



東邦大学

平成24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25年2月14日（木）・15日（金）

修士・博士論文発表会

平成25年2月21日（木）・22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 -
博士・修士論文発表会プログラム.....	- 19 -
博士・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)

場所：理学部 IV 号館大学院セミナー室

平成 25 年 2 月 14 日 (木)

開会

9:00 ~ 9:05

原子過程..... - 5 -

9:05 ~ 9:53

- | | |
|---------------------------------------|-------|
| 1. He とその混合ガスの電子衝突実験 | 牧井 靖由 |
| 2. イオン付着飛行時間型質量分析装置の実用化に向けた内部構造の改良 | 平原 稜 |
| 3. 散乱電子-イオン同時計測装置による窒素分子の解離性イオン化過程の研究 | 青池 祐馬 |
| 4. 蛍光 X 線分析法による鉛体表面汚染評価 | 柳原 孝太 |

量子エレクトロニクス..... - 6 - 7 -

前半 10:00 ~ 10:48

- | | |
|-----------------------------------|-------|
| 1. 新規プラスチックシンチレータの炭素線に対する応答特性の研究 | 佐竹 佑介 |
| 2. 半導体ダイオード検出器の炭素線に対する線量応答についての研究 | 松山 哲大 |
| 3. テーパー角によるガラスキャピラリーの光の透過特性 | 藤原 智 |
| 4. ガラスキャピラリーの形状解析及び光の透過率の測定 | 萱場 千尋 |

後半 10:53 ~ 11:41

- | | |
|--|--------|
| 5. 回転鏡とデジタルカメラを用いたライダーの研究 | 山下 温子 |
| 6. 回転鏡とデジタルカメラを用いた LIDAR の研究 | 仲宗根 好汰 |
| 7. $\text{Yb } 4f^{14}6s6p \ ^3P_2 - 4f^{14}6s7s \ ^3S_1$ の遷移におけるシュタルクシフトの測定 | 河野 佑輔 |
| 8. 高励起状態における Yb 原子のシュタルク効果 | 三浦 潤平 |

学内外研 - 8 -

13:00 ~ 13:12

- | | |
|--------------------------------|---------------|
| 1. 物理モデルを用いた撥弦楽器におけるグリッサンド音の実現 | 古市 朝美 |
| | (情報科学科 白木研究室) |

宇宙・素粒子..... - 8 - 9 -

前半 13:17 ~ 14:05

- | | |
|-----------------------------------|-------|
| 1. Goldstone モデルによるヒッグス粒子 | 高木 康成 |
| 2. Higgs 機構と Higgs 粒子における散乱断面積の計算 | 小谷 駿 |
| 3. ブラックホールに落ちてゆく粒子の運動 | 青木 隆 |
| 4. 強い重力レンズ効果を用いたハッブル定数の推定 | 谷口 勝哉 |

後半 14:10 ~ 14:58

- | | |
|--------------------------------------|--------|
| 5. 重力レンズ統計を用いたダークエネルギーへの制限 | 戸沢 優也 |
| 6. 宇宙の構造形成におけるダークマターの速度分布の進化 | 清水 日菜乃 |
| 7. SIS フォトン検出器の安定動作条件の確立 | 河西 美穂 |
| 8. SIS 光子検出器と多素子読み出し回路の組み合わせ実験の評価と改良 | 久保 大樹 |

磁気物性..... - 10 - 11 -

	前半	15:10 ~ 16:10
1. エピタキシャル Fe/Cr (011)二層膜における熱処理条件と界面フラストレーション	門井 勇也	
2. エピタキシャル Fe/Cr(011)二層膜におけるスローダイナミクスの Fe 膜厚依存性	久保木 翔一	
3. エピタキシャル Fe/Cr(011)二層膜におけるスローダイナミクスの Cr 膜厚依存性	落田 佳耶	
4. Bサイトを乱したスピネル化合物 $\text{Co}[\text{Al}_{1-x}\text{Rh}_x]_2\text{O}_4$ のスピングラス転移	菅原 直樹	
5. パイロクロア酸化物 $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ のスピナイス状態に対する A 及び B サイトの乱れの効果	山中 祐貴	
	後半	16:15 ~ 17:03
6. 弱いランダム異方性を持つアモルファス合金 $(\text{Zr}_{0.57}\text{Nd}_{0.43})_{36}\text{Fe}_{64}$ における交流磁場振幅依存性	横山 香織	
7. 高周波マグネトロンスパッタリング法を用いた $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ 薄膜の作製と磁気特性評価	坂本 大輔	
8. エピタキシャル歪みを用いた $\text{Nd}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{MnO}_3$ 薄膜の軌道状態制御	柳澤 勇希	
9. A サイト秩序型 $RE\text{BaMn}_2\text{O}_6$ ($RE = \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}$) の Ba サイト置換効果	飯島 大貴	

平成 25 年 2 月 15 日 (金)

物性理論..... - 12 - 13 -

	前半	9:00 ~ 9:48
1. 準位統計による不規則系の解析	臼田 鷹実	
2. ニューラル・ネットワークの連想・想起について	土井 智博	
3. シュレーディンガー方程式の有限要素法による解析	遠山 愛	
4. FDTD 法を用いた電磁界の計算シミュレーション	並川 舞	
	後半	9:53 ~ 10:41
5. 電流誘起磁化反転に対する形状磁気異方性の効果	笠井 美波	
6. スピントルクダイオード効果に対する数値的研究	柴田 愛美	
7. スピンゼーベック効果に対する異方性緩和に関する研究	村松 佳奈	
8. 磁気 skyrmion 格子の運動から誘起されるスピン起電力の数値解析	嶋田 裕樹	

基礎物理学..... - 14 - 15 -

	前半	10:50 ~ 11:26
1. 福島での走行サーベイにおけるガンマ線計測の空間応答関数の研究	岡本 由太	
2. ミュー粒子寿命測定装置の開発研究	中村 聡之	
3. 集光レンズ系を導入した透過率測定装置の再構築と性能評価	佐藤 航	
	後半	11:31 ~ 12:19
4. OPERA 実験におけるタウ粒子の崩壊検出のためのニュートリノ反応解析	渡部 拓也	
5. OPERA 実験におけるタウニュートリノ反応の候補事象の解析	野上 道	
6. タウ崩壊事象における π^+ ビームを用いたハドロンバックグラウンドの研究	西村 秋哉	
7. エマルシヨンスペクトロメーターの分解能向上を目的としたビーム照射実験	松本 拓也	

表面物理学..... - 16 -

- | | |
|---|---------------|
| | 13:30 ~ 14:18 |
| 1. 電界イオン顕微鏡(FIM)によるタングステンチップの観察 | 泉妻 那美 |
| 2. 昇温脱離法による石英ガラスからの水の脱離の観察 | 社田 尊秀 |
| 3. 原子間力顕微鏡 (AFM) によるゲータイト表面の原子像観察 | 片倉 康輔 |
| 4. X線光電子分光法 (XPS) によるゲータイト(α -FeOOH)と Cd の吸着形態の観察 | 山田 智之 |

物性物理..... - 17・18 -

- | | |
|--|------------------|
| | 前半 14:28 ~ 15:28 |
| 1. ディラック電子系と電荷秩序絶縁体状態の間における電子状態 | 小澤 拓弥 |
| 2. ゼロギャップ伝導体 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ の電子状態 | 秋葉 朋成 |
| 3. イオン液体を利用したバッキーペーパーカーボンナノチューブトランジスタ (BCN-FET) 作製と圧力効果 | 鈴木 佑貴子 |
| 4. Pd(dmit) $_2$ 塩系のゼーベック係数の圧力依存性 | 爲木 創太 |
| 5. 混晶系分子性導体 Et $_2$ Me $_2$ As $_x$ Sb $_{1-x}$ [Pd(dmit) $_2$] $_2$ ($0 < x < 1$) における圧力効果 | 梶田 初葉 |
| | 後半 15:33 ~ 16:33 |
| 6. プロトン-電子相関系分子性導体 κ -D $_3$ (Cat-EDT-TTF) $_2$ の基底状態の研究 | 山田 翔太 |
| 7. λ -(BETS) $_2$ FeCl $_4$ における伝導性および磁性相転移の圧力制御 | 中村 諭 |
| 8. 有機導体 λ -BETS $_2$ FeCl $_4$ における強磁場下での異常比熱と金属-絶縁体転移の研究 | 杉浦 栞理 |
| 9. λ -(BETS) $_2$ Fe $_x$ Ga $_{1-x}$ Cl $_4$ の金属絶縁体転移における 3d スピンと π 電子の関係性 | 堤 夏輝 |
| 10. κ -(BETS) $_2$ FeBr $_4$ の強磁場金属相の電子状態 | 牟田 翔馬 |

原子過程科学 9:05 ~ 9:53 [平成 25 年 2 月 14 日(木)]

1. He とその混合ガスの電子衝突実験

牧井 靖由

エネルギー損失分光法は、原子や分子の励起やイオン化の研究のために有用な方法である。エネルギー損失分光法で得られる電子エネルギー損失スペクトルは、入射電子と散乱電子のエネルギー差、すなわち標的粒子の励起エネルギーを横軸にとり、縦軸には散乱強度を示したものである。この散乱強度は、実験が行われた散乱角での微分断面積に対応する。今回の実験では、微分断面積を求めるための混合ガス法を確立するために、He、N₂/He、H₂/He、Ar/He を用いた実験を行った。

2. イオン付着飛行時間型質量分析装置の実用化に向けた内部構造の改良

平原 稜

本研究室では、イオン化の際にフラグメンテーションを起こしにくいイオン付着法の利点を活かした飛行時間質量分析計を呼気分析装置として使用することを目的に研究を行っている。呼気分析では容易かつ高感度で未知試料を同定できることが必須条件である。そのためには検出感度を向上させる必要がある。そこで飛行時間型質量分析計の内部のイオンの動きを再検討し、レンズ部に金属製のメッシュを取り付けて均一な電場を構成することで分析部のイオンの流れの安定化を図った。また、内部での部品の接触による通電を防ぎ簡易的に装置を調整できるような改良を行った。

3. 散乱電子-イオン同時計測装置による窒素分子の解離性イオン化過程の研究

青池 祐馬

本研究の目的は、窒素分子(N₂)の光学的禁制な超励起状態の存在とその崩壊過程の解明である。分子の超励起状態はイオン化エネルギー以上の連続状態中に存在し、散乱電子の他に生成イオンを同時に観測することで探索が可能となる。本実験では、この散乱電子-イオン同時計測に向け、入射電子エネルギーを 200 eV、電子の幾何学的な散乱角を 6 deg とした電子衝突実験を行った。得られた電子エネルギー損失スペクトルでは、エネルギー損失値 9 eV と 13 eV 付近で励起状態が観測され、16 eV 以上のエネルギー領域では連続状態となることが確認できた。

4. 蛍光 X 線分析法による鉛体表面汚染評価

柳原 孝太

原子炉の廃炉現場等で想定されるアクチニドによる被ばく事故に対して、迅速かつ正確に体表面汚染状況を評価する方法の開発が必要である。そこで本研究では、同じ重金属である鉛を試料とし、蛍光 X 線分析法を用いた評価方法の研究を行った。まず試料の作製法について検討し、試料の固化にレジン(エポキシ樹脂)を用いると有効であることを明らかにした。次に、その鉛含有レジン試料から得られたスペクトルデータを解析し、試料の X 線吸収線量と鉛の検出下限の相関を得た。例えば、吸収線量 1 mGy のとき、鉛の検出下限は約 0.3 ppm であった。

量子エレクトロニクス 10:00 ~ 11:41 [平成 25 年 2 月 14 日(木)]

--- 前半 10:00 ~ 10:48 ---

1. 新規プラスチックシンチレータの炭素線に対する応答特性の研究

佐竹 佑介

プラスチックシンチレータは組成が人体に近く、放射線治療において患者体内の分布の評価に応用できる可能性がある。近年、新しいプラスチックシンチレータ、シンチレックスが開発された。本研究ではシンチレックスと現在世界で最も使われているプラスチックシンチレータの、治療用炭素線に対する応答を調べた。その結果シンチレックスの炭素線に対する発光量は一般のプラスチックシンチレータの半分ほどであることが分かった。また、発光量の LET に対する依存性も明らかにした。

2. 半導体ダイオード検出器の炭素線に対する線量応答についての研究

松山 哲大

重粒子線を用いたがん治療では患部に線量を集中させ周囲の細胞への影響を最小限にとどめることが可能である。現在、治療計画に基づき照射を行っているが、治療中に体内での線量測定は行われていない。治療計画通りに照射が行われているか、実際に測定し評価することは治療成果のさらなる向上やリスク管理の面で非常に重要な課題となっている。本研究では将来的に体内線量分布測定を行うことを最終目標とし、検出器の小型化などの点で有力候補である、半導体ダイオード検出器の炭素線に対する基礎線量応答特性を評価することを目的とする。

3. テーパー角によるガラスキャピラリーの光の透過特性

藤原 智

ガラスキャピラリーのテーパー角による光の透過率への影響を調べるためにテーパー部に違いのある up, down のキャピラリーを 2mm 管、3mm 管ガラス毎に作製した。キャピラリーの画像からテーパー部の解析を行い、テーパー角を導いた。波長 411nm、488nm、633nm、670nm の 4 つのレーザーを用いて透過率の測定をしたところ、down のキャピラリーの透過率が up より高い傾向にあり、2mm 管の透過率が 3mm 管より 50%程度高かった。光学レンズを用いた場合、up,down の透過率に違いは見られなかった。

4. ガラスキャピラリーの形状解析及び光の透過率の測定

萱場 千尋

本研究ではガラスキャピラリーによるマイクロ光ビームの生成に向けた基礎的な研究を行った。2mm 管と 3mm 管で形状の異なる up と down の 2 種類のガラスキャピラリーを作製し、長さやテーパー角などの形状解析と透過率の測定を行った。レンズなしの透過率の場合、2mm 管、3mm 管共に down の方が up より高かったが、最大テーパー角の違いはあまりみられなかった。レンズ有りの場合透過率に違いはみられなかった。ガラスキャピラリーの長さが長いほど透過率は低くなることから、テーパー角よりも長さの方が透過率に影響を及ぼすことがわかった。

--- 後半 10:53 ~ 11:41 ---

5. 回転鏡とデジタルカメラを用いたライダーの研究

山下 温子

本研究はライダーという装置を利用し、移動可能なデジタルカメラによるレーザーレーダーの測定技術確立し、大気中の N_2 、 O_2 、 H_2O 等の散乱の様子について観測することにより地球規模の大気の観測から環境問題に対して基礎データを与えられるようにすることが主な目的である。今年度は、予備実験として、室内での実験を行い、回転数とシフトが比例関係になることを確認し、距離測定が可能であることを確かめた。そして本実験では、レーザーを 500 [m]離れた建物に照射し、回転鏡をまわしながらデジタルカメラで撮影し、距離を測定した。

6. 回転鏡とデジタルカメラを用いた LIDAR の研究

仲宗根 好汰

近年、懸念されている大気汚染の対策として、まず大気中の物質の特定が必要である。そこで、本研究では LIDAR の手法として、デジタルカメラとレーザーを用いた観測技術の確立を目的としている。本年度は初めに回転鏡とデジタルカメラを用いて、回転鏡により生じた 30m 先のコーナーキューブから反射したレーザー光のシフトが回転鏡の回転数と比例関係であることを確かめた。次に 500m 離れた放送塔へ向け照射し、その散乱光を回転鏡が静止状態と 100 回転/s の状態で撮影し、シフト幅から距離を求め、地図上の距離と比較した。

7. $Yb\ 4f^{14}6s6p\ ^3P_2 - 4f^{14}6s7s\ ^3S_1$ の遷移におけるシュタルクシフトの測定

河野 佑輔

高分解能レーザー分光法を用いて、高励起状態における Yb 原子のシュタルク効果の実験を行った。まず放電により Yb 原子を基底状態 $4f^{14}6s^2\ ^1S_0$ から準安定状態 $4f^{14}6s6p\ ^3P_2$ へ励起し、その後 $4f^{14}6s6p\ ^3P_2 - 4f^{14}6s7s\ ^3S_1$ (769.9 nm) 遷移のスペクトルを観測した。強さ 82 kV/cm まで電場をかけ、シュタルクシフトを測定した。その結果、同遷移のスカラー分極率 $\alpha_s = 230 \pm 16\text{ kHz}/(\text{kV}/\text{cm})^2$ が得られた。

8. 高励起状態における Yb 原子のシュタルク効果

三浦 潤平

本実験では、放電により Yb 原子を基底状態である $4f^{14}6s^2\ ^1S_0$ から準安定状態である $4f^{14}6s6p\ ^3P_2$ に占有し、さらに波長可変半導体レーザーを用いた高分解能レーザー分光法により $4f^{14}6s6p\ ^3P_2 - 4f^{14}6s7s\ ^3S_1$ (769.9 nm) 遷移の分光測定を行った。最高 82kV/cm の電場を生成しシュタルクスペクトルを観測した。得られたスペクトルより Yb 769.9 nm 遷移のスカラー分極率を $230 \pm 16\text{ kHz}/(\text{kV}/\text{cm})^2$ と決定した。

学内外研 13:00 ~ 13:12 [平成 25 年 2 月 14 日(木)]

1. 物理モデルを用いた機弦楽器におけるグリッサンド音の実現

情報科学科 白木研究室 古市 朝美

今日、楽曲製作に使用される音源の多くは、PCM (Pulse Code Modulation) 音源と言われる本物の楽器の音を録音(サンプリング)した波形を用いた音源が使われている。それに対して、物理モデル音源は楽器を偏微分方程式で表し、それをシミュレーションすることによって波形を作り出している。この音源はパラメーターを適切な値に設定することによって、音程、音色、音量など、楽器音の全ての要素を制御することが可能であり、PCM 音源と比べて音の立ち上がりや連続した音の生成等、自然な楽器音作りが行える。本研究では、音を連続的に変化させるグリッサンド奏法と呼ばれる演奏方法に着目して、アコースティック・ギターの生音に迫る物理モデル音源生成法を提案した。更に生成したアコースティック・ギターの物理音源に対する聴取実験を通して、提案した方法の妥当性の検証を行った。

宇宙・素粒子 13:17 ~ 14:58 [平成 25 年 2 月 14 日(木)]

--- 前半 13:17 ~14:05 ---

1. Goldstone モデルによるヒッグス粒子

高木 康成

ヒッグス粒子がなぜ物質に質量をもたせるのかを理解するために、場の理論でスカラー場の量子化と、電磁場の量子化を学んできた。そこから電磁相互作用やゲージ理論、自発的な対称性の破れを使い、最終的にヒッグス模型に行き着く。ヒッグス機構でのベクトル場は、複素スカラー場が持っていた 2 つの自由場のうち 1 つの質量のないベクトル場を取り込み、質量を獲得する。もう 1 つは質量をもつ実場としてヒッグススカラー粒子が残ることがわかり、そこでヒッグス粒子が質量をもたせるという仕組みが分かった。

2. Higgs 機構と Higgs 粒子における散乱断面積の計算

小谷 駿

現在 CERN での実験により「Higgs 粒子らしき粒子」の発見が発表されたが、まだはっきりとした結果は出てはいない。標準理論の正しさをさらに高めるために「Higgs 粒子」の確認が必要である。本論文では Higgs 粒子の理論的な理解を得るために Higgs モデルで自発的対称性の破れの機構を調べる。その結果、Higgs 粒子がどのようにして質量を与えているのかが分かった。さらに、本論文の Higgs モデルを利用して Higgs 粒子の生成・反応の散乱断面積の計算を行うことで、散乱の様子が分かった。

3. ブラックホールに落ちてゆく粒子の運動

青木 隆

ブラックホールは一般相対性理論でのアインシュタイン方程式の解として得られる。特に 球対称ブラックホールは、シュバルツシルド計量によって与えられる曲がった時空となる。ブラックホールは遠方からみると質量のあるニュートン重力源のように見えるが、ブラックホールの半径 (シュバルツシルド半径) に近づくと、大きく異なってくる。ここではシュバルツシルドブラックホールの性質を明らかにするために、球対称ブラックホールへまっすぐ落下してゆく粒子の運動方程式を解き、ニュートン重力で落下する場合と比較し、議論する。

4. 強い重力レンズ効果を用いたハッブル定数の推定

谷口 勝哉

一般相対論から導かれる強い重力レンズ効果によって多重像が形成された場合、一般に像ごとの光の到着時間は異なる。これを時間遅延効果という。各像間の時間差は、各天体間の宇宙論的距離と重力レンズ天体の密度分布に依存する。本研究では、2個の像が現れている系について、レンズ天体の密度分布を特異等温球と仮定し、ハッブル定数を推定した。その結果、 $H_0 = 69.2 \pm 6.6$ [km/s/Mpc]を得た。また、密度分布への強い依存性があることも分かった。したがって、より正確な測定のために、複雑な構造をしている銀河・銀河団の密度分布を、詳細に解析する必要があると考えられる。

--- 後半 14:10 ~ 14:58 ---

5. 重力レンズ統計を用いたダークエネルギーへの制限

戸沢 優也

近年、Ia型超新星爆発の観測から宇宙の加速膨張が示唆されている。この加速は未知のエネルギーが引き起こしていると考えられていて、ダークエネルギーと呼ばれている。本論文では、強い重力レンズ効果が起こる確率を計算し、ダークエネルギーの量を求めた。それにより、超新星爆発を用いた方法とは独立した制限が得られた。結果として、曲率のある一般の宇宙についてはダークエネルギーの下限が得られた。また、平坦な宇宙に対しては宇宙のエネルギーの約70%がダークエネルギーで占められていることが分かった。

6. 宇宙の構造形成におけるダークマターの速度分布の進化

清水 日菜乃

宇宙の大規模構造や銀河・銀河団等は、宇宙初期に存在した僅かな密度揺らぎが成長して形成されたと考えられている。その過程で、ダークマターの分布は一定の平衡状態へ近づいていくと考えられているが、実際には外縁部における物質の降着が続くため、孤立系とは大きく状況が異なってくる。本研究では重力多体シミュレーションを用いて、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進化を調べた。その結果、速度分布は徐々にマクスウェル分布に近づきはするが、宇宙年齢に達しても平衡との有意なずれが存在すると分かった。

7. SIS フォトン検出器の安定動作条件の確立

河西 美穂

現在、国立天文台テラヘルツグループではASTE望遠鏡に搭載するサブミリ波カメラの開発を行っている。本研究ではSISフォトン検出器の電流電圧特性をデュワーとASTEに搭載するクライオスタットの二つで評価し、ASTEクライオスタットの磁場特性の向上を行うことが目的である。バイアス電圧を補正することでこれまでよりも正確に電流電圧特性を測定することができた。また、低リークの読み出しを実現するためにローパスフィルターを入れて、新たな読み出し回路を作成することで実験の安定化も図ることができた。

8. SIS 光子検出器と多素子読み出し回路の組み合わせ実験の評価と改良

久保 大樹

SIS光子検出器は、宇宙から来るサブミリ波をトンネル効果を利用して光電流として読み出す。本研究では0.8K以下の極低温下で、検出器と光電流を電圧にして読み出す電荷積分型読み出し回路(AC-CTIA)を組み合わせ実験をする。そして、光を入れないときと光を入れたときの振る舞いを比較評価することが目的である。先行研究で課題とされていたSISの保護抵抗の変更により、印加磁場の変化の影響がより正確にわかると期待される。また、冷却性能向上のため冷却ステージに敷く銅板の設計についても行った。

磁気物性 15:10 ~ 17:03 [平成 25 年 2 月 14 日(木)]

--- 前半 15:10 ~ 16:10 ---

1. エピタキシャル Fe/Cr (011)二層膜における熱処理条件と界面フラストレーション

門井 勇也

MBE(分子線エピタキシー)法を用いて MgO(111)基板上に Cr50 Å (011)/Fe40 Å (011)を成長させ、熱処理条件を変えて界面の平坦性が異なる二層膜試料を作製した。250 K で残留磁化の緩和測定を行った結果対数的な緩和が観測され、界面が乱れた試料に比べ平坦な試料では磁気粘性係数 S が大きくなる傾向がみられた。また、RHEED による界面の平坦性の評価も同時に行った。この結果は強磁性的な Fe(011)面と反強磁性的な Cr (011)面との界面フラストレーションによって説明される。

2. エピタキシャル Fe/Cr(011)二層膜におけるスローダイナミクスの Fe 膜厚依存性

久保木 翔一

MgO(111)基板上に分子線エピタキシー法を用いて Fe(011)/Cr(011)を蒸着させ、250K で残留磁化の緩和測定を行った。この時、Cr の膜厚は 50 Å に固定し、Fe は 40 Å、80 Å と変化させ、Fe による膜厚依存性を調べた。その結果、対数的な緩和(スローダイナミクス)が観測された。これより磁気粘性 S を求めたところ、Fe の膜厚が大きくなるほど S が小さくなった。これらの結果は Fe(011)/Cr(011)界面に Fe(001)/Cr(001)の場合と同様に、フラストレーションが存在し、Fe 層に生じた磁壁の移動がスローダイナミクスに関係している事を示唆している。

3. エピタキシャル Fe/Cr(011)二層膜におけるスローダイナミクスの Cr 膜厚依存性

落田 佳耶

本研究では分子線エピタキシー(MBE)装置を用いて Cr の膜厚を変化させた Fe/Cr(011)二層膜を作製し、熱残留磁化の緩和の測定から、界面フラストレーションと Cr の膜厚の関係を調べた。その結果、Cr の膜厚が増加すると磁気粘性 S は Fe の膜厚を変化させた場合と同程度に減少した。これはこれまで知られている Fe/Cr(001)界面の場合の構造と異なり Cr の磁気構造の変化がスローダイナミクスに影響している可能性を示唆する。

4. B サイトを乱したスピネル化合物 $\text{Co}[\text{Al}_{1-x}\text{Rh}_x]_2\text{O}_4$ のスピングラス転移

菅原 直樹

幾何学的フラストレーションを持つスピネル化合物 CoAl_2O_4 の B サイトに乱れを加えると、相互作用の乱れ格子の歪みが生じ、スピン液体の状態がスピングラス(SG)へ秩序化することが知られている。しかし、この SG が従来の SG とどのような違いを持っているのかはまだはっきりと分かっていない。そこで本実験では、B サイトの Al^{3+} を Rh^{3+} で置換した試料を作製し、磁場(H)中での磁化測定を行った。その結果、H-T 相図の臨界曲線は従来の SG と比較して、より分子場理論に近い傾向を示した。

5. パイロクロア酸化物 $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ のスピナイス状態に対する A 及び B サイトの乱れの効果

山中 祐貴

低温でスピナイス状態を示すパイロクロア酸化物 $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ の A サイトを Y で、B サイトを Sn でそれぞれ置換した試料を固相反応法により作製し、A、B 両サイトの乱れの効果を調べた。単相が得られた試料に対する交流磁化率測定では、Sn 置換量が 1% ~ 10% へと増加するにつれて、スピナイスに特徴的な 15 K の山が消えていき、その周波数依存性が減少した。これに対して、Y 置換量が 1% ~ 5% ではほとんど変化が見られなかった。これらの事から $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ のスピナイス状態は、A サイトの希釈よりも B サイトの乱れによる格子歪みの影響を強く受ける事がわかった。

--- 後半 16:15 ~17:03 ---

6. 弱いランダム異方性を持つアモルファス合金 ($\text{Zr}_{0.57}\text{Nd}_{0.43}$) $_{36}\text{Fe}_{64}$ における交流磁場振幅依存性

横山 香織

弱いランダム磁気異方性を持つアモルファス合金 ($\text{Zr}_{0.57}\text{Nd}_{0.43}$) $_{36}\text{Fe}_{64}$ をマグネトロンスパッタリング装置によって作製し、交流磁化率の交流磁場振幅 h_0 依存性を調べた。その結果 $h_0 < 2.0$ [Oe] の時は T_f で鋭いピークが一つ見られたが、 h_0 が大きくなると転移は低温 T_l までおさえられ非平衡領域が出現した。これはこの系の自由エネルギーの多谷構造の障壁の高さが h_0 のオーダーであることを反映している。しかし、残留直流磁場が存在する時は、 T_f 以下に強磁性的な別の相が現れることがわかった。

7. 高周波マグネトロンスパッタリング法を用いた $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ 薄膜の作製と磁気特性評価

坂本 大輔

$\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ は、 $x = 0.63$ 付近で x^2-y^2 軌道秩序を持つ A 型反強磁性と $3z^2-r^2$ 軌道秩序を持つ C 型反強磁性が二重臨界的に競合する。この臨界点近傍の 50 K 付近でこれらの軌道の混成により超巨大磁気抵抗 (CMR) 効果が現れる。本研究ではエピタキシャル歪みを利用して混成の度合いを変えて CMR の制御を試みる為、高周波マグネトロンスパッタリング法により薄膜化した。その結果、STO 基板上に成膜した $x = 0.65$ の試料において x^2-y^2 軌道秩序相転移を観測した。

8. エピタキシャル歪みを用いた $\text{Nd}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{MnO}_3$ 薄膜の軌道状態制御

柳澤 勇希

$\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ は $3z^2-r^2$ 軌道秩序と x^2-y^2 軌道秩序の相境界 ($x \approx 0.63$) 付近で軌道の混成に起因する超巨大磁気抵抗が観測される。本研究では高周波マグネトロンスパッタリング法により様々な基板上に $\text{Nd}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{MnO}_3$ 薄膜を作製し、エピタキシャル歪みがこの物質の磁气的性質に与える影響を調べた。その結果、 SrTiO_3 , LaAlO_3 基板上に作製した試料において 250 K 付近から強磁性的な立ち上がりが観測された。これはエピタキシャル歪みによって軌道の混成が強まったためと考えられる。

9. A サイト秩序型 $RE\text{BaMn}_2\text{O}_6$ ($RE = \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}$) の Ba サイト置換効果

飯島 大貴

A サイト秩序型 $RE\text{BaMn}_2\text{O}_6$ ($RE =$ 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 $RE\text{BaMn}_2\text{O}_6$ ($RE = \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}$) の Ba を Ca, Sr で 5% 及び 10% 置換し、電荷・軌道秩序絶縁体 (CO/OOI) 相、強磁性金属相及び A 型反強磁性 (AF(A)) 相に与える効果について調べた。その結果、CO/OOI 相、AF(A) 相の転移温度は低温側に抑えられるが、300 K 付近での強磁性転移温度 ($RE = \text{Nd}$) はほとんど変化しない事がわかった。

物性理論 9:00 ~ 10:41 [平成 25 年 2 月 15 日(金)]

--- 前半 9:00 ~ 9:48 ---

1. 準位統計による不規則系の解析

臼田 鷹実

不純物による電子波の散乱によっておこる、非局在状態から局在状態への遷移過程において、エネルギー固有値の統計的性質について数値的に調べた。今回の研究では系のハミルトニアンとして一次元アンダーソンモデルを採用し、エネルギー固有値を数値的に計算した。その結果、スケーリング理論から予想されるように、一次元のため局在状態から非局在への転移は見られなかったがエネルギー準位統計のサイズ依存性や、長距離ホッピングの効果等が準位統計にどのような変化を与えるか具体的に調べた。

2. ニューラル・ネットワークの連想・想起について

土井 智博

相互結合型ネットワークを用いてパターンの想起の数値実験を行った。ホップフィールド・モデルではローカル・ミニマム（局所極小値）に陥いると想起に失敗してしまう。この弱点の改善のために反学習を行うホップフィールド・ネットワーク、温度の概念を取り入れたボルツマンマシン、そのボルツマンマシンの計算時間短縮を試みたコーシーマシンを使用した。記憶させるパターンの数を変えたとき想起成功率や想起に成功するまでの時間がどのように変化するかを具体的に調べた。

3. シュレーディンガー方程式の有限要素法による解析

遠山 愛

物理現象に現れる偏微分方程式を複雑な形状の系において数値的に解析する場合、系を有限域に分割して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次元の散乱問題と2次元井戸型ポテンシャルの固有値問題について、有限要素法を適応した解析を行い、散乱振幅やエネルギー固有値の精度が分割数にどのように依存するのかなどについて調べた。

4. FDTD 法を用いた電磁界の計算シミュレーション

並川 舞

FDTD(Finite Difference Time Domain=時間領域差分)法とは、マクスウェル方程式を Yee のアルゴリズムを用いて、空間および時間の領域を差分化し、電界と磁界の時間発展を数値的に計算する方法である。Yee のアルゴリズムとは、電界と磁界をそれぞれ空間的、及び時間的に交互に配置して、計算を進めて行くものである。この卒業研究では、FDTD 法で用いる Yee のアルゴリズムの理解、そして FDTD 法を用いた導波管の電磁波の伝搬シミュレーションを行った。

--- 後半 9:53 ~ 10:41 ---

5. 電流誘起磁化反転に対する形状磁気異方性の効果

笠井 美波

強磁性金属中に電流を流すことによって磁性体の磁化構造を変化させることができ、これはスピントルク効果と呼ばれる。一般に、磁性体はその形状、寸法によって特定の方向に強く磁化する性質（磁気異方性）があり、磁化の運動を妨げる。本研究ではその形状磁気異方性が電流誘起磁化反転にどのように影響するかを、数値的に調べた。計算の結果、形状磁気異方性がある場合、磁化が反転する電流の大きさに臨界値が存在すること、また磁化ダイナミクスの緩和定数によってその臨界値が変化することがわかった。

6. スピントルクダイオード効果に対する数値的研究

柴田 愛美

空間的な磁化構造を持つ強磁性金属に電流を流すと、磁化構造が変化することが知られている。これはスピントルク効果と呼ばれる。本研究では、異なる磁化の向きを持った強磁性多層膜に交流電流を印加した場合のスピントルク効果を磁化のダイナミクスを解くことによって、ある周波数の電流で大きく磁化が歳差運動することを示した。この周波数は交流磁場による強磁性共鳴の周波数と一致すること、そのときの電圧が直流成分を持つ「スピントルクダイオード効果」を再現できることなどを示した。

7. スピンゼーベック効果に対する異方性緩和に関する研究

村松 佳奈

強磁性体の両端に温度差を与えた際、温度勾配方向にスピン波が駆動される現象はスピンゼーベック効果と呼ばれる。この効果はミリメートルオーダーで現れ、その緩和過程の解明が望まれている。本研究では強磁性体中の縦緩和・横緩和という2つの緩和定数がスピンゼーベック効果に与える影響を調べた。2スピンモデルを用いた計算の結果、スピンゼーベック効果のシグナルは縦緩和の減少とともに増大することを示した。これは強磁性共鳴の実験で得られる横緩和定数からはスピンゼーベック効果の緩和現象を説明できない事を示唆している。

8. 磁気 skyrmion 格子の運動から誘起されるスピン起電力の数値解析

嶋田 裕樹

強磁性金属中において空間的にねじれた磁化構造が時間的に変化すると、伝導電子の感じるスピン空間のベリー位相の変化に伴って、スピンに依存した起電力が発生する。本研究では、マンガンシリコン (MnSi) 合金で発見された、磁気渦構造をもつ skyrmion 格子 (SkX) に交流磁場を印加したときの、スピン起電力を数値的に解析した。具体的には、Dzyaloshinskii-守谷相互作用を取り入れて、磁化の運動方程式を数値的に解析することで SkX を得る。これに交流磁場を印加したとき、ある周波数で磁気渦構造が集団励起を起こし、大きなスピン起電力の発生を示唆する結果を得た。

基礎物理 10:50 ~ 12:19 [平成 25 年 2 月 15 日(金)]

--- 前半 10:50 ~ 11:26 ---

1. 福島での走行サーベイにおけるガンマ線計測の空間応答関数の研究

岡本 由太

2011 年 3 月に発生した福島第一原子力発電所の事故に伴い、大量の放射性物質が放出した。放射線医学総合研究所では、放射性物質の長期的影響把握のため、ゲルマニウム半導体検出器を搭載した車両による放射線測定システム（ラジプローブ）による計測を行っている。この高精度測定には、測定状況を踏まえた検出器の感度（空間応答関数）が重要になる。しかし、走行サーベイの空間応答関数の一般的な導出手段は確立されていない。本研究では、実験・数値計算により空間応答関数の導出方法を確立し、ラジプローブの空間応答関数を求めた。

2. ミュー粒子寿命測定装置の開発研究

中村 聡之

ミュー粒子は弱い相互作用によって約 $2.2\mu\text{s}$ の寿命で崩壊し電子を生成する。その平均寿命はシンチレーションカウンタとエレクトロニクス回路を用いることで測定することができる。エレクトロニクス回路のうち、ディスクリミネーターというモジュールは、入力信号の波高が指定したしきい値を超えた場合にのみ、規格化された信号を出すことで、ミュー粒子の通過による信号のみを効率よく検出することができる。本研究では、ディスクリミネーターの設計、製作を行い、実際にミュー粒子の寿命測定を行うことで、その性能を評価した。

3. 集光レンズ系を導入した透過率測定装置の再構築と性能評価

佐藤 航

Ashra 実験ではトリガー撮像のための画像伝送系に光ファイバー束を用いている。この光ファイバー束の画像伝送性能を評価する為に、透過率の測定を行っている。今年度、Ashra 実験において観測に用いられている集光レンズ系である、トリガー鏡筒を導入し、透過率測定装置の再構築を行った。さらに光透過率の測定を行い、装置の性能評価を行った。

--- 後半 11:31 ~ 12:19 ---

4. OPERA 実験におけるタウ粒子の崩壊検出のためのニュートリノ 反応解析

渡部 拓也

OPERA 実験は、ニュートリノに質量があることを示すニュートリノ振動を出現型で検出するために、振動後のタウニュートリノから生成されるタウ粒子の直接検出を目指している。本研究では、2011 年から本格的にタウニュートリノ反応探索を行っている。著者は、本年度よりニュートリノ反応事象からニュートリノ反応点と生成粒子を特定し、タウ粒子が崩壊時に見せる幾何学的な飛跡の折れ曲がりを探るニュートリノ反応解析に携わっている。現在までに 19 事象の解析を終了させた。さらに解析数を増やしタウ粒子検出を目指す。

5. OPERA 実験におけるタウニュートリノ反応の候補事象の解析

野上 道

OPERA 実験は、ニュートリノに質量があることを示すニュートリノ振動現象を出現型で立証すべく、タウニュートリノ反応の検出を目指している。検出したニュートリノ反応のうち、タウニュートリノ反応と同様の幾何学的な形状を示す事象を検出したが、その後の詳細解析による核破碎粒子の検出によってタウのハドロン背景事象であると判断できた。さらに、事象の形状解析、放出粒子の運動学的解析を行った。

6. タウ崩壊事象における π^+ ビームを用いたハドロンバックグラウンドの研究

西村 秋哉

OPERA 実験はニュートリノに質量があることを示すニュートリノ振動を出現型によって証明する実験である。 τ 粒子検出には τ 粒子が崩壊する際の幾何学的な折れ曲がりを用いているが、それに類似した事象の一つにハドロンの原子核衝突による二次散乱がある。これまで π^- ビームを用いた解析が行われてきたが、 π^+ ビームは行われていなかった。そこで、本研究では4GeV/cの π^+ ビームを照射した原子核乾板を使い、衝突点に収束する二次粒子の運動量・横運動量を用いてバックグラウンドとなるハドロン反応の頻度を求め、 π^- ビームとの結果の比較も行った。

7. エマルシヨンスペクトロメーターの分解能向上を目的としたビーム照射実験

松本 拓也

エマルシヨンスペクトロメーターは将来のニュートリノ振動実験に有望視されている検出器であり、基礎物理学教室にて開発・改良が行われてきた。しかし、これまでは乾板の固定荷重が定量的に評価されておらず、乾板のズレや歪みが生じてしまい、解析に困難を伴っていた。運動量・電荷符号測定の分解能を向上する上で、乾板のズレや歪みを抑制することは重要である。そこで、固定荷重とズレや歪みの関係を調べる為に、4N~80Nのバネを使用する検出器を製作し、今夏にCERNで6GeV/cの π^- ビームの照射と衝撃実験を行った。

表面物理 13:30 ~ 14:18 [平成 25 年 2 月 15 日(金)]

1. 電界イオン顕微鏡(FIM)によるタングステンティップの観察

泉妻 那美

電界イオン顕微鏡(FIM)により、タングステンティップ先端の原子配列を観察した。結像ガスとして He と Ne の使用を考慮し、ガス導入系の改造を行った。また、除振効果をあげるための空気バネによる除振台を作動させた。結像ガス原子の電界イオン化はティップのフェルミ準位と原子の電子準位間のトンネル効果により引き起こされるため、FIM 像はティップの仕事関数、原子の電離電圧とティップ電圧に大きく影響される。Ne を使用した場合、放出イオン強度は He よりも低いティップ電圧で最大となり、He では観察することのできない低仕事関数面と考えられる原子配列が出現した。

2. 昇温脱離法による石英ガラスからの水の脱離の観察

社田 尊秀

ガラス中の水の吸着、吸蔵状態を観察するために、石英ガラスからの脱離ガスの TPD(Temperature Programmed Desorption)スペクトルを測定した。試料は粒径が約 0.1mm の粉状石英ガラスを使用した。実験は昇温プログラムによる昇温制御下で行い、一定昇温速度 10°C/min、到達温度 1200°C で試料を昇温し脱離ガスを四重極型質量分析計により分析した。主な脱離ガスは質量電荷比 1(H⁺)、2(H₂⁺)、17(OH⁺)、18(H₂O⁺)、44(CO₂⁺)であり、これらの TPD スペクトルを測定した。約 1000°C から、水の脱離が観測され昇温とともに脱離量は増加した。他の脱離種については特徴的な変化は見られなかった。

3. 原子間力顕微鏡 (AFM) によるゲータイト表面の原子像観察

片倉 康輔

土壌鉱物の一種であるゲータイト (FeOOH) を空气中劈開し、その表面を AFM によって観察した。結晶構造は斜方晶系で、劈開表面には主に 110 面が現れる。測定は真空中でコンタクトモードにより行った。原子像は 15nm×15nm の走査範囲で測定した。観察では、二種類の[110]方向に縦長な六角形が[001]方向に列を成し[110]方向に交互に並んでおり、(110)理想表面との比較によりこの観察面は 110 面であることが分かった。

4. X 線光電子分光法 (XPS) によるゲータイト(α -FeOOH)と Cd の吸着形態の観察

山田 智之

土壌粘土鉱物の 1 つである Goethite にカドミウム (Cd) を真空蒸着し、Cd の吸着状態を XPS により分析した。真空蒸着後、大気に晒すことなく、XPS 分析を行うため、真空蒸着装置と試料移送機構を製作し XPS 装置に取り付けた。Goethite への Cd 蒸着により、Goethite から O1s 光電子ピークの結合エネルギーは低エネルギー側へシフトし、Goethite 表面上の酸素と Cd は化学的に結合することが明らかになった。

物性物理 14:28 ~ 16:33 [平成 25 年 2 月 15 日(金)]

--- 前半 14:28 ~ 15:28 ---

1. ディラック電子系と電荷秩序絶縁体状態の間における電子状態

小澤 拓弥

α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ の低温電子状態は、電荷秩序絶縁体状態から 15kbar 以上の静水圧力印加で質量ゼロのディラック電子系へと変化する。この 2 状態の間の電子状態について、理論からマージナルな状態であることが指摘されている。本研究では、この 2 状態の間の電子状態を明らかにすることを目的に、磁気抵抗とホール効果を調べた。その結果、理論結果とは異なり、電荷秩序からディラック電子系へは一次転移であり、その間の状態は、ディラック電子相と電荷秩序絶縁相とが相分離した状態であることを示唆する結果が得られた。

2. ゼロギャップ伝導体 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ の電子状態

秋葉 朋成

α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ は静水圧 1.5GPa 以上の高圧下でゼロギャップ状態が実現する唯一の多層状の物質である。本研究では本物質の電子状態を定量的に評価するため、高圧下でホール効果と層内、層間熱起電力を測定した。その結果、圧力を増加させるにつれ、電荷秩序を伴う金属・絶縁体転移が抑制され、ゼロギャップ状態に特有の緩やかなホール係数、熱起電力の符号反転が見られた。この温度依存性から状態密度 $D(\mu)$ のエネルギー依存性を定量的に評価し、ゼロギャップ状態の電子状態を明らかにした。

3. イオン液体を利用したバッキーペーパーカーボンナノチューブトランジスタ(BCN-FET)作製と圧力効果

鈴木 佑貴子

イオン液体を利用した FET の高圧力下性能を調べることを目的に、BCN-FET を作製した。常圧力下では金属型、半導体型の BCN 両方においてキャリア注入効果を電気伝導測定で確認した。特に半導体型では、ゲート電圧 0~3V 間で約 3 桁の電気抵抗変化を観測した。一方圧力を印加すると電気抵抗のゲート電圧変化は小さくなり、約 0.6GPa 以上の圧力でその効果は得られなかった。重要なのは、ゲート電圧をかけてキャリアを注入した状態で 0.6GPa 以上の圧力を印加すると、ゲート電圧を切ってもその状態を保つことである。

4. Pd(dmit) $_2$ 塩系のゼーベック係数の圧力依存性

爲木 創太

Pd(dmit) $_2$ 塩は、Pd(dmit) $_2$ からなる伝導層と対イオンからなる絶縁層が交互に積み重なり二次元系を形成している。本研究では、Pd(dmit) $_2$ 塩の中で特にフラストレーションの強い 2 つの塩、Et $_2$ Me $_2$ Sb[Pd(dmit) $_2$] $_2$ と EtMe $_3$ P[Pd(dmit) $_2$] $_2$ の転移機構、電子状態探索のため、圧力下でのゼーベック係数の測定を行った。測定の結果、EtMe $_3$ P[Pd(dmit) $_2$] $_2$ において、Mott 絶縁体から価数結合固体状態へ、さらに超伝導状態への相転移を観測した。

5. 混晶系分子性導体 Et $_2$ Me $_2$ As $_x$ Sb $_{1-x}$ [Pd(dmit) $_2$] $_2$ (0<x<1) における圧力効果

梶田 初葉

基底状態で反強磁性秩序を持つ Et $_2$ Me $_2$ As[Pd(dmit) $_2$] $_2$ と、電荷秩序を示す Et $_2$ Me $_2$ Sb[Pd(dmit) $_2$] $_2$ という分子性伝導体の混晶は、混合比率によって、基底状態が、反強磁性、スピン液体、電荷秩序と変化することが知られている。本研究では、表題物質における圧力効果を調べるために、反強磁性(x=0.85)またはスピン液体状態(x=0.50)を示す比率の混晶を用いて、圧力下での電気抵抗を測定した。その結果、x=0.85 では、高圧下(P>8kbar)で金属状態が低温まで安定化することがわかった。

--- 後半 15:33 ~ 16:33 ---

6. プロトン-電子相関係分子性導体 κ -D₃(Cat-EDT-TTF)₂の基底状態の研究

山田 翔太

表題の分子性導体は、分子上で電気伝導および磁性を担う電子と、分子間で水素結合を形成するプロトンとが相関するように設計された新規の系である。これまでに軽水素体の基底状態が、量子スピン液体状態であることが明らかとなっている。本研究では、重水素体の基底状態を明らかにすることを目的とし、SQUID および ESR で低温磁気物性を調べた。その結果、重水素体では、100 K で非磁性状態へと一次転移することが分かった。このような状態は電子系のみでは起こり難く、電子系と強く結合したプロトンを利用して初めて実現された。

7. λ -(BETS)₂FeCl₄における伝導性および磁性相転移の圧力制御

中村 諭

λ -(BETS)₂FeCl₄は静水圧を加えることで金属-絶縁体転移が金属-超伝導-絶縁体転移に移行することが知られている。本研究では静水圧を制御させながら伝導性と磁性がどのように変化するか調べた。圧力の増大に伴って絶縁体転移温度が低下し、超伝導相が金属相と絶縁体相の中間温度領域に出現した。また超伝導転移より高温側では d スピン系の反強磁性秩序化と同時にみられる抵抗の減少が観測された。静水圧の印加により π スピン系の反強磁性絶縁体相の形成が抑制されることが明らかになった。

8. 有機導体 λ -BETS₂FeCl₄における強磁場下での異常比熱と金属-絶縁体転移の研究

杉浦 栞理

表題物質は温度の低下に伴い絶縁体—常磁性金属—反強磁性絶縁体転移を示す。更に 10.5 T 以上の強磁場下で温度に比例した大きな異常比熱が観測されている。約 8 K での金属-絶縁体転移と約 90 K での Mott 転移による絶縁体-金属転移との関係を探るために 70 K 以上での比熱測定を行い、Mott 転移温度よりも高い温度で鋭いピークを観測した。また、強磁場下の比熱異常の起源として重い電子系形成の可能性を伝導電子の振舞いから探るために電気抵抗測定を行い、電気抵抗測定からは通常の重い電子系とは異なる結果を得た。

9. λ -(BETS)₂Fe_xGa_{1-x}Cl₄の金属絶縁体転移における 3d スピンと π 電子の関係性

堤 夏輝

λ -(BETS)₂Fe_xGa_{1-x}Cl₄で観測される金属絶縁体転移形成には Fe の 3d スピンが重要な役割を果たすが、転移直後は π 電子が局在しているのに対し 3d スピンは大きな自由度を持つことがわかってきた。本研究では今まで考慮されていなかった相転移時の Fe スピンが持つ結晶場異方性を考慮し、比熱測定から内部磁場、自発磁化の成長過程から転移の臨界現象を観測することで 3d スピン濃度と π 電子の関係性を探った。その結果、Fe の濃度を希薄にすると内部磁場は減少するが、転移の性格は維持されることが分かった。

10. κ -(BETS)₂FeBr₄の強磁場金属相の電子状態

牟田 翔馬

表題物質は反強磁性状態と超伝導状態が共存する磁性有機超伝導体である。この物質は低温強磁場下において大きな温度に比例する異常比熱が観測されている。本研究ではこの異常比熱の原因を調べることを目的に、ホール効果及び磁化率の測定を行った。ホール効果では BETS 層内の伝導電子、磁化率の測定では FeBr₄ 層の局在電子の状態を調べた。ホール効果は、外部磁場が増加した場合、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を示した。磁化率では、有効磁場に分布が存在し、磁化には顕著な異方性があることを観測した。

博士・修士論文発表会プログラム（理学部 IV 号館大学院セミナー室）

平成 25 年 2 月 21 日（木）

博士課程（講演 30 分、質疑 10 分）

- | | |
|--|-------------|
| 1. ニュートリノ振動実験におけるタウ崩壊事象のハドロンバックグラウンド研究 | 9:00 ~ 9:40 |
| | 石田 拓運（基礎物理） |

修士課程（講演 20 分、質疑 5 分）

- | | |
|--|---------------|
| [基礎物理学] | 9:50 ~ 12:00 |
| 1. ニュートリノ振動実験におけるタウ粒子崩壊の探索及び候補事象の解析 | 梶原 崇史 |
| 2. 原子核乾板における大角度飛跡測定のための自動飛跡読取装置の開発 | 須藤 純 |
| 3. 原子核乾板における高精度飛跡選別装置の開発 | 土田 勇介 |
| 4. OPERA 実験におけるタウ・ハドロン崩壊バックグラウンドの解析 | 鈴木 平 |
| 5. 光半導体検出器 MPPC の基礎特性についての研究 | 小関 真悟 |
| [物性物理] | 13:00 ~ 13:50 |
| 6. ゼロギャップ伝導体 α -(BEDT-TTF) ₂ I ₃ における Dirac point 近傍の電子状態 | 北村 竜一 |
| 7. λ -BETS ₂ FeCl ₄ における常磁性金属-反強磁性絶縁体転移と強磁場下における新奇物性の探索 | 嶋田 一雄 |
| [物性理論] | 14:00 ~ 14:50 |
| 8. 二次元電子格子系のマルチモード・パイエルス転移に伴う比熱の温度変化 | 廣瀬 大記 |
| 9. フェルミオン・ダブリングを伴わないディラック電子のゼロモードのランダムネスに対する安定性 | 本田 貴大 |
| [原子過程] | 15:00 ~ 16:15 |
| 10. 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および後方散乱された励起原子の発光分光 | 野上 慶祐 |
| 11. 散乱電子 - イオン同時計測装置による窒素分子の解離性イオン化過程の研究 | 日野 雄太 |
| 12. 混合ガスを用いた一般化振動子強度の絶対値化 | 宮脇 宙希 |

平成 25 年 2 月 22 日（金）

- | | |
|---|---------------|
| [量子エレクトロニクス] | 9:00 ~ 9:25 |
| 13. デジタルカメラを用いたライダーリモートセンシング | 岩井 励 |
| [磁気物性] | 9:30 ~ 11:10 |
| 14. $RE_{1-x}\text{TiO}_3$ ($RE = \text{La}, \text{Pr}, \text{Nd}$) の A サイト欠損構造の制御とその物性 | 坂井 慎吾 |
| 15. 界面フラストレーションを持つエピタキシャル Fe/Cr(001)二層膜におけるスローダイナミクスの機構 | 中村 隆一 |
| 16. パイロクロア系と 2 次元分子磁石ネットワークのスピンアイス状態に対する乱れが緩和に与える影響 | 児玉 悠太 |
| 17. スピン流による磁性細線中の磁壁挙動の解析 | 倉満 隆寛 |
| [表面物理] | 11:20 ~ 11:45 |
| 18. ゲータイト表面におけるカドミウム吸着形態の観察 | 加藤 志朗 |
| [宇宙・素粒子] | 13:00 ~ 14:40 |
| 19. 回転するブラックホールによる光子湾曲の解析 | 浅妻 翼 |
| 20. 原始銀河形成の基礎過程に関する数値シミュレーション | 渡邊 彩香 |
| 21. ガリレオンに対するラグランジアン構築 | 本多 芳兼 |
| 22. 超対称な Galileon 代数とラグランジアンの組み立て | 恩田 誠治 |

博士論文予稿

1.

ニュートリノ振動実験におけるタウ崩壊事象のハドロンバックグラウンド研究

石田 拓運（基礎物理）

素粒子のうちの中性レプトンであるニュートリノは、素粒子物理学の基本理論である標準模型において、長く質量が存在しないとして考えられてきた。しかし、1998年スーパーカミオカンデにおける大気ニュートリノ欠損の発見等により、ニュートリノは有限の質量を持つことが明らかとなった。しかし、これらの実験はニュートリノ振動前のニュートリノフラックスの欠損を捉えたものであり、振動先のニュートリノの出現を観測したものではない。これに対してOPERA実験は、欧州原子核研究機構（CERN）からミューニュートリノ(ν_μ)ビームを照射し、730 km離れたイタリア国立Gran Sasso研究所の地下1400 mに設置した総質量1.25 ktonの検出器で振動後に生成するタウニュートリノ(ν_τ)の出現を観測する。標的には位置分解能約1 μm の原子核乾板と鉛板を積層したECC検出器約15万個を用いてその鉛中でニュートリノ反応を起こさせ、生成された荷電粒子の飛跡を原子核乾板で捉える。その中にタウ粒子を同定できると、その反応事象は ν_τ が起こしたことを示し、出現したニュートリノを観測することによりニュートリノ振動の直接観測となる。

タウ粒子は短寿命のため、平均数百 μm 走った後、ミュー粒子、電子或いはハドロンへ崩壊する。この崩壊前後の飛跡が幾何学的折れ曲がりを示すため、これを観測してタウ粒子を同定する。従ってタウ粒子以外の荷電粒子がこれと似た幾何学的折れ曲がりを示すと、それはタウ崩壊事象と誤認されるバックグラウンドとなる可能性がある。2012年現在、OPERA実験は2例のタウ崩壊事象候補を発表したが、これは振動により現れたニュートリノの反応の世界で初めての成果である。筆者はその主要なバックグラウンドのうちの一つ、ハドロン衝突バックグラウンドの低減によるタウ崩壊事象の有意性の向上に注目した。

ハドロン衝突バックグラウンドの期待値は既にシミュレーション(FLUKA)を用いて見積もられており、タウ崩壊事象候補のシグナル領域（崩壊2次粒子の運動量 $P > 2.0 \text{ GeV}/c$ かつ横運動量 $P_T > 0.6 \text{ GeV}/c$ ）に入る期待値は、1中性カレント反応あたり $(1.9 \pm 0.1) \times 10^{-4}$ である。しかし、この実験的裏付けが十分ではない。そこで我々はCERN PS beam lineで2, 4, 10 GeV/c の π 粒子を照射したECC(OPERA実験に用いられたBrickと同構造)を用いて、ハドロン衝突バックグラウンドの系統的な評価を行った。

まず2, 4, 10 GeV/c の π 粒子飛跡をそれぞれ584, 913, 2205本を抽出し、ハドロン衝突を起こすまでの平均自由行程をそれぞれ 110^{+14}_{-11} , 185^{+24}_{-20} , $223^{+18}_{-16} \text{ mm}$ と得た。これはシミュレーション結果 124^{+3}_{-3} , 209^{+8}_{-7} , 231^{+6}_{-5} mm と良く一致している(図1.)。次に反応点から放出される2次粒子をOPERA実験と同じ条件で探索した結果、タウ崩壊事象のバックグラウンドとなる1, 3本の2次粒子が観測される(1, 3-prong事象)比率は、1-prongがそれぞれ 43^{+5}_{-5} , 43^{+6}_{-6} , $15^{+3}_{-2} \%$ であり3-prongがそれぞれ < 3 , 3^{+4}_{-1} , $25^{+4}_{-3} \%$ であった。更に2次粒子の運動量 P と横運動量 P_T を多重電磁散乱を用いた位置変位法にて求め、タウ崩壊事象選択条件を満たす確率を求めた。その結果、10 GeV/c においては1-prong事象で $10^{+16}_{-3} \%$, 3-prong事象で $2^{+4}_{-1} \%$ が選択領域に混入することが分かった。これらはシミュレーション結果のそれぞれ 14^{+4}_{-3} , $5^{+1}_{-1} \%$ と良い一致を示し、OPERA実験シミュレーションの実験的裏付けとなった。

さらに新たな指標として核破碎粒子(図2.)の付随確率を測定した。核破碎粒子はハドロンと原子核との衝突反応により原子核を構成する陽子等が放出されるものであり、これが付随していればその反応は崩壊ではないと断定できる。しかし、その放出角分布は等方的なため、従来の自動飛跡認識装置では十分な検出効率がなかった。これを解決するために本研究室では広視野・高分解能のCMOSカメラ、広視野対物レンズ、高速演算処理のためのGPUを用いた新たな自動飛跡認識装置を開発し、乾板に垂直な方向からの角度を θ として、認識できる最大傾斜 $\tan\theta$ を従来の0.6から3.0まで拡張させた。これを用いてハドロン衝突の1, 3-prong事象に対して、衝突反応の上下流の乾板の $3.5 \times 2.5 \text{ mm}^2$, $\tan\theta < 3.0$ の領域までの核破碎粒子探索を行った。その結果、2, 4, 10 GeV/c の衝突現象においてそれぞれ 31^{+9}_{-7} , 58^{+8}_{-9} , $64^{+5}_{-6} \%$ の付

随確率を得ることができた(図 3.)。これによりバックグラウンドの期待値を大幅に低減できた。実際に OPERA 実験で発見された最初のタウ崩壊事象候補に対して同じ条件で核破碎粒子の探索を行ったところ、付随していないことが確認され、候補としての信頼性の向上に大きく貢献できた。

本研究によりハドロン衝突バックグラウンドは実験的な裏付けを得ることができ、更に核破碎粒子の探索もこのバックグラウンド低減に非常に有用であることが示された。OPERA 実験はこの結果を受けて、実際のビームエネルギースペクトル、ニュートリノ反応、2 次粒子の検出効率等を考慮し、本実験の解析サンプルにおける 2 次ハドロン衝突によるバックグラウンドの期待値を再計算している。この精密計算により、タウニュートリノ反応検出の信頼性を正しく見積もることができ、大気ニュートリノ欠損の問題に決着がつくと期待される。

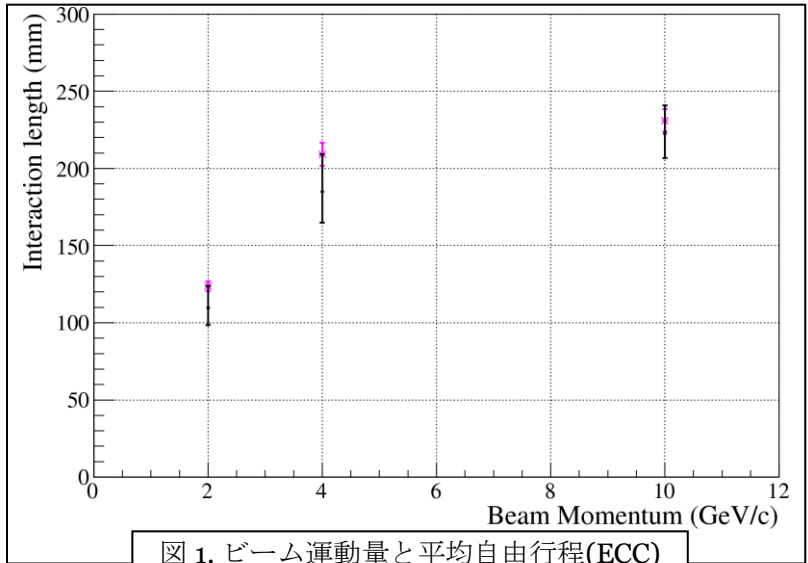


図 1. ビーム運動量と平均自由行程(ECC)

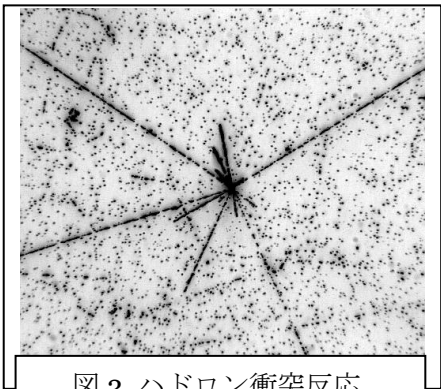


図 2. ハドロン衝突反応.

濃く見える飛跡が核破碎粒子

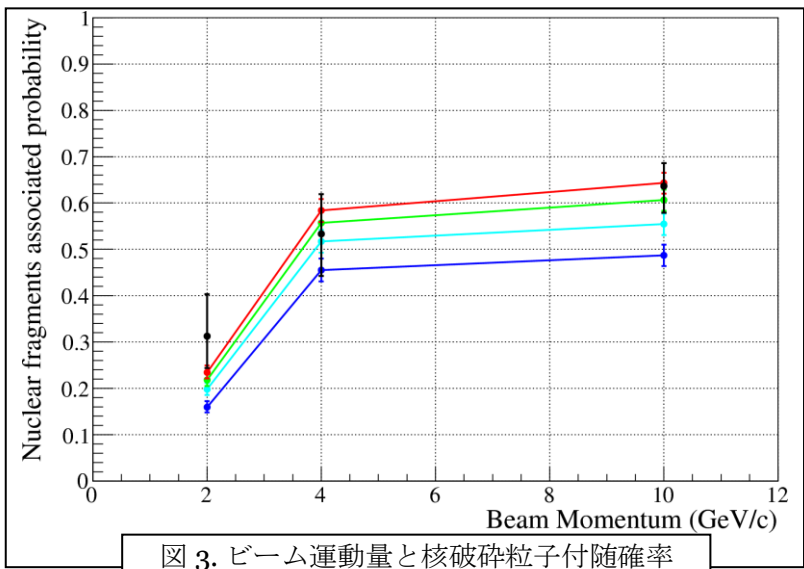


図 3. ビーム運動量と核破碎粒子付随確率

黒が実験データ, カラーが MC

修士論文予稿

1.

ニュートリノ振動実験におけるタウ粒子崩壊の探索及び候補事象の解析

梶原 崇史（基礎物理）

長基線ニュートリノ振動実験 OPERA (Oscillation Project with Emulsion tRaking Apparatus) 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世界で初めて出現型により検証することを目的としている。スイスとフランスの国境にある CERN (欧州原子核研究機構) の CNGS (CERN Neutrino to Gran Sasso) beam line から平均17GeV のミューニュートリノビームを730km離れたイタリアの Gran Sasso 地下研究所内に建設した OPERA 検出器に照射して、ニュートリノ振動の結果現れたタウニュートリノの生成粒子であるタウ粒子の直接検出を目指す。タウ粒子は短寿命 ($c\tau = 87\mu\text{m}$) で崩壊するという特徴があることから検出器には、サブミクロンという高分解能な飛跡検出器である原子核乾板が最適であり、本実験では、世界で初めてタウニュートリノ反応の直接検出に成功したという実績がある ECC (原子核乾板57枚、1mm の鉛板56枚を交互に積層したもの) を使用しており、タウ粒子が崩壊時に見せる幾何学的な形状 (折れ曲がり) を記録するのに適した構造をしている。

OPERA 実験は、2012年でビーム照射期間の最終年度を向かえており、2012年までに17427事象のニュートリノ反応が観測されており、タウ粒子の崩壊探索が行われてきた。その成果として、2010年と2012年に、いずれもハドロニックモードのタウニュートリノ反応候補が2事象検出された。本研究室においても2009年からニュートリノ反応事象の解析を行っており、私は学部4年次にあたる2010年度から携わっている。主な解析内容は、オンライン上で検出されたニュートリノ反応の生成粒子を目視にて確認することである。原子核乾板に記録された飛跡を検出する自動飛跡認識装置は、飛跡の読み取り効率が平均80%で、飛跡の読み違いや取りこぼしが起こる。また、実験に用いている原子核乾板には ECC を再構成するために照射した宇宙線に加えて、コンプトン電子やアルファ粒子のようなニュートリノ反応と無関係の飛跡が大量に含まれている。従って検出された飛跡には宇宙線や偽物の飛跡が含まれる可能性があり、目視確認によりこれらを取り除く必要がある。宇宙線は ECC を貫いて入射しているので検出された飛跡が上流に突き抜けていないか確認することで判別を行う。そして、目視確認の際には飛跡の位置情報を再測定することを行う。これは、より正確な飛跡の角度情報を得るためであり、タウ粒子の崩壊を精度よく識別するためには必要である。最終的に得られた飛跡の位置情報、角度情報からタウ粒子の崩壊の可能性の有無を判断する。翌年の2011年からは従来の解析に加えてオンライン上でのニュートリノ反応の生成粒子探索を始めている。2009年から現在までに147事象 (CC (チャージカレント) 110事象、NC (ニュートラルカレント) 37事象) のニュートリノ反応解析に着手しており、そのうち110事象の解析が終了して、チャーム粒子の崩壊5事象の観測に成功した。チャーム粒子の検出は、タウ粒子同様に短寿命である粒子を検出する能力を我々が有していることを示唆しており、それは我々がタウ粒子を識別できることを意味する。

また、2010年に観測されたタウニュートリノ反応候補事象について、バックグラウンドと成り得る短寿命チャーム粒子崩壊の可能性を排除すべく、OPERA 実験の計画時には考慮していなかった大角度 ($1.0 < |\tan \theta| < 3.0$) の最小電離粒子 (MIP) の探索を本研究室で独自に開発した大角度飛跡検出器を用いて行った。

2.

原子核乾板における大角度飛跡測定のための自動飛跡読取装置の開発

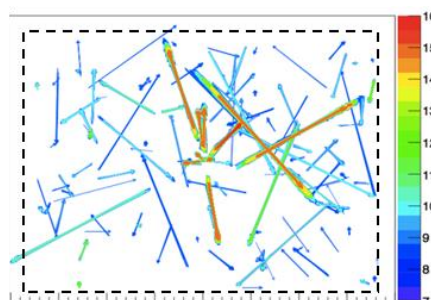
須藤 純（基礎物理）

原子核乾板は素粒子実験に用いられる、放射線検出用に特別に作られた写真乾板である。高速で走る粒子ほど単位長さあたりに失うエネルギーは小さく、飛跡を構成する銀粒子も少なく濃さも薄い飛跡(最小電離粒子)となる。近年の素粒子物理学の実験において、莫大な量の原子核乾板を解析する必要があるため、すべての原子核乾板を通常の顕微鏡を用いて人が全て解析することはほぼ不可能である。そのため解析速度を向上させるために、通常の顕微鏡を改良した装置(手動飛跡読取装置)の開発が行われてきた。更に飛跡読取装置の開発が進んでいくと、原子核乾板より自動的に銀粒子の飛跡を読取ることの出来る装置(自動飛跡読取装置)の開発が行われるようになった。原子核乾板を用いる実験であるOPERA実験の解析が、基礎物理学教室において行われている。

OPERA実験はタウ粒子の生成を直接検出することでニュートリノ振動を確認する。タウニュートリノ反応に似た反応としてハドロン衝突反応やチャーム粒子崩壊事象があり、これらがバックグラウンドとなりうる。モンテカルロシミュレーションによると運動量が4GeV/cのハドロン衝突反応において、二次粒子が $|\tan \theta| > 1.0$ の角度を持つことが1割ほどあり、チャーム粒子崩壊事象に至っては3割以上が大角度の飛跡を放出することが予想されている。また核破砕粒子はほぼ等方的な角度分布をすると考えられているので、解析するには大角度に対応する飛跡読取装置が必要となる。ハドロン衝突反応は核破砕粒子を伴うが、タウニュートリノの崩壊においては核破砕粒子が伴わない。ゆえに核破砕粒子の有無によってもこのバックグラウンドとの識別が可能になる。

現在稼働している自動飛跡読取装置の解析可能な角度範囲は最小電離粒子についてはもちろん、核破砕粒子のような濃く映る飛跡に対しても解析可能な範囲は $|\tan \theta| < 1.0$ までであり、それ以上の角度をもつハドロン衝突反応や、核破砕粒子については十分な研究がなされていなかった。本研究では核破砕粒子のような濃い飛跡はもちろん、最小電離粒子のような薄い飛跡においても解析できるような自動飛跡読取装置の開発を行った。自動飛跡読取装置では、解析可能な角度範囲は顕微鏡で得られる取得画像の視野の大きさに依存する。そのため本研究では解像度が落ちずかつ従来の約6倍ほどの大視野の画像が取得できるカメラ等最新鋭のハードウェアを用いて、新たな自動飛跡読取装置の開発を行った。

今回開発した自動飛跡読取装置では、解析可能な角度範囲を従来の $|\tan \theta| < 1.0$ から $|\tan \theta| < 4.0$ まで拡張した。評価に用いた乾板は2012年8月に大角度のビームをOPERA実験用の原子核乾板に6GeV/cの π^- ビームを照射を照射したものを用いた。その結果、 $|\tan \theta| < 4.0$ までの最小電離粒子の飛跡についても、高い検出率を得ることができた。大角度に対しても高い検出効率を得ることができたのは、乳剤層の中を通ってくる距離が長いため、原子核乾板に写る銀粒子の数が多くなり、波高が高くなったと考えられる。よって今回開発した自動飛跡読取装置によって原子核乾板における新たな領域($|\tan \theta| < 4.0$ の飛跡)の物理解析が十分に可能だと言えるが、 $\tan \theta = 0.4$ 等一部の角度において検出効率が大きく下がっているのも、これに対する原因の追求が必要である。また現状では自動飛跡読取装置として、解析速度が十分ではないので、より高い検出効率を目指し、かつスキニング速度向上についても調整を行っていく事が今後の課題である。



3.

原子核乾板における高精度飛跡選別装置の開発

土田 勇介（基礎物理）

原子核乾板はシグナルとなる飛跡よりも遥かに多くの環境放射線からの低エネルギー電子や飛跡とは無関係にランダムに存在する銀粒子の集団である fog と呼ばれるノイズが写っている。自動飛跡読取装置はそのノイズも同時に読み取ってしまい、シグナルとノイズの最終判定には人間による目視確認が必要となる。近く OPERA 実験で稼働中の超高速自動飛跡読取装置よりも 100 倍高速な自動飛跡読取装置が開発される予定で、目視確認が 100 倍発生するため、解析のボトルネックとなることが予想されている。

それを解消するために、本研究室で昨年より稼働している自動飛跡読取装置の自動飛跡認識部に新たなアルゴリズムを投入し、高精度飛跡選別装置 Fine Track Selector (FTS) としてニュートリノ反応事象の解析に用いることを目指している。FTS の特徴として、原子核乾板の乳剤層の断層映像を従来の 16 層から 32 層へ倍増させてシグナルとノイズの分離を良くしたことで GPU による演算速度の向上である。

FTS の性能評価のため、CERN PS T7 beam line で 2, 4, 10GeV/c の π 中間子を照射した原子核乾板内のある 1 枚に写っている 296 本のシグナルの飛跡と 524 本のノイズの飛跡を対象として用いた。これらの飛跡を FTS によって再構成するまでに原子核乾板の乳剤層の断層映像取得、取得画像の輝度の平滑化、2 値化、ヒットピクセルの拡張処理、画像の重ね合わせの処理が行われる。これらの処理のうち、2 値化の閾値と拡張処理の倍率を変化させることを行った。閾値の 2 種類と倍率の 2 種類を組み合わせた、4 種類の条件を試行して、シグナルでは 99% 程度の検出効率を保ち、ノイズを低減することのできる条件を探し出した。

方法として、各条件により対象としていた飛跡がどのように再構成されているかを確認した。対象飛跡と再構成飛跡の位置差、角度差が $\pm 0.06\text{mrad}$, $\pm 10\mu\text{m}$ 以内であるならば対象飛跡を再構成することができた飛跡とした。シグナルの飛跡が探索範囲内に存在しない場合は、その理由を探し出した。多くは飛跡が再構成されておらず、探索範囲に入ってこなかったということが分かった。また、シグナルの対象飛跡と再構成飛跡の濃さは同じようになるはずであり、明らかな違いがある場合はその理由を探し出した。飛跡が目視確認でも薄いと思われるような見づらい飛跡であることが分かった。

結果として、4 種類のうち 1 種類がシグナルは 98% の検出効率を維持し、ノイズが 8% と、2 枚組インターフェイスフィルムに適用したとき、ノイズによる偽飛跡が 1/100 程度に減り、目視確認を低減できることが分かった。

4.

OPERA 実験におけるタウ・ハドロン崩壊バックグラウンドの解析

鈴木 平 (基礎物理)

OPERA 実験は牧・中川・坂田によって理論的に提唱されたニュートリノ振動を検証する国際共同実験である。CERN から 730km 離れたグランサッソ地下研究所に向けて高純度のミューニュートリノを飛行させタウニュートリノに変化するかを調べている。ニュートリノ振動の検証はこれまでも多くの実験が行われてきているが、その中でも OPERA 実験は、振動先であるタウニュートリノの出現をもって観測する appearance 法を採用している。OPERA 実験ではこの振動先のタウニュートリノを捉えるために検出器である原子核乾板と呼ばれる葉書大の特殊な写真フィルムと、標的である鉛を交互にサンドイッチした構造である ECC を 15 万個、総計 1250 トンの標的を用いている。タウ粒子を検出するうえでバックグラウンドとなる現象が主要なものとして二つある。一つはタウ粒子と似た寿命を持つチャーム粒子の崩壊、もう一つはハドロンの二次反応である。この二つはタウ粒子の崩壊と幾何学的形状が似ているためにバックグラウンドとなる。本研究ではこのバックグラウンドとなりうるハドロンについての研究を行った。

タウ粒子であると判断するには条件がいくつもあり横運動量、崩壊までに進む距離、崩壊後の粒子生成数、崩壊後の角度差などがある。これらの条件はシミュレーションと実験データから得られたものだが実験データはまだ少なかった。もしバックグラウンドの実験データを増やすことが出来ればバックグラウンドと分離したタウ粒子の信頼度は増すことになる。そこで本研究室では運動量領域 2, 3, 4, 5, 6 GeV/c のバックグラウンドであるハドロンの二次反応の横運動量、生成粒子数、平均自由行程、折れ曲がり角度などを測定するために、2012 年 CERN にて新たにビーム照射実験を行い、統計量を増やすべく解析を行った。本照射実験の特徴はビーム上流側に運動量毎に CS (Changeable Sheet) 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そ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。しかし今回は CS のビーム飛跡と繋ぐことでビームの運動量を特定することが出来る。また efficiency を確保するためビームをピックアップするのに 4 枚、ビーム運動量を決定するのに 4 枚の原子核乾板を使う。こうすることで照射ビームの efficiency を落とすことなく解析が行える。

本研究では基礎データである原子核乾板の歪み(distortion)や伸縮(shrink)を調べ、解析の準備を整えた。また、ビームピックアップの efficiency を見積もり、実際にビームの運動量が特定出来ることを確かめた。

5.

光半導体検出器 MPPC の基礎特性についての研究

小関 真悟（基礎物理）

素粒子実験に用いられる、光検出器で最も代表的で主流な物は光電子増倍管であろう。単一光子レベルまで検出可能な超高感度、高速動作、低ノイズ、広い受光面積などを特長としているため、幅広い分野で使用されているためだ。しかし時代が進むにつれ、使用環境も多岐にわたり、より過酷な環境下での動作を求められてきた。一般的な光電子増倍管は大型であり、高電圧（1000V）での動作、磁場中では性能が著しく低下するなどの欠点が存在している。

MPPC (Multi Pixel Photon Counter) は浜松ホトニクス社により製造された光半導体、フォトダイオードの一種である。本研究で使用した MPPC は型番 S10362-11-025C の有効受光面 1 mm×1 mm 内に計 1600 ピクセルの APD (アバランシェ・フォトダイオード) が敷き詰められているものだ。APD とは逆電圧をブレイクダウン電圧以上印加することにより生じる、アバランシェ増倍と呼ばれる現象を利用したフォトダイオードである。MPPC はその APD を二次元に並列接続した構造になっている。ブレイクダウン電圧以上を印加すると、各 APD はガイガーモードで動作し、MPPC 全体の出力は反応した APD のパルスの総和となるため、入射した光子数を見積もることが出来る。

本研究室で参加している実験の一つに Ashra 実験 (All-sky Survey High Resolution Air-shower detector) というものがある。広視野、高分解能の望遠鏡を用いて、集光器からの連続イメージ撮像と高エネルギー宇宙線シャワーのトリガー撮像を常時全天同時観測するものだ。集光器 1 台につき 64 ピクセル×64 ピクセル、計 4096 ピクセル存在し、2×2 ピクセルを 1 チャンネルとしているため 1024 本の光電子増倍管を使用することになる。現在はステーションにある 62 台の光電子増倍管で、特定のチャンネルを測定している。仮にこの方式で運用すると、全天監視のため、計 40 台もの集光器が必要となっているため総数 40960 チャンネル、それと同数の光電子増倍管を必要とする。

今回研究対象とした MPPC は、光電子増倍管のデメリットを克服しており、100V 以下（実験においては 70V 程度）での電圧で動作し、磁場の影響を受けないものとなっている。しかしながら、増倍率は $10^5 \sim 10^6$ と光電子増倍管に匹敵する大きさを持っているとされている。

本研究では、MPPC の生信号をデジタル・フォスファ・オシロスコープで観測する事により、熱励起によるノイズが光電子相当数ごとの等間隔なピークを示していることを確認した。よって、MPPC は光子 1 つからの検出が可能という、非常に優れた検出能力を持っていることが示された。また、使用した MPPC の増倍率は 10^6 あり、光電子増倍管と何ら遜色ない性能であることが確認された。よって、低電圧で動作しながらも、小型で光電子増倍管と同等の増倍率を持つことが確認できた。

6.

ゼロギャップ伝導体 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ における Dirac point 近傍の電子状態

北村 竜一 (物性物理)

α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ は静水圧 1.5GPa 以上の高圧下で絶縁体とも、通常の金属とも異なるゼロギャップ状態を 3 次元物質(2 次元多層状物質)で実現する唯一の物質である。ゼロギャップ状態では、伝導帯と価電子帯が波数空間の一点 (Dirac point) で接する線形分散型($E = \hbar v_F k$)のエネルギー構造を有しており、通常の金属や半導体では見られない電氣的性質を示す。この物質の伝導面に垂直に磁場をかけると、 $N=0$ の特別な Landau 準位が形成され、伝導を担うキャリアがゼロの準位中に限定される量子極限状態が実現することが指摘されている。しかしゼロギャップ伝導体にもっとも特徴的な線形分散などの特異な電子状態の定量的な実験的評価はいまだに行われていない。

近年、伝導帯と価電子帯の対称性の違いから、化学ポテンシャルの温度変化が物性に重要な役割を担っている。本研究では、Dirac point の上下をこの温度変化により掃引できることに着目し、ゼロギャップ伝導体の Dirac point 近傍の状態密度をゼロ磁場および磁場中で定量的に評価することを目的とした。そのためにゼロ磁場や強磁場下、および圧力下で稼働する熱起電力システムの開発を行い、これを用いて圧力を系統的にかえて熱起電力を測定した。測定結果よりゼロ磁場及び強磁場量子極限で、ゼロギャップ状態における Dirac point 近傍の状態密度を定量的に評価した ($S \propto D(\epsilon)T$)。

圧力媒体中におかれた試料の常圧下熱起電力結果を図 1 の挿入図に示す。約 135K で電荷秩序に伴う急激な起電力の低下が観測された。これは先に測定された熱起電力の結果^[1]と定量的に一致するため、圧力中の熱起電力評価が可能であると考えた。次にこのシステムを用いて圧力を印加させると、以前電気抵抗から報告されていた電荷秩序形成温度の低下^[2]と同様の転移温度の低下がみられた。1.0 < P < 1.3GPa では電荷秩序形成に伴う起電力の低下が減少し、1.3~1.6GPa のゼロギャップ状態が実現していると考えられる圧力領域では 50K 付近に山を持ち、滑らかな熱起電力の減少が観測され、約 10K 付近で符号反転が見られた(図 1 参照)。ここでは全温度領域で緩やかな熱起電力変化しか観測されず、高温部からゼロギャップ状態が実現していることを示唆している。

次にゼロギャップ状態が実現している 1.6GPa の熱起電力測定結果は、強束縛近似の状態密度^[3]を用いてほぼ再現できるが、Dirac point 近傍では状態密度を大きく補正すると実験結果をよりよく再現する(図 2 参照)。再現に用いた状態密度は Dirac point 中心としたエネルギーに対し非対称であり、化学ポテンシャルの温度依存性を決めていることがわかる。また状態密度のエネルギー依存性から評価した電子とホールフェルミ速度 $v_{\text{Fh}}=2.8 \times 10^4$ m/s、 $v_{\text{Fe}}=2.4 \times 10^4$ m/s は、電気抵抗から得られたものとよく一致した。

図 3 に磁場中の熱起電力測定の結果を示す。面に垂直に弱磁場から強磁場をかけると熱起電力の最小値(谷)が見られた。この谷を示す温度 T_{min} は、 $N=0$ と ± 1 の Landau 準位がゼーマン分裂効果により分裂した分裂幅状態間のエネルギー幅 $\Delta E/k_B$ とよい一致を示し、強磁場かつ低温は $N=0$ Landau 準位のスピン分裂した状態として理解できた。このように磁場中の熱起電力測定により $N=0, \pm 1$ Landau 準位及びスピン分裂に関する情報を得られた。

以上本研究では、圧力中の熱起電力測定を行い、初めてゼロ磁場および磁場中での状態密度を定量的に評価することが出来た。ゼロ磁場中では、Dirac point 近傍の状態密度は線形分散型からわずかにずれており、しかも状態密度は上下非対称である。Landau 準位の形成がゼーマン分裂を起こし量子極限状態を作っていることが明らかになった。

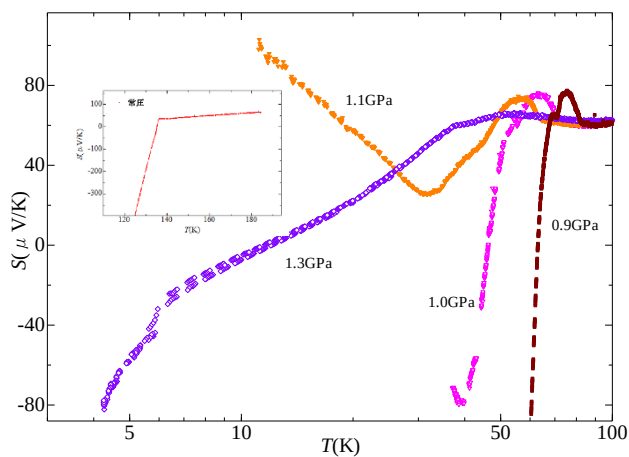


図1 熱起電力の温度依存性

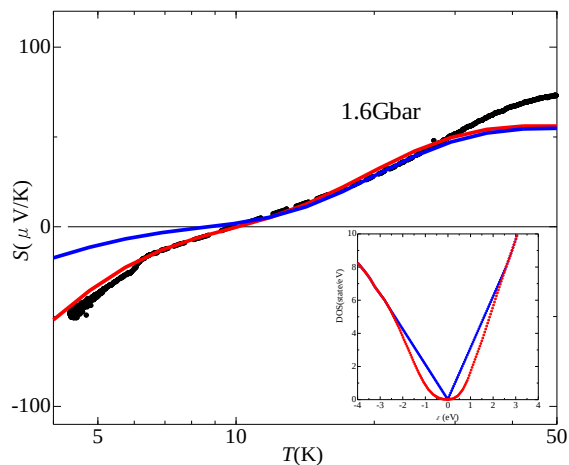


図2 熱起電力の温度依存性
(ゼロギャップ状態)

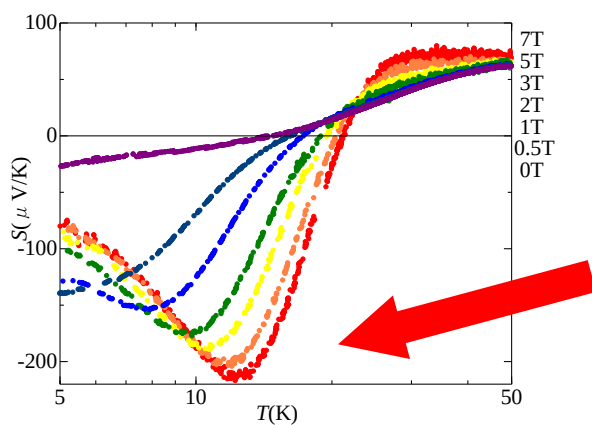
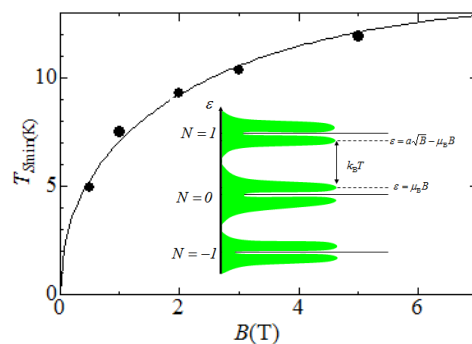


図3 1.5GPaにおける磁場中の熱起電力の温度依存性



- [1] K. Bender *et al.*: Mol.Cryst.Liq.Cryst.**108** (1984) 359.
 [2] N.Tajima, S.Sugawara, M.Tamura, Y.Nishio and K.Kajita: J.Phys.Soc.Jpn.**75** (2006) 051010.

7.

 λ -BETS₂FeCl₄における常磁性金属-反強磁性絶縁体転移と強磁場下における新奇物性の探索

嶋田 一雄（物性物理）

有機導体は幾つかの相互作用の共存・競合及び低次元性によって多彩な物性を示すことが知られている。表題物質である擬2次元有機導体 λ -BETS₂FeCl₄ (BETS =

Bis(ethylenedithio)tetraselenafulvalene)は伝導 π 電子間の電子相関と伝導 π 電子と局在3dスピンの間に働く反強磁性的な相互作用(π -d相互作用)のために磁性と伝導が共存・競合するユニークな電気・磁気的な性質を示す[1]。その中でも非常に顕著な現象として低温約8 Kの常磁性金属-反強磁性絶縁体転移及び、30 Tという超強磁場下で見られる磁場誘起超伝導転移がある[2, 3]。また、FeCl₄分子のFeからGaへの置換や圧力印加によっても相転移や基底状態の様子が大きく変わる[4, 5]。Ga置換では常磁性金属-反強磁性絶縁体転移から常磁性金属-超伝導(3d:常磁性)-反強磁性絶縁体転移を、圧力印加では常磁性金属-(3d)反強磁性金属-(3d)反強磁性超伝導転移を示す。

このように λ -BETS₂FeCl₄では磁場、化学置換、圧力印加によって多様で興味深い物性を示すが、その中心である常磁性金属-反強磁性絶縁体転移の機構やその基底状態については完全に理解されてはいない。

本研究では常磁性金属-反強磁性絶縁体転移の相転移と基底状態の性質を明らかにすること、 π -d相互作用や磁場といったパラメータを制御することによる新奇物性の探索を目標とした。

最初の成果は、 λ -BETS₂FeCl₄の比熱測定の詳細な解析から金属相と絶縁相の電子系・スピン系の自由度について議論し、相転移における3dスピンと π スピンの役割及び π -d相互作用の重要性を明らかにしたことがある。

次に π -d相互作用と相転移の関係を調べるために、相互作用の大きさをBr置換によって制御することができる、Br混晶系 λ -BETS₂FeBr_xCl_{4-x}の電気抵抗測定と比熱測定を行った。Br混晶系では金属-絶縁体転移と反強磁性秩序化が同じ温度で起こるかどうかは明らかではなかったが、これらが同時に起こることが判明した。更に、比熱測定の結果から π -d相互作用と3dスピンの感じる内部磁場の関係をより明瞭にすることができた。

最後の結果は、強磁場下で新奇な電子状態を発見したことである。スピン系の構造を調べるために、 λ -BETS₂FeCl₄の磁場下における比熱測定を行い、金属-絶縁体転移が見られるような弱磁場領域では零磁場で見られていたものと本質的には同様な結果(転移に伴うピークとそれよりも低温側のSchottky型の比熱異常)が得られた。一方、この物質は10.5 T以上の磁場下では金属状態となることが知られているが(磁場誘起超伝導は更に強い磁場領域で観測される)、この強磁場領域で非常に大きな比熱の異常を観測した。温度依存性としては、4 K以下では指数関数的であるが、4 K以上では温度に比例したような振る舞いが見られた。このような振る舞いは反強磁性秩序相の高温側の金属相で見られる比熱の振る舞いとは全く異なるものである。これは、伝導電子系の電子相関、 π -d相互作用及び磁場の作用によって形成された新奇な電子状態の存在を示唆する結果であると考えられる。

以上のように、本研究では λ -BETS₂FeCl₄の常磁性金属-反強磁性絶縁体転移の機構と基底状態を明らかにし、更に強磁場金属相で新奇な電子状態を予期させるような結果を得ることができた。

- [1] H. Kobayashi, *et. al.*: Chem. Rev. **104** (2004) 5265.
- [2] M. Tokumoto, *et. al.*: Synth. Met. **86** (1997) 2161.
- [3] S. Uji, *et. al.*: Nature. **410** (2001) 909.
- [4] H. Kobayashi, *et. al.*: Synth. Met. **70** (1995) 867.
- [5] H. Tanaka, *et. al.*: J. Am. Chem. Soc. **121** (1999) 11243.

8.

二次元電子格子系のマルチモード・パイエルス転移に伴う比熱の温度変化

広瀬 大記（物性理論）

半充填二次元正方格子において、電子-格子相互作用が強い系ではマルチモード・パイエルス状態が基底状態として存在することが Ono、Hamano[1]らの数値解析により明らかにされた。このマルチモード・パイエルス状態は従来考えられていたパイエルス状態とは異なり、格子歪の波数成分にネスティングベクトル $\mathbf{Q}=(\pi/a, \pi/a)$ とその $\mathbf{Q}$ に平行な複数の波数成分を取り得ることが分かっている。このマルチモード・パイエルス状態は実験的にまだその存在を確認されていない。そのため、何がマルチモード・パイエルス状態を阻害しているのかを明らかにするため、電子の遷移積分に異方性を入れた系、電子間相互作用のある系、局所膨張させた系などで安定性について議論されてきた。

本研究では、これまでマルチモード・パイエルス状態の安定性について議論されてきたが、物理的な性質については研究されていないことから、実験などでマルチモード・パイエルス状態を判別する際、一つの指標することを目的に等方的な場合と電子の遷移積分に異方性を入れた系、電子間相互作用のある系についての比熱の温度変化について調べた。

等方的な系の場合、転移温度付近で比熱に大きな異常性が現れることが分かった。また従来基底状態として考えられていたネスティングベクトル $\mathbf{Q}$ のみを格子の波数成分にもつシングルモードパイエルス状態を伴う比熱よりもマルチモード・パイエルス状態を伴う比熱の方が非常に大きい事が確認できた。このような性質は無次元電子格子結合定数に関わらず得られる事も確認できた。

異方性を入れた系ではマルチモード・パイエルス状態の縮退がとける。ここで出た複数の異なるマルチモード・パイエルス状態間の転移を繰り返している。異方性を加えると連続的に基底状態がマルチモード・パイエルス状態からシングルモードパイエルス状態へ変化すると考えられている[2]。有限系の計算ではモードの離散的な変化に伴いデルタ関数型の異常性が現れたがこれは熱力学的極限では消失すると考えられる。そのため、複数のサイズで行った結果のデルタ関数型の異常性を取り除いて外装を試みた結果、異方性を入れた系での大まかな比熱の振る舞いが示せた。

次にオンサイトクーロン相互作用を Hartree-Fock 近似でハミルトニアンに取り入れた。電子相関のない等方的な系同様マルチモード・パイエルス状態から金属状態へ転移する領域が存在し、そこでの比熱の振る舞いを調べた。結果として、等方的な場合と比熱の振る舞いは変わらず、Hartree-Fock 近似の範囲内ではオンサイトクーロン相互作用は比熱には影響を与えなかった。

[1] Y.Ono and T.Hamano: J. Phys. Soc. Jpn. 69 (2000) 1769.

[2] 渡邊千鶴：東邦大学大学院 博士論文(平成 20 年).

9.

フェルミオン・ダブリングを伴わないディラック電子のゼロモードのランダムネスに対する安定性

本田 貴大 (物性理論)

グラフェンなどのディラック電子系において、線形分散に起因する特異な振る舞いはよく知られており、その中でも磁場中のディラック電子系においては、 $n=0$ ランダウ準位(ゼロモード)は、他のランダウ準位に比べて幅がつきにくくシャープな振る舞いを示すということが、実験的に示されている[1]。この特徴的なゼロモードの安定性に関しては Atiyah-Singer の指数定理において、トポロジカルに保護されたゼロモードの安定性が、グラフェンで現われたためと考えられている。

しかし、近年、ゼロモードの安定性に対して、カイラル対称性の役割の重要性を示唆する数値計算結果が示されている[2]。これは、フェルミオン・ダブリングを伴う六角格子模型で行われ、カイラル対称性を壊さないランダムネスに対しては、ランダムネスの空間的な相関が大きくなると、ゼロモードの幅はシャープなデルタ関数的な振る舞いを示すことが知られている。この事は、ランダムネスに空間的な相関を入れることで、バレー間(K, K' 間)の散乱が抑制されたために、ゼロモードのシャープな特性が見られたと解釈されている。

そこで、今回は、ランダムネスに空間的な相関を入れずに、フェルミオン・ダブリングを解くことで、コーン間の散乱を抑制することを考えた。具体的には、二次元正方格子の模型(パイフラックスモデル[3])を考え、そこに複素数の遷移積分を加えることで、フェルミオン・ダブリングを解き、空間的な相関が無いランダムネスに対して、ダブリングを解いていくことでゼロモードの振る舞いを調べた。その結果、ゼロモードは、フェルミオン・ダブリングをしているときは、幅を持ち広がっているが、カイラル対称性を壊さないランダムネスにたいしては、フェルミオンダブリングを解いていくと、他のランダウ準位に比べて、シャープな振る舞いが見られることが分かった。また、カイラル対称性を壊してしまうランダムネスに対しては、同様にダブリングを解いていったとしても、特徴的なゼロモードのシャープな振る舞いは見られないことも確認した。

この様な複素数の遷移積分を実現する方法としては、光学格子における冷却原子系で実現することが可能であることが示唆されている[4]。

[1] A.Gisbers et al, P.R.L 99, 206803 (2007).

[2] T.Kawarabayashi, Y.Hatsugai, and H.Aoki, Phys.Rev.Lett.103,156804 (2009).

[3] Y.Hatsugai, T.Fukui, and H.Aoki, Phys.Rev.B74, 205414 (2006).

[4] N. Goldman et al, Phys. Rev. Lett. 103, 035301 (2009).

10.

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および後方散乱された励起原子の発光分光

野上 慶祐（原子過程）

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表面内部でカスケード衝突を繰り返す。カスケード衝突が表面に到達したとき変位原子の運動速度が表面に対して真空の方向成分をもち、その運動エネルギーが原子の結合エネルギーを超えていれば、固体表面を構成する原子が真空中に放出される。この現象はスパッタリングと呼ばれている。スパッタリングは薄膜の製造から表面処理など半導体製造の広い分野で用いられ、核融合炉内では炉壁から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事が問題になっている。

実験は、核融合科学研究所のイオン衝突実験用ビームラインで行った。固体表面近傍には入射イオンの後方散乱されたイオンと電荷交換した原子、スパッタリングされた固体を形成する原子とそのイオン、これらの励起状態の粒子が存在する。スパッタリング粒子や後方散乱した粒子のイオン化や励起は、固体表面とのトンネル効果による相互作用が深く関わっていると考えられている。そのため固体表面との相互作用とそのダイナミクスの解明する事を目的とした。

本研究では、イオンビームをタングステン表面に垂直に照射し、スパッタリングおよび後方散乱された励起原子の発光をイオンビーム軸に対して垂直方向に設置された分光器で観察した。タングステンの取り付けられているステージはイオンビーム軸に対して平行方向に動かすことが出来る。入射イオンとして一価のクリプトンイオンを入射エネルギーを 35, 45, 55, 60 keV と変えて、一価のアルゴンイオンと水素イオンを入射エネルギー35 keV と変えてタングステン表面に照射した。クリプトンイオンをタングステン表面に照射したときの発光スペクトルにはスパッタリングされたタングステンの発光が多く観測されたが後方散乱されたクリプトンの発光はあまり観測されなかった。アルゴン入射時の発光スペクトルからは、タングステンの発光と後方散乱されたアルゴンイオンの発光を観察することが出来た。水素イオン入射時の発光スペクトルからは電荷交換して中性の励起状態の水素原子の発光を観察したが、スパッタリングされたタングステン原子の発光は観察出来なかった。これは水素イオンをタングステン表面に照射したときのスパッタリングイールドが小さいためである。

観察されたスペクトルの発光強度と表面から垂直方向の距離の関係から、表面に垂直方向の速度を求めた。その結果以下の事がわかった。

クリプトンイオンビームをタングステン表面に入射エネルギーを変えて測定した結果から、今回観察した入射エネルギー領域ではスパッタリングされた励起原子の表面に垂直方向の速度に入射エネルギー依存性は確認されなかった。アルゴンイオンビーム照射時の発光スペクトルと比較した結果、入射イオンの質量に対する依存性は見られなかった。クリプトンイオン照射時とアルゴンイオン照射時の解析結果から、表面に垂直方向の平均速度にはエネルギー準位の違いによって異なる結果が得られた。これはスパッタリングされた遅い励起原子は固体表面との相互作用によってイオン化し発光を観察できないため、観測される励起原子の発光から求められた速度が速く見積もられたからである。

後方散乱されたアルゴンイオンと電荷交換した水素の発光から同様の方法で表面に垂直方向の速度を求めた。その結果、後方散乱された水素の速度は後方散乱されたアルゴンの速度より遅いことがわかった。水素からの発光は入射イオンが固体表面近傍で電荷交換した励起原子が発光するもので、後方散乱された水素の中でも表面に垂直方向の速度が遅い物が多く含まれるためと考えられる。そのため、後方散乱された水素原子の速度は、後方散乱されたアルゴンイオンの発光から求めた平均速度より遅く見積もられた。

11.

散乱電子 - イオン同時計測装置による窒素分子の解離性イオン化過程の研究

日野 雄太 (原子過程)

原子・分子に光や電子を入射しエネルギーを与えると、標的粒子である原子・分子は励起やイオン化といったさまざまな状態へ遷移することがある。特に、標的粒子が分子の場合には解離を伴う場合もある。分子の場合、イオン化エネルギー以上の内部エネルギーをもつ超励起状態は不安定で、分子は短い時間で解離性自動イオン化や中性解離をおこして崩壊してしまう。超励起状態には、内殻の電子が励起する内殻励起状態と、複数の電子が同時に励起する多電子励起状態、Rydberg状態における振動励起状態の3つがあるが、前者の2つは、複数の電子の運動を平均場中の一電子問題として取り扱う平均場近似や独立粒子モデルが破綻する代表例として知られており、これまでに光衝撃や電子衝撃を用いたさまざまな実験的研究あるいは理論的研究が行われてきた。特に、電子衝撃では光学的禁制遷移が起こりうることから、超励起状態の系統的な理解のためには興味深いが、その研究例は少なく、現段階ではその励起エネルギーや崩壊過程に関して未解明な部分が多く残されている。そこで本研究では、このような分子の超励起状態の探索を行い、その存在と崩壊過程の新たな知見を得ることを目指し、窒素分子に着目した研究を行った。

本研究の特徴は、超励起状態の探索とその崩壊過程を探るために分子の解離性イオン化過程に着目し、散乱電子のエネルギー分析を行う電子エネルギー分析器と、生成イオンの質量分析を行う飛行時間型質量分析計を組み合わせた、散乱電子-イオン同時計測法を用いたことである。標的粒子には簡単な分子である窒素分子を選び、入射電子エネルギーを200 eV、電子の幾何学的な散乱角を6 degとして実験を行った。このエネルギーと散乱角では、着目する励起エネルギー領域での運動量移行の大きさは、0.2から0.3程度となり許容、禁制の両方の遷移が起きるので、まだ知られていない禁制遷移による2電子励起状態を探るのに適している。しかし、散乱電子のエネルギー分析で得られる、エネルギー損失スペクトル（横軸にエネルギー損失値、縦軸に散乱電子の強度をとったスペクトル）では、超励起状態はイオン化エネルギー以上の領域に存在し、連続状態に埋もれて直接観測は難しい。生成イオンを同時に観測すると、この埋もれた超励起状態の探索が可能となる。

窒素分子の光学的禁制超励起状態に関する先駆的な実験は、Odagiriら(T. Odagiri *et al.*, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **34**, 4889–4900 (2001).)による散乱電子-蛍光同時計測実験である。彼らの実験は、蛍光を伴う中性解離を引き起こす超励起状態の崩壊過程に注目した実験となっており、本研究とは、相補的な関係にある。それは、特に禁制遷移による分子の超励起状態は解離性イオン化過程か中性解離過程のどちらかで崩壊するからである。さらに、本研究では、同時計測の実験結果から得られる一般化振動子強度分布を絶対値で求めることができ、理論的研究と直接比較することもできる。Odagiriらの先行研究では、25～35 eVの励起エネルギーの領域に光学的禁制超励起状態が提案されているので、本研究ではこのエネルギー領域を含めた、励起エネルギー～41 eVの範囲で窒素分子の電子衝撃実験を行い、得られた二重微分断面積から超励起状態についての議論を行った。窒素分子イオン N_2^+ の二重微分断面積はイオン化エネルギーである16 eV付近で立ち上がり、その後は N_2 の二重微分断面積に沿う様にして、なだらかに変化をしていく傾向にあることが確認できた。

12.

混合ガスを用いた一般化振動子強度の絶対値化

宮脇 宙希（原子過程）

電子と分子の衝突を考える上で重要な概念に衝突の起こりやすさを表す衝突断面積(又は散乱断面積)と言われるものがある。この断面積を立体角 Ω で微分したものが微分断面積(DCS)で、物質の誘電率、分極率、光の屈折率などさまざまな物理量と関係している振動子強度に対応する。電子衝突の実験で得られるものは、一般化振動子強度(GOS)と呼ばれるもので、電子エネルギー損失分光法を用いることで実験的に DCS から得られる。しかし、実験から得られる DCS は、一般的に絶対値を表しておらず、したがって GOS も相対値である。そこで本研究では GOS を絶対値化する方法の一つとして本研究室で開発された混合ガス法についての研究を行った。その目的は、新たな絶対値化の方法としての混合ガス法の確立を目指すことである。

GOS は、Born 近似が成立する範囲においては衝突エネルギーに依存せず、入射電子の運動量と散乱電子の運動量、そしてその間の角度によって表わされる運動量移行の大きさ K にのみ依存するということが知られている。従って、運動量移行の関数としての GOS が求まれば、測定を行えない高エネルギー領域の断面積も見積もる事が可能となる。また、GOS には、 $K \rightarrow 0$ の極限で、振動子強度（光学的振動子強度(OOS)）と一致するという重要な性質があり、このことから光実験でのデータと比較することが可能となる。 $K \rightarrow 0$ の極限は、高エネルギー入射電子を用い、微小散乱角の実験で実現できるが、ボルン近似が成立する場合入射エネルギーには依存せず運動量移行にのみ依存するので、Bethe の総和則あるいは OOS を用いた絶対値化が可能となる。Bethe の総和則とは、GOS(あるいは一般化振動子強度分布(GOSD))の総和が標的の持つ電子の総数 N になるというものであり、その性質を使い GOS の総和を標的原子の総数に合わせることで絶対値化を行う。また後者では、さまざまな散乱角で得られたエネルギー損失スペクトルから得られたある励起状態の相対的な DCS を相対的な GOS に変換し、 $K \rightarrow 0$ の極限値を外挿法で求め、それが OOS に一致することを用いてはこの励起状態の GOS を絶対値化する。したがって、どこか一つでも絶対値を決めることが出来れば全ての励起状態の GOS を絶対値化することが出来る。

ここまで述べた絶対値化の方法は GOS の物理的な性質を用いたものだがこれらのほかに、Relative Flow 法という絶対値化法がよく用いられる。この方法は GOS の値がよく知られている試料ガス(He 等)と GOS が未知の試料についての実験を同一条件下のもとで行い、散乱強度比から DCS を絶対値化する方法である。我々が開発した方法は、標的ガスと基準ガスを混ぜたガスを用いてエネルギー損失スペクトルを得て、1 つ 1 つのスペクトル中で直接 DCS の絶対値化を行うもので、混合ガス法と呼ばれる。本研究では、ヘリウム(He)の $1s \rightarrow 2p$ 遷移(2^1P)の励起エネルギーが他の原子・分子ではイオン化連続領域にあり、そのピークを取り出すことが容易なことから、基準ガスとして He を採用した。

実験は、 N_2/He 、 H_2/He 、 Ar/He を用いて行われ、それらの知見をもとに NO/He の実験結果の再解析を行った。これらの研究の結果、混合ガス法の有用性を示すことができ、 NO の励起状態の一種である γ, δ, ϵ 系列の GOS を決定することができた。

13.

デジタルカメラを用いたライダーリモートセンシング

岩井 励（量子エレクトロニクス）

現在、地球大気を取り巻く環境は様々な問題を抱えている。地球温暖化やオゾン層の破壊、大気汚染による酸性雨など、その問題は多岐にわたっており、それに伴うようにして近年、世界各地で様々な異常気象が観測されている。これらの問題を解決するためにも、地球大気の観測技術は必要不可欠なものであり、その大気中における様々な現象を迅速かつ効率的に観測する手段としてライダーリモートセンシングがある。

ライダーリモートセンシングは遠距離にある対象に対してレーザー光を照射し、その散乱光を測定することによって対象の距離や対象の性質を分析する手法である。ライダーにはレーダーとほぼ同様の技法が用いられており、レーザーレーダーとも呼ばれる。ライダーとレーダーの相違点は、ライダーではレーダーで用いられる電磁波よりも遥かに短い波長の、紫外線、可視光線、近赤外線を用いることである。一般的に、波長よりも小さな物体や物体の特徴は検出できないため、ライダーはレーダーよりもエアロゾルや雲の粒子などの検出に適しており、大気の観測や気象学にとって非常に有用である。

リモートセンシングのセンサーに当たる部分としてデジタルカメラを用いたが、その利点としては分光データと二次元データが同時に取得できる点が挙げられる。また、デジタルカメラによって取得したデータは変換を行わずに利用できるため、リニアなデータとして直接解析に用いることができる。

本研究では移動可能な観測装置の開発を目的として、デジタルカメラを用いたライダーリモートセンシングの研究を行った。過去の研究では、2 地点からの撮影と三角測量を用いることによって距離の測定を行ったが、この測定方法ではカメラ 1 台では 2 地点での同時撮影ができない点や、観測距離が遠くなると距離分解能が落ちるなどの問題点があった。その改善策として、フーコーの光速度測定実験からヒントを得て、回転ミラーを用いた距離測定法を利用し大気観測を行った。

回転ミラーを用いた距離測定が実際に可能であるか、実験を行った。光源に半導体レーザー（波長：650nm）、撮影に CANON EOS 7D を用いた。光源から出た光はハーフミラーを透過、回転ミラーに反射させ、ミラーから 30m 離れた測定地点に配置したコーナーキューブで反射させた。回転ミラーは、モーターのついた固定台に固定し、モーターに接続した電源の電圧を操作することにより回転速度の調整を行った。反射光は再び回転ミラー、ハーフミラーにより反射しカメラのレンズに入るが、回転ミラーから測定地点までの往復時間ミラーは回転しているため、反射光にはズレが生じる。ミラーの静止時と回転時にそれぞれ撮影を行い、その画像でのレーザー光の撮像点のズレと、遅延時間と回転数によって導かれる値を比較することによって距離を測定し、その精度を確認した。

ライダーリモートセンシングでは、光源として Nd:YAG レーザーの第二高調波（波長：532nm）、センサーとしてデジタルカメラ CANON EOS 5D を使用した。レーザー光はプリズム、ミラーを用いて観測地点から 500m 離れた船橋三山送信所の放送塔へ向け照射、デジタルカメラの前に回転ミラーを配置し、散乱光を観測した。散乱光は距離によって観測地点に到達する時間に差が生じるため、回転ミラーを用いて観測すると、距離の遠い地点での散乱光ほど大きなズレが生じ、撮影した画像では曲線状のレーザー光が観測された。この画像とミラーを静止させた状態で撮影した画像とを比較することにより距離を測定した。その後レーザー光を上空に向けて照射し、エアロゾルのミー散乱光の観測を行った。

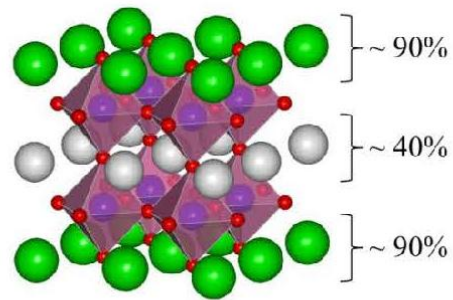
ラマン散乱は物質によって散乱光の波長が変化するため、ミラーの代わりに回折格子を用いることで、窒素や酸素、水蒸気によって分光された散乱光の観測を試みた。散乱光強度が非常に弱く分光自体の観測には至らなかったが、逆にその結果から観測光がミー散乱であることの確認に繋がった。

14.

 $RE_{1-x}TiO_3$ ($RE = La, Pr, Nd$) の A サイト欠損構造の制御とその物性

6411010 坂井 慎吾 (磁気物性)

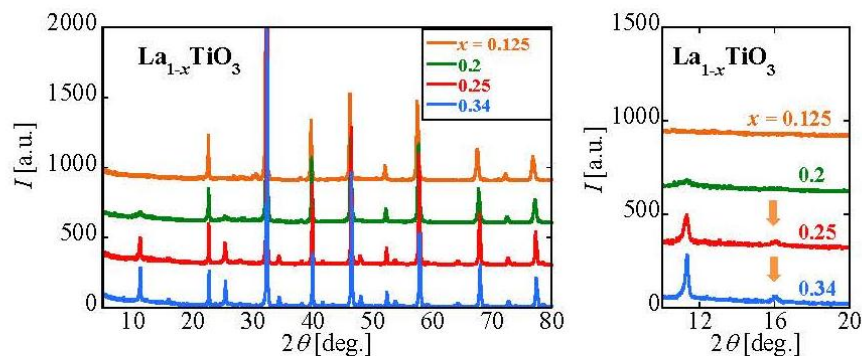
ペロブスカイト型酸化物の多様な物性はその多彩な派生型構造に起因する。本研究の対象物質である A サイト欠損型ペロブスカイト $RE_{1-x}TiO_3$ (La, Pr, Nd) はその派生型構造の一つである。また、 $RE_{1-x}TiO_3$ は $x = 0.34$ ($1/3$) 近傍で A サイトの欠損が部分的に秩序配列した構造を持つ^[1](図 1)。この構造においては、 A サイトの占有率が $\sim 40\%$ の層と $\sim 90\%$ の層(ab 面に平行)が c 軸方向に交互に積層することでこの方向に二倍の長周期が現れる。また、 ab 面内の欠損は無秩序である。

図 1 : $La_{0.66}TiO_3$ の結晶構造

$RE_{1-x}TiO_3$ ($RE = La$) は $x = 0$ ($Ti^{3+}, 3d^1$) ではモット絶縁体、 $x = 0.34$ ($Ti^{4+}, 3d^0$) ではバンド絶縁体であり、その中間領域では金属的な振る舞いを示す^[2]。特に、モット絶縁体–金属転移近傍で興味深い強相関電子物性の発現が期待される。しかしながら A サイト欠損の秩序構造と物性の関係、正確な欠損構造、定比組成など不明な点が多く残っている。本研究の目的はこれらを明らかにすることである。そのため、 A サイト欠損量 x を系統的に変化させて $RE_{1-x}TiO_3$ ($RE = La$) を作製し、その結晶構造、物性を調べた。

試料は原料粉末(La_2O_3 、 Ti_2O_3 、 TiO_2) を所定のモル比で秤量し混合した後、管状炉で熱処理を施すことで作製した。5% H_2 -Ar 雰囲気中で仮焼きと本焼きを行い、それぞれ $1000 \sim 1100^\circ C$ で 4 時間程度、 $1300 \sim 1350^\circ C$ で 8 時間程度焼成することで目的の試料を得た。構造解析は X 線回折法で行った。磁気特性は MPMS を用いて調べた。

図 2 は $La_{1-x}TiO_3$ の X 線回折パターンである。11 deg 付近のピークは A サイト欠損の部分的な秩序配列に起因する (001) 反射である。0.2 $\leq x \leq 0.34$ の範囲でこのピークの存在を確認できることから、少なくともこの組成範囲で

図 2 : $La_{1-x}TiO_3$ の X 線回折パターン

右は 10–20 deg の拡大図

A サイト欠損は秩序配列をしていることがわかる。この結果から我々は、M. J. MacEachern らが報告した組成範囲($0.3 \leq x \leq 0.34$)に比べ^[2]、より広い組成範囲で A サイト欠損が秩序化するということを明らかにした。この違いは試料作製方法の違いが原因であると考えられ

る。また、 $x = 0.25$ 、 0.34 において見られる 16° 付近のピークは、 c 軸方向だけでなく、 ab 面内方向にも A サイト欠損の長周期構造が存在することを示唆している。この結果は、面内の長周期構造を考慮した新しい欠損秩序構造のモデルが必要であることを示唆している。X 線回折パターンに二倍周期に由来するピークが観測されることから、

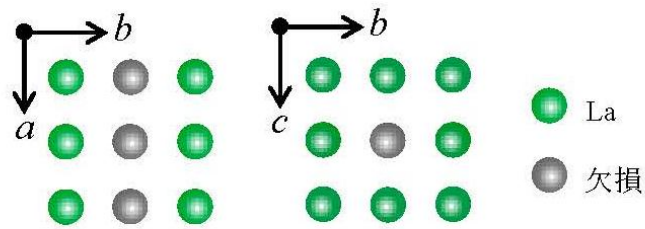


図 3 : $x = 0.25$ ($\text{La}_{0.75}\text{TiO}_3$) の結晶構造のモデル

A サイトが $1/4$ 欠損した $x = 0.25$ が $\text{La}_{1-x}\text{TiO}_3$ の定比組成であると考えられる。 $x = 0.25$ が定比組成である場合の欠損秩序構造モデルの一例として図 3 のようなものが考えられる。このモデルでは欠損の一次元鎖が a 軸方向に配列し

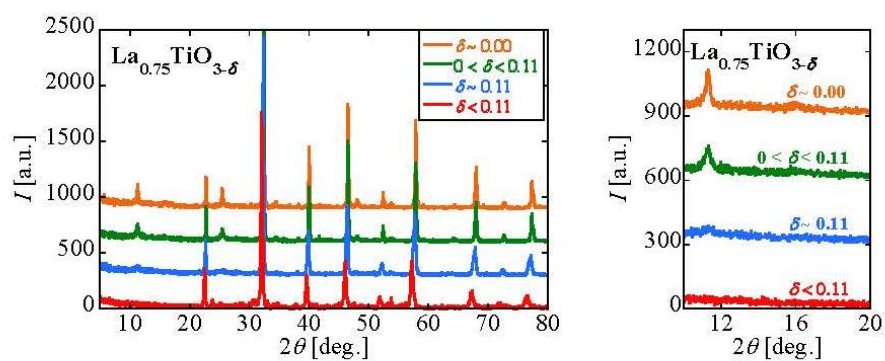


図 4 : $\text{La}_{0.75}\text{TiO}_{3-\delta}$ の X 線回折パターン
右は $10 - 20^\circ$ の拡大図

ていることにより、 b 軸方向および bc 面の対角線方向に長周期構造が現れる。この対角線方向の長周期構造が 16° 付近のピークの起源となっていると考えられる。また、 $x = 0.25$ において磁化はパウリ常磁性的な振る舞いを示す。MacEachern らの報告でも $x = 0.25$ における磁化はパウリ常磁性を示すため、少なくとも $x = 0.25$ においては、 A サイト欠損秩序構造の違いによる磁気特性の変化は見られない。また、 $x = 0.25$ においては酸素欠損量 δ が小さいほど A サイトの欠損の秩序度が高いという結果が得られた(図 4)。これは酸素の欠損を利用することで A サイト欠損構造の制御ができることを示唆している。

[1] K. Yoshii, Journal of Solid State Chemistry. **149** (2000) 354.

[2] M. J. MacEachern *et al*, Chem. Mater. **6** (1994) 2092.

15.

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

6411014 中村 隆一 (磁気物性学教室)

Fe(001) 層と Cr(001) 層を交互に積層した Fe/Cr(001) 界面では原子ステップ位置で磁氣的な界面フラストレーションが存在することが知られている^[1]。R. S. Patel^[2]らは“多結晶” Fe/Cr 多層膜において、磁場中冷却後の熱残留磁化(TRM)が磁場を切った後、ゆっくりと対数的に緩和する事を報告している。しかし、彼らの試料は多結晶膜であり、Fe 原子と Cr 原子の相互拡散は非常に大きく、観測されたスローダイナミクスは本質的にバルク的な乱れに起因した SG 状態を反映していると考えられる。実際、彼らの試料の転移温度は約 35~115 [K]と室温よりかなり低く、Fe 層は強磁性状態になっているとは言えない。

バルク的な乱れを排除したエピタキシャル Fe/Cr 膜において界面フラストレーションがダイナミクスに与える影響、さらに、界面の乱れ具合との関係を調べる事は非常に興味深い問題であるが、このような報告はこれまで知られていなかった。そこで、我々はこれまで、バルク的な乱れの無いエピタキシャル Fe/Cr(001) 膜を異なる成長条件で界面の乱れ具合をナノレベルで制御しながら作製し、TRM の緩和測定を行ってきた。その結果から、界面が乱れるにつれて TRM の緩和を対数フィッティングした時の傾き(磁気粘性 S)が大きくなり、界面フラストレーションの度合いが増大することが分かった^[3]。

この結果は局所的な界面の状態が試料全体の磁氣的性質を決定していることを示している。そこで我々はバルク的な残留磁化のスローダイナミクスのメカニズムとして、磁場を切った場合、界面フラストレーションを解消させるために Fe 層や Cr 層内部に磁区が発生し、その時に生じる磁壁の移動がスローダイナミクスを引き起こすモデルを仮定した。膜が厚い場合、磁壁の体積とともに静磁エネルギーは大きくなり磁壁は形成し辛くなる。つまり Fe や Cr の膜厚により、磁壁の形成し易さが異なる。よって、試料の膜厚を変化させることによりスローダイナミクスに変化が観測されるのではないかと我々は考えた。

そこで本研究ではスローダイナミクスの機構の解明の為に、Fe 及び Cr 層の膜厚を変化させた Fe/Cr(001) 二層膜を MBE 法を用いて作製した。作製した試料の構成の詳細は以下のとおりである。MgO(001)/Cr(001) 20, 50, 70, 100 Å/Fe(001) 40 Å/Au 20 Å と MgO(001)/Cr(001) 50 Å/Fe(001) 20, 40, 60, 80, 160 Å/Au 20 Å である(MgO(001)基板上に緩衝層も兼ねた Cr(001)層、そして Fe(001)層、最後に Au を酸化防止層として 20 Å と順に蒸着している)。また界面の評価は RHEED によるその場観察で行っている。そして TRM の緩和を 250~2 [K]の各温度で測定し、界面フラストレーションの変化を観測した。

その結果以下のことが分かった。(1) すべての試料において室温(300 [K])で強磁性を示す磁気ヒステリシスが見られ、 T_c は室温より高い。これは我々の試料が Fe, Cr 層の相互拡散がほぼ無視できるバルク的な乱れを持たない試料であることを示している。(2) 図1(左図)に見られるように Fe 層の膜厚増加に伴って、磁気粘性 S は減少する。(3) 図1(右図)に見

られるように Cr 層の膜厚を変えても大きくは S の増減に関係しないが、膜厚や温度を変えると Cr 70 Å の試料は 125 [K] 付近に、Cr 100 Å の試料は 175 [K] 付近に S に山を生じる。これらの温度はそれぞれの膜厚において Cr 層内の磁気構造が C-SDW から I-SDW に変化する温度に近い^[4]。(4) これは Fe 層の膜厚を変えたもの、Cr 層の膜厚をかえたもの両方に見られる傾向であるが、 S は 50 [K] に山を持つが、その原因は未だ分からない。

これらの結果は以下のようなメカニズムを示唆した。観測されているスローダイナミクスは本質的には Fe 層の磁壁の移動であると考えられる。Fe 層が薄い時には、より安定な状態を得る為に界面フラストレーションを解消しエネルギーを下げるように磁区を形成する。しかし Fe/Cr 界面にはフラストレーションがランダムに存在する。その為、その特殊な磁壁の移動はエネルギーの多谷構造中の運動による長い緩和時間を生じ、バルク的なスローダイナミクスを引き起こす。一方、Cr 層はスローダイナミクスに大きくは関係していないが、Cr の磁気的構造(SDW)が転移する温度において相境界でのゆらぎを Fe 層の磁壁がひっかけ、 S に山を生じさせる。

- [1] N. Jiko *et al.*, J. Phys.: Condens. Matter. **17** (2005) 2477.
- [2] R. S. Patel *et al.*, J. Magn. Magn. Matter. **309** (2007) 256.
- [3] M. Nomura *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **320** (2011) 012042.
- [4] A. Schreyer *et al.*, Phys. Rev. Lett. **79** (1997) 4914.

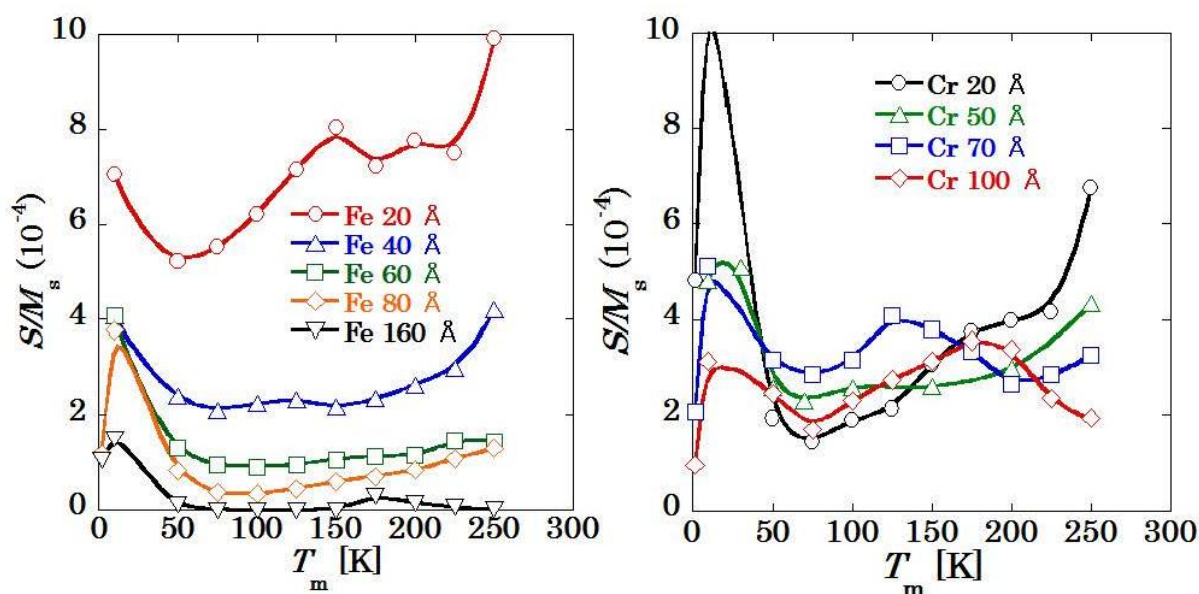


図1 Fe/Cr(001) 二層膜の S の測定温度依存性。Fe の膜厚を変化させた試料(左図)、Cr の膜厚を変化させた試料(右図)。

16.

パイロクロア系と2次元分子磁石ネットワークのスピンアイス状態に対する 乱れが緩和に与える影響

6411009 児玉 悠太 (磁気物性)

本研究ではスピンアイス状態を示すパイロクロア酸化物 $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ と、2次元スピンアイスの候補である2次元単分子磁石ネットワーク $[\text{Mn}(\text{saltmen})]_4[\text{Mn}(\text{CN})_6]\text{ClO}_4 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ に対して元素置換による乱れを導入し、緩和に与える影響を調べた。

パイロクロア酸化物 $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ と $\text{Dy}_2\text{Sn}_2\text{O}_7$ では、A サイトの Dy イオンが頂点共有した正四面体を構成し(Fig.1)、それに働く有効的な強磁性相互作用と一軸異方性の競合によって基底状態が巨視的に縮退する。このスピンアイス状態では、交流磁化率の温度変化に大きな周波数依存性が観測され、その緩和モデルは特異な Davidson-Cole (DC) 型である。最近、幾何学的フラストレーション系において、乱れが一部フラストレーションを解消しスピングラス(SG)的な秩序を引き起こすことが報告されているが、スピンアイスにおいて同様の現象が存在するかははっきりわかっていない。これまで、乱れによるスピンアイス状態への影響については、A サイトへの希釈効果($(\text{Dy}_{1-x}\text{Y}_x)_2\text{Ti}_2\text{O}_7$)について調べられてきた。そこでは、交流磁化率の 15 K ピークを減じ、緩和時間が短くなるように働くことが報告されている。それに対し、我々はこれまで報告例のなかった B サイトの乱れの効果が緩和に与える影響を調べた。試料は $\text{Dy}_2(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)_2\text{O}_7$ と $\text{Dy}_2(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_2\text{O}_7$ で、固相反応法により作製し、交流磁化率測定から緩和解析を行った。特に $\text{Dy}_2(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)_2\text{O}_7$ においては $x = 0$ と $x = 1.0$ で、両試料の基底状態はスピンアイスであるので、中間の組成で乱れの影響を直接的に見ることができると考えた。その結果、A サイトよりも B サイトへの乱れの効果の方が、緩和にはるかに大きな影響をもたらすことがわかった。(i) Sn 置換では $x = 0.01$ の時点で、Zr 置換では $x = 0.005$ において、緩和時間が約 3 倍短くなり、(ii) $x = 0$ に比べて交流磁化率の実部分($\text{Re}\chi$)の周波数依存性は減少し、(iii) DC 型の緩和にフィットしないことがわかった。これらのことから、B サイトへの乱れが間接的に A サイトにおけるフラストレーションを部分的に解消し、スピンアイスの秩序状態を融解したと考えられる。一方、比較に行った A サイトの Dy の Y による希釈では、 $x = 0.1$ においてもほとんど変化がなかった。直接的にスピンアイスルールを壊すような Dy の希釈よりも、間接的な B サイトの乱れのほうが大きな効果をもたらした原因として、置換した元素と置換された元素のイオン半径の差によって生じる格子の歪が、スピンアイス中の仮想的な磁束のループを乱し、A サイトの基底状態を変えたためである可能性が考えられる。

一方、これまでの $[\text{Mn}(\text{saltmen})]_4[\text{M}(\text{CN})_6]\text{ClO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ($\text{M} = \text{Co}, \text{Fe}, \text{Mn}$) の磁気的性質の研究から、 $\text{M} = \text{Fe}, \text{Mn}$ の場合、面内ではほぼ直交する2方向の局所的な一軸異方性容易軸と強磁性的な相互作用を持つ層状2次元分子磁石ネットワークを形成することがわかっている(Fig.2)。ここで、 $[\text{Mn}(\text{saltmen})]_4$ は一軸異方性を持つ単分子磁石(SMM)ユニットとみなせる(スピン $S_T = 4$)。また、錯体 $[\text{M}(\text{CN})_6]^{3+}$ が強磁性的に SMM 間を連結する。このネットワークに特徴的なのは、スピンアイスの2次元版ともいえるような幾何学的フラスト

レーションをもつことである。このため、パイロクロア系のスピナイスと同様、低温まで磁気長距離秩序を持たずに、2 K までの温度範囲で磁化や比熱に異常がみられない。また、交流磁化率の緩和解析から、DC 型の特異な緩和を示し、スピナイス化合物 $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ の緩和と似た振る舞いをみせる。本研究ではこの2次元スピナイス的な単分子磁石ネットワークへの乱れの効果調べるため、 $M = \text{Mn}$ を出発物質として、 Mn を一部非磁性の Co^{III} と強磁性の Fe^{III} で置き換えた $[\{\text{Mn}^{\text{III}}(\text{saltmen})\}_4\{\text{Mn}_{1-x}\text{Co}_x^{\text{III}}(\text{CN})_6\}]\text{ClO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ と $[\{\text{Mn}^{\text{III}}(\text{saltmen})\}_4\{\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x^{\text{III}}(\text{CN})_6\}]\text{ClO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ を作製し、連結部の乱れが磁気転移に与える影響をダイナミクスの観点から調べた。その結果、 Co 置換では2 K までの範囲では相転移は見られなかったが、 $x=0.1$ ですでにDC型の緩和が成り立たなくなっており、スピナイス状態が乱れにより部分的に壊れていることがわかった。 Fe 置換でも同様に $x=0.1$ でDC型の緩和が成り立たなくなった。また、 $x=0.4$ で3 K から2 K に向かって緩和時間が4桁程度長くなり、分布も急速に広がっていることから、2 K 以下の磁気相転移を示唆しており、 $x=0.7$ では2.3 K で明確な転移が観測された。緩和モデルを調べると、 $x \geq 0.3$ で Cole-Cole モデルにフィットし、緩和時間や緩和時間の広がりの特徴的な温度変化から、 $x=0.7$ の相転移はSGに似た「ランダム異方性を持つ磁性体(RAM)」の相への転移だと考えられる。スピナイス的な $M = \text{Mn}$ ネットワークへの乱れによって非磁性である Co 置換では相転移が起きず、 Fe 置換では起きた。これは、磁性のネットワークを維持した状態で、乱れによって磁気秩序(RAM)への転移が起きるということを示唆している。

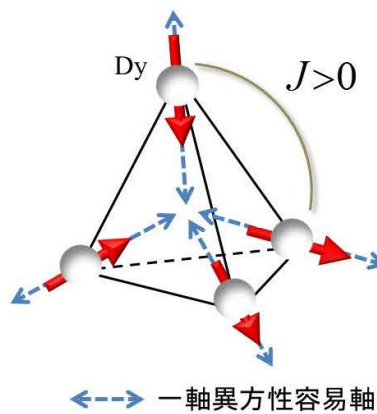


Fig.1 パイロクロア系
スピナイス

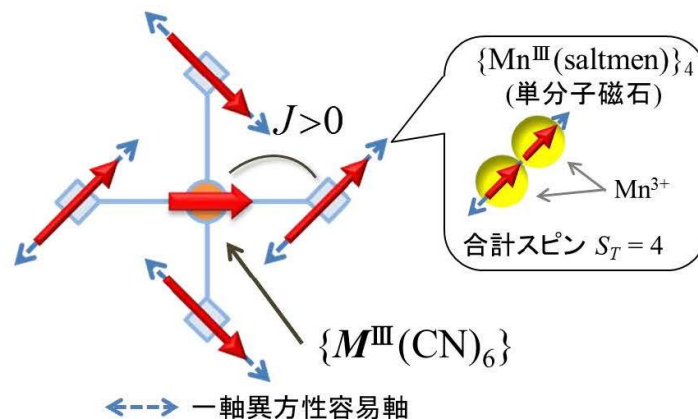


Fig.2 2次元単分子磁石ネットワーク

17.

スピン流による磁性細線中の磁壁挙動の解析

6411007 倉満隆寛 (磁気物性学教室)

強磁性体中に電流を印加すると、電流の伝導電子スピンと強磁性体中の局在電子スピンの間に相互作用が働き、伝導電子から局在電子へのスピントランスファーが起こる。このスピントランスファーを利用した磁気記録デバイスとして、磁性細線を用いたシーケンシャルメモリが提案されている。この磁性細線を用いたシーケンシャルメモリは、可動部がなく書き換え回数が無限で、並列記録により高速化が可能であるため、実用化に向けた研究が盛んに行われている。このシーケンシャルメモリでは、強磁性体である磁性細線中の複数の磁区をパルス電流で、それぞれ等距離移動させなければならない。そこで、磁壁のオーバーランを防止するための磁区トラップ法を3種類考案した。この3種類の磁区トラップ法を導入した磁性細線において、スピントランスファーによる磁性細線中の磁壁の挙動を、磁化の運動方程式である Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式を用いた動的なシミュレーションを行い、3種類の磁区トラップ法の効果を比較・検討した。

数値解析の結果を以下に記す。

・最も安定的（駆動後の磁区の形状を乱さず、そして磁化反転しない領域を残さずに）に電流による磁壁移動を実現できる可能性がある磁区トラップ法は磁性細線の磁区トラップさせる領域の下端に非磁性体を配置する磁区トラップ法であることが明らかになった。

磁区トラップとして下記の非磁性体を磁性細線の下端に配置した場合、駆動後の磁区の乱れは $2 \sim 15 \text{ Mesh}$ ($1 \text{ Mesh} = 2 \text{ nm} \times 2 \text{ nm} \times 2 \text{ nm}$) の範囲内になる。

※磁性細線の下端に配置した非磁性体のサイズ

- ・非磁性体の長さ $L_x = 4 \sim 8 \text{ nm}$
- ・非磁性体の幅 $L_y = 120 \text{ nm}$
- ・非磁性体の膜厚 $L_z = 4 \sim 10 \text{ nm}$

・最も低電流で磁区を駆動できる磁区トラップ法は磁区トラップさせる領域の下端に非磁性体を配置する磁区トラップ法であることが明らかになった。

磁区をトラップさせる領域の

- ・磁気相関を弱める磁区トラップ法の閾値電流密度 $J_{c,th}$ は $0.5 \text{ (A/cm}^2\text{)}$
- ・両端に非磁性体を配置する磁区トラップ法の閾値電流密度 $J_{c,th}$ は $1.5 \text{ (A/cm}^2\text{)}$
- ・下端に非磁性体を配置する磁区トラップ法の閾値電流密度 $J_{c,th}$ は $0.4 \text{ (A/cm}^2\text{)}$

以上であることがわかり、また、磁化反転をしない領域を残さず磁区駆動を実現するには

- ・磁気相関を弱める磁区トラップ法では電流密度 $J_c = 1.0 \text{ (A/cm}^2\text{)}$
- ・両端に非磁性体を配置する磁区トラップ法では電流密度 $J_c = 2.25 \sim 3.0 \text{ (A/cm}^2\text{)}$
- ・下端に非磁性体を配置する磁区トラップ法では電流密度 $J_c = 0.4 \text{ (A/cm}^2\text{)}$

以上を印加する必要があることが明らかになった。

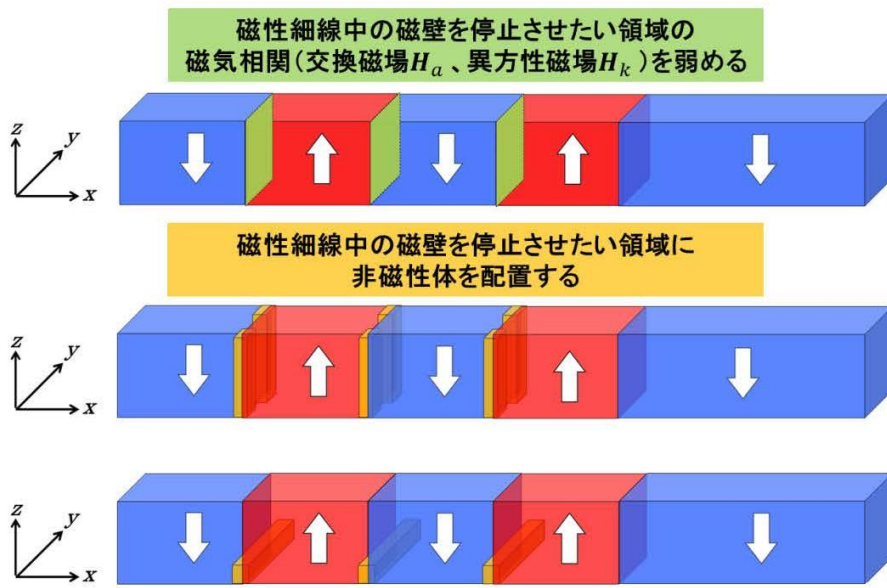


図 提案する3つのトラップサイトの概略図

18.

ゲータイト表面におけるカドミウム吸着形態の観察

加藤 志朗（表面物理）

重金属による土壤汚染はその人体への悪影響から幅広く研究されてきた。その中でもカドミウムはイタイタイ病の原因物質として有名である。土壤物質表面における重金属の吸着機構の理解は汚染土壤の浄化のための基礎研究として重要である。本研究では土壤鉱物の一種であるゲータイト(α -FeOOH)に対しカドミウムを真空蒸着し、X線光電子分光法(XPS)によりゲータイト表面とカドミウムとの化学結合状態の観察を行った。

土壤を構成するゲータイトは通常 $1[\mu\text{m}]$ 以下の粒子であるが、本研究では天然に結晶成長した $10[\text{mm}]$ 程度のゲータイトを使用する。このゲータイトを使用することにより、(110)面を多く含む面を露出させることができ、特定の面への吸着状態を観察することができる。

昨年度はゲータイトを空气中で劈開した後、真空蒸着によりカドミウムを吸着させ、一度大気中に取り出しX線光電子分光法による観察を行った。この方法では大気に曝すことになるため、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を含む可能性がある。大気物質とカドミウムとの反応を避けるだけでなく、同一ゲータイト試料に対し種々の膜厚での観察を可能にするため、本年度はX線光電子分光装置に真空蒸着するための試料準備室(真空蒸着槽)と、準備室-X線光電子分光装置間を試料移送するための移送機構を製作し、試料の作製から観察までを真空中で行った。

試料準備室は試料台、膜厚測定用水晶振動子、蒸着装置、試料移送機構により構成されている。蒸着源の加熱はアルミナのるつぼに巻いたタングステン線によって行う。蒸着源のるつぼ内部温度の制御はタングステン線への投入電力により行った。そのため、あらかじめ、熱電対(銅-コンスタンタン)によりるつぼ内部の温度と投入電力の関係を明らかにした。膜厚の制御は水晶振動子法を用いた。印加電力 $13.5[\text{W}]$ での蒸着速度はおおよそ $0.06[\text{\AA}/\text{s}]$ である。試料の移送はトランスファーロードで行う。蒸着時の試料準備室内の圧力は $10^{-5}[\text{Pa}]$ であった。

XPS 実験において X 線源には $\text{MgK}\alpha$ 線($1253.6[\text{eV}]$)を使用した。結合エネルギーの較正及び帯電補正にはそれぞれ $83.8[\text{eV}]$ の $\text{Au}4f_{7/2}$ ピークと $284.6[\text{eV}]$ の $\text{C}1s$ ピークを用いた。ピーク形状(peak profile)はガウス関数によるフィッティングを行った。天然に放射状に結晶成長したゲータイトを劈開することにより(110)面を多く含む清浄表面を準備した。その後、直ちに XPS 試料室へと設置し、真空排気を行った。加熱脱ガス後 $10^{-6}[\text{Pa}]$ の圧力内で XPS 測定を行った。

XPS による測定の結果、ゲータイト表面の $\text{O}1s$ 電子結合エネルギーは $531.3[\text{eV}]$ であった。ピーク分析の結果、 O と OH が確認され、その強度比は $3:2$ となった。これは(110)面の O と OH の存在比 $3:2$ と一致する。カドミウムを蒸着後、ピークシフトが見られた。ゲータイト表面において、 Fe と結合している O と OH はカドミウムが吸着することによりカドミウムと結合し、 CdO や CdOH , $\text{Cd}(\text{OH})_2$ となったことによるものと考えられる。さらに CdO と結合したことによる $\text{O}1s$ ピーク、 CdOH , $\text{Cd}(\text{OH})_2$ と結合したことによる $\text{O}1s$ ピークに分解し、吸着状態の考察を行った。

19.

回転するブラックホールによる光子湾曲の解析

浅妻 翼（宇宙・素粒子）

サブミリ波 VLBI などを用いた非常に高い空間分解能を有する観測によって、ブラックホールの直接撮像およびブラックホール近傍の観測が近い将来実現する可能性があるとし唆されている。この場合、光がブラックホールのごく近傍を通過するため、ブラックホールの回転効果が観測結果に影響を及ぼす可能性がある。

そこで本研究では、回転するブラックホール近傍での光の振る舞いを調べ、回転効果が及ぼす影響を定量的に扱う事を目的とした。アインシュタイン方程式の軸対称定常解であるカー解より導かれる光子の軌跡についての方程式から、様々な自転角運動量を持つブラックホールの周囲において、様々な初期位置・初期運動量を与えた光子の軌跡を数値的に求めた。そして重力レンズ効果やブラックホールの直接観測などの宇宙論的現象における光子の軌跡を再現し、ブラックホールの回転がある場合とない場合を比較する事で回転の影響を考察した。

第一に、重力レンズ効果に対するブラックホールの回転の影響を考察した。重力源を回転しない無限小の質点として、薄レンズ近似を用いて得られたレンズ方程式の解に対し、重力源を回転するブラックホールとした場合に得られる結果はどのような変化があるのかを調べた。光源・重力源・観測者が一直線上に存在するとき、観測者から見える光源の像はアインシュタインリングと呼ばれるリング状となる事がレンズ方程式から導かれる。本研究ではアインシュタインリングとして観測される光子の軌跡を数値的に求め、ブラックホールの回転によって観測者に対する光子の入射角がどのような変化をするのか確かめた。その結果、光源・重力源・観測者それぞれの天体間の距離がシュワルツシルド半径の 1000 倍程度以下のとき、回転の影響が顕著に現れる事がわかった。また、ブラックホールの回転が無い場合でも同程度の距離で薄レンズ近似が成立しなくなるという事もわかった。

第二に、ブラックホールの直接観測をした場合に観測されることが示唆されているブラックホールシャドウについて考察を行った。ブラックホールシャドウとは、ブラックホールが持つ特異面である事象の地平面の像である。この地平面は光速ですら脱出不可能な領域であるため、内部からは光も放射されず、もし観測した場合には真っ暗なシャドウとして見える事が示唆されている。本研究ではブラックホールに対して様々な方向に観測者が存在した場合を想定しそれぞれの観測者からブラックホールシャドウはどのように見えるのかを調べた。その結果、回転していなければ正円に見えるはずのシャドウの形が回転効果によって歪み、その面積も変化する事がわかった。またブラックホールシャドウは無限遠観測者に対して解析解が与えられているが、本研究ではブラックホール近傍の観測者が見たシャドウの計算も行い、両者の違いを確かめた。

第三に、ブラックホールシャドウの近傍での光の振る舞いを考察するため、ブラックホール近傍を通過して観測される光の軌跡はどのような角度の光源から入射したものであるのかを調べた。その結果、回転の有無によらず背景方向ではない方向から入射する軌跡を辿る光が観測される領域が存在し、その形状や位置が回転効果によって変化する事がわかった。

20.

原始銀河形成の基礎過程に関する数値シミュレーション

渡邊 彩香（宇宙・素粒子）

現在の宇宙は非一様であり、過去に宇宙がほぼ一様であった頃にわずかに存在したゆらぎが成長して形成されたものだと考えられている。ゆらぎが小さい場合には、線形近似など様々な近似を用いることによって比較的容易に振る舞いを考えることができるが、ゆらぎが大きい場合には非線形近似が必要となり解析的に考えることは難しい。

本研究では、銀河形成において主要な役割を果たす物理過程を解明することを目的として、宇宙空間に球対称分布するガスに対して流体計算を行い、密度ゆらぎの非線形成長を考察することで銀河の形成過程を考察した。その対象として、形成過程を考える銀河をその主成分が水素とヘリウムであり、金属類を含まないような原始銀河とした。今回、対象とする銀河を原始銀河としたのは、宇宙において一番初めにできた銀河ならば、ほかの銀河や星からの放射による影響がないことから、対象の形成を密度ゆらぎの計算から不定性なく考察することができるためであり、また、最初に形成された恒星からの放射によって、その後の形成過程がどう影響されるのかを考察しやすいと考えたためである。この原始銀河の形成過程を考える際に、まず密度ゆらぎの時間発展に対する数値計算を行った。この計算に対して、ガスが断熱であった場合、ガスが断熱でなかった場合について計算し、それぞれを比較することで形成過程への影響を考察していった。

結果として、密度ゆらぎの時間発展に対する数値計算からは、ガスは宇宙膨張の効果により初期には膨張するが、重力により初期ゆらぎの大きな部分から順に収縮に転じることが分かった。ガスを断熱だと仮定した場合には、収縮によってガスが加熱されることによって生まれる圧力勾配が、重力に対して斥力となり、ガスの収縮を妨げることが分かった。ガスが断熱であるという過程を外し、放射冷却による熱の放出を考慮して数値計算を行ったところ、圧力勾配による収縮の妨げは見られず、収縮し続けることが分かった。

さらに、本研究ではこの結果を受けて、原始銀河の形成の最中に、その分布の原点の位置に大質量星が形成されたと考え、そこからの放射がその後の銀河形成過程にどのような影響を及ぼすのかを考察した。この大質量星から放出される光子は、ガスをその内側から電離していく。光子から得られるエネルギーによってガスは加熱されるため、ガスが放射冷却によって収縮し続けることは妨げられると考えられる。このように、原始星の放射による外部熱が原始銀河の形成に与える影響を、様々な質量に対して調べることで、原始銀河の質量を理論的に見積もることができると考えた。本研究では、このような放射フィードバックの影響を考察することで、銀河としての系を形成し得る下限の質量を求める。

21.

ガリレオンに対するラグランジアン構築

本多 芳兼（宇宙・素粒子）

本論文ではガリレオンに対するラグランジアン構築を行った。また、ガリレオンを用いたモデルが加速膨張を引き起こすものになっているかを考察した。

現在の宇宙は遠方の超新星爆発の観測の結果から加速膨張していると考えられている。その加速膨張を引き起こす候補として考えられているのが宇宙項と呼ばれるもので、アインシュタイン方程式における重力場の定数の自由度として導入されたものである。これを素粒子物理学の真空のエネルギー密度として解釈し、観測される値と比較すると 120 桁もオーダーが大きい。これは宇宙項問題と呼ばれている。この問題を解決するために一般相対性理論を拡張する試みがあり、その方法の一つとしてガリレオンと呼ばれるスカラー場を加える仮説がある。

ガリレオンの特徴は二階微分の運動方程式を満たすスカラー場であり、三階以上の微分方程式は含まない。この特徴は理論にゴーストを生じさせないことに対応している。このスカラー場が時間変化する宇宙項として働くことで、負の重力源として加速膨張を引き起こすと考えられる。定数でなければ宇宙項問題は回避できるが、時間依存するガリレオンが観測される結果と矛盾しないものでなければならない。

ガリレオンは高次元時空の自発的対称性の破れから生じるスカラー場であると解釈できる。高次元時空の自発的対称性の破れは高次元時空にブレーンを置くことで生じる。ガリレオンでは五次元時空を想定し、そこにブレーンが埋め込まれている。ブレーンが存在するとブレーン内部の並進対称性及び Lorentz 対称性は保存されるが、その他の対称性は破れる。破れる対称性として五番目の座標方向の並進対称性と五番目の座標方向とブレーン方向の回転対称性がある。この対称性の破れから五次元時空のブレーンが覆っていなかった空間の座標がスカラー場として現れる。また、五次元時空だけでなく Conformal 四次元時空についてもガリレオンは得られる。この場合、スケール変換に対するパラメーターがガリレオンとなる。そしてその場合、自発的対称性の破れはスケール変換及び特殊共形変換によって生じる。これらの変換によって、ブレーンの形状が変化するために対称性が破れてしまう。

本論文で焦点を当てたものは、Conformal 四次元時空の自発的対称性の破れから生じる Conformal ガリレオンを一様等方宇宙モデルに物質場として導入した場合に、Conformal ガリレオンがアインシュタイン方程式から宇宙の加速膨張を説明できるものになっているかについてである。Conformal ガリレオンは時間依存性のみあると考え、作用から変分を取ることによってアインシュタイン方程式を解くとフリードマン方程式が得られる。

結果として、ガリレオンから得られるポテンシャルエネルギーと運動項を比較したとき、運動項が無視できる場合であるのなら、このポテンシャルエネルギーは宇宙定数となって宇宙の加速膨張を説明できるものになる。ただ、宇宙項問題を回避するには時間依存性を持った宇宙項である必要があるので、スカラー場が時間依存性のある場合で微分方程式を解く必要性がある。

22.

超対称な Galileon 代数とラグランジアンを組み立て

恩田 誠治（宇宙・素粒子）

本論文はスカラー場である Galileon に超対称性の導入を目指した。Galileon は一般相対性理論の拡張として宇宙論で考えられたモデルである。一般相対性理論では時空の対称性が重要であり、これにより時空の性質が決まる。また Galileon を時空の対称性から以下のように求めることができる。

特殊相対性理論は時間 1 成分・空間 3 成分の 4 次元で我々の世界を記述する。この時空内ではローレンツ不変性などの対称性が保たれる。ここに空間 1 成分をさらに加え、ローレンツ不変性を満たす 5 次元時空を仮定する。この 5 次元時空内に 4 次元の面を置き、これを我々の世界とする。こうすると面が存在することにより 5 次元時空内の時空の対称性が崩れる。そしてこの時空の対称性の破れによって、4 次元の面に対し法線方向の座標の自由度が 4 次元のスカラー場として現れることになる。こうして現れたスカラー場が Galileon である。Galileon はその整合性から運動方程式が 2 階以下の非線型微分方程式になる。Galileon を一般相対性理論に導入すると、その補正から加速膨張など宇宙論の問題解決の手がかりとなる。

超対称性理論とは、ボソンとフェルミオンを対として扱う理論である。この時場の自由度の数など互いに相手の持つ性質から影響を受けるため、超対称性を適応すると理論にかなり強い制限が掛かることになる。統一理論では超対称性は満たすべき対称性の 1 つと考えられているので、既存の理論を超対称性にすることは理論研究においてかなり興味深いことである。また一般に理論に対しラグランジアンを作ることには難しいことである。これはラグランジアンを含む対称性が厳密に成り立つことを意味する。しかしラグランジアンからは運動方程式をはじめとする様々なことがわかるので、観測の難しい実験や現象の予想にラグランジアンを組み立てることは大いに役立つ。

本論文は、まず本論に必要な超対称性理論の理解のため Wess-Zumino モデルを例にとり解説する。その上でより超対称性理論の制約等が見えてくる 3 次元の超重力理論で具体的な計算をし、また 4 次元超重力理論を用いて 3 次元のときと比べ実際に場の自由度が増えることを説明する。具体的なラグランジアンの組み立て方法として Coset を用いる。この手法を用いると、ラグランジアンの対称性を自然に持たせることができる。また微分形式はテンソルの添え字を減らすことができ、計算を見やすくすることもできる。これらはラグランジアン構築で重要になるので具体的なモデルを用いて説明を行った。

これらの準備の後 Galileon への超対称性の適応について議論する。この Galileon を含んだ超対称なラグランジアンを Wess-Zumino 項を作り計算していく。Wess-Zumino 項とは 5 次元から 4 次元の項を作るものである。この Wess-Zumino 項の解説も含め、まず始めにミンコフスキー時空の場合の Galileon から説明を行った。そしてこの時空に超対称性の効果を導入することにより、超対称な Galileon を記述できるラグランジアンがミンコフスキー時空の場合と同様 5 つ得られるかどうかを考察した。その結果期待していた 5 つの超対称なラグランジアンの候補を作ることができた。またこれらのラグランジアンに対し、これから確認すべき点があることもわかった。