

## サブグループ活動状況 平成 23 年度

サブグループの活動状況を、以下順を追って報告する。記載されている項目は、次の通りである。

### 1. 研究活動の概要

### 2. 研究業績

- 1) 論文 (国内外の専門学術雑誌記載のオリジナルな研究論文)
- 2) 国際会議報告集 (国際会議、国際ワークショップ等のプロシーディング)
- 3) 学会講演 (日本物理学会等の学会や、国際会議での講演。招待講演の場合はそのことが明記されている。上の 1) 2) と重複するものもある。国際会議での講演は、まとめて後に置かれている)
- 4) 科学研究費等報告書 (代表者が本教室の教員である課題のみ記載されている。) 学会誌等 (商業誌等を含む) に発表された論文、解説等。(研究所レポートや研究会報告は含んでいない。) 著書、訳書、編集等 (著、訳、編の別が氏名の後に示されている。訳書は邦訳の後に () 内に原著者名、原著名が示されている)



# 素粒子理論サブグループ

## 1. 研究活動の概要

### 1) 加速器・原子炉ニュートリノ $\theta_{13}$ 実験の総合的解析 (南方)

数年前から 1-3 角が現在知られている制限 (Chooz limit) と同程度の大きな値をもつとの予想に立って、この帰結を主に摂動論によって調べてきた。今年度になって、T2K 実験でミューニュートリノから電子ニュートリノへの転換事象が発見され、さらに、原子炉実験 Double Chooz に続いて Daya Bay および RENO によって反電子ニュートリノ消失の決定的証拠が観測されたことにより、「大きな 1-3 角の仮説」は実験的確認を得た。現状で得られている実験結果を総合的に解析して 1-3 角を決定し、これがゼロでない有限の値をもつという仮説の信頼度が  $7.7\sigma$  であることを示した。また、加速器・原子炉両実験の組み合わせによって CP 位相  $\delta$  を決定できるという南方-杉山の予想 (2004 年) の有効性を初めて実験的にテストした。(サンパウロ大学 P. A. N. Machado 氏、R. Zukanovich-Funchal 氏、リオデジャネイロ・カトリック大学 布川弘志氏との共同研究)

### 2) 太陽ニュートリノを用いるニュートリノ非標準的相互作用の探索 (南方)

これまでのニュートリノの非標準的相互作用 (NSI) の探索方法に関する研究の中で、NSI 対角要素  $\varepsilon_{ee}$  に関する感度が他の要素に比して 1 桁以上も落ちることが認識されてきた。(この性質は菊地-南方-内波の摂動論的な取り扱いから予期されるものであった。) NSI 対角要素の探索方法として、近未来に得られる太陽ニュートリノデータを用いることによって、 $\varepsilon_{ee}$  に関してかなりの高感度の探索が可能であることを見いだした。特に太陽ニュートリノの日夜変化と低エネルギーニュートリノの高精度のスペクトル測定がとりわけ高い検証感度を持つことを指摘した。(バレンシア大学 Carlos Peña-Garay 氏との共同研究)

### 3) ニュートリノ振動とニュートリノが超光速で伝播する可能性 (南方)

最近、精密な GPS を備えた OPERA 実験でニュートリノの伝播速度が測定された。(第 1 報ではニュートリノが超光速で伝播しているという結果であったが、この解析には誤りがあると信じられている。)これを契機に、ニュートリノの真空中および物質中での伝播速度に関する包括的な考察を特殊相対論の枠組みの中で行った。この結果、ニュートリノ振動による wave packet の形状の変形によって超光速の群速度をもつニュートリノの伝播が可能であることが分かった。これが支配的な効果で、これまで人々の議論してきた二つの質量固有状態の速度差の効果はこれに比べて極めて十分小さく、無視できることが分かった。もちろん、前者とて OPERA 第 1 報の結果である光速の  $10^{-5}$  倍程度もの超光速よりも 8 桁以上も小さい。(Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics の Alexei Smirnov 氏との共同研究)

### 4) 小さな炉心の原子炉によるステライルニュートリノ探索の現象論 (安田)

原子炉ニュートリノのフラックスの理論値が最近見直され、従来よりも 3% 増加したものが正しいフラックスであるという主張が専門家の間で出されるようになり、質量二乗差が  $1\text{eV}^2$  程度のニュートリノ振動に關与するステライルニュートリノの存在の可能性 (原子炉アノマリーと呼ばれている) が、再び脚光を浴びてきている。そこで、 $1\text{eV}^2$  程度の質量二乗差のステライルニュートリノのニュートリノ振動を探るための方法として、至近距離に測定器を置いた原子炉ニュートリノ振動実験の現象論を考察した。仮定としては、同一な前置検出器と後方検出器がそれぞれ一基で、Bugey 実験と同じ体積・系統誤差をもつこと、前置検出器と後方検出器の炉心からの距離を自由に換えられるとしてこれらの距離について最適化すること、ステライルニュートリノは 1 種類で、いわゆる (3+1)-スキームを考えること、である。結果は、商業炉の場合、炉心の直径が 3~4m あり、基線の平均化により  $2\text{eV}^2$  以上の質量二乗差

に対して感度が劣化することがわかった。一方、炉心の大きさが比較的小さな実験原子炉（高速中性子炉の常陽、ILLの実験炉、Osirisの実験炉等）の場合には、数  $eV^2$  程度の質量二乗差に対して  $\sin^2 2\theta$  が 0.03 程度まで達成できることがわかった。

#### 5) 準ステライルニュートリノ探索の現象論 (安田)

LSNDの実験結果や原子炉アノマリーから示唆される現象をニュートリノ振動で説明しようとする試みには、多くの場合、物質と一切相互作用のないステライルニュートリノが関与すると仮定されているが、その枠組みを少し広げ、新しい物理により物質とある程度相互作用すると想定される、準ステライルニュートリノとでも呼ぶべき粒子の現象論を考察した。一般的に、準ステライルニュートリノと通常のニュートリノの混合が十分小さい場合には現在までの実験結果と矛盾することがないと言える。これまでの解析の結果、物質とのポテンシャルが電子ニュートリノの標準的ポテンシャルよりも数倍程度以上に大きい場合には、太陽・大気ニュートリノからの制限により、LSND等の結果を説明することは出来ないことがわかった。定量的な解析は現在も継続中である。

#### 6) 低スケール弦模型のLHC加速器実験における検証に向けた理論的研究 (北澤)

弦模型では異なる素粒子は唯一の弦の異なる振動モードとして表現される。エネルギーの最も低い振動モードが我々の知っている素粒子や力を媒介するゲージ粒子に対応するが、もちろんエネルギーの高い振動モードも存在し、それは未知の重い素粒子に対応するはずである。低スケール弦模型におけるように、弦の張力のエネルギースケールが  $TeV$  程度であれば、弦模型の確実な予言として  $TeV$  程度の質量を持つ粒子が存在しなければならない。欧州原子核研究機構 (CERN) でのLHC加速器実験の主な目的は電弱対称性の破れの物理を解明することであるが、それは同時に  $TeV$  のエネルギースケールの新しい物理の探索でもある。低スケール弦模型が真実であれば弦の励起状態が必ず発見されるはずである。しかしながら、 $TeV$  程度の質量を待った新粒子を予言する理論的仮説はたくさんある。そこで重要になるのは、 $TeV$  程度の質量の粒子が見つかった場合、それが弦模型における弦の励起状態であるのか、あるいはそうでないのかということ、どのようにして判定するかということである。

LHC加速器は陽子と陽子を衝突させる（現在の衝突エネルギーは  $7TeV$ ）ものであるが、素過程は陽子を構成しているクォークやグルーオンの衝突である。この衝突によって励起状態が生成され、それが再びクォークやグルーオン2体崩壊するという過程を探索することが発見に向けて最も有望である。終状態は、互いに正反対の方向に生ずる2束の粒子群（ジェット）となる。観測されるたくさん2ジェット事象について、各事象ごとの2ジェットの不变質量を実験で測定してその分布を見ることができる。既知の物理の範囲では滑らかな分布が期待されるが、もし何らかの励起状態（新粒子）が存在すればその上にガウス関数型の共鳴の分布が見えるはずである。

弦模型の励起状態の特徴のひとつは、励起状態が繰り返すことである。それは、弦の振動状態（モード）が、低エネルギーのものから始まり高エネルギーのものに向けて無限にあることに対応する。そこで、弦模型の検証として興味深いのは、まず1つの共鳴状態が発見されたとして、次の2番目の共鳴状態をみることができかどうかということである。そこで、低エネルギー弦模型における共鳴が実際に実験でどのように見えるかということ、弦模型の細部によらない理論的な計算を基礎として、計算機を用いたモンテカルロシミュレーションを行うことにより調べた。LHCの衝突エネルギーを、その設計値である  $14TeV$  に設定した場合、弦の張力のエネルギースケールが  $4TeV$  の場合、 $50\text{ fb}^{-1}$  の積分ルミノシティがあれば十分に発見可能であることを確認した。

弦模型の励起状態のもうひとつの特徴は、質量は縮退しているがスピンの異なる複数の粒子がその共鳴に寄与することである。これは、共鳴を構成しているジェットについて、加速器のビーム方向に対する角度分布を分析すれば明らかにすることができる。弦の第1励起状態については、スピン  $1/2$  とスピン

3/2 の粒子の重なりとして見えるはずことがわかっているが、計算機を用いたモンテカルロシミュレーションを行うことにより、LHCの衝突エネルギーを14TeVに設定した場合、弦の張力のエネルギースケールが4TeVの場合、 $20 \text{ fb}^{-1}$ の積分ルミノシティがあれば、2つの寄与を十分に分解して観測することが可能であることを確認した。

この研究は東京大学(駒場)の大学院生の橋真奈美氏との共同研究である。

#### 7) 弦理論におけるゲージ対称性の自発的破れ(北澤)

素粒子の世界において、電弱対称性という電磁相互作用と弱い相互作用を表現するためのゲージ対称性が存在し、さらにそれが自発的に破れていることは実験的に高い精度で確認されている。素粒子とそれらのあいだの相互作用を記述する確立した道具として場の量子論という枠組みがある。この枠組みにおいては上記の電弱対称性の自発的破れを実現することは比較的容易であり、LHCで現在探索中のヒッグス粒子の存在はひとつの予言である。しかしながら、素粒子とそれらのあいだの相互作用を記述する道具として弦理論を考える場合、電弱対称性の自発的破れの自発的破れを表現することは容易ではない。

低スケール弦模型を想定した場合、実験により弦の張力のエネルギースケールに下限がつくが、実験が進むにつれて、その値が大きくなってゆく可能性がある。どこまで下限が大きくなったら低スケール弦模型が排除されるかどうかを判断するために、弦の張力のエネルギースケールと電弱対称性の自発的破れのエネルギースケールの間の関係を明らかにしなければならない。そのために、最初の試みとして、ゲージ対称性の破れが実際に起こっている弦模型の構成を試みた。

この研究は高エネルギー理論研究室の小林秀太郎氏との共同研究であり、継続中のものである。

#### 8) 弦模型における宇宙論(北澤)

一般に素粒子の弦模型は超対称性を持つとは限らない。超対称性を持たない場合、そのポテンシャルエネルギーが指数関数で記述されるスカラー場がいくつか現れる。指数関数型のポテンシャルの勾配が十分に緩やかな場合には宇宙のインフレーションを説明する可能性があることが知られている。弦模型は自然に宇宙のインフレーションを説明できる可能性を持つものである。指数関数型ポテンシャルを持つスカラー場がある場合の宇宙の時間発展を分類すると、ビッグバン特異点を時間の原点としたときに、スカラー場が指数関数型のポテンシャルを高いところから単純に下った後にインフレーションを起こすものと、低いところから一度登らされてから下っていった後にインフレーションを起こすものの2種類があることがわかる。前者については、弦模型を参照せずに多くの研究がなされたきたが、後者についての研究は多くない。弦模型については後者の可能性の方が高いという考察がある。後者の可能性、“climbing phenomena”、が実現している場合の宇宙背景輻射のゆらぎを求めた。結果としてゆらぎのスケールが大きくなるにつれて緩やかにゆらぎがなくなっていくという予言が得られ、これによって、宇宙背景輻射のゆらぎの多重極展開の最も低い部分が観測からずれていることを説明できる可能性を指摘した。

この研究はピサ高等師範学校の A.Sagnotti 氏と、パリ工科大学の E.Dudas 氏および S.P.Patil 氏との共同研究である。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

K. Asano and H. Minakata: Large- $\theta_{13}$  Perturbation Theory of Neutrino Oscillation for Long-Baseline Experiments, *Journal of High Energy Physics* **1106** (2011) 022-1-26.

P. Coloma, A. Donini, J. Lopez-Pavon, and H. Minakata: Non-Standard Interactions at a Neutrino Factory; Correlations and CP Violation, *Journal of High Energy Physics* **1108** (2011) 036-1-41.

P. A. N. Machado, H. Minakata, H. Nunokawa, and R. Zukanovich Funchal: Combining Accelerator and Reactor Measurements of  $\theta_{13}$ : The First Result, *Journal of High Energy Physics* **1205** (2012) 023-1-13.

O. Yasuda: Search for sterile neutrinos at reactors, *Journal of High Energy Physics* **11** (2011) 036.

M. Hashi and N. Kitazawa: Signatures of low-scale string models at the LHC, *Journal of High Energy Physics* **12** (2012) 050.

### 2) 国際会議報告

O. Yasuda: Sensitivity to sterile neutrino mixings and the discovery channel at a neutrino factory, Proceedings of the Fifth International Conference - Beyond 2010, edited by H.V. Klapdor-Kleingrothaus, I.V. Krivosheina, R. Viollier, World Scientific Publishing Co., (2011), 300-313.

O. Yasuda: Sensitivity of T2KK to non-standard interactions, Nucl. Phys. Proc. Suppl. **217** (2011), 220-222.

O. Yasuda: Some attempts to explain MINOS anomaly, AIP Conf. Proc. **1382** (2011), 103-105.

O. Yasuda: Search for sterile neutrinos at reactors with a small core Acta Phys. Polon. **B42** (2011), 2379-2387.

### 3) 将来計画の実験計画書

S. Choubey et al. (135 authors including O. Yasuda), International Design Study for the Neutrino Factory, Interim Design Report, e-Print: arXiv:1112.2853 [hep-ex].

### 4) 学会講演

日本物理学会年会 2011 年秋季大会 2011 年 9 月 16 日 ~ 9 月 19 日 (弘前大学 文京町キャンパス)

浅野克博, 南方久和 (首都大): Chooz 限界程度の 1-3 角を持つニュートリノ振動の摂動論 (17aSA-8)

日本物理学会年会 2012 年春季年会 2012 年 3 月 24 日 ~ 3 月 27 日 (関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス)

安田修 (首都大): 小さな炉心の原子炉によるステライルニュートリノ探索の現象論 (24aGA-1)

橋 真奈美 (東京大)、北澤 敬章 (首都大): LHC 実験における low-scale string model のシグナル (24pGA-8)

## 国際会議

13th International Workshop on Neutrino Factories, Superbeams and Betabeams (NuFact11), 1-6 August 2011, CERN-University of Geneva, Geneva, Switzerland.

H. Minakata: If  $\theta_{13}$  is Large, then What?

International Workshop on "Double Beta Decay and Neutrinos", 14-17, November 2011, Osaka, Japan.

H. Minakata: Era of the Accelerator and Reactor  $\theta_{13}$  Experiments (Invited talk)

Nu HoRIZons V "Neutrinos in Physics, Astrophysics and Cosmology", 1-3, February 2012, Harish-Chandra Research Institute, Allahabad, India.

H. Minakata: Looking for Nonstandard Neutrino-Matter Interactions with Large  $\theta_{13}$  (Invited talk)

35th International Conference of Theoretical Physics (Ustron'11), September 12-18, 2011, Ustron, Poland.

O. Yasuda: Search for sterile neutrinos at reactors (Invited talk)

Sterile Neutrinos at the Crossroads, September 26-28, 2011, Blacksburg, VA, USA.

O. Yasuda: Sterile Neutrinos at the Crossroads (poster)

A topical conference on elementary particle physics and cosmology (Miami2011), December 15-20, 2011, Fort Lauderdale, Florida, USA

O. Yasuda: Search for sterile neutrinos at reactors (Invited talk)

## 5) 学会誌等

南方久和：最後の混合角  $\theta_{13}$  の発見

パリティ特集「物理科学、この1年」Vol. 27, No. 01 (2012) pp 52-53.

南方久和 (翻訳)：ニュートリノのヘリシティ反転を追い求めて

パリティ Vol. 27, No. 04 (2012) pp 20-26.

安田修：T2K 実験、第三レプトン混合角  $\theta_{13}$  の兆候をついに発見か?

日本物理學會誌 Vol. 66, No. 11 (2011) pp 810-812.

# 高エネルギー理論サブグループ

## 1. 研究活動の概要

最近の私たちの研究は超重力理論とその宇宙論への応用についてのものである。超重力理論の枠内において、現在の宇宙におけるダークエネルギーやダークマターの起源及び、初期宇宙における実現可能なインフレーション理論を探ることを主眼としている。また、超重力理論と標準理論を越える素粒子論の関連性や、超対称性の破り方についても研究している。

本研究室の研究により、初期宇宙における通常の  $(R+R^2)$  インフレーションモデルを近年構築された  $N=1$  超対称性  $F(R)$  超重力理論に自然な形で埋め込む方法が発見された。この発見により、超重力理論の枠内でシンプルかつ実現可能なカオティックインフレーションモデルが初めて示された。スローロールインフレーションとなるための唯一の条件は、 $F(R)$  関数のテイラー展開の中に非常に大きな係数の  $R^3$  の項が存在することであることが分かった (Ketov, Starobinsky)。

近年、 $F(R)$  超重力モデルとして一般の 3 次関数を持ったモデルが提唱された。このモデルは高時空曲率の領域でカオティック (スローロール) インフレーションを上手く記述できることが知られている。我々はこのモデルに簡単な修正を加え、低時空曲率の領域における宇宙定数を計算した。その結果、この修正モデルから正の宇宙定数が得られることを発見した。標準的な (普通の物質を持った) 超重力理論は負またはゼロの宇宙定数しか持つことができない。しかし  $F(R)$  超重力理論におけるインフラトン超場は ( $f(R)$  重力理論におけるインフラトンのように) 強いエネルギー条件を破り、従って従来の超重力理論の制限をも破る。また我々は最も簡潔で非自明な  $F(R)$  超重力モデルの構造について、体系的かつ詳細な調査を行った。そのモデルは  $F$  関数がスカラー超曲率  $R$  の 2 次多項式で表され、また対応する  $f(R)$  重力関数を完全に導くことができる。得られた  $f(R)$  重力関数のうち物理的なものを選択するために、我々は安定性条件を適用した。さらにこのモデルの宇宙論への応用を考え、 $F(R)$  超重力理論の現象論的な性質を評価した (Ketov, 渡邊)。

我々の研究の一つは、非線形な電磁気学で有名な Born-Infeld 作用の非可換ゲージへの拡張についての問題でもある multiple D-brane や multiple M-brane の作用を記述することにある。特に、我々は Bagger-Lambert-Gustavsson (BLG) により最近になって提案された multiple M2-branes を研究した。この BLG 理論は最大の超共形対称性を持った 3 次元時空 (3D) 上での超対称 Chern-Simons ゲージ理論として思うことができる (Ketov, 小林)。

我々は 3D,  $N=1$  の超空間の理論を用いて、van Raamsdonk により提案された形状での BLG 理論のゲージセクターの構造について研究した。Mukhi と Papageorgakis により提案された新しい Higgs 機構を用いることにより、BLG 理論から従うこととして、逆二乗のゲージ結合定数を持つ超対称 Yang-Mills 作用及び、明白な  $N=1$  の超対称性を持っている高次の項を導いた。そして、全ての高次の項は超場により記述された超対称 Yang-Mills 場の場の強さが因子となる反可換子を少なくとも一つは持っていること、即ち、高次の (時空) 微分に対する超対称 Yang-Mills 項の補正であることを見つけた (Ketov, 小林)。

私たちは、 $f(R)$  重力理論の量子化の為、高階の時間微分を含むトイモデルである、パイス-ウーレンベック振動子の正準量子化及び経路積分量子化を行った (Ketov, 弓林, 道明)。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

Sergey Ketov: *Advances in Quantum Field Theory*, InTech Open Access Publishers, 2012, ISBN 978-953-51-0035-5, 230 pages



S. V. Ketov, G. Michiaki and T. Yumibayashi: Quantizing with a higher time derivative, in *"Advances in Quantum Field Theory"*, InTech Open Access Publishers, 2012, ISBN 978-953-51-0035-5, p.p. 49-72

S. V. Ketov: F(R) supergravity and early universe: the meeting point of cosmology and high-energy physics, in *"Advances in Modern Cosmology"*, edited by Adnan Ghribi, InTech Open Access Publishers, 2011, ISBN 978-953-307-423-8, p.p. 3-38

S. V. Ketov and S. Kobayashi: Higher-derivative gauge interactions of Bagger-Lambert-Gustavsson theory in N=1 superspace, *Phys.Rev. D* **83** (2011) 045003

S. V. Ketov and A. A. Starobinsky: Embedding (R+R<sup>2</sup>)-inflation into supergravity, *Phys.Rev. D* **83** (2011) 063512

S. V. Ketov and N. Watanabe: Cosmological properties of a generic R<sup>2</sup>-supergravity, *JCAP* **1103** (2011) 011

S. V. Ketov and N. Watanabe: Cosmological constant in F(R) supergravity, *Phys.Lett. B* **705** (2011) 410-413

## 2) 国際会議報告

International Conference "Cosmology meets Particle Physics", DESY, Hamburg, September 27-30, 2011

S. Ketov: Inflation and non-minimal scalar-curvature coupling in gravity and supergravity (invited talk)

International Conference "Testing Gravity with Astrophysical and Cosmological Observations", Institute for Physics and Mathematics of the Universe (IPMU), 東京大学柏キャンパス, 23 January - 3 February, 2012

S. Ketov: Non-minimal scalar-curvature couplings in gravity and supergravity (invited talk)

国際的な活動 セルゲイ・ケトフは、2011年8月にハンブルク(ドイツ)のDESYにおける特別研究プログラム"Particles, Strings and Early Universe"招へい研究者としての任務を務めた。

# 原子核理論サブグループ

## 1. 研究活動の概要

### 1) 原子核の巨大四重極共鳴状態に対する WTMM 法を用いた強度関数の分析

これまで原子核の巨大共鳴領域における強度関数の揺らぎを、ウェーブレットに基づく WTMM 法を用いて検討し、とくにエネルギー・スケール  $\Delta E$  に伴う強度関数の特徴の変化を調べてきた。この巨大共鳴領域を含む原子核の高励起状態は、状態を特徴づける量子数が失われカオスに移行する領域と考えることができる。これは  $\Delta E$  を最小にした極限で得られる個々の準位間隔の分布からも確認できる。本研究では、強度関数のゆらぎと減衰過程を取り入れたモデルに基づき、モデルのパラメタを調節して共鳴幅を変化させて、WTMM 法による解析が共鳴幅をどのように反映するかを調べた。これによって、 $\Delta E$  とパラメタの関係をあらわす現象論的公式を得た。また、典型的な原子核  $^{40}\text{Ca}$  と  $^{208}\text{Pb}$  の理論計算に基づく解析との比較を行い、現実の原子核に対応するパラメタの値を導いた。

### 2) 極低温原子気体の静的・動的性質の研究

ポテンシャルにトラップされた極低温原子気体の研究は、有限量子多体系として、原子核物理学との共通点も多い。当研究室ではとくにボゾンやフェルミオンの種々の混合による多成分量子気体を中心に研究を進めている。

#### a) 等核フェッシュバツハ共鳴により捕獲された多成分ボース・アインシュタイン凝縮体の相分離

多成分ボース・アインシュタイン凝縮は、成分間の斥力が強い場合には相分離を引き起こすことが知られている。これにフェッシュバツハ共鳴分子が加わると、分子の生成・分離の自由度が系の安定相に影響を及ぼし、多様な相形成が実現される。これらの研究結果を論文としてまとめ、出版した。

#### b) 1次元トーラス内におけるボース・フェルミ混合系の動的性質

本研究では、1次元トーラス内におけるボース・フェルミ混合系の時間発展を追い、量子多体相関が系に与える影響を調べた。変形ポテンシャルを与えて初期基底状態を作り、ポテンシャル切断後のエネルギースペクトルを計算した結果、対称性の破れからの回復に伴うソフト・モードが発現することがわかった。これは平均場近似では現れない特有のモードで、量子多体相関により生じたものと考えられる。このような量子多体相関による物理学は核理論分野における変形核でも議論されてきた話題であり、極低温原子気体の研究分野のみならず学際的な立場からの取り組みである。また、葉巻型ポテンシャルやトーラス内における1次元ボース系の実験が精力的に行われている一方で、ボース・フェルミ混合系は未だに実現されていないため、本研究は実験グループへの具体的提言ともなるであろう。

#### c) 双極子相互作用をもつボース粒子系の格子上配位におけるエネルギー利得

電氣的・磁氣的双極子相互作用をもつ極低温原子・分子気体は、相互作用の方向依存性や長距離性がこの系の安定性に影響してさまざまな相をもたらすと予想され、さまざまな研究が進められている。しかし多くの研究では双極子の方向や運動を凍結して計算して安定配位を求めている。本研究では、双極子の方向を任意にとり、また様々な配位に対応して励起モードの安定性を調べることを目標にしている。今回はまず立方格子の基本格子点上に双極子を置き、その様々な配位を分類して、それぞれに対して双極子相互作用に基づく系のエネルギーを求め、安定な配位を調べた。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

R. Shibato, T. Nishimura, T. Watanabe, T. Suzuki: Phase separation of Bose-Einstein condensates of trapped atoms and molecules with a homonuclear Feshbach resonance, *Phys.Rev. A* **84** 043627 (2011)

T. Suzuki: Bose Fermi pair formation in the mixture of cold atomic gases, *J. Phys.: Conf. Ser.* **321** 012027(2011)

### 2) 学会講演

日本物理学会 2011 年秋季大会 2011 年 9 月 16 日～19 日 (弘前大学文京町キャンパス)

相場浩和 (京都光華女子大) 松尾正之 (新潟大) 西崎滋 (岩手大) 鈴野浩大、鈴木徹 (首都大): 巨大共鳴減衰過程の WTMM 間隔分布による分析 II

日本物理学会第 67 回年次大会 2011 年 3 月 24 日～27 日 (関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス)

相場浩和 (京都光華女子大) 松尾正之 (新潟大) 西崎滋 (岩手大) 鈴野浩大、鈴木徹 (首都大): WTMM 間隔分布で見る  $^{208}\text{Pb}$  と  $^{40}\text{Ca}$  の巨大四重極共鳴強度関数とカオス

### 国内研究会

基研研究会「熱場の量子論とその応用」2011 年 8 月 22 日～8 月 24 日 (京都大学基礎物理学研究所)

柴藤亮介、西村拓史: 1 次元トーラス内におけるボーズ・フェルミ混合系の動的性質 (ポスター発表)

### 国際会議

American Physical Society March Meeting, Boston, USA, Feb27–Mar2, 2012

R. Shibato, T. Nishimura: The Many-Body Correlation in the One-Dimensional Bose-Fermi Mixture,

### 3) 学会誌等

柴藤亮介、西村拓史: 1 次元トーラス内におけるボーズ・フェルミ混合系の動的性質、素粒子研究 119-4C(2012)F136

# 宇宙物理理論サブグループ

## 1. 研究活動の概要

宇宙理論サブグループでは、高エネルギー天体現象、銀河・銀河団の形成と進化、宇宙プラズマの基礎的物理過程の3つを大きなテーマとして、様々な天体を対象に理論的研究を進めている。2011年度のグループ構成はスタッフ2名、大学院生5名。以下は、2011年度に行った主な研究の概要である。

### 1) 再結合X線放射を示す超新星残骸の起源

超新星残骸は、爆発で放出された超新星物質と周囲の星間物質との相互作用で生じた衝撃波が、星間物質および超新星物質を加熱し高温プラズマを形成した天体である。衝撃波加熱に比べ電子衝突電離のタイムスケールが長いため、比較的若い超新星残骸では電離プラズマ状態 (ionizing) にあると考えられていたが、X線天文学衛星 *Suzaku* によって、再結合プラズマ状態 (recombining) にある超新星残骸の存在が明らかになった。何れも、電波の強度分布はシェル様であるがX線はその内部に分布する mixed-morphology SNR に分類され、GeV/TeV-線放射や分子雲との相互作用が報告されている。再結合X線放射の起源、また、これらの超新星残骸の進化を明らかにする目的で、系統的な観測および理論的研究を進めている。理論的には、一つの可能性として恒星風物質中で爆発した超新星を想定し、衝撃波のブレイクアウトによる再結合状態、衝撃波で加速された粒子によるシンクロトロン電波、線放射について調べた。

### 2) 銀河団ガスにおける乱流による粒子加速

銀河団は10 - 1000個の銀河から構成される天体で、銀河間には $10^7 - 10^8$  Kの高温ガスが広がっている。中でも、他の銀河団と衝突-合体中と見られるものは比較的高温でX線輝度も大きく、また、銀河団スケールまで広がったシンクロトロン電波放射 (電波ハロー) が観測されるものがある。衝突-合体の過程で電子がGeV領域まで加速されていると考えられるが、一方で、衝突-合体中と見られる銀河団でも電波が観測されないものがあり、電波ハローの起源はよく分かっていない。電波ハローが大域的であることから、同規模の銀河団衝突を想定し、衝撃波による加速 (1次 Fermi 加速) より乱流による加速 (2次 Fermi 加速) が効いていると考えて、電子のエネルギー分布を Fokker-Planck 方程式を用いて調べた。空間的な輸送は考えず、運動量空間でのみ輸送を扱った。得られた電子のエネルギー分布から、熱的X線光度、シンクロトロン電波強度などを計算し、観測されている値と比較した。また、エネルギー分布の時間変化から、電波ハローの寿命、非熱的硬X線放射の観測可能性を調べた。

### 3) 放射冷却する銀河団ガスのコア

重力的に緩和した銀河団では中心部のガスの放射冷却時間は Hubble 時間より短い。圧力の低下を補うように外層部から中心部にガスの流入が起きると考えられるが、以前に提唱されたような大規模なクーリングフローが起きるのでなく、局所的に静水圧平衡が保たれながら緩やかにガスが流入する準静水圧平衡にあると考えられる。このような準静水圧平衡の下で放射冷却するガスについて、引き続き解析的な研究を行った。冷却前は isothermal または polytrope のピリアル平衡とし、ダークマターの分布として King モデルと NFW モデルを考えた。密度分布の他、エントロピー分布、圧力分布、熱制動放射の輝度分布を計算し、 $(\Omega_M, \Omega_\Lambda) = (0.3, 0.7)$  宇宙の下で銀河団サンプルと比較した。

### 4) 銀河団プラズマの性質

銀河団外縁部の高温プラズマをX線衛星 *Suzaku* を用いて観測し、数値シミュレーションの結果が予想するよりも、温度が急激に減少していることを確認した。シミュレーションとのずれがどのような物理過程によるものか検討を行った。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

T. Ohnishi, K. Koyama, T.G. Tsuru, K. Masai, H. Yamaguchi, M. Ozawa: X-Ray Spectrum of a Peculiar Supernova Remnant G 359.1-0.5, *Publ. Astron. Soc. Japan* **63** (2011) 527–533

T. Shimizu, K. Masai, K. Koyama: Evolution of Supernova Remnants Expanding out of the Dense Circumstellar Matter into the Rarefied Interstellar Medium, *Publ. Astron. Soc. Japan* **64** (2012) 24/1–8

### 2) 国際会議報告

### 3) 学会講演

日本天文学会 2011 年秋季年会 2011 年 9 月 19–22 日 (鹿児島大学)

澤田真理, 小山勝二, 山口弘悦, 政井邦昭, 馬場 彩: 「すざく」 X 線分光による超新星残骸 W28 の再結合プラズマの空間分布

清水崇文, 政井邦昭: 恒星風物質 (星周物質) と相互作用する超新星残骸の進化

日本天文学会 2012 年春季年会 2012 年 3 月 19–22 日 (龍谷大学)

清水崇文, 政井邦昭: Mixed-morphology 型超新星残骸の起原

木村聖人, 政井邦昭: 銀河団における宇宙線の加速

澤田 真理, 小山 勝二, 大西隆雄, 内田裕之, 政井邦昭, 清水崇文: ASTRO-H/SXS の超精密分光による新しい SNR 進化メカニズムの解明

政井邦昭: 広帯域非分散分光撮像がもたらす超新星残骸研究の展開

### 国内研究会

HEAP2011 高エネルギー宇宙物理学研究会, 大阪大学, 2011 年 12 月 15–17 日

木村聖人, 政井邦昭: 銀河団 merger による粒子加速とガスの加熱

清水崇文, 政井邦昭: Mixed-Morphology SNRs の熱的/非熱的粒子

### 国際会議

Workshop on Chemical Evolution of the Universe, Tokyo, Japan, 31 October – 2 November, 2011

Shin Sasaki: Clusters of galaxies as a tool to study cosmology

# 非線形物理サブグループ

## 1. 研究活動の概要

### 1) 馬蹄極限における量子エノン写像のストークス幾何学の再検討

複素 WKB 法は、「カオスのトンネル効果」の必須の解析手段であるが、その根幹にあるストークス現象は、いまだ十分な理解に至っていないと、言い難い。ここでは、エノン写像の量子プロパゲータに対するストークス幾何学、特に、系が馬蹄型条件を満たす場合についてのストークス幾何学の再検討を行い、「トンネル解」がストークス幾何学の大域的性質を反映して非自明な相殺を起こす詳しい機構を解析し、写像回数無限大でのトンネル解の個数に対する詳しい漸近評価を得た。

### 2) 動的トンネル効果に対するトンネル確率の定義可能性

混合位相空間中で起こるいわゆる「カオスのトンネル効果」は、従来の 1 次元のトンネル効果とその背後にある動力学機構を異にするため、そもそもトンネル確率の定義そのものが自明でない。ここでは、単純な位相空間をもつ系を用いて、疑義のないトンネル確率の定義可能性についてさまざまな吟味をおこなった。特に、吸収境界条件を位相空間に課した量子系の共鳴固有状態虚部とトンネル確率との関係について系統的な数値計算を実行した。

### 3) 非線形共鳴によって促進されたトンネル効果の半古典解析

非線形共鳴の発生は系の非可積分性と密接に関連する。近年注目されている「非線形共鳴によって促進されたトンネル効果 (Resonance assisted tunneling)」に対する複素半古典論の立場からの解析を開始した。一般に、非線形共鳴によって促進されたトンネル効果の結果として、エネルギー分裂などトンネル効果の特徴づける量に 1 次元トンネル効果には見られない「構造」が観測される。ここではその原因を、部分 Wick 回転を施した系を考察することによって探った。可積分極限に近い状況では、複素軌道の作用虚部が Wick 回転の角度によらないこと、にも関わらず、複素空間上での軌道の形が大変形を受けることなどが明らかにされた。

### 4) 3 準位非断熱遷移におけるストークス幾何学について

多準位の非断熱遷移の問題を完全 WKB 解析の観点から考察した。とくに、Landau-Zener の 2 準位モデルを拡張した多準位非断熱遷移モデルについて、前年度数理解析研究所のグループによって発見された「新ストークス曲線上での接続が必ず現れる例」を巡ってその定量的な解析を開始した。また、さらに一般の多準位系のストークス幾何学を系統的に計算するアルゴリズムを開発した。

### 5) 量子写像および量子回路の断熱定理

量子写像と量子回路は新奇な量子ホロノミーを持つ系の例題として重要である。これらの系について、多くの状況証拠から断熱定理が成立することはもっともらしいはずである。実際、A. Dranov, J. Kellendonk and R. Seiler (1988) は、微分方程式の離散化の観点から Avron ら (1987) の断熱定理の拡張を示している。我々は離散スペクトルの仮定の下で、離散断熱定理のより簡潔な証明を示した。

### 6) 全のアンホロノミー (新奇な量子ホロノミー) のゲージ不変量

周期的なパラメータ依存を持つ Hamiltonian に対し、その固有状態を始状態としてパラメータを断熱的に一周分変化させたときの時間発展は、断熱定理のため、動力的な位相を被った上で始状態に戻ると素朴には予想される。実は、そこに幾何学的位相 (Berry 位相) が伴うことが良く知られている。一方、全のアンホロノミー (新奇な量子ホロノミーとも呼ばれる) を持つ系では、パラメータに対して周期的な依存性を持つ Hamiltonian の固有値 (固有エネルギー) が、そのパラメータの周期性に従わない

(Cheon 1998) . このため、固有値の縮退が無い(つまり、Wilczek-Zee の幾何学的位相が発現し得ない) 場合においてすら、上述と同様の時間発展では、驚くべきことに、始状態と終状態は直交する . 全のアンホロノミーは、幾何学的位相がそうであるように、量子物理の基礎概念として様々な場面に顔を出すことが期待される .

固有空間のアンホロノミーを特徴付ける量として、閉経路の前後での定常状態間の重なり積分を要素とする行列 (ホロノミー行列) とそのゲージ共変な表式が知られていたが、これは、Wilczek-Zee のホロノミーと同様に、必ずしも観測可能量を特定するものではない . これに対して、適切なゲージを見いだすことで、ホロノミー行列の標準形を求め、そこに内在するゲージ不変量を明らかにした . また、量子回路空間中の閉経路の分類を通じて、これらのゲージ不変量と、Kitagawa ら (2010) の導入した周期外力系のトポロジカル整数との比較を行なった (全教授 (高知工科大) と Kim 准教授 (Pusan Nat. Univ.) との共同研究) .

## 2. 研究業績

### 1) 論文

A. Akaishi, M. Hirata, K. Yamamoto and A. Shudo: Meeting time distributions in Bernoulli systems, *J. Phys. A : Math. Theor.* **44** (2011) 375101(12 pages)

Atushi Tanaka: Adiabatic Theorem for Discrete Time Evolution, *Journal of the Physical Society of Japan* **80** (2011) 125002-1–125002-2

Atushi Tanaka, Sang Wook Kim and Taksu Cheon: Eigenvalue and eigenspace anholonomies in hierarchical systems, *Europhysics Letters* **96** (2011) 10005-p1–10005-p6

### 2) 学会講演

日本物理学会 2012 年年次大会 2012 年 3 月 24 日 ~ 3 月 27 日 2012 年 3 月 (関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス)

田中篤司, 全卓樹, Sang Wook Kim: 固有空間と固有値のアンホロノミーでのゲージ不変量

日本物理学会第 66 回年次大会 2011 年 3 月 25 日 ~ 3 月 28 日 (新潟大学五十嵐キャンパス)

赤石暁, 平田雅樹, 山本謙一郎, 首藤啓: 力学系の meeting time の分布 III

金井真澄, 首藤啓: 多準位の非断熱遷移とストークス幾何

花田康高, 首藤啓, 池田研介: ケプラー写像における動的トンネル確率の異常増大

日本物理学会 2011 年秋季大会 2010 年 9 月 21 日 ~ 9 月 24 日 (富山大学五福キャンパス)

池田研介, 首藤啓: カオス的トンネル効果の複素半古典論

花田康高, 首藤啓, 池田研介: ケプラー写像におけるカオス的トンネル効果の異常増大

赤石暁, 平田雅樹, 山本謙一郎, 首藤啓: 混合位相空間における meeting time の分布

原田浩充, 首藤啓: トンネル複素軌道と部分 Wick 回転

田中篤司: 量子写像および量子回路での断熱定理

Annual spring meeting of the German Physical Society, March 25-30, 2013 (Berlin University)

A.Bäcker, R.Ketzmerick, S.Löck, N.Mertig and A.Shudo : Complex paths for regular-to-chaotic tunneling rates

### 国内研究会

量子論の諸問題と今後の発展 2012年3月16日～17日 (高エネルギー加速器研究機構つくばキャンパス)

田中篤司: 固有空間・固有値のアンホロノミーでのゲージ不変量 (ポスター)

### 国際会議

Advanced Study Group 2011: Towards a Semiclassical Theory of Dynamical Tunneling, Max Planck Institute for the physics of complex systems, Dresden, Germany, April 1 - Aug 15, 2011

A. Shudo: Dynamical tunneling in the anti-integrable limit (2 lectures, invited)

Satellite meeting of the international workshop on microcavities and their applications, Seoul national university, Seoul, South Korea, May 23, 2011

A. Shudo : Quantum tunneling with and without chaos (invited)

International workshop on microcavities and their applications (WOMA2011), Pusan national university, Pusan, South Korea, May 24 - 27, 2011

A. Shudo : Diffraction and Tunneling in the system with sharply divided phase space (invited)

MPIPKS focus meeting, “ Dynamical Tunneling in Non-Integrable Systems”, Max Planck Institute for the physics of complex systems, Dresden, Germany, June 14-17, 2011

A. Shudo : What does theory of complex dynamics tell us ? (invited)

International Summer School/Conference “ Let’s face chaos through nonlinear dynamics”, Maribor, Slovenia, June 26 - July 10, 2011

A. Shudo : Role of natural boundaries of KAM curves in quantum tunneling problems (invited)

Dynamics days 2012, The Sheraton Inner Harbor Hotel (Baltimore, Maryland US), Jan 4- 7, 2012

Y.Hanada, K.S. Ikeda and A. Shudo : Flooding of tunneling flux in the Kepler map

A. Akaishi, M. Hirata, K. Yamamoto and A. Shudo : Meeting time distributions in dynamical systems

International Symposium on Nano Science and Functional Materials: Post-symposium of International Symposium on Catalysis and Fine Chemicals 2011, Tokyo Metropolitan University, Dec 1, 2011

Y.Hanada, K.S. Ikeda and A. Shudo : Flooding of tunneling flux in the Kepler map



### 3) 著書等

T. Harayama and A. Shudo : Boundary element method and isospectrality in quantum billiards, 物性研究 **97** (2011) 414-420

田中篤司, 全卓樹, Sang Wook Kim: 固有値・固有空間のアンホロミーの階層的構成, 素粒子論研究 **119** (2012) D32-D38

# 凝縮系理論サブグループ

## 1. 研究活動の概要

本サブグループは、凝縮系物理の理論的研究を行っている。2011年度における研究活動の概要は次の通りである。

### 1) エネルギー状態密度の計算と相転移の次数

エネルギー状態密度を直接測定するモンテカルロ法が広く用いられるようになったが、効率よい手法として Wang-Landau アルゴリズムが知られている。これまで注意を払われてこなかった状態密度の差分に着目し、これが計算の収束、精度を議論するのに有効な量であることを示し、 $1/t$  アルゴリズムの有効性を議論した。さらに、この量が相転移の次数を判定するのに有効であることを指摘し、熱力学における Maxwell の等面積則との関連を議論した。[岡部]

### 2) モンテカルロ法の GPU による計算の高速化

近年、graphic processing unit (GPU) を高速計算に応用することが試みられ、モンテカルロ法への適用もなされるようになった。クラスターフリップアルゴリズムのモンテカルロ法の場合には、これまで GPU による並列計算は難しいとされてきたが、我々は、クラスターラベリングの効率よい並列化計算を実現することに成功し、スピン系の Swendsen-Wang タイプのクラスターアルゴリズムの計算を GPU 上に実装した。2次元イジングモデルの場合に、CPU による計算の 12.4 倍の計算速度が得られることを示した。[岡部]

### 3) モンテカルロ法の画像処理問題への応用

Mumford-Shah エネルギー汎関数による画像領域分割問題について、モンテカルロ法により低エネルギー解を安定して探索する方法を公表してきたが、さらに、グラフカット法との比較を行った。多値分割の場合、グラフカット法は、初期条件をうまく選べば、大域的なエネルギー最小値に収束するが、一般的にはよい初期条件を探すのが容易ではない。そこで、モンテカルロ法とグラフカット法を組み合わせたハイブリッド法を提案した。すなわち、モンテカルロ法により求めた解をグラフカット法の初期条件として用いる方法で、画像によらず、計算時間も短く、大域的な最小値に近づくことを示した。[岡部]

### 4) $f$ 電子系の多極子物性

近年、希土類およびアクチノイド化合物の  $f$  電子系において、軌道の自由度とスピンの自由度が結合した多極子自由度の秩序化や揺らぎに起因した現象が活発に研究されている。特に、電気単極子や磁気双極子を越えた電気四極子や磁気八極子の秩序状態が実際に観測され、さらに高次の電気十六極子秩序の可能性も議論されている。多極子は従来、 $LS$  結合描像や  $j-j$  結合描像に基づいて議論されてきた。これらは、クーロン相互作用  $U$  とスピン軌道相互作用  $\lambda$  を摂動論的に扱うスキームであるが、 $U = \infty$  の極限から  $\lambda$  を摂動論的に考慮するのが  $LS$  結合描像、 $\lambda = \infty$  の極限から  $U$  を摂動論的に考慮するのが  $j-j$  結合描像である。現実の物質では  $U$  の方が大きいので、 $LS$  結合描像で議論することが多いが、実際には  $U$  も  $\lambda$  も有限であり、 $LS$  結合描像の波動関数に  $j-j$  結合描像の成分が混ざるはずである。しかし、このような波動関数の変化が多極子状態に与える影響はこれまであまり議論されてこなかった。そこで、 $f$  電子の全ての電子配置を用いて電子状態を記述し、系の多極子物性を微視的観点から調べた。特に、 $LS$  結合描像と  $j-j$  結合描像の差がはっきり現れるハーフフィリング近傍のガドリニウムイオン  $Gd^{3+}$  ( $f^7$  電子系) の四極子モーメントとキュリウムイオン  $Cm^{4+}$  ( $f^6$  電子系) の磁気モーメントを議論した。これらの系を  $LS$  結合描像で議論すると、それぞれ四極子モーメントと磁気モーメントは存在しないと考

えられてきた。しかし、それらの四極子感受率と磁気感受率をきちんと計算すると、 $Gd^{3+}$  の四極子モーメントや  $Cm^{4+}$  の磁気モーメントが現れることを明らかにし、実際に実験で検出可能であることを議論した。本研究は、大学院生の新倉文明君との共同研究である。[堀田]

#### 5) 振動する磁性イオンの非磁性近藤効果

磁性イオンが金属中で振動すると、静止している場合と比べて、伝導電子との混成に新しいチャンネルが生じる。また、イオンが振動するので、電気双極子モーメントが発生する。このような状況では、磁気モーメントの遮蔽に起因した通常の近藤効果に加えて、電気双極子モーメントの遮蔽による新しい非磁性近藤効果の発現が期待される。そこで、振動する磁性イオンと混成する2チャンネルアンダーソンモデルを数値繰り込み群法によって解析した。 $s$ チャンネル伝導電子と局在電子の混成を  $V_0$ 、 $p$ チャンネル伝導電子との混成を  $V_1$  とすると、 $V_0 \approx V_1$  において  $s$ チャンネル近藤効果から  $p$ チャンネル近藤効果に移り変わることで、そしてその境界線上で2チャンネル近藤効果が現れることが明らかにされていた。本研究では、エントロピーや比熱の計算に加えて、磁気および電気双極子モーメントに関する感受率を計算することにより、スピンモーメントと電気双極子モーメントの遮蔽に起因する磁性および非磁性の近藤効果が生じることを見出した。また、クーロン相互作用  $U$  が大きい場合は磁気的な近藤効果が、 $U$  が小さい場合は非磁性の近藤効果が生じることを確認するとともに、電気双極子モーメントの遮蔽に起因した非磁性の2チャンネル近藤効果が起きることも見出した。その近傍では非磁性起源の非フェルミ液体効果が顕著になり、それによって、磁場に鈍感な重い電子状態が比較的容易に発現する。このように、振動する磁性イオンと伝導電子の混成は、近藤現象に新しい可能性をもたらすことが期待される。[堀田]

#### 6) スピン・電荷の輸送現象の理論

スピントロニクス的重要な課題であるスピン・電荷の輸送現象に関して、スピン蓄積を用いたスピン注入、磁化ダイナミクスを用いたスピンポンピング効果、逆スピンホール効果、温度勾配を用いたスピンドラフト生成（スピンゼーベック効果）、光誘起磁化反転などの現象に関して、微視的な解析を進め、現象の理論的理解を進めた。

スピン流の生成と測定に用いられるスピンポンピング効果と逆スピンホール効果のメカニズムに関しては、これまでの我々の研究により従来の解釈の限界と問題点が明らかになっていた。本年度はこれらの研究成果を発展させ、これらの現象は、磁化の運動がモノポールを生成し、そのモノポールがアンペール則により電流を発生しているという描像でうまく理解できることを見出した。この場合の理論は、電磁気学の体系とスピン輸送現象が既存の理論の枠内でうまく融合した体系となっている。スピン流に基づいた解釈では、その非保存性が物理的な解釈を混みいったものにしてはよく知られているが、この新しいシナリオではそうした不確定性は存在しない。モノポールシナリオは、詳細な比較については今後の解析が必要であるが、基本的にこれまでのスピン輸送実験とも整合している。この研究成果により、スピン輸送現象の新たな理解と発展の可能性が見出されたことになる。

光誘起磁化反転では、従来の逆ファラデー効果とは異なった新しい逆ファラデー効果を見出した。この効果は幾何学的磁化構造に選択的に働き、 $ns$ 以下の短時間で磁気渦などの構造を反転させることができる。さらに、従来の効果と異なりスピン軌道相互作用を用いないので、Ptなどの高価な元素を用いる必要がない点は応用上の大きなメリットである。

また、トポロジカル絶縁体の表面でのスピン誘起電荷輸送問題にも取り組んだ。この系は伝導電子が、空間2次元の相対論的なDirac方程式を満たすという物質中では非常に稀な性質を持っており、量子ゆらぎが異常な伝導特性を示す量子異常が現れることが期待される。我々は、トポロジカル絶縁体と強磁性体との接合においては、強磁性体の磁化が電流を誘起するゲージ場としてはたらいており、このゲー

ジ場により生じる量子異常が、電気伝導特性の整流化として観測できることを示した。この予言は物質中の量子異常を電気伝導から直接観測できる可能性を初めて指摘したものである。[多々良]

#### 7) 光学格子上のボーズ・フェルミ混合系が示す絶縁状態の解析

解析手法および数値手法の開発を基礎とした、光学格子上に閉じ込められたボーズ・フェルミ混合原子系が示す局在状態の成立条件の解析を行った。とくに混合系に特徴的な現象に注目し、その発生原因についてくわしい解析を目指した。光学格子上の混合原子系に特化した数値手法を開発する目的でこれまで開発してきた効率をよいシミュレーションコードを利用し、ランダムポテンシャルや準周期ポテンシャル中でボーズ・フェルミ混合系が示す特徴的な振る舞いについて詳細な解析を行った。見出した主な特徴は以下の通りである。

- ・ランダムポテンシャルでも準周期ポテンシャルでも同様の局在現象が見られた。ただしボーズ粒子とフェルミ粒子の間の相互作用の符号および大きさによって定性的に大きく異なる振る舞いが発見された。

- ・ボーズ粒子とフェルミ粒子の間に斥力相互作用が作用する場合、非局在化現象が見られた。互いの存在により深いポテンシャルから抜け出ることができるためと考えられる。

- ・ボーズ粒子とフェルミ粒子の間に引力相互作用が作用する場合、引力が強いほど局在が進む。これは、フェルミオンの存在がポテンシャルを実効的に深くするためである。しかし特別な条件が整う環境では、ある強さの引力により非局在化が見られることがわかった。この条件を詳細に検討し、引力領域での非局在化の原因を明らかにした。この非局在化はこれまで指摘されたことのない新たな現象であり、原因も含めて明らかにできたことは高く評価されている。[森]

#### 8) 2次元光学格子上のボーズ系に印加する仮想磁場の効果

冷却原子気体は中性原子であることから実磁場には応答しないが、空間変化するポテンシャルをさまざまな手法で生成することで、一様磁場に対応するベクトルポテンシャルと同じポテンシャルを作ることが実験的に可能になってきた。そのため、(仮想)磁場中の原子気体の問題が最近脚光を浴びている。

本研究では2次元光学格子上のボーズ原子系に仮想磁場が印加された状況を想定し、ボーズ凝縮を起す転移温度の磁場依存性を解析した。具体的には、光学格子として正方格子を仮定し、1セル当りの磁束を磁束量子  $\Phi_0$  を単位として  $1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6$  にさまざまに変化させたケースについて転移温度を数値的に求めた。これにより転移温度の磁場依存性が明らかになり、ボーズ凝縮がもっとも安定化する磁場の大きさについても議論した。[森]

#### 9) 二次元スピンアイスの有効モデルと相構造

四面体がコーナーを共有しながら形成する三次元的ネットワークの例としてパイロクロア格子がある。Dy や Ho を含む化合物の中には各四面体で所謂アイスルールを満たすパイロクロア磁性体(スピンアイスと呼ばれる)が知られている。[111] 方向に磁場を掛けて行くと飽和磁化の  $2/3$  で磁化プラトーが出現するが、そこではカゴメ格子上に二次元スピンアイス(カゴメアイスと呼ばれる)が実現されると考えられている。同アイスのスピン配置と六角格子ダイマーモデルのダイマー配置とは等価であるが、実際には磁場および有限温度の効果により現われる磁気モノポールの励起が重要と考えられている。我々はアイスルールを破れを含む二次元スピンアイスの性質を短距離相互作用をもつ六角格子モノマーダイマー混合系を用いて調べた。モノマー密度が低い領域では二次元双対サインゴルドンモデルを用いた記述が可能であるが、それによると弱相関ではモノマードーピングの効果はレレバントであり短距離相関をもつ無秩序相が安定化される。一方、引力相関が強い領域では磁氣的秩序に対応したコラムナー相が安定化される。これら二つの相の間の相転移は共形場理論におけるユニタリ離散系列の  $M_5$  に対応した固定点で支配される。一方、モノマー密度が低くない領域では六角格子のもつ対称性から三状態ポッツ格子ガス

模型の理論が適用可能であるが、それによると上記  $M_5$  の固定点はユニタリ離散系列の別のモデルである  $M_6$  に対する least relevant operator による摂動の結果として現われていると考えることができる。我々はモノマーダイマー混合系の全パラメータ領域にてくりこみ群フローを予測し、相転移の普遍性クラスを予言し更に転送行列の固有値解析を数値的に行うことによりこれら理論予想を定量的に確かめた。[大塚]

#### 10) 二次元スピンの AC 磁化率に関する考察

最近、上述のスピンの見られる磁気モノポールの励起に注目が集まっており、その検出および静的動的性質に関する研究が精力的に行われている。その一つとして [111] 方向に DC 磁場を掛け、さらにそれに垂直方向に AC 磁場をかけることにより得られる AC 磁化率の測定実験が、後藤-高津-門脇グループを中心に行われ興味深いデータが得られつつある。我々は特に DC 磁場が上記二次元スピンの実現する範囲にありかつ十分低温領域での AC 磁化率に関する理論的考察を行っている。そこでは磁気モノポールの励起を表す欠陥の自由度を用いた系の記述が効率的であり、二次元スピンの基底状態の spin 配置空間の持つ特徴が磁化率に強く反映されることが明らかになりつつある。本研究では、AC 磁化率を欠陥の持つ電荷の静的な空間相関を用いて近似的に書き表し、更に上述の有効理論について知られている厳密解の知識を組み合わせることによりその解析的表式を得ることに成功した。またモンテカルロ法を用いた数値計算結果とも定性的に一致する振る舞いを確認することが出来た。現在、実験データとの比較も含めたより詳細な研究を行っている。[大塚]

## 2. 研究業績

### 1) 論文

Y. Komura and Y. Okabe: Reply to the Comment on 'Phase transition of a two-dimensional generalized XY model', J. Phys. A: Math. Theor. **44** (2011) 208002(1-2).

Y. Komura and Y. Okabe: GPU-based single-cluster algorithm for the simulation of the Ising model, J. Comp. Phys. **231** (2012) 1209-1215.

Y. Komura and Y. Okabe: Difference of energy density of states in the Wang-Landau algorithm, Phys. Rev. E **85** (2012) 010102(R)(1-4).

Y. Komura and Y. Okabe: GPU-based Swendsen-Wang multi-cluster algorithm for the simulation of two-dimensional classical spin systems, Comp. Phys. Commun. **183** (2012) 1155-1161.

Takahiro Fuse, Yoshiaki Ōno, and Takashi Hotta: Heavy-Electron Formation and Bipolaronic Transition in the Anharmonic Holstein Model, J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 044701.

Kunihiro Oshiba and Takashi Hotta: Strong-Coupling Theory of Rattling-Induced Superconductivity, J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) 094712.

Fumiaki Niikura and Takashi Hotta: Magnetic behavior of curium dioxide with non-magnetic ground state, Phys. Rev. B **83** (2011) 172402.

Kunihiro Oshiba and Takashi Hotta: Electron Mass Enhancement due to Anharmonic Local Phonons, J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) SA134.

Takahiro Fuse and Yoshiaki Ōno: Rattling-Induced Heavy Fermion State in the Anharmonic Holstein Model, J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) SA136.

- Akihito Takeuchi, Gen Tatara: Spin Damping Monopole, *J. Phys. Soc. Jpn.* **81** (2012) 033705(1–4).
- Hiroaki Ueda, Akihito Takeuchi, Gen Tatara, Takehito Yokoyama: Topological charge pumping effect by the magnetization dynamics on the Surface of Three-Dimensional Topological Insulators, *Phys. Rev. B* **85**, 115110(1-6) (2012).
- Katsuhisa Taguchi, Gen Tatara: Theory of inverse Faraday effect in disordered metal in THz regime, *Phys. Rev. B* **84** (2011) 174433-(1–5).
- Kazuhiro Hosono, Akinobu Yamaguchi, Yukio Nozaki, and Gen Tatara: Microscopic theory of diffusive spin current with spin-orbit interaction, *Phys. Rev. B* **83** (2011) 144428-(1–10).
- Kazuhiro Tsutsui, Akihito Takeuchi, Gen Tatara and Shuichi Murakami: Spin Currents induced by Nonuniform Rashba-Type Spin-Orbit Field, *J. Phys. Soc. Japan* **80** (2011) 084701-(1–4).
- Kouki Nakata and Gen Tatara: Magnon Pumping by a Time-Dependent Transverse Magnetic Field in Ferromagnetic Insulators, *J. Phys. Soc. Japan* **80** (2011) 054602-(1–5).
- Akihito Takeuchi and Gen Tatara: Spin current driven by magnetization dynamic in Rashba systems, *AIP Conf. Proc.* **1399** (2011) 733–734.
- Shibata, J., Tatara, G., and Kohno, H.: A brief review of field- and current-driven domain-wall motion, *Journal of Physics D: Applied Physics* **44** (2011) 384004-(1–18).
- Akihito Takeuchi and Gen Tatara: Magnetic monopole in spin pumping systems, *J. Appl. Phys.* **111** (2012) 07C509(1–3).
- Akiko Masaki and Hiroyuki Mori: Localization of Bose-Fermi Mixtures in One-Dimensional Incommensurate Lattices, *J. Physics*, **362** (2012) 112.
- Hiromi Otsuka: Monomer-Dimer Mixture on a Honeycomb Lattice, *Phys. Rev. Lett.* **106** (2011) 227204.
- Hiromi Otsuka: Phase Transitions in Square-Lattice Dimer Model with Anisotropic Interactions, *Comp. Phys. Comm.* **182** (2011) 1888.
- 2) 学会講演
- 日本物理学会第 66 回年次大会 2011 年 3 月 25 日～3 月 28 日 (新潟大学五十嵐キャンパス)  
東日本大震災の影響により中止. 発表は成立 .
- 小村幸浩, 岡部豊: グラフィック処理ユニット (GPU) を用いたイジングモデルのシングルクラスターアルゴリズムの開発
- 佐次田哲, 岡部豊: Chan-Vese モデルによる画像領域分割における三手法の数値比較
- 堀田貴嗣: 多極子秩序相近傍の超伝導の理論
- 大柴邦洋, 堀田貴嗣: 非調和格子振動による超伝導の理論的研究
- 仲田光樹, 多々良源: Magnon Source term induced by transverse magnetic field

筒井一尋, 竹内祥人, 多々良源, 村上修一: 非一様なスピン軌道結合によるスピン流

田口勝久, 多々良源: THz 偏光下での逆ファラデー効果による磁化の微視的理論

中林紀之, 多々良源: 強磁性金属における磁場誘起スピン流の理論

正木晶子, 森弘之: 1次元擬周期ポテンシャル中でのボーズ・フェルミ混合系の局在現象

大塚博巳: 六角格子上モノマーダイマー混合系の相構造 II — Toy Model を用いた Ising Pyrochlore Magnet の解析 —

日本物理学会 2011 年秋季大会 2011 年 9 月 21 日~9 月 24 日 (富山大学五福キャンパス)

佐次田哲, 岡部豊: Mumford-Shah segmentation モデルによる画像領域分割における三手法の数値比較 II

小村幸浩, 岡部豊: グラフィック処理ユニット (GPU) を用いた q 状態ポッツモデルのマルチクラスターアルゴリズムの開発

大柴邦洋・堀田貴嗣: ラットリングによる強結合超伝導と同位体効果

新倉文明・堀田貴嗣: 非磁性基底状態を持つ  $\text{CmO}_2$  の磁氣的振舞い

植田浩明, 桃井勉: フラストレート強磁性体の磁化過程に現れるネマティック相と相分離

竹内祥人, 多々良源: スピンドランピングが生み出す磁気モノポール

田口勝久, 多々良源: スピン Berry 位相下における逆ファラデー効果

田口勝久, 多々良源: ラッシュバースピン・軌道相互作用下における円偏光誘起スピン

正木晶子, 森弘之: 擬周期ポテンシャル中でのボーズ・フェルミ混合系の局在現象

大塚博巳: 六角格子上モノマーダイマー混合系の相構造 III

日本機械学会 第 24 回計算力学講演会 (CMD2001) 2011 年 10 月 8 日~10 日 (岡山大学津島キャンパス)

野本 祐春, 小村 幸浩: G P G P U を用いたマルチフェーズフィールド法プログラムの開発

日本物理学会第 67 回年次大会 2012 年 3 月 24 日~27 日 (火) (関西学院大学 西宮上ヶ原キャンパス)

布施貴裕・堀田貴嗣: 局所ヤーンテラー振動と結合する 2 チャンネルアンダーソンモデル

堀田貴嗣・上田和夫: 振動する磁性イオンの非磁性近藤効果

多々良源: スピン流電流変換メカニズムに対する理論的知見、「スピン変換の物理とその関連現象」シンポジウム講演

竹内祥人, 多々良源: 非一様 Rashba 相互作用下での電場による電流駆動

植田浩明, 竹内祥人, 多々良源, 横山毅人: トポロジカル絶縁体表面における電流生成

佐々木優太, 植田浩明, 多々良源: 磁性体接合系におけるスピン波の伝播

後藤和基、高津浩、東中隆二、大塚博巳、門脇広明、松林和幸、上床美也、元屋清一郎：Dy<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub> のカゴメアイス状態における磁気モノポール

## 国内研究会

新学術領域研究「重い電子系の形成と秩序化」第3回研究会, 東京大学柏の葉キャンパス, 2011年6月23日~25日

布施貴裕・大野義章・堀田貴嗣: 動的平均場理論による非調和ホルスタイン模型の一次転移

大柴邦洋・堀田貴嗣: ラットリングによる超伝導の強結合理論

新学術領域研究「重い電子系の形成と秩序化」ワークショップ「多自由度強相関係の新しい量子相」, 新潟大学五十嵐キャンパス, 2011年11月12日~13日

堀田貴嗣: 振動する磁性イオンの非磁性近藤効果

新倉文明・堀田貴嗣: ガドリニウム化合物の四極子感受率

日本磁気学会第180回研究会「メタマテリアルからみた光と磁気」中央大学 2011年10月21日

多々良源: スピントロニクスにおけるモノポール (invited)

Ultracold Gases: Superfluidity and Strong Correlations (USS-2012), 東京理科大学, 2012年1月11日~13日

森弘之、正木晶子、余越翔: Bose-Fermi 混合系の絶縁状態と相互作用の役割

特定領域研究「フラストレーションが創る新しい物性」最終成果報告会 2012/1/6-8 (大阪大学吹田キャンパス銀杏会館)

後藤和基、高津浩、東中隆二、大塚博巳、門脇広明、松林和幸、上床美也、元屋清一郎：Dy<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub> のカゴメアイス状態における磁気モノポール励起

## 国際会議

Japan-Swiss Workshop on “New Electronic Properties through Structure and Correlation”, Zurich, Swiss, September 17, 2011.

Takahi Hotta: Rattling-induced superconductivity and anomalous isotope effect.

International Symposium on Nano Science and Functional Materials (Post-symposium of International Symposium on Catalysis and Fine Chemicals 2011), Minami-Osawa, Tokyo Metropolitan University, December 10, 2011.

Takahiro Fuse, Takashi Hotta, and Yoshiaki Ōno: Dynamical mean-field study on the bipolaronic transition of the anharmonic Holstein model

APS March Meeting 2012, Boston, Massachusetts, USA, February 27 - March 2 2012



H.T. Ueda, and G. Tatara: Topological charge pumping effect by the magnetization dynamics on the Surface of Three-Dimensional Topological Insulators

Katsuhisa Taguchi and Gen Tatara: Theory of the inverse Faraday effect driven by non-coplanar spin structures

CECAM-Workshop, Simulation and Modeling of Emerging Electronics -2011, The University of Hong Kong. December 12-16 2011

Gen Tatara: Maxwell's equation and monopole in spintronics (invited)

The 2nd ASRC International Workshop on Magnetic Materials and Nanostructures, Advanced Science Research Center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA), 10-12 January, 2012

Gen Tatara: Maxwell's equation and spin damping monopole in spintronics (invited)

Collaborative Conference on 3D & Materials Research, Ramada Plaza Jeju Hotel Jeju, South Korea June 27 - July 1, 2011

Gen Tatara: Spin damping monopoles in spin pumping + inverse spin Hall systems (invited)

5th International Workshop on Spin Currents, Sendai International Center, Sendai, JAPAN. July 25 - 28, 2011

Gen Tatara: Monopole in spin pumping + inverse spin Hall system (invited)

A. Takeuchi and G. Tatara: Magnetic Monopole in Spin-Orbit System with Magnetization Dynamics

K. Taguchi and G. Tatara: Theory of inverse Faraday effect in disordered metal in the THz regime

6th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology (SPINTECH6), Matsue, Japan, Aug. 1-5 (2011)

Gen Tatara: Introduction to microscopic theory of spin transport (invited lecture)

A. Takeuchi and G. Tatara: Theory of spin damping monopole

K. Taguchi and G. Tatara: Theory of inverse Faraday effect in disordered metal in the THz regime

26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), (Beijing, China), August 10 - 17, 2011

A. Takeuchi and G. Tatara: Magnetic Monopole Generated by Spin Damping with Spin-Orbit Coupling (invited)

K. Taguchi and G. Tatara: Theory of inverse Faraday effect in disordered metal in the THz regime

56th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM2011), (Scottsdale, Arizona, USA) October 30 - November 3, 2011

A. Takeuchi and G. Tatara: Magnetic Monopole Generated by Spin Damping with Spin-Orbit Coupling

7th International Conference on Advanced Materials and Devices (ICAMD 2011), (Ramada Plaza Jeju Hotel, Jeju, Korea) December 7-9, 2011

Gen Tatara: Maxwell's equation and monopole in spintronics

International Symposium on Nano Science and Functional Materials: Post-symposium of International Symposium on Catalysis and Fine Chemicals 2011, (TMU, Tokyo, Japan) December 10, 2011

A. Takeuchi: Control of spin transport in spintronics

K. Taguchi and G. Tatara: Spin polarization induced by circularly polarized light in a terahertz regime

Y. Sasaki, H.T. Ueda, and G. Tatara: Transmission and reflection of spin wave in a ferromagnetic junction,

26th International conference on low temperature physics, Beijing, China, August 10-17, 2011.

Akiko Masaki and Hiroyuki Mori Localization of Bose-Fermi Mixtures in One-Dimensional Incommensurate Lattices

### 3) 雑誌等への掲載

多々良源：Newton 「手のひらにN極だけの磁石を」 (2012年5月号)

多々良源：日経サイエンス 「固体の中をモノポールが流れる」 (2012年5月号)

多々良源：科学新聞 「相対論効果が生み出す磁気モノポールを発見」 (2012年3月23日)

森弘之：新電気 「元素の旅」(毎月連載)(オーム社)

森弘之：English Journal 「特集：ロジカルに話す」(2011年10月号)

森弘之：English Journal 「特集：ライティング力を高める」(2012年4月号)

### 4) 著書等

多々良原：ミニマム電磁気学 培風館 (2011)

# 高エネルギー実験サブグループ

## 1. 研究活動の概要

高エネルギー実験サブグループでは、日本が世界をリードしている B ファクトリーにおける、粒子・反粒子対称性の破れの研究を始めとする高エネルギー衝突型加速器実験の他、原子炉を用いたニュートリノ振動実験、宇宙から飛来する高エネルギーのニュートリノ検出実験などの幅広い物理実験を展開している。2011 年 10 月より角野秀一が准教授として着任し、本サブグループのメンバーとなった。

### 1) Belle 実験、Belle II 実験

今年度から始まった KEKB 加速器の 40 倍のルミノシティを目指す super KEKB の建設に呼応して、Belle 検出器の upgrade 版である Belle II 検出器の建設が始まった。当研究室ではこれまでの粒子識別装置を改善するために、エアロゲルを輻射体としたリングイメージチェレンコフ検出器 (A-RICH) の開発を進めている。A-RICH で使用する新型の高性能光センサーとして、HAPD (ハイブリッド・アヴァランシェフォト・ダイオード) と呼ばれる高性能の光検出器を浜松ホトニクス社と共同開発しているが、Belle II 実験では中性子の照射量が  $10^{11}/\text{cm}^2/\text{year}$  におよぶことから HAPD の中性子損傷が懸念されている。HAPD の p 層を薄くすることで、HAPD の中性子損傷が緩和されることがわかった。また、中性子損傷によるリーク電流の増加に対しては、整形回路の時定数を短くすることで対応できることがわかった。HAPD からの信号読み出しに使用される ASIC の開発は本研究室が担当しているが、整形回路の時定数を改良した SA03 を製作し、その性能の評価を行った。その結果、ほぼ予想通りの性能が確認された。 $\gamma$  線に対する放射線損傷に関しても試験を続けており、その対応方法が確立した。今年度は Belle 実験で 21 編の欧文雑誌への投稿論文が出版された。

### 2) Double Chooz 実験

ニュートリノ振動実験パラメータ  $\theta_{13}$  角を測定するために、フランスの Chooz 原子力発電所を用いたニュートリノ振動実験グループ Double Chooz に参加している。当研究室は新潟大学・東北大学・神戸大学・東京工業大学などと協力して、Double Chooz 実験でニュートリノ反応を検出するために最も重要となる、光電子増倍管 (PMT) と高電圧電源システムを担当している。Double Chooz 実験は 2011 年 4 月から本格的なデータ収集を開始した。9 月までに得られた 101 日間のデータを解析して、11 月に韓国で開催された国際会議で  $\sin^2 2\theta_{13} = 0.086 \pm 0.041(\text{stat}) \pm 0.030(\text{sys})$  という最初の結果を報告した。その後も順調にデータを取得しており、また宇宙線に起因するバックグラウンド ( ${}^9\text{Li}$ ) の理解も進み、大幅な誤差の改善が期待されている。2012 年 6 月に京都で開催されるニュートリノ国際会議で新しい結果が報告される予定である。

### 3) DCBA 実験

ニュートリノ振動実験によりニュートリノに質量があることが判明した現在、ニュートリノが Majorana 粒子である可能性が益々大きくなっている。もし、ニュートリノが Majorana 粒子であるなら、ニュートリノを放出しない二重  $\beta$  崩壊事象 ( $0\nu\beta\beta$ ) が観測されるはずである。この  $0\nu\beta\beta$  事象を、ドリフトチェンバー (DC) を利用して観測することを目指す DCBA 実験グループ (KEK、静岡大などの共同実験) に参加している。DCBA-T2 と呼ばれる常伝導電磁石と DC を組み合わせたスペクトロメーターで、二重ベータ崩壊を起こす  ${}^{100}\text{Mo}$  を 9.6% 含んだ Mo 板から複数の 2 電子崩壊事象を検出した。今年度はより高いエネルギー分解能を目指して超伝導電磁石が稼働を始めた。この超伝導電磁石はスイッチを ON すれば稼働するという特殊な冷凍機を搭載したもので、無人運転が可能となっている。現在、データが大量に蓄積されつつあり、今後の解析が期待される。

#### 4) 岩塩鉱や南極氷床を用いた超高エネルギーニュートリノ検出器の研究開発

超高エネルギーニュートリノ ( $> 10^{16} eV$ ) は宇宙空間で存在が確認されている超高エネルギー宇宙線と宇宙背景放射との衝突で生成が推測される。その飛来数が極度に低いため 10 事象/年の検出には 50Gt の検出媒質が必要となる。岩塩鉱や南極氷床中でのニュートリノ反応シャワーを捉える方法として、我々の発見した電波反射効果は媒質中の温度上昇に伴う誘電率の上昇による反射電波位相変化であることが明らかとなった。日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所の 2MeV 電子ビームによる電子ビーム照射した 435MHz 岩塩や氷充填同軸管からの電波反射波の位相を測定した。その測定値から反射振幅が再現された。さらに摂動空洞共振器法で氷の電波減衰長の測定方法の開発を行った。

#### 5) 長寿命 $\pi^+\pi^-$ 原子の探索とラムシフト測定へ向けて

CERN の 24GeV 陽子シンクロトロン陽子ビームをターゲットへ衝突させ、その時発生する長寿命  $\pi^+\pi^-$  原子を測定するための永久磁石の製作し、データ取得を行った。さらにラムシフト測定のための高磁場永久磁石の検討を行った。

#### 6) ポジトロニウムの 4 光子、5 光子崩壊過程の研究

未だ検証されていない  $\alpha^8$  の高次 QED 過程であるポジトロニウムの 5 光子稀崩壊現象のデータ取得を行った。実験データの解析から 1108 日分のデータを解析し、存在が統計的に有意な事象数を得た。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

Observation of two charged bottomonium-like resonances in  $\Upsilon(5S)$  decays

A. Bondar, A. Garmash, R. Mizuk, D. Santel, K. Kinoshita, *et al.*, (Belle collaboration)

Phys. Rev. Lett. 108, 122001 (2012)

Evidence for direct CP violation in  $B^\pm \rightarrow \eta h^\pm$  and observation of  $B^0 \rightarrow \eta K^0$

C.-T.Hoi, P.Chang, *et al.*, (Belle collaboration), Phys. Rev. Lett. 108, 031801 (2011)

Search for CP Violation in D Meson Decays to  $\phi\pi^+$

M.Staric, *et al.*, (Belle collaboration), Phys. Rev. Lett. 108, 071801 (2012)

Search for charmonium and charmonium-like states in  $\Upsilon(2S)$  radiative decays

X.L.Wang, C.P. Shen, C.Z. Yuan, P.Wang, *et al.*, (Belle collaboration)

Phys. Rev. D 84, 071107(R) (2011)

Observation of  $B^- \rightarrow p\Lambda D^0$  at Belle

P.Chen, M.-Z.Wang *et al.*, (Belle collaboration), Phys. Rev. D 84, 071501(R) (2011)

First observation of the P-wave spin-singlet bottomonium states  $h_b(1P)$  and  $h_b(2P)$

I.Adachi *et al.*, (Belle collaboration), Phys. Rev. Lett. 108, 032001 (2012)

Observation of  $D^+ \rightarrow K^+\eta'$  and search for CP violation in  $D^+ \rightarrow \pi^+\eta'$  decays"

E.Won, B.R.Ko *et al.*, (Belle collaboration), Phys. Rev. Lett. 107, 221801 (2011)

Search for Lepton-Number-Violating  $B^+ \rightarrow \ell^+\ell'^+$  decays

O.Seon, Y.-J. Kwon, T. Iijima *et al.*, (Belle collaboration)

Phys. Rev. D 84, 071106(R) (2011)

Bounds on the width, mass difference and other properties of  $X(3872) \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$  decays  
S.-K. Choi, S.L. Olsen, K. Trabelsi *et al.*, (Belle collaboration)  
Phys. Rev. D 84, 052004(R) (2011)

Study of  $B^\pm \rightarrow K^\pm(K_s K \pi)^0$  Decay and Determination of  $\eta_c$  and  $\eta_c(2S)$  Parameters  
A. Vinokurova, A. Kuzmin, and S. Eidelman *et al.*, (Belle collaboration)  
Phys. Lett. B 706, 139 (2011)

Observation of  $X(3872) \rightarrow J/\psi\gamma$  and search for  $X(3872) \rightarrow \psi'\gamma$  in B decays  
V. Bhardwaj, K. Trabelsi, J.B. Singh, S.-K. Choi, S.L. Olsen *et al.*, (Belle collaboration)  
Phys. Rev. Lett. 107, 091803 (2011)

First observation of radiative  $B^0 \rightarrow \phi K^0 \gamma$  decays and measurements of their time-dependent  $CP$  violation  
H.Sahoo, T.E.Browder *et al.*, (Belle collaboration), Phys. Rev. D 84, 071101(R) (2011)

Observation of the interference fragmentation function for charged pion pairs in  $e^+e^-$  annihilation near  $\sqrt{s} = 10.58 GeV$   
A. Vossen, R. Seidl, M. Grosse-Perdekamp, and A. Ogawa *et al.*, (Belle collaboration)  
Phys. Rev. Lett. 107, 072004 (2011)

Evidence for the Suppressed Decay  $B^- \rightarrow DK^-$ ,  $D \rightarrow K^+\pi^-$   
Y. Horii, K. Trabelsi, H. Yamamoto *et al.*, (Belle collaboration)  
Phys. Rev. Lett. 106, 231803 (2011)

Observation of  $B_s^0 \rightarrow J/\psi f_0(980)$  and Evidence for  $B_s^0 \rightarrow J/\psi f_0(1370)$   
J.Li *et al.*, (Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 106, 121802 (2011)

Study of the decays  $B \rightarrow D_{s1}(2536)^+ \bar{D}^{(*)}$   
T.Aushev *et al.*, (Belle Collaboration), Phys. Rev. D 83, 051102(R) (2011)

Measurements of time-dependent  $CP$  asymmetries in  $B \rightarrow D^{*\mp} \pi^\pm$  decays using a partial reconstruction technique  
S. Bahinipati, K. Trabelsi, and K. Kinoshita *et al.*, (The Belle Collaboration)  
Phys. Rev. D 84, 021101(R) (2011)

Search for  $CP$  Violation in the Decays  $D^0 \rightarrow K_S^0 P^0$   
B. R. Ko and E. Won *et al.*, (Belle collaboration), Phys. Rev. Lett. 106, 211801 (2011)

Search for Lepton-Flavor-Violating tau Decays into a Lepton and a Vector Meson  
Y.Miyazaki, *et al.*, (The Belle Collaboration), Phys. Lett. B 699, 4, 251-257 (2011)

Search for  $CP$  violation in  $\tau^\pm \rightarrow K_S^0 \pi^\pm \nu_\tau$  decays at Belle  
M. Bischofberger, H. Hayashii, *et al.*, (The Belle Collaboration)  
Phys. Rev. Lett. 107, 131801 (2011)

Measurement of the decay  $B^0 \rightarrow \pi^- \ell^+ \nu$  and determination of  $|V_{ub}|$   
H.Ha, E.Won *et al.*, (The Belle collaboration), Phys. Rev. D 83, 071101(R) (2011)

Indication of Reactor  $\bar{\nu}_e$  Disappearance in the Double Chooz Experiment

Y. Abe *et al.*, (Double Chooz Collaboration) , Phys. Rev. Lett. 108, 131801 (2012)

Evaluation of 400 low background 10-in. photo-multiplier tubes for the Double Chooz experiment

T. Matsubara *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A661 (2012) p16-25

A study of reactor neutrino monitoring at the experimental fast reactor JOYO

H. Furuta *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A662 (2012) p90-100

Determination of  $\pi\pi$  scattering lengths from measurement of  $\pi^+\pi^-$  atom lifetime

B. Adeva *et al.*, Phys. Lett. B 704 (2011) p24-29

Development of a gaseous PMT with micro-pattern gas detectors

T. Sumiyoshi *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A662 (2012) p90-100

## 2) 国際会議報告

Proceedings of the Seventh International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors, Cassis, France, May 3-7 2010, Nucl. Instr. Meth A639 (2011) 103-106

Study of a 144 channel multi-anode hybrid avalanche photo-detector for the Belle II RICH counter, I.Adachi *et al.*,

The Xth Nicola Cabibbo International Conference on Heavy Quarks and Leptons, Frascati, Italy, Oct. 11-15 2010, Proc. of Science (HQL2010) 035

Double Chooz status, J.Maeda

International Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics (CHEP 2010), Taipei, Taiwan, Oct. 18-22 2010, J. of Physics: Conference Series 331 (2011) 022018

Online data acquisition and the control system for the Double Chooz experiment, J.Maeda

4th International workshop on Acoustic and Radio EeV Neutrino detection Activities (ARENA 2010), Nantes, France, June 29 - July 2, 2010, Nucl. Instr. Meth. A662 (2012) 222-225

Radar for Detection of Ultra -High-Energy Neutrinos Reacting in a Rock Salt Dome, M. Chiba *et al.*

## 3) 学会講演

日本物理学会 2010 年秋季大会 2011 年 9 月 16 日 ~ 19 日 ( 弘前大学 )

高垣英幸、住吉孝行、汲田哲郎、岩田修一、坂下嘉徳ほか : Belle II 実験における Aerogel-RICH 用読み出しシステムの開発状況

森和香奈 ( 東邦大 )、住吉孝行、汲田哲郎、岩田修一、高垣英幸、坂下嘉徳ほか : BelleII 実験で使用する Aerogel-RICH 用の光検出器 HAPD の 線耐性

新里貴史 ( 東北大 ) ほか、Double Chooz Japan グループ: Gd 入り液体シンチレータを用いた小型原子炉モニターニュートリノ検出における高速中性子バックグラウンドについての研究

江森弘賢 ( 新潟大 ) ほか、Dpuble Chooz Japan グループ: Double Chooz 実験における PMT 波形解析に関する研究

今野智之（東工大）ほか、Double Chooz Japan グループ: Double Chooz 実験でのエネルギーキャリアレーションの現状

阿部陽介（東工大）ほか、Double Chooz Japan グループ: Double Chooz 実験における LED システムを用いた検出器キャリアレーション

佐藤文孝、住吉孝行、前田順平、松原綱之ほか、Double Chooz Japan グループ: Double Chooz 実験初期データによる検出器性能と安定性の評価

古田久敬（東北大）ほか、Double Chooz Japan グループ: Double Chooz 実験におけるアクシデンタルバックグラウンドの研究

田村滋（東工大）ほか、Double Chooz Japan グループ: Double Chooz 実験における宇宙線ミュオン粒子飛跡再構成手法の開発

塚越健人、住吉孝行、前田順平、佐藤文孝ほか、Double Chooz Japan グループ: Double Chooz 実験における高電圧印加システムの稼働状況

岩瀬広（KEK） 住吉孝行ほか: DCBA による二重ベータ崩壊実験 XII

川井正徳（KEK） 住吉孝行ほか: 二重ベータ崩壊実験測定器 DCBA-T3 用無冷媒超伝導ソレノイド電磁石の開発（5）

谷川孝浩，上條敏生，千葉雅美，安田修ほか: 超高エネルギーニュートリノ検出器のためのパルス電子ビームの照射による誘電体温度上昇と電波反射測定

千葉雅美，上條敏生，谷川孝浩，安田修ほか: 超高エネルギーニュートリノ検出のためのレーダー法の電波反射効率

日本物理学会 第 67 回年次大会 2012 年 3 月 24 日～27 日（関西学院大学 西宮上ヶ原キャンパス）

松澤光司、坂下嘉徳、千葉雅美: ポジトロニウムの 5 光子消滅反応の測定とデータ解析

谷川孝浩、上條敏生、千葉雅美、安田修、矢野浩之ほか: 超高エネルギーニュートリノ検出器のための電子ビーム照射による岩塩と氷からの電波反射強度測定

矢野浩之、上條敏生、谷川孝浩、千葉雅美、安田修ほか: 超高エネルギーニュートリノ検出器のための電波反射測定における位相測定

千葉雅美、上條敏生、谷川孝浩、安田修、矢野浩之ほか: 超高エネルギーニュートリノ検出のための岩塩鉱と南極氷床を利用したレーダー法

澤村慶幸（東北大）ほか、Double Chooz Japan グループ: 液体シンチレータを用いた小型原子炉ニュートリノ検出器における波形弁別によるバックグラウンド除去の研究

岩田修一、住吉孝行、角野秀一、汲田哲郎、高垣英幸、坂下嘉徳ほか: Belle II 実験のための Aerogel-RICH 検出器プロトタイプへのテストビームによる性能評価

樋口雅弘（東京理科大）、住吉孝行、角野秀一、汲田哲郎、岩田修一、高垣英幸、坂下嘉徳ほか: Belle II 実験における Aerogel-RICH 用光検出器 HAPD の放射線耐性

坂下嘉徳、住吉孝行、角野秀一、汲田哲郎、岩田修一、高垣英幸ほか: Belle II 実験における Aerogel-RICH 検出器用エレクトロニクスの開発

大矢政基 (新潟大) ほか、Double Chooz Japan グループ: Double Chooz 実験における高速中性子バックグラウンドの研究

#### 国際会議

Technology and Instrumentation in Particle Physics 2011, Chicago, USA, June 9-14, 2011

F. Sato: HV system for the Double Chooz experiment

S. Iwata: Development of Ring Imaging Cherenkov counter for Belle II experiment at super KEKB

K. Matsumoto: Development of gaseous photomultipliers with Micro Pattern Gas Detectors

The 11th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG11), Nov. 14-17, 2011, Saitama, Japan

T. Tanikawa: Measurement of radio wave reflection due to temperature rising from rock salt and ice irradiated by an electron beam for an ultra-high-energy neutrino detector

M. Chiba: An Ultra-High-Energy-Neutrino Detector Using Rock Salt and Ice as Detection Media for Radar Method

Lake Louise Winter Institute 2012, Lake Louise, Canada, Feb. 19-25, 2012

J. Maeda: First result from the Double Chooz neutrino experiment

Rencontres de Moriond, EW Interactions and Unified Theories, La Thuile, Italy, Mar. 3-10, 2012

T. Matsubara: First result from the Double Chooz reactor-neutrino experiment

#### 4) 学会誌等

石塚正基、中島恭平、早川知克、前田順平: いよいよ始まった Double Chooz 実験  
高エネルギーニュース Vol.30, No.1 (2011) p1-9



# 原子物理実験サブグループ

## 1. 研究活動の概要

9月1日付で古川武が助教として着任した。また、特任研究員であった井上洋子が転出したため、1月1日付けで宮内直弥を採用した。連携大学院教授である理化学研究所の東俊行主任研究員とその研究室スタッフは継続して客員研究員として籍を置いている。従来通り新旧のメンバーが、それぞれの得意とする技術・知識・経験を活かし、イオン衝突を中心とした原子分子物理学に関して、様々なアプローチによって精力的に研究を推進している。

### 1) 静電型イオン蓄積リングによる原子分子衝突の研究

静電型イオン蓄積リングは、周回イオンの軌道制御を静電場のみで行うイオン蓄積リングである。従来の磁場制御の場合に存在していた、周回イオン種の質量に関する制約を原理的に排除し、生体分子を含む巨大分子やクラスターイオンを長時間蓄積できるのが最大の特徴である。本学設置の静電型イオン蓄積リング TMU E-ring では、昨年度に引き続き、主に分子物質化学専攻・城丸グループとの共同研究のもと、孤立巨大分子イオンやクラスターイオンの分光実験および寿命測定を行った。

#### (1) 極低温イオントラップを備えた大型分子イオン入射システムの開発：

昨年度、大型分子生成のためのエレクトロスプレーイオン (ESI) 源の後段に、イオン数の増加と分子の回転・振動冷却を目的としてイオントラップ部を設置し、バッファーガスによって冷却された分子イオンを引き出して、電極にパルス的に高圧を加えることにより、加速したイオンをリングに導入することに成功している。この装置は前助教の間嶋拓也氏を中心にして開発したものであり、京都大学転出後も継続して共同で研究開発を行っている。今年度は、このイオントラップ部に改造を加え、1.0 W GM 冷凍機を装着した。これにより 4 K に冷却された電極に囲まれた環境下でガス衝突させることによって、さらに分子イオンの振動・回転温度が冷却される。このトラップに蓄積されたメチレンブルー正イオンを、パルス的にリングに導入することに成功した。このようにして生成した周回メチレンブルー正イオンに対する可視波長可変 OPO レーザ合流実験も開始され、室温冷却したイオンとは明瞭に異なる挙動も観測されている。今後、トラップからリングへのイオン導入効率の向上や周回中のイオンの内部温度評価などの実験へ展開予定である。

#### (2) 直鎖状炭素クラスター負イオンおよび炭化水素負イオンの寿命・分光測定：

星間空間において観測されている負分子イオンに関して、その電子脱離過程や放射性脱励起過程を探求するために、これまで直鎖状炭化水素負イオンを蓄積し電子脱離による寿命を測定してきたが、本年度は  $C_4^-$  から  $C_{10}^-$  イオンにおよぶ直鎖状炭素クラスター負イオン、さらに  $C_4H^-$ 、 $C_6H^-$ 、および  $C_8H^-$  を対象としてその挙動を統一的に理解することを目指した観測を行った。その結果、イオン源で生成され蓄積リング中をミリ秒時間領域で周回するこれらの負イオンは、小型分子イオンであるものの振動励起した高温状態にあり、自動電子脱離による中性粒子生成は冷却過程を強く反映していることが判明した。一般に負分子イオンの熱化後に起こる遅延過程による電子脱離は、分子イオンが高温では速く、低温になるにつれ遅くなると考えられる。一方、蓄積リングで起こる中性粒子生成ではこれらの過程の内、測定に適した領域のみが切り取って観測される。従って、ビーム合流型の波長可変レーザー照射によって電子脱離させる際にも、中性粒子生成によって観測される吸収スペクトルの解釈には注意を要することが明らかになった。さらに、リング中にガス導入することによって励起状態イオンと基底状態イオンの残留ガスとの衝突過程の差異に関する実験も行った。

## 2) 多価イオンの電荷移行反応

X線観測衛星によって、太陽風に含まれている多価イオンの電荷交換反応に伴う軟X線が観測されていることから、この発光過程を実験室で再現し、本学の宇宙実験サブグループが開発しているTES型マイクロカロリメータによってX線スペクトルを測定する計画がある。太陽風の速度は300–800 km/s程度であるため、電子サイクロトロン共鳴 (ECR) 型多価イオン源からの引き出し効率を向上させるレンズ系を改良するとともに、太陽風と同じ速度にまでイオンビームを減速するための静電レンズ系を設計した。また、これまではイオンビームに直交する方向から発光を観測していたが、発光断面積を測定するには偏光度に依存する発光の角度分布の影響を受けない魔法角での観測が必要である。そこで新たな装置を設計・開発し、新規購入した窓無しシリコンドリフト型半導体検出器による測定を開始した。

水素様イオンである  $O^{7+}$ ,  $N^{6+}$ , および  $C^{5+}$  を入射し、標的气体に  $H_2$ ,  $He$ , および  $CH_4$  を用いて系統的に軟X線発光スペクトルを測定した。古典的オーバーバリアモデルでも共同研究者である L. Liu による原子軌道緊密結合 (AOCC) 法による計算でも多価イオンに捕獲される電子軌道の主量子数は3–5であるが、最も強い発光は  $1s^2-1s2p$  遷移であった。これは上準位からカスケードによって  $1s2p$  状態が多く生成するためと考えられる。また、発光観測ではなくイオンの価数分析を行う電荷移行断面積測定装置でも同じ衝突系における測定を行った。入射イオンが1電子系であるため AOCC 計算は近似的なものであるが、理論と実験の結果は定性的には十分に良い一致を示し、計算の妥当性が示されている。理論計算結果にカスケード効果を取り入れて発光断面積を計算すると、実測値とは数倍程度離れることもあるが定性的な特徴は再現できている。また、幾つかの議論から、観測された発光スペクトルには許容遷移だけでなく異重項間遷移も寄与していることが判明し、これを正確に考慮することで発光断面積の絶対値について信頼性を高めていくことが課題であることが明確になった。

また、今年度から国際熱核融合実験炉 (ITER) の壁材に使用される W に関する原子分光学的データ取得を目的にして、核融合科学研究所を中心とした共同研究を開始した。首都大では ECR イオン源を用いて多価 W イオンを生成し、中性標的との電荷移行衝突に伴う脱励起光スペクトルを測定することで、価数を特定した遷移波長の決定を行う計画である。今年度は常温で白色固体である  $W(CO)_6$  の蒸気をプラズマチェンバーに導入することで、4–27 価の多価 W イオン生成を確認した。

## 3) 低温ヘリウム気体中のイオン移動度

液体窒素および液体ヘリウムによって気体を冷却できる極低温移動管質量分析装置を用いて、低温ヘリウム気体中のイオン移動度を測定している。 $H_2O$  蒸気を電子衝撃することで生成した  $OH^+$ ,  $H_2O^+$ , および  $H_3O^+$  の移動度と比較するため、重水 ( $D_2O$ ) を用いて  $OD^+$ ,  $D_2O^+$ , および  $D_3O^+$  について測定を行った。気体中の平均的な衝突エネルギーを表す実効温度  $T_{eff}$  の関数としての分子イオンの移動度は、低  $T_{eff}$  領域で一定値を取るのが一般的であるが、 $OH^+$ ,  $OD^+$ ,  $H_2O^+$  には深い極小、 $H_3O^+$  には浅い極小が見られる一方、 $D_2O^+$  と  $D_3O^+$  には極小はなかった。Born-Oppenheimer 近似の範囲では H を D に置き換えても分子イオンと He の相互作用ポテンシャルは全く同じであるから、移動度の同位体効果は分子イオンの内部自由度に起因すると考えられる。衝突エネルギーが 10 meV でも同位体効果が見られることから、電子励起や振動励起の可能性は考えられないため、分子イオンの回転励起が関与していると思われる。実際、H と D の違いによって分子イオンの慣性モーメントには差が生じ、回転励起エネルギーが異なる。この回転励起の寄与を実証するには理論的な裏付けが必要であるので、非経験的量子化学コード Gaussian09 を用いて相互作用ポテンシャルを計算した。Gaussian09 による計算の妥当性を確認するため、理論化学計算を専門とする上智大の南部伸孝氏の協力を仰いで Molpro による計算も行っている。

#### 4) イオン移動度分析装置の開発

2010年度から文部科学省・科学技術振興調整費「安全・安心な社会のための犯罪・テロ対策技術等を実用化するプログラム」において「化学剤の網羅的迅速検知システムの開発」というテーマで科学警察研究所，理化学研究所，理研計器株式会社と共同研究を開始した。首都大の担当業務は，イオン移動度を用いて化学剤 (chemical warfare agents) を検出するための基礎的データを取得することであり，具体的には大気圧で動作する移動度分析装置と差動排気型質量分析装置を組み合わせ，イオンの質量を分離した到着時間スペクトルを測定することである。本年度は，昨年度に開発を始めた装置を用いて四十極質量分析器の特性評価，大気圧放電で生成したイオンの質量分析などの予備的実験を行うとともに，理研計器の試作装置や市販の移動度分析装置で測定された質量を選別しない到着時間スペクトルの理論的な解析を行った。

#### 5) 高速多価重イオンのコヒーレント共鳴励起の研究

単結晶中を通過する高速イオンは，結晶周期ポテンシャルを振動電場として感じる。この振動数が入射イオンの原子準位エネルギー差と一致するとき，共鳴的な励起が期待される（この現象はオコロコフ効果もしくはコヒーレント共鳴励起 (RCE) と呼ばれている）。本年度は HIMAC (放射線医学総合研究所重イオン加速器) において供給される核子あたり約 400 MeV の多価重イオンをシリコン結晶に通過させ，入射イオン方向に対する結晶の角度を走査しながら，出射イオンの電荷分布，イオンから放出される2次電子，さらに脱励起 X 線を観測することによって X 線領域の原子遷移制御を目的として実験研究を引き続いて行った。

##### (1) 1重共鳴下での脱励起 X 線放出角度異方性の観測: $460 \text{ MeV/u H-like Fe}^{25+} 1s \rightarrow 2p_{1/2}, 2p_{3/2}$ :

3次元コヒーレント共鳴励起 (3D-RCE) 法によって通過イオンに対する特定の電子準位への励起が可能である。また，結晶原子面配列を選択することによって励起に利用する振動電場の偏光を制御できる。このようにして磁気副準位を選択した偏極水素様 (1個の束縛電子をもつ) 重イオンからの放出脱励起 X 線における異方性は，スピン軌道相互作用が大きく寄与し理論的にも極めて興味深い。しかしながら，実験的には適した X 線レーザーが利用できなかったため，従来困難であった。また，電子-イオン衝突による実験は報告されてきたが，このような衝突系から偏光効果を議論するのは容易ではない。我々は，1  $\mu\text{m}$  厚のシリコン結晶を通過する核子あたり 460 MeV の水素様  $\text{Fe}^{25+}$  イオンから垂直・水平方向に放出される  $K_{\alpha}$  X 線を測定した。3D-RCE に利用する結晶面の選択することによって偏光方向依存性を観測される。水素様イオンの場合， $2p_{1/2}$  準位からの X 線放出は等方的であるが， $2p_{3/2}$  準位からの放出角度分布には軌道角運動量を反映して異方性が存在し，さらにスピン軌道相互作用が影響を与える様子が明瞭に観測された。

##### (2) Ladder 型 2重共鳴下での脱励起 X 線観測: $445 \text{ MeV/u Li-like Ar}^{15+} 1s^2 2s \rightarrow 1s 2s 2p \rightarrow 2s 2p^2$ :

昨年度リチウム様 (3個の束縛電子をもつ) 重イオンの 2重共鳴励起によって生成される 3重励起状態，すなわち K 殻がすべて空孔で 3個の電子が L 殻に存在する特異な状態から放出されるオージェ電子を観測した。本年度は核子あたり 445 MeV リチウム様  $\text{Ar}^{15+}$  イオンを使った同様の条件下で，励起イオンから放出される脱励起 X 線の 2重励起条件下での増加を観測することに成功した。通過イオンの荷電分布，オージェ電子，さらに脱励起 X 線からの得られた実験結果に理論的シミュレーションを加えることによって反応過程の定量的な全容が明確になると期待される。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

H. Tanuma, H. Ohashi, N. Yamamoto, D. Kato, I. Murakami, S. Fujioka, H. Nishimura, and K. Nishihara: Charge-exchange EUV spectroscopy in collisions of  $\text{Xe}^{q+}$  ( $q = 7 - 9$ ) with rare gases, *Phys. Rev. A* **84** (2011) 042713.

H. Ohashi, S. Suda, H. Tanuma, S. Fujioka, H. Nishimura, K. Nishihara, H. A. Sakaue, N. Nakamura, and S Ohtani: EUV emission spectra of iron ions following charge exchange collisions with He, *Physica Scripta* **T144** (2011) 014030.

R. D'Arcy, O. Morris, H. Ohashi, S. Suda, H. Tanuma, S. Fujioka, H. Nishimura, K. Nishihara, C. Suzuki, T. Kato, F. Koike, and G. O 'Sullivan: Configuration interaction in charge exchange spectra of tin and xenon, *Physica Scripta* **T144** (2011) 014026.

T. Kanda, H. Ohashi, S. Maeno, T. Ishida, H. Tanuma, H. Akamatsu, Y. Abe, W. Yokota, K. Henmi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, T. Ohashi, K. Shinozaki, and K. Mitsuda: Laboratory experiments on soft x-ray emissions from the solar wind, *Physica Scripta* **T144** (2011) 014025.

H. A. Sakaue, N. Yamamoto. Morita, N. Nakamura, C. Chen, D. Kato, H. Kikuchi, I. Murakami, S. Ohtani, H. Tanuma, T. Watanabe, and H. Tawara: Electron density dependence of intensity ratio for Fe XXII extreme ultraviolet emission lines arising from different ground levels in electron beam ion trap and large helical device, *J. Appl. Phys.* **109** (2011) 073304.

Y. Nakano, S. Suda, A. Hatakeyama, Y. Nakai, K. Komaki, E. Takada, T. Murakami, and T. Azuma: Selective production of the doubly excited  $2p^2(^1D)$  state in He-like  $\text{Ar}^{16+}$  ions by resonant coherent excitation, *Phys. Rev. A* **85**, (Rapid Comm.) (2012) 020701.

S. Suda, Y. Nakano, K. Metoki, T. Azuma, Y. Takano, A. Hatakeyama, Y. Nakai, K. Komaki, E. Takada, T. Murakami: Electron emission from fast heavy ions associated with resonant coherent excitation, *Physica Scripta* **T144** (2011) 014044.

Y. Nakano, Y. Takano, T. Ikeda, Y. Kanai, S. Suda, T. Azuma, H. Bräuning, A. Bräuning-Demian, Th. Stöhlker, D. Dauvergne, Y. Yamazaki: Observation of intrashell radiative decay of Li-like uranium ( $2p_{3/2}-2s_{1/2}$ ) using silicon drift detectors, *Physica Scripta* **T144** (2011) 014010.

T. Sato, T. Majima, K. Hashimoto, K. Hashimoto, Y. Zama, J. Matsumoto, H. Shiromaru, K. Okuno, H. Tanuma, and T. Azuma: "Microhydration of the methylene blue cation in an electrospray ion source", *Eur. Phys. J. D* **63** (2011)189-194.

R. Chevrier, J. M. Daugas, L. Gaudefroy, Y. Ichikawa, H. Ueno, M. Hass, H. Haas, S. Cottenier, N. Aoi, K. Asahi, D. L. Balabanski, N. Fukuda, T. Furukawa, G. Georgiev, H. Hayashi, H. Iijima, N. Inabe, T. Inoue, M. Ishihara, Y. Ishii, D. Kameda, T. Kubo, T. Nanao, G. Neyens, T. Ohnishi, M. M. Rajabali, K. Suzuki, H. Takeda, M. Tsuchiya, N. Vermeulen, H. Watanabe, and A. Yoshimi: Is the 7/21- isomer state of 43S spherical?", *Phys. Rev. Lett.*, accepted.

Y. Togano, Y. Yamada, N. Iwasa, K. Yamada, T. Motobayashi, N. Aoi, H. Baba, S. Bishop, X. Cai, P. Doornenbal, D. Fang, T. Furukawa, K. Ieki, T. Kawabata, S. Kanno, N. Kobayashi, Y. Kondo, T. Kuboki, N. Kume, K. Kurita, M. Kurokawa, Y. G. Ma, Y. Matsuo, H. Murakami, M. Matsushita, T. Nakamura, K. Okada, S. Ota, Y. Satou, S. Shimoura, R. Shioda, K. N. Tanaka, S. Takeuchi, W. Tian, H. Wang, J. Wang, and K. Yoneda Hindered proton collectivity in  $^{2816}\text{S}12$ : Possible magic number at  $Z=16$ , *Phys. Rev. Lett.*, accepted.

## 2) 学会講演

原子衝突研究協会年会 2011年8月17日–8月19日 (新潟大学五十嵐キャンパス)

石田卓也, 神田拓真, 島谷紘史, 赤松弘規, 榎崇利, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 大橋隆哉, 大橋隼人, 篠崎慶亮, 満田和久, L. Liu, J. Wang, 田沼肇: 軽元素多価イオンの軟 X 線領域における電荷交換分光 II (ポスター)

伊藤源, 松本淳, 間嶋拓也, 城丸春夫, 田沼肇, 東俊行: TMU E-ring を用いた  $\text{C}_8\text{H}^-$  の準安定状態の寿命測定 (ポスター)

森本航, 中野祐司, 榎本嘉範, 東俊行: 極低温型静電型イオン蓄積リングの開発 (ポスター)

伊澤亮介, 山添純一, 田沼肇, 大槻一雅: 極低エネルギー領域における  $\text{H}_n\text{O}^+$  ( $n = 1 - 3$ ) - He 衝突の特異な運動量移行断面積 (ポスター)

安田知世, 須田慎太郎, 中野祐司, 東俊行, 畠山温, 中井陽一, 小牧研一郎, 高田栄一, 村上健: コヒーレント共鳴励起を使った励起イオンからの電子放出の観測 (ポスター)

第41回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム 2011年9月5日–9月7日

ハンセン クラウス, スンデン エリカ, 後藤基, 座間優, 松本淳, 城丸春夫, 阿知波洋次, 伊藤源, 田沼肇, 東俊行: イオン蓄積実験による直鎖炭素クラスターおよびポリインイオンの輻射冷却の観察

第5回分子科学討論会 2011年9月20日–23日 (札幌コンベンションセンター)

Klavs Hansen, Erika Sundén, 後藤基, 座間優, 松本淳, 城丸春夫, 阿知波洋次, 伊藤源, 田沼肇, 東俊行: 高温炭素分子イオンの分光と冷却過程

佐藤祐旭, 佐藤智子, 和田資子, 若林知成, Benjamin Wales, 入来仁隆, 間嶋拓也, 兒玉健, 城丸春夫: 炭素クラスターを骨格とする分子の生成を目指した高速イオン照射実験

日本物理学会 2011年秋季大会 2011年9月21日–9月24日 (富山大学五福キャンパス)

伊藤源, 佐藤智子, 松本淳, 間嶋拓也, 田沼肇, 東俊行, 城丸春夫, A. E. K. Sundén, K. Hansen: 静電型イオン蓄積リングを用いた水素付加炭素クラスター負イオンの蓄積および分光 (23aEA-1)

佐藤智子, 間嶋拓也, 座間優, 松本淳, 城丸春夫, 奥野和彦, 田沼肇, 東俊行: TMU E-ring のための巨大分子イオン入射システムの開発 III (23aEA-2)

石田卓也, 神田拓真, 島谷紘史, 赤松弘規, 榎崇利, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 大橋隆哉, 大橋隼人, 篠崎慶亮, 満田和久, L. Liu, J. Wang, 田沼肇: 太陽風多価イオンの電荷交換反応 (23aEA-7)

伊澤亮介, 山添純一, 田沼肇, 大槻一雅: 極低温ヘリウム気体中における  $H_nO^+$  ( $n = 0 - 3$ ) の移動度 III (24pEA-2)

齋藤和幸, 浅川拓磨, 阿部雅大, 的場史朗, 小泉哲夫, 小島隆夫, 田沼肇: He 気体中における  $Li^+$ - (limonene) クラスタイオンの移動度 (24pEA-3)

榎本嘉範, 中野祐二, 森本航, 東俊行: 極低温静電イオン蓄積リングの開発 II-(a) (23aEA-3)

森本航, 中野祐司, 榎本嘉範, 東俊行: 極低温静電型イオン蓄積リングの開発 II-(b) (23aEA-4)

中野祐司, 須田慎太郎, 高野靖史, A. Ananyeva, 金井保之, 池田時浩, 東俊行, H. Bräuning, A. Bräuning-Demian, D. Dauvergne, Th. Stöhlker, 山崎泰規: コヒーレント共鳴励起による Li-like  $U^{89+}$  イオンの精密分光 II (23aEA-10)

須田慎太郎, 中野祐司, 目時健一, 畠山温, 中井陽一, 東俊行, 小牧研一郎, 高田栄一, 村上健: コヒーレント共鳴励起にともなう電子放出の観測 V (23aEA-11)

今村慧, 古川武, 山口康広, Yang Xiaofei, 加藤裕樹, 小林徹, 幕田将宏, 畠山温, 小田島仁司, 松尾由賀利: 超流動 He 環境におけるアルカリ原子の超微細構造間隔測定 (22aEB-7)

日本物理学会 2011 年秋季大会 2011 年 9 月 16 日-9 月 19 日 (弘前大学文京町キャンパス)

古川武, 涌井崇志, 佐々木彩子, 泉さやか, 市川雄一, 吉見彰洋, 田尻邦彦, 石井裕司, 吉田直高, 松浦佑一, 加藤裕樹, 山口康広, 今村慧, 幕田将宏, 畠山温, 和田道治, 園田哲, 伊藤由太, 七尾翼, 小林徹, 西村俊二, 西村美月, 近藤洋介, 青井考, 米田健一郎, 久保野茂, 上野秀樹, 下田正, 篠塚勉, 旭耕一郎, 松尾由賀利: 超流動ヘリウム中に打ち込まれた  $87Rb$  ビームのレーザー誘起蛍光観測と光ポンピング (18pSK-14)

市川雄一, 上野秀樹, 石井裕司, 古川武, 吉見彰洋, 亀田大輔, 渡邊寛, 青井考, 旭耕一郎, D. L. Balabanski, R. Chevrier, J. M. Daugas, 福田直樹, G. Georgiev, 林宏憲, 飯島裕章, 稲辺尚人, 井上壮志, 石原正泰, 久保敏幸, 七尾翼, 大西哲哉, 鈴木都文, 土屋真人, 竹田浩之, M. Rajabali: 分散整合二回散乱法による核スピン整列 RI ビームの生成 III (18pSK-1)

川村広和, 伊藤正俊, 吉田英智, 原田健一, 及川明人, 早水友洋, 齋藤真樹, 佐藤智哉, 加藤智洋, 江連咲紀, Huliyaar S. Nataraj, Liu Shan, 酒見泰寛, 古川武, 青木貴稔, 今井憲一, 村上哲也, 畑中吉治, 若狭智嗣, 畠山温, 内田誠, 清水康弘電子 EDM 探索のための中性アルカリ原子生成装置の開発 (18aSK-5)

七尾翼, 古川武, 井上壮志, 吉見彰洋, 近森正敏, 土屋真人, 林宏憲, 石井裕司, 吉田直貴, 内田誠, 旭耕一郎: EDM 測定のための環境磁場安定化システムの構築 (18aSK-6)

井上壮志, 七尾翼, 近森正敏, 古川武, 吉見彰洋, 林宏憲, 土屋真人, 石井裕司, 吉田直貴, 内田誠, 旭耕一郎: 能動帰還型核スピンメーザーの周波数特性 (18aSK-7)

近森正敏, 井上壮志, 七尾翼, 古川武 A, 吉見彰洋 B, 土屋真人, 林宏憲, 石井裕司, 吉田直貴, 内田誠, 旭耕一郎: EDM 測定のための  $129Xe$  核スピン偏極セルの製作 (18aSK-8)

園田哲, 和田道治, 松尾由賀利, 久保敏幸, 富田英生, 坂本知佳, 能任琢真, 篠塚勉, 古川武, 涌井崇志, 伊藤由太, P. Schury, 中村聡佑, 宮武宇也, 今井伸明, 石山博恒, 平山賀一, 渡辺裕, 鄭淳讚, 岡田邦宏, 高峰愛子, Yu. Kudryavtsev, M. Huyse, P. Van Duppen: ガスセル内レーザー共鳴イオン化法の開発とレーザー核分光への応用 (18pSK-14)

日本物理学会第 67 回年次大会 2012 年 3 月 24 日–3 月 27 日 (関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス)

石田卓也, 島谷紘史, 赤松弘規, 榎崇利, 木村哲平, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 大橋隆哉, 大橋隼人, 篠崎慶亮, 満田和久, L. Liu, J. Wang, 田沼肇: 太陽風多価イオンの電荷交換反応 II (25pGC-2)

伊藤源, 松本淳, 間嶋拓也, 城丸春夫, 田沼肇, 東俊行: 静電型イオン蓄積リングを用いた水素付加炭素クラスター負イオンの蓄積および分光 II (26pAB-1)

佐藤智子, 間嶋拓也, 松本淳, 城丸春夫, 奥野和彦, 田沼肇, 東俊行: TMU E-ring のための巨大分子イオン入射システムの開発 IV (26pAB-2)

伊澤亮介, 田沼肇, 大槻一雅, 南部伸孝: 極低温ヘリウム気体中における  $\text{NH}_n^+$  ( $n = 1 - 3$ ) の移動度 (26pAB-10)

齋藤和幸, 浅川拓摩, 阿部雅大, 的場史朗, 小泉哲夫, 小島隆夫, 田沼肇, 城丸春夫:  $\text{Li}^+-(2\text{-butanol})_n$  クラスターイオンの移動度のクラスターサイズ依存性 (26pAB-11)

西尾達哉, 岸本孝則, 間嶋拓也, 須田慎太郎, 中野祐司, 東俊行, 今井誠, 柴田裕実, 土田秀次, 伊藤秋男: アバランシェフォトダイオードによる二次電子個数分布の測定 (25aAB-8)

東俊行, 中野祐司, 中井陽一, 畠山温, 小牧研一郎, 高田栄一, 村上健: コヒーレント共鳴励起による水素様重イオンから放出される  $\text{Ly-}\alpha_1$ ,  $\text{Ly-}\alpha_2$  X 線強度の角度異方性観測 (26pAB-13)

石井裕司, G. Georgiev, 市川雄一, 上野秀樹, 渡邊寛, 西村太樹, 石橋陽子, 旭耕一郎, 吉田直貴, 白井葉月, 井上壮志, 林宏憲, 土屋真人, 七尾翼, 近森正敏, 宮武裕和, 古川武, 新倉潤, J.-M. Daugas, R. Chevrier, D. L. Balabanski, R. Lozeva, C. Sotty, D. Yordanov, J. Ljungvall: 一核子抜き取り反応によるスピン整列  $^{69\text{m}}\text{Cu}$  の生成とその核モーメント測定 (24pXC-7)

松浦佑一, 古川武, 小林徹, 加藤裕樹, 山口康広, 今村慧, 畠山温, 立川真樹, 松尾由賀利: 超流動ヘリウム環境を用いた Au 原子のスピン偏極と核スピンの導出 (25pAD-1)

加藤裕樹, 古川武, 小林徹, 今村慧, 山口康広, Yang Xiaofei, 畠山温, 立川真樹, 松尾由賀利: 超流動ヘリウム環境下における In 原子の電子スピン緩和 (25pAD-2)

宮武裕和, 近森正敏, 井上壮志, 七尾翼, 吉見彰洋, 古川武, 市川雄一, 林宏憲, 土屋真人, 石井裕司, 吉田直貴, 白井葉月, 内田誠, 旭耕一郎:  $^3\text{He}$ -comagnetometer 導入に向けた、 $^3\text{He}$  核スピン偏極の生成 (25pXD-1)

井上壮志, 七尾翼, 近森正敏, 宮武裕和, 古川武, 吉見彰洋, 市川雄一, 林宏憲, 土屋真人, 石井裕司, 吉田直貴, 白井葉月, 内田誠, 旭耕一郎: 能動帰還型核スピンメーザーの周波数特性 II (25pXD-2)

七尾翼, 井上壮志, 近森正敏, 宮武裕和, 吉見彰洋, 古川武, 市川雄一, 林宏憲, 土屋真人, 石井裕司, 吉田直貴, 白井葉月, 内田誠, 旭耕一郎: EDM 測定のための NMOR を用いた原子磁力計の開発 (25pXD-7)

佐藤智哉, 青木貴稔, 江連咲紀, 古川武, 原田健一, 畠山温, 畑中吉治, 早水友洋, 今井憲一, 伊藤正俊, 加藤智洋, 川村広和, Liu Shan, 村上哲也, H.S.Nataraj, 及川明人, 清水康弘, 内田誠, 若狭智嗣, 吉田英智, 酒見泰寛: 電子 EDM 探索のための高輝度アルカリ原子ビームの開発 (25pXD-9)

日本化学会第 92 春季年会 2012 年 3 月 25 日–3 月 28 日 (慶應義塾大学日吉キャンパス・矢上キャンパス)

佐藤智子,伊藤源,駒倉健一,古川武,間嶋拓也,田沼肇,東俊行,金井恒人,Klavs Hansen,Erika Sundén,後藤 基,松本淳・阿知波洋次,城丸 春夫; 静電リングに蓄積したイオンの初期温度依存レーザー誘起遅延反応 (1A2-48)

#### 国内研究会

レーザー研シンポジウム 2011, 大阪大学コンベンションセンター, 2011年5月11日

田沼肇: レーザープラズマ放射における原子素過程の研究

TMS 研究会, 立教大学, 2011年5月21日

田沼肇: イオン移動度研究の将来

第12回「イオンビームによる表面・界面解析」特別研究会, 東京大学・生産技術研究所, 2011年12月9日-10日

中野 祐司, 須田慎太郎, 畠山温, 中井陽一, 小牧研一郎, 東俊行, 高田栄一, 村上健; 薄膜結晶におけるコヒーレント共鳴励起: 中空イオンの選択的生成

原子分子データ応用フォーラムセミナー, 核融合科学研究所, 2011年12月13日-14日

田沼肇: 酸素分子および酸素分子イオンが関係した衝突素過程

第133回質量分析関西談話会, 京都年金基金センター, 2012年2月4日

田沼肇: 気相中イオン移動度の基礎と応用 原子イオン~クラスター・巨大分子, 常温~極低温

#### 国際会議

4th International Workshop on Electrostatic Storage Devices, Gatlinburg, Tennessee, USA, 8-11 July, 2011

M. Goto, J. Matsumoto, H. Shiromaru, Y. Achiba, T. Majima, H. Tanuma, and T. Azuma: Thermometry of large molecular anion by laser-induced delayed detachment

J. Matsumoto, G. Ito, T. Majima, H. Tanuma, T. Azuma, and H. Shiromaru: Lifetime measurements of chain hydrocarbon anions and electron detachment

Y. Nakano, Y. Enomoto, W. Morimoto, and T. Azuma: Design of a cryogenic electrostatic storage ring at RIKEN

K. Hansen, A.E.K. Sundén, Y. Zama, M. Goto, J. Matsumoto, H. Shiromaru, H. Tanuma, and T. Azuma: Thermionic emission layer spectroscopy of  $C_4^-$  and  $C_6^-$

A. E. K. Sundén, M. Goto, Y. Zama, H. Shiromaru, J. Matsumoto, H. Tanuma, T. Azuma, and K. Hansen: Radiative cooling of  $C_5^-$

XVI International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarms, Maynooth, Ireland, 22-25 July, 2011



H. Tanuma: Anomalous behavior of molecular ion mobility in cooled helium gas (invited talk)

XXVII International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions, Belfast, Northern Ireland, UK, 27 July – 2 August, 2011

H. Tanuma: Unexpected mobility of  $\text{OH}^+$  and  $\text{OD}^+$  molecular ions in cooled helium gas (invited talk)

T. Sato, T. Majima, Y. Zama, M. Goto, J. Matsumoto, H. Shiromaru, K. Okuno, H. Tanuma, and T. Azuma: Laser spectroscopy of the methylene blue cation in an electrostatic ion storage ring

Y. Nakano, W. Morimoto, T. Majima, J. Matsumoto, H. Tanuma, H. Shiromaru, and T. Azuma: A cryogenic electrostatic storage ring project at RIKEN

S. Suda, Y. Nakano, K. Metoki, T. Shindo, S. Ohtsuki, T. Azuma, A. Hatakeyama, K. Komaki, Y. Nakai, E. Takada, and T. Murakami: Convoy electron emission following ionization of highly-charged ions excited by resonant coherent excitation

Y. Nakano, W. Morimoto, T. Majima, J. Matsumoto, H. Tanuma, H. Shiromaru, and T. Azuma: A cryogenic electrostatic storage ring project at RIKEN

A. Bräuning-Demian, A. Ananyevna, T. Azuma, H. Bräuning, D. Dauvergne, Y. Kanai, Y. Nakano, T. Shindo, S. Suda, and Y. Yamazaki: Resonant coherent excitation of 191.1 MeV/u  $\text{U}^{89+}$  ions planar-channeled in a silicon crystal

R. Isawa, J. Yamazoe, K. Ohtsuki, and H. Tanuma: Unexpected mobility of  $\text{OH}^+$  and  $\text{OD}^+$  molecular ions in cooled helium gas

# 宇宙物理実験サブグループ

## 1. 研究活動の概要

「すざく」衛星は順調に観測を続けており、本グループも搭載機器の軌道上較正やデータ解析プログラムの開発で主要な役割を果たすとともに、銀河系内外のさまざまな天体の観測的研究を進めている。また、日本の次期 X 線天文衛星 ASTRO-H の準備作業が、2014 年の打ち上げを目指して進められ、マイクロカロリメータによる世界初の宇宙 X 線観測を目指して、本グループも搭載機器の設計や試験を進めた。より将来の X 線観測のために、TES マイクロカロリメータと、超軽量 X 線望遠鏡の開発を精力的に進めた。

### 1) 銀河団・銀河間物質の観測

「すざく」の XIS 検出器はバックグラウンドが低いため、銀河団の周辺部の低温・低密度領域を高い感度で調べられる。ピリアル半径付近までの温度と密度が 10 以上の銀河団について調べられ、平衡に達した銀河団はほぼ同じ温度勾配で外側ほど低温になること、一方ガスのエントロピー ( $kTn^{-2/3}$ ) が、外縁部では力学平衡からの予想より低くなることがわかった。多くの銀河団で、ピリアル半径付近では高温ガスが平衡状態に十分達しておらず、まだ加熱の途中にあることを示す結果である。

一方、電波リリックという円弧状の電波放射を示す銀河団 A3667, A3376, CIZA 2242.8-5301 の「すざく」データを解析し、電波リリックの位置でガスの温度が 3 倍程度ジャンプすることを明らかにした。温度がジャンプする手前の低温、低輝度領域の状態を明らかにしたのははじめてである。この結果から、電波リリックが確かに衝撃波であり、銀河団ガスの加熱が起きていることを確かなものとした。

### 2) X 線による高密度星の観測

強磁場の白色矮星では磁極に落ちるガスが衝撃波で加熱され硬 X 線が放射される。従来のモデルでは、磁場の形状やガスの非平衡状態が考慮されていなかったため、X 線観測結果から導かれる白色矮星の質量が、連星運動から求めた値の半分ほどとなる場合があり、改良が望まれていた。今回、磁場の形を実際のものに近づけ、非平衡状態も考慮した新しい降着柱モデルを作り、「すざく」の観測データに適用した。その結果、特に EX Hya では導出された白色矮星質量が大きくなり、他の観測と矛盾しない値となり、モデルが正しいことが示された。この新しい降着柱モデルは、強磁場白色矮星に広く適用できるものであり、X 線観測結果から正確な白色矮星質量を求め、プラズマの加熱プロセスを現実に即して評価することが可能になった。

### 3) 「すざく」による惑星の観測

日本の「すざく」衛星は広がった X 線に対して世界で最高レベルの感度を持つ。今年度、我々は地球の超高層大気である外圏からの X 線放射の研究を進めた。10 地球半径にも広がる希薄な外圏大気は太陽風に含まれる高階電離したイオンと電荷交換反応を生じる。電子はイオンへと移動し、カスケードにより X 線輝線を放出する。こうした X 線は銀河団などのあらゆる X 線観測の前景放射となるため、太陽風フラックスとの強度関係や視線方向の依存性を押さえることが重要となる。そこで我々は電波障害などを生じるほどの太陽風が地球の磁気圏に侵入した時に生じる、磁気嵐の際のデータに着目し、手始めとして「すざく」の観測中に生じた最大の磁気嵐の際の公開データを解析して、電荷交換 X 線を発見した。そして「すざく」の質の高いデータから太陽風強度依存性を定量的に決定することに成功した。今後、さらに多くの公開データを解析予定である。また同様の手法で、火星外圏の「すざく」観測データから世界で初めて X 線を用いて太陽活動極小期の外圏密度に制限を付けることに成功した。

#### 4) TES 型カロリメータの開発

JAXA 宇宙研等との共同で数 100 素子からなるアレイ型 TES (Transition Edge Sensor) カロリメータの開発を進めている。積層配線という方法で、Si 基板の厚さ方向へ 2 層の配線を作り込むことができ、その上に TES カロリメータを形成することが課題であった。特に、配線表面の自然酸化膜と、配線による段差のために TES が段切れ状態になることが問題であった。自然酸化膜については逆スパッタの条件を整えることで解決し、段切れ問題については TES の厚さを約 2 倍に厚くすることで解消した。この結果、積層配線上に 400 素子からなる TES カロリメータアレイを作ることができた。16 素子の試験モデルで X 線の信号が出ることが確認されており、今後 400 素子カロリメータの X 線照射テストを進めていく。

#### 5) 冷凍器の開発と電荷交換反応への応用

首都大の原子物理グループと共同で、電荷交換 X 線の TES カロリメータによる地上測定を目指して準備を進め、新型ヒートスイッチの試験や、2 段式 ADR によって TES を冷却するための予備実験を行った。2 段式 ADR で冷却した際 TES が超伝導転移しないという問題が明らかになり、磁気シールドの効果の数値計算で調べるとともに、冷凍機内にホール素子を導入して磁場を測定するなどの試験を行った。

#### 6) ASTRO-H へ向けた作業

2014 年の打ち上げをめざす ASTRO-H の観測装置の製作と試験を進めた。各装置のエンジニアリングモデル (EM) を製作し、その性能評価や単体環境試験などを行った。軟 X 線反射望遠鏡 (SXT) の EM 品が宇宙研、NASA/GSFC、名古屋大学との共同で製作され、宇宙研の 30 m ビームラインで性能評価試験が行われた。要求された角分解能 (Half-power diameter) 1.7 分角に対し、1.3 分角という非常によい値が得られ、フライト品でさらに良い性能を目指すことにしている。

主検出器マイクロカロリメータ (SXS) の開発でも、さまざまな検討を行なった。超流動ヘリウムの流出を阻止するための porous plug, knife-edge device などの製作と試験を住友重機械などと進め、ヘリウム排気系全体の信頼性の向上に努めた。SXS の信号を処理するためのデジタル系 PSP の開発を、埼玉大、宇宙研、NASA/GSFC、三菱重工業、NEC とともに進め、EM 品の製作、噛み合わせ試験、環境試験などを進めた。

サイエンスチームのまとめ役という立場で、ASTRO-H の検討を行なった。第 2 回の ASTRO-H Summer School を 8 月に熱海で開催、ブラックホールと降着過程をテーマとして 4 名の講師をお願いし、58 名の参加があった。また、7 月のスタンフォードでのサイエンス会議をはじめ、小規模の研究会も開催した。

#### 7) 超軽量 X 線光学系の開発

我々は次世代の宇宙 X 線観測衛星に向けて、従来よりも一桁軽くかつ秒角の角度分解能を達成する、マイクロマシン技術を用いた独自の微細穴光学系の開発を、宇宙研、産総研、東北大、立命館大、フロリダ大、京都大らと共同で進めている。数百  $\mu\text{m}$  の薄い基板に  $\mu\text{m}$  スケールの微細な穴をあけ、側壁を反射鏡として利用する。基板が薄いため、原理的に世界最軽量が可能であり、しかも一体成形で大量に鏡を生産できる。今年度はシリコンドライエッチングの条件出しを行い、結像性能に直結する側壁の粗さを約 10 倍改善した。さらに側壁の平滑化工程であるアニールの時間と温度も最適化して、角度分解能 14 分角を達成した。これは昨年度より 6 倍程度良い。分解能を制限しているのは、平行光を点に集光するために必要な高温塑性変形の精度であり、今後、条件出しを進める。さらに本格的な 2 回反射型望遠鏡の組立を行って、世界で初めて本手法で試作品を完成させた。可視光での結像性能は約 5 分角であり、今後 X 線で評価を行う。またシリコンの側壁への Ir 膜付けし、X 線全反射に本手法で世界で初めて成

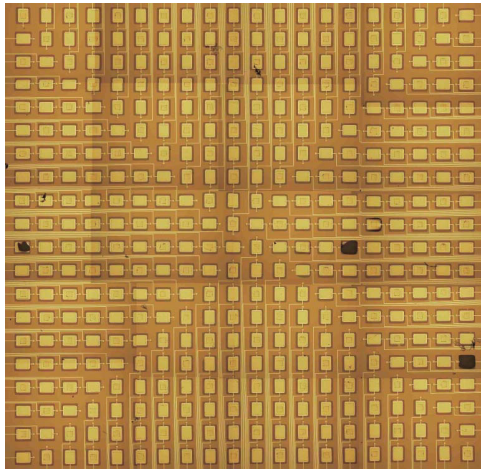


図 1: 製作された 400 素子の TES カロリメータ。大きさは 1 cm 四角。Si 基板上に積層配線を形成し、その上に TES カロリメータを作り込んでいる。

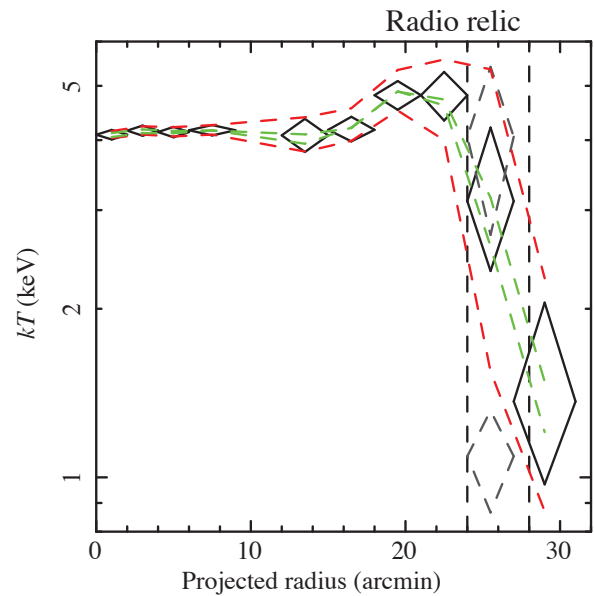


図 2: 銀河団 A3376 の電波リリック領域から発見された大きな温度ジャンプ。電波リリックが衝撃波面に対応しており、ガスが加熱されていることがはっきりした。

功した。こうした技術開発と平行して、将来の木星探査衛星、技術実証衛星へと本手法の光学系を提案しつつあり、早期の宇宙実証を目指している。

#### 8) 高い空間分解能を有する X 線望遠鏡の開発

次世代の X 線観測衛星 DIOS などを目指して薄いシリコン基板を高温塑性変形して作る新しい望遠鏡の開発を京都大と共に進めている。Al フォイルと同程度の厚みでありながら、剛性が高く、しかも平滑な基板を商業的に得ることが可能なため、軽量性を保ちつつ、角度分解能を 1 桁以上向上することができると考えられる。今年度は数  $\mu\text{m}$  以下の精度で理想曲面と一致する超高精度治具の製作をメーカーと協力して実現し、変形した基板の X 線結像性能を評価した。しかし変形基板の形状が十分高くなかったために、角度分解能は Al フォイルで実現している数分角より有意に悪かった。主原因は変形時のストレスによる基板表面のしわであり、今後は新しい変形装置を用いて、変形圧力、温度、速度などの最適化を進めてゆく。

#### 9) 将来の X 線天文衛星へ向けた検討

温度  $10^6$  K ほどの中高温の銀河間ガスは、宇宙のバリオン全体の約半分を占め、宇宙の大構造をトレースして分布すると考えられているが、まだその分布はほとんどわかっていない。これを酸素の輝線 ( $\text{O}_{\text{VII}}$ ,  $\text{O}_{\text{VIII}}$ ) を使ってサーベイするために、専用小型衛星 DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) を 2017 年頃の打ち上げを目指して検討した。11 月に首都大で研究環の補助による国際シンポジウム「Chemical Evolution of the Universe」を開催するとともに、DIOS Collaboration 会議を開催し、国際協力の進め方についても議論した。また、2022 年の打ち上げを目指す、大型 X 線ミッション ATHENA (それまでの IXO を変更したもの) の科学的検討と宇宙物理学委員会へのスタディ提案をおこなった。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

Y. Takei, E. Ursino, E. Branchini, T. Ohashi, H. Kawahara, K. Mitsuda, L. Piro, A. Corsi, L. Amati, J.-W. den Herder, M. Galeazzi, J. Kaastra, L. Moscardini, F. Nicastro, F. Paerels, M. Roncarelli, M. Viel: Studying the Warm-hot Intergalactic Medium in Emission, *The Astrophysical Journal*, **734**, id. 91 (2011)

T. Sousbie, C. Pichon, H. Kawahara: The persistent cosmic web and its filamentary structure - II. Illustrations, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **414**, 384-403 (2011)

Y. Fujii, H. Kawahara, Y. Suto, S. Fukuda, T. Nakajima, T. A. Livengood, E. L. Turner: Colors of a Second Earth. II. Effects of Clouds on Photometric Characterization of Earth-like Exoplanets, *The Astrophysical Journal*, **738**, id. 184 (2011)

H. Kawahara, Y. Fujii: Mapping Clouds and Terrain of Earth-like Planets from Photometric Variability: Demonstration with Planets in Face-on Orbits, *The Astrophysical Journal Letters*, **739**, L62 (2011)

Y. Ezoe, Y. Miyoshi, H. Yoshitake, K. Mitsuda, N. Terada, S. Oishi, T. Ohashi: Enhancement of Terrestrial Diffuse X-Ray Emission Associated with Coronal Mass Ejection and Geomagnetic Storm, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **63**, S691-S704 (2011)

K. Ishikawa, Y. Ezoe, T. Ohashi, N. Terada, Y. Futaana: X-Ray Observation of Mars at Solar Minimum with Suzaku, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **63**, S705-S712 (2011)

H. Murakami, M. Komiyama, K. Matsushita, R. Nagino, T. Sato, K. Sato, M. Kawaharada, K. Nakazawa, T. Ohashi, Y. Takei: Suzaku and XMM-Newton Observations of the Fornax Cluster: Temperature and Metallicity Distribution, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **63**, S963-S977 (2011)

H. Akamatsu, A. Hoshino, Y. Ishisaki, T. Ohashi, K. Sato, Y. Takei, N. Ota: X-Ray Study of the Outer Region of Abell 2142 with Suzaku, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **63**, S1019-S1033 (2011)

I. Mitsuishi, A. Gupta, N. Y. Yamasaki, Y. Takei, T. Ohashi, K. Sato, M. Galeazzi, J. P. Henry, R. L. Kelley: Search for X-Ray Emission Associated with the Shapley Supercluster with Suzaku, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **64**, 18 (2011)

Y. Ezoe, T. Moriyama, T. Ogawa, T. Kakiuchi, I. Mitsuishi, K. Mitsuda, T. Aoki, K. Morishita, K. Nakajima: Large-aperture focusing of x rays with micropore optics using dry etching of silicon wafers, *Optics Letters*, **37**, 779 (2012)

Y. Ezoe, R. Fujimoto, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda, T. Ohashi, K. Ishikawa, S. Oishi, Y. Miyoshi, N. Terada, Y. Futaana, S. F. Porter, G. Brown: Suzaku Observations of Charge Exchange Emission from Solar System Objects, *Astron. Nachr.*, **333**, 319-323 (2012)

## 2) 国際会議報告

Y.Ezoe, Y.Ishisaki, S.Oishi, Y.Abe, T.Ohashi, H.Yoshitake, N.Sekiya, N.Y.Yamasaki, K.Mitsuda, T.Morooka, K.Tanaka: Development of Multilayer Readout Wiring for Large-format TES X-ray Microcalorimeter Arrays, *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, **21**, 246-249 (2011)

T. Kanda, H. Ohashi, S. Maeno, T. Ishida, H. Tanuma, H. Akamatsu, Y. Abe, W. Yokota, K. Henmi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, T. Ohashi, K. Shinozaki, K. Mitsuda: Laboratory experiments on soft x-ray emissions from the solar wind, *Physica Scripta*, **144**, 014025 (2011)

Y. Ishisaki, K. Henmi, H. Akamatsu, T. Enoki, T. Ohashi, A. Hoshino, K. Shinozaki, H. Matsuo, N. Okada, T. Oshima: Development of Active Gas-Gap Heat Switch for Double-Stage Adiabatic Demagnetization Refrigerators, *Journal of Low Temperature Physics*, **167**, 777-782 (2012)

S. Oishi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, Y. Abe, Y. Enokijima, R. Hosoya, T. Ohashi, K. Mitsuda, T. Morooka, K. Tanaka: Development of Superconducting Multilayer Wiring for Large Arrays of TES X-ray Microcalorimeters, *Journal of Low Temperature Physics*, **167**, 220-225 (2012)

T. Enoki, Y. Ishisaki, H. Akamatsu, Y. Ezoe, T. Ohashi, T. Kanda, T. Ishida, H. Tanuma, K. Shinozaki, K. Mitsuda: Development of Laboratory Experimental System to Clarify Solar Wind Charge Exchange Mechanism with TES Microcalorimeter, *Journal of Low Temperature Physics*, **167**, 771-776 (2012)

Y. Shimoda, H. Seta, M. S. Tashiro, Y. Terada, Y. Ishisaki, M. Tsujimoto, K. Mitsuda, T. Yasuda, S. Takeda, Y. Hiyama, K. Masukawa, K. Matsuda, K. R. Boyce: Development of a Digital Signal Processing System for the X-ray Microcalorimeter onboard ASTRO-H (II), *Journal of Low Temperature Physics*, **167**, 575-581 (2012)

K. Mitsuda, R. L. Kelley, K. R. Boyce, G. V. Brown, E. Costantini, M. J. DiPirro, Y. Ezoe, R. Fujimoto, K. C. Gendreau, J.-W. den Herder, A. Hoshino, Y. Ishisaki, C. A. Kilbourne, S. Kitamoto, D. McCammon, M. Murakami, H. Murakami, M. Ogawa, T. Ohashi, A. Okamoto, S. Paltani, M. Pohl, F. S. Porter, Y. Sato, K. Shinozaki, P. J. Shirron, G. A. Sneiderman, H. Sugita, A. Szymkowiak, Y. Takei, T. Tamagawa, M. Tashiro, Y. Terada, M. Tsujimoto, C. de Vries, N. Y. Yamasaki: The High-Resolution X-Ray Microcalorimeter Spectrometer, SXS, on Astro-H, *Journal of Low Temperature Physics*, **167**, 795-802 (2012)

Y. Takei, H. Akamatsu, Y. Hiyama, Y. Maeda, M. Ishida, H. Mori, Y. Ishisaki, A. Hoshino: Stray light of Suzaku XRT from Crab offset observations, *SUZAKU 2011: Exploring the X-ray Universe: Suzaku and Beyond. AIP Conference Proceedings*, **1427**, 239-240 (2012)

H. Kawahara: SUZAKU observation of filamentary junctions in the SDSS galaxies, *SUZAKU 2011: Exploring the X-ray Universe: Suzaku and Beyond. AIP Conference Proceedings*, **1427**, 340-341 (2012)

I. Mitsuishi, A. Gupta, N. Y. Yamasaki, Y. Takei, T. Ohashi, K. Sato, M. Galeazzi, J. P. Henry, R. L. Kelley: Search for X-ray emission from the Shapley supercluster and the WHIM with Suzaku, *SUZAKU 2011: Exploring the X-ray Universe: Suzaku and Beyond. AIP Conference Proceedings*, **1427**, 344-345 (2012)

M. Kawaharada, N. Okabe, K. Umetsu, M. Takizawa, K. Matsushita, Y. Fukazawa, T. Hamana, S. Miyazaki, K. Nakazawa, T. Ohashi: ICM in Cluster Outskirts Affected by Large Scale Structure Discovered in A1689, *The X-ray Universe 2011*, 087 (2011)

T. Ohashi: Search for WHIM in X-rays, *The X-ray Universe 2011*, 012 (2011)

L. Piro, J.-W. den Herder, T. Ohashi, D. H. Hartmann, C. Kouveliotou: ORIGIN: Metal Creation and Evolution From The Cosmic Dawn, *GAMMA RAY BURSTS 2010. AIP Conference Proceedings*, **1358**, 427-430 (2011)

R.E. Riveros, M. A. Tan, H. Yamaguchi, I. Mitsuishi, K. Ishizu, T. Moriyama, T. Ogawa, Y. Ezoe, M. Horade, S. Sugiyama, Y. Kanamori, N.Y. Yamasaki, K. Mitsuda: Progress on the magnetic field-assisted finishing of MEMS micropore x-ray optics, *Optics for EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Astronomy V. Edited by O'Dell, Stephen L.; Pareschi, Giovanni. Proceedings of the SPIE*, **8147**, 814715-814715-10 (2011)

T. Ogawa, Y. Ezoe, T. Moriyama, T. Ohashi, I. Mitsuishi, K. Mitsuda, Y. Kanamori, H. Yamaguchi, R.E. Riveros: Measurement of the Taper Angle and X-ray Reflectivity of MEMS- based Silicon Mirrors, *Proc. of Optical MEMS*, 167-168 (2011)

Y. Ezoe, K. Ishizu, T. Moriyama, T. Ogawa, I. Mitsuishi, K. Mitsuda: Simulation-based Study of A MEMS Wolter Type-I X-ray Telescope, *Proc. of Optical MEMS*, 197-198 (2011)

T. Moriyama, Y. Ezoe, T. Ogawa, T. Ohashi, I. Mitsuishi, M. Mita, K. Mitsuda, Y. Kanamori, A. Maeda: Smoothing Sidewalls of A MEMS- based Silicon X-ray Optics, *Proc. of Optical MEMS*, 205-206 (2011)

C. Tao, M. Fujimoto, Y. Kasaba, T. Kimura, Y. Ezoe, M. Kagitani, H. Tadokoro, Y. Miyoshi, S. Kasahara, T. Takashima, and the JMO working group: Magnetospheric Science Targets of JMO, *Proc. EPSC-DPS*, 767-768, (2011)

### 3) 学会講演

日本物理学会 2011 年秋季大会 2011 年 9 月 16 日 ~ 19 日 (弘前大学)

石田卓也, 神田拓真, 島谷紘史, 赤松弘規, 榎崇利, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 大橋隆哉 (首都大), 大橋隼人 (電通大), 篠崎慶亮 (ARD/JAXA), 満田和久 (ISAS/JAXA), L. Liu, J. Wang (IAPCM), 田沼肇 (首都大): 太陽風多価イオンの電荷交換反応

日本天文学会 2011 年秋季年会 2011 年 9 月 19 日 ~ 22 日 (鹿児島大学)

赤松弘規, 石崎 欣尚, 大橋 隆哉 (首都大学東京): 「すざく」衛星による銀河団外縁部領域の観測 (I)

佐藤浩介, 松下恭子 (東京理科大学), 山崎典子 (ISAS/JAXA), 佐々木伸, 大橋隆哉 (首都大学東京): 「すざく」で観測された Abell 1246 銀河団の温度とエンロピー分布

佐藤拓也, 松下恭子, 佐藤浩介 (東京理科大学), 岡部信広, 梅津敬一 (ASIAA), 太田直美 (奈良女子大学), 大橋隆哉 (首都大学東京), 滝沢元和 (山形大学), 川原田円, 田村隆幸 (JAXA), 中澤知洋 (東京大学), 深沢泰司 (広島大学), 藤田裕 (大阪大学): すざく衛星による中規模銀河団 Hydra-A のピリアル半径までの観測

磯部 直樹 (ISAS/JAXA), 花田 行弥, 浅沼 匡, 岡野 仁庸, 杉山 透, 鈴木 信義, 佐原 宏典, 大橋 隆哉, 江副 祐一郎, 養王田 一尚 (首都大学), ORBIS チーム: 巨大バイナリブラックホール探査小型衛星 ORBIS の開発

大石詩穂子、石崎欣尚、江副祐一郎、榎島陽介、大橋隆哉 (首都大)、満田和久 (JAXA 宇宙研)、師岡利光 (SII)、田中啓一 (SIINT): DIOS 衛星搭載を目指した大規模ピクセル TES 型 X 線マイクロカロリメータアレイの開発

石崎欣尚、大橋隆哉、江副祐一郎 (首都大)、満田和久、山崎典子、竹井洋、辻本匡弘、小川美奈 (ISAS/JAXA)、杉田寛之、佐藤洋一、篠崎慶亮、岡本篤 (ARD/JAXA)、藤本龍一、星野晶夫 (金沢大)、田代 信、寺田幸功 (埼玉大)、北本俊二、村上弘志 (立教大)、玉川徹 (理研)、太田直美 (奈良女大)、村上正秀 (筑波大)、R. L. Kelley, C. A. Kilbourne, F. S. Porter, G. Sneiderman, K. Boyce, M. DiPirro, P. Shirron (NASA/GSFC), D. McCammon (Wisconsin 大), A. Szymkowiak (Yale 大), J.-W. den Herder, C. de Vries (SRON), S. Paltani, M. Pohl (Geneva 大) ほか ASTRO-H SXS チーム: ASTRO-H 搭載 精密軟 X 線分光装置 SXS の開発の現状 (VI)

下田優弥、瀬田裕美、田代信、寺田幸功、安田哲也、武田佐和子 (埼玉大)、石崎欣尚、檜山裕一 (首都大)、辻本匡弘、満田和久 (ISAS/JAXA)、Kevin Boyce (NASA/GSFC)、松田健司、益川一範 (三菱重工業)、ASTRO-H/SXS チーム: ASTRO-H 搭載 精密軟 X 線分光装置 SXS の波形処理システム PSP の開発の現状 (IV)

武田佐和子、田代信、寺田幸功、瀬田裕美、下田優弥、安田哲也 (埼玉大)、石崎欣尚、檜山祐一 (首都大)、辻本匡弘、満田和久 (ISAS/JAXA)、Kevin Boyce (NASA/GSFC)、ASTRO-H/SXS チーム: ASTRO-H 搭載 精密軟 X 線分光装置 SXS の波形処理システム PSP のアルゴリズムを用いた波形データの解析

大橋隆哉、石崎欣尚、江副祐一郎 (首都大)、田原 譲 (名古屋大)、満田和久、山崎典子、竹井 洋 (ISAS/JAXA)、J. -W. den Herder (SRON)、DIOS ワーキンググループ: ダークバリオンの探査を目指す小型科学衛星 DIOS の開発の現状

榎崇利、木村哲平、赤松弘規、江副祐一郎、石崎欣尚、大橋隆哉、石田卓也、島谷紘史、田沼肇 (首都大)、篠崎慶亮 (ARD/JAXA)、満田和久 (ISAS/JAXA): TES 型 X 線マイクロカロリメータを用いた電荷交換反応機構の解明 (2)

地球電磁気・惑星圏学会 2011 年 11 月 4 日 (神戸大学)

江副 祐一郎, 森山 鉄平, 小川 智弘, 垣内 巧也, 石川 久美, 大橋 隆哉, 木村 智樹, 笠原 慧, 山崎 敦, 藤本 正樹, 三石 郁之, 満田 和久, 三好 由純: 木星探査計画 EJSM JMO に向けた X 線撮像・分光装置の検討

応用物理学会 2012 年春季大会 2012 年 3 月 15 日 ~ 18 日 (早稲田大学)

垣内巧也、江副祐一郎 (首都大)、三石郁之、満田和久 (ISAS/JAXA)、洞出光洋 (名古屋大)、杉山進 (立命館大)、Riveros Raul (フロリダ大)、金森義明 (東北大)、森下浩平 (京都大)、前田龍太郎 (産総研)、森山鉄平、小川智弘、大橋隆哉 (首都大)、山口ひとみ (フロリダ大)、中嶋一雄 (京都大): 将来衛星に向けた超軽量、高分解能 MEMS 光学系の基礎開発 (4)

日本天文学会 2012 年春季年会 2012 年 3 月 19 日 ~ 22 日 (龍谷大学)



赤松弘規, 河原創, 石崎欣尚, 大橋隆哉 (首都大学東京): ASTRO-H SXS による X 線精密分光観測で挑む銀河団形成・進化過程

小波さおり (理研/東京理科大), 竹井 洋 (ISAS/JAXA), 大橋隆哉 (首都大学), 佐藤浩介 (東京理科大), Eugene Churazov, Irina Zhuravleva, Rashid Sunyaev (MPA): Astro-H で探る銀河団中心における共鳴散乱の直接観測

川原田 円 (ISAS/JAXA), 岡部信広 (ASIAA), 田村隆幸 (ISAS/JAXA), 藤田裕 (大阪大), 滝沢元和 (山形大), 松下恭子 (東京理科大), 佐藤浩介 (東京理科大), 太田直美 (奈良女子大), 中澤知洋 (東京大), 大橋隆哉 (首都大): ASTRO-H で診る銀河団の進化に伴う銀河団ガスの加熱と粒子加速

江副 祐一郎, 石川 久美, 大橋 隆哉 (首都大), 三好 由純 (名古屋大), 木村 智樹 (JAXA 宇宙研), 寺田直樹 (東北大): ASTRO-H で拓く太陽系天体の物理

石川久美, 江副祐一郎, 大橋隆哉 (首都大), 三好由純 (名古屋大), 寺田直樹 (東北大): 磁気嵐に伴う地球からの広がった軟 X 線放射の「すざく」による観測

佐藤 浩介, 松下 恭子 (東京理科大学), 赤松 弘規, 大橋 隆哉 (首都大学東京), 藤田 裕 (大阪大学), 川原田 円, 田村 隆幸 (ISAS/JAXA), 中澤 知洋 (東京大学), 岡部 信広 (ASIAA), 太田 直美 (奈良女子大学), 滝沢 元和 (山形大学): Abell 2199 銀河団のビリアル半径までの温度/エントロピー/質量分布

田代 信, 寺田幸功 (埼玉大), 満田和久, 山崎典子, 竹井洋, 辻本匡弘, 小川美奈 (ISAS/JAXA), 杉田寛之, 佐藤洋一, 篠崎慶亮, 岡本篤 (ARD/JAXA), 大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎 (首都大), 藤本龍一, 星野晶夫 (金沢大), 北本俊二, 村上弘志 (立教大), 玉川徹 (理研), 佐藤 浩介 (東京理科大), 太田直美 (奈良女大), 村上正秀 (筑波大), R. L. Kelley, C. A. Kilbourne, F. S. Porter, G. Sneiderman, K. Boyce, M. DiPirro, P. Shirron (NASA/GSFC), D. McCammon (Wisconsin 大), A. Szymkowiak (Yale 大), J.-W. den Herder, C. de Vries (SRON), S. Paltani, M. Pohl (Geneva 大) ほか ASTRO-H SXS チーム: ASTRO-H 搭載精密軟 X 線分光装置 SXS の開発の現状 (VII)

永吉 賢一郎, 満田 和久, 山崎 典子, 竹井 洋 (ISAS/JAXA), 大橋 隆哉, 石崎 欣尚, 江副 祐一郎, 大石詩穂子, 榎島 陽介, 鳥羽 玲奈 (首都大), 前畑 京介, 前田 亮 (九州大): TES 型 X 線マイクロカロリメータにおけるマッシュルーム型吸収体の開発

大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎 (首都大), 田原 譲 (名古屋大), 満田和久, 山崎典子, 竹井 洋 (ISAS/JAXA), DIOS ワーキンググループ: ダークバリオン探査ミッション DIOS: 開発の進展について

江副祐一郎, 大石詩穂子, 鳥羽玲奈, 榎島陽介, 石崎欣尚, 大橋隆哉 (首都大), 永吉 賢一郎, 満田 和久 (JAXA 宇宙研), 師岡利光 (SII), 田中啓一 (SIINT): DIOS 衛星を目指した TES 型 X 線マイクロカロリメータアレイの開発

日本物理学会 2012 年春季大会 2012 年 3 月 24 日 ~ 27 日 (関西学院大学)

石田卓也, 島谷紘史, 赤松弘規, 榎崇利, 木村哲平, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 大橋隆哉 (首都大), 大橋隼人 (電通大), 篠崎慶亮 (ARD/JAXA), 満田和久 (ISAS/JAXA), L. Liu, J. Wang (IAPCM), 田沼肇 (首都大): 太陽風多価イオンの電荷交換反応 II

満田和久, 山崎典子, 竹井洋, 辻本匡弘, 小川美奈 (ISAS/JAXA), 杉田寛之, 佐藤洋一, 篠崎慶亮, 岡本篤 (ARD/JAXA), 大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎 (首都大), 藤本龍一, 星野晶夫 (金沢大), 田代信, 寺田幸功 (埼玉大), 北本俊二, 村上弘志 (立教大), 玉川徹 (理研), 佐藤浩介 (東京理科大), 太田直美 (奈良女子大), 村上正秀 (筑波大), R.L. Kelley, C.A. Kilbourne, F.S. Porter, G.A. Snedermann, K.R. Boyce, M.J. DiPirro, P.J. Shirron, K.C. Gentreau (NASA/GSFC), G.V. Brown (LLBL), D. McCammon (Wisconsin 大), A. Szymkowiak (Yale 大), J.-W. den Herder, C. de Vries, E. Costantini (SRON), S.Paltani, M.Pohl (Geneva 大), 他 ASTRO-HSXS チーム: ASTRO-H 搭載 精密軟 X 線分光装置 SXS の開発の現状 (IV)

榎島陽介, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 大石詩穂子, 鳥羽玲奈, 大橋隆哉 (首都大), 竹井洋, 山本亮, 山崎典子, 満田和久, 太田方之, 佐藤有, 古関優, 国分紀秀 (ISAS/JAXA): TES 型 X 線マイクロカロリメータの放射線耐性試験

小川智弘, 江副祐一郎, 森山鉄平, 垣内巧也, 大橋隆哉 (首都大), 満田和久, 三石郁之 (ISAS/JAXA), 洞出光洋 (名古屋大), 杉山進 (立命館大), 山口ひとみ, Raul E. Riveros (フロリダ大), 金森義明 (東北大), 森下浩平, 中嶋一雄 (京都大), 青木竜彦 (コパレントシリコン): マイクロマシン技術を用いた超軽量・高角度分解能 X 線光学系の開発と現状

#### 国内研究会

小型衛星による実証シンポジウム 2011 年 9 月 7 日 (一橋記念講堂)

江副 祐一郎, 森山 鉄平, 小川 智弘, 垣内 巧也, 石川 久美, 大橋 隆哉, 木村 智樹, 笠原 慧, 山崎 敦, 藤本 正樹, 三石 郁之, 満田 和久, 三好 由純: 木星探査計画 EJSM JMO に向けた X 線撮像・分光装置の検討

第 11 回 X 線結像シンポジウム 2011 年 11 月 5 日 (東北大学)

江副 祐一郎: マイクロマシン技術による高分解能 X 線望遠鏡 (招待講演)

JSPS 161 委員会 結晶技術の宇宙応用 2011 年 11 月 25 日 (国立天文台)

江副 祐一郎: 宇宙 X 線望遠鏡とシリコン高温塑性変形技術 (招待講演)

第 12 回宇宙科学シンポジウム、2012 年 1 月 5~7 日 (ISAS/JAXA)

○満田和久, 山崎典子, 竹井洋, 辻本匡弘, 小川美奈 (ISAS/JAXA), 杉田寛之, 佐藤洋一, 篠崎慶亮, 岡本篤 (ARD/JAXA), 大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎 (首都大), 藤本龍一, 星野晶夫 (金沢大), 田代信, 寺田幸功 (埼玉大), 北本俊二, 村上弘志 (立教大), 玉川徹 (理研), 佐藤浩介 (東京理科大), 太田直美 (奈良女大), 村上正秀 (筑波大), R.L. Kelley, C.A. Kilbourne, F.S. Porter, G.A. Snedermann, K.R. Boyce, M.J. DiPirro, P.J. Shirron, K.C. Gentreau (NASA/GSFC), G.V. Brown (LLNL), D. McCammon (Wisconsin 大), A. Szymkowiak (Yale 大), J.-W. den Herder, C. de Vries, E. Costantini (SRON), S.Paltani, M.Pohl (Geneva 大), 他 ASTRO-HSXS チーム: ASTRO-H 衛星搭載 SXS-XCS 検出器

○大橋隆哉 (首都大), R. Mushotzky (U. Maryland), 松下恭子 (東京理科大), 上田佳宏 (京都大), 久保田あや (芝浦工大), 太田直美 (奈良女子大), 内山泰伸 (スタンフォード大), R. Smith (CfA/SAO), 馬場彩 (青山学院大), 山田真也 (理研), 辻本匡弘, 川原田 円, 湯浅孝行, 小高裕和, 高橋忠幸 (ISAS/JAXA): ASTRO-H の目指すサイエンス 1

○大橋隆哉 (首都大), R. Mushotzky (U. Maryland), 松下恭子 (東京理科大), 上田佳宏 (京都大), 久保田あや (芝浦工大), 太田直美 (奈良女子大), 内山泰伸 (スタンフォード大), R. Smith (CfA/SAO), 馬場彩 (青山学院大), 山田真也 (理研), 辻本匡弘, 川原田 円, 湯浅孝行, 小高裕和, 高橋忠幸 (ISAS/JAXA): ASTRO-H の目指すサイエンス 2

大橋隆哉 (首都大), 上田佳宏 (京都大), 北本俊二 (立教大), 松下恭子 (東京理科大), 寺島雄一 (愛媛大), 山崎典子, 竹井 洋 (ISAS/JAXA): ATHENA の目指すサイエンス

大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎 (首都大理工), 田原 譲 (名大エコトピア研), 満田和久, 山崎典子, 竹井洋 (ISAS/JAXA), 他 DIOS ワーキンググループ: ダークバリオン探査小型衛星 DIOS の開発の現状

山本亮, 酒井和広, 満田和久, 山崎典子, 竹井洋, 吉武宏, 関谷典央, 永吉賢一郎 (ISAS/JAXA), 大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 赤松弘規, 石川久美, 大石詩穂子, 榎崇利, 榎島陽介, 鳥羽玲奈 (首都大): 衛星搭載に向けた TES マイクロカロリメータの周辺技術の開発

永吉賢一郎, 満田和久, 山崎典子, 竹井洋, 吉武宏, 関谷典央, 酒井和広, 山本亮 (ISAS/JAXA) 大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 赤松弘規, 石川久美, 大石詩穂子, 榎崇利, 榎島陽介, 鳥羽玲奈, 木村哲平 (首都大) 藤本龍一, 星野晶夫, 谷津貴裕, 國久哲平, 小井教江, 乗附未季 (金沢大) 篠崎慶亮 (JAXA/ARD), 師岡利光 (セイコーインスツル), 田中啓一 (エスアイアイ・ナノテクノロジー): TES マイクロカロリメータの開発現状

小川智弘, 江副祐一郎, 森山鉄平, 垣内巧也, 大橋隆哉 (首都大), 満田和久, 三石郁之 (ISAS/JAXA), 洞出光洋 (名古屋大), 杉山進 (立命館大), 山口ひとみ, Raul E. Riveros (フロリダ大), 金森義明 (東北大), 中嶋一雄, 森下浩平 (京都大), 青木竜彦 (コバレントマテリアル): MEMS 技術を用いた超軽量・高角度分解能 X 線光学系の開発と現状

京都大学 GCOE シンポジウム「階層の連結」、2012 年 2 月 13 日～15 日 (京都大学)

大橋隆哉: X-ray study of large to small scale structures in the Universe (招待講演)

小型科学衛星シンポジウム、2012 年 3 月 1 日 (ISAS/JAXA)

大橋 隆哉、石崎 欣尚、江副 祐一郎 (首都大)、田原 譲 (名古屋大)、満田 和久、山崎 典子、竹井 洋 (JAXA 宇宙研)、他 DIOS ワーキンググループ: ダークバリオン探査衛星 DIOS

江副 祐一郎、大橋 隆哉、石崎 欣尚、大石 詩穂子、鳥羽 玲奈、榎島 陽介 (首都大)、満田 和久、山崎 典子、竹井 洋、永吉 賢一郎 (JAXA 宇宙研)、山田 真也 (理研): DIOS へ向けた TES 型 X 線マイクロカロリメータアレイの開発

酒井和広、竹井洋、山崎典子、山本亮、満田和久、関谷典央 (宇宙研) 大橋隆哉、石崎欣尚、江副祐一郎 (首都大): DIOS 等の小型衛星における TES 信号多重化に向けた SQUID と駆動回路の開発

高エネルギー宇宙物理連絡会 第 12 回研究会 2012 年 3 月 28 日～30 日 (奈良女子大学)

大橋隆哉: DIOS 計画 (招待講演)

#### 国際会議

Space Cryogenics, Coeur d'Alene, USA, June 8 – June 11, 2011

Yuichiro Ezoe, Kumi Ishikawa, Takaya Ohashi, Hiroya Yamaguchi, Kazuhisa Mitsuda, Ryuichi Fujimoto, Masahide Murakami, Kenichi Kanao, Seiji Yoshida, Soji Tsunematsu, Michael DiPirro, Peter Shirron, and the SXS team: Development of porous plug phase separator and superfluid film flow suppression system for the Soft X-ray Spectrometer onboard ASTRO-H

The X-ray Universe 2011, Berlin, Germany, June 27 – June 30, 2011

M. Kawaharada, N. Okabe, K. Umetsu, M. Takizawa, K. Matsushita, Y. Fukazawa, T. Hamana, S. Miyazaki, K. Nakazawa, T. Ohashi: ICM in Cluster Outskirts Affected by Large Scale Structure Discovered in A1689

T. Ohashi: Search for WHIM in X-rays (Invited)

Exploring the X-ray Universe: Suzaku and Beyond, Stanford, USA, July 20–22, 2011

K. Ishikawa, Y. Ezoe, T. Ohashi, Y. Miyoshi, Y. Futaana, N. Terada, H. Negoro, Y. Uchiyama: Solar system planets observed with Suzaku

H. Akamatsu, Y. Ishisaki, T. Ohashi, J. De plaa, J. Kaastra, A. Hoshino, Y. Takei, K. Sato, N. Ota: Properties of the intracluster medium in the outer regions of merging clusters of galaxies

I. Mitsuishi, A. Gupta, N. Y. Yamasaki, Y. Takei, T. Ohashi, K. Sato, M. Galeazzi, J. P. Henry, R. L. Kelley: Search for X-ray emission from the Shapley supercluster and the WHIM with Suzaku

T. Ohashi: Present and future X-ray studies of WHIM in emission

Y. Takei, H. Akamatsu, Y. Hiyama, Y. Maeda, M. Ishida, H. Mori, Y. Ishisaki, A. Hoshino: Stray light of Suzaku XRT from Crab offset observations

Low Temperature Detector 14, Heidelberg, Germany, August 1–5, 2011

Y. Ishisaki, K. Henmi, H. Akamatsu, T. Enoki, T. Ohashi, A. Hoshino, K. Shinozaki, H. Matsuo, N. Okada, T. Oshima: Development of Active Gas-Gap Heat Switch for Double-Stage Adiabatic Demagnetization Refrigerators

S. Oishi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, Y. Abe, Y. Enokijima, R. Hosoya, T. Ohashi, K. Mitsuda, T. Morooka, K. Tanaka: Development of Superconducting Multilayer Wiring for Large Arrays of TES X-ray Microcalorimeters

T. Enoki, Y. Ishisaki, H. Akamatsu, Y. Ezoe, T. Ohashi, T. Kanda, T. Ishida, H. Tanuma, K. Shinozaki, K. Mitsuda: Development of Laboratory Experimental System to Clarify Solar Wind Charge Exchange Mechanism with TES Microcalorimeter

Y. Shimoda, H. Seta, M. S. Tashiro, Y. Terada, Y. Ishisaki, M. Tsujimoto, K. Mitsuda, T. Yasuda, S. Takeda, Y. Hiyama, K. Masukawa, K. Matsuda, K. R. Boyce: Development of a Digital Signal Processing System for the X-ray Microcalorimeter onboard ASTRO-H (II)

K. Mitsuda, R. L. Kelley, K. R. Boyce, G. V. Brown, E. Costantini, M. J. DiPirro, Y. Ezoe, R. Fujimoto, K. C. Gendreau, J.-W. den Herder, A. Hoshino, Y. Ishisaki, C. A. Kilbourne, S. Kitamoto,

D. McCammon, M. Murakami, H. Murakami, M. Ogawa, T. Ohashi, A. Okamoto, S. Paltani, M. Pohl, F. S. Porter, Y. Sato, K. Shinozaki, P. J. Shirron, G. A. Sneiderman, H. Sugita, A. Szymkowiak, Y. Takei, T. Tamagawa, M. Tashiro, Y. Terada, M. Tsujimoto, C. de Vries, N. Y. Yamasaki: The High-Resolution X-Ray Microcalorimeter Spectrometer, SXS, on Astro-H

Optical MEMS, Istanbul, Turkish, August 8–11, 2011

Y. Ezoe, K. Ishizu, T. Moriyama, T. Ogawa, I. Mitsuishi, K. Mitsuda : Simulation-based Study of A MEMS Wolter type-I telescope

T.Ogawa, Y.Ezoe, T.Moriyama, I.Mitsuishi, K.Mitsuda, Y.Kanamori, H.Yamaguchi, R.Riveros : Measurement of the Taper Angle and X-ray Reflectivity of MEMS-based Silicon Mirrors

T.Moriyama, Y.Ezoe, I.Mitsuishi, T.Ogawa, T.Ohashi, M.Mita, K.mitsuda, Y.Kanamori, A.Maeda : Smoothing Sidewalls of A MEMS-based Silicon X-ray Optics

SPIE Optics+Photonics 2011 San Diego, USA, August 21 – August 25, 2011

R.E. Riveros, M. A. Tan, H. Yamaguchi, I. Mitsuishi, K. Ishizu, T. Moriyama, T. Ogawa, Y. Ezoe, M. Horade, S. Sugiyama, Y. Kanamori, N.Y. Yamasaki, K. Mitsuda: Progress on the magnetic field-assisted finishing of MEMS micropore x-ray optics

Chemical Evolution of Universe Hachioji, Japan, October 31–November 2, 2011

T. Ogawa, Y. Ezoe, , T. Moriyama, T. Kakiuchi ,T. Ohashi, I. Mitsuishi , M. Mita, K. Mitsuda, M. Horade , S. Sugiyama, R.E.Riveros, H. Yamaguchi, Y. Kanamori, K. Morishita, K. Nakajima, A. Maeda, Y. Ichinosawa: Development of Novel Ultra Light Weight and High Resolution X-ray Micro Pore Optics for Space Research

Takatoshi Enoki, Yoshitaka Ishisak, Hiroki Akamatsu, Yuichiro Ezoe, Takaya Ohashi, Takuma Kanda, Takuya Ishida, Hajime Tanuma (Tokyo Metropolitan University), Hayato Ohashi (The University of Electro-Communications), Keisuke Shinozaki (ARD/JAXA), Kazuhisa Mitsuda (ISAS/JAXA): Development of laboratory experimental system to clarify solar wind charge exchange mechanism with TES microcalorimeter

Y. Ezoe: X-rays from solar system objects (Invited)

International Workshop on Astronomical X-ray Optics, Prague, Czech, December 8–10, 2011

Y. Ezoe: Progress in MEMS X-ray optics (Invited)

American Physical Society, APS April Meeting 2012, March 31–Apr 3, 2012

D. Hartmann, C. Kouveliotou, J.-W. den Herder, L. Piro, D. Burrows, T. Ohashi: Probing cosmic baryons with X-ray spectroscopy of GRB afterglows

#### 4) 学会誌等

石崎 欣尚 and The ASTRO-H SXS Team: 宇宙用 X 線マイクロカロリメータ検出器, 応用物理学会 放射線分科会誌 「放射線」 **37**, 217-226 (2011)

江副 祐一郎, 木村 智樹, 笠原 慧, 山崎 敦, 三好 由純: 将来木星探査と X 線観測, 日本惑星科学会誌, **20**, 300-308 (2011)

# 光物性サブグループ

## 1. 研究活動の概要

### 1) 極細単層カーボンナノチューブの光電子分光

CoMoCAT 法で作製された極細単層カーボンナノチューブ (SWCNT) は、(6, 5)、(7, 5)、(7, 6)、(6, 6)、(7, 4) といった限定的なカイラリティをもつチューブからなっている。そこで、単一カイラリティの SWCNT の電子状態を明らかにするために、密度勾配超遠心分離法によって (6, 5) チューブの構成比を制御した試料を 4 種類作製し、光電子分光と光吸収の実験を行った。その結果、以下の事が明らかになった。(a) CoMoCAT 法で合成された直径 0.76 nm 程度のチューブからなる 4 種類の試料、アーク放電法で合成された直径 1.4 ~ 1.25 nm の試料の電子状態の比較から、観測された半導体型 SWCNT の van Hove 特異点 (VHS) は、1.4 ~ 0.76 nm の直径範囲で、タイトバインディング近似による状態密度計算結果と一致した。(b) 光電子分光で観測されたカイラリティ (6, 6)、(7, 4) の極細金属型 SWCNT の VHS は、光吸収実験結果や状態密度計算結果とは整合性がとれなかった。密度汎関数理論などの計算結果との比較から、 $sp^3$  混成などの曲率の影響を考慮した電子構造計算が極細金属チューブに対しては適当であった。(c) 金属型の (6, 6)、(7, 4) の SWCNT では、朝永 ラッティンジャー液体状態による状態密度のべき依存性が観測された。べき指数は 0.6 であった。

### 2) CdS/CdSe 量子ドットを吸着した $TiO_2$ ナノ粒子電極の光電変換特性評価

半導体量子ドット太陽電池は、 $TiO_2$ 、CdS/CdSe 混合量子ドット増感剤、電極、対極から構成される。このうち、比表面積が高いことから用いられる  $TiO_2$  ナノ粒子は、小さい粒径のときは、増感剤の吸着量は増加するが表面欠損によるトラップ準位が形成されやすい。一方、大きい粒径のときは、比表面積の減少により増感剤の吸着量は減るがトラップ準位は形成されにくい。そこで、量子ドットの吸着量とトラップ準位数でつり合いがとれる最適粒径を調べるため、光音響法による光吸収スペクトル、電流変換量子効率 (IPCE) スペクトル、ソーラーシミュレータによる出力特性の測定から電極の分光増感特性を評価した。測定結果は以下の様であった。(a) 可視光領域において、分光増感による光電流が確認され、光電変換量子効率は 70 % に達した。(b)  $TiO_2$  ナノ粒子の直径が 30 nm と 40 nm では、光子エネルギー 2 eV に光電流が発生した。これは、トラップ準位からの再励起によると考えられる。(c)  $TiO_2$  粒径の増大に伴い暗電流が減少し、開放電圧は上昇した (直径 20 nm では 0.53 V、40 nm では 0.6 V)。以上の結果から、 $TiO_2$  ナノ粒子の最適直径は 40 nm であり、改良後の太陽電池の光電変換効率は改良前の 3 % から 4.2 % まで向上した。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

J. Ishikawa, T. Miyahara, Y. Hirato, H. Ishii, T. Kodama, K. Kikuchi, T. Nakamura, K. Kodama, D. Asakura and T. Koide: MCD study on  $Ce@C_{82}$  and  $Ce_2@C_{80}$  in the soft X-ray region, *J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena* **184** (2011) 284–286.

### 2) 学会講演

日本物理学会第 66 回年次大会 2011 年 3 月 25 日 ~ 3 月 28 日 (新潟大学五十嵐キャンパス)

米森啓太、柿原隆介、宮尾智章、石井廣義、鷺谷智、真庭豊、柳和宏、羽淵隆文、平山大裕、林博和、姜健、岩澤英明、島田賢也、生天目博文、谷口雅樹：金属及び半導体カーボンナノチューブの光電子分光

日本物理学会 2011 秋季大会 2011 年 9 月 21 日～9 月 24 日 ( 富山大学五福キャンパス )

米森啓太、柿原隆介、宮尾智章、石井廣義、鷺谷智、真庭豊、柳和宏、羽淵隆文、平山大裕、林博和、姜健、岩澤英明、島田賢也、生天目博文、谷口雅樹：金属及び半導体カーボンナノチューブの光電子分光

日本物理学会第 67 回年次大会 2012 年 3 月 24 日～3 月 27 日 ( 関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス )

鈴木良輔、米森啓太、柿原隆介、石井廣義、鷺谷智、真庭豊、柳和宏、永田偉士、堀家大希、平山大裕、羽淵隆文、林博和、姜健、岩澤英明、島田賢也、生天目博文、谷口雅樹：CoMoCAT 法で合成された極細カーボンナノチューブの光電子分光

鷺谷智、米森啓太、柿原隆介、鈴木良輔、石井廣義、中井祐介、柳和宏、真庭豊、羽淵隆文、平山大裕、林博和、姜健、永田偉士、堀家大希、岩澤英明、島田賢也、生天目博文、谷口雅樹：金属及び半導体単層カーボンナノチューブから二層カーボンナノチューブの作製とその光電子分光

第 25 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム 2012 年 1 月 6 日～1 月 9 日 ( 鳥栖市民文化会館・中央公民館 )

鈴木良輔、米森啓太、柿原隆介、石井廣義、鷺谷智、真庭豊、柳和宏、羽淵隆文、平山大裕、林博和、姜健、岩澤英明、島田賢也、生天目博文、谷口雅樹：金属及び半導体カーボンナノチューブの光電子分光

第 32 回日本熱物性シンポジウム 2011 年 11 月 21 日～11 月 23 日 ( 慶応義塾大学日吉キャンパス )

柿原隆介、沈 青、豊田太郎：ポリサルファイド・ポリアクリルアミド擬固体化電解質ゲルの光熱変換スペクトル

## 国際会議

The 16th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation, March 3-4, 2012, Hiroshima, Japan

K. Yonemori, R. Suzuki, R. Kakihara, H. Ishii, S. Sagitani, Y. Mania, K. Yanagi, T. Habuchi, D. Hirayama, H. Hayashi, J. Jiang, H. Iwasawa, K. Shimada, H. Namatame and M. Taniguchi: Photoemission spectroscopy of carbon nanotubes synthesized by CoMoCAT



# 電子物性研究サブグループ

## 1. 研究活動の概要

比較的局在性の強い  $4f$ -電子は、伝導体中では伝導電子と混成し非従来型の超伝導や量子臨界的挙動などの現象を引き起こしたり、幾何学的にフラストレートしたサイトに配置された磁性体中では、その特徴を反映した新規スピン量子状態がもたらされることが近年の研究から明らかになりつつある。本サブグループは、新たな特性の期待できる希土類を含む化合物の結晶を育成し、二つの視点から研究を進めている。一つは、基礎物理的な興味に基づいて、 $f$ -電子の強い相関効果に起因する新奇現象を探索し、見出された興味深い現象の機構を解明するという視点であるが、さらに、これらの物質の示す新奇特性の実用的な可能性を追求するというもう一つの視点も重要視している。この両者の目的のためには、純良単結晶の育成は不可欠であり、高圧下フラックス法など、特徴のある手法で単結晶育成から基礎物性測定をグループ内で行いながら、さらに、国内外の研究者との共同研究も進めている。ここ数年は、充填スクッテルダイト  $RT_4X_{12}$  (R:希土類、T:遷移金属、X:15族元素) や  $RT_2Al_{20}$  など、希土類を囲む籠構造を結晶内に持つ化合物を主要な対象として研究を進めている。

### 1) Yb系充填スクッテルダイト ( $YbFe_4P_{12}$ 、 $YbOs_4Sb_{12}$ ) の単結晶育成と物性評価

重希土類を含む充填スクッテルダイトは合成が困難であり、これまで比較的容易な P 系について高圧下で合成された多結晶での物性報告がなされてきたが、試料の純良性、異方性の評価の観点から単結晶による評価が欠かせない。通常の結晶構造でも変化に富んだ  $c$ - $f$  混成効果が見出される Yb 系充填スクッテルダイトの結晶育成と物性評価が望まれたが、なかなか実現しなかった。我々は、高圧下フラックス法により、興味深い特性が期待された、格子定数の最も小さな  $YbFe_4P_{12}$  と最も大きな  $YbOs_4Sb_{12}$  について、基礎物性評価に適う単結晶の育成に成功し、測定を進めた。その結果、帯磁率測定からともに Yb の価数は 2 価に近いことが分かった。また、両物質とも金属伝導を示すが、前者では、多結晶試料で報告された抵抗極小が、大きさは抑制されるものの、単結晶でも存在することが確認された。 $YbFe_4P_{12}$  においては、低温比熱に明確な非フェルミ液体的振舞が見いだされた。

### 2) $PrFe_4P_{12}$ の磁場 [111] 方位に出現する高磁場秩序相の秩序変数と起源

$PrFe_4P_{12}$  は Pr 系としては、極めて重い電子状態 (FL) が疑いなく確認された物質であり、最も精力的に研究された充填スクッテルダイトの一つである。長い間解明されなかった低温・低磁場非磁性秩序相は、紆余曲折の末、スカラー型の多極子秩序相 (SOP) であることが分かり、磁場により抑制すると、殆どの磁場方位で重い電子状態が誘起される。我々は、磁場が [111] 方位の近傍に加えた場合には、顕著な非フェルミ液体状態 (NFL) が現れることを見出したが、その後、[111] 方位のごく近傍で新たな秩序相 (HOP) が出現することが分かった。この奇妙な新秩序相について、結晶場準位の交差によるもの提案はなされたものの、低温・強磁場が必要なことから、機構の解明は進んでいなかった。今回、純良単結晶で、より低温 (30mK)、高磁場 (18T) までの電子輸送効果測定を行い、[111] 方位での SOP、HOP、HF、LF の関わる相図を明らかにした。更に、その過程で、HOP の相内に新たな相境界を発見した。これらの結果により、HOP 相の秩序変数が同定され、起源の解明がなされること期待している。

### 3) $PrRu_4P_{12}$ における $4f$ 電子と原子核スピンの複合状態形成

$PrRu_4P_{12}$  の低温電荷秩序相内において、Pr イオンの持つ  $4f$  電子が、 $^{141}\text{Pr}$  核スピンと超微細相互作用を通して結合することにより、両者が複合した特異な量子状態が形成されていることを実験的に確認し報告した (図 1 参照: 科学新聞、日本物理学会誌に紹介記事掲載)。この複合状態を持つイオンが結晶中で規則正しく配列している状態の観測は、固体中では初めてである。低温で吐き出されるエントロ

ピーがこの複合多重項状態の形成と矛盾しないこと、また、本実験結果を他の Pr 化合物における測定結果と系統的に比較することにより、Pr イオンの超微細結合定数が化合物に依存しないこと (Pr イオン内部の局所的環境で決定づけられていること) を明らかにした。

#### 4) $(\text{Sm}_x\text{La}_{1-x})\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$ における重い電子状態の Sm イオン価数

$\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$  における磁場の影響を受けない重い電子状態 (S.Sanada *et al.* J. Phys. Soc. Jpn. 74, 246 (2005) にて報告。第 15 回日本物理学会論文賞受賞) の形成メカニズムを明らかにするために、 $4f$  電子を含まない  $\text{LaOs}_4\text{Sb}_{12}$  との合金系  $(\text{Sm}_x\text{La}_{1-x})\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$  の基礎物性測定を進めている。 $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$  の Sm イオン価数が顕著な温度依存をすることが報告されたのを受けて、本合金系の Sm イオン価数を Sm L3-edge の X 線吸収スペクトル測定 (蛍光法) を行ない調べた (SPring-8 BL01B1 課題番号: 2011A1436)。その結果、 $x < 1$  の試料についても、 $x = 1$  と同様に、Sm イオン価数が 150 ~ 200 K あたりから降温とともに減少していること、また、 $x$  の低下に伴い、Sm イオン価数が 2 価側へシフトしていることを明らかにした。低温における電子比熱係数 (電子有効質量を反映) と Sm イオン価数の関係は、本系における重い電子状態形成メカニズムを明らかにする上で重要なヒントを与えているものと思われる。

#### 5) 超伝導体 $\text{Pr}(\text{Os}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sb}_{12}$ のラトリング- $4f$ 電子結晶場励起の束縛状態の探索

非従来型の重い電子超伝導体  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  と従来型超伝導体  $\text{PrRu}_4\text{Sb}_{12}$  との合金系  $\text{Pr}(\text{Os}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sb}_{12}$  の  $x = 0.68$  近傍で、Pr イオンの局所原子振動 (ラトリング) と結晶場励起の励起エネルギーが交差しており、そこでは両者が束縛した新奇な複合状態を形成している可能性があることをこれまでに報告した。このことを実験的に検証するために、非弾性 X 線散乱実験によるラトリング励起の観測を、高輝度光科学研究センターの筒井智嗣氏と共に、SPring-8 のビームライン BL35XU を用いて前年度に引き続き行った (課題番号: 2011A1366)。ラトリング励起のピークの半値巾が低温で増大する振る舞いが  $x = 0.68$  でのみ起きていることをフォノンスペクトル測定で確認した。これは束縛状態の形成を示唆する異常である可能性がある。今後、他の測定手段も組み合わせ、これを検証する。

#### 6) 非磁性基底状態を持つ $\text{PrT}_2\text{Al}_{20}$ ( $T = \text{Nb}, \text{Ta}$ ) における新奇基底状態の探索

新規カゴ状物質  $\text{RT}_2\text{Al}_{20}$  は 16 個の Al サイトによって構成されるカゴの中に R サイトが位置するカゴ状構造をしており、一方、T サイトは三角形を基本とした幾何学的フラストレーションを内在したパイロクロア構造をしており、二つの特徴的な構造が共存している。そのため、両方の構造に起因する物理が絡み合った興味深い現象の実現が期待されており、実際に様々な物質において強相関電子物性の発現が相次いで報告されている。その中で  $\text{PrT}_2\text{Al}_{20}$  ( $T = \text{Ti}, \text{V}, \text{Nb}, \text{Ta}$ ) の系で結晶場励起状態に起因する近藤効果及び、 $\Gamma_3$  二重項に起因する多極子秩序、四極子近藤効果の実現可能性が議論されており、特に注目を集めている。我々はこれまで、 $4d, 5d$  電子を持つ  $\text{PrT}_2\text{Al}_{20}$  ( $T = \text{Nb}, \text{Ta}$ ) の単結晶試料を用いた低温物性測定を行い、非磁性  $\Gamma_3$  二重項に起因する非フェルミ液体的な振る舞いを示すことを明らかにしてきた。今年度は、基底状態の詳細を明らかにするために  $\text{PrT}_2\text{Al}_{20}$  ( $T = \text{Nb}, \text{Ta}$ ) の純良単結晶を用いて、希釈冷凍機温度までの抵抗、ホール係数、磁化、比熱測定を行った。PrNb<sub>2</sub>Al<sub>20</sub> については、2 K までの抵抗と 0.1 K までの DC 磁化測定からは非フェルミ液体的な振る舞い ( $\rho \sim T^{1/2}$ ,  $m \sim -T^{1/2}$ ) を示したが、磁場中での  $C/T$  の温度依存性からは 0.8 K 付近でほとんど磁場依存性を示さないブロードなピークを持ち、低温で一定値 ( $\gamma \sim 1.2 \text{ J/molK}^2$ ) を取るフェルミ液体的な振る舞いを観測した。PrTa<sub>2</sub>Al<sub>20</sub> については、比熱で  $T \sim 0.8 \text{ K}$  で印加磁場方向に対して異方的な振る舞いを示すピークを観測し、抵抗においてもピークを示す温度から  $\rho$  が減少することを観測した。これらの実験から得られたピークの磁場依存性、異方性から何らかの多極子秩序を起こしていると考えられる。これに加えて、転移後においても PrNb<sub>2</sub>Al<sub>20</sub> と同様な大きな電子比熱係数 ( $\gamma \sim 1.5 \text{ J/mol K}^2$ ) を持っており、両物質は非磁性基底

状態を持つにもかかわらず、重い電子状態を実現している可能性が考えられる。今後、上記の新奇状態の起源を明らかにすべくこれらの物質の研究を進める予定である。

### 7) $\text{SmTi}_2\text{Al}_{20}$ における磁場に依存しない相転移および重い電子状態の起源探索

昨年度、上で記したカゴ状物質の一つである  $\text{SmTi}_2\text{Al}_{20}$  が、40 K 付近に近藤効果を示唆する抵抗率の上昇を示すことを明らかにし、複数の f 電子を持つにもかかわらず強い cf 混成を示す珍しい系であることを明らかにした。さらに、温度を下げていくと、 $T = 6.5$  K に相転移を示唆する比熱のピークを示すがその転移温度がほとんど磁場に依存しないことを見いだした。今年度は、さらに低温の比熱測定を行うことにより、その秩序状態の詳細について研究を行った。その結果から、秩序状態に磁気モーメント ( $0.5 \mu_B$ ) が存在することを明らかにし、それに加えて、転移温度以下においても比較的大きな電子比熱係数を持つ重い電子状態を形成しており、その状態がほとんど磁場に依存しないことを見いだした。このような磁場に鈍感な重い電子状態は本研究室で研究を行っている  $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$  においても観測されているが、その起源は近藤効果による重い電子状態形成のシナリオでは説明することができず、その基底状態の詳細に興味を持たれる。今後、遷移金属を他の 3d, 4d, 5d 元素に置換した物質も含めてこれらの物質の研究をさらに進める予定である。

### 8) 異方的な籠状物質 $\text{RAu}_3\text{Al}_7$ ( $R$ :希土類) の単結晶育成と物性探索

充填スクッテルダイトが示す興味深い物性の多くにおいて、希土類元素を囲む 15 属元素が作る籠状構造が重要と考えられており、その重要性は、最近研究が進められている  $\text{RT}_2\text{X}_{20}$  ( $R$ :希土類、 $T$ :遷移金属、 $X$ :Al, Zn) でも確認されている。両物質系ともに立方晶系であり、希土類元素の適度に高い対称性も、特異物性出現のための要素と考えられることから、異方的な籠状物質として  $\text{RAu}_3\text{Al}_7$  を選択し、フラックス法による単結晶育成と基礎物性評価を開始した。 $\text{CeAu}_3\text{Al}_7$  は磁気異方性が大きく、2.5K で強磁性転移を示すが、電気抵抗は  $\sim 20\text{K}$  以下で近藤効果を示唆する  $-\log T$  依存を示す。常圧で結晶育成の育成が実現していない参照系  $\text{LaAu}_3\text{Al}_7$  についても、最近、高圧下フラックス法により単結晶育成に成功しており、更に系統的な物性測定を計画している。

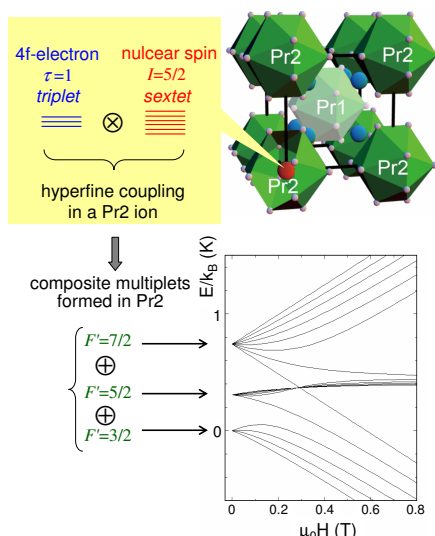


図 1:  $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$  における  $4f$  電子と原子核スピンの新奇な複合状態形成 ( $\text{Pr}_2$  イオン) が実験で確認された。形成された 3 つの複合多重項は磁場中で分裂する。

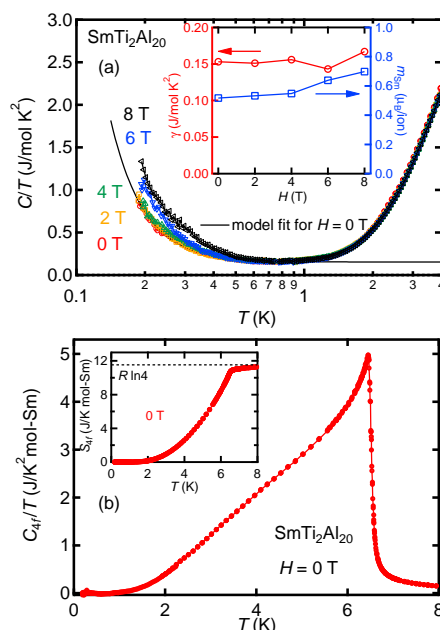


図 2:  $\text{SmTi}_2\text{Al}_{20}$  の磁氣的秩序相における磁場に依存しない電子比熱係数。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

Y. Aoki, T. Namiki, S. R. Saha, T. Tayama, T. Sakakibara, Ryouyusuke Shiina, H. Shiba, H. Sugawara and H. Sato: f-Electron-Nuclear Hyperfine-Coupled Multiplets in the Unconventional Charge Order Phase of Filled Skutterudite  $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ , *J. Phys. Soc. Jpn.* **80** (2011) 054704. "JPSJ Papers of Editors' Choice Award"

T. Muramatsu, T. Kanemasa, T. Kagayama, K. Shimizu, Y. Aoki, H. Sato, M. Giovannini, P. Bonville, V. Zlatic, I. Aviani, R. Khasanov, C. Rusu, A. Amato, K. Mydeen, M. Nicklas, H. Michor, and E. Bauer: Reentrant quantum criticality in  $\text{Yb}_2\text{Pd}_2\text{Sn}$ , *Phys. Rev. B* **83** (2011) 180404(R).

M. Mizumaki, S. Tsutsui, T. Uruga, H. Tanida, D. Kikuchi, H. Sugawara, and H. Sato: Rare Earth Dependence of Einstein Temperatures in Filled Skutterudite Compounds  $\text{REFe}_4\text{P}_{12}$  ( $\text{RE} = \text{La}, \text{Ce}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{and Sm}$ ), *J. Phys. Soc. Jpn.* **80** (2011) 074603.

H. Tou, Y. Inaoka, M. Doi, M. Sera, K. Asaki, H. Kotegawa, H. Sugawara, and H. Sato: Possible Mass Enhancement by Multipole Fluctuations Excited via the Singlet? Triplet Crystal Electric Field States in  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ : Sb-NMR Studies Using a Single Crystal, *J. Phys. Soc. Jpn.* **80** (2011) 074703.

T. Saito, H. Sato, K. Tanaka, S. Tatsuoka, M. Ueda, R. Higashinaka, T. Namiki, Y. Aoki, Y. Utsumi, K. Kuwahara, and T. Hosoya: Strong Effect of Yb Filling Fraction on the Magnetic Ground State of the Filled Skutterudite  $\text{YbFe}_4\text{Sb}_{12}$ , *J. Phys. Soc. Jpn.* **80** (2011) 063708.

Y. Aoki, S. Sanada, D. Kikuchi, H. Sugawara, and H. Sato: Temperature-dependent development of the magnetic-field-insensitive heavy fermion state in  $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ , *J. Phys. Soc. Jpn.* **80** (2011) Supplement A, SA013.

R. Higashinaka, A. Nakama, M. Ando, M. Watanabe, Y. Aoki and H. Sato: Single crystal growth and low temperature properties of  $\text{PrNb}_2\text{Al}_{20}$ , *J. Phys. Soc. Jpn.* **80** (2011) Supplement A, SA048.

R. Higashinaka, T. Maruyama, A. Nakama, R. Miyazaki, Y. Aoki and H. Sato: Unusual Field-Insensitive Phase Transition and Kondo Behavior in  $\text{SmTi}_2\text{Al}_{20}$ , *J. Phys. Soc. Jpn.* **80** (2011) 093703.

H. Yamaoka, I. Jarrige, N. Tsujii, Jung-Fu Lin, T. Ikeno, Y. Isikawa, K. Nishimura, R. Higashinaka, H. Sato, N. Hiraoka, H. Ishii, and Ku-Ding Tsuei: Strong Coupling between 4f Valence Instability and 3d Ferromagnetism in  $\text{Yb}_x\text{Fe}_4\text{Sb}_{12}$  Studied by Resonant X-Ray Emission Spectroscopy, *Phys. Rev. Lett.* **107** (2011) 177203.

R. Higashinaka, A. Nakama, M. Ando, M. Watanabe, Y. Aoki, and H. Sato: Magnetic and transport properties of  $\text{YbT}_2\text{Al}_{20}$  ( $T = \text{Ti}, \text{V}$  and  $\text{Cr}$ ), *J. Phys.: Conf. Ser.* **273** (2011) 012033.

N. Ogita, R. Kojima, T. Hasegawa, H. Sugawara, H. Sato, and M. Udagawa: Raman Spectral Analysis of Metal-Insulator Transitions in Skutterudite, *Raman Spectral Analysis of Metal-Insulator Transitions in Skutterudite*, *Chinese J. Phys.* **49** (2011) 471-479.

T. Yamashita, R. Miyazaki, Y. Aoki, and S. Ohara: Transport, Thermal, and Magnetic Properties of  $\text{YbNi}_3\text{X}_9$  ( $X = \text{Al}, \text{Ga}$ ): A Newly Synthesized Yb-Based Kondo Lattice System, J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 034705.

## 2) 学会講演

日本物理学会秋季大会 2011年9月21日~9月24日 (富山大学五福キャンパス)

青木勇二: 充填スクッテルダイトにおける磁場の影響を受けない重い電子状態 (企画講演)

太田直希, 松島育夫, 瀧川陽, 正司康, 宮田和明, 難波孝夫, 菅原仁, 佐藤英行, 関根ちひろ, 城谷一民, 森脇太郎, 池本夕佳, Z. Liu, G. L. Carr, 岡村英一:  $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$  の高圧赤外分光による研究

宮崎亮一, 筒井智嗣, 青木勇二, 東中隆二, Alfred Q. R. Baron, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト  $\text{Pr}(\text{Os}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sb}_{12}$  における非弾性 X 散乱

真岸孝一, 高橋将央, 斉藤隆仁, 小山晋之, 菅原仁, 斉藤隆志, 龍岡翔, 田中謙弥, 佐藤英行: 高圧合成  $(\text{La}, \text{Ce})\text{Fe}_4\text{Sb}_{12}$  の Sb-NQR

伏屋健吾, 宮崎亮一, 青木勇二, 水牧仁一郎, 筒井智嗣, 宇留賀朋也, 末光文也, 東中隆二, 佐藤英行: X 線吸収による  $(\text{Sm}_x\text{La}_{1-x})\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$  の Sm イオン価数測定

山岡人志, Ignace Jarrige, 辻井直人, Jung-Fu Lin, 池野剛, 石川義和, 西村克彦, 東中良司, 佐藤英行, 平岡望, 石井啓文, Ku-Ding Tsuei:  $\text{Yb}_x\text{Fe}_4\text{Sb}_{12}$  スクッテルダイトにおける異常価数転移

國利洸貴, 東中隆二, 青木勇二, 佐藤英行:  $\text{YbOs}_4\text{Sb}_{12}$  の単結晶育成と物性測定

中間章浩, 東中隆二, 高橋剛, 山浦淳一, 木内陽子, 青木勇二, 佐藤英行: カゴ状金属間化合物  $\text{RT}_2\text{Al}_{20}$  の単結晶育成と物性測定

日本物理学会第 2012 年第 67 回年次大会 2012年3月24日(土)~27日(火) (関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス)

青木英和, 佐藤英行, 菊池大輔, 東中隆二, 青木勇二, 菅原仁, 宇治進也, 寺嶋太一, A. Pourret, K. Behnia:  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  に於ける高磁場秩序相  $\{H//[111]\}$  及び新たな高磁場相境界の評価

岩佐和晃, Lijie Hao, 神木正史, 桑原慶太郎, J.-M. Mignot, 菅原仁, 青木勇二, 松田達磨, 佐藤英行:  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  の全対称型秩序相における磁気励起

真岸孝一, 高橋将央, 斉藤隆仁, 小山晋之, 菅原仁, 斉藤隆志, 龍岡翔, 田中謙弥, 佐藤英行: 高圧合成  $(\text{La}, \text{Ce})\text{Fe}_4\text{Sb}_{12}$  の Sb-NQR II

竹内和也, 瀧川陽, 菅原仁, 佐藤英行, 森脇太郎, 池本夕佳, 岡村英一:  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ ,  $\text{CeRu}_4\text{Sb}_{12}$  の高圧低温での赤外分光による電子状態研究

國利洸貴, 東中隆二, 青木勇二, 佐藤英行:  $\text{YbOs}_4\text{Sb}_{12}$  の単結晶育成と物性測定

中間章浩, 東中隆二, 宮崎亮一, 青木勇二, 佐藤英行:  $\text{PrTa}_2\text{Al}_{20}$  の磁場誘起相転移

東中隆二, 中間章浩, 宮崎亮一, 青木勇二, 佐藤英行: 極低温物性測定によるカゴ状物質  $\text{PrNb}_2\text{Al}_{20}$  の基底状態の探索

後藤和基, 高津浩, 門脇広明, 東中隆二, 松林和幸, 上床美也, 元屋清一郎: Dy<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub> のカゴメアイス状態における磁気モノポール

## 国内研究会

新学術領域研究「重い電子系の形成と秩序化」第3回研究会 2011年6月23日~6月25日 (東京大学 柏キャンパス)

青木勇二、並木孝洋、S.R. Saha、田山孝、榊原俊郎、椎名亮輔、斯波弘行、菅原仁、佐藤英行: 充填スクッテルダイト PrRu<sub>4</sub>P<sub>12</sub> の電荷秩序相鬼おける 4f 電子と核の複合状態

宮崎亮一, 青木勇二, 東中隆二, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト超伝導体 Pr(Os<sub>1-x</sub>Ru<sub>x</sub>)<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> におけるピーク効果の Ru 依存性

前田達矢、佐藤英行、東中隆二、青木勇二: 充填スクッテルダイト化合物 SmOs<sub>4</sub>As<sub>12</sub> の単結晶育成と物性評価

國利洸貴, 東中隆二, 青木勇二, 佐藤英行: YbOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> の単結晶育成と物性測定

東中隆二、中間章浩、宮崎亮一、山浦淳一、志村恭通、榊原俊郎、青木勇二、佐藤英行: Γ<sub>3</sub> 二重項基底状態を持つカゴ状物質 PrNb<sub>2</sub>Al<sub>20</sub> の奇妙な重い電子状態

中間章浩、東中隆二、宮崎亮一、青木勇二、佐藤英行: カゴ状金属間化合物 PrT<sub>2</sub>Al<sub>20</sub> (T=Nb, Mo, Ta, W) の単結晶育成と物性測定

新学術領域研究「重い電子系の形成と秩序化」ワークショップ 2012年1月10日~11日 (東京大学 柏キャンパス)

東中隆二、中間章浩、末光文也、宮崎亮一、青木勇二、佐藤英行: 四極子自由度を持つ PrT<sub>2</sub>Al<sub>20</sub> (T=Nb, Ta) の低温物性

宮崎亮一、青木勇二、東中隆二、佐藤英行: 近藤反強磁性体 YbNi<sub>3</sub>Al<sub>9</sub> の比熱および磁気熱量効果測定

東中隆二、中間章浩、宮崎亮一、青木勇二、佐藤英行: SmTi<sub>2</sub>Al<sub>20</sub> における磁場に鈍感な相転移および近藤効果

## 国際会議

International conference on Strongly Correlated Electron Systems 2011(SCES 2011), Cambridge, England, Aug. 29 – Sep. 3, 2011

Y. Aoki, T. Namiki, S.R. Saha, T. Tayama, T. Sakakibara, R. Shiina, H. Shiba, H. Sugawara and H. Sato: *f*-Electron-Nuclear Hyperfine-Coupled Multiplets of Pr Ions in Charge-Ordered Filled Skutterudite PrRu<sub>4</sub>P<sub>12</sub>

J. Custer, A. Yamada, T. Tayama, T. Sakakibara, H. Sugawara, Y. Aoki, H. Sato, Y. Onuki, M. Hedo, P. Miranovic and K. Machida: From Kondo to Cooper - Superconductivity in the Vicinity of a Quantum Phase Transition

R. Higashinaka, A. Nakama, R. Miyazaki, J. Yamaura, Y. Shimura, T. Sakakibara, Y. Aoki and H. Sato: Unusual Heavy Fermion Behavior in  $\text{PrNb}_2\text{Al}_{20}$  with a  $\Gamma_3$  Doublet Ground State

K. Iwasa, T. Orihara, K. Saito, K. Tomiyasu, Y. Murakami, H. Sugawara, K. Kuwahara, H. Kimura, R. Kiyonagi, Y. Ishikawa, Y. Noda, Y. Aoki, H. Sato and M. Kohgi: Neutron Scattering Study on Magnetic Ordering in a Partially Rare-Earth Filled Skutterudite  $\text{Pr}_x\text{Fe}_4\text{Sb}_{12}$

R. Miyazaki, R. Higashinaka, Y. Aoki, H. Sugawara and H. Sato: Heavy Fermion Superconducting Properties of the Filled Skutterudite Series  $\text{Pr}(\text{Os}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sb}_{12}$

S. Tsutsui, H. Uchiyama, J. Sutter, A. Baron, J. Yamaura, H. Sugawara and H. Sato: Inelastic X-Ray Scattering of Heavy Fermion Compounds  $\text{ROs}_4\text{Sb}_{12}$  ( $R$ : Light Rare-Earth)

M. Yogi, H. Niki, H. Sugawara, N. Takeda and H. Sato:  $^{121}\text{Sb}$ -NMR Knight Shift Study of Filled Skutterudite  $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$

M. Yoshizawa, H. Mitamura, F. Shichinomiya, S. Fukuda, Y. Nakanishi, H. Sugawara, T. Sakakibara, K. Kindo and H. Sato: Ultrasonic Measurements of  $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$  in Pulsed Magnetic Fields up to 55 T

From Blue Pigment to Green energy: Cobalt mines - Skutterudites - Thermoelectrics, Tyrifjord hotell, Norway, Sep. 5 – 8, 2011

H. Sato: The research project on the filled skutterudites in Japan from 2003 to 2007 and beyond

International workshop on heavy fermion TOKIMEKI 2011(TOKIMEKI2011), Osaka University, Osaka, Nov. 23 – 26, 2011

R. Higashinaka, A. Nakama, R. Miyazaki, Y. Aoki and H. Sato: Unusual Field-Insensitive Phase Transition and Kondo Behavior in  $\text{SmTi}_2\text{Al}_{20}$  (Oral)

R. Miyazaki, R. Higashinaka, Y. Aoki, H. Sugawara and H. Sato: Heavy fermion superconducting properties of the filled skutterudite series  $\text{Pr}(\text{Os}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sb}_{12}$

M. Yogi, H. Niki, H. Mukuda, Y. Kitaoka, H. Sugawara and H. Sato: Spin Susceptibility of  $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$  Probed by  $^{121}\text{Sb}$ -NMR

International Conference of New Science Created by Materials with Nano Spaces: From Fundamentals to Applications, Sendai, Miyagi, Nov. 23 – 26, 2011

H. Sato, A. Nakama, H. Kunitoshi, T. Maeda, Y. Ogawa, M. Matsumura, Y. Takahashi, T. Maruyama, R. Higashinaka, T. Namiki and Y. Aoki: Electronic state of 4f-electrons confined in nanoscale cages (Oral)

H. Kunitoshi, H. Sato, Y. Aoki and R. Higashinaka: Single crystal growth and characterization of  $\text{YbOs}_4\text{Sb}_{12}$

### 3) 雑誌等への掲載

科学新聞 「Pr 化合物中に形成された電子と核の複合状態発見」(2011年5月20日号)

日本物理学会誌 「Pr 化合物中に発見された 4f 電子と核の複合準位系」66, No. 8 (2011) 623-624.

# ナノ物性Iサブグループ

## 1. 研究活動の概要

カーボンナノチューブ (CNT)、ゼオライト、フラーレン、ボロンクラスター固体などのナノメートルサイズの構造を有する物質系では、バルク物質では見られない興味深い性質が現れる。本グループでは、このようなナノ構造物質系において、新規物性の開発とその発現機構を物性実験の種々の手法 - 核磁気共鳴 (NMR)、X線回折、磁化測定、比熱、広帯域インピーダンス測定、計算機実験など - を用いて研究している。2011年 (平成23年) 7月には、松田助教の後任として中井助教を迎え新たな出発を行った。2011年度の主な研究・教育活動の概要は以下のとおりである。

### 1) 単層カーボンナノチューブ (SWCNT) 内の水

水はあらゆるところに存在する。地殻や土壌、生体内部や大気中、宇宙空間にさえ存在する。水はごくありふれた物質である。しかしその本質は未だ十分に解明されているとはいえない。バルクの液体の水には2種類あると考えられている。高密度水と低密度水である。関連して第2臨界点仮説が提案され、4で密度が最大になる、などの水の異常が議論されている。このような水の一部は、微細な空間内あるいは幾何学的に強く束縛された条件下において存在し、自然界における様々な現象において支配的な役割を担っている。また微細空間内の水の理解は、プロトン伝導体や新規分離膜の開発などにおいても重要である。本グループでは、単層カーボンナノチューブ (SWCNT) を用いて、原子スケールからバルク領域に至る微細空間内の水の物性研究を行っている。SWCNTは原子レベルで均一なサブナノメートルから数ナノメートル径の疎水的な円筒空洞をもつ。したがって、分子数個から巨視的なレベルに至る水の挙動を調べる理想的容器となる。これまで平均直径が1.2~2.4 nmのSWCNT内の水について研究し、以下の点が明らかになった。

1) SWCNTは室温、飽和蒸気圧下で水を容易にその空洞内に吸着することがわかった。2) 直径Dが約1.4nm以下のSWCNT内の水は低温でアイスナノチューブと呼ばれるチューブ状の氷になる。このアイスナノチューブの融点はDが小さくなると上昇し、D~1.2nmでは室温で5員環のアイスナノチューブとなる。すなわちアイスナノチューブの融点はバルクキャピラリー内の水の融点 (変形ケルビン式で記述される) と逆の空洞径依存性を示す。3) アイスナノチューブはプロトンが秩序化した氷であり、反 (フェリ) 強誘電体となり、ステップ状の特異な分極過程を示す。4) Dが約1.5nm以上では、SWCNT内部の水が外部に排出される wet-dry 転移を起こす。その転移温度は、ケルビン式と同じ空洞径依存性すなわちDが大きくなると転移温度が高くなる。5) したがってバルク領域と分子スケール領域との間で水の性質が不連続的に変化する (バルクと原子スケール領域のクロスオーバー)。6) ガス雰囲気下におかれた水を内包したSWCNTにおいては、低温で雰囲気ガスと水分子の入れ替え (交換転移) が起こる。この転移温度はガスの種類に依存し、窒素 - メタン - クリプトン - 二酸化炭素と順に上昇する。また圧力が高くなるほど高くなる。この交換転移はガスセンサーや分子選択的ナノバルブ機構として利用可能である。7) クロスオーバー領域近傍の有限長SWCNTでは、SWCNTの端の効果のため内包する水の量に依存して中空アイスナノチューブから1次元水チェーンを内包したアイスナノチューブへと変化する。

これまでの研究より、SWCNT内部の水の水素結合のネットワーク構造とその安定性がSWCNT直径に極めて敏感であることがわかった。今後、プロトン伝導特性との関係を調べる予定である。



## 2) 新しい酸素固体とその磁性研究

酸素はスピン1の磁性分子である。酸素分子同士の磁氣的相互作用は、その大きさが分子間距離に依存するだけではなく、分子の相対的な配向に依存して強磁性的にも反強磁性的にもなる。本グループでは古典分子動力学計算によりSWCNT内部の酸素の低温凝縮構造の全体像を明らかにし、特に細いSWCNT内部の酸素が反強磁性的な量子1次元鎖となりうることを明らかにした。本年度は、大阪大学のグループと共同研究を行い、酸素とともに封止されたSWCNT試料の強磁場磁化過程の研究を行った。

## 3) ナノ構造物質の電子状態および核磁気共鳴(NMR)による研究

セメント超伝導体C12A7、ボロンクラスター固体、SWCNTなどの電子状態を明らかにする目的で微視的プローブであるNMRによる研究を行っている。本年度は、フラーレンC60を内包したSWCNT(ピーポッド)から高温加熱によって2層カーボンナノチューブ(DWCNT)へ変換される過程を炭素13核のNMRにより追跡した。C60が融合してSWCNTへ変換される過程においてsp<sup>3</sup>的な炭素の存在は見いだされず、生成機構について一定の制約を加えることができた。また、外側SWCNTとして半導体型または金属型を高濃度にエンリッチした試料を用いてDWCNTを作製し、その光電子分光実験を行った。どちらの場合にもDWCNTの内側と外側のSWCNTの間で電荷移動が生じていることが明らかにおなった。(鷲谷修士論文)また、3次元のグラファイトというべきゼオライト鑄型炭素(ZTC)の電子状態を明らかにするために炭素13核のNMR実験を行った。ZTC粉末試料についての電気抵抗の測定からは、非常に小さなギャップの半導体的な温度依存性が得られている。さらに、SWCNT、錯体結晶、ZTCなどに吸着された水のNMR実験を行い、水のダイナミクスを議論した。

## 4) ゼオライト鑄型炭素(ZTC)空洞内に吸着された水と希ガスの研究

ゼオライト鑄型炭素(ZTC)はゼオライトを鑄型として作られる炭素を主成分とする細孔性物質である。直径が1nm程度の空洞が3次元的に配列し、炭素材料の中で最も大きな表面積4000m<sup>2</sup>/gをもつ。本グループでは、東北大学との共同研究により、ZTC空洞に吸着された水とガス分子について、その構造と相転移挙動を明らかにする研究を行っている。これまでの研究から、ZTCは水やガスを大量に吸着可能であり、低温ではアモルファス的な構造をとることがわかった。前者は水素結合系の、後者はレナード・ジョーンズ(LJ)系の新規アモルファス固体と考えられ、今後、この生成機構や凍結過程を調べることは極めて重要である。(高部修士論文)

## 5) その他

卒業研究として、SWCNTの内部空洞を利用した新規FETデバイスの開発(松原)、壁開法によるグラフェンの作製と電気特性の研究(本田)、単層カーボンナノチューブにおける起電力発生研究(新田)を行った。

## 6) 学外共同利用施設による研究、その他

高エネルギー加速器研究機構(KEK PF)において放射光実験を行った。課題名(課題番号): 複合ナノ炭素材料の構造物性(2010G667)

# 2. 研究業績

## 1) 論文

H. Kyakuno, K. Matsuda, H. Yahiro, Y. Inami, T. Fukuoka, Y. Miyata, K. Yanagi, Y. Maniwa, H. Kataura, T. Saito, M. Yumura, and S. Iijima: Confined water inside single-walled carbon nanotubes: Global phase diagram and effect of finite length, *J. Chem. Phys.* **134** (2011) 244501-14. (DOI: 10.1063/1.3593064) Cover: Volume 134 Number 24 (28 June, 2011)

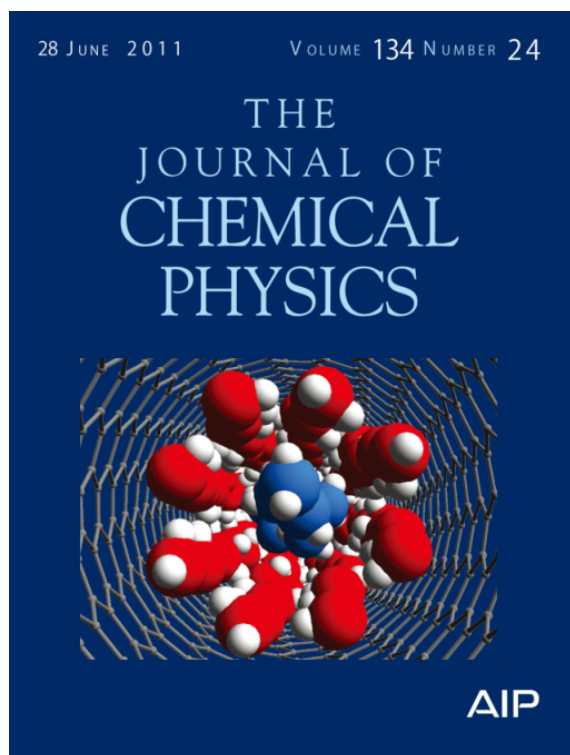


図 1: クロスオーバー領域近傍の SWCNT 内部の水の構造。水を大量に吸着させた場合。水の量が少ないと中空のアイスナノチューブができる。水の量を増すと中空アイスナノチューブが次第に成長し、ついに SWCNT の両端まで達すると中央に 1 次元的な水チェーンが成長する。SWCNT 直径に依存して水素結合角などが微妙に変化する。JCP の 2011 年 6 月 28 日号の表紙を飾った。

K. Yanagi, R. Moriya, Y. Yomogida, T. Takenobu, Y. Naito, T. Ishida, H. Kataura, K. Matsuda, Y. Maniwa: Electrochromic Carbon Electrodes: Controllable Visible Color Changes in Metallic Single-Wall Carbon Nanotubes, *Adv. Mater.* **23** (2011) 2811-2814. (DOI: 10.1002/adma.201100549)

Y. Nakai, S. Kitagawa, T. Iye, K. Ishida, Y. Kamihara, M. Hirano, and H. Hosono: Enhanced anisotropic spin fluctuations below tetragonal-to-orthorhombic transition in  $\text{LaFeAs}(\text{O}_{1-x}\text{F}_x)$  probed by  $^{75}\text{As}$  and  $^{139}\text{La}$  NMR, *Phys. Rev. B* **85** 134408(1-5)

T. Hattori, Y. Ihara, Y. Nakai, K. Ishida, Y. Tada, S. Fujimoto, N. Kawakami, E. Osaki, K. Deguchi, N. K. Sato, and I. Satoh: Superconductivity induced by longitudinal ferromagnetic fluctuations in  $\text{UCoGe}$ , *Phys. Rev. Lett.* **108** 066403(1-5)

T. Iye, Y. Nakai, S. Kitagawa, K. Ishida, S. Kasahara, T. Shibauchi, Y. Matsuda, and T. Terashima: Microscopic Evidence of Direct Coupling between Magnetic and Superconducting Order Parameters in  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ , *J. Phys. Soc. Jpn.* **81** 033701(1-4)

S. Kitagawa, H. Ikeda, Y. Nakai, T. Hattori, K. Ishida, Y. Kamihara, M. Hirano, H. Hosono: Metamagnetic Behavior and Kondo Breakdown in Heavy-Fermion  $\text{CeFePO}$ , *Phys. Rev. Lett.* **107** 277002(1-5)

## 2) 学会講演

日本物理学会第 66 回年次大会 2011 年 3 月 (新潟大学)

米森啓太, 柿原隆介, 宮尾智章, 石井廣義, 鷺谷智, 真庭豊, 柳和宏, 羽瀨隆文, 平山大裕, 林博和, 姜健, 岩澤英明, 島田賢也, 生天目博文, 谷口雅樹: 金属及び半導体カーボンナノチューブの光電子分光

鵜戸浩樹, 柳和宏, 片浦弘道, 松田和之, 真庭豊: 金属型・半導体型単層カーボンナノチューブネットワークにおける電気伝導特性

守屋理恵子, 柳和宏, 蓬田陽平, 竹延大志, 片浦弘道, 内藤泰久, 松田和之, 真庭豊: 金属型・半導体型単層カーボンナノチューブ薄膜における光電気化学測定

池田真実, 萩原政幸, 柳和宏, 松田和之, 真庭豊: カーボンナノチューブ中の1次元的に配列した酸素分子の強磁場磁性

客野遥, 松田和之, 八尋瞳, 伊波悠, 福岡智子, 宮田耕充, 柳和宏, 真庭豊, 片浦弘道, 斎藤毅, 湯村守雄, 飯島澄男: 単層カーボンナノチューブに内包された水の相転移挙動: X線回折実験を用いた研究

松田和之, 福岡智子, 高部陽介, 客野遥, 真庭豊, 西原洋知, 京谷隆: ゼオライト鑄型カーボンに吸着した水の挙動: X線回折とNMRによる研究

第41回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム 2011年9月5日-7日(首都大学東京)

河合将利, 五十嵐透, 鈴木拓也, 竹延大志, 真庭豊, 柳和宏: 直径1.4 nm近傍の単層カーボンナノチューブにおける直径・半金分離

守屋理恵子, 尾崎裕之, 五十嵐透, 真庭豊, 柳和宏: 単層カーボンナノチューブに内包された $\pi$ 共役分子の光電気化学特性

松田和之, 鷺谷智, 福岡智子, 柳和宏, 真庭豊, 片浦弘道:  $C_{60}$  ピーポッド-二層カーボンナノチューブ変換過程における $^{13}C$  NMR測定

客野遥, 松田和之, 福岡智子, 真庭豊, 西原洋知, 京谷隆: ゼオライト鑄型炭素への水吸着

日本物理学会 2011年秋季大会 2011年9月21日 - 24日(富山大学五福キャンパス)

米森啓太, 柿原隆介, 宮尾智章, 石井廣義, 鷺谷智, 真庭豊, 柳和宏, 羽淵隆文, 平山大裕, 林博和, 姜健, 岩澤英明, 島田賢也, 生天目博文, 谷口雅樹: 金属及び半導体カーボンナノチューブの光電子分光II

守屋理恵子, 柳和宏, 真庭豊: 一次元 ナノ空間に束縛された分子の光電気化学特性

客野遥, 松田和之, 福岡智子, 高部陽介, 真庭豊, 西原洋知, 京谷隆: 水を吸着したゼオライト鑄型カーボン(ZTC)の研究

池田真実, 萩原政幸, 柳和宏 A, 真庭豊, 松田和之, 奥西巧一: カーボンナノチューブ中の1次元的に配列した酸素分子の強磁場磁性II

家哲也, 中井祐介, 北川俊作, 石田憲二, 笠原成, 芝内孝禎, 松田祐司, 寺嶋孝仁: NMRから見た鉄系超伝導体  $BaFe_2(As_{1-x}P_x)_2$  における反強磁性と超伝導の関係

北川 俊作, 中井 祐介, 服部 泰佑, 石田 憲二, 池田 浩章, 神原 陽一, 平野 正浩, 細野 秀雄: 擬二次元重い電子系物質  $CeFePO$  の新奇なメタ磁性の発見

第42回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム 2012年3月6日-8日(東京大学)

鷺谷智, 松田和之, 福岡智子, 中井祐介, 柳和宏, 真庭豊, 片浦弘道: $^{13}C$  NMR と x線回折による  $C_{60}$  ピーポッド-2層カーボンナノチューブ変換過程の研究

河合将利、鈴木拓也、五十嵐透、竹延大志、鈴木浩紀、岡崎俊也、片浦弘道、真庭豊、柳和宏：分子内包可能な単層カーボンナノチューブの単一カイラリティ精製

工藤光、柳和宏、真庭豊、片浦弘道、小林春花、末永和知、竹延大志、蓬田陽平、平田邦生、吉宗良祐、中津亨：結晶状単層カーボンナノチューブ集合体の創製

客野遥、松田和之、中井祐介、福岡智子、真庭豊、西原洋知、京谷隆：ゼオライト鑄型炭素 (ZTC) に吸着した水の構造と相挙動

日本物理学会第 67 回年次大会 2012 年 3 月 (関西学院大学)

鷲谷智、米森啓太、柿原隆介、鈴木良輔、石井廣義、中井祐介、柳和之、真庭豊、羽淵隆文、平山大裕、林博和、姜健、永田偉士、堀家大希、岩澤英明、島田健也、生天目博文、谷口雅樹：金属及び半導体単層カーボンナノチューブから二層カーボンナノチューブの作製とその光電子分光

客野遥、松田和之、中井祐介、福岡智子、高部陽介、真庭豊、西原洋知、京谷隆：ゼオライト鑄型炭素 (ZTC) 内の水の構造と相挙動

高部陽介、真庭豊、中井祐介、松田和之：「ゼオライト鑄型炭素」による幾何学的閉じ込め効果を用いた、希ガスの物質相探索

水口佳一、濱田健太郎、高津浩、後藤和基、門脇広明、中井祐介、真庭豊、町田理、坂田英明、三浦大介：Fe<sub>1+d</sub>Te 系における反強磁性転移と構造相転移

家哲也、中井祐介、北川俊作、石田憲二、笠原成、芝内孝禎、松田祐司、寺嶋孝仁：鉄系超伝導体 BaFe<sub>2</sub>(As<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>)<sub>2</sub> の磁性と超伝導の共存/競合

The 16th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation, Hiroshima, Japan, March 3-4, 2012

K. Yonemori, R. Suzuki, R. Kakihara, H. Ishii, S. Sagitani, Y. Maniwa, K. Yanagi, T. Habuchi, D. Hirayama, H. Hayashi, J. Jiang, H. Iwasawa, K. Shimada, H. Namatame and M. Taniguchi: Photoemission spectroscopy of carbon nanotubes synthesized by CoMoCAT

International Conference of New Science Created by Materials with Nano Spaces: From Fundamentals to Applications, Sendai, Japan, November 23 - 26, 2011

Haruka KYAKUNO, Kazuyuki MATSUDA, NO, K. MATSUDA, Tomoko FUKUOKA, Yutaka MANIWA, Hiroto NISHIHARA, and Takashi KYOTANI: Water Adsorption in Zeolite Templated Carbon,

M. Hagiwara, M. Ikeda, K. Yanagi, K. Matsuda, Y. Maniwa: High-field magnetism of 1D-arrayed oxygen molecules confined within a single-walled carbon nanotube

The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2011), Cambridge, UK, 29 August - 2 September, 2011

Y. Nakai, T. Iye, S. Kitagawa, K. Ishida, H. Ikeda, S. Kasahara, T. Shibauchi, Y. Matsuda, and T. Terashima: Unconventional Superconductivity Around a Quantum Critical Point in the Iron-Based Superconductor BaFe<sub>2</sub>(As<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>)<sub>2</sub>

16th international symposium on intercalation compounds (ISIC16), Se-Ustupky, Czech Republic, May 22-27, 2011

M. Hagiwara, M. Ikeda, K. Yanagi, K.Matsuda, Y. Maniwa: High-field magnetization of oxygen molecules confined within a single-walled carbon nanotube

### 3) 学会誌等

松田和之、真庭豊：「10.2 水内包 SWCNT」196-199、カーボンナノチューブ・グラフェンハンドブック、コロナ社、2011年、フラーレン・ナノチューブ・グラフェン学会編

松田和之、真庭豊：「10.3 酸素など気体分子内包 SWCNT」199-201、カーボンナノチューブ・グラフェンハンドブック、コロナ社、2011年、フラーレン・ナノチューブ・グラフェン学会編

# ナノ物性IIサブグループ

## 1. 研究活動の概要

ナノ物質およびその集合体の光物性・電子物性に着目して研究行っている。主として、単層カーボンナノチューブ(SWCNT)を研究材料として用いて、SWCNT単体、分子内包複合体、およびそれらの凝集体における新奇物性探索・物質創製・技術開発・デバイス開発を進めている。

### 1) SWCNTの光物性

合成直後のSWCNTは様々なカイラリティが存在する為、可視光領域全体に吸収が広がってしまい、黒ずんだ色をする。しかしながら、高純度精製を行うと、その電子構造に依存した特定の吸収帯が可視領域に出現し、カイラリティに依存した鮮やかな色を示す。金属型SWCNTは可視光領域に一つの吸収帯を備える為、その直径を系統的に変えることで、シアン・マゼンタ・イエロー色を示す試料を得ることが可能である。本研究では、その色を能動的に制御する方法を開発することを目標に研究を行った。発色する起源は、基底準位から励起準位への電子遷移に由来する。よって、ドーピング制御により、電子遷移確率を能動的に制御可能であることが予想された。即ち、SWCNT試料に対しての電子・ホールドーピングを精密に制御することによって、その色を制御可能であることが予想された。精密に制御する為には電気化学的に行う必要があり、光電気化学測定系を新しく構築し測定を行った。青緑・赤・黄色の色を示す金属型SWCNTを分離精製し、薄膜を形成し、それらに対し光電気化学測定を行った。電解質をイオン液体を用いることにより、高電位をかけることが可能となり、その結果、全ての色において可逆変化を観察した。色変化する要素も配線も金属型SWCNTが担うことが可能である為、all-carbon nanotube display が可能であることを立証した。繰り返し耐久性試験や色変化効率を見積もり、他のエレクトロクロミック素子と同等な性能を備えていることを明らかにした。(6,5)型半導体型SWCNT薄膜も用いて色変化の実証研究も進めている。

### 2) ランダムネットワーク系における電気伝導機構の解明と電界効果型トランジスタの作製

SWCNTの電界効果型デバイス(FET)応用において、ネットワーク系における電気伝導機構を明らかにすることは極めて重要である。本研究では、系統的に金属型・半導体型含有率の異なるSWCNTパッキーペーパーを作成し、おのこの電気伝導特性を明らかにした。その結果、高純度金属型SWCNTでは弱局在が散乱中心となり、半導体型含有量を系統的に増やすに従って、ホッピング伝導へと変わっていくことを明らかにした。この変化は、磁場印加による負の磁気抵抗効果からも立証された。またホッピング伝導の次元が含有量によって変化し、3次元から1次元へと高純度半導体型SWCNTになるに従って変化することを明らかにした。ホッピング特性温度から、金属型含有量を見積もることを可能とさせ、新しい純度評価法を提案した。分離精製に必要なSWCNTを分散する過程は、SWCNTの短絡化や欠陥増加を生じる。系統的に分散処理時間の異なる試料を作製し、SWCNTの欠陥量の指標であるG/D比とホッピング特性温度との相関を明らかにした。

また、高純度半導体型SWCNTを用いたFET応用も進めている。早稲田大学竹延研究室と共同で、イオンゲルをゲート絶縁体として用いることで、高純度半導体型SWCNT厚膜(厚み: 300 nm程)の試料において、ON/OFF比 =  $10^4$ 、移動度数  $10 \text{ cm}^2/\text{VS}$ 程のデバイス素子が形成可能であることを明らかにした。今までは、 $\text{SiO}_2$ を用いたバックゲート方式が一般的であるが、その場合、表面第一層のSWCNTにしかキャリアを注入することが出来ない。イオンゲルを用いることで、全てのSWCNTにドーピング可能となりFET特性を向上させることに成功した。

### 3) SWCNTの高純度精製

SWCNTの物性を真に明らかにする為には、単一カイラリティの試料を得ることは必要不可欠である。近年の分離精製技術の進展により、直径が1.0 nm以下の試料においては、単一カイラリティの試料を得る方法は多く提案されている。しかしながら、それより大きな直径では、単一カイラリティ試料を得る方法はほとんど報告されていない。本研究では、金属型・半導体型分離と直径分離を組み合わせることで、単一カイラリティ試料を得ることを目標に研究を行った。直径の違いは密度の違いとして現れることが予想された為、密度の違いで分離精製を行うのに最適なセシウムクロライドという試薬を密度勾配剤として用いて実験を行った。直径1 nm以下の試料においては、極めて高純度に直径分離が可能であることを明らかにした。直径が1.4nm程の試料において用いた場合、分散時間を最適化することにより直径分離が可能であることを明らかにした。更に、金属型・半導体型分離精製を行った後、丁寧に洗浄を行い、吸着した界面活性剤を除去した後、セシウムクロライドを用いた分離を行うことにより、(11,10) SWCNTの単一カイラリティ精製に世界ではじめて成功した。

### 4) SWCNTの結晶化技術の開発

SWCNTがランダムに配列したネットワークにおいては、そのランダム性に由来して、必然的に伝導電子は局在し、界面において散乱されてしまう。このような伝導特性の劣化を改善する為には、SWCNTが規則正しく配列した結晶状試料を作製する必要がある。本研究では、密度勾配遠心分離法によって、単一カイラリティ精製を行った(6,5)SWCNTを用いて、蒸気拡散法による結晶作製技術の開発を行った。結果として、針状の結晶状試料を得ることに成功した。顕微ラマン分光測定により、SWCNTが結晶内に存在することが分かったが、偏光依存性は悪い為、結晶化手法の更なる改善が必要となっている。

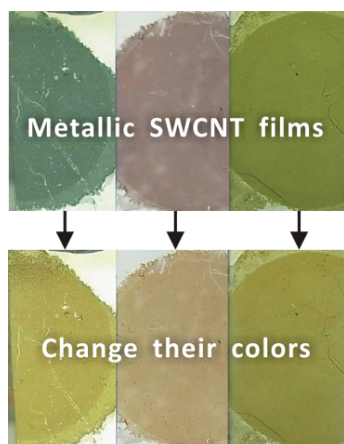


図 1: 金属型 SWCNT の色制御

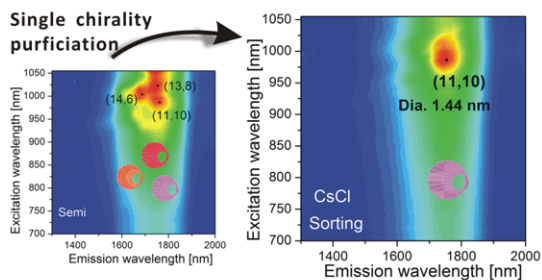


図 2: (11,10) カイラリティの単一カイラリティ精製

## 2. 研究業績

### 1) 論文

M. Ichida, S. Saito, T. Nakano, Y. Feng, Y. Miyata, K. Yanagi, H. Kataura, H. Ando: Absorption spectra of high purity metallic and semiconducting single-walled carbon nanotube thin films in a wide energy region, *Solid. State. Comm.***151** (2011) 1696–1699

Y. Nobusa, Y. Yomogida, S. Matsuzaki, K. Yanagi, H. Kataura, T. Takenobu: Inkjet printing of single-walled carbon nanotube thin-film transistors patterned by surface modification, *Appl. Phys. Lett.***99** (2011) 183106–183108

S. Matsuaki, Y. Nobusa, K. Yanagi, H. Kataura, T. Takenobu: Inkjet printing of carbon nanotube complementary inverters, *Appl. Phys. Express* **4** (2011) 105101–105103

K. Yanagi, R. Moriya, Y. Yomogida, T. Takenobu, Y. Naito, T. Ishida, H. Kataura, K. Matsuda, Y. Maniwa: Electrochromic carbon electrodes: Controllable visible color changes in metallic single-wall carbon nanotubes, *Adv. Mater.* **23** (2011) 2811–2814

H. Kyakuno, K. Matsuda, H. Yahiro, Y. Inami, T. Fukuoka, Y. Miyata, K. Yanagi, Y. Maniwa, T. Saito, S. Iijima: Confined water inside single-walled carbon nanotubes: Global phase diagram and effect of finite length, *J. Chem. Phys.* **134** (2011) 244501–2445014

K. Saito, K. Yanagi, R. Cogdell, H. Hashimoto: A comparison of the Liptay theory of electroabsorption spectroscopy with the sum-over-state model and its modification for the degenerate case, *J. Chem. Phys.* **134** (2011) 044138–044146

## 2) 学会講演

新技術説明会 2011年7月2日(日比谷、JST)

柳 和宏: 金属型単層カーボンナノチューブを用いたレアメタルフリーの画像素子開発

Nanotech2012 2012年2月15日(東京ビックサイト) 柳 和宏: エレクトロクロミックカーボン電極(出展&発表)

高次 空間の創発と機能開発 第6回公開シンポジウム 2011年7月15日(自然科学研究機構 岡崎コンファレンスセンター)

柳 和宏、中津亨: 結晶性一次元 ナノ空間の創製と制御(ポスター&口頭)

高次 空間の創発と機能開発 第7回公開シンポジウム 2012年3月13日~3月14日(松山メルパルク道後)

柳和宏, : 単層カーボンナノチューブの結晶化技術の開発(口頭)

カロテノイド研究談話会 2011年9月13日(つくば国際会議場)

守屋 理恵子、柳 和宏: 一次元 ナノ空間に束縛された カロテンの光電気化学特性(口頭)

日本MRS 2011年12月20日~12月21日(横浜波止場会館)

守屋 理恵子、尾崎 裕之、五十嵐 透、真庭 豊、柳 和宏: 単層カーボンナノチューブに内包された 共役分子の光電気化学特性(ポスター)

河合将利、五十嵐透、鈴木拓也、竹延大志、真庭豊、柳和宏: 直径 1.4nm 付近での単層カーボンナノチューブの単一カイラリティ精製(ポスター)

柳 和宏、守屋 理恵子、蓬田 洋平、竹延 大志、片浦 弘道、真庭 豊: 全カーボンナノチューブエレクトロクロミック素子の開発(口頭)

第41回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム 2011年9月5日~9月7日(首都大学東京 南大沢キャンパス)



河合将利、五十嵐透、鈴木拓也、竹延大志、真庭豊、柳和宏: 直径 1.4 nm 近傍の単層カーボンナノチューブにおける直径・半金分離 (ポスター)

守屋理恵子、尾崎裕之、五十嵐透、真庭豊、柳和宏: 単層カーボンナノチューブに内包された 共役分子の光電気化学特性 (ポスター)

松田和之、鷺谷智、福岡智子、柳和宏、真庭豊、片浦弘道: C60 ピーポッド-二層カーボンナノチューブ変換過程における  $^{13}\text{C}$  NMR 測定 (ポスター)

第 42 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム 2012 年 3 月 6 日~3 月 8 日 (東京大学 本郷キャンパス)

蓬田陽平、野房勇希、柳和宏、岩佐義宏、竹延大志: 高性能フレキシブル SWCNT トランジスタ (ポスター)

鷺谷智、松田和之、福岡智子、中井佑介、柳和宏、真庭豊、片浦弘道:  $^{13}\text{C}$  NMR と x 線回折による C60 ピーポッド-2 層カーボンナノチューブ変換過程の研 (ポスター)

松崎怜樹、蓬田陽平、柳和宏、岩佐義宏、竹延大志: インクジェット法を用いた分離チューブトランジスタの作製 (口頭)

河合将利、鈴木拓也、五十嵐透、竹延大志、鈴木浩紀、岡崎俊也、片浦弘道、真庭豊、柳和宏: 分子内包可能な単層カーボンナノチューブの単一カイラリティ精製 (ポスター)

高木勇樹、野房勇希、牛腸翔太、柳和宏、片浦弘道、竹延大志: インクジェット法を用いた微細カーボンナノチューブ薄膜 (ポスター)

工藤光、柳和宏、真庭豊、片浦弘道、小林春花、末永和知、竹延大志、蓬田陽平、平田邦生、吉宗良祐、中津亨: 結晶状単層カーボンナノチューブ集合体の創製 (ポスター)

清水諒、松崎怜樹、柳和宏、竹延大志: インクジェット法を用いたカーボンナノチューブの連続的電子ドーピング (ポスター)

守屋理恵子、柳和宏、Nguyen Thanh Cuong、大谷実、岡田晋: 単層カーボンナノチューブ内に束縛された一次元 共役分子のドーピング特性 (ポスター)

第 72 回応用物理学学会学術講演会 2011 年 8 月 29 日~9 月 2 日 (山形大学 小白川キャンパス)

田原佳祐<sup>1</sup>、古賀 翔<sup>1</sup>、片山郁文<sup>1</sup>、武田 淳<sup>1</sup>、柳 和宏<sup>2</sup>、島田 透<sup>3</sup>、北島正弘<sup>4</sup> (横浜国大院工<sup>1</sup>、横国大 IRC<sup>2</sup>、物材機構<sup>3</sup>、首都大院理工<sup>4</sup>、フリッツハーバー研究所<sup>5</sup>、防衛大理工<sup>6</sup>): 表面プラズモンによるカーボンナノチューブのコヒーレントフォノン振幅増強

守屋理恵子<sup>1</sup>、蓬田陽平<sup>2</sup>、竹延大志<sup>3</sup>、真庭 豊<sup>1,4</sup>、柳 和宏<sup>1</sup> (首都大東京<sup>1</sup>、早大<sup>2</sup>、産総研<sup>3</sup>、JST-CREST<sup>4</sup>): 金属型単層カーボンナノチューブによるレアメタルフリーエレクトロクロミック素子の開発

柳 和宏<sup>1</sup>、河合将利<sup>1</sup>、五十嵐透<sup>1</sup>、真庭 豊<sup>1,2</sup>、大久保修一<sup>3</sup> (首都大理工<sup>1</sup>、JST-CREST<sup>2</sup>、NEC Avio 赤外線テクノロジー<sup>3</sup>): 高純度半導体型単層カーボンナノチューブネットワークにおける熱抵抗変化率

第 59 回応用物理学会関係連合講演会 2012 年 3 月 15 日～3 月 18 日 (早稲田大学 早稲田キャンパス)

田原佳祐 1, 古賀 翔 1, 片山郁文 1, 武田 淳 1, 柳 和宏 2, 島田 透 3, 北島正弘 4 (横国大院工 1, 首都大院理工 2, フリッツハーバー研 3, 防衛大理工 4): 単層カーボンナノチューブにおけるコヒーレントフォノンの検出波長依存性

河合将利 1, 鈴木拓也 1, 五十嵐透 1, 竹延大志 2, 岡崎俊也 3, 片浦弘道 3, 真庭 豊 1,4, 柳 和宏 1 (首都大東京 1, 早大 2, 産総研 3, JST-CREST4): (11,10) 単層カーボンナノチューブの単一カイラリティ精製

蓬田陽平 1, 竹延大志 2,3, 柳 和宏 4, 岩佐義広 5 (東北大理 1, 早大先進 2, PRESTO3, 首都大理 4, 東大工 5): イオンゲルを用いた高性能半導体 SWCNT トランジスタ

日本物理学会秋季大会 2011 年 9 月 21 日～9 月 24 日 (富山大学、五福キャンパス)

下谷秀和 A, 津田諭 A, 袁洪涛 B, C, 蓬田陽平 A, 守屋理恵子 D, 竹延大志 E, F, 柳和宏 D, 岩佐義宏 B, C (東北大理 A, 東大工 B, JST-CRESTC, 首都大理工 D, 早大先進 E, JST さきがけ F): 金属・半導体分離 SWNT 薄膜の 1 次元的伝導特性

米森啓太 A, 柿原隆介 A, 宮尾智章 A, 石井廣義 A, 鷲谷智 A, 真庭豊 A, 柳和宏 A, 羽淵隆文 B, 平山大裕 B, 林博和 B, 姜健 B, 岩澤英明 C, 島田賢也 C, 生天目博文 C, 谷口雅樹 C (首都大理工 A, 広島大理 B, 放射光科学研究セ C): 金属及び半導体カーボンナノチューブの光電子分光 II

守屋理恵子, 柳和宏, 真庭豊 A (首都大理工, CREST-JSTA): 一次元 ナノ空間に束縛された分子の光電気化学特性

池田真実, 萩原政幸, 柳和宏 A, 真庭豊 A, 松田和之 B, 奥西巧一 C(阪大極限セ, 首都大理工 A, 神奈川大工 B, 新潟大理 C): カーボンナノチューブ中の 1 次元的に配列した酸素分子の強磁場磁性 II

日本物理学会第 67 回年次大会 2012 年 3 月 24 日～3 月 27 日 (関西学院大学 上ヶ原キャンパス)

鈴木良輔, 米森啓太, 柿原隆介, 石井廣義, 鷲谷智, 真庭豊, 柳和宏, 永田偉士 A, 堀家大希 A, 平山大裕 A, 羽淵隆文 A, 林博和 A, 姜健 A, 岩澤英明 B, 島田賢也 B, 生天目博文 B, 谷口雅樹 B (首都大理工, 広島大理 A, 放射光科学研究セ B): CoMoCAT 法で合成された極細カーボンナノチューブの光電子分光

松崎怜樹 A, 蓬田陽平 B, 柳和宏 C, 片浦弘道 D, 岩佐義宏 E, 竹延大志 A (早大先進 A, 東北大理 B, 首都大理工 C, 産総研ナノテク D, 東大工 E): インクジェット法によって作製した半導体ナノチューブ トランジスタのキャリア伝導機構

工藤光, 柳和宏, 小林春花 A, 末永和知 A, 蓬田陽平 B, 竹延大志 B, 吉宗良祐 C, 中津亨 C (首都大理工, 産総研 A, 早大応物 B, 京大薬 C): 結晶状単層カーボンナノチューブ集合体の作製とその物性

斉藤圭亮 A, 柳和宏 B, 橋本秀樹 C(京大生命科学系キャリアパス A, 首都大理工 B, 阪市大院理・複合先端研・CREST/JSTC): 電場変調吸収 (Stark) 分光における Liptay 理論と状態和理論との比較

国内研究会

International Symposium on Nano Science and Functional Materials: Post-symposium of International Symposium on Catalysis and Fine Chemicals, Dec. 17, 2011

K. Yanagi: "Control of colors of single-wall carbon nanotubes" (口頭, invited)

### 国際会議

NT11 2011年7月10日~7月16日 (Cambridge, UK)

Kazuhiro Yanagi: "All carbon nanotube electrochromic device" (口頭)

The third international symposium of emergence of highly elaborated pi-space and its function, 2011年11月18日~11月19日 (つくば国際会議場)

K. Yanagi, H. Kudo, K. Suenaga, H. Kobayashi, T. Takenobu, Y. Yomogida, K. Hirata, R. Yoshimune, R. Nakatsu, : Development of Crystalline One-dimensional pi-Conjugated Systems(ポスター)

### 新聞報道

ナノチューブの色制御、日経産業新聞、2012年1月31日

# 粒子ビーム物性サブグループ

## 1. 研究活動の概要

本年度の特筆すべき研究成果は、量子スピン液体状態ではなからうか？と言われていた謎の磁性体  $Tb_{2+x}Ti_{2-x}O_{7+y}$  が、 $x$  の微小変化により量子相転移を起こすことを発見したことと、スピンアイス磁性体  $Dy_2Ti_2O_7$  において、磁気モノポール由来の現象を AC 磁化測定で明確に観測したことである。こういった進展もあった反面、本年度の前半は、東日本大震災の影響により電力使用量削減等の影響を受けるなどにより、予定していた実験ができないことが多かった。特に日本原子力研究開発機構東海研究所にある中性子散乱実験施設は、ダメージが大きく年度を通じて中性子散乱実験ができなかったのは残念であった。

### 1) 幾何学的フラストレーションを示す磁性体の研究

パイロクロア構造を持つ磁性体  $Tb_2Ti_2O_7$  は、短距離磁気相関が数 K の温度領域で発達しているが、極低温領域の 50 mK まで長距離磁気秩序を持たないことが、約 10 年前に示され、その後多くの興味を集めてきた。 $Tb_2Ti_2O_7$  の基底状態が Tb 原子間距離程度の短距離秩序しか示さない理由は何なのか？という問題は、幾何学的フラストレーションを示す多くの磁性体の研究の中で、非常に興味深いが大いなる難問だと考えられている。興味深い理論的な考え方に、 $Tb_2Ti_2O_7$  では多くの縮退したスピンアイス状態間を量子力学的に揺らいでいる基底状態が実現している、すなわち量子スピンアイス状態と呼べるようなものではなからうか？という仮説がある。

我々は、 $Tb_2Ti_2O_7$  の低温状態について実験的に理解する糸口を見出すべく、以前から問題が多いのではなからうかと言われていたサンプルを純良化する方向で研究を進めてみた。単結晶を FZ 炉を用いて育成すると、以前から指摘されていたように、低温比熱の再現性に問題があることが分かった。 $Tb_2Ti_2O_7$  の結晶は簡単に育成できるが、その純良化は非常に難しい。そこで方向性を変えて、サンプルのコントロールがより簡単な多結晶  $Tb_{2+x}Ti_{2-x}O_{7+y}$  を合成することを試みた。驚いたことに、 $x$  の微小変化が tuning parameter となり、スピン液体状態と (order parameter は分からないが) 長距離秩序状態間の量子相転移を引き起こすことを発見した。これは、この系の実験上の難問を解決する突破口であると考えられ、今後の実験研究に大きな進展をもたらすであろうと期待できる。

氷 ( $H_2O$ ) の水素原子は、ふたつの酸素原子を結ぶ線分上にはあるものの、どちらの酸素の近くに位置するかということに関して、局所的に  $H_2O$  分子を構成するというアイスルースが成立する以外は、ランダムな配置をとっている。氷の水素原子の配置はフラストレーションの典型例であり、そのためにゼロ点エントロピーを持つ。スピンアイス  $Dy_2Ti_2O_7$  は、氷における水素原子の役割を  $Dy^{3+}$  のスピンの担う系である。このスピンアイスにおける励起状態を考察すると、磁気モノポール・反磁気モノポールの対生成現象と非常によく似ていることが最近興味を集めている。磁気モノポールの考え方を導入すると、フラストレーションがあるため現象が複雑に見えるということではなく、磁気モノポールに注目することにより、より単純に理解することが可能な現象があることが面白い。

スピンアイスの磁気モノポール理論は簡単だが、明確な実験を行うのはなかなか難しい。そこで、磁気モノポールの典型と考え得る実験を行うべく、 $Dy_2Ti_2O_7$  に [111] 方向の DC 磁場をかけ、その DC 磁場に垂直な方向の AC 磁化を測定する実験を計画した。実験の進行はやや遅れたものの、年度末にはとても楽しそうに見える実験データを得ることに成功した (図参照)。まず間違いなく磁気モノポールに由来するとシグナルを観測することに成功したと考えられる。今後、理論やシミュレーションとの比較を行う予定である。

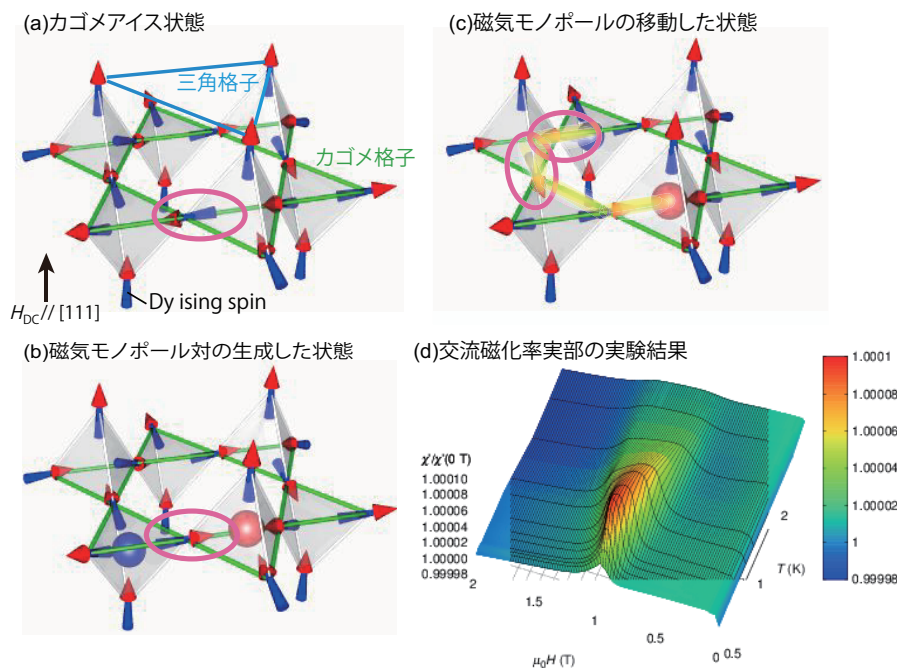


図 1:  $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$  におけるスピン配列と磁気モノポール生成過程。(a) 直流磁場  $H_{\text{DC}}$  を  $[111]$  結晶軸方向に印加した時に現れるカゴメアイス状態：三角格子層にあるスピンの向きは磁場によって方向を固定されているが、カゴメ格子層のスピンはアイスルールが成り立つために、2in-1out または 1in-2out のルールに従ってランダムネスを保った状態になる。(b) 2つの隣り合う四面体で共有される1個のスピンを反転させることにより、モノポール・反モノポール（赤と青の球）の対が生成された様子。(c) スピンを反転に伴って正負のモノポールがつながりあった経路に沿って引き離されていく様子。熱エネルギーにより、有限温度でこれがおきると、モノポールは互いに独立した動き回る点欠陥として振る舞う。(d) 交流帯磁率測定の実験結果。実験は、直流磁場を  $[111]$  に向け、それと垂直なカゴメ格子面内で交流磁場を振る条件で行った。磁場・温度マップで  $\chi'$  がピークとなる（すなわち、磁化の変化が大きいことを表す）特徴的な振る舞いが見て取れる。

## 2) 導電性三角格子反強磁性体の異常ホール効果と磁気構造

幾何学的にフラストレートした磁性体では、結晶構造の幾何学的特徴のために、局所的なスピンの安定配置が系全体では同時に実現できない。このためスピンの熱的な揺らぎが抑えられる低温領域において様々な特異現象が期待される。特にフラストレートした局在スピンを持つ“金属的な”フラストレート磁性体においては、従来のスピン-軌道相互作用に基づく異常ホール効果に加えて、「スピンの幾何学性」に起因する新奇な異常ホール効果の発現の可能性が議論され、注目を集めている。

我々は、この研究の流れの中で、最も基本的なフラストレート格子の「カゴメ格子」を成す  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  という物質に着目し、スピン構造と新奇なホール効果発現の関係性について研究を始めた。スピンの作り出す量子位相と電流が関係していることにより、非平面型スピン構造による実効的な磁場によるホール効果として観測されることが期待できる。また、我々は導電性二次元三角格子反強磁性体の  $\text{PdCrO}_2$  の単結晶を用いた中性子回折実験も行い、この系で実現する非平面型スピン構造が、ホール効果にも影響を与えることを示した。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

H. Takatsu, H. Kadowaki, T. J. Sato, J. W. Lynn, Y. Tabata, T. Yamazaki, K. Matsuhira: Quantum spin fluctuations in the spin-liquid state of  $Tb_2Ti_2O_7$ , *J. Phys.: Condens. Matter* **24** (2012) 052201-(1-4).

K. Goto, H. Takatsu, T. Taniguchi, H. Kadowaki: Absence of anomalous negative lattice-expansion for polycrystalline sample of  $Tb_2Ti_2O_7$ , *J. Phys. Soc. Jpn.* **81** (2012) 015001-(1-2).

Y. Mizuguchi, K. Hamada, K. Goto, H. Takatsu, H. Kadowaki, O. Miura: Evolution of two-step structural phase transition in  $Fe_{1+d}Te$  detected by low-temperature x-ray diffraction, *Solid State Commun.* **152** (2012) 1047-1051.

### 2) 学会講演

日本物理学会第 66 回年次大会 2011 年 3 月 25 ~ 28 日 (新潟大学 東日本大震災のため概要集による発表のみになった)

25aPS-47: 「三角格子反強磁性体  $PdCrO_2$  の低温磁気構造」: 高津浩, 太田真秀, 門脇広明, 吉沢英樹<sup>A</sup>, 米澤進吾<sup>B</sup>, 前野悦輝<sup>B</sup>, 金廷恩<sup>C</sup>, 辻成希<sup>C</sup>, 高田昌樹<sup>C</sup>: (首都大理工, 東大物性研<sup>A</sup>, 京大院理<sup>B</sup>, JASRI<sup>C</sup>)

25pEC-4: 「重い電子  $Ce(Ru_{1-x}Rh_x)_2Si_2$  の反強磁性量子相転移におけるランダムネスの効果」: 田畑吉計, 門脇広明<sup>A</sup>, B. Fak<sup>B</sup>, S. Raymond<sup>B</sup>, 和氣剛, 中村裕之, 横山淳<sup>C</sup>: (京大院工, 首都大理工<sup>A</sup>, CEA-Grenoble<sup>B</sup>, 茨大理<sup>C</sup>)

25aPS-55: 「 $Tb_2Ti_2O_7$  は量子スピンアイスなのか」: 門脇広明, 高津浩, 田畑吉計<sup>A</sup>, 佐藤卓<sup>B</sup>: (首都大理工, 京大院工<sup>A</sup>, 東大物性研<sup>B</sup>)

25pHE-11: 「 $Dy_2Ti_2O_7$  のカゴメアイス状態におけるカステレイン転移」: 土居直弘, 高津浩, 門脇広明, 田山孝<sup>B</sup>, 榊原俊郎<sup>C</sup>, 東中隆二, 松平和之<sup>D</sup>, 廣井善二<sup>C</sup>, 室裕司<sup>E</sup>, 元屋清一郎<sup>F</sup>: (首都大理工, 富山大理<sup>B</sup>, 東大物性研<sup>C</sup>, 九工大工<sup>D</sup>, 広大院先端物質<sup>E</sup>, 東理大理工<sup>F</sup>)

日本物理学会 2011 年秋季大会 2011 年 9 月 21 ~ 24 日 (富山大学 五福キャンパス)

21aPS-111: 「三角格子反強磁性体  $PdCrO_2$  の導電性と磁気秩序」: 高津浩, 門脇広明, 吉沢英樹<sup>A</sup>, Collin Broholm<sup>B</sup>, Yang Zhao<sup>B</sup>, Mark Green<sup>C</sup>, 米澤進吾<sup>D</sup>, 前野悦輝<sup>D</sup>, 金廷恩<sup>E</sup>, 辻成希<sup>E</sup>, 高田昌樹<sup>E</sup>: (首都大理工, 東大物性研<sup>A</sup>, Johns Hopkins Univ.<sup>B</sup>, NIST-CNR<sup>C</sup>, 京大院理<sup>D</sup>, JASRI<sup>E</sup>)

22aGC-4: 「重い電子  $Ce(Ru_{1-x}Rh_x)_2Si_2$  の反強磁性量子相転移におけるランダムネスの効果」: 田畑吉計, 門脇広明<sup>A</sup>, B. Fak<sup>B</sup>, S. Raymond<sup>B</sup>, 和氣剛, 中村裕之, 横山淳<sup>C</sup>: (京大院工, 首都大理工<sup>A</sup>, CEA-Grenoble<sup>B</sup>, 茨大理<sup>C</sup>)

22aGH-8: 「 $Tb_2Ti_2O_7$  のスピン液体状態における量子スピン揺らぎ」: 門脇広明, 高津浩, 田畑吉計<sup>A</sup>, 佐藤卓<sup>B</sup>, J. W. Lynn<sup>C</sup>: (都大理工, 京大院工<sup>A</sup>, 東大物性研<sup>B</sup>, NIST-CNR<sup>C</sup>)

日本物理学会第 67 回年次大会 2012 年 3 月 24 ~ 27 日 (火) (関西学院大学 西宮上ヶ原キャンパス)

24aPS-99 : 「 $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$  のカゴメアイス状態における磁気モノポール」: 後藤和基, 高津浩, 門脇広明, 東中隆二, 松林和幸<sup>A</sup>, 上床美也<sup>A</sup>, 元屋清一郎<sup>B</sup> : (首都大理工, 東大物性研<sup>A</sup>, 東理大理工<sup>B</sup>)

24aPS-102 : 「フラストレートしたパイロクロア磁性体  $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$  のスピン液体状態の研究」: 谷口智洋, 後藤和基, 高津浩, 門脇広明, 山崎照夫<sup>A</sup>, 佐藤卓<sup>A</sup>, 廣井善二<sup>A</sup>, 松平和之<sup>B</sup> : (首都大理工, 東大物性研<sup>A</sup>, 九工大工<sup>B</sup>)

25aYA-1 : 「 $\text{Fe}_{1+d}\text{Te}$  系における反強磁性転移と構造相転移」: 水口佳一, 濱田健太郎, 高津浩<sup>A</sup>, 後藤和基<sup>A</sup>, 門脇広明<sup>A</sup>, 中井祐介<sup>A</sup>, 真庭豊<sup>A</sup>, 町田理<sup>B</sup>, 坂田英明<sup>B</sup>, 三浦大介 : (首都大電気電子, 首都大物理<sup>A</sup>, 東京理科大<sup>B</sup>)

## 国内研究会

特定領域研究「フラストレーションが創る新しい物性」最終成果報告会、大阪大学吹田キャンパス、2012年1月6~8日

「 $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$  のスピン液体状態における量子スピン揺らぎ」: 門脇広明, 高津浩, 後藤和基, 谷口智洋, 田畑吉計<sup>A</sup>, 佐藤卓<sup>B</sup>, J.W. Lynn<sup>C</sup>, 山崎照夫<sup>B</sup>, 松平和之<sup>D</sup>, L. R. Yaraskavitch<sup>E</sup>, J. B. Kycia<sup>E</sup> : (首都大理工, 京大院工<sup>A</sup>, 東大物性研<sup>B</sup>, NIST-CNR<sup>C</sup>, 九工大院工<sup>D</sup>, Univ. of Waterloo<sup>E</sup>)

「 $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$  のカゴメアイス状態における磁気モノポール励起」: 後藤和基, 高津浩, 東中隆二, 大塚博巳, 門脇広明, 松林和幸<sup>A</sup>, 上床美也<sup>A</sup> : (首都大理工, 東大物性研<sup>A</sup>)

「導電性フラストレート反強磁性体  $\text{PdCrO}_2$  の磁気構造」: 高津浩, 門脇広明, 吉沢英樹<sup>A</sup>, Collin Broholm<sup>B</sup>, Yang Zhao<sup>B</sup>, Mark Green<sup>C</sup>, 米澤進吾<sup>D</sup>, 前野悦輝<sup>D</sup>, 金廷恩<sup>E</sup>, 辻成希<sup>E</sup>, 高田昌樹<sup>E</sup> : (首都大理工, 東大物性研<sup>A</sup>, Johns Hopkins Univ.<sup>B</sup>, NIST-CNR<sup>C</sup>, 京大院理<sup>D</sup>, JASRI<sup>E</sup>)

# ESR 物性サブグループ

## 1. 研究活動の概要

電子スピン共鳴 (ESR) 法や SQUID 磁束計を中心手段として興味ある物性を示す系について研究を進めている。ESR には通常、市販の X-バンド (10 GHz) や Q-バンド (36 GHz) 装置が使われることが多い。これらの装置は感度が高く有用であるが、本研究室の特徴としては分子科学研究所との共同研究により 10~94,000 MHz にわたって周波数可変なスペクトロメーターを用い、温度、周波数、圧力をパラメーターとした電子状態の解明を目指してきた。また、圧力に関しては、静水圧と一軸変位が加えられる ESR 装置を用い、任意の軸のみ或いは一様に格子定数を変えて電子間或いは電子-格子間の相互作用を変調し、物性発現に寄与する相互作用を調べている。現在は更に、産総研との共同研究により、均一で更に高い圧力が発生できる cubic anvil セルを用いた 10 GPa までの高圧下 ESR の開発を進めている。

また、物質の状態を知る方法は多くあるが、その中で、走査型探針顕微鏡 (SPM) を用いた研究もこの 4~5 年続けてきており、興味深いデータと解析結果を得て来た。

以下に今年度行われた研究の概要を整理する。

### 1) DNA

我々生物の遺伝情報をつかさどる DNA (デオキシリボ核酸) は、燐酸、糖に加えて 4 種のアミノ基、グアニン (G)、シトシン (C)、アデニン (A)、チミン (T) の組合せによって構成される有機高分子であり、2 本の DNA が G-C 或は A-T の組み合わせの塩基対によって連結されて、良く知られた 2 重螺旋構造を構成する。この塩基対は、任意に設計・合成が可能な配列のフレキシビリティと高い自己組織化能を併せ持つことから、任意形状のナノサイズ構造物を DNA の 2 重螺旋で構成出来ることも報告されている。

一方で、人類の DNA の長さは 1 m にも及ぶことが知られているが、放射線照射などにより発生した欠陥の位置から、かなり離れた部分に遺伝情報の異常が発生したりする事から、ソリトン伝導など、何らかの高速な情報伝達機構があるのではないかと等、その本質には未だ計り知れない神秘性が残されている。本研究グループでは、物性的には未知である DNA について報告される新規な現象を、物性物理の立場からチェックしていくこと、これまでの研究から半導体であることが確認されてきた天然の DNA に電荷担体を導入し、その物性を明らかにすることを通して、ナノエレクトロニクス素材としての可能性の検証も目的の一つとして研究を進めている。

2 価の金属イオン水溶液中では、DNA は、2 つの  $\text{Na}^+$  カウンターイオンの代わりに、塩基対の間の水素結合位置に 2 価金属イオンを取り込み化合物を作る。中でも鉄を導入した Fe-DNA は、 $\text{Fe}^{2+}$  として取込まれた後に  $\text{Fe}^{3+}$  に変化する事が観測されており、 $\text{Fe}^{2+}$  から飛び出した電子が DNA にドープされている可能性がある。この 3 価の鉄は、空气中に置かれた  $\text{FeCl}_2$  水溶液からは生じないこと、また、高温の  $\text{FeCl}_2$  水溶液中では、空气中酸化による  $\text{Fe}^{3+}$  を含む  $\text{FeO}(\text{OH})$  が生じるが、DNA 中の  $\text{Fe}^{3+}$  イオンとは全く異なった共有結合性の電子状態に起因する光学吸収スペクトルを示すことが確認されている。DNA 中の Fe イオンは、DNA+ $\text{FeCl}_2$  水溶液中では時間に比例して増え続ける。また、 $\text{FeCl}_3$  とほぼ同一の光学吸収スペクトルを示し、水和されたイオンとして DNA 中の塩基対間に配位していると考えられている。

興味深いことに、Fe-DNA の磁化曲線や ESR スペクトルを観測すると、 $\text{Fe}^{3+}$  は単一のスピンではなく、結晶場により支配された高スピン状態の  $S=5/2$  と低スピン状態の  $S=1/2$  がほぼ 1 対 3 の割合で共存することが知られている。その原因は未だ明らかにされていない。その原因究明の一つの可能性とし



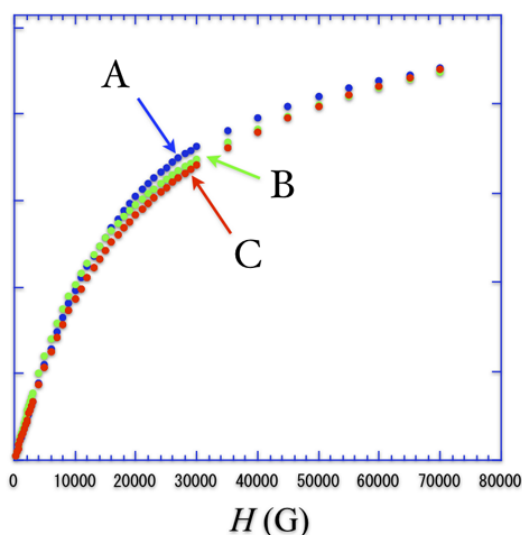


図 1: 空气中で合成し、乾燥条件を変えた Fe-DNA の 2 K における磁化曲線: A: 空气中乾燥、B: 空气中加熱乾燥、C: 真空乾燥。系統的な磁化曲線の変化が観測される。乾燥度が高いほど高磁場に於けるゆっくりとした増加 ( $S=1/2$  のブリルアン関数に対応) をする成分が増し、低磁場で急速に立ち上がる  $S=5/2$  の成分の割合が減少している。この結果から、 $\text{Fe}^{3+}$  イオンの電子状態を支配する配位子場が DNA 中の水分子に支配されていることが示唆される。

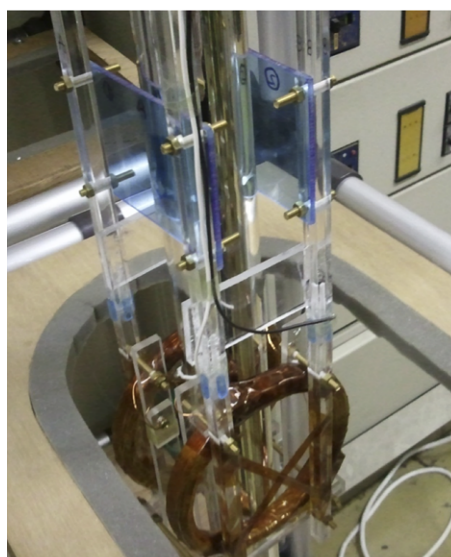


図 2: 吸収曲線測定用の低周波 ESR 装置。液体窒素中に配置された磁場発生用空芯コイルは、試料位置に合わせて上下に調整が可能。鉄芯を持たないため高速磁場掃引ができ、 $1/f$  雑音に影響されずに吸収曲線を直接測定出来る。DPPH 参照試料と同時測定で、反磁性の影響を受けずスピン常磁性磁化率を効率良く測定出来る。一例として、圧力下の  $\beta''$ -(DODHT) $_2$ PF $_6$  の場合に、従来の微分波形測定より 1 桁程度測定時間の短縮が可能になった。

て、空气中の酸素分子が  $\text{Fe}^{3+}$  イオンに配位する影響を明らかにするために、以下の様に 3 段階に雰囲気制御して合成・測定を行った。

1. アルゴン雰囲気下で合成・真空乾燥
2. 空气中で合成・真空乾燥
3. 空气中で合成・加熱乾燥

その結果を解析して、最終的に得られた結果を図 1 に示す。アルゴン雰囲気下で合成・真空乾燥した試料は、空气中合成・乾燥した試料とは明確に異なる「 $S=1/2$  の割合が増加する」という結果を与えた。これより、「酸素」或は「水」分子が  $\text{Fe}^{3+}$  の電子状態を支配していることが明確になった。合成段階の酸素の影響が無視出来ることは、2. の結果で明らかになり、3. の結果まで含めた図 1 から、Fe-DNA 中の水分こそが  $\text{Fe}^{3+}$  の高スピン状態を生み出す原因であることを明らかに出来た。

## 2) (BEDT-TTF) $_2$ ICl $_2$

有機電荷移動錯体 (BEDT-TTF) $_2$ ICl $_2$  は常圧、22K で反強磁性転移を起こす Mott 絶縁体であるが、8.2GPa 以上の圧力下で有機導体として最高の転移温度 14.2K で超伝導転移を示すことから注目されており、常圧における電子状態がどのように金属的状态に変化するかを圧力下 ESR を用いて調べている。そのために、高圧下 (3GPa ~ 10GPa) の測定用のキュービックアンビルセルを利用した ESR 装置開発を進めている。これまでに、80 トン (約 8GPa) まで信号を観測出来る様になったが、タングステン・カーバイド (WC) アンビル中の強磁性的バインダーのために、その磁気的ヒステリシスに起因する信号のベースラインの大きな歪みが問題であった。これは、高圧下で ESR リード線の破断を防ぐ目的で用いた、アンビル自信をリード線の一部とする配線に原因があった。しかし、元に戻って 30  $\mu\text{m}\phi$  のリード線が破断ししやすい欠点を克服する別の方法が必要になった。そこで、従来より高圧下でよく使われる金箔を、30  $\mu\text{m}\phi$  のコイル線と 0.3 mm $\phi$  に太くした外出し線との接続の補強に用いて解決することができ、最終的に 80 トンまで安定に加圧が可能になった。

また、磁化率測定用の参照試料として用いている DPPH の ESR 線幅が圧力とともに増加することから、圧力センサーとしての利用の可能性を検討した。これまで複数回行った結果をまとめると類似の振舞いを行うことが確認できるが、実験毎に系統的なずれが見出された。その原因は、圧力セル内に入れる前後で線幅が変化することから予測が可能になった。WC の磁性のために、試料位置の磁場の不均一が余剰の線幅を生み出していると考えられる。そこで、アンビルに入れる前後の線幅の差が磁場の不均一に起因すると考えて圧力下の線幅を補正すると、系統的なズレが綺麗に補正され一つの関数系で代表出来ることから、圧力センサーとして利用出来ることが分かった。(埼玉大、産総研(千葉大)との共同研究)

### 3) STM による構造と電子状態の研究

走査型トンネル顕微鏡は、単結晶表面の構造や電子状態を探る手段として有効であることは良く知られている。今年度は2つの対象に適用し、興味深い結果を得て来た。一つは DNA 及び金属イオンを導入した M-DNA であり、もう一つは有機電荷移動結晶の  $\beta$ -(EDO-TTF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub> の単結晶である。

DNA は生体中、或は水溶液中では良く知られた 2 重螺旋構造を取る。親水性を持たない基盤である HOPG (Highly Oriented Pyrolytic Graphite) 上に DNA 水溶液からすくい取り STM の試料とした。通常は DNA が直径が 2nm もある 2 重螺旋構造を取るため、STM 像では明確な構造を持たない周期が約 3 nm のぼんやりとした像が得られることが多い。しかし、そのなかの限られた本数の DNA は幅が 2nm 程度で、直線的で 1nm 以下の周期性を示す構造も見つかった。これは、二重螺旋構造が引き延ばされて螺旋構造が解けた縄はしご的な平面構造であると結論付けられた。Mn-DNA や Co-DNA の場合は、natural DNA とは幾つかの点で明確な違いがある。一つは、塩基対間の位置に骨格と同一の 0.7-0.8 nm の周期で明るいスポットが観測された。この周期性は、natural の 0.6 nm より僅かに広がっている。二つ目は、2本の DNA 骨格間の間隔が、natural の 2 nm と比較して広い 2.7 nm 程度であり、且つ、金属イオンと思われるスポットの周囲を丸く囲むイメージが得られた。これらの点と、Mn-DNA の ESR スペクトルにおける超微細分裂パラメータから結論された「Mn<sup>2+</sup> は塩基の窒素と共有結合を作りやすいにもかかわらずイオン結合している」という事実を考慮すると、Mn-DNA のはしご構造は、水和した Mn が塩基間でイオン結合している事を強く示唆する。骨格の周期性が natural に比較して広い点も、Mn イオン間のクーロン反発のためだと考えられる。

このような DNA のはしご構造の観測は非常に稀であるが、これまでに natural DNA で数例、Mn-DNA で 2 例、Co-DNA で 1 例、単一鎖 DNA で 1 例見いだして来た。STM が開発された初期に、DNA の螺旋構造の研究が多く行われた。その結果として、HOPG 自体に DNA の螺旋構造に類似の特異な構造があることが分かり、HOPG は必ずしも DNA の STM 観測には向いていないと考えられて来た。しかし、はしご構造の DNA は、HOPG の特異な類似構造よりスケールが 1 桁小さく、原子像に近い分解能で観測され、HOPG の螺旋構造と類似した構造とは明確な区別が可能である。

一方、分子構造の変化を伴う電荷秩序転移を室温近辺で起こす (EDO-TTF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub> の STM 観察も行った。本来、固有抵抗が大きい系であり、STM 測定に困難が予想されたが、綺麗なユニットセルと同一の周期性を持ち、球対称性を持たないイメージが得られた。EDO-TTF 分子も、 $\alpha$ -(ET)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> で見いだされた表面電荷の再構成の原因となった、末端のエチレン基を分子の片側だけに持つ。しかし、観測されたイメージは、同様の再構成が起こった場合に期待される「ユニットセルの 2 倍化」に対応する周期構造は示さなかった。その原因として、(EDO-TTF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub> の場合は、EDO-TTF 分子の末端エチレン基が交互に配置するため、表面の欠損した PF<sub>6</sub> 分子との相互作用が非常に弱いためであると結論される。詳細は、波動関数を用いたシミュレーションの結果を待つ必要がある。(北海道大学、京都大学との共同研究)

#### 4) $\beta''$ -(DODHT)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub>

$\beta''$ -(DODHT)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub> は 1/4-filling のバンドを持ち、常圧下 255K で金属絶縁体転移を、さらに、1.3GPa (13 kbar) の圧力下で転移温度 2.3K の超伝導転移を示す。常圧での X 線回折と SQUID による磁化率の結果から、常圧、255K 以下の絶縁相では電荷秩序の存在が報告されている。このことから、圧力温度相図で超伝導相と隣接する絶縁相が電荷秩序状態である可能性があり、超伝導と電荷揺らぎの関係から興味を持たれる。そこで、加圧下 ESR により電子スピン磁化率の温度変化を測定し、絶縁相から超伝導相への電子状態の変化を磁性の面から調べている。今年度は、開発を続けて来た吸収曲線測定用の低周波 ESR 装置が完成し (図 2)、これを用いて加圧下 ESR の測定を行った。磁化率の絶対値は、 $\beta''$ -(DODHT)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub> と標準試料 DPPH の吸収曲線を同時に測定し、両者の信号を分離し面積を比較することで求めた。 $\beta''$ -(DODHT)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub> の ESR 線幅は DPPH よりも数倍~20 倍も広いいため、信号の分離には、一般的な吸収線の微分曲線を測定するよりも、新装置のように吸収曲線を直接測定し解析する方が有利である。また、新装置は鉄芯の無いコイルを用いるので磁気損失が無く静磁場の高速度の掃引が可能であり、従来の電磁石を用いた測定より一桁以上短い積算時間で同程度の S/N 比の信号が得られる。今回、短時間で測定した信号から二つの吸収曲線の分離が精度よくでき、新装置の有用性が確認できた。常圧では、 $\beta''$ -(DODHT)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub> について報告されている磁化率の温度変化を再現する結果が得られた。また、0.5 GPa (5 kbar) では、絶縁体転移が報告されている 200 K 付近で、ESR 線幅、磁化率ともに温度変化に飛びが観測された。これは、電荷秩序状態でのスピン間の交換相互作用  $J$  と双極子-双極子相互作用を考慮することで理解できる可能性がある。圧力-温度相図を完成させるために、さらに高い圧力での測定を続ける予定である。(茨城大との共同研究)

## 2. 研究業績

### 1) 論文

M. Nagatori, M. Ojima, Y. Ibuki, H. Sakamoto, and K. Mizoguchi: Electronic states of metal ions incorporated in Mn-DNA, *J. Phys. Soc. Jpn.* **80**, (2011) 114803 (1-5)

E. Mori, H. Usui, H. Sakamoto, K. Mizoguchi, and T. Naito: Charge Distribution in the Surface BEDT-TTF Layer of  $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> at Room Temperature with Scanning Tunneling Microscopy, *J. Phys. Soc. Jpn.* **81**, (2011) 014707 (1-7)

### 2) 国際会議報告

K. Mizoguchi: Metal incorporated M-DNA: structure, magnetism, optical absorption, *Proc. SPIE* **8103**, (2011) 810307 (1-10)

### 3) 学会講演

日本物理学会 第 66 回年次大会 2011 年 3 月 25 日-3 月 28 日 (新潟大学: 中止)

森英一, 生井圭一郎, 坂本浩一, 溝口憲治, 内藤俊雄: STM による  $\beta''$ -(ET)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> の室温電荷量解析 II (25aTA-1)

伊吹依利子, 坂本浩一, 溝口憲治: 3d 遷移金属 Fe をドーブした DNA の電子状態の解析 (25pTJ-2)

圓谷淳, 伊吹依利子, 坂本浩一, 溝口憲治: 金属をドーブした DNA の光吸収 III (25pTJ-1)

谷口尚, 高倉寛史, 溝口憲治, 坂本浩一, 谷口弘三, 竹下直:  $\beta''$ -(ET)<sub>2</sub>ICl<sub>2</sub> の電子状態の解明に向けた高圧化 ESR 装置の開発 IV (28aTK-6)

藤巻俊登, 谷口尚, 坂本浩一, 溝口憲治: 吸収曲線測定用低周波 ESR 装置の開発 (28aTK-7)

日本物理学会 2011 年秋季大会 2011 年 9 月 21 日 - 9 月 24 日 (富山大学)

高倉寛史, 溝口憲治, 坂本浩一, 谷口弘三, 竹下直:  $\mu$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>ICl<sub>2</sub> の電子状態の解明へ向けた高圧下 ESR 装置の開発 (21aTQ-3)

溝口憲治, 森英一, 坂本浩一, 内藤俊夫: STM による  $\mu$ -ET<sub>2</sub>I<sub>3</sub> の表面電子状態の考察 (21pTR-17)

桑田翼, 圓谷淳, 坂本浩一, 溝口憲治: 凍結乾燥法で作製した Zn-DNA の電子状態の解明 (24aTG-6)

横矢貴秀, 臼井英正, 坂本浩一, 溝口憲治: STM による Metal-DNA の構造解析 (24aTG-7)

伊吹依利子, 溝口憲治, 坂本浩一: 3d 遷移金属 Fe をドーブした DNA の電子状態の解析 (2) (24aTG-8)

藤巻俊登, 谷口尚, 坂本浩一, 溝口憲治: 吸収曲線測定用低周波 ESR 装置の開発 II (24pTG-12)

日本物理学会 第 67 回年次大会 2012 年 3 月 24 日 - 3 月 27 日 (関西学院大学)

高倉寛史, 谷口尚, 溝口憲治, 坂本浩一, 谷口弘三, 竹下直:  $\mu$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>ICl<sub>2</sub> の電子状態の解明へ向けた高圧下 ESR 装置の開発 II (26pBK-9)

桑田翼, 坂本浩一, 溝口憲治: 凍結乾燥法で作製した Zn-DNA の電子状態 II (26pCC-13)

横矢貴秀, 臼井英正, 坂本浩一, 溝口憲治: STM による Metal-DNA の構造解析 (26pCC-14)

溝口憲治, 森英一, 生井圭一郎, 坂本浩一, 矢持秀起, 平松孝章: (EDO-TTF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub> の STM による表面状態 (27aBK-6)

藤巻俊登, 谷口尚, 坂本浩一, 溝口憲治: 吸収曲線測定用低周波 ESR 装置の開発 II (27aCF-1)

#### 国内研究会

第 5 回東北大 G-COE 研究会 「金属錯体の固体物性科学最前線 - 錯体化学と固体物性物理と生物物性の連携新領域創成を目指して -」 2012 年 1 月 20 日 - 1 月 22 日

溝口憲治: Zn-DNA における強相関 バンドの出現と電子状態 (口頭)

#### 国際会議

Nanobiosystems: Processing, Characterization, and Applications, SPIE Optics+Photonics, San Diego, USA, Aug. 21-23, 2011

K. Mizoguchi: Metal incorporated M-DNA: Structure, Magnetism, Optical absorption (Invited Talk)



## 編集後記

日立の会長が新聞のコラムで、会社経営者の役割はいうまでもなく社員に方向性を示すことだ、ということを書いていた。これはあらゆる社会的組織と構造に当てはまることで、我々大学教員は学部生と大学院生に道を示すことが最も重要な職務である。ここでいう道とは、物理研究はいうまでもなく人間性や社会性をも含む。現実はどうかという、道を示すために費やす時間よりも大学全体もしくは理工系、あるいは学会や科研費のグループといった組織構造を維持するために奮闘する時間のほうが長いのが我々のほとんどが持っている感触であろう。これは今のように運営費交付金や競争的研究費などを通して管理体制が強化され、また説明責任も重要とされている時代には仕方ない面もある。しかし、組織を生物の個体に置き換えてみれば、生長することなく自らの組織を維持することにエネルギーをほとんど費やす個体は種にとって価値はない。現実には、餌が潤沢にない限り他のより活力のある個体に滅ぼされてしまうのが運命である。今我々大学教員が置かれている状況は、十分な質と数の学生を確保することが難しく、餌の少ない環境の生物と同じである。

それぞれ個々の教員の方々は危機感を持って講義や研究室での教育をされていることと思うが、今の状況は個人レベルで解決できるものではない。また大学全体としての方向性は我々がどうにかできる問題ではない。ただ、少なくとも全員が教員であり研究者である物理教室では、それぞれが現場での問題点を把握しているはずであり、ある程度組織としてまとめて改善してゆくことは容易であるはずである。これまでに推薦制度などによる良い学生の確保や講義の改善など、入り口と平均的層への対策が行われている。他に間違いなく出口である就職状況と卒業時点また在学時の満足度は大きなファクターである。

自分の時を考えれば、満足度にとって最も重要なのは学生へのケア、個別指導ではないか。修士まで一貫して考えるのなら特に研究室の個別指導がその後の評価を左右する。みていると、なんとか修士の時間が過ぎて卒業するのをじっと待っている感の学生が多いようである。もし、教室として研究室での教育に対し成果や学生の満足度を高めるための指針を与えることができれば、かなりの割合の大学院生の意欲を高め、ゆくゆくは首都大の評判もあがってゆくはずである。これを実現するのは簡単で、それぞれの分野で良い成果が出ている研究室ではどのような教育が行われているのかを他大学も含め調査し、成功例を共有するようにすればよい。世界中に先例があるのだから調査すれば事は進む。上の例は1つにすぎない。

物理教室の一員として物理コースがよくなってゆくためにはあらゆる努力をしたいと思う。新しい年度も物理教室が真の意味で発展し個性と高い成果をもつ大学として知られるようになってほしいものである。

(多々良源 記)

平成 23 年度年次報告編集委員  
住吉孝行 (2011 年度物理学教室主任)  
政井邦昭  
多々良源  
古川武