かった。

3. Ba 原子の高励起状態$5d6p\ {}^3F_3$におけるゼーマン効果の測定

成田　早也子

Ba 原子の低励起状態における g 因子はこれまでの研究でいくつか報告されているが、高励起状態についてはほとんど報告がない。そのため我々は系統的なゼーマン効果の測定を行っている。本研究では高分解能レーザー分光法を用いて、高励起状態における Ba 原子のゼーマン効果の研究を行った。電気放電により、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、$6s5d\ \ {}^3D_2 \rightarrow 5d6p\ {}^3F_3$(728nm)遷移のスペクトルを観測した。強さ 121G の磁場をかけ、ゼーマンスペクトルの測定を行い、上準位$5d6p\ {}^3F_3$のg_J因子を 0.9870(41)と求めた。

4. Ba 原子の$6s5d\ \ {}^3D_2$から$5d6p\ \ {}^3F_3$への遷移におけるゼーマン効果の測定

宮澤　正隆

原子のもつg因子を得ることで、原子の基礎的な性質を知る事ができる。我々は、外部共振器型波長可変半導体レーザーと原子線を使用し、高分解能レーザー分光法によるBa原子の高励起状態におけるゼーマン効果の研究を行った。電気放電を用いて、Ba原子を基底状態である$6s^2\ \ {}^1S_0$から準安定状態の$6s5d\ \ {}^3D_2$ に占有させ、$6s5d\ \ {}^3D_2$ から$5d6p\ \ {}^3F_3$ への748.8nm遷移のスペクトルを観測した。また、強さ121.0(5)Gの磁場をかけることにより、上記の遷移のゼーマンスペクトルを詳しく測定した。これにより、上準位$5d6p\ \ {}^3F_3$ のg因子を0.9870(41)と決定した。

5. 薄暮時の観測に向けた LIDAR の研究

石井　果歩

本研究では、薄暮時に使用できることを目的として LIDAR の改良を行った。まず、レーザーと毎秒 100 回転する回転鏡の同期をして夜間に実験を行った。離れた対象物にレーザー光を照射し、散乱光を撮影することに成功した。次に背景光を抑えるために毎秒 40 回転するメカニカルシャッターを製作し、回転鏡と同期をして薄暮時に実験を行った。上空に向けてレーザー光を射出し、0.3ms 相当のシャッタースピードで散乱光を撮影することに成功した。撮影した画像を解析し、距離と散乱光強度の関係を調べた。

6. 薄暮時における回転鏡を用いた LIDAR の研究

鎌嵜　俊輔

本研究は「デジタルカメラ、回転鏡、メカニカルシャッターを用いたレーザーレーダー」による大気の観測である。今年度の研究では、背景光の影響から夜間でしか行うことのできなかった観測を、より背景光の多い薄暮時に観測可能な方法の確立を目的とした。実験では薄暮時に YAG レーザーの発振と毎秒 40 回転するメカニカルシャッター、回転鏡を同期させ、0.3[ms]相当のシャッタースピードで撮影した。レーザービームを大気中のエアロゾルに向けて照射し、記録した画像を解析することで距離と散乱光の強度を測定した。

7. テーパー型ガラスキャピラリーにおける光の透過率の測定及び計算

川村　崇

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搬及び、透過特性の解明を目的としている。出口径 23 μm から 106 μm までのテーパー型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、透過率及び回折縞の拡がり角を測定した。ガラスキャピラリーをモデル化し、シミュレーションを用いて透過率を計算した結果、実験値とほぼ一致した。また、計算ではガラスキャピラリーや入射光のパラメータ（beam size、屈折率、テーパー角、長さ）などの値を変えて透過率の影響を調べた。

8. 小照射野線量計の炭素線に対する基礎特性

下山　薫

がん治療法の一つとして重粒子線（炭素線）治療が行われている。放射線治療では、治療計画による線量分布が正確に照射機器で形成されているかを確認することが品質保証/品質管理(QA/QC)の観点から重要である。よって QA/QC 方法の確立及び測定の高精度化は、治療成果のさらなる向上やリスク低減に大きく関わる。本研究では、光子線治療において小照射野線量分布の QA/QC に広く使われている小型線量計について、炭素線に対する基礎線量応答特性を評価し、炭素線治療での適用について検討を行った。

磁気物性

9. RKKY 型スピングラス a-GdSi 薄膜の作製とその磁気的性質の測定

加藤　光樹

アモルファス磁性体 a-Gd_xSi_{1-x}は RKKY 型スピングラス(SG)とされているが、その性質や磁気相図は未だ良くわかっていない。本研究では x=0.13～0.60 の薄膜を高周波マグネトロンスパッタリング装置を用いて複合ターゲット法により作製した。組成は電子線プローブマイクロアナライザー(EPMA)を用いて決定した。また、直流磁化率と交流磁化率の測定をし、磁気相図を作成した。その結果、x≦0.27 ではカノニカル SG 的な特徴が得られ、x≧0.50 では常磁性相から強磁性相、強磁性相から SG 相へのリエントラント転移が生じることが明らかになった。

10. MgO(001)基板上の Fe/Au/Cr(001)三層膜で観測された磁化のスローダイナミクス

床井　圭佑

MgO(001)基板上に MBE 法を用いて Fe/Au/Cr(001)三層膜を作製し、熱残留磁化の時間変化を調べた。その結果、非磁性の Au を挟んでもスローダイナミクスが現れた。これは、量子井戸効果による Au のスピン分極に起因して界面フラストレーションが発生したことを示唆する。しかし、この効果を検証するためには、Au の界面がエピタキシャルである必要がある。そこで、本研究では Au が Cr 上にどのように成長するか RHEED を用いて詳細に調べた。その結果、Au の膜厚に関わらずストリーク像が観測され、エピタキシャルな成長過程を保ったまま量子井戸の構造を制御することが可能であることがわかった。

11. 化学量論的組成からずれたスピネル酸化物 $Co_{1+x}Al_{2-x}O_4$の磁気的性質

塚原　雅之

本研究では幾何学的フラストレーションを持つスピネル酸化物 $CoAl_2O_4$ を非化学量論的組成で作製し、$Co_{1+x}Al_{2-x}O_4$の構造と磁気的性質の変化を調べた。その結果、0.05≦x≦0.5 の試料で B サイトの Co^{3+}置換と１～３割程度の Co^{2+}置換が行われ、先行研究の B サイト Co^{3+}置換のみの実験結果より大きな格子定数と A サイトと B サイト間の乱れ η があることが分かった。また、x=0.15 の試料では η が 0.08 と小さいにもかかわらずスピングラスが出現した。この理由として単純な B サイトの乱れ以外の効果も考えられる。

12. $(Co_{1-x}Fe_x)_2Mo_3O_8$, $LiCo_2Mo_3O_8$の作製および磁気的性質の測定

内藤　充更

神岡鉱($Fe_2Mo_3O_8$)は磁性を持つ天然鉱物であり、磁性を担う Fe^{2+}はハニカム状格子を形成している。そして、この Fe サイトを他の遷移金属元素で置換することで、多彩な磁性が発現することが知られている。しかし、神岡鉱型構造を持つ試料の作製が困難であるため、その物性には不明な点も多い。本実験では $Co_2Mo_3O_8$ の一部を他元素で置換した$(Co_{1-x}Fe_x)_2Mo_3O_8$ および $LiCo_2Mo_3O_8$ を作製した。磁化測定の結果、$Co_2Mo_3O_8$ で見られる多段転移は Co の一部を Fe で置換することで抑えられることがわかった。また、$LiCo_2Mo_3O_8$においては室温で強磁性的な振る舞いが観測された。この原因は、Co サイトと Mo サイト間の磁気的相互作用に起因する可能性が考えられる。

13. Aサイト秩序型$R\mathrm{BaMn_2O_6}$(R = Pr, Y)のRサイトの乱れが磁性に与える効果

谷川　統久

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)効果を示すため、この効果を利用した新しい材料の開発が期待されている。Aサイト秩序型$R\mathrm{BaMn_2O_6}$(R = 希土類)はR

とBaが規則化した構造を持つ。そして、室温に多重臨界点があるため、CMR 効果が室温で発現する可能性がある。本研究ではRサイトにイオン半径が大きく異なるPr, Yを固溶させることで結晶構造に乱れを入れ、その乱れが多重臨界点付近の物性に与える効果を調べた。その結果、Rサイトの乱れが Mn 3d 電子の伝導を妨げ、電荷・軌道秩序絶縁体相がより安定化されることがわかった。

14. *A* サイト秩序型 $SmBaMn_2O_{6-x}$ の酸素欠損にともなう結晶構造・磁性の変化

渡邉　槙一

ペロブスカイト型 Mn 酸化物は Mn の平均価数の変化によって、超巨大磁気抵抗(CMR)効果や巨大電気磁気効果を示す。*A* サイト秩序型 $RBaMn_2O_6$(R = 希土類)は室温で CMR 効果の発現が期待されている物質である。本研究では、$SmBaMn_2O_{6-x}$ の酸素を欠損させることで Mn の平均価数を制御し、それにともなう結晶構造と物性の変化を調べた。その結果、x = 0.1 付近の試料においては、x = 0 の試料よりも電荷・軌道秩序絶縁体転移温度が高温側へ移動していることがわかった。また、x = 0.5 だけでなく、x = 0.25 付近にも新しい酸素欠損の秩序構造の存在を示唆する結果が得られた。

15. $EuTi_{1-x}M_xO_3$ (M = Al^{3+}, Ga^{3+}, $0 \leq x \leq 1$)の試料作製及び磁気的性質の測定

長瀬　拓朗

$EuTiO_3$ は磁性誘電体であり、磁場を印加することで誘電率が変化を示す。$EuTiO_3$ の基底状態は反強磁性絶縁体であり、Ti^{4+}を 10%程度の Al^{3+}で置換すると基底状態が強磁性絶縁体に変化することが最近の研究で報告されている。しかし、Al^{3+}の置換量が 10%以上の試料 $EuTi_{1-x}Al_xO_3$ ($x > 0.1$) の物性についてはまだ知られていない。そこで、本研究ではアーク炉を用いて $EuTi_{1-x}Al_xO_3$ ($0.1 < x \leq 1$) の試料作製を行い、その磁気的性質について調べた。その結果、置換量 x の増加にともない強磁性相関が発達し、x = 0.2 付近で最も強くなることが分かった。

物性理論

16. Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用を有する磁性多層膜を用いたスピントルクダイオード効果に対する数値的研究

高杉　美菜

空間的な磁化構造を持つ強磁性体に電流を流すと、伝導電子のスピンによって磁化構造を変化させることができる。この現象はスピントルク効果と呼ばれている。本研究では二つの磁化の間に Dzyaloshinskii-Moriya(DM)相互作用がある場合のスピントルクダイオード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、スピントルク効果を加え、交流電流を流したときの電圧を計算した。計算の結果、二つの磁化間の向きと DM 相互作用の向きを調節することで、大きな整流作用が得られることが明らかになった。

17. 3 次元立方格子模型でのアンダーソン局在とエネルギー準位統計

伊藤　駿利

金属において電子の波動関数が不純物などによる不規則ポテンシャルにより局在し絶縁体的振る舞いが現れることが知られている。本研究では３次元立方格子模型において各格子点に不規則ポテンシャルを導入し不規則性の強さを大きくするとアンダーソン局在が生じることを確認した。またエネルギー準位統計において最近接準位間隔分布が金属ではウィグナー分布、絶縁体ではポアソン分布になることが知られて

いる。これを数値的に計算し不規則性の強さを大きくすると分布がウィグナー分布からポアソン分布に近づくことを確認し転移点を求めた。

18. 有限要素法によるシュレーディンガー方程式の数値解析

田中　映里

物理現象に現れる偏微分方程式を、任意形状の系のなかで任意の境界条件のもとに解く場合、考えている領域を多数の小さな領域に分割して近似的に解析する有限要素法を用いるのが有効である。本研究では、1 次元散乱問題と 2 次元固有値問題について、有限要素法を適用した解析を行い、透過係数やエネルギー固有値の精度と分割数との依存性を調べた。また、2 次元固有値問題では、領域の形状を複雑にした場合の解析も行い、有限要素法の汎用の高さを確認した。

19. 境界要素法による散乱問題の量子解析

岩崎　渉

解析的な方法では解くことのできない複雑な問題は、数値的手法を用いて近似的に解く必要がある。本研究ではそうした数値的手法の一つである境界要素法を用いて量子系の散乱問題を調べた。境界要素法とは、複雑な形状を扱うのに適した手法である。まず初めに一次元系における散乱問題を解いて、エネルギーと透過確率と反射確率の関係、境界要素法の精度について調べた。次に二次元系に拡張してエネルギーと反射確率と透過確率の関係などについて調べた。

20. ニューラルネットワークを用いた誤り訂正符号の数値的研究

梅岡　雅人

情報を雑音のある通信路に送ることで、受信側は、雑音のある情報を得ることになる。そこで送信する情報以外に送る情報を冗長化し、雑音が入っても正しい情報を推定することを誤り訂正符号問題である。本研究は、100、1000 ビットの情報を±1 の Ising スピンで表し、確率 p で雑音が入る通信路を考え、冗長化としてスピン間の積も合わせて通信路に送る場合を考えた。送った情報から推定するためにニューロンの時間変化を記述する dynamics を応用した。その結果、確率 p が 0.2 の場合は、100、1000 ビットの情報を 100%程度、正しい情報を修復することができた。

21. ニューラルネットワークのダイナミクスの数値的研究

浦上　周平

本研究では、複数のパターンを記憶させたニューラルネットワークにおいて、ニューロン同士の結合が対称ではない場合にネットワークの動的性質がどのように変化するか調べた。非対称性の強さによってネットワークのダイナミクスにリミットサイクル(極限周期軌道)が現れることをシミュレーションプログラムを具体的に構築して調べた。その結果、ネットワークの規模が大きい時ほど、記憶させた内容を思い出したときの成功度合が高くなるということがわかった。

22. Kernel Polynomial 法による格子模型の局所状態密度の解析

板垣　諒

正方格子やグラフェンに磁場を入れると、ランダウ準位が現れることがわかっている。このランダウ準位の準位ごとの状態密度について数値的に計算をした。またグラフェンにケクレ型ボンド秩序にドメイン境界があると、境界付近にゼロエネルギー状態が出現することが知られている。このような系に副格子間

での符号のみ違うポテンシャルを加えて、このゼロエネルギーの状態密度がどのように変化するのかを調べた。その結果、ポテンシャルがない時のゼロエネルギーの状態密度が、ポテンシャルの分だけシフトするという結果を得た。

23. グラフェンの Kekulé 型ボンド秩序の欠陥近傍の電子状態

國府田 桂介

グラフェンに Kekulé 型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る。このようなボンド秩序の組み合わせでドメイン境界があると、境界が交わる位置で欠陥がある系が考えられる。欠陥近傍に局在したゼロエネルギー状態がエネルギーギャップ中に形成されることが知られている。今回は厳密対角化法により波動関数を直接求めその性質を調べた。特に副格子で正負のみが違うポテンシャルを加えた場合について、欠陥に付随した非整数電荷の変化について具体的に調べた。その結果として有効理論とよく一致することを確認した。

原子過程

24. 水素イオン照射によりタングステン表面で反射された励起水素の Hα 線の偏光度空間分布測定

峯田　翔太

イオンを金属表面に衝突させた時に起こるスパッタリングや反射、電荷交換過程は、核融合プラズマの診断やシミュレーションにおいて重要で、それらの基礎データが熱望されている。本実験では電荷交換過程の詳しい解明を目的とし、H^+イオンビームを入射エネルギー35 keV でタングステン表面に照射し、電荷交換過程で生じた反射した励起水素原子からの Hα 線の二次元発光強度を測定した。偏光板を挿入して得られた発光強度分布から偏光度の二次元分布を見積もったところ、Hα 線は励起水素原子の反射方向に偏光している事がわかった。

25. 電子衝撃を用いたアルゴンの副殻電子励起による Fano 効果の観測

金親　奈穂

系の離散的な状態と連続状態が同じ固有値をとるとき、その遷移確率を表すプロファイルが特徴的な形状を示すことがある。これは、量子力学的な干渉と共鳴の現れであり、Fano 効果と呼ばれる。アルゴンの副殻 3s 電子の励起状態は、エネルギー的に連続状態の中にあるため、光吸収では Fano 効果が観測される。本研究では、この励起エネルギー領域でのエネルギー損失スペクトルに Fano 効果を確認することを目的とした。実験の結果、得られたスペクトルの 26.6eV 付近に干渉と共鳴の証であるディップを観測することができた。

26. ゲート法を用いたイオン付着飛行時間型分析装置による質量分析

茂木　善行

本研究室で開発されたイオン付着飛行時間型分析装置は、気相の試料分子を壊すことなく観測できる装置であるが、測定を行う際にイオンビームをパルス化することが必要となる。これまで用いていた偏向法ではパルス化されたイオンの直進性が低く、イオンの検出効率がよくない。そこで本研究では、検出効率の向上を目的に、電場勾配によってイオンの通過・遮断を制御するゲート法をパルス化法として採用し、実験を行った。その結果、ゲート法を用いても質量分析は可能であったが、イオンの検出感度を大きく向

上させることはできなかった。

27. 散乱電子-イオン同時計測装置による窒素分子の二電子励起状態の研究

長谷川　徹

二つの電子が同時に励起準位に励起した二電子励起状態の分子は、自動イオン化により分子イオンをつくる過程、あるいはイオン化解離や中性解離を起こすといった過程により緩和する。本研究では、窒素分子の二電子励起状態を探索すること、および解離過程を明らかにすることを目的とする。実験では、入射電子エネルギー200 eV、散乱角 6°で窒素分子に対して散乱電子 - イオン同時計測を行い、励起エネルギーを関数とした N_2^+と N^+のイオンの生成量を得た。その結果、光学的に禁制な二電子励起状態の存在を確認することができた。

28. 中性子線照射および X 線照射による水中でのラジカル発生機構

右田　豊紀恵

人体に中性子線が照射されたときの影響を理解するためには、中性子線照射による水中でのラジカル発生機構についての知見を得る必要がある。本研究では、水に中性子線や X 線を照射したときのラジカル発生機構に関する知見を得ることを目的とし、発生した OH ラジカルの量を電子スピン共鳴スピントラップ法を用いて定量測定した。その結果、照射後の OH ラジカル生成量に相違はなかったが、信号強度の減衰速度は異なることが見出された。その解析から、中性子線照射では X 線照射と比べて H ラジカル発生量が少ないことが示唆された。

表面物理

29. 昇温脱離法による石英ガラスからの水･水素脱離の観察

中村　麻里

ガラスへの水の吸着･吸蔵状態を調べるため、石英ガラスからの昇温脱離気体の TPD(Temperature Programmed Desorption)スペクトルを測定した。試料には粒径 0.1 mm の粉状のシリカビーズを用いた。ガラス粉を重水に浸し、曝露時間の異なる試料(0 h, 24 h, 96 h)を作成した。昇温速度は 4 ℃/min、到達温度は 1000 ℃とし、昇温中の脱離気体種と脱離量を四重極型質量分析計で測定した。重水曝露前の試料では、H または O を含む脱離気体は m/z= 2(H_2)、18(H_2O)であった。24h 曝露試料からは D を含む脱離気体は検出できず、96h 曝露からは m/z=19(HDO)の脱離が検出された。H_2O、HDO には複数の脱離機構の存在が示唆される。

30. 電子衝撃脱離イオン捕集用静電レンズ系の設計

市川　香

本研究室では金属中での水素透過特性を調べるため、ステンレス薄板の片側を重水素雰囲気に曝露し反対側表面上に拡散透過した重水素を走査電子線による電子衝撃脱離イオン像として観察している。イオン像 1 枚の撮影時間は 400 秒であるが検出されたイオン数は極端に少なく試料の結晶構造との関連付けが困難である。イオンの捕集効率を上げるため捕集用静電レンズの最適化シミュレーション、レンズ系付試料台の設計・製作および検出器の開口面積を広げる改良を行った。その結果検出イオン数は 2 桁増加し、湧出サイトの可視化が期待できる。

31. 原子間力顕微鏡によるゲータイト劈開面の観察

山中　俊

原子間力顕微鏡(AFM)を用いて土壌鉱物であるゲータイト劈開面の観察を行った。天然に結晶成長したゲータイトを大気中で劈開後 AFM 試料台に取り付け、真空排気し(～1×10^{-3} Pa)、AFM 観察を行った。ゲータイトは 1 個の Fe^{3+}を各々3 個の O^{2-}と OH^{-}が取り囲む 8 面体が稜を共有し c 軸方向に 2 列シート状に配列している。このシートは b 軸方向に同じ幅の空洞と交互に並ぶ。劈開面には幅 200～700 nm の間に多く分布するステップが並び、その段差は b 軸の格子定数(0.996 nm)の約 1/2 の整数倍になっており、劈開面が(010)かその微斜面であることを示唆している。

32. XPS を用いた Goethite(αーFeOOH)へのセシウム吸着形態観察

石塚　裕介

Cs の土壌鉱物への吸着形態を調べる為、土壌主成分である Goethite(α-FeOOH) の(010)劈開面に Cs を真空蒸着し XPS を用いて O 1s と Cs 3d の Chemicai Shift を測定した。Goethite は Fe^{2+}の周囲に O^{2-}と OH^{-}が 3 個ずつ配位した八面体を構造単位としてシート状に配列する構造である。Cs 膜厚を 0 から 9 Åへと蒸着した際，OH^{-}由来の O 1s ピークが低エネルギー側にシフトし、O^{2-}由来のピークシフトはしなかった。また、9 Å蒸着によって出現した Cs 3d ピークの結合エネルギーより CsOH 由来のピークであることが分かった。よって，Cs は Goethite の OH^{-}サイトに優先的に結合することが分かった。

[平成 27 年 2 月 13 日(金)]

宇宙・素粒子

33. 銀河団に付随するダークマターの速度分布

中町　隆太

銀河団は孤立系ではないため、宇宙年齢という有限時間でどの程度の力学的平衡状態に達するかは自明ではない。本研究では、重力多体シミュレーションの結果を用いて、銀河団質量の大半を占めるダークマターの速度分布を定量的に調べた。その結果、安定した形状をもつ銀河団の内縁部ではマクスウェル分布が近似的に実現されることがわかった。平均速度は速度分散に比べて十分に小さく、ともにほぼ一定で等方的な振る舞いを見せた。外縁部にいくにつれて速度分散はゆるやかに減少しはじめ、異方性が大きくなることが確認できた。これは外側からの物質降着の影響であると考えられる。

34. ダークマタ—ハローの密度プロファイル

藤原　將誠

ダークマタ—は宇宙の物質の大部分を占めており、大規模構造の形成においても大きな役割を担っていると考えられている。本研究では宇宙論的大規模数値シミュレーションの結果を用いて、力学平衡にほぼ達したとみなせるダークマタ—ハローの密度分布を計算した。そして、その結果を過去の研究によって示唆されている半径方向の平均的な密度分布と比較する。さらに、密度分布が角度方向にどの程度変化するかを調べる。

35. 重力マイクロレンズ効果を用いた太陽系外惑星探査の方法

田久保　耀子

太陽系外惑星の探査方法の一つに、重力マイクロレンズ効果を利用した方法がある。これは、背景天体と観測者の間を惑星系が通過することによって、背景天体の見かけの明るさに急激な増光がみられることを利用したものである。本研究では、重力マイクロレンズ効果を用いた太陽系外惑星の探査方法の理解を目的とし、惑星を伴った恒星が通過することで起こる増光の様子について定量的に調べた。過去の研究では、惑星の恒星周りの公転運動が考慮されずに解析されることが多かったが、ここでは惑星の公転運動も考慮した場合の増光の様子についても調べた。

36. 重力マイクロレンズ効果を用いた銀河系内ダークマター候補天体の観測確率

佐々木　健人

一般相対論から導かれる重力マイクロレンズ効果は、銀河や恒星などの背景天体と観測者の間を別の天体が通過したとき、背景天体が増光する現象である。本論文では、銀河系内における太陽系の位置と銀河系内の質量密度分布を考慮して、任意の方向の背景天体を観測した場合に起こるマイクロレンズ効果の確率を求めることを目的とした。そして、観測者の位置から大マゼラン星雲や銀河の中心方向など任意の方向を観測した際に起きるマイクロレンズ効果の効率を定量的に比較する。

37. 2+1 次元重力理論における光路の解析

廣田　桂祐

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。

38. 2+1 次元での一般相対性理論

長坂　健汰

空間 2 次元＋時間 1 次元での重力場の性質を調べるため、2+1 次元でのシュワルツシルド解を求める。その結果、平面を V 字に切り取った様な時空となり、その切り口を張り合わせた時空は質点の位置にのみ特異点を持つ「円錐状」になる。3+1 次元重力場でのブラックホールとの違いは、イベントホライズンを持たないという事である。次に測地線方程式を解き、粒子の振る舞いを調べる。最後に、ラプラス方程式から 2＋1 次元でのニュートンポテンシャルを求め、そこでの粒子の振る舞いと比較する。

39. Yang-Mills 理論とクォークの散乱

佐藤　広規

素粒子の相互作用を理解する手段として Yang-Mills の一般ゲージ理論は有効な理論であり、ゲージ群が U(1)対称性や SU(3)対称性の場合に電磁相互作用や強い相互作用を表現する。この論文では Yang-Mills 理論の一つの例としてクォークのゲージ場による散乱振幅を計算する。具体的には電磁相互作用が働く Dirac 粒子の系で、電子－電子散乱振幅の衝突断面積の計算を行う。また電子－陽電子散乱振幅の衝突断面積の計算も行う。両者の散乱の衝突断面積を比較する。二つの系の衝突断面積は散乱角が小さい時、Rutherford 散乱の衝突断面積に近い値となる。

物性物理

40. 多層ディラック電子系の層間磁気抵抗: ゼロモードランダウ準位効果

塚本　智晃

高圧力下にある二次元有機導体 α-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$ は世界初の「多層状単結晶」の二次元ゼロギャップ電気伝導体である。特徴の 1 つは磁場下で通常導体とは異なるランダウ準位構造を形成することにある。最も特徴的なのは、ディラック点にゼロモードと呼ぶ N=0 の特別なランダウ準位を持つことである。本研究ではゼロモードの基本的な性質を明らかにすることを目的として、この系の層間磁気抵抗を幾つかの圧力下で調べた。その結果、フェルミ速度は圧力で増加する傾向が見られた。さらに、ゼロモードの広がりは他のランダウ準位と比べて非常に小さいことが示唆する結果を得た。

41. 分子性導体 EtMe$_3$P[Pd(dmit)$_2$]$_2$ におけるモット転移近傍のホール効果

馬場　知之

バンド理論では金属であるべき物質が、強い電子相関によって実現した絶縁体をモット絶縁体という。圧力等により、モット絶縁体－金属転移近傍で超伝導などの興味深い物性が実現するが、統一的な理解はまだなされていない。本研究では、常圧でモット絶縁体、圧力印加によって金属状態、さらには超伝導を示す分子性導体 EtMe$_3$P[Pd(dmit)$_2$]$_2$ を用いて、モット転移の秩序変数は何かという問題に取り組み、モット転移近傍のホール効果を測定した。その結果、この系の主な秩序変数はキャリア易動度であることが分かった。

42. 無冷媒式ヘリウム 3 システムを用いた分子性導体 EtMe$_3$P[Pd(dmit)$_2$]$_2$ の電気伝導測定

田中　元貴

二次元系の VBS(Valence Bond Solid)状態が分子性導体 EtMe$_3$P[Pd(dmit)$_2$]$_2$ の低温で実現した。興味深いのは、この物質を加圧すると、VBS 相に隣接して超伝導が出現することである。VBS 相ではスピン一重項状態を形成しているが、本研究ではそのことが超伝導発現にどう関与するのかという問題に取り組んだ。そこで、新たに導入した無冷媒式ヘリウム 3 システムの調整を行い、2 次元伝導面に垂直に磁場をかけて超伝導相の温度－磁場相図を幾つかの圧力下で調べた。結果、VBS に隣接した超伝導状態は強固で、パウリ極限よりも非常に高い臨界磁場をもつことがわかった。

43. 有機導体 λ-(BETS)$_2$FeCl$_4$ の磁場誘起絶縁体金属転移のヒステリシスの研究

松岡　高広

有機伝導体 λ-(BETS)$_2$FeCl$_4$ は 8.3 K で常磁性金属－反強磁性絶縁体転移を起こす。また、磁場の印加により絶縁体から金属へのヒステリシスを伴う 1 次相転移が報告されているが、その機構は未だ不明である。本研究では磁場誘起絶縁体－金属転移に見られるヒステリシスの詳細を調べ、その機構を探るため、金属－絶縁体転移温度以下で磁場下における電気抵抗を磁場の掃引速度を変化させ測定を行った。その結果、ヒステリシスに温度依存性がないことを確認した。また、磁場の掃引速度を遅くするとヒステリシスは小さくなることが明らかとなった。

44. κ-(BETS)$_2$FeBr$_4$ の磁場下での熱的性質

宇都宮　一広

磁性有機超伝導体 κ-(BETS)$_2$FeBr$_4$ は低温において 3d スピンによる反強磁性相と π 電子による超伝導相が共存し、外部磁場の増大に伴い両相とも消失するが、強磁場下にて再度超伝導相を発現する。本研究では、

磁場下でのこうした相転移の起源を調べることを目的に磁気熱量効果を測定し、エントロピー変化について評価した。その結果、強磁場下で磁場誘起超伝導が発現する原因であるπ-d 相互作用が、磁気秩序の消失する常磁性領域においても 3d スピンに大きな影響を与えていることがわかった。

45. κ-$(BETS)_2Fe_xGa_{1-x}Br_4$の電気抵抗測定

佐藤　俊

磁性有機超伝導体は、伝導を担うπ電子系と磁性を担う d 電子系の相互作用によって磁性と超伝導の共存や磁場誘起超伝導などの特異な性質を示す。本研究では d スピンが及ぼす磁性と電気伝導への影響を明らかにするため、κ-$(BETS)_2Fe_xGa_{1-x}Br_4$混晶系試料の電気抵抗測定を行った。その結果 d スピンの稀薄化によって反強磁性転移が低温への抑制されることや、超伝導転移が高温側へ移動し、その発現が容易化される様子が観測された。これにより同系では反強磁性転移をπ電子が媒介している可能性や、磁気秩序が超伝導転移を妨げるように働く様子が明らかとなった。

46. 有機伝導体κ-$(BEDT\text{-}TTF)_2Cu[N(CN)_2]Br$の比熱測定

丸山　和希

表題物質は超伝導相と反強磁性モット絶縁体相が競合し、BEDT-TTF 分子の重水素置換量により超伝導相から絶縁体相へ転移させることが可能な系である。本研究では両相の転移領域で系の乱雑さを決定付けると言われているグラス転移の性質を検討するために比熱装置の作成をし、実験を行った。測定の結果から重水素置換量が多いほうがグラス転移を起こす温度が高いことが明らかとなった。また掃引速度の依存性では、速度が遅くなるにつれて転移温度が下がっていくことが観測することができた。

47. 有機導体θ-$(BEDT\text{-}TTF)_2TlZn(SCN)_4$における比熱測定

大嶋　一樹

θ-$(BEDT\text{-}TTF)_2M(SCN)_4$ (M =TlZn, TlCo)は低温で ET 分子内の電荷の偏りが対角型及び水平型のストライプ秩序に転移することが知られているが、TlZn 塩の転移の詳細はまだわかっていない。このため本研究では TlZn 塩と TlCo 塩の比熱を測定し、転移におけるエントロピー変化から電荷の偏りの過程を調べた。その結果、TlCo 塩では 245 K で 7.5 J/mol K の大きなエントロピー変化を伴う比熱のピークが観測された。一方 TlZn 塩では TlCo 塩とは異なり、165～175 K の間で複数の小さな比熱のピークが観測され、温度掃引の仕方に寄りピークの形、大きさ、ピークの温度が変化する特異なシグナルを発見した。

ツーステップ

48. LED の基本知識と特性が理解できる学習プログラムの作成

工藤　聖

本研究では、LED の構造と発光原理、種類を調べ、電流電圧特性・受光特性を調べる予備実験を行った。実験により LED の電流と電圧の特性、省電力であることがわかり、異なる光の波長を当てた時の LED による発電の違いのデータが得られた。それらを踏まえ、高校生向けの LED の構造と発光原理、種類などを学習する授業と電流電圧特性、受光特性などを学習する実験を合わせた学習プログラムを開発し大学生向けに授業実践し、小学生向けの LED を用いた工作教材を実験工作教室で実践した。

49. 風力発電について学ぶための小型風車モデルの開発

宮内　崚

風力発電を学ぶため、風速と風車の回転数の簡易的な測定方法を考案し、身近な素材であるペットボトル・紙コップ・板目表紙を用いて小型水平軸型風車モデルを開発した。風速の測定は風圧板の角度の測定で、回転数はモーターの電圧と回転数の関係性から求めた。結果、紙コップは小学生でも加工がしやすいが、羽根のたわみを考慮する必要が出てくる、板目表紙の場合は条件制御が行いやすいが自由度が減ってしまうなどそれぞれに有用性と欠点があることがわかった。今後の課題は安定した風速を作り出すこと、垂直軸型風車の教材開発である。

基礎物理

50. ミュー粒子寿命測定装置のための信号処理系の製作

柴野　誠

ミュー粒子は弱い相互作用によって約 2.2μs の寿命で崩壊する。その寿命はシンチレーションカウンターと電子回路を用いることで測定できる。本研究では、ディスクリミネーター回路を構成し、1ch あたり 5cm×9cm の大きさにすることで PC に組み込み可能とした。ヒステリシス回路を構成することにより、おおむね 5mV のヒステリシスを持たせることができた。その結果、入力信号中に含まれるノイズにより、基準電圧付近で出力が不安定になるのを防ぐことができた。動作試験を行い、入力信号に対してほぼ設定どおりの閾値で作動させることができたことを確認した。

51. ダブルハイパー核探索実験 E373 の乾板を用いたハンマートラック事象の親質量測定

荒谷　純平

KEKPS-E373 実験の原子核乾板には大量の素粒子反応が記録されている。その中に潜むダブルハイパー核を検出するため、原子核乾板を自動飛跡認識装置でスキャンし、複数飛跡が収束する反応点を抽出した後、その画像から目視により複数反応点候補を伴う事象を選別し、実際に顕微鏡下で確認した。様々な興味深い事象が検出されたが、その中にハンマーのような形の飛跡がある。これら 18 個のハンマートラック事象について、放出された 2 個の α 粒子の飛程を測定し、運動エネルギーを見積もって親の質量を計算したところ、$^{8}\mathrm{Be}^{*}$ であることがわかった。

52. 高精度飛跡選別装置による原子核乾板中の荷電粒子電離損失量の測定

星　魁人

原子核乾板を使用したニュートリノ実験の解析において背景事象を除去するには、荷電粒子の物質中での電離損失量を測定し、粒子を識別する方法が有効である。そこで、今日広く使用されている高速自動飛跡読取装置(UTS)を用いて、16 層の断層映像中の何層に粒子飛跡に伴う銀粒子像があるか、または各層の銀粒子像面積の総和によって、粒子飛跡の電離損失量を測定して識別する方法が開発された。本研究では、この UTS と本研究室が独自に開発した高精度飛跡選別装置(FTS)で同様の測定をし、FTS の粒子識別能力の評価を行った。

53. 自動飛跡認識装置 FTS におけるナビゲーションシステムの開発

川井　慎之介

原子核乾板の自動飛跡認識装置は年々改良が進み、短時間で膨大なデータを得ることができるようになった。しかし、シグナルとノイズを分離する目視確認は依然必要不可欠なため、それが全体の解析時間を決めている。そこで目視確認の自動化を目指し、ナビゲーションと呼ばれる座標系の再現に必要な位置補正システムを開発した。3 つの異なるトラック集団に対し、高い確率で 10μm 以下と十分な再現性を確認できた。これにより、異なるシステムで得た飛跡の 1 対 1 対応が可能となったので、それぞれの飛跡の評価や再測定による精密測定が可能になった。

54. 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

ニュートリノ振動の検証を行う OPERA 実験ではタウ粒子崩壊の幾何学的・運動学的特徴を用いてタウニュートリノの出現を検出するが、ハドロンの二次散乱が背景事象(BG)となる。これまで OPERA 実験ではシミュレーション(MC)により BG の期待値が見積もられている。本研究では 3GeV/c のパイ中間子ビームを照射した原子核乾板を用いてその正当性を実験的に評価した。その結果、平均自由行程において誤差の 1σ 以内で MC との一致を確認し、さらに二次粒子の運動量に関する基礎データを得ることができた。

55. ニュートリノ精密測定実験で用いる原子核乾板の性能評価

稲生　恒明

原子核乾板は 1μm 以下の精度で荷電粒子を観測できる固体飛跡検出器である。新しい J-PARC でのニュートリノ・原子核反応の測定実験では、感度向上を目指し、臭化銀含有体積比を従来の 30%から 55%に向上させた新型原子核乾板を用いる。本研究では、新型原子核乾板 5 枚を用いた性能評価用検出器を作製し、乾板垂線に対して $\tan\theta = 0, 1, 2, 3$ の宇宙線を 1 平方センチあたり各角度 10^3 本となるように照射した。乾板現像後、垂直方向の宇宙線を測定したところ、1 平方センチあたり $1.5*10^3$ 本となり、期待値とほぼ一致した。この実験をもとに検出効率の評価を行う。

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。

平成 27 年 2 月 19 日（木）

博士課程（講演 30 分、質疑 10 分）

9:00 ～ 9:40

1. 動的核偏極を用いた光励起分子の電子三重項状態の寿命測定と陽子・炭素-13 スピン超偏極状態の生成　河原 朋美 [量エレ]

修士課程（講演 20 分、質疑 5 分）

9:40 ～ 10:05

1. 二波長三光子共鳴イオン化分光法による Ti の励起準位の寿命測定　赤羽 直幸 [量エレ]

10:15 ～ 11:55

2. 分子性ディラック電子系の高圧下輸送現象　小澤 拓弥 [物性物理]
3. π–d 系有機導体λ-$(BETS)_2FeCl_4$における磁場誘起相転移の電気・磁気特性　杉浦 栞理 [物性物理]
4. 有機導体κ-$(BETS)_2FeBr_4$の磁場下での電子状態　牟田 翔馬 [物性物理]
5. プロトンー電子相関系有機伝導体κ-X_3(Cat-EDT-TTF)$_2$[X=H,D]における H/D 同位体効果及び圧力効果の研究　山田 翔太 [物性物理]

13:00 ～ 14:40

6. X 線光電子分光法による Goethite 表面における Cesium の吸着形態の観察　山田 智之 [表面物理]
7. MgO(001) 基板上のエピタキシャル Fe/Au/Cr 三層膜における量子井戸効果がもたらす界面フラストレーション　蕗田 佳耶 [磁気物性]
8. 蛍光 X 線分析を用いた創傷部アクチニド汚染定量評価法の開発　柳原 孝太 [原子過程]
9. カイラル磁性体中の磁化ダイナミクスから誘起されるスピン起電力　嶋田 裕樹 [物性理論]

平成 27 年 2 月 20 日（金）

13:00 ～ 14:15

10. タウ崩壊事象におけるπビームを用いた高統計のためのハドロンバックグラウンドの研究　西村 秋哉 [基礎物理]
11. ECC 構造での低エネルギー電子の反応解析　松本 拓也 [基礎物理]
12. KEK-PS E373 における次世代ダブルハイパー核探索法を用いた再解析　福永 匠吾 [基礎物理]

14:25 ～ 15:40

13. 三軸不等楕円体モデルにおける銀河団質量の定量的評価　戸澤 優也 [宇宙・素]
14. トンネル接合型サブミリ波カメラの安定動作条件の確立　河西 美穂 [宇宙・素]
15. サブミリ波カメラの冷却システムと読み出し回路の開発　久保 大樹 [宇宙・素]

博士論文予稿

1.

動的核偏極を用いた光励起分子の電子三重項状態の寿命測定と陽子・炭素-13 スピン超偏極状態の生成

河原　朋美（量エレ）

核スピン偏極は、理学・工学・医療分野において、基礎科学から応用まで広く用いられている現象である。核スピン偏極は、まず電子スピン偏極を生成し、それを移行する事で得られる（動的核偏極法＝DNP 法）。一般的な DNP 法は、2.5 T 以上の高磁場・1 K 以下の低温という極めて特殊な環境を必要とする。これに対し、近年では芳香族分子の光励起三重項状態を用いた新たな動的核偏極法（triplet-DNP 法）が注目されている。この手法は、マイクロ波照射を用いて、光励起電子スピンの高偏極状態を核スピンに移す手法である。励起電子スピンの偏極率は実験環境に関わらず 70%と大きな値を持つため、0.5 T 以下の低磁場・100 K 以上の高温下でも、10%を超える大きな核スピン偏極を作り出すことができる。これにより、従来の手法に比べ、核スピン偏極の応用の幅を圧倒的に広げる事ができた。我々はこの手法に基づき、自然界に存在しない不安定原子核の散乱実験の為の核スピン偏極標的を開発してきた。

本研究では常温の環境下において、triplet-DNP 法による核スピンの高偏極度化に関する研究を行った。試料として用いたのは、p-ターフェニルにペンタセンをドープした単結晶である。まず、効率的に高偏極電子スピンを生成するため、ペンタセンの励起電子スピンの寿命とスピン−格子緩和時間の測定を行った。

励起電子スピンの偏極を陽子偏極率増大比へ射影し、そのレーザーパルス構造に対する依存性を解析した。この結果、三重項状態の各準位はそれぞれ$\tau_0 = 22.3^{+3.0}_{-1.5}$ μs、$\tau_{\pm1} = 88^{+13}_{-19}$ μs という寿命と 300 μs 以上のスピン−格子緩和時間を持つ事がわかった。本研究で開発した測定法は、電子スピン共鳴を用いる従来の測定法では不可能であった、寿命・緩和時間の独立決定を可能にした物である。さらにパルスの繰り返し周波数を上げると、前のパルスによって励起された残存電子が新たに励起された電子の偏極率を部分的に打ち消し、実効的に低下させることを実証した。これにより、最適な繰り返し周波数は 3.5 kHz 程度であることがわかった。

次に、上記で得られた知見を元に、0.3 T・常温で陽子偏極の最大化に取り組んだ。大強度のレーザーを照射すると、試料の温度上昇が陽子のスピン−格子緩和時間の現象と最大偏極率の低下を引き起こすことが、測定から明らかになった。そこで、温度制御システムを組み上げ、試料を 283 K に保つ事で、陽子偏極率 15%を得る事に成功した。

最後に、不安定核の磁気回転比の精密測定の為の基礎実験として、異核への偏極移行を試みた。triplet-DNP 法で得られた陽子偏極を炭素-13 に移し、偏極信号を観測する事に成功した。

修士論文予稿

1.

二波長三光子共鳴イオン化分光法による Ti の励起準位の寿命測定

赤羽 直幸（量エレ）

共鳴イオン化分光法を用いて Ti の $3d^3(^4F)4p$ の状態の寿命を測定した。パルス加熱法を用いて Ti の原子ビームを生成し、色素レーザー光を照射し、$3d^24s^2 \rightarrow 3d^3(^4F)4p \rightarrow 3d^24s(^4F)4d$ の遷移過程で励起・イオン化した。発生したイオンを、飛行時間質量分析計を用いて検出した。原子ビームを生成する際に用いたフィラメントの太さ、長さおよび束ねた本数の最適化を行った。また、レーザーの Q スイッチトリガーパルス発生装置を改良し、発振タイミングを安定化した。

寿命測定は二波長三光子共鳴イオン化を用いて測定を行った。

励起・イオン化しの過程を分析し、結果を単一指数関数でフィットできる時間領域が存在することを示した。その結果、レーザーパルスの幅が寿命の 3 分の 1 程度であってもデータを単一指数関数で近似でき、寿命を決定できる領域の判定が容易になった。また、複数の波長のレーザー光によって光イオン化が起きている場合、各々の波長の光パルスによるイオン化率の寄与を評価することが可能になった。

全角運動量 *J* ごとに測定を行い、解析をして以下のような結果を得た。

J=1	$\tau = 15.4(14)$ns
J=2	$\tau = 21.3(18)$ns
J=3	$\tau = 16.7(16)$ns

さらに本研究における紫外パルスと可視パルスによるイオンの生成率の比を 2 対 10 と決定した。

2.
分子性ディラック電子系の高圧下輸送現象

小澤　拓弥（物性物理）

ゼロギャップ伝導体は2005年にグラファイトを1層だけにしたグラフェンで実現され大変注目を集めてきた。2010年にはその発見者であるGeim、Novoselov両博士はノーベル物理学賞を受賞した。両博士はこの物質の電子はあたかも質量ゼロのニュートリノのように固体中で振る舞い（ディラック電子と呼ぶ)、伝導性の主役となって金属や半導体では見られない輸送特性や新奇の量子効果を示すことを発見したのである。一方で、世界最初のバルク（多層状構造）な2次元ゼロギャップ伝導体が高圧下にある有機導体 α-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$ で実現した。本研究では α-(BEDT-TTF)$_2$I$_3$ を舞台にして固体中のディラック電子の物理を展開することを目的とする。

ディラック電子系の特徴の一つは、磁場下に見られる。磁場下では通常の導体とは異なり、$E_N \propto \sqrt{B}$ で表される特別なランダウ準位構造を取り得るのである。最も大きな特徴は、ディラック点を周回する軌道がベリー位相 π を持つことで、常にディラック点の位置に n=0 のランダウ準位（ゼロモードと呼ぶ）が形成されることである。低温では、特殊なランダウ準位構造により、わずかに磁場を印加しただけで量子極限に突入し、ゼロモードランダウ電子が伝導の主役となる。これまでゼロモード電子とそのスピン分裂は主に層間磁気抵抗測定で検出されてきた。本研究では、ゼロモードランダウ電子による特徴的な層内輸送現象明らかにし、以下2つの問題に取り組んだ。

第一の問題は、低温・高磁場下のスピン分裂が非常に特異であることである。ゼロモードの縮重度は磁場に比例して増大する。この効果は量子極限領域で層間抵抗に負の磁気抵抗として検出される。一方、低温・高磁場下では、ゼロモードのスピン分裂により、層間抵抗は$R_{zz} \propto \exp(g\mu_{\mathrm{B}}B/k_{\mathrm{B}}T)$に依存する。この曲線から見積もった$g$値は驚いたことに、2 K以下で2から急激に減少するのである。本研究では、この異常な g 値を理解するために、2 次元伝導面内の輸送特性から調べた。層内磁気抵抗は、スピン分裂状態で$\rho_{xx} = \rho_0(1+\alpha^2B^2)$と表すことができ、傾き$\alpha = \mathrm{g}\mu_B/2\Gamma$から g 値がわかる。ここで、Γ はゼロモードの広がりである。結果、層間抵抗の測定と同様に、低温でg値は2よりも小さいと評価した。この系は、低温・高磁場下の量子ホール強磁性状態が実現し、それが弱い相互作用で多層構造している。従って、弱い層間相互作用による特殊なスピンテキスチャが予期される。

第二に、ゼロモードの Γ を評価した。一般にランダウ準位はキャリアの散乱により$\hbar/\tau$程度の広がりを持つ。また、安藤によるセルフコンシステントボルン近似によると、ランダウ準位の Γ は$\sqrt{B}$に比例して増大する。一方で、ゼロモードはディラック点近傍でのキャリア散乱効果が弱いために、他のランダウ準位よりも非常に広がりが小さいと考えられている。河原林らの理論によると、カイラル対称性が系のランダムネスに対して他の準位よりも安定である。本研究ではゼロモードの Γ ついて、層間・層内伝導性から調べた。結果、Γは非常に狭く、温度程度であることがわかった。それが$\sqrt{B}$に比例して増大してもその効果は非常に小さい。

以上、層間方向と層内方向の電気伝導性から、ゼロモードランダウキャリアとそのスピン分裂の描像の一端を明らかにした。

3.
π–d 系有機導体λ-$(BETS)_2FeCl_4$における磁場誘起相転移の電気・磁気特性

杉浦　栞理（物性物理）

電子間のクーロン相互作用と電子の運動エネルギーとが拮抗するような系は一般に強相関電子系と呼ばれる。中でも磁性と伝導性とが競合・協調する系には酸化物、f 電子系金属間化合物、有機導体（分子性結晶）などがあり、新奇な超伝導や巨大磁気抵抗効果等の特異な物性が現れることが知られている。

本研究で対象とした有機導体λ-$(BETS)_2FeCl_4$は、BETS 分子の並ぶ伝導層と $FeCl_4$ 分子の並ぶ絶縁層が交互に積層することで、擬二次元的な電子状態をもつ。本試料は伝導π電子と局在 3d スピン間の強いπ-d 相互作用よって温度・磁場・圧力に対して多彩な物性を示すことが知られている[1]。低温ゼロ磁場では、反強磁性絶縁体相を基底状態として持つが、磁場を印加することで反強磁性絶縁体（AFI）－常磁性金属（PM）転移を起こす。ここでは 6 桁以上も電気抵抗が変化する劇的な相転移を示す他、さらに強磁場(17 T 以上)では磁場誘起超伝導相が発現することが報告されている[2]。

近年の比熱研究から、低温の AFI 相は π 電子系の反強磁性秩序であること、またそれに伴い π 電子が作る内部磁場を 3d スピンが受けた物性が発現していることが示唆されている。本研究では外部磁場の変化に伴う磁場誘起相転移において、内部磁場が物性へ与える影響を探ることを目的とし、1)電気伝導特性、2)磁気特性、3)磁気熱量特性を測定した。

実験の結果、1)電気伝導特性からは、他の基底状態を持つ有機導体と非常によく似た非線形伝導を観測し、二次元的な伝導層内における電子－ホール対が作るポテンシャルによって理解できることがわかった。この結果は、層間に強いπ–d 相互作用が働く場合においても伝導電子系の二次元性が高く保たれることを示す。2)磁気特性からは 3d スピンの反強磁性秩序では明らかに説明できない磁気トルクを観測し、磁気トルクの簡単なモデル計算によって内部磁場の強い影響が示唆された。3)磁気熱量特性からは嶋田（東邦大）らの比熱測定結果とも定性的に一致するエントロピーの磁場変化を得ることができた。

以上の結果は、本系におけるπ–d 相互作用が、電子系の次元を変えずに内部磁場としてπ、d の両スピン間に介在することで特異な反強磁性状態を実現していることを示唆する。

[1] H. Kobayashi *et al.*, Chem. Rev. **104**, 5265-5288 (2004).
[2] S. Uji *et al.*, Natuer **410**, 908-910 (2001).

4.
有機導体κ-(BETS)$_2$FeBr$_4$の磁場下での電子状態

牟田　翔馬（物性物理）

κ-(BETS)$_2$FeBr$_4$は擬2次元有機超伝導体である。伝導層であるBETS分子と絶縁層である$FeBr_4$分子が交互に積層しており、伝導層のπ伝導電子と絶縁層の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ことが知られている。また、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と超伝導転移が共に抑制され、$H > 2$Tでは常磁性金属状態となる。また、$H = 11$~14Tの強磁場下では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見られる。

奥澤（東邦大）と行った磁化率の測定では、常磁性金属状態となる中間磁場中において、3dスピンが通常の常磁性状態で期待されるブリュアン関数から求めた磁化率とは異なる振る舞いを観測した。この結果から、この物質の中間磁場中では、電子間の相互作用によって外部磁場が打ち消され、実際に磁性スピンに対して有効な磁場が変化していることが期待されている。このように、3dスピンを用いてπ-d相互作用を探るのは初めての試みである。

本研究では磁場中に置ける特異な電子状態を明らかにすることを目的に比熱の温度依存性及び磁気熱量効果の測定を行った。比熱では、磁場を一定にした状態で温度依存性の測定を行い、3dスピンの比熱の振る舞いについて解析を行った。磁気熱量効果では、熱浴の温度を一定にした状態で磁場の掃引を行い、試料温度の変化を観測した。この試料温度の変化から3dスピンの磁場掃引に伴うエントロピーの変化について解析を行った。どちらの測定でもπ電子が3dスピンに与える影響を調べることを目的としている。

比熱では通常、Feの3dスピンに外部磁場がかかった場合にはゼーマン効果によって6準位のショットキー比熱を示すことが期待される。これに対して測定されたスピン比熱は異なる振る舞いを示し、先行研究と同様に、π-d相互作用による有効磁場が影響した電子状態の形成が期待される結果となった。

磁気熱量効果では、低磁場における試料温度の変化において、反強磁性転移に対応する鋭いピークが観測され、先行研究の反強磁性から常磁性状態への転移とよく一致する結果が得られた。また、常磁性金属状態を示す中間磁場中でのエントロピーの変化量について、比熱と同様にゼーマン効果から期待される振る舞いと比較を行った。こちらでも比熱と同様に、測定結果は異なる振る舞いを示し、π-d相互作用による有効磁場が期待される結果となった。磁気熱量効果で測定されたエントロピーの磁場依存性について、π電子とdスピンの相互作用および、π電子を介したdスピン間の相互作用を考え、これらの相互作用による内部磁場が外部磁場を弱めていると仮定して解析を行い、有効磁場を定量的に見積もった。その結果、常磁性金属領域におけるエントロピーの測定結果を説明する結果が得られた。

比熱および磁気熱量効果の測定より、どちらの測定でも外部磁場がそのままdスピンに作用している場合に期待される振る舞いとは異なる結果となり、π-d相互作用による有効磁場が影響した電子状態が期待される結果が得られた。また、磁気熱量効果から求めた常磁性金属領域のエントロピーの解析より、この特異な電子状態はπ電子とdスピンの相互作用および、π電子を介したdスピン間の相互作用による内部磁場が原因だと考えられる結果が定量的に得られた。

5.
プロトンー電子相関系有機伝導体κ-X_3(Cat-EDT-TTF)$_2$[X=H,D]における H/D 同位体効果及び圧力効果の研究

山田　翔太（物性物理）

水素結合は、DNA などの生体系のみならず固体物性の分野においても重要な役割を果たしている。例えば、KHS や KDP といった水素結合型誘電体は、水素結合プロトンのダイナミクス（オーダー・ディスオーダー）により（反）強誘電/常誘電転移を示し、その転移温度が水素結合中の H/D 置換や圧力印加により変化することが知られている。さらに最近では、水素結合を電子物性と相関させた「プロトンー電子相関系有機伝導体」と呼ばれる新しいタイプの有機伝導体が東大物性研の森グループにより開発されている。中でも、κ-H_3(Cat-EDT-TTF)$_2$（H 体）は従来の系と異なり、対アニオンを含まず、π電子伝導層が水素結合により架橋された特異な結晶構造を有している。本研究では、この H 体の水素結合部を重水素化したκ-D_3(Cat-EDT-TTF)$_2$（D 体）に着目し、結晶構造と電子物性に対する H/D 同位体効果および圧力効果を調査した。その結果、重水素置換および圧力印加に起因する相転移現象を発見し、この相転移が水素結合部の変化とπ電子系の相関を起源とする、本質的に新しい現象であることを明らかにした。以下に本研究の内容を示す。

①H/D 同位体効果

H 体の伝導層はκ型の分子配列をしており、Cat-EDT-TTF$^{+0.5}$ 二分子からなるダイマーが二次元三角格子を形成している。従って、ダイマーあたり S = 1/2 のスピンを持ち、室温では常磁性のダイマーモット絶縁体である。極低温まで冷却しても、構造、磁気相転移を示さず、基底状態は量子スピン液体状態である。この知見をもとに今回、D 体の電気抵抗率および磁化率の温度依存性を測定したところ、D 体は室温から 180 K までは H 体と同様の振る舞いを示すが、180 K において半導体的な挙動から絶縁化、常磁性から非磁性への相転移を起こすことが分かった。この相転移の起源を明らかにするために、放射光 X 線を用いた単結晶構造解析を行った。その結果、D 体は室温において H 体と同型の結晶構造（単斜晶系:$C2/c$）であるのに対し、低温（50 K）では三斜晶系の $P\bar{1}$に構造相転移していることが明らかとなった。水素結合部に注目すると、室温では H 体と同様に重水素が酸素原子間の中心に存在する[O…D…O]$^{-1}$ 型であるが、興味深いことに低温では重水素が片側の酸素原子に偏り[O-D…O]$^{-1}$ 型に変化していた。さらに、この重水素移動に伴い、水素結合した二つの Cat-EDT-TTF$^{+0.5}$ は結晶学的に非等価になり、電荷不均化（Cat-EDT-TTF$^{+0.06}$、Cat-EDT-TTF$^{+0.94}$）していた。これにより、伝導層では、+0.94 価の分子からなるダイマーと+0.06 価の分子からなるダイマーが生成され、電荷秩序化およびスピンシングレット化することで、上記のような相転移現象が観測されたと考えることができる。すなわち、H/D 同位体効果による水素結合ダイナミクスの違いによって、H 体とは全く異なる基底状態が現れ、水素結合と電子系が強く相関していることを明らかにすることができた。

②圧力効果

この相転移についてさらに知見を得るために、D 体の圧力下電気抵抗率測定を行ったところ、加圧により相転移温度が上昇する振る舞いが観測された。さらに、常圧において相転移が起きない H 体に対しても圧力印加を行ったところ、D 体と同様、構造変化を伴う絶縁化転移が起こり、さらに加圧することで転移温度が上昇した。すなわち、H 体において圧力誘起の新規相が発現したことが明らかとなった。これらの結果は、圧力印加により水素結合ダイナミクスが変化し、プロトンー電子相関により電子物性を変調したことを示している。

6.
X 線光電子分光法による Goethite 表面における Cesium の吸着形態の観察

山田　智之（表面物理）

福島原発の事故による放射性 Cesium(以下 Cs)などの土壌汚染は深刻な問題である．化学物質の蓄積から引き起こされる土壌汚染問題はファイトレメディエーションや客土法による一時的な除染は行われているが，数十年単位の長期的な土中での物質拡散の観点から除染が困難である．そのため，より効率的な除染が求められており，土壌鉱物と Cs の吸着形態，吸着挙動の詳細に関する研究は明らかになっていない部分が多い．

本研究では X 線光電子分光法(以下 XPS)を用い土壌鉱物の一種である Goethite(α−FeOOH)と Cs の吸着形態，吸着挙動を明らかにすることを目的としている．本論文では Goethite 表面((010)劈開面)への Cs の蒸着量を変化させ，Goethite 表面における O 1s の結合エネルギーの Chemical shift より Cs の吸着サイトについて議論する．

実験装置はゲートバルブで分離された真空蒸着槽と XPS 分析槽の 2 槽から構成され，
Cs 蒸着後大気に晒すことなく XPS 観察が可能である．XPS 側の到達圧力は 10^{-6} [Pa]である．試料には天然に結晶成長した Goethite を大気中劈開して用いた．

蒸着槽で Alkali Metal Dispensers(SAES Getter)を蒸発源として使用し，Cs を Goethite 表面へ 0，9，15…[Å]と膜厚を変化させ蒸着した試料で測定を行った． X 線源には Mgkα線(1253.6 [eV])，Alkα線(1486.6 [eV])を用いた．エネルギー軸の較正には Au $4f_{5/2,7/2}$ $4d_{3/2,5/2}$，Cu $2p_{1/2,3/2}$ ピークを使用した．また帯電補正には C 1s を用いた．

予備実験として Cs 4d 本来の結合エネルギーを測定するとともに Cs 膜厚を評価するために Au の多結晶表面への Cs 蒸着量を変化させ，それぞれの膜厚で Au 4f，Cs 4d ピークを測定した．ピークから Cs 4d の結合エネルギーおよび Au と Cs の光電子強度比の蒸着量依存性を調べた．Cs 膜厚が変化するに従って Au 表面を Cs が覆い，Au 4f ピークは減少し，Cs 4d ピークの強度が増加する．これらの変化と光イオン断面積などを考慮し，Au 表面を覆う Cs の膜厚を評価した．

予備実験と同条件で Goethite 表面への Cs の蒸着量を変化させ，O 1s ピークを測定した．Goethite 表面(Cs = 0 [Å])からの O 1s ピークは 2 つのピークより構成され，高結合エネルギー側が OH^-，低結合エネルギー側が O^{2-}に由来するピークである．Cs 蒸着により O^{2-}由来の O 1s ピークは低結合エネルギー側へシフトし，蒸着量の増加と共にさらに低結合エネルギー側へシフトした．このピーク位置は Hrbek らによって報告されている Cs_2O の O 1s と一致している[1]．これは Cs が Goethite の O^{2-}へ優先的に吸着し Cs_2O を形成することを示している．以上のことから Cs は Goethite の O^{2-}に優先的吸着するという結果が得られた．

また Goethite からの O 1s 強度は Au の蒸着挙動とは異なり，蒸着量に対して明瞭な減衰を示さない．この事は Cs 原子が Goethite 表面の O 原子上に体積せず，c 軸方向に走る溝上に配置することを示唆している．

[1] Hrbek et.al:”Oxidation of Cesium Multilayers” Surf.Sci. **296** ,Oct (1993)

7.
MgO(001) 基板上のエピタキシャル Fe/Au/Cr 三層膜における量子井戸効果がもたらす界面フラストレーション

蕗田 佳耶（磁気物性）

Fe/Cr 多層膜は巨大磁気抵抗(GMR)効果や Cr 層を介した Fe 層間交換結合の振動に加えて，“界面フラストレーション効果”が知られている。強磁性的なスピン配列の Fe 層と反強磁性的なスピン配列の Cr 層の界面を考えると，界面が原子レベルで理想的に平坦な場合では界面フラストレーションは存在しない。しかし，界面が原子レベルで乱れている場合は界面フラストレーション効果が存在する。我々は長年，界面フラストレーション効果をマクロな量である磁化等で直接観測してきた。すなわち，MgO(001)基板上にエピタキシャル Fe(001)/Cr(001)/ MgO(001)膜を分子線エピタキシー(MBE)法を用いて，異なる基板温度 T_s で作製し，熱残留磁化(TRM)の緩和を測定してきた。その結果，界面が乱れるにつれて TRM の時間変化を対数フィッテイングした時の傾き(磁気粘性 S)が大きくなった。これは，Jiko らの界面フラストレーションモデルと一致する。この様に，先行研究では Fe/Cr(001)二層膜の界面フラストレーションの磁化緩和への影響について調べてきたが，本研究では新たに Fe/Cr(001)界面に非磁性である Au を挟んだエピタキシャル Au(20Å) /Fe(40Å) /Au (40Å) /Cr(50Å) / MgO(001)を MBE 装置を用いて作製した。その結果，Au を挟まない二層膜と同様にスローダイナミクスが観測された。これは，量子井戸効果によって Au 層がスピン分極した可能性が考えられ，新たなスローダイナミクスの機構がある事を示唆している。これより，本研究では量子井戸効果がもたらす界面フラストレーションと磁化緩和への影響について調べる事を目的とした。

本研究を行うにあたり，Au の膜厚(Z Å)を変えてエピタキシャル成長させた試料で S を比較する必要がある。この為に， MBE 法で Au(20Å) /Fe(40Å) /Au (ZÅ) /Cr(50Å) / MgO(001)を T_s = 400[℃]の条件で作製した。ここで Z は 0～100[Å]まで変えた。これに加え，Au の膜厚を固定し，T_s を変化させた試料も作製した。表面構造は製膜中に反射高速電子線回折（RHEED）によって評価し、磁化測定は超伝導量子干渉素子（SQUID）を利用した磁気特性測定装置（MPMS)によって行った。その結果，Fe/Au/Cr 系でも，全ての試料でスローダイナミクスを観測し，S の Au 膜厚による振動がみられた。一方，T_s = 100[℃]に変えた試料ではスローダイナミクスが観測されなかった。

これらの結果は，Fe/Cr に挿入されている Au が，量子井戸効果によりスピン分極した可能性を示唆する。T_s = 100 [℃]に下げた試料でスローダイナミクスが観測されなかった事は，Au がスピン分極したとして，Cr/Au(001)界面において，Fe/Cr(001)の界面フラストレーションと同等な現象が起きたとすれば説明できる。すなわち，界面が理想的な平坦さに近づくと界面フラストレーションは生じない。更に，S の Au 膜厚依存性がみられたことは，量子井戸効果が膜厚によって変化することに対応していると考えられる。この様に，Fe/Au/Cr 三層膜でも界面フラストレーションが発生し，量子井戸効果との関連性を見ることができたと考えられる。

8.
蛍光X線分析を用いた創傷部アクチニド汚染定量評価法の開発

柳原 孝太（原子過程）

東京電力福島第一原子力発電所事故からの復旧・復興作業、あるいは今後行われるであろう原子炉の廃炉作業等において、融解したウラン(U)やプルトニウム(Pu)を含む核燃料物質(これらはアクチニド核種に属する)による、人体表面汚染または創傷部汚染を伴う事故が起こる可能性がある。この場合、治療計画の策定のために汚染の定量を迅速に行わなければならない。通常はこれらγ線の放出率が低くα線を放出する核種による創傷部の汚染については、α線計測によりその有無を判断している。しかし、α粒子は血液によって遮蔽されるため、α線計測による創傷部アクチニドの定量は困難であった。そこで、本研究では蛍光X線分析法を用いることにより、現場で迅速に創傷部アクチニド汚染を定量分析する方法することを目的とした。蛍光X線分析は試料の前処理が不要で、短時間での分析が可能なため、事故現場での迅速な分析に適している。また、蛍光X線強度は原子数に比例するので、単位放射能当たりの原子数が多いUやPuには有効である。さらにX線は厚さ数mmの血液であれば透過するので、創傷部に血液が存在していたとしても測定が可能である。これらの理由から本研究で開発される方法は従来のα線計測と比較して有利な点を多く有しているといえる。

本研究では劣化ウランをエポキシレジンで固化した模擬汚染軟組織と、ラット血液をアクリル板に封入した模擬血液、軟X線の吸収率が皮下組織と酷似している模擬皮下組織とを組み合わせた、創傷部劣化ウラン汚染ファントム(模型)を開発し、これを可搬型蛍光X線分析装置 (Ourstex 100FA)で分析した。得られた蛍光X線スペクトルにUのLα線が観測され、その信号強度が劣化ウラン濃度に比例することを確認した。そこで、そのBG信号強度のばらつきの3倍の信号を与える濃度を検出下限値(MDL)とし、分析時間に対する劣化ウラン濃度の検出下限値の関係を求めた。これは汚染創傷部の施術時に医師が使用するツールとなる。また、この検出下限値における ^{238}U の放射能(検出下限放射能:MDA)から、^{239}Pu の推定検出下限放射能の算出も行った。例えば、創傷部劣化ウラン汚染ファントムの血液厚さが 0.5 mm、測定時間30sec の条件下では、^{238}U の MDL は 28.02 ppm(原子数:5.31×10^{14} 個)となり、それに対応する MDA は 2.61 mBq となった。同じ個数の ^{239}Pu 原子が検出できると仮定すると、その推定検出下限放射能は 484 Bq となる。^{239}Pu による事故では、過去に kBq オーダーの汚染が検出された例があることから、本研究で開発された蛍光X線分析を用いた創傷部アクチニド汚染評価法は、創傷部のアクチニド汚染を定量する有用な手法であると期待される。

以上により、蛍光X線分析を用いた創傷部アクチニド汚染評価法を開発することができた。

9.
カイラル磁性体中の磁化ダイナミクスから誘起されるスピン起電力

嶋田　裕樹（物性理論）

MnSi などの空間反転対称性が破れた結晶構造を持つ磁性体は、ねじれた磁化構造が安定となる Dzyaloshinskii-Moriya(DM)相互作用を有し、カイラル磁性体と呼ばれる。このような系では、強磁性結合と DM 相互作用の競合によって、Curie 温度以下で螺旋磁性構造を基底状態に持つ。この構造に静磁場を印加することで磁気スカーミオン構造が発現する。スカーミオン構造は、磁化が渦状構造を取ることで量子化されたトポロジカル量を定義でき、外場に対して強固な性質を持つため、次世代の情報キャリアの候補として注目されている。2 次元のバルク試料ではスカーミオンが三角格子状に最密充填された「スカーミオン格子」を形成する磁気秩序相がある。このスカーミオン格子に面内振動磁場を印加することでスカーミオンの回転を伴う集団励起が起こる[1]。このような磁化ダイナミクスからは様々な電気磁気効果が誘起される。例えば、金属磁性体中における局所的な磁化構造の時間変化は遍歴する伝導電子に起電力を及ぼすことがわかっている。この力はスピン起電力と呼ばれ、磁気ディスクを用いた磁気渦コアの回転運動などから実際に検出されている[2]。

本研究では、2 次元カイラル磁性体におけるスカーミオン・ダイナミクスから誘起されるスピン起電力の理論的研究を行った。特に、周期境界を用いたバルク試料と、ディスク形状の有限系の試料について解析を行った。数値計算手法としては磁化の運動方程式を表す Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式を 4 次の Runge-Kutta 法で解いた。スピン起電力は磁化の時空間微分で記述されるため、得られた磁化ダイナミクスから直接計算できる。また、試料内の電位分布を Poisson 方程式から求め、任意の電極間の電位差を観測量として計算した。計算の結果、スカーミオンの回転運動の速度と垂直方向にスピン起電力が発生することが明らかになった。さらに、スカーミオン格子の集団運動では、個々のスカーミオンから生じる電位が直列に繋がるカスケード効果によって大きな電圧が得られることが明らかになった。一方、ディスク型試料を用いた計算では、電圧の周波数特性に集団励起のピークが複数現れた。これらのピークはスカーミオン間の運動の位相差に起因し、有限系に特徴的なものである。この集団励起の中でも最低エネルギーのモードはすべてのスカーミオンの運動の位相が揃っているため、バルク試料と同じようにカスケード効果が起き、大きな電位差が得られた。その他の高エネルギーモードではスピン起電力の空間的位相が乱れるため、小さな電位しか得られなかった。これらの結果により、スカーミオン格子をデバイス内で新しい「電池」として使用することが可能であることを明らかにし、効率的なデバイス設計の方針を与えた。

[1] Y. Onose, Y. Okamura, S. Seki, S. Ishiwata, and Y. Tokura: *PRL* **109** (2012) 037603.
[2] K. Tanabe *et al.*: *Nat. Commun.* **3** (2012) 845.

10.

タウ崩壊事象における π ビームを用いた高統計のためのハドロンバックグラウンドの研究

西村　秋哉（基礎物理）

素粒子の一種であるニュートリノは、素粒子物理学の基礎理論である標準理論において質量がゼロだと仮定されてきた。1998 年、スーパーカミオカンデ実験においてニュートリノの種類(フレーバー) が飛行中に別の種類へ変化してしまうニュートリノ振動($\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$) の発見はそれまで質量がゼロであると考えられてきたニュートリノに質量が存在することを示すこととなった。

長基線ニュートリノ振動実験 OPERA 実験は、スイスとフランスの国境にある欧州原子核研究機構（CREN）から平均 17 GeV/c の ν_μビームを照射し、730 km 離れたイタリア国立グランサッソ研究所の地下 1000 m に設置された原子核乾板を主とした検出器にて、振動後の ν_τから崩壊する τ粒子を観測する。OPERA 実験は 2008 年から本格的な実験を開始し、計 5 年間ビーム照射が行われた。そして 2014 年 12 月 5 日までに 4 例の τ崩壊事象候補を発表したが、これはニュートリノ振動したニュートリノの反応を出現型で直接的に示した、世界で初めての成果である。これまでの成果により、ニュートリノ振動の直接観測の有意度は目標である 4σを達成した。一方で、τ崩壊事象のバックグラウンドを低下させることによって、有意度を高める研究も行なっており、そのなかでハドロン衝突バックグラウンドについて研究を行った。

ハドロン衝突現象は、荷電粒子であるハドロンが標的の原子核に衝突をする現象である。そしてこの現象がニュートリノ反応から生成されたハドロンで起こり、かつ 1, 3 本の荷電粒子を放出すると、τ崩壊のバックグラウンドになる。τ崩壊分岐比において上記への崩壊モードは約 65%になるため、このバックグラウンドの詳細解析と理解は重要である。ハドロンバックグラウンドとタウ崩壊の分離のひとつの指標として、横運動量というものが用いられている。粒子の崩壊事象と粒子の鉛原子核による散乱では、横運動量に差が出るため、OPERA 実験では運動量及び横運動量を用いてシグナル領域を設定し識別している。また、このハドロン衝突バックグラウンドは、シミュレーション(FLUKA) を用いて見積もられている。このシミュレーションの正当性を確かめるための実験を、本研究室でOPERA 実験とは別に運動量 2,4,10GeV/c の πビームが照射された原子核乾板の解析を行い、50%の誤差を計上していたものを 30%まで低減が可能となった。

一方で、使用した原子核乾板の枚数が少なかったために統計量はまだ十分とは言えない状態である。そのため、2012 年には CERN にて新たにビーム照射実験を行い、OPERA 実験において特に興味のある運動量領域 2,3,4,5,6GeV/c のハドロン反応についてさらに統計量を増やすべく解析を行った。これまでのハドロンバックグラウンド解析との特に大きな違いはビーム上流側に運動量毎に CS(CangeableSheet) を使っていることである。これまでは運動量を分離するのにビーム角度を用いていたがこの方法ではビームの染み出しで角度が混ざり完全に分離することができなかった。しかし今回の方法ではそれぞれの運動量の CS を繋ぐことでビームの運動量を特定した状態で照射ビームを抽出することが可能となった。また照射ビームの efficiency を確保するために CS とは別に 4 枚の原子核乾板(SpecialSheet) 、を用いた。本研究では各運動量の照射ビームを抽出し、それぞれのビームを掘り下げて衝突反応点を探索し、衝突反応数、平均自由行程を求めた。また、それぞれの衝突反応点から二次粒子を探索し、二次粒子放出数、放出角、を求め、これまでの実験よりも高統計の結果を得ることができた。

11.

ECC 構造での低エネルギー電子の反応解析

松本　拓也（基礎物理）

スーパーカミオカンデによって発見された大気ミューニュートリノ欠損は、世代間混合ニュートリノ振動理論によって説明できる。この概念ではニュートリノは質量を持つ粒子とされる為、世界中で様々なニュートリノ振動実験が行われ、3 種類のニュートリノが異なる質量を持つこと、3 つの混合角が明らかになった。次は CP 対称性の破れの検証に向けた実験準備が進められており、J-PARK で行われている 1 GeV/c 前後の低エネルギーニュートリノを用いた実験もその一つである。その一方で、LSND 実験のように標準理論を越えた第四世代のステライルニュートリノの存在を示唆する実験結果も報告されている。これらの問題を解決する実験を遂行する為には、すべての放射粒子を精密測定できる検出器が必要となる。

原子核乾板は、他の検出器に比べ高い空間分解能を持つ 3 次元飛跡検出器であり、τ 等の短寿命粒子の観測に適している。OPERA 実験で使用されている検出器は ECC（Emulsion Cloud Chamber）と呼ばれ、原子核乾板と物質量の大きい鉛がサンドイッチ状に積層されている検出器である。ECC は荷電レプトンの種類によって反応の振る舞いが異なる為、それらを観測することで識別が可能となるが、荷電レプトンの電荷符号を識別することはできない。ECC の後置検出器として磁場を印加したエマルションスペクトロメーターを設置することで、全てのレプトンを精密に測定することができる。しかし、電荷を測定するためにはスペクトロメーターに電子が到達しなければならない為、ECC 中の電子の振る舞いを解析し、特徴を調べることは重要である。

筆者は、ECC 構造での低エネルギー電子の振る舞いの研究を行った。放射光利用研究推進機構 Spring-8 のレーザー電子光ビームライン(BL33LEP)において、2.0, 1.0, 0.5, 0.25 GeV/c の電子ビームを照射した原子核乾板を使用した。乾燥により膜厚が十分でなかった為、再膨潤処理を行った後に名古屋大学に持って行き、S-UTS で全面スキャンを行った。電子の密度分布から照射密度の低い領域を 2.0 cm × 2.0 cm の範囲に分けて飛跡の再構成を行った。再構成された飛跡の中から宇宙線を選び出し飛跡の検出効率を求めたところ、98.4 %と高い検出効率があることがわかった。次に電子の飛跡を選び出しマニュアルチェックで下流に負い下げていき、カスケードシャワーを再構成した。GEANT でシミュレーションを行い、結果の比較を行った。また、ECC に挟む物質を鉛から鉄など違う物質に変えた時にどの様な変化があるかを見積もった。本研究によって得られた電子の振る舞いは、エマルションスペクトロメーターを用いた実験を行う際の指標とする事ができ、低エネルギーの電子ニュートリノから生成される電子の反応解析にも役立てることができる。

12.
KEK-PS E373 における次世代ダブルハイパー核探索法を用いた再解析

福永　匠吾（基礎物理）

高エネルギー加速器研究機構陽子シンクロトロンを用いた KEK-PS E373 実験 はハイブリットエマルション法を用いてダブルΛハイパー核を検出し、ΛΛ相互作用等、ストレンジネス(S)が-2 の核の性質を理解することを目的とした実験である。この E373 実験は 1998 年から 2000 年にかけてつくば市の高エネルギー加速器研究機構(KEK)でビーム照射実験が行われ、世界で初めて核種が同定されたダブルΛハイパー核（NAGARA event）の検出に成功した。この実験の方法はハイブリットエマルション法と呼ばれ、K^-ビームをダイヤモンド標的に照射し、準自由反応 $K^- p \rightarrow K^+ \Xi^-$ により生成されたΞ^-を原子核乾板内で静止、吸収させてハイパー核を生成し、シンチレーションファイバー検出器等からなるカウンターシステムでその位置や K^+の運動量等の情報を得て、それらをもとに乾板内のΞ^-の静止点を観測するというものである。しかし、この手法では検出できる K^-中間子反応は全体の 10%程度であり、また $K^- n \rightarrow K^0 \Xi^-$ 反応により生成されたΞ^-は検出できず、多くのハイパー核事象がこの実験の乾板には潜んでいると考えられる。そこで、E373 実験の 10 倍の統計のダブルΛハイパー核の検出を目指した J-PARC E07 実験においては、ハイブリッドエマルション法と平行して、原子核乾板の全面探索を行う。その手法は使用する全厚型乾板の全体積を CCD カメラで撮像し、そこから反応点抽出プログラムを用いて自動的にハイパー核を検出してくるというもので、2016 年の実験開始に向けて開発が進んでいる。本研究では現在開発中である次世代のハイパー核探索法、全面探索法を用いて、全面探索法の実用化へ向けたテストと新たなダブルΛハイパー核の検出を目的として、E373 実験で使用された原子核乾板を用いた全面探索を行った。全面探索を行った乳剤層の総体積は $103.5\times0.025\mathrm{cm}^3$ で、そこからプログラムが、反応点が 1 つ以上写っていると認識して抽出してきた画像は 412777 枚である。それらの画像から目視により反応点が 2 つ以上写っている様に見える候補を選別し、原子核乾板にて本当に反応点が 2 つ以上あるかを確認して興味深い反応は詳細に測定した。その結果、105 個のシングルハイパー核候補および、17 個のハンマートラック事象の検出に成功した。さらに検出されたハイパー核候補の内、ダブルハイパー核生成・崩壊事象の可能性があり、核種同定が期待できる、吸収点から正反対に飛跡が出ているようなハイパー核候補に対して核種同定のための解析を試みた。また、ハイパー核の解析で重要な飛程・エネルギー関係の較正において、従来から用いられてきたトリウム系列のα崩壊飛跡に加えて、ハンマートラック事象を用いる可能性を探るため、ハンマートラック事象のα粒子飛程を測定し、親粒子核種同定の解析も行なった。

13.

三軸不等楕円体モデルにおける銀河団質量の定量的評価

戸澤　優也（宇宙・素）

現在の宇宙にみられる階層構造は、宇宙初期に存在したわずかな密度ゆらぎが成長して形成されたと考えられている。本研究ではその階層構造の一つである銀河団を対象とした。銀河団とは数百から数千の銀河が集まった天体である。その総質量は約 1014～1015 太陽質量で、銀河の質量は数％しかなく、約 15％は高温のガス、残りの約 80％は暗黒物質が占めている。また、銀河団の力学進化する時間は約 109 年と宇宙年齢の約 1010 年と近い値をとるので、銀河団形成過程が宇宙の進化と密接に結び付いていると考えられる。そして、銀河団質量は宇宙の構造形成のモデル検証や宇宙論パラメータの推定に必要な情報を与えてくれる。そのため、観測から銀河団質量を精度よく測定することが重要となる。

銀河団質量を求める一般的な方法として、X 線による銀河団ガスの観測から得られる密度、温度分布を用いる方法がある。このとき銀河団は静水圧平衡を仮定することが必要である。しかし厳密に言えば、静水圧平衡は成り立っておらず、銀河団の真の質量と静水圧平衡の仮定のもと求めた質量には誤差があると考えられる。この誤差を定量的に明らかにすることが銀河団の質量を正確に求めるために重要なことである。その検証には数値シミュレーションにより作られた銀河団を調べる方法がある。この方法による先行研究は数多くある。その大半が球対称の仮定もと、銀河団の真の質量と静水圧平衡下の質量との誤差は最大で約 30％あるという結果に達しているが、その要因は諸説ある。最近の研究では、Suto et al. (2013, ApJ, 767. 79)がその誤差の主要因はオイラー方程式におけるガスの加速度項による寄与であると考察している。しかし、その結果には球対称の仮定に起因する誤差がどの程度なのか明らかになっていない。

そこで本研究では、球対称でなく三軸不等楕円体モデルにおける真の質量と静水圧平衡下の質量の誤差要因について調べることを目的とした。また、先行研究の再現や楕円体との比較のため、球対称モデルでの計算も行った。方法としては、オイラー方程式に基づいて、その方程式の圧力勾配項、慣性項、加速度項にそれぞれ対応した質量項を定義し、大規模数値流体シミュレーションより作られた銀河団のガスのデータを用いて計算を行った。そして、それぞれの質量項における真の質量への寄与を調べた。まず球対称を仮定した計算の結果、銀河団の真の質量と静水圧平衡下の質量との誤差は、先行研究での結果とほぼ一致することが確認できた。また、オイラー方程式の慣性項から寄与はほとんど無視でき、真の質量と静水圧平衡下の質量の差は加速度項による寄与であるという Suto et al.(2013)の主張と一致した。次に三軸楕円体で計算を行う上で楕円体の形と向きを決めるパラメータは慣性モーメントテンソルの固有値、固有ベクトルから求めて、質量の計算を行った。その結果、真の質量と静水圧平衡下の質量との誤差は最大で 10％程度になり、球対称モデルと比較して大幅に減少した。また、真の質量と静水圧平衡下の質量の差の要因は球対称モデルの結果と異なり、オイラー方程式の加速度項による寄与だけでなく慣性項の寄与の影響も無視できないことがわかった。

14.
トンネル接合型サブミリ波カメラの安定動作条件の確立

河西　美穂（宇宙・素）

現在、我々は1000素子のサブミリ波カメラの開発をしている。2006年には1000素子アレイカメラのプロトタイプとして、SISCAM-9を開発しチリにあるASTE望遠鏡に搭載し試験観測を行った。しかし、この試験観測ではいくつか問題点も判明し2006年以降研究室ではこの問題点を解決すべく研究を進めてきた。

その中で、ASTE望遠鏡の主鏡・副鏡駆動時に検出器ノイズがショットノイズの約1000倍乗ってしまうという問題がある。検出器ノイズをショットノイズのレベルまで下げないと観測は困難となる。先行研究により、検出器と読み出し回路中のSi-JFETをつなぐ配線の磁場感度が高く、この部分でノイズを発生していることが判明した。これを受け、試験観測時にSISCAMの外部で発生した76[mG_{rms}](@60Hz)をこの配線部分で1.8μG_{rms}(@60Hz)まで下げる磁気シールドが作成された。

本研究では作成された磁気シールドをSISCAMに搭載し、SISフォトン検出器の検出器ノイズを評価することが目的である。しかし、先行研究で使用していたSISフォトン検出器36素子チップ(MD15-23)は破損してしまったので、新しいチップ(MD15-42)を新たに評価した。このチップを液体ヘリウムデュワーで評価した結果、最も低かったリーク電流は200[pA](@0.2mV)でノイズは5×10^{-14}[A/$Hz^{1/2}$]だった。ショットノイズが1.26×10^{-14}[A/$Hz^{1/2}$]であるので、リーク電流も十分低く、検出器ノイズもショットノイズレベルに達したといえる。

また、検出器自体が外部磁場の影響を受け、試験観測時に発生したノイズに影響を与えていた可能性がある。そこで、外部磁場によりSISフォトン検出器自体から発生するノイズを調べた。その結果、ASTE望遠鏡の電源周波数である60Hzの交流磁場に対する感度は1.21[pA/mG](@60Hz)であった。この感度は検出器とSi-JFET間の配線の磁場感度の100分の1である。さらに、検出器搭載部に漏洩する磁場が非常に小さいことを踏まえると出力されるノイズに対して検出器自体から発生するノイズは無視できる。磁気シールドを搭載すれば現状よりもさらにノイズに対して強くなるため、試験観測時に発生していたすべてのノイズに対処できると考えられる。

磁気シールドに関しては、まずシールド搭載前の状態で検出器のリーク電流、ノイズを評価する。その後、磁気シールドを搭載した結果期待される成果について議論する。

15

サブミリ波カメラの冷却システムと読み出し回路の開発

久保　大樹（宇宙・素）

我々の研究グループでは、サブミリ波カメラ開発のため超伝導体を用いた SIS(Superconductor-Insulator-Superconductor) フォトン検出器およびガリウムヒ素半導体を用いた読み出し回路の研究を行ってきた。検出器の熱雑音を抑えるため、冷却システムによって極低温環境下で SIS フォトン検出器と光電流を読み出す AC 結合型の電荷積分型読み出し回路(Alternating Current Capacitive Trans-ImpedanceAmplifier:AC-CTIA) を接続し、読み出し回路から出力された電圧変化により天体からのサブミリ波を検出する。このシステム全体を SISCAM(SuperconductiveImaging Submillimeter-wave CAMera) と呼んでおり、検出器・読み出し回路・冷却システムの 3 つはサブミリ波カメラの開発において必要不可欠である。本研究は 32 素子でのサブミリ波観測を実現するための冷却システムの開発と読み出し回路の評価が目的である。

冷却システムにおいて、従来用いていたヘリウム 3 を使った冷却システムでは冷却パワーが不足しており、32ch 読み出し回路の発熱(熱負荷) を十分に冷却しつつ、SIS フォトン検出器の温度要求(0.8 K 以下) を長時間満たすことはできない。そこで、熱負荷に強く、検出器の温度要求を長時間満たせるような冷却システムの設計・開発をした。

新たな冷却システムとして活性炭を用いたヘリウム 4 ガス吸着型冷凍器を試作した。将来的に口径 10 m のサブミリ波望遠鏡(ASTE) 搭載用のクライスタット内で 2 つの冷凍器を置き、交互運転することにより SISCAM の長時間冷却を可能にするため、100 mm×100 mm 以内のコンパクトな設計にした。また、小型でありながら、冷凍器単体で検出器の温度要求 0.8 K 以下の環境下で 32ch 読み出し回路の熱負荷(400 μW) に対して～2.3 h の冷却持続時間を実現できる設計にした。これは冷凍器の冷却サイクル(30 m～1 h) に対して十分な長さである。これにより 32 素子での長時間観測が可能になると期待される。この試作した冷凍器が、実際に読み出し回路の熱負荷の条件と検出器の温度要求をクリアできるかどうかの実験をした。

読み出し回路において、実験の際に読み出し回路が出力する積分波形から換算した、実質的に検出器に与えられている入力バイアス(有効バイアス電圧) が、実際に検出器に与えている入力バイアスと比較して数%程度になっている「有効バイアス問題」が以前から問題視されてきた。そこで、回路シミュレーターの PSpice を用いると同様の現象が再現した。シミュレーターの解析結果から、AC-CTIA 回路にはコンデンサの電荷リセットを担うスイッチ素子:FET(Field Effect Transistor)があり、スイッチ動作時に FET の浮遊容量に蓄積されていた電荷が回路のコンデンサに移動することにより、有効バイアス問題を発生させている可能性があることが分かった。この結果を踏まえて、有効バイアス問題の解決方法を提示した。