

サブグループ活動状況 平成 20 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) 神岡・韓国 2 検出器系を用いた非標準的なニュートリノ物理の探索 (南方)

高いエネルギースケールに存在する標準模型を超える新しい物理の反映としてニュートリノを含むフェルミオンの 4 体有効相互作用 (以下では非標準的相互作用と呼ぶ) を仮定し、この効果をニュートリノ振動を使って探索する可能性がここ数年世界中で盛んに議論されている。我々も昨年度にはニュートリノファクトリーを用いる探索法とこれにまつわる問題点について議論した。今年度は 2005 年に梶田・南方等によって提唱された「神岡・韓国 2 検出器系」の設定で上記の非標準的相互作用の他、ローレンツ不変性の破れなどの新しい物理の効果がどう取り出せるかについて議論し、またこの感度評価を行った。量子論的なコヒーレンスの破れや特定のタイプのローレンツ不変性の破れに対して高い感度が期待できることを示した。ミュウ・タウニュートリノチャンネルにおける非標準的相互作用の探索には神岡・韓国 2 検出器系が有利であることを指摘し、これを用いて非標準的相互作用の探索感度に関する研究を行った。

(東京大学宇宙線研究所 梶田隆章氏、中山昭英氏、コリア高等研究所 Pyungwon Ko 氏、リオデジャネイロカトリック大学 布川弘志氏、Nei Cipriano Ribeiro 氏との共同研究)

2) 非標準的相互作用の存在する系でのニュートリノ振動の摂動論 (菊地・南方・内波)

ニュートリノの非標準的相互作用が存在する場合のニュートリノ振動現象の多様性を統一的に理解できるような摂動論的枠組みを提出した。セルベラ達の公式として知られる最も広く使われている摂動論の枠組みを拡張し、非標準的相互作用を含めた定式化を行い、全てのチャンネルにおいて摂動の 2 次 (電子ニュートリノ関係 3 次) までの振動確率公式を導いた。驚くべきことに結果は簡単で、標準的な場合の大気・太陽変数を、それぞれ非標準的相互作用を含む一般化された変数で置き換えるだけでよいことが分った。この枠組みの中でパラメータ決定の問題、標準的・非標準的相互作用パラメータ間の混乱の問題についての一般的・包括的理解を得た。さらに、非標準的相互作用を含む系におけるパラメータ縮退の問題を議論し、通常型の縮退が非標準的相互作用パラメータを含む形で拡張されることを示すとともに、非標準的相互作用系の特徴に由来する全く新しい形のパラメータ縮退を発見した。

3) ニュートリノファクトリーにおける不活性ニュートリノ探索の現象論 (安田・婦木)

1990 年代半ばの LSND 実験の結果により示唆された 4 世代目の不活性ニュートリノのシナリオは、2007 年に発表された MiniBooNE 実験の否定的結果により排除されたと考えられている。しかし、MiniBooNE を含むこれまでの否定的な諸実験の結果から受ける制限を全てみたくような不活性ニュートリノのシナリオはまだ排除されている訳ではなく、将来計画されているニュートリノの精密測定実験において検証できるユニタリー性の破れの可能性を予言する。この研究では、将来計画として構想されているニュートリノファクトリーにおいて、上記の条件をみたく (3+1) - スキームと呼ばれる不活性ニュートリノのシナリオがどの程度制限されるかについて議論した。特に、ミュウニュートリノからタウニュートリノへのチャンネル (この研究によりディスカバリーチャンネルと命名された) の変換確率は従来ほとんど解析されていなかったが、非標準的なシナリオを議論する場合には重要であることを指摘し、詳細な解析を行った。その結果、標準シナリオにはない混合角の上限値が、それぞれ現在の値の半分程度まで改善することがわかった。(上記課題はマドリッド自治大学のドニー二氏・ロペス - パボン氏、ローマ大学のメローニ氏との共同研究)

4) 銀河超新星ニュートリノ観測におけるパラメータ縮退 (南方)

将来起きると期待される天の川銀河内の超新星爆発のニュートリノ観測に関する研究を行った。水チェレンコフ検出器を用い、支配的である反電子ニュートリノを捉えるチャンネルに限った議論を行った。スペクトルのゆがみパラメータを含むイベント再構成フィットを行うと連続的なパラメータ縮退が生じることを発見した。この縮退は真剣にその計画が議論されているハイパーカミオカンデなどのメガトン級の水チェレンコフ検出器によっても解けない「頑健」なものであることも示した。この結果は、将来の銀河超新星ニュートリノの観測に備えて、水チェレンコフ検出器に相補的な検出器を準備する必要性を強く示唆している。

(リオデジャネイロカトリック大学 布川弘志氏、バレンシア大学 Jose W. F. Valle 氏、ハンブルグ大学 Ricard Tomàs 氏との共同研究)

5) 質量に対する弦の量子補正における NS-NS タドポール問題の回避 (北澤)

超対称性のない弦模型においては、一般に「NS-NS タドポール」というものが存在し、例えば素粒子の質量などの物理量への弦の量子補正を計算しようとした場合に赤外発散をもたらす。超対称性のない弦模型においては、古典的には質量のないスカラー粒子が弦の量子効果によって質量を持つはずであり、特にその2乗が負になるような状況が実現できれば、自然な「電弱対称性の自発的破れ」に応用できる。昨年度に開発した“tadpole resummation”というこの問題を回避する手法を質量への量子補正に応用すべく定式化を行った。この手法は“boundary state formalism”を基礎としており、弦理論に基づく素粒子模型の構成要素であるDブレーンを閉じた弦の“boundary state”として表現するが、質量の計算にあたっては、これを拡張した“スカラー場の背景場を含む boundary state”を新たに構成する必要があった。

6) 低スケール弦模型の可能性 (北澤)

素粒子の世界において「電弱対称性の自発的破れ」が実際に起きていることは実験において検証されている。しかし、素粒子の「標準模型」ではそれを起こすスカラー粒子であるヒッグス粒子を「手で」入れてその質量の2乗を負に「手で」設定している。このような恣意的な状況を、弦理論に基づく模型では打開できる可能性がある。上記の項目で述べた可能性(弦の量子補正による「電弱対称性の自発的破れ」)は非常に興味深く、弦のエネルギースケールが TeV 程度になるという大雑把な予言ができる。一方、弦のエネルギースケールは重力相互作用の実現を通じて「コンパクト化」された余剰次元(4次元目以降の空間次元)の大きさと関係しており、その大きさには天体観測等から制限がついている。それによると TeV 程度の弦のエネルギースケールの可能性は排除されかかっている。しかしながら、弦のエネルギースケールが TeV 程度になるという予言はあくまで大雑把なもので、NS-NS タドポール問題の回避の研究をしている過程で、弦のエネルギースケールが TeV より大きくても自然な「電弱対称性の自発的破れ」を実現できる可能性に気がついた。これを、具体的な模型を構成して示そうと試みた(進行中)。また、このような低スケール弦模型においては、「フレイバーを変える中性カレント (FCNC)」の問題が深刻であることに気がつき、これについても系統的な理解を求めて研究を行った(進行中)。

7) 超対称性を持たない弦模型における自然なインフレーション (北澤)

超対称性を持たない弦理論においては、非常に特殊な設定をしなくても、自動的に宇宙のインフレーションが起きる可能性がある。これは指数関数型のポテンシャルにしたがう「ディラトン場」が必然的に指数関数のポテンシャルの壁を上るような解が存在しないことによる。この新しい機構が、これまでに提案されている宇宙のインフレーションの様々な模型と比較して、どの程度有利なものであるか検討した。その結果、残念ながら非常に有利な事柄があるわけではないことが判明した。そこで、宇宙論

への応用ではなく、超対称性のない弦理論についての意味を考察する方向に切り替えた。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 氏との共同研究で、まだ進行中のものである。

8) LHC 加速器を用いた実験による大きな余剰次元のシナリオの検証 (生田目)

近年、素粒子と重力を記述する新たなモデルの候補として大きい余剰次元の存在を仮定するいくつかのモデルが議論されている。その中で最も単純なモデルである Arkani-Hamed と Dimopoulos – Dvali のモデル (ADD 模型) の LHC 加速器を用いた実験による検証方法について研究を行った。本研究ではモデルに無限個含まれる Kaluza-Klein 重力子 (重力を媒介する質量を持った粒子) が媒介する 2 つの陽子を衝突させ 2 つの荷電レプトンを生成する過程について検証し、この過程の散乱断面積が非物理的な振る舞いであることを明らかにした。具体的には、計算して得られた散乱断面積は遠距離力である強い重力相互作用による散乱過程の散乱断面積であるにも関わらず、スピンの 2 の非常に重い粒子が媒介する近距離力による散乱過程の散乱断面積と同じ振る舞いをする。本研究により、この問題の原因が散乱断面積を求める際に生じる、余剰次元方向の運動量の二重足し上げにあることが明らかになった。(論文執筆中)。

2. 研究業績

1) 論文

N. Cipriano Ribeiro, T. Kajita, P. Ko, H. Minakata, S. Nakayama, and H. Nunokawa:
Probing Nonstandard Neutrino Physics by Two Identical Detectors with Different Baselines, *Physical Review D* **77** (2008) 073007-1-12.

N. Haba, N. Kitazawa and N. Okada:
Invisible Technicolor, *Acta Physica Polonica* **B40** (2009) 67-74.

T. Kikuchi, H. Minakata, and S. Uchinami:
Perturbation Theory of Neutrino Oscillation with Nonstandard Neutrino Interactions, *Journal of High Energy Physics* **03** (2009) 114-1-49.

N. Kitazawa:
One-Loop Masses of Open-String Scalar Fields in String Theory, *Journal of High Energy Physics* **09** (2008) 049-1-27.

H. Minakata, H. Nunokawa, R. Tomas and J. W. F. Valle:
Parameter Degeneracy in Flavor-Dependent Reconstruction of Neutrino Fluxes in Supernova, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **12** (2008) 006-1-23.

2) 国際会議報告

H. Minakata: Phenomenology of Future Long-Baseline Neutrino Experiments, *Journal of Physics: Conference Series* **136** (2008) 022017.

H. Minakata: Probing Non-Standard Neutrino Physics at Neutrino Factory and T2KK, in “Venice 2008, Neutrino oscillations in Venice”, pp 361-380, edited by Milla Baldo Ceolin.

T. Kajita and H. Minakata: Highlights in the T2KK Workshops in 2005 and 2006, in *Far Detector in Korea for the J-PARC Neutrino Beam*, pp 3-14, edited by T. Kajita and S.-B. Kim (Universal Academy Press, Tokyo, 2008).

N. Cipriano Ribeiro, T. Kajita, P. Ko, H. Minakata, S. Nakayama, H. Nunokawa: Probing Nonstandard Neutrino Physics at T2KK, in *Far Detector in Korea for the J-PARC Neutrino Beam*, pp 97-108, edited by T. Kajita and S.-B. Kim (Universal Academy Press, Tokyo, 2008).

H. Minakata: Long Baseline Neutrino Experiments with Two-Detector Setup, *International Journal of Modern Physics A*, **23** (2008) 3388-3394. arXiv:0710.2926 [hep-ph].

H. Minakata: Looking for Leptonic CP Violation with Neutrinos, *Acta Physica Polonica B* **39** (2008) 283-294.

N. Cipriano Ribeiro, T. Kajita, P. Ko, H. Minakata, S. Nakayama, H. Nunokawa: Non-Standard Neutrino Physics Probed by Tokai-to-Kamioka-Korea Two-Detector Complex, in "Particle Physics on the Eve of LHC", pp 160-165, edited by A. I. Studenikin, World Scientific, Singapore, 2009.

S. J. Parke, H. Minakata, H. Nunokawa, and R. Zukanovich Funchal: Mass Hierarchy via Mössbauer and Reactor Neutrinos, *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements* **188** (2009) 115-117.

O. Yasuda: Non oscillation flavor physics at future neutrino oscillation facilities, *Proceedings Of Science NUFACT08* (2008) 016-1-8.

S. Uchinami: Probing Non-Standard Neutrino Physics at T2KK and Neutrino Factory, *Proceedings Of Science NUFACT08* (2008) 056-1-5.

K. Fuki, A. Donini, D. Meloni, J. Lopez-Pavon, O. Yasuda: Sterile neutrino oscillation at a neutrino factory, *Proceedings Of Science NUFACT08* (2008) 123.

O. Yasuda and A. Donini: Signatures of sterile neutrino mixing in high-energy cosmic neutrino flux, *Proceedings Of Science NUFACT08* (2008) 146-1-3.

3) 学会講演

日本物理学会 第 63 回年次大会 2008 年 3 月 22 日 ~ 26 日 (近畿大学本部キャンパス)

N. Cipriano Ribeiro, 南方久和、布川弘志、内波生一、R. Zukanovich Funchal: Probing Non-Standard Neutrino Interactions with Neutrino Factories

日本物理学会 2008 年秋季大会 2008 年 9 月 20 日 ~ 9 月 23 日 (山形大学)

婦木 健一 : ニュートリノファクトリーにおけるステライルニュートリノの効果

生田目春香 : ADD 模型の仮想 Kaluza-Klein 重力子交換過程における新たな問題について

国内研究会

KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEKPH09)

(高エネルギー加速器研究機構, 3 月 3 日 - 3 月 6 日)

H. Namatame: A New Problem of Virtual Kaluza-Klein graviton exchanges

国際会議

IV International Workshop on Neutrino Oscillations in Venice, Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Palazzo Franchetti, Campo S. Stefano, Venice, April 15-18, 2008

- H. Minakata: Probing Non-Standard Neutrino Physics at Neutrino Factory and T2KK (Invited Talk)
XXIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2008)
Christchurch, New Zealand, May 25-31, 2008
- H. Minakata: Phenomenology of Future Long-Baseline Neutrino Experiments (Invited Talk)
Melbourne Neutrino Theory Workshop, Melbourne, Australia, June 2-4, 2008
- N. Cipriano Ribeiro, H. Minakata, H. Nunokawa, S. Uchinami, R. Zukanovich Funchal
(speaker underlined): Probing Non-Standard Neutrino Interactions with Neutrino Factories
The international Design Study for the Neutrino Factory Second Plenary Meeting
Fermilab, USA, June 10-12, 2008
- N. Cipriano Ribeiro, H. Minakata, H. Nunokawa, S. Uchinami, R. Zukanovich Funchal
(speaker underlined): Probing NSI with a Neutrino Factory (Invited Talk)
10th International Workshop on the Neutrino Factories, Superbeams, and Beta Beams,
Valencia, Spain, June 30-July 5, 2008
- O. Yasuda: Non oscillation flavor physics at future neutrino oscillation facilities (Invited talk)
- S. Uchinami: Probing Non Standard Neutrino Physics at T2KK and Neutrino Factory (Invited talk)
- A. Donini, K. Fuki, J. Lopez-Pavon, D. Meloni and O. Yasuda: Sterile neutrino oscillation at a neutrino
factory (Poster)
- O. Yasuda and A. Donini: Signatures of sterile neutrino mixing in high-energy cosmic neutrino flux
(Poster)
Neutrino Oscillation Workshop (NOW 2008), Conca Specchiulla, Otranto, Lecce, Italy,
September 6-13, 2008
- S. J. Parke, H. Minakata, H. Nunokawa, and R. Zukanovich Funchal (speaker underlined): Mass
Hierarchy via Mössbauer and Reactor Neutrinos
A Topical Conference on Elementary Particle Physics and Cosmology,
Fort Lauderdale, Florida, USA, 16 - 21 December 2008
- O. Yasuda: Signatures of sterile neutrino mixing in high-energy cosmic neutrino flux (Invited talk)
XIII International Workshop on Neutrino Telescopes, Istituto Veneto di Scienze,
Lettere ed Arti, Venice, Italy, March 10-13, 2009
- H. Minakata: Neutrino's Non-Standard Interactions; Another Eel under a Willow? (Invited Talk)

高エネルギー理論サブグループ

1. 研究活動の概要

2008年の研究活動は「超対称性と時空間の微細構造」という1つの方向性に基づいて行われた。財政援助に関しては、日本学術振興会からの科研費（基盤C、番号18540283）及び当大学の基本研究費が支給された。なお、このうち科研費（基盤C）のプロジェクトは本年が最終年で、成功裏に終了させることができた。

1) 研究にあたっての背景

時空の微視的構造と自然界における超対称性の役割を理解することは、今日の高エネルギー物理学にとっての最も基本的な挑戦である。理論的側面からすると、超対称性はボソンとフェルミオンを統一し、素粒子物理学でいうエネルギースケールの階層性問題を解決に導き、さらには場の量子論での紫外発散を抑えることなどから必要である。超対称性はまた超弦理論が無矛盾であるために必要とされている。超対称性は標準模型を超える素粒子物理学の研究の殆ど全てで主要な手段になっている。セルンで現在建設されている大型ハドロン衝突型加速器（2009年に全稼動する予定）は世界規模の先端の実験施設であるが、それはヒッグス粒子、超対称性、そして自然界にあるかもしれない隠れた余剰次元の発見を目指して造られているのである。

一般相対性理論と場の量子論はどちらも（紫外極限で）不完全な理論であって、プランク距離とプランク時間では量子重力理論に置き換えられる（乃至は拡張される）べきものである。プランク・スケールでは重力と他の基本的相互作用とに違いはないから、ビッグバン特異点解消と、全ての素粒子と相互作用との統一の問題は一緒に、ひとつの理論で解決されるべきなのである。量子重力を実現できる最も有力な候補は超弦理論である。超弦理論はまた、紫外発散のない、自然界の全ての基本的相互作用を統一的に記述しうる、最も有望で理論的に魅力的な提唱なのである。量子重力が必須であるエネルギースケール（プランクスケール）を考える際には、初期宇宙の研究が超弦理論の自然なテストを与えてくれる。

超対称性は時空と密接に関係している。というのは二つの超対称変換の交換子が時空の並進になるからである。そのために局所的な超対称性は自動的に一般座標変換不変性を示唆し、それゆえ重力理論を内包している。このような超重力理論は超弦理論やM理論の低エネルギー近似で自然に出てくる。超重力理論は古典的なアインシュタイン重力理論の無矛盾な拡張になっており、超弦理論は無矛盾な量子重力理論を与えている。全てこれらの理論には様々な興味深い物理的応用がある。高エネルギーの素粒子物理、初期宇宙、暗黒物質、暗黒エネルギー、ブラックホール、それにハドロンや原子核物理などである。

同時に、超弦理論と超重力理論はどちらも実験とは深い隔たりがある。超対称性や余剰次元に対する実験的証拠は何もなく、超弦理論に至っては言わずもがなである（もっともそれらが間違っているという実験的証拠もない！）。従って、超対称性や超弦理論の理論的結論を全て調べ、それらからの確認可能な物理的予言を引き出すことは極めて重要である。つまり「万物は弦からなっている」ことを示すのである。超対称性の破れは超弦理論と素粒子現象論とのギャップを埋めるとともに、冷たい暗黒物質の起源を説明する鍵となると信じられている。

我々の研究課題は、先端的な理論物理学と数学での現在の（学術における）フロンティアに属している。特に、超弦理論がもつ数学的かつ物理的に興味深い応用はソリトンである。ソリトンとは、物理で言えば有限なエネルギーを持っている、非線形な偏微分運動方程式の（非摂動的またはトポロジカルな）解のことである。非可換な時空上でのソリトンとその物理的性質は殆ど理解されていない。

2) 研究の目的

我々の研究は、標準模型を超える素粒子物理の新しい超対称なモデルを構成することによる、新しい超対称性の破れの機構の提唱と、超重力理論や超弦理論に基づいた新しいインフレーションシナリオの提唱をして、はっきりした物理的予言を引き出すことに目標をおいている。

我々の研究の重要な目標は、素粒子と場と弦の現代的な量子論において、超対称性と超重力理論そして素粒子物理の間にある様々なつながりを理解することにある。我々が理解したいというのは、(i) 低エネルギー近似を超えた、超弦理論から得られる有効場の理論に、どのような超対称な相互作用が現れるのか (ii) 超対称性と可積分性との関係は何か (iii) 上述のような場の理論的モデルの背景にある対称性は何か、である。そういったことが、素粒子の標準模型を超えた素粒子現象論や初期宇宙での場の理論的なインフレーションモデルに対する、我々のモデルで可能な現象論的応用に光を当ててくれる。

我々の宇宙の一様性と等方性や、観測された密度揺らぎのスペクトラムはインフレーション宇宙で説明できる。インフレーションは通常、スカラー場（インフラトン）を導入し適当にスカラーポテンシャルを決めることによって実現されている。アインシュタイン方程式を使うと、強エネルギー条件の有質量的破れと、大きな負の圧力を持ったエキゾチック物質が現れる。このようなインフレーションシナリオの簡明さにもかかわらず、インフラトンとそのスカラーポテンシャルのような、鍵となるものの起源ははっきりしていない。

超弦理論やM理論を使って明確なインフレーションの機構を構成するのは自然である。最近では、沢山のブレーンインフレーションシナリオが提唱された。それらは、(ワープ化され)コンパクト化された超弦理論のモデルに埋め込まれており、素粒子物理から課される現象論的な制限を満たしてもいる。しかしながら、インフレーションの鍵となるものの起源を解明するには至っていない。それにまた、可能な数が飛躍的に増大して（これはストリング・ランドスケープとして知られている）、宇宙に超弦理論の証拠を求めるための具体的な理論的予言を阻んでしまった。

我々はまた、Dブレーンによって引き起こされる非反可換性を有する場合に明示的なソリトン解を導き、その物理的性質を研究したい。

3) 研究手法

我々の研究の方法は学際的であり、場の量子論、重力理論、超対称性理論そして現代幾何学にまたがっている。同時に、現在、高エネルギー理論物理学と数学で使える最先端の計算機を使う。

アインシュタイン重力理論の幾何学的記述はリーマン幾何学でなされている。同様に、超対称変換は、超空間と呼ばれている（量子的な）フェルミオンの方向を持つよう拡張された時空の並進と理解できる。標準的な超空間には互いにきっちりと反交換するフェルミオンの座標がある。超対称性が、或る高エネルギースケールで現れるとき、実験が行われうる（低い）エネルギースケールでは、超対称性は破れていなければならない。自発的な超対称性の破れは、超重力理論に現れる（補助）場に真空期待値を与えることにより可能である。超空間座標のうちフェルミオンの座標はグラスマン型の代数をなすが、その代わりにクリフォード（またはディラック）代数に従うようにすることは、超対称性の自発的破れの自然な方法のひとつである。実際、そういう理論は、いわゆる非反可換な場の理論と同等なのである。

スカラーポテンシャルから得られるインフレーションや超弦理論とブレーンを使って得られるインフレーションは決して要求されるものではない。他の可能性は、アインシュタイン方程式の重力部分を、時空の曲率の高階項によって変形する方法である。この方法ではインフレーションもエキゾチック物質も要求しない。特定の高階曲率項は超弦理論の有効作用に現れることがよく知られている。

摂動論的超弦理論はオンシェルで（量子論的振幅のかたちで）定義されていて、無限に多くの高階曲率項からの補正がアインシュタイン方程式に加わるが、それはレジャスロープパラメータと弦結合定数

の全ての次数にわたる。これらの全ての補正は閉じた形では知られておらず、全てを扱うのは無理である。しかしながら、弦とブレーンから来る、アインシュタイン方程式への最初の補正項を考察するのは意味のあることである。もちろん、単に最初の量子論的補正項から得られた結果は、最終的なものではない。それにもかかわらず、定義され十分に制限された枠組みの中では、補正された理論は初期宇宙へ定量的技術的な洞察を与えてくれる。

我々は、時空の曲率で4階の、超弦理論由来の重力項のうち、最初の補正項で変形したアインシュタイン方程式に基づいたやり方を用いた。その4階の曲率項をアインシュタイン項と同等に、つまり非摂動的に扱ったのである。

我々は4次元時空上のM理論の低エネルギー有効作用で幾何学的な項（つまり純粋重力項）のみを考察した。我々の仮定では、量子論的超弦理論の補正は、最初のツリーの超弦理論補正で抑えられるとし、ディラトンやアクシオンなどを含め全てのモデュライは安定化されるとした。（例えば、フラックスによって、ワーブ化された4次元へのコンパクト化をし、自発的に超対称性を破った後にこういう状況になる。）

4) 研究結果

我々は、レッジスローブパラメタに関して最初の次数での、（ワーブ化されたトーラスにコンパクト化した）超弦理論/M理論に由来する4次の項（時空の曲率で4階）を調べた。そしてそれが4次元FRW宇宙で、ハッブルスケールの発展に（非摂動的に）どう影響するかを研究した。オフシェル超弦理論の有効作用の定義に量子論的不定性があることを考慮に入れ、われわれは一般化されたフリードマン方程式を提唱した。それには時空特異点のない（ド・ジッターの）厳密にインフレーションを起こす解があることを見つけ、そして安定性と、我々の解にスケール因子の双対不変性を課すことによって先の量子論的不定性を制約した。最も素朴な（ベル・ロビンソンテンソルの2乗である）4階の項は除外され、従って超弦理論のオフシェルの重力的有効作用には（リッチテンソルに依存した）別の4階の項が必要であることの証拠を与えた。我々の手法は時空の曲率のさらに高次まで一般化できるものである。

副産物として、FRW計量を明白に共形平坦な形にする、新しい分離不可能な座標変換族を見出した。我々の結果は簡潔で完全であり、我々の導出は極めて明示的である。我々はまた、ワイルテンソルを含めて全てのFRW曲率を計算した。

4次元ユークリッド空間上の、ベクトル多重項とスカラー多重項が結合した $N = 1/2$ 超重力理論を初めて構成した。我々は標準的な4次元ユークリッド空間上の $N = (1,1)$ に拡張された共形超重力理論から出発し、重力光子の場の強さをある任意の自己双対場にして非物理的にした（C変形といわれる）。局所的超対称性の下ではこのような手続きの無矛盾性は保証されないのだが、我々は、局所的超対称性を $3/4$ だけ落とし、対応する重力微子を消すような簡潔で無矛盾な代数的制限を見つけた。最終的に得られた場の理論は（超共形ゲージ固定をした後）、局所的な $N = (0,1/2)$ または簡単に $N = 1/2$ 超対称性を持ち、対応するゲージ場としてのカイラルな重力微子をひとつだけ持っている。我々の理論は、ノンゼロの自己双対重力光子の真空期待値のために、‘ローレンツ’ - 不変ではないが、それは非反可換な超空間上で得られるC変形をうけた超対称性理論に共通していることである。

我々は $2 + 1$ 次元のある超対称シグマ模型を考察した。それは多重ソリトン解を持ち、散乱するものとしもないものがある。我々はこの場の理論的モデルを、グラスマン奇の超空間座標のなすグラスマン代数をクリフォード代数に置き換えて非反可換変形した。静的なCP(1)ソリトンとU(2)ソリトンを詳しく構成した。非反可換変形のために、それらはスピン $1/2$ の自由度を余計にもっている。我々はアーベル的BPS解を明示的に導いたが、それらはモヤル変形の場合と異なり、無限大の作用を持っていることを発見した。

2. 研究業績

1) 論文

M.Iihoshi, S.V. Ketov, On the superstrings-induced four-dimensional gravity, and its applications to cosmology, *Advances High Energy Physics*, 521389, 23 pages, 2008, [査読有](#)

S.V. Ketov, O. Lechtenfeld, Non-anticommutative solitons, *Physics Letters*, B663, 353-359, 2008, [査読有](#)

M.Iihoshi, S.V. Ketov, On the quartic curvature gravity in the context of FRW cosmology, *International Journal of Modern Physics*, A23, 2153-2160, 2008, [査読有](#)

原子核理論サブグループ

1. 研究活動の概要

1) 重い原子核における強度関数のゆらぎ

原子核の励起状態の様々な強度関数の大局的な特徴は、平均場の中の一粒子運動や、表面振動など少数自由度の集団励起によって説明される。これに対し強度関数のゆらぎは、原子核のダイナミクスにおける非線形効果によって特徴づけられるもので、原子核にとどまらないユニバーサルな効果を反映すると考えられている。これまで、軽く非線形効果の小さい原子核 (Ca) と、典型的なカオス性を示す重い原子核 (Pb) の強度関数の計算により巨大共鳴領域の強度関数の比較を行ってきた。本年はこの二つの原子核における巨大共鳴の幅の形成機構を中心に調べた。その結果、両者の大きい違いが、集団励起が最初に結合する「戸口状態」と、その「戸口状態」が結合する二粒子二空孔状態の違いに起因することが明らかになった。

2) 異なる変形をもつ多準粒子励起状態における遷移確率

原子核の準粒子励起状態における電磁的な遷移確率は、核構造の研究において重要な役割を果たしてきた。最近、希土類原子核の高スピン励起状態の実験的研究が進んでおり、準位構造や電磁的モーメントが調べられている。とくに高スピン異性体の構造の研究では、異なる変形度をもつ状態間の電磁的遷移の研究の重要性が指摘されている。本研究では、変形一体場における多準粒子励起状態を考えて、変形が異なる状態間の観測量の行列要素を計算する公式を導き、これに基づいて Gd 原子核の高スピン状態の電磁遷移確率を計算した。その結果、遷移確率が始状態と終状態の変形度の違いに非常に敏感であることがわかった。

3) 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ソンやフェルミオンの種々の混合系を中心に、基底状態の種々の相やその安定性、集団励起、分子形成などに注目して研究を進めている。

a) 極低温原子気体中の分子生成と超流動転移

近年、フェッシュバハ共鳴法等を用いた極低温原子気体中の分子生成の研究が盛んに行われている。極低温では量子統計効果が働くため、そこでの分子生成の様子は古典気体中のものとは全く異なり、また、分子生成は超流動転移と密接な関係を持つ。我々は、その振る舞いを多角的に研究し、特に化学平衡における分子生成率や超流動転移温度、共存相を有する複雑な相構造の様子を理論的に明らかにした。

b) 双極フェルミ気体の自由膨張の量子動力学

双極フェルミ気体は本年になって初めて実現された新たな量子多体系である。この系の特徴は、非等方的な非短距離力である双極子 - 双極子間相互作用によって系が支配されているという点にある。その相互作用は運動量分布を歪め、その歪みの測定には通常、自由膨張を用いた飛行時間測定法が用いられている。我々は、その自由膨張の量子動力学を理論的に研究し、分布の歪みがどのように生じるのかを明らかにした。

c) 極低温原子気体中の分子生成と超流動転移

ボーズ・フェルミ混合原子気体の系について、それらの原子から形成される対の状態について議論を行った。フェルミ原子の系と同様に、クーパー対と束縛分子に対応する二つの対状態を考えることができ、それぞれの形成される条件を原子間の散乱長や質量比をパラメーターとして理論的に考察した。フェルミ原子系と比較すると、クーパー対の形成には余分なエネルギーが必要とされる点で違いが確認された一方で、束縛分子の形成に関してはフェルミ系と共通の性質を有し、統計性によらない普遍性を示すことがわかった。フェルミ原子が対の状態にどれだけ転化されているかをみるために、フェルミオンの分散関係の計算を行った。ボーズ、フェルミ原子の密度比が小さいときには対に寄与するフェルミ原子とそうでない原子を明瞭に区別することができるが、密度比が同程度ではそれらの状態が強く混成する事が示された。

2. 研究業績

1) 論文

T. Watanabe, T. Suzuki and P. Schuck, Bose-Fermi pair correlations in attractively interacting Bose-Fermi atomic mixtures, *Phys. Rev. A*, **78** (2008) 033601

T. Nishimura, A. Matsumoto, and H. Yabu, Molecular formations in ultracold mixtures of interacting and noninteracting atomic gases, *Phys. Rev. A* **77** (2008) 063612

N. Yoshida, H. Sagawa, A. Odahara and T. Suzuki, Electric Multipole Transitions between High-Spin States with Different Shapes, *Prog. Theor. Phys.* **121** (2009) 85

2) 学会講演

日本物理学会「第63回年次大会」 2008年3月22-26日(近畿大学本部キャンパス)

相場浩和、松尾正之、西崎滋、鈴木徹：ウェーブレットを用いた強度関数ゆらぎの分析手法の拡張

基研研究会「熱場の量子論とその応用」2008年9月3~5日(京都大学基礎物理学研究所)

西村拓史：フェルミ双極分子の極低温気体の動力学(素粒子論研究 116 巻 6号 F66-68 2009年2月)

日本物理学会「2008秋期大会」 2008年9月20-23日(山形大学小白川キャンパス)

相場浩和、松尾正之、西崎滋、鈴木徹： ^{208}Pb の巨大四重極共鳴の減衰における2粒子2空孔状態の役割

3) 学会誌等

日本物理学会「第63回年次大会」 2008年3月22-26日(近畿大学本部キャンパス)

鈴木徹：「フェッシュバハ共鳴」

原子核研究 **53**(2009) 26-27

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、高エネルギー天体现象、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。2008年度のグループ構成はスタッフ2名、大学院生2名。以下は、2008年度に行った主な研究の概要である。

1) 銀河団の進化と超熱的粒子

統計的粒子加速について理論研究を進めるとともに、銀河団の高エネルギー粒子について観測的研究の現状をサーベイした。加速過程の研究では、生成される準熱的粒子の分布がバックグラウンドの熱的粒子にどのように依存するか、温度 $kT = 0.3 - 1.0$ keV の範囲の Maxwell 分布について調べた。その結果、何れの温度でも普遍的に、バックグラウンド粒子の5倍程度の温度の Maxwell 分布で近似される準熱的粒子成分が形成されることが確かめられた。このことは、加速された粒子が共存する場合の非平衡放射計算を近似によって単純化できる可能性を示している。また、最近の銀河団の観測から：Mpc スケールの電波ハローをもつ合体途中の銀河団は40を超えるが、非熱的X線放射の報告は同一検出器による13例のみで未だ有意な結果とは言い難い。電波ハローは一定期間だけ活動しており、大規模な銀河団合体で加速された電子によるものと解釈するのが自然である。電波放射とX線放射ガスの温度には相関が見られ、合体は加速だけでなくガスの加熱にも効いていると考えられる。以上の結果はこれまでの研究の見通しどおりであるが、バックグラウンドの熱的電子を高エネルギー電子の種としてきたのに対し、観測的研究からは、過去に加速された高エネルギー陽子衝突による2次電子が種となる可能性が示唆される。これは今後の研究で考慮すべき点である。また、この研究では超熱的粒子の生成過程を調べてきたが、一度生成された高エネルギー電子の時間発展が解釈の争点になっている。今のところ理論計算でも、非熱的成分は残存する/消滅して加熱に効く、との全く対照的な結果が出されており、生成過程から整合的に時間発展を追い決着をつけることも今後の課題の一つである。

2) 超新星残骸衝撃波による粒子加速と加熱

超新星残骸の高分解能観測やPICシミュレーションによる微視的過程の研究の進展によって、衝撃波による粒子加速現象の理解は近年急速に進みつつある。また、Fermi 線望遠鏡衛星によって、EGRET ソースの検証が進められつつある。このような状況を背景として、超新星残骸の力学的進化、衝撃波の構造、無衝突衝撃波の物理過程と古典的な拡散的描像との対応などについて、問題点の整理、見直しを進めている。実際、Fermi 衛星の初期観測の結果から、線を放射している多くの超新星残骸は若いとは云えないことが示唆されている。また、HESSによって発見された広がった TeV 線源のうち、パルサー活動 (pulsar wind nebulae) に関係しない、未同定のいくつかは古い超新星残骸である可能性がある。衝撃波による加速では、準熱的粒子の生成は小さく相対論的領域まで効率よく粒子が加速されることが期待される。実際、 \sim GHz の電波シェルが普遍的に見られることは、ほぼ普遍的に \sim GeV 電子が生成されていることを示している。しかし、Fermi 加速に基づく一般的な衝撃波粒子加速の理論では、衝撃波速度が重要なパラメータになっており、断熱進化フェーズにある若い超新星残骸が有利と考えられてきた。Fermi の観測結果は、また HESS についても古い超新星残骸とすれば、加速現象はそれほど単純でないことを示している。また、高エネルギー粒子加速が期待される一方で、多くのシェル型超新星残骸では熱的な放射成分が支配的である。準熱的粒子群は e-folding スペクトルで、そのエネルギー領域はいわゆる injection エネルギー域に当たり、熱的粒子と相互作用する一方で、非熱的粒子生成の種となることを意味している。したがって、衝撃波加速においても、熱的粒子 + 非熱的粒子という2元的描像

や単純な thermal leakage 描像は適切でなく、熱化プロセスも含めた粒子スペクトル形成の素過程の理解が、粒子加速の定量的な解明につながると考えている。

3) 中高温銀河間ガスの検出可能性

宇宙に存在するバリオンの総量は宇宙背景放射の非等方性の観測や、ビッグバン元素合成の理論などにより精度よく評価することができる。しかし、現在のそれらのバリオンの全てが観測されているわけではなく、星や銀河団中の高温ガスとして観測されているバリオンの量は、推定されている総量の半分以下でしかない。残りのバリオンの多くは中高温のガスとして銀河間に存在していると考えられている。計画中の X 線天文衛星 DIOS などによる検出可能性、観測からどのようなことを知ることが出来るのか議論をした。

2. 研究業績

1) 論文

E. Miyata, K. Masai, J. P. Hughes: Evidence for Resonance Line Scattering in the Suzaku X-ray Spectrum of the Cygnus Loop, *Publ. Astron. Soc. Japan* **60** (2008) 521–526

H. Kawahara, E. Reese, T. Kitayama, S. Sasaki, Y. Suto: Extracting Galaxy Cluster Gas Inhomogeneity from X-ray Surface Brightness: A Statistical Approach and Application to Abell 3667, *Astrophysical Journal* **687** (2008) 936–950

L. Piro, J. W. den Herder, T. Ohashi, L. Amati, J. L. Atteia, S. Barthelmy, M. Barbera, D. Barret, S. Basso, M. Boer, S. Borgani, O. Boyarskiy, E. Branchini, G. Branduardi-Raymont, M. Briggs, G. Brunetti, C. Budtz-Jorgensen, D. Burrows, S. Campana, E. Caroli, G. Chincarini, F. Christensen, M. Cocchi, A. Comastri, A. Corsi, V. Cotroneo, P. Conconi, L. Colasanti, G. Cusumano, A. de Rosa, M. Del Santo, S. Etori, Y. Ezoe, L. Ferrari, M. Feroci, M. Finger, G. Fishman, R. Fujimoto, M. Galeazzi, A. Galli, F. Gatti, N. Gehrels, B. Gendre, G. Ghirlanda, G. Ghisellini, P. Giommi, M. Girardi, L. Guzzo, F. Haardt, I. Hepburn, W. Hermsen, H. Hoovers, A. Holland, J. in 't Zand, Y. Ishisaki, H. Kawahara, N. Kawai, J. Kaastra, M. Kippen, P. A. J. de Korte, C. Kouveliotou, A. Kusenko, C. Labanti, R. Lieu, C. Macculi, K. Makishima, G. Matt, P. Mazzotta, D. McCammon, M. Mendez, T. Mineo, S. Mitchell, K. Mitsuda, S. Molendi, L. Moscardini, R. Mushotzky, L. Natalucci, F. Nicastro, P. O'Brien, J. Osborne, F. Paerels, M. Page, S. Paltani, G. Pareschi, E. Perinati, C. Perola, T. Ponman, A. Rasmussen, M. Roncarelli, P. Rosati, O. Ruchayskiy, E. Quadri, I. Sakurai, R. Salvaterra, S. Sasaki, G. Sato, J. Schaye, J. Schmitt, S. Sciortino, M. Shaposhnikov, K. Shinozaki, D. Spiga, Y. Suto, G. Tagliaferri, T. Takahashi, Y. Takei, Y. Tawara, P. Tozzi, H. Tsunemi, T. Tsuru, P. Ubertini, E. Ursino, M. Viel, J. Vink, N. White, R. Willingale, R. Wijers, K. Yoshikawa, N. Yamasaki: EDGE: Explorer of diffuse emission and gamma-ray burst explosions, *Experimental Astronomy* **23** (2009) 67–89

2) 国際会議報告

N. Ota, T. Kitayama, K. Masai: $L_X - T$ Relation and Thermal Evolution of Galaxy Clusters, *Chinese J. Astron. Astrophys. Suppl.* **8** (2008) 84–92

3) 学会・研究会講演

「高エネルギー宇宙物理学研究会」

宮津ロイヤルホテル (京都府宮津市)、2008年11月14-16日

政井邦昭: 銀河団における粒子加速と加熱 (口頭)

佐々木 伸: 銀河団ガス非一様性: Log-normal 分布モデル (口頭)

非線形物理サブグループ

1. 研究活動の概要

1) 多次元量子系における動的トンネル効果と動的局在

カオスの発生する非可積分系における動的局在現象と動的トンネル効果との関係を、前年度に引き続き調べた。今年度は以下の2点、(1) 3次元結合振動子系における動的トンネル効果の異常増大、(2) (ポテンシャル項、運動量項などに) 解析性をもたない系における回折効果とトンネル効果、に焦点を当て解析を行った。(1) に関しては、前年度行った2次元結合系と比較し、3次元系においては異常トンネル効果がより強調されて現れることが明らかになった。これにより、動的局在・非局在転移によって誘発されたトンネル遷移確率の異常増大、という、我々が当初立てた仮説の強い裏付けが得られた。また、(2) に関しては、解析性の崩れた系においては、混合位相空間に見られる通常の動的トンネル効果とはその発生機構を異にする「回折効果」がトラス・カオス間の過程に支配的になることを明らかにした。関連して、近年、ドレスデンのグループによって提案された、動的トンネル確率を評価する公式について、その想定される状況を吟味すると共に、以前より我々が構築してきた半古典的なシナリオとの整合性を議論した。

2) 馬蹄極限における量子エノン写像の鞍点寄与の時間依存性

エノン写像はカオスを示す最も単純な2次元写像のひとつである。写像が多項式で与えられることから、対応する量子論の時間発展核に寄与する鞍点解(複素古典軌道)の寄与・非寄与問題を解析するためのミニマムなモデルとしても有効である。特に、一回写像の時間発展核は、いわゆるエアリ積分そのものであり、光学の回折現象をその初等カタストロフの観点から分類した、いわゆる回折カタストロフ(diffraction catastrophe)の標準型とも関連が深い。今年度は、馬蹄極限における量子エノン写像のいわゆるストークス幾何学を詳しく解析した結果、その寄与数が(予想に反して)時間に対して高々代数的にしか増大しないことがわかった。また、その厳密な証明を与えた。それに対し、回折カタストロフの拡張として多項式作用をもつ1重積分を考え、多項式の次数がエノン写像の鞍点解と同じ、指数関数的に増大するような比較設定をした場合には、得られる寄与鞍点解の個数は指数関数的に増大することが明らかになった。これらの比較から、引き延ばしと折れたたたみ過程の繰り返しから得られる鞍点解の間には、ストークス幾何を介した相関が存在することがわかる。

3) 双曲空間上の剛体粒子モデルの局所秩序構造と移動度の空間的な不均一性

ガラスにおける動的不均一性の動的な起源と、遅い緩和過程を引き起こすためのミニマムな条件を探るべく、2次元の双曲空間上の剛体粒子のモデルの研究を前年度より引き続き行った。負曲率面上においては平面のもっていた並進対称性が失われるため、局所的な格子構造は保持しつつも長距離秩序を保つことができなくなる。結果、ランダムネスを外から手で入れることなく、系にフラストレーションを内在させることが可能になり、条件次第ではフラストレーション解消に伴う遅い遷移運動を発生させることができる。本年度は、適当な局所秩序変数を導入し、一定時間での粒子の運動の移動度と秩序変数との対応関係を調べた。粒子の移動が少なく比較的安定な領域と、粒子が大きく移動している領域が空間的に不均一に分布していること、また、移動度の空間的な不均一性は、曲率の効果(フラストレーション)により発生した局所秩序構造の空間的な不均一性に由来していることなどが明らかになった。

4) 全の holonomy 達の研究

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、これに加えて、幾何学的位相 (Berry 位相) が生じることが良く知られている。一方、全の holonomy (Cheon 1998) 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。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 holonomy 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。

特に、本年度は、固有空間の holonomy を取り扱う理論的枠組みを構築した。順序付けられた基底 vector 列から誘導される gauge 接続を、Fujikawa による幾何学的位相の定式化 (2005) を拡張したものに組み込むことで、幾何学的位相をも含む量子 holonomy の統一理論を得た。また、全の holonomy の新たな具体例として、Kramers 縮退を利用して構成して固有値縮退下の例を解析した。統一理論によれば、固有空間の holonomy がこの gauge 接続の径路積分として記述される。これに対し、断熱 parameter の複素化を通じ、固有値の複素縮退点 (加藤の分類による例外点) と、そこでの gauge 接続の極から径路積分の評価を陽に与える例を見いだした。これが示唆することは、複素縮退点が、幾何学的位相での実 parameter 空間中の縮退点と対照的な役割を演じることである。以上は、全教授 (高知工科大) および Kim 准教授 (Pusan Nat. Univ.) との共同研究による成果である。

2. 研究業績

1) 論文

A. Shudo and K.S. Ikeda: Stokes geometry for the quantum Hénon map, *Nonlinearity*, **21** (2008) 1831–1880.

T. Cheon and A. Tanaka: New anatomy of quantum holonomy, *Europhysics Letters* **85** (2009) 20001 (5pp).

2) 国際会議報告

A. Akaishi and A. Shudo: Unstable Periodic Orbits Accumulating to the Boundary between Torus and Chaos in Sharply Divided Phase Space, *AIP Conference Proceedings* **1076**, Proceedings of “ Let’s Face Chaos Through Nonlinear Dynamics ” 7th International Summer School and Conference, Edited by M. Robnik and V. Romanovski, pp.1-4 (2008).

3) 学会講演

日本物理学会第 63 回年次大会 2008 年 3 月 22 日–26 日 (近畿大学本部キャンパス)

赤石暁, 首藤啓: 定負曲率面における剛体粒子モデルの遅い動力学的研究

石川明幸, 田中篤司, 首藤啓: 2 自由度系におけるカオス的トンネル効果

城本理恵, 首藤啓, 池田研介: 複素半古典論を用いた動的障壁系トンネル効果の考察

田中篤司, 根本香絵: 全の anholonomy に沿った断熱量子検索

2008 年日本物理学会秋季大会 2008 年 9 月 20–23 日 (岩手大学)

赤石暁、首藤啓: 定負曲率面における剛体粒子モデルの局所秩序構造

全卓樹, 田中篤司: 位相の anholonomy と 固有空間の anholonomy の統一

国内研究会

多様な非線形ダイナミクスを生かした次世代制御調査研究会 2008 年 8 月 24 日 (早稲田大学)

首藤 啓: 量子カオスの諸問題と多次元トンネル効果

第 18 回量子情報技術研究会 (QIT18) 2008 年 5 月 22 日–23 日 (東京大学)

田中篤司, 宮本学: Floquet 作用素における全の anholonomy と, その量子計算への応用

古典および量子ダイナミクス・非平衡統計力学に関するワークショップ 2009 年 3 月 1 日–3 日
(学士会館本館)

田中篤司: Classicalization due to internal/external disturbances in quantum chaos (invited)

国際会議

7th International Summer School/Conference LET'S FACE CHAOS THROUGH NONLINEAR
DYNAMICS, CAMTP University of Maribor, June 28-July 13 2008

A. Shudo: Amphibious complex orbits and its manifestation in quantum mechanics (invited)

A. Shudo: Toward pruning front for the Stokes geometry (invited)

A. Akaishi and A. Shudo: Unstable Periodic Orbits Accumulating to the Boundary between Torus and Chaos in Sharply Divided Phase Space

Dynamics Days Asia Pacific 5, Nara Prefectural New Public Hall, Sep. 9-12 2008

A. Shudo: Dynamical localization and dynamical tunneling (invited)

A. Akaishi and A. Shudo: A study on the slow dynamics of hard disk systems on the hyperbolic plane

A. Ishikawa, A. Tanaka, A. Shudo: Flooding of wavefunctions in two-dimensional coupled rotors

Atushi Tanaka, Taksu Cheon, Manabu Miyamoto: Cheon's eigenspace and eigenvalue anholonomies in quantum maps and a unification of quantum holonomy

Japan-Slovenia International Workshop on Nonlinear Dynamics Univ.of Tokyo, Nov. 12–14 2008

A. Shudo Some aspects of classical and quantum dynamics in sharply divided phase space (invited)

Unifying Concepts in Glass Physics IV, Inamori Hall Shiran Kaikan, Kyoto University,
Nov. 25–28 2008

A. Akaishi and A. Shudo: Frustration and glass dynamics on the hyperbolic plane

Foundations of exact WKB analysis and resurgence theory, Kansai Seminar House, Kyoto,
Dec.15-19 2008

A. Shudo: Toward the pruning theory of Stokes geometry for the quantum Hénon map (invited)

International Mini-Workshop: Theoretical Foundations and Applications of Quantum Control,
Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Jul. 11 2008

Atushi Tanaka: Adiabatic quantum search along quasienergy anholonomy

Joint Workshop of the JST-CNRS "Quantum Computation: Theory and Feasibility" project,
the Institute Henri Poincare, Paris, September 25-26, 2008

Atushi Tanaka: Adiabatic quantum computation along Cheon's holonomies (invited)

International Conference "Dynamics and manipulation of quantum systems", University of Tokyo,
20-22 Oct 2008

Atushi Tanaka, Taksu Cheon: A Unified Theory of Quantum Adiabatic Holonomies

One day Workshop in Tokyo February 2009 of the JST-CNRS "Quantum Computation: Theory
and Feasibility" project National Institute of Informatics, Tokyo, 2009-02-24

Atushi Tanaka: Cheon's eigenvalue and eigenspace holonomies

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。2008年度末をもって椎名亮輔が神奈川大学工学部准教授に転出した。2008年度における研究活動の概要は次の通りである。

1) Kosterlitz-Thouless 転移における渦密度

Kosterlitz-Thouless 転移を示す系では、低温では渦の励起が対を成しているのに対し、高温で自由渦が現れる。周期境界条件では、渦が現れるとすると偶数個になるので、単独の自由渦が出始めるところを見ることができない。以前に、川村-菊池は diagonally antiperiodic (DAP) 境界条件をとることにより、自由渦を調べた。境界条件の違いによるエネルギーや自由エネルギーの差を調べることにより、渦密度の性質を調べたが、精度が十分ではなかった。新しいモンテカルロ手法である Wang-Landau 法を用いて、DAP 境界条件の XY (クロック) モデルの精度の高い計算を行い、直接、渦密度を計算した。[岡部]

2) 画像処理問題へのモンテカルロ法の応用

統計力学分野での画像処理は確率的画像処理と呼ばれ、本格的な研究が行われ始めたのはごく最近のことである。従来モンテカルロ法などの確率的手法は実際的な計算効率がよくないとの理由で余りとりあげられてこなかったが、最近のモンテカルロ法の手法的な発展を応用すれば新しい展開が期待される。2007年度はこのテーマの問題として、画像領域分割にとりくんだが、2008年度は画像修復問題を取りあげた。ベイズ統計に基づき、確率的に原画像を推定するが、その際に、周辺尤度関数とよばれる関数を最大化することにより、最も確からしい推定量(最尤推定量)を求める。モデルを定めると周辺尤度関数を最大化するパラメータ(ハイパーパラメータとよぶ)を決定することになるが、そのために、周辺尤度関数をハイパーパラメータ空間で直接計算する手法を提案した。その際に、エネルギー状態密度を計算する Wang-Landau 法とよばれる方法を用いた。周辺尤度関数のハイパーパラメータ依存性を大域的に求めることが可能にし、同じ画像について反復アルゴリズムによる結果と比較し、その性能について議論した。[岡部]

3) ボーズ・フェルミ混合系のモット状態の内部構造

極低温原子系の中でも解析の遅れているボーズ・フェルミ混合系に関し、原子間相互作用が斥力の際に生じるモット状態を解析した。原子の閉じ込めポテンシャルの影響により、モット状態は局所的に発生するが、その内部にフェルミ原子とボーズ原子の粒子数比に依存した秩序構造が見られることを数値シミュレーションにより明らかにした。

シミュレーションで扱ったシステムは1次元系であることから観測された秩序は準長距離秩序だが、現実の3次元系ではモット状態におけるボーズ原子とフェルミ原子の配列は長距離秩序をもつと想像される。

さらに、閉じ込めポテンシャル中で形成される局所的モット状態では、粒子数が保存しない(すなわち隣接する超流動相との粒子の出入りがある)ため、モット状態内部でのボーズ原子とフェルミ原子の粒子数比はエネルギー的に安定な値に選ばれ、具体的には単純な整数比となる。結果として内部にあらわれる原子配列の準長距離秩序も比較的単純なものとなることが数値的に示された。[森]

4) 異種フェルミ原子混在系での振動現象の解析

フェルミ原子を閉じ込めたのち、閉じ込めの中心をずらしたばあい、原子集団はポテンシャル中で振動を始める。他の要因がなければ原子集団はポテンシャルの極小点を中心とした振動をおこなうだけであるが、この系に周期ポテンシャル(光学格子)が存在していると過減衰現象が起こる。

過減衰現象では、原子集団の重心の位置が閉じ込めポテンシャルの極小点にまで下がらず、斜面の途中で減衰振動をおこなう。この現象を2種類のフェルミ原子に対してシミュレーションにより解析したところ、原子間の相互作用によってふるまいが大きく変わる可能性が観測された。とくに引力相互作用により両種の原子が逆位相で振動する様子が見られた。[森]

5) 逆スピンホール効果による電流生成の理論

スピン軌道相互作用を用いれば、電流を流すことでスピンの流れ(スピン流)を発生し、結果として磁化を発生することが可能である(スピンホール効果)。一方、交換相互作用は磁化からスピン流や電流という電子の流れを生じるはたらきがある)。これらを組み合わせると磁化から発生したスピン流をスピン軌道相互作用を用いて電流に変換するという逆スピンホール効果が可能である。これにより磁場をかけるだけで電圧を全くかけずに電流が取り出せることになる。この効果を半導体の Rashba スピン軌道相互作用の場合及び金属系のスピン軌道相互作用の場合に解析した。解析はゲージ不変性を保った形で進め、従来の理論では欠けていた電荷保存を満たした形の物理的に正しい結果を導いた。その結果、確かに磁化ダイナミクスからスピン流星性、及び電流生成が起きることが示された。[多々良]

6) 電流による磁化反転効率のスピンの連続の式に基づいた定式化

ハードディスク等の比較的大規模な磁気記憶媒体において、情報の書き込みは外部磁場により磁性体中の磁化を反転させることで行っている。しかしながら高密度化により、磁性体が小さくなると情報の書き込みに必要な外部磁場は急激に増大してしまう。また外部磁場の発生装置の必要性もあるため、小型化を目指す際に不利である。このように従来の方法では限界が予想されるため新しい手法を用いての情報の書き込みが求められている。従来の方法に変わる手段として、注目を集めている1つのメカニズムがスピン偏極電流のもつスピン移行トルク効果である。この効果は従来はsd型のスピン間相互作用に基づいて議論されてきたが、そこではsとdの電子軌道がそれぞれ電気伝導と磁化のみに寄与するという役割分担が大前提となっている。もちろんこのsd分離の仮定はあまり現実的ではない。そこで、電流により誘起されるトルクの定式化をスピンの連続の式を用いてsd分離を仮定することなく一般的に行い、実際のトルクの評価を行った。この結果は今後第一原理計算などによる現実的な反転効率の見積りに適用する予定である。[多々良]

7) スピンのベクトルカイラリティによる異常ホール効果

スカラーカイラリティを持つような非自明なスピン構造による「異常な」異常ホール効果の存在が最近知られている。これはスピンの立体構造に伴うベリー位相による異常ホール効果として理解されている。一方、スピン構造のベクトルカイラリティはベリー位相を持たず、単独では異常ホール効果を生じないとされている。そこで、どのようなケースであればベクトルカイラリティがホール効果を生み出すのかを線形応答理論に基づいて解析した。その結果、伝導電子にスピン分極があればベクトルカイラリティによる異常ホール効果が起こることが明らかになった。この効果はベクトルカイラリティがつくるスピン流で解釈することもでき、スピン流の応用の観点からも興味深い。[多々良]

8) 多極子近藤効果の理論

最近、Sm系充填スクッテルダイト化合物 $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ における「磁場に鈍感な重い電子状態」が注目を集めている。大きな有効質量が磁場によってほとんど変化しないことから、電子間相互作用による通常の磁気的な近藤効果ではなく、電子フォノン相互作用による非磁性近藤効果によるものではないか、という見方が当初からあった。実際、 $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ においては、Sbの正二十面体のかごの内部をSm原子が大振幅の振動をする、いわゆるラットリングの効果が大きいことから、フォノン説が有力とされていた。しかし、電子格子相互作用以外の可能性もあるのではないかと思ひ、磁場に鈍感な重い電子状態の起

源として、多極子近藤効果の可能性を考えた。アイデアは単純で、磁場が直接結合するのは双極子モーメントであり、それ以上の高次の多極子モーメントは磁場とは直接結合せず、双極子モーメントとの重なりを通して磁場と間接的に結合するので、四極子以上の多極子モーメントに関する近藤効果、すなわち多極子近藤効果は磁場にはあまり影響されない可能性がある。これを確かめるために、軌道縮退アンダーソンモデルに基づいて、磁場下で多極子感受率、エントロピー、比熱を計算し、多極子モーメントに関する近藤効果が磁場によってどのように変化するかを詳細に調べた。具体的には、7軌道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、電子比熱係数 γ の磁場依存性を調べた。低磁場において、 γ が磁場に全く依存しないという結果は得られなかったが、10テスラ以上の高磁場側では γ は磁場に殆ど依存しないことを明らかにした。[堀田]

9) 非調和フォノンによる重い電子状態

従来、重い電子状態は、局所磁気モーメントと伝導電子の一重項形成による近藤効果に基づいて理解されてきたが、磁気モーメントが絡んでいることから想像できるように、磁場を印加することによって電子の有効質量は顕著に減少する。しかし、最近発見された $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ における重い電子状態は、30テスラまで磁場をかけても電子比熱係数は殆ど変化せず、通常近藤効果では理解できない磁場に鈍感な重い電子状態として注目を集めている。上記の研究では多極子自由度に着目したが、ここでは充填スクッテルライト構造に特徴的な非調和性の強いポテンシャル中の局所原子振動、すなわちラットリングの効果に着目した。具体的には、非調和性を考慮したホルスタインフォノンと結合するアンダーソンモデルに基づいて、数値繰り込み群法によって電子比熱係数を計算した。その結果、ポテンシャルの底が平らに近くなって、原子の振幅が大きくなるあたりで、自由電子の100倍程度に増強された電子比熱係数が磁場に対して鈍感になることを明らかにした。今後、重い電子状態に対するラットリングの寄与を実証するための方法や実験を考案する必要がある。[堀田]

10) 三体相互作用を持つクロックスピン模型の場の理論的考察

アルカラッツらにより考案された三体相互作用を持つ三角格子クロックスピン模型の解析を場の理論と数値計算を組み合わせることで定量的に行っている。この系は状態数が4以上の場合、低温秩序相と高温無秩序相との間に、臨界的中間相を持つことが予想されていた。我々はベクトル双対サインゴルドン場の理論によりこの系の理論的取り扱いが可能であることを既に示しているが、本年度は系のもつ2つの相転移のうちの高温無秩序相への連続転移について詳しく議論した。具体的には、系の持つ $U(1) \times U(1)$ 対称性に適したスピンの長波長ツイストを導入することで、系のスティッフネスを反映するヘリシティモジュラスのミクロな定義を与えると共に、モンテカルロ法などにより得られるデータの解析に必要な有限サイズスケール関係式を導いた。更に、実際に数値計算を行うことにより、上記スケール関係式を含むいくつかの理論的予想を確認した。[大塚、野村清英 (九大)]

11) 正方格子上で相互作用するダイマー系の相転移と相構造に関する考察

与えられた格子を二量体(最近接サイトを占める)で覆う問題は、所謂ダイマー模型として定式化される。特に60年代初頭に、カステレイン、テンパリー&フィッシャーらにより議論されたプラナー格子上のそれは可解であり今日でも多くの研究が継続してなされている。最近の興味は主に量子効果を持つダイマー系に現われる新奇相に集まっているが、例えばグラファイト上に吸着された棒状分子系にも見られるように、ダイマー間の相互作用がもたらす現象も注目されている。我々は、正方格子上で相互作用するダイマー系を調べている。具体的には近接する2つのダイマー間に異方的な相互作用を与えた系の、低エネルギー長距離での振る舞いを記述する有効理論を調べ、それをを用いてダイマー液体相から様々なコラムナー秩序相への相転移を議論し、実際転送行列の固有値構造を数値的に調べることにより、系の

大域的相構造を明らかにしている。[大塚]

12) PrRu₄P₁₂ における異常 CDW 秩序と金属絶縁体転移

スクッテルダイト化合物の一種である PrRu₄P₁₂ では、10 年ほど前に金属絶縁体転移が発見され、最近それが f 電子の秩序形成と関連した新種の CDW 転移であることが分かってきた経緯がある。本年の主要課題として、この CDW 現象の解明に取り組んだ。スクッテルダイト中の Pr イオンでは、大雑把に言って、f 電子がシングレットとトリプレットと呼ばれる結晶場 2 準位のどちらかを占有することが分かっている。まず最初に、この f 電子の 2 準位と伝導電子との相互作用が、f 電子の秩序化と金属絶縁体転移の同時発生を導くことを示した。その上で、f 電子の占有がシングレットとトリプレットの間で激しく揺らいでおり、それが、電気抵抗の温度変化に、通常の絶縁体の振る舞いからの大きなズレをもたらすことを明らかにした。これらの計算結果が最近の実験結果をよく再現することを示し、この物質で、揺らぎに強く影響された興味深い準粒子状態が実現していることを指摘した。

[椎名]

13) TmTe の四極子秩序と共鳴 X 線散乱の理論

TmTe は、長く磁性半導体として知られていたが、近年の純良単結晶の生成により、常圧で四極子秩序が発見され、また高圧下で金属絶縁体転移が強磁性と同時に起こることも明らかになり、再び注目が集まっている。我々は、TmTe の四極子秩序に対して、以前に古典モデルによる平均場解析を行ったが、(1) 結晶場準位の同定、(2) 理論の定量性、(3) 揺らぎ効果、について問題が残っていた。そこで、本研究では、現実的な $J = 7/2$ 多重項モデルを用いて、まず上記問題点の (1)、(2) について、平均場近似の解析を進めた。 Γ_3 型四極子の転移温度に関して、磁場による変化と異方性が実験を定量的に再現することを確認した。また、その際の結晶場準位が、中性子散乱から示唆されていた候補スキームの一つ ($\Gamma_8(0K)$ - $\Gamma_6(5K)$ - $\Gamma_7(10K)$) と一致することを示した。さらに、平均場波動関数を用いて、共鳴 X 線散乱強度のアジマス角依存性に関する計算を行い、秩序変数と結晶場による特徴の現れ方を議論した。

[椎名、長尾(群馬大)]

2. 研究業績

1) 論文

T. Surungan, N. Kawashima and Y. Okabe: Critical properties of the edge-cubic spin model on a square lattice, Phys. Rev. B **77** (2008) 214401-(1-7).

Katsuhisa Taguchi and Gen Tatara: Anomalous Hall conductivity due to vector spin chirality in the weak coupling regime, Phys. Rev. B **79**, 054423-1-054423-5 (2009).

Gen Tatara, Hiroshi Kohno and Junya Shibata: Microscopic Approach to Current-induced Domain Wall Dynamics, Phys. Rep., **468**, 213-301 (2008).

Gen Tatara and Peter Entel: Calculation of current-induced torque from spin continuity equation, Phys. Rev. B **78**, 064429-1 -064429-6 (2008).

Katsunori Obata and Gen Tatara: Current induced domain wall motion in Rashba spin orbit system, Phys. Rev. B **77**, 214429-1- 214429-12 (2008).

Akihito Takeuchi, Gen Tatara: Charge and Spin Currents Generated by Dynamical Spins, J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 074701-1-074701-8 (2008).

- Yoshinobu Nakatani, Junya Shibata, Gen Tatara, Hiroshi Kohno, André Thiaville, Jacques Miltat: Nucleation and dynamics of magnetic vortices under spin-polarized current, *Phys. Rev.* **B77**, 014439-1-014439-7 (2008).
- Katsuyuki Sato and Gen Tatara: スピン移行トルクに対する量子補正 (Quantum Correction to Spin Torque), *J. Magn. Soc. Jpn.* **32**, 462-465 (2008), in Japanese.
- Kazuhiro Hosono, Akihito Takeuchi, and Gen Tatara: Perturbation Theory of Charge Current Driven by Magnetization Dynamics, *Journal of Physics: Conference Series*, **150**, 022029-1-022029-3 (2009).
- A. Tsukada, S. Masaki and H. Mori: Superfluid State of Strongly-Correlated Bose-Fermi Mixtures on Optical Lattices at Commensurate Filling, *J. Phys. Soc. Jpn.* **78** (2009) 025004.
- A. Masaki, S. Tsukada and H. Mori: Trapped Bose-Fermi mixture on an optical lattice, *J. Phys. Conf. Series*: 150 (2009) 032050.
- S. Ikeda and H. Mori: Superfluid and insulator of dirty Bose-Fermi mixture, *J. Phys. Conf. Series*: 150 (2009) 032063.
- R. Ota and H. Mori: Interacting electrons on Moebius strip with disorder, *J. Phys. Conf. Series*: 150 (2009) 022058.
- Takashi Hotta: Magnetically Robust Multipole Kondo Effect, *J. Phys.: Conf. Ser.* **150** (2009) 042061-1-4.
- Takashi Hotta: Effect of Rattling Phonons on Sommerfeld Constant, *J. Phys. Soc. Jpn.* **77** (2008) 103711-1-4.
- Takashi Hotta: Field-Induced Multipole States of Sm-Based Filled Skutterudites, *J. Phys. Soc. Jpn.* **77** (2008) 074716-1-9.
- Takashi Hotta: Multipole as f-Electron Spin-Charge Density in Filled Skutterudites, *J. Phys. Soc. Jpn.* **77** Suppl. A (2008) 96-101.
- Hiroaki Onishi and Takashi Hotta Antiferro-quadrupole state of orbital-degenerate Kondo lattice model with f^2 configuration, *J. Phys. Soc. Jpn.* **77** Suppl. A (2008) 199-201.
- Hiromi Otsuka and Kiyohide Nomura: Critical Intermediate Phase and Phase Transitions in Triangular-Lattice Three-Spin Interaction Model: Level-Spectroscopy Approach, *J. Phys. A: Math. Theor.* **41** (2008) 375001.
- Hiromi Otsuka: Finite-Size-Scaling Ansatz for the Helicity Modulus of the Triangular-Lattice Three-Spin Interaction Model, *Phys. Rev. E* **77** (2008) 062101.
- Hiromi Otsuka: A Numerical Study of the Phase Transition in a Triangular-Lattice Model with Three-Spin Interactions, *J. Phys. : Conf. Ser.* **145** (2009) 012043.
- Hiromi Otsuka and Yutaka Okabe: Crossover of Criticality in a Three-State Potts Antiferromagnets with a Staggered Polarization Field, *J. Korean Phys. Soc.* **53** (2008) 1280.

R. Shiina: Unconventional Charge-Density Wave, Fluctuating f -Orbitals, and Metal-Insulator Transition in $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$, J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) 083705-1-4.

R. Shiina and T. Nagao: Anisotropic Phase Diagram for Quadrupole Ordering and Possible Crystal Field Level Structure in TmTe J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) 124715-1-6

R. Shiina, O. Sakai and H. Shiba: Theory of Elastic Neutron Scattering by Ordered Magnetic Octupoles in f -Electron Systems, J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) Supplement A 281-284

2) 学会講演

日本物理学会 2008 年第 63 回年次大会 2008 年 3 月 22 日 ~ 3 月 26 日 (近畿大学)

安田建, 岡部豊, 川島直輝: T_c に依存しない有限サイズスケーリング

渡辺博史, 岡部豊: モンテカルロ法による画像領域分割の拡張

池田秀一, 森弘之: Bose-Fermi 混合原子気体、特に Insulator-Superfluid 混合系の数値解析

正木晶子, 塚田草太, 森弘之: トラップされた光学格子上ボーズ・フェルミ混合系

塚田草太, 正木晶子, 森弘之: 格子上のボーズ・フェルミ混合系のモット絶縁体状態

太田吏城, 森弘之: メビウスの帯における永久電流の数値シミュレーション

堀田貴嗣: Sm 系充填スクッテルダイト化合物の多極子状態

小幡一智, 多々良源: 電流誘起磁化ダイナミクス of スピン軌道相互作用による効率化

伴芳祐, 多々良源: 拡散領域でのスピン移行トルク

竹内祥人, 大江純一郎, 多々良源: スピンダイナミクスにより生成される電流・スピン流

細野一弘, 多々良源: 金属系における磁化ダイナミクスによる電流生成の摂動論

田口勝久, 多々良源: ベクトルスピン・カイラリティがつくる異常ホール効果

仲谷栄伸, 柴田絢也, 多々良源, 河野浩, Andre Thiaville, Jacques Miltat: スピン流による磁気渦対生成とその運動

多々良源: non-trivial 磁気構造のスピン移行トルクとホール効果 (シンポジウム講演)

大塚博巳: 三体相互作用をもつ三角格子上 Z_p スピンモデルの解析 IV

日本物理学会 2008 年秋季大会 2008 年 9 月 20 日 ~ 9 月 23 日 (岩手大学)

小村幸浩, 岡部豊: 2次元一般化 XY モデルの相転移

佐次田哲, 岡部豊: モンテカルロ法による画像修復におけるハイパーパラメータ推定

正木晶子, 塚田草太, 森弘之: 調和トラップ中における光学格子上 Bose-Fermi 混合系のシミュレーション

堀田貴嗣: 非調和性局所フォノンによる電子比熱係数の増強

田口勝久、多々良源：ベクトルカイラリティ，スピン流による異常ホール効果

多々良源、Peter Entel：スピン緩和起源トルクのスピン流からの計算

北見学、多々良源：伝導電子スピンからみたスピン移行トルク

竹内祥人、細野一弘、多々良源：スピン軌道相互作用下における電流とスピン流の関係

細野一弘、竹内祥人、多々良源：逆スピンホール効果における電流とスピン流の相互関係

大塚博巳：三体相互作用を持つ三角格子上 XY スピンモデルの解析

椎名亮輔、 $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ における電荷密度波，軌道揺らぎ，金属絶縁体転移

特定領域研究「充填スクッテルダイト構造に創出する新しい量子多電子状態の展開」

第 6 回研究会 2008 年 7 月 11 日～7 月 13 日（東京大学物性研究所）

堀田貴嗣：多極子に関するコメント

堀田貴嗣：Sm 系充填スクッテルダイトの磁場誘起多極子状態と電子比熱係数

物性研短期研究会「重い電子系研究の新展開」

2008 年 7 月 23 日～7 月 25 日（東京大学物性研究所）

堀田貴嗣：非調和局所フォノンと電子比熱係数

椎名亮輔：スクッテルダイト $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ における異常な電荷密度波状態と金属絶縁体転移の理論（口頭）

新学術領域研究「重い電子系の形成と秩序化」第 1 回研究会

2009 年 3 月 9 日～10 日（東京大学柏キャンパス柏図書館メディアホール）

堀田貴嗣：ラットリングをめぐる現状と展望

椎名亮輔： $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ の CDW 状態と輸送現象の理論（口頭）

科研費特定領域「スクッテルダイト」第 6 回まとめ研究会

2008 年 7 月 11 日～7 月 13 日（東京大学物性研究所）

椎名亮輔：多極子に関するコメント（口頭）

椎名亮輔：多極子と Fulde 論文へのコメント（口頭）

椎名亮輔： $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ における電荷密度波，軌道揺らぎ，金属絶縁体転移（ポスター）

国際会議

StatPhys-Taiwan-2008

Taipei, Taiwan, July 8-12, 2008

Y. Okabe: Monte Carlo Study of Image Segmentation Problem (invited talk)

2nd Conference of WUN on SPIN

Nanjing, China, July 13-16,2008

G. Tatara Novel magneto-electric effect : Current-induced domain wall motion and inverse spin Hall effect (invited talk)

Fifth International Conference on Physics

and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors (PASPS-V)

Foz do Iguassu, Brazil, August 3 - 6

A. Takeuchi, K. Hosono, and G. Tatara Current Pumping from Spin Dynamics

Conference on Computational Physics 2008, Ouro Preto, Brazil, August 5-9, 2008

Y. Okabe: Computational Science and Infrastructure for Supercomputing in Japan – Development of an Over Peta Scale Supercomputer – (invited talk)

25th International Conference on Low Temperature Physics

Amsterdam, August 6-13, 2008

H. Mori and S. Ikeda: Superfluid and insulator of dirty Bose-Fermi mixture

H. Mori and R. Ota: Interacting electrons on Moebius ring with disorder

A. Masaki, S. Tsukada and H. Mori: Trapped Bose-Fermi mixture in optical lattice

S. Tsukada, A. Masaki and H. Mori: Mott insulator state of Bose-Fermi mixed system on a cubic lattice

T. Hotta: Magnetically Robust Multipole Kondo Effect

K. Hosono, A. Takeuchi, and G. Tatara, Perturbation Theory of Charge Current Driven by Magnetization Dynamics

Supercomputing in Solid State Physics 2009

ISSP, February 18, 2009

A. Masaki, S. Tsukada and H. Mori: Quantum Monte Carlo Calculation of Quasi-Long-Range Order in One-Dimensionally Trapped Bose-Fermi Mixtures

The 9th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics

in the Light of New Technology (ISQM-Tokyo '08)

Hatoyama, Japan, 25-28 August, 2008

G. Tatara, Novel Current Pumping Mechanism by Spin Dynamics (invited talk)

A. Takeuchi, K. Hosono, and G. Tatara, Novel Current Pumping Mechanism by Spin Dynamics

K. Taguchi and G. Tatara, Anomalous Hall Effect due to Vector Spin Chirality

The 23rd Nishinomiya-Yukawa Memorial International Workshop
”Spin Transport in Condensed Matter” (STCM-Kyoto)
Kyoto, Japan, October 27 - November 28, 2008

K. Hosono, Perturbation theory of inverse spin Hall effect

A. Takeuchi, Current Pumping from Dynamical Spins in Spin-Orbit Interaction System

K. Taguchi, Anomalous Hall effect induced by the vector spin chirality and electron spin

IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference 2008 (NMDC 2008-Kyoto)
Kyoto, Japan, October 20 - 22, 2008

K. Hosono, A. Takeuchi, and G. Tatara, Perturbation theory of charge current driven by magnetization dynamics

K. Taguchi and G. Tatara, Anomalous Hall Effect Caused by Circular Spin Current

The 2nd International Symposium on Anomalous Quantum Materials (ISAQM2008)
and the 7th Asia-Pacific Workshop
Tokyo, Japan, November 7 - 10, 2008

A. Takeuchi, K. Hosono, and G. Tatara, Current Induced by Spin Dynamics in Spin-Orbit Interaction System

K. Taguchi and G. Tatara, Anomalous Hall Effect due to Vector Spin Chirality

International Workshop on Advances in Spintronic Materials:Theory and Experiment
Duisburg, Germany, November 26-28, 2008

G. Tatara Novel magneto-electric effect : Current-induced domain wall motion and inverse spin Hall effect (invited talk)

International workshop “Spin Caloritronics”
Leiden,the Netherlands, 9 - 13 Feb, 2009

G. Tatara, Current pumped by magnetization dynamics ? Dynamic inverse spin Hall effect (invited talk)

Highly Frustrated Magnetism 2008
Braunschweig, Germany, September 7-12, 2008

Hiromi Otsuka, A Numerical Study of the Phase Transition in a Triangular-Lattice Model with Three-Spin Interactions.

3) 学会誌等

岡部豊「物性研とその全国共同利用の現状と将来-スーパーコンピュータの共同利用-」日本物理学会誌 **63** (2008) 933

堀田貴嗣「超ウラン系の超伝導」(特集：物理科学、この1年)：パリテイ **24** (2009) 29-31.

多々良 源、河野浩、柴田絢也：誌上セミナー スピントロニクス理論の基礎 (連載 1-5 回)：固体物理 **43**, 1-7 (2008); **43**, 131-143 ; **43**, 265-276 **43** 319-329 ; **43**, 617-627 (2008).

椎名亮輔「局在 f 電子系における群論と量子多極子 - ヘキサボライド、スクッテルダイト、ダイオキサイドの相転移」：固体物理 **43** (2008) 249-263.

酒井治、菊地淳、椎名亮輔、瀧川仁「多極子秩序と NMR 測定によるその同定」：日本物理学会誌 **63** (2008) 427-434 .

4) 著書等

岡部豊「熱・統計力学」朝倉書店 (2008)

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。

1) B ファクトリー実験 (Belle)

KEK-B 加速器は一昨年よりルミノシティーの向上を目指し Crab Cavity を導入して運転を継続しているが、これまでのところ期待したルミノシティーの増加は得られていない。しかし、積分ルミノシティーは $810 fb^{-1}$ から $890 fb^{-1}$ へと順調に増加し、2010 年度中には念願の $1 ab^{-1}$ が実現される予定である。衝突エネルギーに関しても $\Upsilon(4s)$ だけでなく $\Upsilon(1s)$ 、 $\Upsilon(5s)$ などの共鳴状態に設定され、これらの共鳴状態からの様々な崩壊過程が詳細に研究された。

今年度の物理解析で得られた大きな成果としては、 $B \rightarrow K^* l^+ l^-$ 過程における forward-backward asymmetry の測定があげられる。この測定は超対称粒子の存在に敏感であり、今後のデータ蓄積で興味深い結果が期待される。また、 $B^0 \rightarrow K^+ \pi^- \chi_{c1}$ 崩壊事象において $\pi - \chi_{c1}$ 系の不変質量に 2 つの共鳴状態 ($4051 MeV/c^2$, $4248 MeV/c^2$) が発見された。

一方、2010 年度から始まる KEK-B 加速器の性能向上に呼応して、Belle 検出器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の開発を進めている。この検出器に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。この HAPD からの信号読み出しには、ASIC を用いた電子回路の開発が必要で、本研究室がその開発を担当しており、SA01 と呼ばれる新しい ASIC を製作しその基本性能を確認した。また、2009 年度には SA01 を改良した SA02 の制作を予定している。

今年度は 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 θ_{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。

当研究グループは新潟大学・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) を担当している。2008 年度中に全 PMT の半数である 400 本を日本グループが調達し、国内で全数試験を行った。合格したものをドイツのマックス・プランク研究所に空輸し、再度簡易試験を行った。2008 年 11 月には 400 本の検査を終え、2009 年 5 月から実験装置への組み込みを予定している。

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崩壊事象 ($0\nu\beta\beta$) が観測されるはずである。当研究グループは、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している DCBA 実験グループ (KEK、静岡大などとの共同実験) 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、 ^{207}Bi の崩壊で生成された電子のエネルギー分布を測定しているが、測定精度を向上させるためにデータ解析の高速化を進めた。一方、より高いエネルギー分解能を目指して超伝導電磁石を用いた、大型の DCBA-T3 検出器の製作が始まっているが、そのための DC のワイヤー張力の測定やシミュレーションによる性能評価を行った。

4) 岩塩を用いた超高エネルギーニュートリノ観測のための基礎研究

宇宙由来の超高エネルギーニュートリノ ($> 10^{16}\text{eV}$) として GZK ニュートリノの存在は確実視されている。GZK ニュートリノは超高エネルギー宇宙線と宇宙背景輻射との衝突で生成される。飛来数が非常に稀なため検出するためには 50Gton(体積 $3 \times 3 \times 3\text{km}^3$) の巨大質量の検出器が必要となる。巨大天然岩塩鉱中でのニュートリノ反応で惹起したハドロンシャワー及び電磁シャワーを捉える方法としてレーダー法の研究を行なった。

電波に対する低損失の岩塩電波減衰長を我々が開発した TM_{010} モードの 200MHz 及び 300MHz 試料挿入孔封鎖型摂動空洞共振器法で測定した。更に試料を挟む封鎖用蓋へ力を掛けて蓋と試料両端への密着性を高め測定値のバラツキを五分の一へ減少させた。その測定結果から 10MHz に於ける減衰長は 7km に及ぶことが推定された。

簡略レーダー法においては既存の掘削ホールを利用し高価なボアホールなしでパルスレーダー波のニュートリノ反応生成シャワーからの反射波を測定する。KEK-PF-AR での X-band 導波管中の放射光照射された岩塩試料からのマイクロ波反射の発見に加えて原研高崎の 2MeV 電子ビームによる自由空間中の岩塩試料照射からの 435MHz 電波反射が観測された。巨大天然岩塩鉱に適用すると 10MHz の 1GW パルスレーダーでは 10^{19}eV においては探索距離が 3km に達する。GZK ニュートリノが簡略レーダー装置により年間約 10 個検出されることが推定された。

5) πK 原子の寿命測定による低エネルギー非摂動領域での QCD の実験的検証

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 $\pi^+\pi^-$ 原子の寿命を測定した結果、 $2.8 \pm 0.2\text{fs}$ となり QCD カイラル摂動理論予測と一致した。同時に π^+K^- 及び π^-K^+ 原子をはじめ観測し、その寿命の下限を 0.8fs (90% C.L.) と求めた。

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 α^7 と α^8 の高次 QED 過程の検証を目的とした、ポジトロニウムの稀崩壊現象のデータ取得を長期間行った。

2. 研究業績

1) 論文

Development of an HAPD with 144 channels for the aerogel RICH of the Belle upgrade.

Shohei Nishida, Takayuki Sumiyoshi *et al.*, Nucl.Instr. Meth. A595: 150-153,2008

Studies of a proximity focusing RICH with aerogel radiator for future Belle upgrade.

T. Iijima *et al.*, Nucl.Instr. Meth. A595: 92-95, 2008

DCBA experiment for searching for neutrinoless double beta decay (I).

N. Ishihara *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. 120: 052049, 2008.

DCBA experiment for searching for neutrinoless double beta decay (II).

N. Ishihara *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. 120: 052062, 2008.

Precise measurement of hadronic τ -decays with an η meson.

By Belle Collaboration (K. Inami *et al.*), Phys. Lett. B672: 209-218, 2009.

Search for Lepton-Flavor-Violating τ Decays into Lepton and $f_0(980)$ Meson.

By Belle Collaboration (Y. Miyazaki *et al.*), Phys. Lett. B672: 317-322, 2009

High-statistics measurement of neutral-pion pair production in two-photon collisions.

By the Belle Collaboration (S. Uehara *et al.*), Phys. Rev. D78: 052004, 2008.

Measurement of the Decay $B_s^0 \rightarrow D_s^- \pi^+$ and Evidence for $B_s^0 \rightarrow D_s^\pm K^\pm$ in e^+e^- Annihilation at $\sqrt{s} \sim 10.87 GeV$.

By Belle Collaboration (R. Louvot *et al.*), Phys. Rev. Lett. 102: 021801, 2009

Evidence for $B^0 \rightarrow \chi_{c1} \pi^0$ at Belle.

By Belle Collaboration (R. Kumar *et al.*), Phys. Rev. D78: 091104, 2008.

Study of intermediate two-body decays in $\bar{B}^0 \rightarrow \Sigma_c(2455)^0 \bar{p} \pi^+$.

By Belle collaboration (H.O. Kim *et al.*), Phys. Lett. B669: 287-293, 2008.

Measurement of $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$ Decays and Search for $B^0 \rightarrow \rho^0 \rho^0$.

By Belle Collaboration (C.-C. Chiang *et al.*), Phys. Rev. D78: 111102, 2008

Review of Particle Physics.

By Particle Data Group (C. Amsler *et al.*), Phys. Lett. B667: 1, 2008.

Observation of a near-threshold enhancement in the $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c^+ \Lambda_c^-$ cross section using initial-state radiation.

By Belle Collaboration (G. Pakhlova *et al.*), Phys. Rev. Lett. 101: 172001, 2008.

Evidence for Neutral B Meson Decays to ωK^{*0} .

By Belle Collaboration (P. Goldenzweig *et al.*), Phys. Rev. Lett. 101: 231801, 2008

Observation of $B^\pm \rightarrow \psi(2S) \pi^\pm$ and search for direct CP-violation.

By Belle Collaboration (V. Bhardwaj *et al.*), Phys. Rev. D78: 051104, 2008.

Measurement of CP asymmetry in Cabibbo suppressed D^0 decays.

By Belle Collaboration (M. Staric *et al.*), Phys. Lett. B670: 190-195, 2008.

Observation of two resonance-like structures in the $\pi^+ \chi_{c1}$ mass distribution in exclusive $\bar{B}^0 \rightarrow K^- \pi^+ \chi_{c1}$ decays.

By Belle Collaboration (R. Mizuk *et al.*), Phys. Rev. D78: 072004, 2008.

Time-dependent CP Asymmetries in $B^0 \rightarrow K_S^0 \rho^0 \gamma$ Decays.

By Belle Collaboration (J. Li *et al.*), Phys. Rev. Lett. 101: 251601, 2008.

High-Statistics Study of the $\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \nu_\tau$ Decay.

By Belle Collaboration (M. Fujikawa *et al.*), Phys. Rev. D78: 072006, 2008.

Search for $B^0 \rightarrow J/\psi \phi$ decays.

By Belle Collaboration (Y. Liu *et al.*), Phys. Rev. D78: 011106, 2008

Measurement of Azimuthal Asymmetries in Inclusive Production of Hadron Pairs in e^+e^- Annihilation at $\sqrt{s} = 10.58 GeV$.

By Belle Collaboration (R. Seidl *et al.*), Phys. Rev. D78: 032011, 2008.

Measurement of branching fractions, isospin and CP-violating asymmetries for exclusive $b \rightarrow d\gamma$ modes.

By Belle Collaboration (N. Taniguchi *et al.*), Phys. Rev. Lett. 101: 111801, 2008, Erratum-ibid.101: 129904, 2008

Search for $B \rightarrow \pi l^+ l^-$ Decays at Belle.

By Belle Collaboration (J.-T. Wei *et al.*), Phys. Rev. D78: 011101, 2008.

Study of the Suppressed B meson Decay $B^- \rightarrow DK^-$, $D \rightarrow K^+ \pi^-$.

By Belle Collaboration (Y. Horii *et al.*), Phys. Rev. D78: 071901, 2008.

Search for $B^+ \rightarrow D^{*+} \pi^0$ decay.

By Belle Collaboration (M. Iwabuchi *et al.*), Phys. Rev. Lett. 101: 041601, 2008.

Evidence for $\pi - K$ -atoms with DIRAC

B. Adeva, L. Afanasyev, Y. Allkofer, C. Amsler, A. Anania, A. Benelli, V. Brekhovskikh, G. Caragheorghopol, T. Cechak, M. Chiba, *et al.*, Phys. Lett. B 674 (2009), pp.11-16

2) 学会講演

日本物理学会 2008 年秋季大会 2008 年 9 月 20 日 ~ 9 月 23 日 (山形大学小白川キャンパス)

住吉孝行, 門叶冬樹, 櫻井敬久, 郡司修一, 杉山浩之, 大村孝幸, 岡田晃行, 大石登: ガス増幅型光電子増倍管の開発

佐藤文孝, 住吉孝行, 遠藤裕介, 松原綱之, 他: 原子炉ニュートリノ振動実験 Double Chooz 用 10 "PMT のドイツでの受け入れ検査の現状

香山翔, 住吉孝行, 浜津良輔, 川崎健夫, 山崎玄太, 他: Double Chooz 実験検出器のシミュレーションを用いた評価

佐久間哲哉, 石川達也, 石川高史, 住吉孝行, 喜多村章一, 他: 二重ベータ崩壊測定器 DCBA T2 の性能

石川達也, 佐久間哲哉, 石川高史, 住吉孝行, 喜多村章一, 他: 二重ベータ崩壊測定器 DCBA T3 の設計と製作

植木泰生, 足立一郎, 飯嶋徹, 池田博一, Samo Korpar, 住吉孝行, 西澤勲, 西田昌平, 宮沢優一, 他: Aerogel RICH 検出器における HAPD 用 ASIC の性能評価

伊部圭介, 近匡, 清水裕, 近重悠一, 荒川葉子, 上條敏生, 千葉雅美, 安田修, 矢吹文昭, 内海倫明, 谷内康, 藤井政俊: 岩塩ニュートリノ検出器の為の超高エネルギーニュートリノと核子の反応断面積

荒川葉子, 千葉雅美, 上條敏生, 中村俊介, 安田修, 矢吹文昭, 伊部圭介, 近匡, 清水裕, 近重悠一, 内海倫明, 谷内康, 藤井政俊: 岩塩ニュートリノ検出器の為の V・UHF 帯における岩塩減衰長の測定

千葉雅美、荒川葉子、上條敏生、中村俊介、安田 修、矢吹文昭、伊部圭介、近 匡、清水 裕、近重悠一、二宮壮介、内海倫明、谷内康行、藤井政俊：岩塩ニュートリノ検出器の為の電子線照射による電波反射実験

日本物理学会第 64 回年次大会 2009 年 3 月 27 日～3 月 30 日（立教大学池袋キャンパス）

遠藤裕介，住吉孝行，久世正弘，松原綱之，今野智之，他：原子炉ニュートリノ振動実験 Double Chooz に用いる 10 "PMT 検査結果の報告

香山翔，住吉孝行，浜津良輔，川崎健夫，山崎玄太，他：Double Chooz 実験のための解析手法の開発

汲田哲郎，植木泰生，住吉孝行，黒田英諒，西田昌平，足立一郎，池田博一，澤藤奈津子，石井良和，椎塚晋：Prototype A RICH 検出器のビームテストの結果報告

黒田英諒，住吉孝行，汲田哲郎，植木泰生，足立一郎，西田昌平，池田博一，石井良和，澤藤奈津子，飯嶋徹，椎塚晋：Aerogel RICH 検出器における HAPD 信号読み出し用 ASIC の開発

石川高史，石川達也，佐久間哲哉，住吉孝行，喜多村章一，他：DCBA による二重ベータ崩壊実験 IX

沼沢栄佑、千葉雅美、荒川葉子、上條敏生、安田修、矢吹文昭、伊部圭介、近匡、清水 裕、近重悠一、内海倫明、平勝良、藤井政俊：岩塩ニュートリノ検出器のための電波反射の岩塩温度依存性

千葉雅美、荒川葉子、上條敏生、安田修、矢吹文昭、沼沢栄佑、伊部圭介、近匡、清水 裕、近重悠一、内海倫明、平勝良、藤井政俊：岩塩ニュートリノ検出器の為の電子線照射による電波反射の温度依存性

荒川葉子，千葉雅美，上條敏生，安田修，矢吹文昭，沼沢栄佑，伊部圭介，近匡，清水裕，近重悠一，内海倫明，平勝良，藤井政俊：岩塩ニュートリノ検出器の為の V・UHF 帯における電波減衰長の精密測定

伊部圭介，近匡，清水裕，近重悠一，荒川葉子，千葉雅美，上條敏生，安田修，矢吹文昭，沼沢栄佑，内海倫明，平勝良，藤井政俊：岩塩ニュートリノ検出器の為の超高エネルギーニュートリノと核子の反応断面積への Boson-gluon fusion 効果

第 69 回応用物理学学術講演会 2008 年 9 月 2 日～9 月 5 日（中部大学）

谷内康行、平勝良、内海倫明、松村義人、千葉雅美、白川利昭、藤井政俊：小型中性子発生装置の開発

平勝良，谷内康行，内海倫明，松村義人，藤井政俊，白川利昭，千葉雅美：金属重水素化物陰極を用いた小型中性子発生装置の開発

第 56 回応用物理学関係連合講演会 2009 年 3 月 30 日～4 月 2 日（筑波大学）

谷内康行、平勝良、内海倫明、松村義人、千葉雅美、白川利昭、藤井政俊：慣性静電閉じ込め核融合を用いた小型中性子発生装置の研究

平勝良、木所敬誠、大野達也、谷内康行、松村義人、千葉雅美、藤井政俊、白川利昭、内海倫明：金属重水素化物陰極を用いた小型中性子発生装置の開発 II

国際会議

The 1st international conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics

Mar. 12-17, 2009 Tsukuba, Japan

T.Sumiyoshi: Development of a gaseous PMT with micro-pattern gas detectors

The 3rd International Workshop on the Acoustic and Radio EeV Neutrino detection Activities

ARENA2008, Rome, Italy, June 25-27, 2008

Masami Chiba, Yoko Arakawa, Toshio. Kamijo, Fumiaki Yabuki, Osamu Yasuda, Yuichi Chikashige, Keisuke Ibe, Tadashi Kon, Yutaka Shimizu, Yasuyuki Taniuchi, Michiaki Utsumi, and Masatoshi Fujii
Radar for Salt Ultra-High-Energy Neutrino Detector and Contribution of W-Gluon Fusion Process to Collision of Neutrinos against Quarks

35th IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS2008), June 15-19, 2008,

University of Karlsruhe, Germany

Y. Taniuchi, K. Taira, M. Utsumi, Y. Matsumura, M. Chiba, M. Fujii

Development of Compact Neutron Generator

4th Vacuum and Surface Sciences Conference of Asia and Australia (VASSCAA-4), Oct. 28-31,

2008, Matsue, Japan

Katsuyoshi Taira, Yasuyuki Taniuchi, Michiaki Utsumi, Yoshihito Matsumura, Masami Chiba, Masatoshi Fujii, Toshiaki Shirakawa

Development of Compact Neutron Generator with Metal Deuteride Cathode

Yasuyuki Taniuchi, Katsuyoshi Taira, Michiaki Utsumi, Yoshihito Matsumura, Masami Chiba, Toshiaki Shirakawa, and Masatoshi Fujii

Development of Compact Neutron Generator

3) 学会誌等

汲田哲郎: レーザーと高エネルギー電子ビームの非線形コンプトン散乱, レーザー研究 **36** (2008) 789-793

原子物理実験サブグループ

1. 研究活動の概要

本年度4月に、イオントラップを駆使したクラスター研究を専門分野としてきた間嶋拓也氏が助教として着任し、スタッフ総数が3名になった。meVからGeVまでの非常に広い衝突エネルギーに亘る原子衝突現象のダイナミクスを原子・分子・結晶などの様々な標的に対して実験的に解明するという本グループの特徴が一層生かされる体制となった。

1) 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）。我々は、HIMAC（放射線医学総合研究所重イオン加速器）から供給される約400 MeV/uの多価重イオンをSi結晶に通過させ、出射イオンの電荷や脱励起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標として実験研究を行ってきた。本年度は、1 μ m厚のSi薄膜結晶による通過原子面の周期性を利用する3D-RCE(3次元RCE)条件下での2重共鳴を昨年度に引き続き展開して、光学的手法では困難であった2重励起状態の選択的生成などを行った。また、生成2次電子測定による共鳴の観測を新しく開始し、励起イオンに関する詳細な情報が得られるようになった。ドイツ・GSI重イオン研究所における分光実験へ向けての準備も行った。

(1) He-like イオンに対する ladder 型 2 重共鳴: 465 MeV/u He-like Ar¹⁶⁺ 1s² \rightarrow 1s2p \rightarrow 2p²

RCEによって、He様重イオンの最内殻軌道にある2つの束縛電子を両方励起し、エキゾチックな中空状態を選択的に生成することを試みた。Ar¹⁶⁺イオンをSi薄膜結晶に入射し、振動結晶電場の2つの周波数成分を同時に利用して2つの束縛電子を連続的に励起させた。結晶透過後の出射イオンの電荷や脱励起X線の観測から2重励起状態の選択的生成に初めて成功したことを確認した。

(2) He-like イオンに対する Λ 型 2 重共鳴: 431 & 433 MeV/u He-like Fe²⁴⁺ 1s² \rightarrow 1s2p \rightarrow 1s2s

平成19年度に、Ar¹⁶⁺イオンの Λ 型2重共鳴実験においてAutler-Townes 2重項の観測に成功し、これによってRCEにおけるラビ周波数の直接観測などが可能になった。本実験では入射イオンをFe²⁴⁺に替えて同様の測定を行い、Ar¹⁶⁺とは異なった共鳴プロファイルを観測した。これは遷移モーメントの大きさやコヒーレンス長の違いから説明される。

(3) He-like イオンに対する 1 重共鳴のコンボイ電子による観測: 416 MeV/u He-like Ar¹⁶⁺ 1s² \rightarrow 1s2p

結晶内における衝突過程で通過イオンから剥がされて生成した2次電子は、イオンとほぼ同じ速度を持って標的前方に放出される(コンボイ電子)。この電子のエネルギー分布は、束縛状態の運動量分布を反映したカスプ構造を持ち、コンプトン・プロファイルと呼ばれる。RCEによって選択的に生成された励起状態のイオンから放出されるコンボイ電子を磁場型アナライザーを使って観測したところ、基底状態からの電子放出に比べて電子収量の増加やエネルギー分布幅の先鋭化が観測された。これにより励起イオンの波動関数に関する情報を得られることが明らかになった。

(4) GSI 重イオン研究所における RCE 実験に向けての準備: 190 MeV/u Li-like U⁸⁹⁺ 2s_{1/2} \rightarrow 2p_{3/2}

ドイツGSI重イオン研究所の施設を利用して、Li-like U⁸⁹⁺における2s_{1/2}から2p_{3/2}への遷移(遷移エネルギー: 約4.5keV)を精密測定することによるQEDテストを目標とした実験をH21年度に予定している。Zが大きくなると短寿命でX線放出して脱励起するため、観測はX線が主となる。ビーム強度、RCE励起確率がともに弱いと予想されることから、高検出効率の測定が必須である。大面積(100mm²)Siドリフト型X線検出器を複数導入し、ペルチエ素子とヒートパイプの組み合わせによる冷却テストを行い動作確認を実施した。またデータ収集系の制御プログラムの開発も行った。

2) 静電型イオン蓄積リングによる原子分子衝突の研究

分子物質化学専攻・城丸グループと共に開発してきた静電型イオン蓄積リング (TMU E-Ring) 実験では、今年度小型分子イオンから大型分子イオンまで正負様々なイオンを取りあつかった。蓄積周回イオンの選別では、周回周期をモニターしながら不要なイオン種をパルス電場を用いて複数回取り除く手法が確立した。その結果、直鎖炭化水素負イオンの識別に成功している。本リングは、蓄積イオンの崩壊に伴う中性粒子強度を周回毎に検出することによって、ミリ秒から秒オーダーまでの遅い過程を追跡できるのが特徴である。そこで寿命測定や波長可変レーザーによる選択的励起を利用して、小型分子イオンの準安定状態に関する研究を本格的に開始した。また自由度の高い色素分子や炭素クラスター分子といった大型イオンの脱励起過程を、やはりレーザーを駆使した崩壊過程の観測から研究してきた。そのために、スウェーデン・イエテボリ大学のグループとの共同研究が進められた。

(1) 直鎖炭化水素負イオンの寿命測定:

昨年度までに観測に成功していた、セシウムスパッタイオン源から引き出した直鎖炭素分子負イオン C_n^- ($n = 2 - 6$) に関して詳細な測定を行った結果、宇宙空間に存在する負分子イオンとして最近注目を集めている、直鎖炭化水素負イオン C_mH^- ($m = 2 - 6$) が同時に蓄積周回されていることを確認した。蓄積中に電子脱離を起こし中性化した粒子を検出することで寿命測定を行った結果、直鎖炭素分子負イオンでは、以前報告されているとおり、 C_2^- , C_3^- , C_5^- でミリ秒程度の寿命を持つ準安定状態の成分が観測され C_4^- , C_6^- ではこの成分は観測されなかった。一方、直鎖炭化水素負イオンでは観測したすべてのイオン種 C_mH^- ($m = 2 - 6$) でミリ秒程度の寿命を持つ準安定状態の成分が観測されるという興味深い結果が得られている。

(2) 酸素分子正イオンの準安定状態の寿命測定およびレーザー分光:

周回蓄積されたイオンに波長可変可視光レーザーを導入して、ある内部状態のイオンのみを選択的に光解離させると、特定の内部状態のイオンの追跡が可能になり、状態選別した寿命測定が可能になる。その最初の例として、 O_2^+ イオンの準安定励起状態 $a^4\Pi_u$ の寿命測定を行った。 $a^4\Pi_u$ 状態はスピン禁制のため 100 ms 以上の長い寿命を持ち、気相イオン反応において重要な役割を担う。これまで、イオントラップを用いた寿命測定などが報告されているが、その値は測定方法によって大きくばらついていた。今回観測された $b^4\Pi_g \leftarrow a^4\Pi_u$ ($\Delta v = 3$) 吸収バンドに対する光解離スペクトルの形状は、イオン蓄積時間に依存して大きく変化している。すなわち、バンド中心部が 100 ms 以内に素早く減衰するのに対し、両端のピークは数 100 ms の寿命でゆっくり減衰している。これは、スピン状態 ($\Sigma = \pm 3/2$ あるいは $\pm 1/2$) に依存した放射寿命の差異によるものと考えられている。さらにこの吸収バンドには、励起波長に依らず数秒オーダーの長寿命成分が存在していることが確認された。

(3) 巨大分子イオンのレーザー分光:

昨年度より孤立状態における巨大分子イオンの分光学的研究の観測対象としているフタロシアニン亜鉛負イオンに関して、輻射冷却過程について検討するため、レーザーとの合流実験におけるイオン崩壊過程のレーザーフルエンス依存性をイオン蓄積開始時からのレーザー導入タイミングを変化させながら測定した。その結果、蓄積時間の経過に伴い多光子吸収の寄与が増大していることが観測され、その依存性から冷却速度やイオンの蓄積内部エネルギーを推定することを試みている。一方で、 C_{60}^- 負イオンを対象として、レーザーの 1 光子吸収に伴うイオン崩壊の時間依存性から蓄積時間の経過に伴う冷却速度の変化を評価することも行った。その他に、マトリックス支援レーザー脱着イオン化法で生成したメチレンブルー正イオンのレーザー分光を行った。水中の吸収スペクトルと比較すると、吸収帯の波長領域がほぼ同じであるものの、水中では極大吸収波長が大きく赤方偏移していることが確認された。

3) 低温ヘリウム気体中のイオン移動度

希薄な気体中におけるイオン移動度は、イオンと気体分子の間に働く相互作用ポテンシャルに非常に敏感であるため、粒子間ポテンシャルの決定手段として昔から活用されている。我々は液体窒素によって 77 K、液体ヘリウムによって 4.2 K にまで冷却したヘリウム気体の中でのイオン移動度を測定できる世界で唯一の装置を開発して、これまでに様々な種類のイオンについて移動度の測定を行ってきた。

昨年度までにイオン源を主真空槽とは別の容器に移すことで、冷却された移動管に試料ガスが付着することを避けるための改造を行ってきた。今年度は、廃棄された質量分析装置のイオン化箱を改造することで、新たな電子衝撃型イオン源を製作した。このイオン源では永久磁石によって電子ビームを細く絞り、イオン化領域の体積を小さくすることで、イオンビームの初期ビーム径を狭める工夫がなされている。開発したイオン源を用いて、 N_2 ガスだけでなく常温では液体であるメタノール (CH_3OH) を用いた予備実験を行い、蒸気圧が十分にある液体試料であれば、移動度の測定が可能な強度のイオンを生成できることを確認した。このイオン源を用いて、 OH^+ (液体試料: H_2O)、 CCl^+ (同: CCl_4)、など、電気双極子モーメントを持つ分子イオンに関する移動度の測定を行い、これまでにやってきた他の分子イオンの測定結果との比較を行っていく計画である。

4) 多価イオンの電荷交換分光

(1) 半導体リソグラフィーに関連した多価 Sn イオンの研究：

次世代半導体製造技術として波長 13.5 nm の極端紫外 (EUV) 光を用いたリソグラフィーが開発されており、そのために Sn を用いたプラズマ光源が精力的に研究されている。しかしながら、EUV 領域での発光に寄与している多価 Sn イオンに関しては、エネルギー準位・遷移波長・遷移確率といった原子分光学的データが殆ど報告されていない。そこで 2003 年度より阪大レーザー研を中心に文部科学省リーディングプロジェクト「極端紫外 (EUV) 光源等の先進半導体製造技術の実用化」が立ち上がり、我々も再委託研究として多価イオンの電荷交換分光実験を開始した。これは電子サイクロトロン共鳴型イオン源を用いて多価イオンを生成し、これを電場によって引き出した後に磁場によって価数を選別して衝突実験槽に導き、標的気体と衝突させて電荷移行反応によって生成した励起状態からの発光を観測するものである。

昨年度、40-170 nm の波長領域について 3-6 価の Sn イオンを用いた電荷交換分光測定を行った。2-4 価イオンについてはエネルギー準位に関する文献データとの照合によって殆どの発光ラインが判明したが、5 価イオンについては全く報告がなかったため遷移の同定を行うことができなかった。そこで今年度、相対論的原子計算コードである GRASP によるエネルギー準位と遷移波長の計算を行った。その結果、5 価イオンからの 40-170 nm 領域における発光は主量子数 $n = 5, 6$ の励起状態間の遷移であることが明らかになった。

(2) 天体物理学に関連した多価 Fe イオンの研究：

今年度は多価 Fe イオンについても、電荷交換分光の実験を行った。太陽の表面温度は約 6000 K であるが、表面に現れるコロナは 10^6 K 以上にも達する。このコロナを加熱する機構は未だに解明されておらず、2006 年に打ち上げられた太陽観測衛星“ひので”による主要な研究テーマとなっている。“ひので”には 17-29 nm の EUV 領域の撮像分光装置が搭載されている。これはコロナにおける多価 Fe イオンなどの発光を観測するためのものである。Fe イオンに関するデータはかなり蓄積されてはいるが、その殆どは基底状態への遷移に関するものばかりであり、励起状態間遷移についてのデータは乏しい。そこで他の手法では観測困難な遷移を発見することを目的に、6-16 価の Fe イオンを入射イオンとして EUV 領域での電荷交換分光スペクトルを測定した。標的気体としては、2 電子系である He および H_2 を用いた。その結果、これまでに報告されていない数百本のラインが観測され、新しい Fe の原子分光データとして貴重なものと考えて解析を進めている。

2. 研究業績

1) 論文

Y. Nakano, C. Kondo, A. Hatakeyama, Y. Nakai, T. Azuma, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada, T. Murakami : “Polarization control in three-dimensional resonant coherent excitation”, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 085502 (2009).

Y. Nakai, Y. Nakano, T. Azuma, A. Hatakeyama, C. Kondo, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada, T. Murakami : “Dressed atoms in flight through a periodic crystal field: X-VUV double resonance”, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 113201 (2008).

M. Goto, M. Togawa, S. Jinno, T. Takao, J. Matsumoto, H. Shiromaru, Y. Achiba, H. Tanuma, T. Azuma : “Absorption spectra of zinc phthalocyanine anions under radiative cooling”, *Chem. Phys. Lett.* **460**, 46-49 (2008).

S. Matoba, H. Tanuma, and K. Ohtsuki : “Mobility of the metastable C^+ ion in cooled He gas at 77 and 4.3 K”, *J. Phys. B* **41**, 145205 (2008).

K. Nishihara, A. Sunahara, A. Sasaki, M. Nunami, H. Tanuma, S. Fujioka, Y. Shimada, K. Fujima, H. Furukawa, T. Kato, F. Koike, R. More, M. Murakami, T. Nishikawa, V. Zhakhovskii, K. Gamata, A. Takata, H. Ueda, H. Nishimura, Y. Izawa, N. Miyanaga, and K. Mima : “Plasma physics and radiation hydrodynamics in developing an extreme ultraviolet light source for lithography”, *Phys. of Plasmas*, **15**, 056708 (2008).

Y. Izawa, K. Nishihara, H. Tanuma, A. Sasaki, M. Murakami, A. Sunahara, H. Nishimura, S. Fujioka, T. Aota, Y. Shimada, M. Yamaura, M. Nakatsuka, H. Fujita, K. Tsubakimoto, H. Yoshida, N. Miyanaga, and K. Mima : “EUV light source by high power laser”, *J. Phys. Conf. Ser.* **112**, 04207 (2008).

A. Sasaki, A. Sunahara, K. Nishihara, T. Nishikawa, F. Koike, and H. Tanuma : “Detailed atomic modeling of Sn plasmas for the EUV source”, *J. Phys. Conf. Ser.* **112**, 042062 (2008).

A. Terasaki, T. Majima, C. Kasai, and T. Kondow : “Photon-trap spectroscopy of size-selected free cluster ions: “Direct” measurement of optical absorption of Ag^{9+} ”, *Eur. Phys. J. D* **52**, 43-46 (2009).

T. Mizuno, H. Tsuchida, T. Majima, Y. Nakai, and A. Itoh : “Multiple ionization of C_{60} by fast Si^{q+} ions”, *Phys. Rev. A* **78** 053202 (2008).

2) 学会講演

ナノ学会第6回大会, 2008年5月7日~9日 (九州大学, 福岡市)

寺寄亨, 間嶋拓也, 笠井千晴, 近藤保 : フォトントラップ分光法によるサイズ選別された孤立クラスターイオンの光吸収「直接」測定

第54回質量分析総合討論会シンポジウム「新たな質量分析を切り開くイオン反応」
2008年5月14日~16日 (つくば国際会議場エポカル)

東俊行 : 静電型蓄積リングを用いた原子・分子イオン冷却ダイナミクスの観測

第 24 回化学反応討論会, 2008 年 6 月 2 日 ~ 4 日 (北海道大学, 札幌市)

寺寄亨, 間嶋拓也, 笠井千晴, 近藤保 : イオントラップに捕捉したサイズ選別クラスターの超高感度分光

第 5 回原子・分子・光科学 (AMO) 討論会, 2008 年 6 月 13 日 ~ 14 日 (首都大学東京, 八王子市)

東俊行 : オコロコフ効果を利用した原子物理

須田慎太郎 : 多価 Sn イオンの真空紫外領域における電荷交換分光

中野祐司 : 結晶場による多価重イオンのコヒーレント量子操作

松本淳, 後藤基, 高雄智治, 外川茉実, 神野智史, 間嶋拓也, 田沼肇, 東俊行, 城丸春夫 : TMU E-ring を用いた負イオン蓄積実験の現状

原子衝突研究協会第 33 回研究会, 2008 年 8 月 5 日 ~ 7 日 (北海道大学, 札幌市)

橋本公瑛, 小泉哲夫, 小島隆夫, 田沼肇, 城丸春夫, 清水敏夫 : カイラル分子クラスターイオンの移動度

間嶋拓也, 寺寄亨, 笠井千晴, 近藤保 : イオントラップと光共振器を利用したクラスターイオンの超高感度分光

河東礼子, 間嶋拓也, 東俊行 : TMU E-ring のためのエレクトロスプレーイオン化源 (ESI) の開発

松本淳, 後藤基, 座間優, 大月聡子, 間嶋拓也, 田沼肇, 東俊行, 城丸春夫 : TMU E-ring で蓄積した炭素クラスター負イオンの準安定状態の寿命

後藤基, 座間優, 兒玉健, 松本淳, 城丸春夫, 阿知波洋次, 間嶋拓也, 田沼肇, 東俊行 : TMU E-ring におけるフラーレン負イオンの輻射冷却

的場史朗, 田沼肇, 大槻一雅 : 移動管法における量子効果の観測

山田充子, 奥野和彦, 松本淳, 城丸春夫, 阿知波洋次 : スプレー型イオン源で生成した負イオンの光電子脱理

目時健一, 中野祐司, 高野靖史, 畠山温, 中井陽一, 東俊行, 小牧研一郎, 山崎泰規, 高田栄一, 村上健 : コヒーレント共鳴励起による Fe^{24+} イオンの 2 重共鳴

中野祐司, 目時健一, 高野靖史, 畠山温, 中井陽一, 東俊行, 小牧研一郎, 山崎泰規, 高田栄一, 村上健 : 結晶場による高速イオンのコヒーレント量子操作

大橋隼人, 須田慎太郎, 田沼肇, 藤岡慎介, 西村博明, 西原功修 : 真空紫外領域における多価 Sn イオンの電荷交換分光

日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 20 日 ~ 23 日 (岩手大学, 盛岡市)

須田慎太郎, 大橋隼人, 田沼肇, 藤岡慎介, 西村博明, 西原功修 : 多価 Sn イオンの電荷移行衝突 V

松本淳, 高雄智治, 後藤基, 神野智史, 間嶋拓也, 田沼肇, 東俊行, 城丸春夫 : TMU E-ring を用いた炭素負イオンクラスターの準安定状態の寿命測定

橋本公瑛, 小泉哲夫, 小島隆夫, 田沼肇, 城丸春夫, 清水敏夫 : カイラル分子クラスターイオンの混合気体中の移動度

目時健一, 中野祐司, 東俊行, 高野靖史, 畠山温, 中井陽一, 小牧研一郎, 山崎泰規, 高田栄一, 村上健 : 3次元コヒーレント共鳴励起 (3D-RCE) による Fe^{24+} イオンの2重共鳴

高野靖史, 中野祐司, 目時健一, 池田時浩, 金井保之, 東俊行, 山崎泰規, D. Dauvergne, R. Schuch, H. Braeuning, Th. Stoehlker : コヒーレント共鳴励起による U^{89+} イオンの精密分光計画

第2回分子科学討論会, 2008年9月24日~27日 (福岡国際会議場, 福岡市)

間嶋拓也, 寺寄亨, Gabriele Santambrogio, 笠井千晴, 近藤保 : 空間電荷効果による八極子線形イオントラップ内蓄積イオン分布の不均一性

寺寄亨, 間嶋拓也, 笠井千晴, 近藤保 : フォトントラップ法によるサイズ選別クラスターイオンの光吸収分光 : 光解離に依らない直接測定

笠井千晴, 間嶋拓也, 寺寄亨, 築山光一, 近藤保 : イオントラップを用いた銀クラスターイオンの光吸収分光 : 光減衰の直接測定と光解離測定

後藤基, 座間優, 兒玉健, 松本淳, 城丸春夫, 阿知波洋次, 間嶋拓也, 田沼肇, 東俊行 : レーザー分光によるフラーレン負イオンの輻射冷却の研究

首都大学東京・物理学教室談話会, 2008年12月12日 (首都大学東京)

東俊行 : 結晶周期場中を飛ぶ高速原子 X線レーザーのライバル?

原子分子データ応用フォーラムセミナー, 2008年12月17-18日 (核融合科学研究所, 土岐市)

田沼肇 : 気体中のイオン移動度

平成20年度核融合科学研究所共同研究「プラズマ分光診断と原子分子素過程の最先端」研究会
2009年1月15-16日 (核融合科学研究所, 土岐市)

田沼肇 : 多価イオンの電荷交換分光

第36回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム, 2009年3月2日~4日 (名城大学, 名古屋市)

城丸春夫, 後藤基, 兒玉健, 松本淳, 阿知波洋次, 間嶋拓也, 田沼肇, 東俊行, A.E.K. Sunden, K. Hansen : 静電リングに蓄積した C_{60}^- のレーザー合流実験

第89回日本化学会春季年会, 2009年3月27日~30日 (日本大学, 船橋市)

寺寄亨, 笠井千晴, 間嶋拓也, 近藤保 : フォトントラップ法による気相クラスターイオンの光吸収分光 : 光減衰の直接測定

松本淳, 後藤基, 座間優, 川口瑛司, 大月聡子, 間嶋拓也, 田沼肇, 東俊行, 城丸春夫, 阿知波洋次 : 静電型イオン蓄積リングを用いた直鎖炭素分子および炭化水素負イオンの準安定状態の寿命測定

日本物理学会2009年春季大会, 2009年3月27日~30日 (立教大学, 豊島区)

寺寄亨, 間嶋拓也, 笠井千晴, 近藤保 : フォトントラップ法による孤立クラスターイオンの光吸収分光 : 光解離によらない光減衰の直接測定

間嶋拓也, 花田勝彦, 後藤基, 川口瑛司, 大月聡子, 松本淳, 城丸春夫, 田沼肇, 東俊行 : TMU E-ring を用いた O_2^+ イオン準安定状態の寿命測定

目時健一, 中野祐司, 寺田正裕, 高野靖史, 畠山温, 中井陽一, 東俊行, 小牧研一郎, 山崎泰規, 高田栄一, 村上健 : コンボイ電子による 3 次元コヒーレント共鳴励起の観測

須田慎太郎, 大橋隼人, 田沼肇, 藤岡慎介, 西村博明, 西原功修, 小池文博 : 多価 Sn イオンの電荷移行衝突 VI

大橋隼人, 須田慎太郎, 田沼肇, 藤岡慎介, 西村博明, 西原功修 : 極端紫外領域における多価 Fe イオンの電荷交換分光

国際会議

Sakura Workshop (International Workshop on Materials & Life Science using nuclear probes from high-energy accelerators), RIKEN, Wako, Japan, April 1-3, 2008

T. Azuma : Atomic resonant coherent excitation of heavy ions in crystals

7th International Symposium Swift Heavy Ions in Matter (SHIM2008), Lyon, France, June 2-5, 2008

T. Azuma : Atomic resonant coherent excitation in crystals

The 21st International Conference on Atomic Physics (ICAP2008), Connecticut, USA, July 27 - August 1, 2008

Y. Nakano, T. Azuma, A. Hatakeyama, Y. Nakai, C. Kondo, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada, T. Murakami : Dressed state formation by periodic crystal fields

The 23th International Conference on Atomic Collisions in Solids (ICACS23), Phalaborwa, South Africa, August 17-22, 2008

T. Azuma : Coherent excitation of heavy ions penetrating through crystals

14th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions (HCI 2008), Chofu, Japan, September 1-5, 2008

Y. Nakano, T. Inoue, T. Azuma, A. Hatakeyama, Y. Nakai, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada, T. Murakami : Selective formation of multiply excited states by resonant coherent excitation (selected talk)

S. Suda, H. Ohashi, H. Tanuma, S. Fujioka, H. Nishimura, and K. Nishihara : Vacuum ultraviolet spectra in charge transfer collisions of multiply charged Sn ions

H. Ohashi, S. Suda, H. Tanuma, S. Fujioka, H. Nishimura, K. Nishihara, T. Kai, A. Sasaki, H.A. Sakaue, N. Nakamura, and S. Ohtani : Complimentary spectroscopy of tin ions by using ion beams and electron beams

14th International Symposium on Small Particles and Inorganic Clusters (ISSPIC XIV),
Valladolid, Spain, September 15-19, 2008

T. Majima, A. Terasaki, C. Kasai, and T. Kondow : Optical absorption spectroscopy of Ag^{9+} stored in an ion trap: “Direct” vs. photodissociation measurements

A. Terasaki, T. Majima, C. Kasai, and T. Kondow : Photon-trap spectroscopy of size-selected cluster ions : “Direct” measurement of optical absorption

M. Goto, T. Kodama, J. Matsumoto, H. Shiromaru, Y. Achiba, T. Majima, H. Tanuma, T. Azuma : Measurement of absolute cooling rates of fullerene ions in an electrostatic storage ring

A.E.K. Sunden, M. Goto, J. Matsumoto, H. Shiromaru, H. Tanuma, T. Azuma, J.U. Andersen, S.E. Canton, K. Hansen : Vis/near-IR excitation spectra of laser desorbed C_{60}^-

International Conference on Atomic Data and their Applications (ICAMDATA 06),
Beijing, China, October 28-31, 2008

H. Ohashi, S. Suda, H. Tanuma, S. Fujioka, H. Nishimura, A. Sasaki, and K. Nishihara : Charge exchange spectroscopy of Sn^{q+} ($q = 6 - 21$)

S. Matoba, H. Tanuma, and K. Ohtsuki : Elastic cross sections for ion-He collisions at meV

The 8th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics (AISAMP 8),
Perth, Australia, November 24-28, 2008

H. Tanuma : Ion mobility measurements for metastable ions in cooled helium gas

S. Suda : Charge exchange spectroscopy in collisions of multi-charged Sn ions with rare gases

Symposium on Size Selected Clusters 2009 (S3C 2009), Brand, Austria, March 8-13, 2009

A. Terasaki, C. Kasai, T. Majima, and T. Kondow : Optical absorption spectra of trapped silver cluster ions measured “directly” by photon-trap spectroscopy

3) 学会誌等

寺寄亨, 間嶋拓也, 江頭和宏, 近藤保 : “共振器に閉じ込めた光を利用する超高感度分光 : 光吸収・磁気光学効果・光ポンピング”, 日本物理学会誌, **63** 702-706 (2008).

寺寄亨, 間嶋拓也, 近藤保 : “イオントラップと光共振器を利用した超高感度イオン分光法の開発”, 原子衝突研究協会誌「しょうとつ」, **5** (4), 3-10 (2008).

西原功修, 砂原淳, 佐々木明, 田沼肇, 小池文博, 藤岡慎介, 西村博明, 島田義則 : “極端紫外光源の原子モデルと最適設計”, レーザー研究, **36**, 690-699 (2008).

宇宙物理実験サブグループ

1. 研究活動の概要

「すざく」衛星は順調に軌道上で観測を続けており、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 が、2013年の打ち上げを目指して正式プロジェクトとしてスタートした。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予備試験を進めた。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 検出器は軟X線領域でのエネルギー分解能がすぐれているため、酸素からマグネシウムに至る元素の存在量を精度よく決定できる。銀河団の周辺部などの低温・低密度領域についても高い感度をもっている。赤方偏移 $z = 0.143$ にある銀河団 Abell 1413 の解析を詳細に行ない、ビリアル半径（銀河団が熱化している領域の限界）までの輝度と温度を決めた（図1）。ガスの温度が銀河団周辺部では、中心付近の $1/2 \sim 1/3$ までも低下することがはっきりした。この結果を、NFW モデルに立脚した非等温平衡状態のモデルと比較した。その結果、現在のモデルでは銀河団全体について密度と温度をよく合わせるの難しいことがわかった。これをもとにビリアル半径までの重力質量を今までより高い信頼度で求めることができた。

この他に、AWM 7 銀河団の周辺部（ビリアル半径の 0.75 倍）も「すざく」で観測し、大構造フィラメントに沿う方向の重元素量が、フィラメントに直角な方向より多いという兆候を得た。これは、銀河形成効率がフィラメント上では特に高くなっている可能性を示唆するもので、より詳しい解析を進めている。

ダークバリオンである中高温の銀河間物質を、銀河団周辺や超銀河団領域で探す研究も進めた。Shapley 超銀河団（赤方偏移 $z = 0.043$ ）中の軟X線超過領域を「すざく」で観測し、酸素の輝線が強いことを確認した。ただ赤方偏移は統計的に 0 からのずれを言うのは難しく、引続き解析を進めている。また高温銀河団 A2142（赤方偏移 $z = 0.091$ ）のビリアル半径領域の観測結果についても、ガスの温度や赤方偏移した酸素輝線の上限值を求めている。

星生成銀河 NGC 4631 から流出するガスを「すざく」で観測し、ガスが銀河円盤から 10 kpc もの範囲に広がっていることを確認し、特に広がったガスの組成は II 型超新星のものと良く合うことが分かった。これは、主に重い星の超新星爆発で作られたガスが銀河から流出する、という描像を支持する結果である。

2) 「すざく」による激変星の観測

自転周期が 33.08 秒の強磁場激変星 AE Aqr では、数千秒の間隔でフレアが起きているが、このフレアの最中に硬X線パルスが強くなっていることを発見した。何らかの爆発現象に伴って粒子加速が起きているものと考えられる。「すざく」のデータを詳細に解析した結果、矮新星 SS Cyg では、静穏時は古典的な境界層からX線が発生しているのに対し、爆発時には降着円盤の上でできたコロナがX線線の発生源になっていることを初めて突き止めた。この結果は日本天文学会欧文研究報告に掲載された。

3) 「すざく」による惑星の観測

「すざく」による木星の観測データを解析した。観測は太陽活動の極小期に行なわれたもので、木星X線が太陽風や太陽X線強度とどのように関連するかを調べる上で興味深い。木星からのX線強度を、XMM-Newton の結果と比較した所、約半分に減少しており、太陽風の減少率とよく関連することがわかった。

一方、1–5 keV の X 線放射は、power-law スペクトルで現される非熱的なもので、その広がりが木星半径の 6 倍程の領域に広がることを発見した。放射過程としては逆コンプトン放射の可能性が高い。これは木星磁気圏での粒子加速が広い範囲に及んでいることを示すものであり、惑星磁気圏の成立ちを知る上で極めて重要な結果である。

4) TES 型カロリメータの開発

将来の X 線天文衛星への搭載を目指し、JAXA 宇宙研等との共同で TES (Transition Edge Sensor) 型カロリメータの開発を進めている。最終目標は ~ 2 eV のエネルギー分解能と数 100 ピクセルからなる多ピクセルアレイである。宇宙研に DRIE 装置が入り、首都大-宇宙研だけで速いサイクルで素子製作を進めることが可能になった。現在、しわの無いメンブレン構造を作成出来るよう条件出しを進めているところである。性能試験では、複素インピーダンスを用いて TES の熱的・電気的特性を評価する測定法が整備され、エネルギー分解能を制限する原因として phonon 的なノイズが強いことがはっきりした。カロリメータの改善等を施した結果、単素子でのエネルギー分解能は 3.5 eV まで上昇し、世界記録 (1.8 eV) へ大きく近づいた (図 2)。一方、256 素子の TES カロリメータも X 線吸収体の無い状態で性能試験が繰り返され、エネルギー分解能は 4.4 eV と大幅な改善がみられた。また、イタリアとの二国間協力が開始され、修士 2 年の赤松が 6 週間ローマの宇宙物理学機関に滞在し、TES 開発の共同実験を行なった。

5) 断熱消磁冷凍器の開発

TES カロリメータの動作環境として、コンパクトかつ温度精度の高い断熱消磁冷凍器 (ADR) の開発を行なっている。宇宙研で開発中の 2 段式 ADR の冷却試験を行ない、約 $10 \mu\text{K}$ の温度安定度が得られることを確認した。一方、ADR の信頼性を高めるため新しいヒートスイッチの設計と製作を、国立天文台との共同で進めた。これはオン/オフの間の熱伝導率の比を大きく取りながら、機械的にもしっかりした構造を持つもので、試作品の製作までが行なわれた。また、物質材料研究機構、NASA/GSFC と協力して、連続型 ADR (cADR) に TES カロリメータと SQUID 電流計を組み込んで動作させる実験を行なった。その結果、27 時間以上 120 mK の極低温を連続して保持し、世界で初めて cADR と組み合わせて TES カロリメータを動作させることに成功した。

6) Astro-H へ向けた作業

2013 年の打ち上げをめざす Astro-H に搭載されるマイクロカロリメータ (SXS) の開発へ向けて、さまざまな検討を行なった。液体ヘリウムと機械式冷凍機が併用されるが、超流動ヘリウムの流出を阻止するための対策が必要である。Si の微細加工技術を応用し、超流動表面流を止めるナイフエッジデバイスを試作し、原子レベルの鋭いエッジを持つことを確かめた。これを含めたヘリウム排気系の試験を進めていく。また、Space Wire という新しい規格のもとで、SXS 信号を処理するためのデジタル系の設計も、埼玉大、宇宙研、NASA/GSFC、三菱重工業、NEC とともに進めた。

また、大橋がサイエンスチームのまとめ役となり、サイエンス面からいろいろな検討を行なった。日米欧からなるサイエンス検討チームが選出され、カロリメータで追求するサイエンスや、それを補強する CCD のためのミラーの設計などに関して議論を行なった。

7) 超軽量 X 線光学系の開発

次世代の宇宙 X 線望遠鏡には、従来の鏡に比べ 1 桁以上軽い軽量性と秒角の角度分解能が求められる。我々は、宇宙研、産総研、東北大、立命館大、フロリダ大と共同で、マイクロマシン技術を用いた独自のマイクロポアオプティクス (微細な穴の光学系) 開発を進めている。マイクロマシン技術を用いて μm スケールの微細な穴を、数百 μm の薄い基板に開け、その側壁を X 線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、しかも一度のプロセスで穴を大量に開けることで、鏡製作

を大量生産することができる。我々はシリコンドライエッチングと X 線 LIGA を用いた新たな手法を考案し合わせて 2 件の関連特許を出願した。今年度は第一段階として、(1) X 線反射の実証、(2) 可視光での結像の実証、を目指して、開発を進め、どちらも世界で初めて成功させた。開発の経過は、立命館大学や次世代望遠鏡の国際会議で招待講演を行い報告した他、天文学会、応用物理学会などで大学院生が発表を行った。また H21 年度の光学系およびマイクロマシン系の国際会議に口頭発表 4 件、ポスター発表 2 件が採択されている。

8) 高い空間分解能を有する X 線望遠鏡の開発

前年度に引続き「薄板多重積層型 X 線望遠鏡」の高解像度化に取り組んだ。昨年度までに、望遠鏡内部での反射鏡の位置決め誤差を 0.55 分角まで改善し、角度分解能に対して無視できるレベルまで抑え込むことに成功したので、今年度は反射鏡そのものの形状を改善すること、および、反射鏡を多数製作し、実用に耐える有効面積を持つ望遠鏡を組み上げることを目標に研究を進めた。反射鏡の性能向上には幾多の紆余曲折があったが、最終的には長めに作ったものの両端を切り落とすことで目標性能（望遠鏡に組み込んだときの角分解能に換算して 0.8 分角相当）を達成した。望遠鏡に組み込む際には、反射鏡を 200 枚程度製作し、ここから性能の良い 80 枚を選ぶことで、40 シェルの Wolter-I 型光学系からなる X 線望遠鏡を製作した。この望遠鏡を宇宙研の 30m ビームラインで評価したところ、全体の角分解能は 1.08 分角、昨年度までと同様に 10 シェルでみた場合には 0.89 分角（昨年度は 1.47 分角）と、目標の 1 分角をほぼ達成することができた。

以上のような Al フォイルを基板として用いる鏡の開発と平行して、薄くフラットなシリコン基板を高温塑性変形で曲げて作る新しい高分解能 X 線望遠鏡の開発に東北大 金材研と共同で着手した。今年度は、高温塑性変形のさまざまな条件（温度、圧力など）を試し、X 線反射に必要な表面粗さと形状を両立するような条件を探した。変形形状としては、スタンダードな球面変形 ($R = 1 \text{ m}$) とし、表面粗さが $< 1 \text{ nm}$ と変形前後でほとんど変わらない条件を出し、変形後の基板での X 線全反射に世界で初めて成功した。一方、変形精度は将来の大型衛星 IXO に必要な $< 1 \mu\text{m}$ に及ばないことも分かったため、引き続き変形条件および基板選定を進め、最終的には角度分解能 0.1 ~ 0.2 分角程度を目指す。

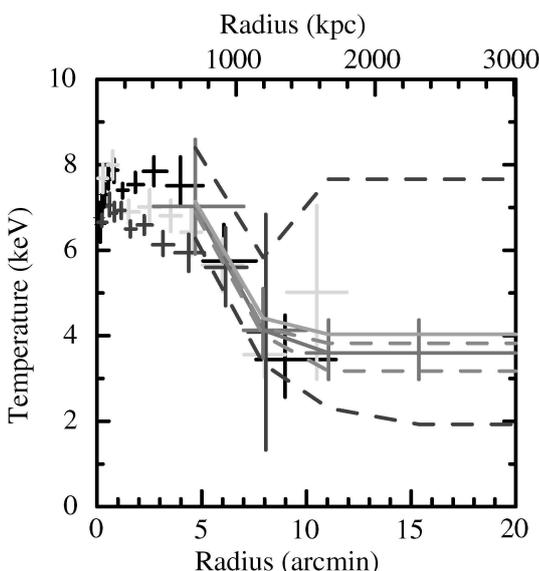


図 1: 銀河団 A1413 の温度分布。最も外側（ピリアル半径に相当）まで温度を決めたのが「すざく」で、Chandra と XMM-Newton による内側領域の温度も合わせて示しており、点線で示される範囲は系統誤差で決まる温度範囲。

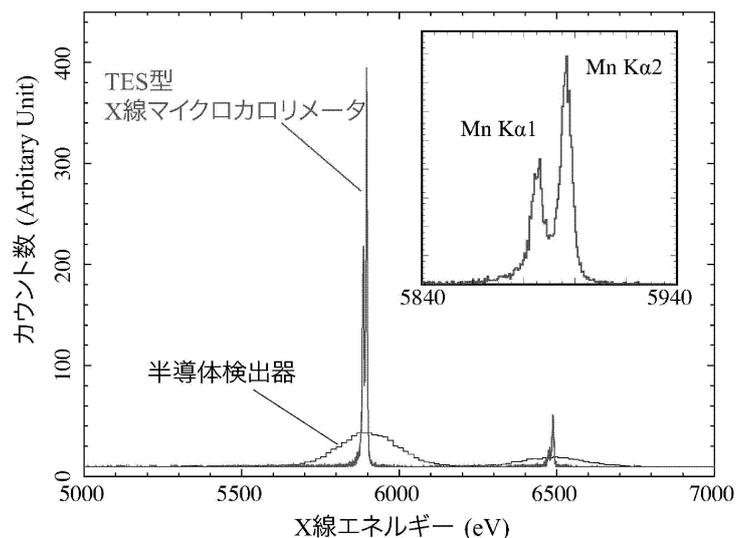


図 2: 単素子の TES カロリメータにより、6 keV の X 線に対するエネルギー分解能 3.5 eV が達成された。これは世界記録の 1.8 eV に迫る結果である。

9) 次期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、宇宙の大構造を非常に良くトレースして分布すると考えられているが、まだその全貌はほとんどわかっていない。これを酸素の輝線 (O_{VII} , O_{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 2015 年頃の打ち上げを目指して提案してきた。ハードウェアとしては 256 素子 TES カロリメータと 4 回反射 X 線望遠鏡 (名大担当) が用いられる。また、DIOS をスケールアップし、線バーストの X 線残光を光源として、銀河間物質による吸収線も見られる機能を追加した衛星 Xenia を、早ければ 2018 年頃の打ち上げを目指して、米、オランダ、イタリアとの協力で米国の Decadal Survey に提案している。

さらに、2020 年以降の打ち上げを目指す、世界規模の大型ミッション IXO (International X-ray Observatory) の検討も、Decadal Survey への提案を目指して急ピッチで進められた。大橋が日本のサイエンス検討チームのまとめ役となり、Decadal 委員会からの要求に対して、提案文書のサイエンス部分の作成、さまざまなサイエンスの検討資料の整備、IXO ワークショップのプログラム作成などを行なった。

2. 研究業績

1) 論文

Y. Terada, T. Hayashi, M. Ishida, K. Mukai, T. Dotani, S. Okada, R. Nakamura, S. Naik, A. Bamba, K. Makishima: Suzaku Discovery of Hard X-Ray Pulsations from a Rotating Magnetized White Dwarf, AE Aquarii, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **60** (2008) pp.387–397

Y. Takei, E.D. Miller, J.N. Bregman, S. Kimura, T. Ohashi, K. Mitsuda, T. Tamura, N.Y. Yamasaki, R. Fujimoto: The Lack of Strong O-Line Excess in the Coma Cluster Outskirts from Suzaku, *The Astrophysical Journal* **680** (2008) pp.1049–1052

T. Tamura, K. Mitsuda, Y. Takei, N.Y. Yamasaki, A. Itoh, K. Hayashida, J.P. Henry, H. Kunieda, K. Matsushita, T. Ohashi: Suzaku Observations of the Cluster of Galaxies Abell 2052, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **60** (2008) pp.695–705

M. Ozawa, H. Uchiyama, H. Matsumoto, H. Nakajima, K. Koyama, T.G. Tsuru, M. Uchino, H. Uchida, K. Hayashida, H. Tsunemi, H. Mori, A. Bamba, M. Ozaki, T. Dotani, T. Kohmura, Y. Ishisaki, H. Murakami, T. Kato, T. Kitazono, Y. Kimura, K. Ogawa, S. Kawa: Energy-Scale Calibration of the Suzaku X-Ray Imaging Spectrometer Using the Checker Flag Charge-Injection Technique in Orbit, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **61** (2009) pp.S1–S7

H. Uchiyama, M. Ozawa, H. Matsumoto, T.G. Tsuru, K. Koyama, M. Kimura, H. Uchida, H. Nakajima, K. Hayashida, H. Tsunemi, H. Mori, A. Bamba, M. Ozaki, T. Dotani, D. Takei, H. Murakami, K. Mori, Y. Ishisaki, T. Kohmura, G. Prigozhin, S. Kissel: New CTI Correction Method for Spaced-Row Charge Injection of the Suzaku X-Ray Imaging Spectrometer, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **61** (2009) pp.S9–S15

M. Ishida, S. Okada, T. Hayashi, R. Nakamura, Y. Terada, K. Mukai, K. Hamaguchi: Suzaku Observations of SS Cygni in Quiescence and Outburst, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **61** (2009) pp.S77–S91

- Y. Ezoe, K. Hamaguchi, R. A. Gruendl, Y.H. Chu, R. Petre, M. F. Corcoran: Suzaku and XMM-Newton Observations of Diffuse X-Ray Emission from the Eastern Tip Region of the Carina Nebula, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **61** (2009) pp.S123–S136
- S. Yamauchi, K. Ebisawa, Y. Tanaka, K. Koyama, H. Matsumoto, N. Y. Yamasaki, H. Takahashi, Y. Ezoe: Iron Emission Lines on the Galactic Ridge Observed with Suzaku, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **61** (2009) pp.S225–S232
- N.Y. Yamasaki, K. Sato, I. Mitsuishi, T. Ohashi: X-Ray Halo around the Spiral Galaxy NGC 4631 Observed with Suzaku, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **61** (2009) pp.S291–S298
- M. Komiyama, K. Sato, R. Nagino, T. Ohashi, K. Matsushita: Suzaku Observations of Metallicity Distribution in the Intracluster Medium of the NGC 5044 Group, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **61** (2009) pp.S337–S352
- K. Sato, K. Matsushita, Y. Ishisaki, N.Y. Yamasaki, M. Ishida, T. Ohashi: Suzaku Observation of Group of Galaxies NGC 507: Temperature and Metal Distributions in the Intra-Cluster Medium, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **61** (2009) pp.S353–S363
- N. Kawano, Y. Fukazawa, S. Nishino, K. Nakazawa, T. Kitaguchi, K. Makishima, T. Takahashi, M. Kokubun, N. Ota, T. Ohashi, N. Isobe, J.P. Henry, A. Hornschemeier: Constraint of Non-Thermal X-Ray Emission from the On-Going Merger Cluster Abell 3376 with Suzaku, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **61** (2009) pp.S377–S386
- L. Piro, J.W. den Herder, T. Ohashi, L. Amati, J. L. Atteia, S. Barthelmy, M. Barbera, D. Barret, S. Basso, M. Boer, S. Borgani, O. Boyarskiy, E. Branchini, G. Branduardi-Raymont, M. Briggs, G. Brunetti, C. Budtz-Jorgensen, D. Burrows, S. Campana, E. Caroli, G. Chincarini, F. Christensen, M. Cocchi, A. Comastri, A. Corsi, V. Cotroneo, P. Conconi, L. Colasanti, G. Cusumano, de A. Rosa, M. Del Santo, S. Etti, Y. Ezoe, L. Ferrari, M. Feroci, M. Finger, G. Fishman, R. Fujimoto, M. Galeazzi, A. Galli, F. Gatti, N. Gehrels, B. Gendre, G. Ghirlanda, G. Ghisellini, P. Giommi, M. Girardi, L. Guzzo, F. Haardt, I. Hepburn, W. Hermsen, H. Hoovers, A. Holland, in't J. Zand, Y. Ishisaki, H. Kawahara, N. Kawai, J. Kaastra, M. Kippen, P.A.J. de Korte, C. Kouveliotou, A. Kusenko, C. Labanti, R. Lieu, C. Macculi, K. Makishima, G. Matt, P. Mazzotta, D. McCammon, M. Méndez, T. Mineo, S. Mitchell, K. Mitsuda, S. Molendi, L. Moscardini, R. Mushotzky, L. Natalucci, F. Nicastro, P. O'Brien, J. Osborne, F. Paerels, M. Page, S. Paltani, G. Pareschi, E. Perinati, C. Perola, T. Ponman, A. Rasmussen, M. Roncarelli, P. Rosati, O. Ruchayskiy, E. Quadrini, I. Sakurai, R. Salvaterra, S. Sasaki, G. Sato, J. Schaye, J. Schmitt, S. Sciortino, M. Shaposhnikov, K. Shinozaki, D. Spiga, Y. Suto, G. Tagliaferri, T. Takahashi, Y. Takei, Y. Tawara, P. Tozzi, H. Tsunemi, T. Tsuru, P. Ubertini, E. Ursino, M. Viel, J. Vink, N. White, R. Willingale, R. Wijers, K. Yoshikawa, N. Yamasaki: EDGE: Explorer of diffuse emission and gamma-ray burst explosions, *Experimental Astronomy* **23** (2009) pp.67–89
- M. Arnaud, X. Barcons, D. Barret, M. Bautz, R. Bellazzini, J. Bleeker, H.H. Böhringer, T. Boller, W.N. Brandt, M. Cappi, F. Carrera, A. Comastri, E. Costa, T. Courvoisier, P. de Korte, T. Dwelly, A. Fabian, K. Flanagan, R. Gilli, R. Griffiths, G. Hasinger, J. Kaastra, S. Kahn, R. Kelley, H. Kunieda,

K. Makishima, G. Matt, M. Mendez, K. Mitsuda, K. Nandra, T. Ohashi, M. Page, G. Palumbo, M. Pavlinsky, S. Sciortino, A. Smith, L. Strüder, T. Takahashi, M. Türler, M. Turner, Y. Ueda, C. Vignali, J. Vink, R. Warwick, M. Watson, R. Willingale, S.N. Zhang: XEUS: the physics of the hot evolving universe, *Experimental Astronomy* **23** (2009) pp.139-168

2) 国際会議報告

Y. Ishisaki, H. Kurabayashi, A. Hoshino, T. Ohashi, T. Yoshino, T. Hagihara, K. Mitsuda, K. Tanaka: Effect of On-Chip Magnetic Shielding for TES Microcalorimeters, *Journal of Low Temperature Physics* **151** (2008) pp.131–137

T. Yoshino, K. Mukai, Y. Ezoe, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda, H. Kurabayashi, Y. Ishisaki, T. Takano, R. Maeda: The Noise and Energy Resolution of the Ti/Au Bilayer X-ray TES Calorimeter with an Au Absorber, *Journal of Low Temperature Physics* **151** (2008) pp.185–189

T. Oshima, Y. Yamakawa, H. Kurabayashi, A. Hoshino, Y. Ishisaki, T. Ohashi, K. Mitsuda, K. Tanaka: A High Energy Resolution Gamma-Ray TES Microcalorimeter with Fast Response Time, *Journal of Low Temperature Physics* **151** (2008) pp.430–435

A. Hoshino, K. Tokoi, Y. Ishisaki, K. Shinozaki, D. McCammon: Fabrication of CPA Salt Pill with Circulating Solution Method, *Journal of Low Temperature Physics* **151** (2008) pp.655–661

K. Mitsuda, R. Kelley, D. McCammon, J.W. den Herder, T. Ohashi: Microcalorimeter Instruments for the Spectrum-R(X)G and NeXT Missions, *Journal of Low Temperature Physics* **151** (2008) pp.703–708

P.A.J. de Korte, J.V. Anquita, X. Barcons, P. Bastia, J. Beyer, F. Briones, Brockley C. Blatt, M. Bruijn, J. Bussons, A. Camon, M.T. Ceballos, D. Drung, C. Enns, L. Fabrega, G. Fraser, F. Gatti, L. Gottardi, W. Hajdas, Helistö, Panu; I. Hepburn, J. den Herder, H. Hoovers, Y. Ishisaki, M. Kiviranta, J. van der Kuur, A. Mchedlishvili, K. Mitsuda, L. Piro, J. Sese, N. Yamasaki, C. Whitford: EURECA: a European-Japanese micro-calorimeter array, *Journal of Low Temperature Physics* **151** (2008) pp.733–739

K. Sato, K. Tokoi, K. Matsushita, Y. Ishisaki, N.Y. Yamasaki, M. Ishida, T. Ohashi: Supernovae contributions to metals in intra-cluster medium observed with Suzaku, *ORIGIN OF MATTER AND EVOLUTION OF GALAXIES: The 10th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies: From the Dawn of Universe to the Formation of Solar System. AIP Conference Proceedings* **1016** (2008) pp.367-0-372

T. Takahashi, R. Kelley, K. Mitsuda, H. Kunieda, R. Petre, N. White, T. Dotani, R. Fujimoto, Y. Fukazawa, K. Hayashida, M. Ishida, Y. Ishisaki, M. Kokubun, K. Makishima, K. Koyama, G.M. Madejski, K. Mori, R. Mushotzky, K. Nakazawa, Y. Ogasaka, T. Ohashi, M. Ozaki, H. Tajima, M. Tashiro, Y. Terada, H. Tsunemi, T.G. Tsuru, Y. Ueda, N. Yamasaki, S. Watanabe: The NeXT Mission, *Space Telescopes and Instrumentation 2008: Ultraviolet to Gamma Ray, Proceedings of the SPIE* **7011** (2008) pp.70110O-70110O-14

J.W. den Herder, R. Kelley, D. McCammon, K. Mitsuda, H. Aarts, van C. Baren, M. Buntov, E. Churazov, E. Costantini, J. Cottam, L., IV Dubbeldam, Y. Ezoe, P. Friedrichs, R. Fujimoto, M. Gilvanov, Y. Ishisaki, J. Kaastra, C. Kilbourne, K. Kuntz, R. Mushotzky, M. Murakami, T. Nakagawa, T. Ohashi, M. Pavlinsky, R. Petre, F. Scott Porter, P. Predehl, Y. Sato, N. Semena, K. Shinozaki, R. K. Smith, S. Snowden, R. Sunyaev, H. Sugita, Y. Takei, A. Tkachenko, J. Vink, de C. P. Vries, N. White, N. Yamasaki, F. Zwart: The Spektr-RG x-ray calorimeter, *Space Telescopes and Instrumentation 2008: Ultraviolet to Gamma Ray, Proceedings of the SPIE* **7011** (2008) pp.70110K-70110K-11

Y. Tawara, I. Sakurai, A. Furuzawa, T. Ohashi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, A. Hoshino, H. Akamatsu, K. Ishikawa, K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, Y. Takei, K. Shinozaki, K. Masui, T. Yoshino, T. Hagihara, S. Kimura, H. Yoshitake: Status of the DIOS mission, *Space Telescopes and Instrumentation 2008: Ultraviolet to Gamma Ray, Proceedings of the SPIE* **7011** (2008) pp.70111H-70111H-10

K. Mitsuda, N.Y. Yamasaki, K. Shinozaki, Y. Takei, T. Nakagawa, H. Sugita, Y. Satoh, R. Fujimoto, T. Ohashi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, M. Murakami, M. Tashiro, Y. Terada, S. Kitamoto, T. Tamagawa, M. Kawaharada, T. Mihara, R.L. Kelley, C.A. Kilbourne, F.S. Porter, P.J. Shirron, M.J. DiPirro, D. McCammon, J.W. den Herder: The x-ray microcalorimeter on the NeXT mission, *Space Telescopes and Instrumentation 2008: Ultraviolet to Gamma Ray, Proceedings of the SPIE* **7011** (2008) pp.70112K-70112K-8

N.Y. Yamasaki, K. Mitsuda, Y. Takei, K. Masui, T. Hagihara, S. Kimura, M. Koshiishi, I. Mitsuishi, K. Shinozaki, A. Tsuchiya, T. Yoshino, H. Yoshitake, R. Fujimoto, Y. Ishisaki: An analog baseband feedback circuit for TES signals in frequency domain multiplexing, *Space Telescopes and Instrumentation 2008: Ultraviolet to Gamma Ray, Proceedings of the SPIE* **7011** (2008) pp.70113Q-70113Q-8

K. Shinozaki, K. Mitsuda, N.Y. Yamasaki, Y. Takei, M. DiPirro, Y. Ezoe, R. Fujimoto, J.W. den Herder, M. Hirabayashi, Y. Ishisaki, K. Kanao, M. Kawaharada, R. Kelley, C. Kilbourne, S. Kitamoto, D. McCammon, T. Mihara, M. Murakami, T. Nakagawa, T. Ohashi, F.S. Porter, Y. Satoh, P. Shirron, H. Sugita, T. Tamagawa, M. Tashiro, S. Yoshida: Design of the two-stage series adiabatic demagnetization refrigerator for the NeXT and Spectrum-RG missions, *Space Telescopes and Instrumentation 2008: Ultraviolet to Gamma Ray, Proceedings of the SPIE* **7011** (2008) pp.70113R-70113R-9

P.A.J. de Korte, J.V. Anquita, X. Barcons, P. Bastia, J. Beyer, F. Briones, M. Bruijn, J. Bussons, A. Camón, F. Carrera, M.T. Ceballos, L. Colasanti, B. Dirks, D. Drung, L. Fabrega, F. Gatti, R. Gonzalez-Arrabal, L. Gottardi, W. Hajdas, P. Helistö, J.W. den Herder, H. Hoervers, Y. Ishisaki, M. Kiviranta, J. van der Kuur, C. Macculi, A. Mchedlishvili, K. Mitsuda, S. Paltani, M. Parra-Borderías, L. Piro, R. Rohlfs, J. Sese, Y. Takei, G. Torrioli, N. Yamasaki: EURECA: a European-Japanese microcalorimeter array, *Space Telescopes and Instrumentation 2008: Ultraviolet to Gamma Ray, Proceedings of the SPIE* **7011** (2008) pp.701122-701122-11

M. Pavlinsky, R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, A. Vikhlinin, G. Hasinger, P. Predehl, K. Mitsuda, R. Kelley, D. McCammon, T. Ohashi, J.W. den Herder, B. Ramsey, M. Gubarev, S. O'Dell, R. Fujimoto: Spectrum-Roentgen-Gamma astrophysical mission, *Space Telescopes and Instrumentation 2008: Ultraviolet to Gamma Ray, Proceedings of the SPIE* **7011** (2008) pp.70110H-70110H-14

Y. Maeda, T. Hayashi, H. Mori, R. Nakamura, T. Satoh, A. Sekiguchi, K. Someya, K. Tamura, M. Ishida, T. Osawa, T. Shirata, M. Suzuki, Y. Ogasaka, A. Furuzawa, Y. Haba, T. Miyazawa, H. Kunieda, K. Yamashita, T. Okajima: Soft x-ray calibration for the NeXT x-ray telescope, *Space Telescopes and Instrumentation 2008: Ultraviolet to Gamma Ray, Proceedings of the SPIE* **7011** (2008) pp.70112O-70112O-9

Y. Ezoe, T. Yoshino, K. Mukai, H. Yoshitake, H. Akamatsu, K. Ishikawa, T. Takano, R. Maeda, Y. Ishisaki, N.Y. Yamasaki, K. Mitsuda, T. Ohashi: Design and fabrication of TES microcalorimeters for x-ray astrophysics in Japan, *High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy III, Proceedings of the SPIE* **7021** (2008) pp.70211X-70211X-9

Y. Terada, T. Hayashi, M. Ishida, K. Mukai, T. Dotani, A. Bamba, S. Okada, R. Nakamura, K. Makishima, K. Morigami, A. Harayama: Suzaku Observation of a White Dwarf as a new Candidate of Cosmic-ray Origin, *HIGH ENERGY GAMMA-RAY ASTRONOMY: Proceedings of the 4th International Meeting on High Energy Gamma-Ray Astronomy. AIP Conference Proceedings* **1085** (2008) pp.689-692

3) 学会講演

日本物理学会 2008 年春季大会 2008 年 3 月 22 日 ~ 26 日 (近畿大学東大阪キャンパス)

赤松弘規、星野晶夫、石崎欣尚 (首都大)、児島祐介、藤本龍一 (金沢大)、篠崎慶亮、満田和久 (ISAS/JAXA)、神谷宏治、沼澤健則、高橋健太 (物材研)、Peter Shirron (NASA/GSFC): 微小重力下環境下における TES 型 X 線マイクロカロリメータの動作実験

日本天文学会 2008 年春季大会 2008 年 3 月 24 日 ~ 27 日 (国立オリンピック記念青少年総合センター)

江副 祐一郎 (首都大)、二元 和朗、益居 健介、萩原 利士成、海老沢 研、満田 和久 (ISAS/JAXA)、寺田 直樹 (NICT)、藤本 龍一 (金沢大): すざく衛星による赤道面方向の地球外圏からの酸素輝線の検出

大橋隆哉、赤松弘規、星野晶夫、石崎欣尚 (首都大)、竹井 洋 (SRON)、佐藤浩介、松下恭子 (東京理科大)、山崎典子、満田和久 (ISAS/JAXA)、J.P. Henry (ハワイ大): 「すざく」による銀河団周辺の中高温銀河間物質 (ミッシングバリオン) 探査

佐藤 浩介 (東理大理)、床井 和世 (首都大理工)、松下 恭子 (東理大理)、石崎 欣尚 (首都大理工)、山崎 典子、石田 学 (ISAS/JAXA)、大橋 隆哉 (首都大理工): 銀河群・銀河団における重元素分布と構成銀河の光度の関係

星野晶夫、床井和世、石崎欣尚、大橋隆哉 (首都大)、佐藤浩介 (東理大)、林田清、田和憲明、長井雅章 (大阪大) J. Patric Henry (ハワイ大): 「すざく」衛星による Abell 1413 の温度と重力質量測定

竹井 洋 (SRON)、木村俊介、満田和久、田村隆幸、山崎典子 (ISAS/JAXA)、大橋隆哉 (首都大理工)、藤本龍一 (金沢大自然)、Eric D. Miller (MIT)、Joel N. Bregman (ミシガン大): 「すざく」衛星 XIS によるかみのけ座銀河団周辺の中高温銀河間物質の探査

染谷 謙太郎、岡田俊策、井上裕彦、中村良子 (ISAS/JAXA)、林 多佳由、白田涉雪、鈴木真樹、大澤武幸 (首都大)、前田良知、石田 學 (ISAS/JAXA): X 線天文衛星 Suzaku の X 線望遠鏡の応答関数の高精度化

児嶋 佑介、藤本 龍一(金沢大自然)、赤松 弘規、星野 晶夫、石崎 欣尚(首都大理工)、篠崎 慶亮、満田 和久 (ISAS/JAXA)、神谷 宏治、沼澤 健則、高橋 健太(物質材料研究機構)、P. Shirron (NASA/GSFC): 連続運転型断熱消磁冷凍機による TES カロリメータの動作実験

床井和世、星野晶夫、横田涉、中村圭佑、江副祐一郎、石崎欣尚、大橋隆哉(首都大)、篠崎慶亮(ISAS/JAXA)、大島泰(国立天文台): 極低温 X 線検出器のための断熱消磁冷凍機開発

篠崎 慶亮、満田 和久、山崎 典子 (ISAS/JAXA)、杉田 寛之 (IAT/JAXA)、藤本龍一(金沢大自然)、大橋 隆哉、石崎 欣尚、江副 祐一郎(首都大理工)、川原田 円(理研)、平林 誠之、金尾 憲一 (SHI)、R. Kelley、C. Kilbourne、F.S. Porter (NASA/GSFC)、D. McCammon (U. Wisconsin): NeXT, Spectrum-RG 衛星搭載 X 線マイクロカロリメータ用 2 段式 ADR の開発

大澤武幸、白田涉雪、林 多佳由(首都大)、井上裕彦、岡田俊策、中村良子、染谷 謙太郎、前田良知、石田 學 (ISAS/JAXA)、大橋隆哉(首都大)、國枝秀世(名古屋大): 可動式 X 線発生装置による軟 X 線望遠鏡性能評価システムの構築

鈴木真樹、白田涉雪、林 多佳由(首都大)、井上裕彦、岡田俊策、中村良子、染谷 謙太郎、前田良知、石田 學 (ISAS/JAXA)、大橋隆哉(首都大): 反射鏡およびその支持機構の改良による X 線望遠鏡の結像性能の向上

日本応用物理学会 2008 年春季大会 2008 年 3 月 27 日 ~ 30 日 (日本大学理工学部船橋キャンパス)

三石郁之、輿石真樹 (ISAS/JAXA)、白田涉雪、林多佳由、江副祐一郎(首都大)、満田和久、山崎典子、前田良和 (ISAS/JAXA)、高野貴之、前田龍太郎(産総研): 将来衛星に向けた超軽量 MEMS 光学系の X 線評価

吉武宏 (ISAS/JAXA)、江副祐一郎(首都大)、吉野友崇、向井一馬 (ISAS/JAXA)、石川久美、石崎欣尚(首都大)、満田和久、山崎典子 (ISAS/JAXA)、前田龍太郎、高野貴之(産総研): 多ピクセル TES 型 X 線マイクロカロリメータの研究開発

2008 年春季低温工学・超電導学会 2008 年 5 月 26 日 ~ 28 日 (明星大学)

神谷宏治、高橋健太、沼澤健則 (NIMS)、Peter Shirron (NASA/GSFC)、石崎欣尚、赤松弘規(首都大)、藤本龍一、児嶋祐介(金沢大)、篠崎慶亮 (ISAS/JAXA): 宇宙用連続型断熱消磁冷凍機の開発 (2) 地上冷凍機試験

日本物理学会 2008 年秋季大会 2008 年 9 月 20 日 ~ 23 日 (山形大学小白川キャンパス)

赤松弘規、星野晶夫、石崎欣尚(首都大)、児嶋祐介、藤本龍一(金沢大)、篠崎慶亮、満田和久 (ISAS/JAXA)、神谷宏治、沼澤健則、高橋健太(物材研)、Peter Shirron (NASA/GSFC)、田中啓一 (SIINT): 連続運転型断熱消磁冷凍機による TES カロリメータの動作実験

日本天文学会 2008 年秋季年会 2008 年 9 月 11 日 ~ 13 日 (岡山理科大学)

石川 久美、江副 祐一郎、大橋 隆哉(首都大)、笹平 康太郎(東大)、寺田 直樹 (NICT): 「すざく」による太陽活動極小期における木星の X 線放射の観測

石崎欣尚、星野晶夫、赤松弘規、浅野健太郎、大橋隆哉(首都大)、佐藤浩介(金沢大)、竹井洋、山崎典子 (ISAS/JAXA): 「すざく」による近傍銀河団 AWM 7 のオフセット領域の観測

藤本龍一(金沢大)、満田和久、山崎典子、篠崎慶亮、竹井洋、中川貴雄、杉田寛之、佐藤洋一(JAXA)、大橋隆哉、石崎欣尚、江副祐一郎(首都大)、村上正秀(筑波大)、田代信(埼玉大)、北本俊二(立教大)、玉川徹、川原田円、三原建弘(理研)、R. L. Kelley、C. A. Kilbourne、F. S. Porter (NASA/GSFC)、D. McCammon(Wisconsin 大)、J.W. den Herder (SRON): NeXT と Spektr-RG 衛星の X 線カロリメータによる銀河団の観測計画

林多佳由、佐藤拓郎(首都大)、染谷謙太郎、中村良子、関口晶子(ISAS/JAXA)、白田涉雪(首都大)、森秀之、前田良知、石田學(ISAS/JAXA)、大橋隆哉(首都大): 反射鏡の改良による X 線望遠鏡の結像性能の向上

染谷謙太郎、中村良子、関口晶子、森英之、前田良知、石田學、尾崎正伸(ISAS/JAXA)、小賀坂康志、國枝英世(名古屋大)、林多佳由、白田涉雪、佐藤拓郎(首都大): 次期 X 線天文衛星「NeXT」搭載に向けた小型かつ軽量なアラインメントモニターの基礎開発

篠崎 慶亮、満田 和久、山崎 典子、竹井 洋、中川 貴雄 (ISAS/JAXA)、杉田 寛之、佐藤洋一 (ARD/JAXA)、藤本 龍一 (金沢大自然)、大橋 隆哉、石崎 欣尚、江副 祐一郎 (首都大理工)、村上 正秀 (筑波大システム情報工)、田代 信 (埼玉大理)、北本 俊二 (立教大理)、玉川 徹、川原田 円、三原 建弘 (理研)、平林 誠之、金尾憲一、吉田 誠至 (SHI)、R. Kelley、C. Kilbourne、F.S. Porter (NASA/GSFC)、D. McCammon (U. Wisconsin)、Jan-Willem den Herder (SRON): NeXT, Spectrum-RG 衛星搭載 X 線マイクロカロリメータ用冷凍機の開発

赤松弘規、石崎欣尚、星野晶夫、江副祐一郎、大橋隆哉(首都大学理工)、吉野友崇、竹井洋、山崎典子、満田和久(ISAS/JAXA)、大島 泰(国立天文台)、田中啓一(SIINT): TES 型 X 線マイクロカロリメータのインピーダンス測定による特性評価

三石郁之、輿石真樹、満田和久、山崎典子、前田良知(ISAS/JAXA)、江副祐一郎、白田涉雪、林多佳由(首都大)、高野貴之、前田龍太郎(産総研): C K α 蛍光輝線(0.29keV)を用いた超軽量 MEMS 光学系の X 線評価

吉武宏、吉野友崇、山崎典子、満田和久(宇宙研)、江副祐一郎、石川久美、赤松弘規、石崎欣尚、大橋隆哉(首都大)、野口俊彦、前田龍太郎(産総研): In-house 製作による TES 型 X 線マイクロカロリメータの開発と評価 (2)

藤本龍一(金沢大)、大橋隆哉、石崎欣尚、江副祐一郎(首都大)、満田和久、山崎典子、篠崎慶亮、竹井洋、中川貴雄、杉田寛之、佐藤洋一(JAXA)、村上正秀(筑波大)、田代信(埼玉大)、北本俊二(立教大)、玉川徹、川原田円、三原建弘(理研)、R. L. Kelley、C. A. Kilbourne、F. S. Porter (NASA/GSFC)、D. McCammon (Wisconsin 大)、J.W. den Herder (SRON): Spektr-RG 衛星搭載 X 線カロリメータ分光装置 SXC

篠崎 慶亮、満田 和久、山崎 典子、竹井 洋、益居 健介 (ISAS/JAXA)、杉田 寛之 (IAT/JAXA)、藤本 龍一 (金沢大自然)、横田 渉、大橋 隆哉、石崎 欣尚、江副 祐一郎 (首都大理工)、川原田 円 (理研)、平林 誠之、金尾 憲一、吉田 誠至 (SHI)、P. Shirron (NASA/GSFC): NeXT, Spectrum-RG 衛星のための 2 段式断熱消磁冷凍技術実証機の開発

国内研究会

学術会議シンポジウム「第 2 回 天文学・宇宙物理学の展望」、東京大学、2008 年 5 月 31 日-6 月 1 日

大橋隆哉 (首都大): ダークバリオン探査衛星 DIOS (小型科学衛星)

立命館大学シンクロトンセンター報告会、立命館大学草津キャンパス、2008年7月10日

江副祐一郎 (首都大) (招待講演): マイクロマシン技術の宇宙 X 線望遠鏡への応用

第9回宇宙科学シンポジウム、宇宙科学研究本部/JAXA、2009年1月8-9日

大橋隆哉 (首都大)、田原 讓 (名大)、満田和久、山崎典子 (ISAS/JAXA)、他 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 および Xenia の開発の現状

満田和久、山崎典子、篠崎慶亮、竹井洋、辻本匡弘 (ISAS/JAXA)、杉田寛之、佐藤洋一 (ARDD/JAXA)、
藤本龍一、佐藤浩介 (金沢大)、大橋隆哉、石崎欣尚、江副祐一郎 (首都大)、村上正秀 (筑波大)、田代
信、寺田幸功 (埼玉大)、北本俊二、村上弘志 (立教大)、玉川徹、三原建弘、川原田円、山口弘悦 (理研)、
R.L. Kelley, C.A. Kilbourne, F.S. Porter, P.J. Shirron, M.J. DiPirro (NASA/GSFC), D. McCammon
(U. Wisconsin), J.W. den Herder (SRON)、SXS チーム: Astro-H 衛星 SXS-XCS

赤松弘規、大橋隆哉、石崎欣尚、江副祐一郎、星野晶夫、石川久美、横田 渉、高木うた子、阿部祐輝 (首
都大)、満田和久、山崎典子、竹井 洋、篠崎慶亮、吉野友崇、土屋彰広、木村俊介、輿石真樹、萩原利士
成、吉武 宏、三石郁之 (ISAS/JAXA)、藤本龍一、佐藤浩介、和田茜 (金沢大): 宇宙観測へ向けた TES
型 X 線マイクロカロリメータの開発の現状

三石郁之 (ISAS/JAXA)、江副祐一郎 (首都大)、輿石真樹 (ISAS/JAXA)、高木うた子 (首都大)、山崎典
子、満田和久 (ISAS/JAXA)、Raul Riveros、山口ひとみ (フロリダ大)、加藤史樹、杉山進 (立命館大)、
森下浩平、中嶋一雄、藤平慎也、金森義明 (東北大)、前田龍太郎 (産総研): 宇宙観測を目指した超軽量
X 線光学系の高分解能化への挑戦

超伝導カメラ研究会、高エネルギー加速器研究機構、2009年2月20-21日

江副祐一郎 (首都大) (招待講演): X 線用 TES 開発

第10回惑星圏研究会、東北大学、2009年3月17-19日

江副祐一郎、石川久美、大橋隆哉 (首都大)、三好由純 (名大)、寺田直樹 (NICT): 「すざく」衛星で観
測した木星からの広がった硬 X 線放射と木星磁気圏 MeV 電子との関係

石川久美、江副祐一郎、長田 翔、大橋隆哉 (首都大)、寺田直樹 (NICT): 「すざく」衛星による地球外
圏からの電荷交換放射の検証

国際会議

Local Hot Bubble and Beyond II, New York, April 20-23, 2008

N.Y. Yamasaki, K. Mitsuda, Y. Ezoe, T. Hagihara, K. Kimura, K. Masui, I. Mitsuishi, T. Ohashi,
K. Sato, Y. Takei, T. Yoshino (invited): Suzaku Detection of the Charge Exchange Emission and
Observation for the Soft X-ray Diffuse Emissions

The Warm and Hot Universe, New York, May 7-9, 2008

T. Ohashi (invited): Missing Baryons at Low Redshift and Future Missions

T. Takahashi, R. Kelley, K. Mitsuda, H. Kunieda, R. Petre, N. White, T. Dotani, R. Fujimoto, Y. Fukazawa, K. Hayashida, M. Ishida, Y. Ishisaki, M. Kokubun, K. Makishima, K. Koyama, G.M. Madejski, K. Mori, R. Mushotzky, K. Nakazawa, Y. Ogasaka, T. Ohashi, M. Ozaki, H. Tajima, M. Tashiro, Y. Terada, H. Tsunemi, T.G. Tsuru, Y. Ueda, N. Yamasaki, S. Watanabe: The NeXT Mission

J.W. den Herder, R. Kelley, D. McCammon, K. Mitsuda, H. Aarts, van C. Baren, M. Buntov, E. Churazov, E. Costantini, J. Cottam, L., IV Dubbeldam, Y. Ezoe, P. Friedrichs, R. Fujimoto, M. Gilvanov, Y. Ishisaki, J. Kaastra, C. Kilbourne, K. Kuntz, R. Mushotzky, M. Murakami, T. Nakagawa, T. Ohashi, M. Pavlinsky, R. Petre, F. Scott Porter, P. Predehl, Y. Sato, N. Semena, K. Shinozaki, R. K. Smith, S. Snowden, R. Sunyaev, H. Sugita, Y. Takei, A. Tkachenko, J. Vink, de C. P. Vries, N. White, N. Yamasaki, F. Zwart: The Spektr-RG x-ray calorimeter

Y. Tawara, I. Sakurai, A. Furuzawa, T. Ohashi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, A. Hoshino, H. Akamatsu, K. Ishikawa, K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, Y. Takei, K. Shinozaki, K. Masui, T. Yoshino, T. Hagihara, S. Kimura, H. Yoshitake: Status of the DIOS mission

K. Mitsuda, N.Y. Yamasaki, K. Shinozaki, Y. Takei, T. Nakagawa, H. Sugita, Y. Satoh, R. Fujimoto, T. Ohashi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, M. Murakami, M. Tashiro, Y. Terada, S. Kitamoto, T. Tamagawa, M. Kawaharada, T. Mihara, R.L. Kelley, C.A. Kilbourne, F.S. Porter, P.J. Shirron, M.J. DiPirro, D. McCammon, J.W. den Herder: The x-ray microcalorimeter on the NeXT mission

N.Y. Yamasaki, K. Mitsuda, Y. Takei, K. Masui, T. Hagihara, S. Kimura, M. Koshiishi, I. Mitsuishi, K. Shinozaki, A. Tsuchiya, T. Yoshino, H. Yoshitake, R. Fujimoto, Y. Ishisaki: An analog baseband feedback circuit for TES signals in frequency domain multiplexing

K. Shinozaki, K. Mitsuda, N.Y. Yamasaki, Y. Takei, M. DiPirro, Y. Ezoe, R. Fujimoto, J.W. den Herder, M. Hirabayashi, Y. Ishisaki, K. Kanao, M. Kawaharada, R. Kelley, C. Kilbourne, S. Kitamoto, D. McCammon, T. Mihara, M. Murakami, T. Nakagawa, T. Ohashi, F.S. Porter, Y. Satoh, P. Shirron, H. Sugita, T. Tamagawa, M. Tashiro, S. Yoshida: Design of the two-stage series adiabatic demagnetization refrigerator for the NeXT and Spectrum-RG missions

P.A.J. de Korte, J.V. Anquita, X. Barcons, P. Bastia, J. Beyer, F. Briones, M. Bruijn, J. Bussons, A. Camón, F. Carrera, M.T. Ceballos, L. Colasanti, B. Dirks, D. Drung, L. Fabrega, F. Gatti, R. Gonzalez-Arrabal, L. Gottardi, W. Hajdas, P. Helistö, J.W. den Herder, H. Hoevers, Y. Ishisaki, M. Kiviranta, J. van der Kuur, C. Macculi, A. Mchedlishvili, K. Mitsuda, S. Paltani, M. Parra-Borderías, L. Piro, R. Rohlfs, J. Sese, Y. Takei, G. Torrioli, N. Yamasaki: EURECA: a European-Japanese microcalorimeter array

M. Pavlinsky, R. Sunyaev, E. Churazov, M. Gilfanov, A. Vikhlinin, G. Hasinger, P. Predehl, K. Mitsuda, R. Kelley, D. McCammon, T. Ohashi, J.W. den Herder, B. Ramsey, M. Gubarev, S. O'Dell, R. Fujimoto: Spectrum-Roentgen-Gamma astrophysical mission

Y. Maeda, T. Hayashi, H. Mori, R. Nakamura, T. Satoh, A. Sekiguchi, K. Someya, K. Tamura, M. Ishida, T. Osawa, T. Shirata, M. Suzuki, Y. Ogasaka, A. Furuzawa, Y. Haba, T. Miyazawa,

H. Kunieda, K. Yamashita, T. Okajima: Soft x-ray calibration for the NeXT x-ray telescope, *Space Telescopes and Instrumentation 2008: Ultraviolet to Gamma Ray, Proceedings of the SPIE* **7011** (2008) pp.70112O-70112O-9

Y. Ezoe, T. Yoshino, K. Mukai, H. Yoshitake, H. Akamatsu, K. Ishikawa, T. Takano, R. Maeda, Y. Ishisaki, N.Y. Yamasaki, K. Mitsuda, T. Ohashi: Design and fabrication of TES microcalorimeters for x-ray astrophysics in Japan

Optical MEMS, Freiburg, Germany, August 11–14, 2008

I. Mitsuishi, Y. Ezoe, M. Koshiishi, M. Mita, Y. Maeda, N.Y. Yamasaki, K. Mitsuda, T. Shirata, T. Hayashi, T. Takano, R. Maeda: Evaluation of X-ray reflectivity of a MEMS X-ray optic

M. Koshiishi, Y. Ezoe, K. Mitsuda, M. Mita, A. Hoshino, Y. Ishisaki, T. Takano, R. Maeda: Simulation-based design of a MEMS X-ray optic for X-ray astronomy

Applied Superconductivity Conference 2008, Chicago, August 17–22, 2008

H. Yoshitake, Y. Ezoe, T. Yoshino, K. Mukai, K. Ishikawa, K. Mitsuda, N.Y. Yamasaki, Y. Ishisaki, H. Akamatsu, R. Maeda, T. Takano: Optimization of Structure of Large Format TES Arrays

Exploring the Hot Universe with IXO Garching, Germany, September 17–19, 2008

T. Ohashi (invited): WHIM Studies with IXO

SpaceWire International Conference 2008, Nara, November 4–6, 2008

Y. Ezoe, Y. Ishisaki, T. Ohashi, K. Shinozaki, Y. Takei, N.Y. Yamasaki, K. Mitsuda, K. Sato, R. Fujimoto, Y. Terada, M. Tashiro, R.L. Kelley, J.W. den Herder: SpaceWire Application for the microcalorimeter instrument onboard the Astro-H mission

International Workshop on Astronomical X-ray Optics, Prague, Czech, December 2–6, 2008

Y. Ezoe, I. Mitsuishi, U. Takagi, T. Shirata, M. Ishida, K. Mitsuda, N.Y. Yamasaki, T. Ohashi, K. Fujiwara, K. Morishita, K. Nakajima, S. Fujihira, Y. Kanamori, R. Riveros, H. Yamaguchi, F. Kato, S. Sugiyama and R. Maeda (invited): Development of light-weight & high-resolution X-ray pore optics in Japan

Workshop on High Resolution X-ray Spectroscopy towards IXO, Dorking, England, March 19–20, 2009

T. Ohashi: DIOS: An X-ray Mission to Survey Missing Baryons

光物性サブグループ

1. 研究活動の概要

1) 内殻励起磁気円二色性を用いた希土類内包フラーレンなどの磁気状態の研究

希土類金属内包フラーレンは、 C_{82} などのフラーレンの内部に Gd、La、Dy などの希土類金属を内包した物質で、磁性研究の対象としてとても興味深い。希土類の $4f$ 電子が価電子と強く混成することにより遍歴性を持つ場合もあり、様々な興味深い物性を示す。本研究では内殻励起磁気円二色性 (Magnetic Circular Dichroism MCD) を用いて、磁性化合物中の希土類元素の $4f$ 軌道の情報をとりだし、新しい知見を得た。実験で使用した試料は主として $Ce @ C_{82}$ と $Ce_2 @ C_{80}$ であり、実験結果が示すこの2つの試料の違いは、(1)20 K より高温では、前者は反強磁性的、後者は強磁性的傾向を示す。前者では高温で Ce 原子の熱運動が活発になることが示唆される、(2)20 K より低温では、後者の方が Ce 原子 1 個あたりの磁気モーメントが大きく、わずかに強磁性的である。これは、低温で2つの Ce 原子間に強磁性的相互作用が働いていることを示唆する、(3) $4f$ 電子とカーボンの π 電子との混成はあまり大きくない、などの知見が得られた。また金属内包フラーレンを内包したピーポッドでは、全体のスペクトルからナノチューブだけのスペクトルを差し引くことにより、金属内包フラーレンのみのスペクトルが得られることがわかり、新しい方法論として興味深い。

2) フラーレンピーポッドの逆光電子分光

前年度から引き続き、フラーレンピーポッドの占有・非占有電子状態を、正逆光電子分光を用いて調べている。今回行ったフラーレン薄膜の研究は既に多く行われているが、実験条件によって HOMO、LUMO ピークのエネルギー位置が異なっている。そこで、フラーレンの非占有電子状態の蒸着基板依存性を逆光電子分光で測定した。その結果、伝導帯の LUMO ピーク位置は、価電子帯の HOMO ピーク位置と同様に基板の仕事関数に依存してシフトすることが分かった。これは、金属 フラーレン界面に働く電気二重層によるものと考えられる。

3) CdSe 量子ドット増感太陽電池電極の硬 X 線光電子分光

次世代太陽電池として半導体量子ドット増感太陽電池が注目されているが、実用化には光電変換効率の飛躍的向上が必要である。そこで、高効率化を目指して、太陽電池を他研究機関(電通大)と共同で作製し、光吸収・光化学電流測定・硬 X 線光電子分光によって電極の電子構造と変換効率との関連を調べた。その結果、最も増感能力が高い CdSe 量子ドットの粒径は、6 nm 程度であることが分かった。また、光吸収・光化学電流測定から得られたバンドギャップの CdSe 量子ドット粒径への依存性と、硬 X 線光電子分光から得られた価電子帯のエネルギー位置の粒径への依存性から、電子とホールの有効質量が見積もられた。この結果は、ナノ物質に特有な電子状態の解明という基礎物理学の観点からも興味深い。

4) GaAs 薄膜の軟 X 線領域における光学定数の測定

以前に行った放射光のみによる2次高調波発生の研究において、GaAs 薄膜の光学定数、特に屈折率が位相整合条件を満たしているかどうかは課題であった。2次高調波は2つの軟 X 線ビームを互いに20度の角度で薄膜上にて合流させたときにのみおきるはずである。このとき $n(\omega)\cos(10^\circ)=n(2\omega)$ という条件が薄膜の屈折率に課せられる。右辺はほとんど1に近いから、必要なのは $n(\omega)$ を正確に測定することである。GaAs はポリカーボネート薄膜上に半分だけ蒸着し、蒸着されない部分はポリカーボネートのみの吸収測定に用いた。4種類の GaAs の膜厚にたいして透過率を 80 eV から 220 eV までの範囲で測定し、吸収係数を KK 変換した結果、As の $3p$ 内殻吸収端に対応する 140 - 141 eV 近傍で屈折率が異常

分散を示して、最大で 1.05 程度になることを見出した。このことは、以前に行われた 2 次高調波発生の実験結果と矛盾しないので、一つの新しい研究（世界初のレーザを用いない 2 次高調波発生）が完了したことを意味する。

2. 研究業績

1) 論文

Y. Nakayama, S. Fujiki, Y. Hirado, H. Shiozawa, H. Ishii, T. Miyahara, Y. Maniwa, T. Kodama, Y. Achiba, H. Kataura, Y. Kubozono, M. Nakatake and T. Saitoh: Photoemission study of electronic structures of fullerene and metallofullerene peapods, Phys. stat. sol. (b) Vol. 245, No. 10 (2008) 2025-2028.

2) 学会講演

物理学会 2008 年春季大会（近畿大学本部キャンパス、2008 年 3 月 22 日 - 26 日）

中山裕二、藤木伸一郎、塩澤秀次、石井廣義、宮原恒昱、真庭豊、兒玉健、鈴木信三、阿知波洋次、片浦弘道、仲武昌史、齋藤智彦：金属内包フラーレンを内包した単層カーボンナノチューブの光電子分光

平戸康晴、石井廣義、島田賢也、沈青、豊田太郎、姜健、宮原恒昱、有田将司、生天目博文、谷口雅樹、齋藤祐児、竹田幸治、大和田謙二、稲見俊哉、池永英司、小林啓介：CdSe 量子ドットを吸着したナノ構造 TiO₂ 電極の硬 X 線光電子分光 II

ナノ学会第 6 回大会（九州大学医学部百年講堂、2008 年 5 月 7 日 - 9 日）

平戸康晴、石井廣義、島田賢也、沈青、豊田太郎、田中克昇、姜健、宮原恒昱、生天目博文、谷口雅樹、上田茂典、山下良之、吉川英樹、小林啓介：CdSe 量子ドットを吸着したナノ構造 TiO₂ 電極の硬 X 線光電子分光 II

物理学会第 63 回年次大会（岩手大学上田キャンパス、2008 年 9 月 20 日 - 23 日）

平戸康晴、石井廣義、島田賢也、沈青、豊田太郎、宮原恒昱、生天目博文、谷口雅樹、上田茂典、山下良之、吉川英樹、小林啓介：CdSe 量子ドット増感太陽電池電極の電子構造の硬 XPS 研究

第 22 回放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム（東大本郷キャンパス、2009 年 1 月 9 日-12 日）

平戸康晴、石井廣義、島田賢也、沈青、豊田太郎、奥村修一、宮尾智章、田村聡、吉田征央、田中克昇、姜健、宮原恒昱、生天目博文、谷口雅樹、上田茂典、山下良之、吉川英樹、小林啓介：CdSe 量子ドット増感太陽電池電極の電子構造の硬 X 線光電子分光研究

第 26 回 PF シンポジウム（エポルカつくば、2009 年 3 月 24 日 - 25 日）

芝崎公達、石川淳、宮原恒昱、高山泰弘、佐々木直也、中山祐二、西畑啓介、米田裕一、吉田徹夫、中村聡、石井廣義、尾嶋正治、岡林潤、金井謙、山本樹、柳下明、足立純一：砒素リッチ GaAs 薄膜を用いた内殻吸収励起による光学定数の評価と二次高調波生成

電子物性研究サブグループ

1. 研究活動の概要

本サブグループが研究対象としている物質系は希土類などの f-電子を含む強相関電子系物質、及びナノ構造を持つ磁性体/非磁性体複合系との二つに大きく分類される前者についてはフラックス法引き上げ法高圧結晶育成法などを用いて自ら純良単結晶を育成し磁気特性電子輸送測定熱測定などの基本特性を測定するとともに多くの研究者との共同研究を行っている後者については企業等の先端技術で作製されたサンプルを時間依存伝導現象に着目した特殊な測定技術を用いて研究している

1) f-電子系強相関伝導物質

本研究室では f-電子と伝導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ことを目的としており、希土類元素を含み、興味深い物性が報告されている典型的化合物や、新奇特性が期待される新たな化合物の純良単結晶を育成し研究を進めている最近は特に充填スクッテルライト構造を持つ化合物 RT_4X_{12} (R:希土類,T:遷移金属,X:15族元素)を主要な研究対象としている。充填スクッテルライト化合物はその構成要素 (T,X) の組み合わせにより純良結晶の育成条件が大きく異なる当初は、興味深い物性が期待される軽希土類 (R = La, Ce, Pr, Nd, Sm) に重点を絞り、常圧フラックス法により、(T=Fe, Ru X=P) 及び (T=Ru, Os X=Sb) の組み合わせで純良単結晶を育成し新奇物性を探索するとともに、その機構を解明することを中心に研究を進めた。これらの系の示す多様な振る舞いの理解は、多くの研究者との共同研究により、かなり進展したといえる。一方、常圧下での合成が困難な As や Sb 系充填スクッテルライトについては、いまだ本質的な特性が分かっていないものが多い。また、重希土類系充填スクッテルライトは、常圧下フラックス法では育成できず、高圧下での短時間焼成による試料でのみ測定が行われていたため、高圧下での単結晶育成が望まれている。他に、解決すべき課題が残されている Pr-系、Sm-系の重点物質についても、高圧下での結晶育成が、問題解決の糸口となる可能性がある。そのために、本年度は、高圧下での純良結晶の合成と、育成された試料での物性評価に重点を置いて研究を進めた

1-1) 高圧下での As 系、Sb 系充填スクッテルライト化合物の純良結晶合成と物性評価

特に、As 系充填スクッテルライトは蒸気圧が高い As を含み、しかも適切なフラックスが見出されないため、測定試料は主に高圧合成による多結晶に限られてきた。そのため、純良な試料は得られず、本質的な特性がほとんど明らかになっていない。昨年度からの丹念な試料育成の努力が実を結び、本年度は単結晶育成が大幅に進展した。初めに、昨年度に純良な多結晶試料の合成に成功し、転移温度 5.2 K において弱い遍歴電子強磁性転移を示すことを発見した $LaFe_4As_{12}$ について、高温高圧下 As 自己フラックス法により、さらに純良な単結晶を育成した。得られた試料を用いて de Haas-van Alphen 振動の観測に成功し、フェルミ面の断面積の主要な面内での角度依存性効果の測定を行い、周波数 $2 \times 10^6 \sim 8 \times 10^7$ Oe の範囲で、7つのブランチの振動を決定した。磨氏のバンド計算による 50 番目のホール面と角度依存性が良く合うブランチが全角度範囲で観測されている。ただし、その絶対値は 5 割程度小さく、より詳細な比較が必要である。多重連結した 51 番目のホール面からのブランチには有効質量が $10 m_0$ (m_0 : 電子の静止質量) を超えるものもあり、電子比熱係数との詳しい比較が待たれる (阪大: 大貫・摂待グループとの共同研究として進められた)。

更に、 $CeFe_4As_{12}$ 、 $NdFe_4As_{12}$ 、の純良単結晶の育成に成功し、物性評価をおこなった。 $CeFe_4As_{12}$ は、これまで、高圧下合成の多結晶は半導体的、低圧 (\sim MPa) 育成の単結晶では半金属と、電気的基底状態が異なり、高圧 (\sim 4 GPa) 下で育成された単結晶での決定が望まれていたものである。高圧下育成の単結晶内でも試料依存性はあるものの、低温で顕著な抵抗増加は見られず、電子相関の強い半金属と

考えられる。NdFe₄As₁₂ は、~15K に強磁性的転移を示す。磁化測定から得られた飽和磁気モーメント (2 m_B)、有効ボーア磁子 (~4.7 m_B/f.u.) は、局在 4f 電子と遍歴 3d 電子から形成された強磁性転移であることを示唆している。更にこの物質で見出された興味深い特徴は、比熱が約 6.5 K に、4f 準位の分裂を反映する極めて顕著なショットキーピークを示すことである。小さな結晶場分裂は、充填スクッテルダイトの全体像を理解するためのキーワードとなっており、このピークの原因の理解、このピーク分裂が諸物性に与える影響について、さらなる検証が必要である。

1-2) GdRu₄P₁₂ の反強磁性転移とフェルミ面のネスティング

RRu₄P₁₂ (R:希土類)のフェルミ面は、バンド計算により波数ベクトル $q=[100]$ で表されるネスティング条件を持つことが予測されており、実際 PrRu₄P₁₂、SmRu₄P₁₂ ではネスティング効果と f-電子の自由度とが協力的に働いて、これまでにない特性を示す金属-非金属転移が見出され、精力的な研究が進められてきた。一方、最近、GdRu₄P₁₂ において反強磁性転移が観測され、転移により電気抵抗が増加することから、フェルミ面のネスティングとの関連が議論されている。しかし、GdRu₄P₁₂ の試料は常圧下での合成はかなわず、これまでの報告は高圧合成された残留抵抗が極めて大きな焼結体試料での測定に限られていた。我々は、高温高圧下で長時間処理することにより残留抵抗が格段と向上した純良試料合成に成功し、基礎物性の測定を行った。初めて、ホール効果と磁気抵抗の測定を行ったところ、転移に伴いキャリア数が減少していること確認された。これは、反強磁性転移にフェルミ面のネスティングがかかわる間接的な証拠といえる。また、比熱測定では、f 電子が良く局在した Gd としては異例の、大きな電子比熱係数を見出した。更に、高圧フラックス法により純良単結晶を育成し、この低エネルギー励起の機構の解明を行う計画が進められている。

1-3) PrOs₄Sb₁₂ の高圧下フラックス法による単結晶育成と超伝導特性

PrOs₄Sb₁₂ は、その興味深い超伝導特性から、充填スクッテルダイトの中でも、最も精力的に研究が行われてきた。しかし、この物質の示す試料依存性が大きな超伝導 2 段転移、超伝導転移温度 T_c と結晶場分裂幅 Δ_{CEF} (基底状態と第 1 励起状態のエネルギー差) との関連など、いまだ説明されずに残された問題がある。一方、最近、格子定数が大きな Sb 系では、常圧下で育成された結晶では希土類の充填率が 100% となり難しいことが認識され、充填率の諸特性に与える影響の評価は不可欠となっていた。我々は、PrOs₄Sb₁₂ の超伝導 2 段転移と Pr の充填率との関連に着目し、高圧合成法により充填率の高い純良単結晶を育成し、本質的な特性を明らかにすることを目的として研究を進めた。結果として、高圧下での PrOs₄Sb₁₂ の高充填率単結晶の育成に初めて成功し、電気抵抗、磁化、比熱などの基礎物性の評価を行い、以下のような結果を得た。

(a) Pr の充填率の増加と共に超伝導の 2 段転移は消失し、低温側の 1 つのシャープな転移となることを確認した。更に、帯磁率のピークと比熱のショットキー型異常の温度 (T_{Pk} 、 T_{PC})、超伝導の転移温度 (T_c)、および転移に伴う比熱の「とび」(ΔC_{Tc}) を注意深く決定した。その結果、Pr の充填率の増加に伴い、(1) T_{Pk} と T_{PC} は系統的に増加するのに対し、(2) T_c と ΔC_{Tc} は系統的に減少することを見出した。 T_{Pk} と T_{PC} は Δ_{CEF} を反映することから、高圧合成により Δ_{CEF} が増加することを示している。また、比熱のとびは超伝導にかかわる準粒子の有効質量を反映しており、実験事実は高圧合成により超伝導転移と有効質量が抑制されていることを示している。著者は、これらの実験結果を、超伝導の引力機構として提案されている結晶場励起を伴う非球面的クーロン散乱の考えと詳しく比較し、矛盾しないことを確かめた。

1-4) Pr(Os_{1-x}Ru_x)₄Sb₁₂ おける重い電子超伝導状態の元素置換効果

重い電子超伝導を示す PrOs₄Sb₁₂ の Os サイトを Ru イオンで部分置換すると、 T_c が中間濃度で極小を示すことが報告されており、二種類の異なる超伝導メカニズムの拮抗が指摘されている。この現象を

実験的により深く理解するため、比熱、磁化率などの測定手段により、検証するため、 Δ_{CEF} や Pr イオンの局所的イオン振動（ラットリングと呼ばれる）の特徴的エネルギー Θ_{Ein} を Ru 濃度の関数として求め、相図に整理した。また、上部臨界磁場等の超伝導特性の Ru 濃度依存性を調べた。「 T_c の極小」の現象を理解する上で重要な知見を与えているものと考えられる。

（以上のテーマに加え多くの充填スクッテルダイトに関する研究が本学:神木正史客員教授、徳島大学:菅原仁准教授、東北大学:岩佐和晃准教授、茨木大学:桑原慶太郎准教授ほか特定領域研究充填スクッテルダイト構造に創出する新しい量子多電子状態の展開のメンバーの方々更には国内外の多くの方々との共同研究として進められた）

2) ナノ磁性体の電気伝導

絶縁層を二つの強磁性層でサンドイッチした構造を持つ TMR (Tunnel magnetoresistance) 素子は、ハードディスクの磁気的情報読み取りヘッドとして既に実用化されている磁気センサーである。強磁性層の相対的な磁化方向に依存して、電子のトンネル抵抗が大きく変化すること、すなわち、スピン依存する電子の伝導現象を利用している (2007 年のノーベル物理学賞は、「巨大磁気抵抗」効果発見者の Albert Fert 氏と Peter Grunberg 氏に与えられた)。しかし、近年の大容量化を目指して、微細加工技術を用いて $\sim 100\text{nm}$ のサイズにまで微細化された TMR 素子における電子輸送現象には、微細化にともなう新たな物理現象の発現が期待される。

我々は、新たに $\sim 70\text{nm} \times 100\text{nm}$ のサイズを持つ TMR 素子を用いて、磁気抵抗および時間依存伝導現象に着目した研究を進めた。静電破壊を克服する技術探索に多くの時間を必要としたが、低周波電圧ノイズスペクトルに特異な振る舞いを見出した。通常、 $1/f$ 型ノイズが顕著に現れるが、これに重ね合わされる形で、ローレンツ型成分が観測された (時間ドメインで観測される 2 準位型ノイズに対応)。降温過程では、ローレンツ型スペクトルの特徴的な周波数 f_c が低周波側へとシフトしていく振る舞いが、複数の温度領域で観測された。この振る舞いは、2 つのポテンシャル極小を持つ二つの準安定状態の間で熱活性型の揺らぎがあるモデルでうまく記述できる。このモデルを特徴づけるエネルギー差とアテンプトタイムをそれぞれのローレンツ型成分に対して求めた。また、 f_c のバイアス電流依存や外部磁場依存も測定した。現時点で、このローレンツ型成分をもたらすノイズの起源は不明であるが、これらの情報は、その解明に対して重要な知見を与えるものと考えられる。

2. 研究業績

1) 論文

Universal scaling in the optical conductivity of heavy fermion compounds: H. Okamura, T. Watanabe, M. Matsunami, T. Nishihara, N. Tsujii, T. Ebihara, H. Sugawara, H. Sato, Y. Onuki, Y. Isikawa, M.S. Kim, T. Takabatake and T. Namba, *Physica B* **403**, Issues 5-9 (2008) 761-763.

Observation of charge fluctuations in skutterudite compounds through an Sb-NQR measurement: H. Kotegawa, Y. Irie, H. Hidaka, T.C. Kobayashi, D. Kikuchi, H. Sugawara and H. Sato, *Physica B* **403**, Issues 5-9 (2008) 772-774.

Transport properties of the filled skutterudite $\text{Pr}_x\text{Fe}_4\text{Sb}_{12}$ synthesized under high pressure: K. Tanaka, D. Kikuchi, Y. Kawahito, M. Ueda, H. Aoki, K. Kuwahara, H. Sugawara, Y. Aoki and H. Sato, *Physica B* Vol.**403**, Issues 5-9 (2008) 866-868.

Elastic property of a high-field ordered state observed in $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$: Y. Nakanishi, T. Fujino, T. Tanizawaa, M. Nakamura, H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato and M. Yoshizawa, *Physica B* Vol.**403**,

Issues 5-9 (2008) 877-878.

Synthesis and basic properties of the filled skutterudite $\text{SmFe}_4\text{Sb}_{12}$: M. Ueda, Y. Kawahito, K. Tanaka, D. Kikuchi, H. Aoki, H. Sugawara, K. Kuwahara, Y. Aoki and H. Sato, *Physica B* Vol.**403**, Issues 5-9 (2008) 881-883.

Elastic modulus of LaFe_4Sb_1 : I. Ishii, H. Higaki, S. Morita, I. Mori, H. Sugawara, M. Yoshizawa and T. Suzuki, *Physica B* Vol.**403**, Issues 5-9 (2008) 887-889.

Crystal field excitations in the filled skutterudite $\text{NdOs}_4\text{Sb}_{12}$: K. Kuwahara, M. Takagi, K. Iwasa, S. Itobe, D. Kikuchi, Y. Aoki, M. Kohgi, H. Sato and H. Sugawara, *Physica B* **403** (2008) 903-905.

de Haas-van Alphen effect in $\text{PrOs}_4\text{P}_{12}$: H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato, T. Endo, R. Settai, Y. Onuki, *Physica B* **403** 5-9 (2008) 934-936.

Electronic state of $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ under high pressure probed by infrared spectroscopy: A. Irizawa, K. Sato, M. Kobayashi, K. Shimai, T. Murakami, H. Okamura, T. Nanba, M. Matsunami, H. Sugawara and H. Sato, *Physica B* **403** (2008) 948-949.

Probing the nodal structures of heavy electron superconductors by means of specific heat measurements in magnetic fields: T. Sakakibara, J. Custers, K. Yano, A. Yamada, T. Tayama, Y. Aoki, H. Sato, H. Sugawara, H. Amitsuka and M. Yokoyama, *Physica B* **403** (2008) 990-993.

Site-selective NMR study of the vortex state in an s-wave superconductor: Y. Nakai, Y. Hayashi, K. Ishida, H. Sugawara, D. Kikuchi and H. Sato, *Physica B* **403** (2008) 1109-1111.

Electrical resistivity and AC-calorimetric measurements of $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ under pressure: A. Miyake, A.T. Holmes, T. Kagayama, K. Shimizu, C. Sekine, I. Shirovani, D. Kikuchi, H. Sugawara and H. Sato, *Physica B* **403** (2008) 1298-1300.

Octupole ordering in filled-skutterudite $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$, Y. Aoki, S. Sanada, D. Kikuchi, H. Sugawara and H. Sato, *Physica B* **403** (2008) 1574-1576.

Ru-NQR studies on filled skutterudite compounds $\text{RRu}_4\text{P}_{12}$ (R=La, Nd, Sm), S. Masaki, T. Mito, M. Takemura, S. Wada, H. Harima, D. Kikuchi, H. Sato, H. Sugawara, N. Takeda and G.-q. Zheng, *Physica B* Vol.**403**, Issues 5-9 (2008) 1630-1632.

NQR investigation on multipolar ordering systems: T. Mito, S. Tomisawa, S. Masaki, M. Takemura, S. Wada, H. Harima, Y. Kato, M. Kosaka, D. Kikuchi, H. Sato, H. Sugawara, N. Takeda and G.-q. Zheng, *Physica B* Vol.**403**, Issues 5-9 (2008) 1633-1635.

Muon Knight shift measurements in possible octupole ordering system $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$, T.U. Ito, W. Higemoto, K. Ohishi, R.H. Heffner, N. Nishida, K. Satoh, H. Sugawara, Y. Aoki, D. Kikuchi and H. Sato, *Physica B* Vol.**403**, Issues 5-9 (2008) 1647-1649.

Stability of electronic states across the metal-insulator transition in $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$, A. Yamasaki, S. Imada, A. Sekiyama, H. Fujiwara, M. Yano, J. Yamaguchi, G. Funahashi, H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato, T. Muro, A. Higashiya, K. Tamasaku, M. Yabashi, H. Kobori, A. Sugimura, T. Ishikawa, H. Harima, and S. Suga, *Phys. Rev. B* **77**, 165125 (2008) (4 page)

Gap opening with ordering in $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ studied by local tunneling spectroscopy, H. Suderow, K. Behnia, I. Guillamon, V. Crespo, S. Vieira, D. Kikuchi, Y. Aoki, H. Sugawara, and H. Sato, Phys. Rev. B **77**, 153101 (2008) (*4 pages*)

High-temperature spin relaxation process in $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ probed by ^{47}Ti -NQR, K. Kitagawa, R. Higashinaka, K. Ishida, Y. Maeno, and M. Takigawa, Phys. Rev. B **77**, 214403 (2008)

Electronic structure of semiconducting $\text{CeFe}_4\text{P}_{12}$: Strong hybridization and relevance of single-impurity Anderson model, M. Matsunami, K. Horiba, M. Taguchi, K. Yamamoto, A. Chainani, Y. Takata, Y. Senba, H. Ohashi, M. Yabashi, K. Tamasaku, Y. Nishino, D. Miwa, T. Ishikawa, E. Ikenaga, K. Kobayashi, H. Sugawara, H. Sato, H. Harima, and S. Shin, Phys. Rev. B **77** (2008) 165126-1-5.

Stability of electronic states across the metal-insulator transition in $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$, A. Yamasaki, S. Imada, A. Sekiyama, H. Fujiwara, M. Yano, J. Yamaguchi, G. Funahashi, H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato, T. Muro, A. Higashiya, K. Tamasaku, M. Yabashi, H. Kobori, A. Sugimura, T. Ishikawa, H. Harima, and S. Suga, Phys. Rev. B **77** (2008) 165125-1-4.

Gap opening with ordering in $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ studied by local tunneling spectroscopy, H. Suderow, K. Behnia, I. Guillamon, V. Crespo, S. Vieira, D. Kikuchi, Y. Aoki, H. Sugawara and H. Sato, Phys. Rev. B **77** (2008.4.14) 153101-1-153101-4.

Novel Features Realized in the Filled Skutterudite Structure, H. Sato, D. Kikuchi, K. Tanaka, M. Ueda, H. Aoki, T. Ikeno, S. Tatsuoka, K. Kuwahara, Y. Aoki, M. Kohgi, H. Sugawara, K. Iwasa, and H. Harima, J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) Suppl. A, 1-6.

Inelastic Neutron Scattering Study of the Heavy Fermion Superconductor $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$, S. Raymond, K. Kuwahara, K. Kaneko, K. Iwasa, M. Kohgi, A. Hiess, M.-A. Messon, J. Flouquet, N. Metoki, H. Sugawara, Y. Aoki, and H. Sato, , J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) Suppl. A, p.25-30.

Sb-NQR Probe for Multiband Superconductivity in Filled-Skutterudite Compounds $(\text{Pr}_{1-x}\text{La}_x)\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$, M. Yogi, T. Nagai, Y. Imamura, H. Mukuda, Y. Kitaoka, D. Kikuchi, H. Sugawara, Y. Aoki, H. Sato, and H. Harima, J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) Suppl. A, p.31-36.

Field Induced Magnetic Moment Distribution in the Ordered Phase of $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$, K. Iwasa, L. Hao, Y. Murakami, M. Kohgi, K. Kuwahara, H. Sugawara, T.D. Matsuda, Y. Aoki, H. Sato, J.-M. Mignot, and A. Gukasov, J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) Suppl. A, p.67-71.

Magnetic Phase Diagram of $\text{Pr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_4\text{P}_{12}$ ($0 \leq x \leq 0.15$), T. Tayama, Y. Isobe, T. Sakakibara, H. Sugawara, Y. Aoki, and H. Sato, J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) Suppl. A, p.78-83.

Exploring Characteristic Electronic States in Filled Skutterudites by Ultrasonic Measurements - Multipole Ordered State in $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$ -, M. Yoshizawa, P. Sun, M. Nakamura, Y. Nakanishi, C. Sekine, I. Shirotni, D. Kikuchi, H. Sugawara, and H. Sato, J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) Suppl. A, p.84-89.

Anomalous Kondo Effect and Ordered State in Heavy Fermion System $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$: Resistivity, Sb-NQR, and Magnetization Measurements under High Pressure, H. Kotegawa, K. Tabira, Y. Irie, H. Hidaka, T.C. Kobayashi, D. Kikuchi, K. Tanaka, S. Tatsuoka, H. Sugawara, and H. Sato, J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) Suppl. A, p.90-95.

The Ground State of $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ Probed by Thermal and Thermoelectric Transport , A. Pourret, K. Behnia, D. Kikuchi, Y. Aoki, H. Sugawara, and H. Sato, J. Phys. Soc. Jpn. 77 (2008) Suppl. A, p.102-107.

de Haas-van Alphen study of the filled skutterudite compounds, H. Sugawara, Y. Iwahashi, K. Magishi, T. Saito, K. Koyama, H. Harima, D. Kikuchi, H. Sato, T. Endo, R. Settai, Y. Onuki, N. Wada, H. Kotegawa and T.C. Kobayashi, J. Phys. Soc. Jpn. 77 (2008) Suppl. A, p.108-113.

Guest Ion Motion in Cage Structure Crystals Investigated by Raman Scattering , M. Udagawa, T. Hasegawa, Y. Takasu, N. Ogita, K. Suekuni, M.A. Avila, T. Takabatake, Y. Ishikawa, N. Takeda, Y. Nemoto, T. Goto, H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato, C. Sekine, I. Shirotni, J. Yamaura, Y. Nagao, and Z. Hiroi, J. Phys. Soc. Jpn. 77 (2008) Suppl. A, p.142-147.

Rattling in Clathrate Compounds of $\text{ROs}_4\text{Sb}_{12}$ and $\text{R}_3\text{Pd}_{20}\text{Ge}_6$, Y. Nemoto, T. Yanagisawa, Y. Yasumoto, H. Kobayashi, A. Yamaguchi, S. Tsuduku, T. Goto, N. Takeda, A. Ochiai, H. Sugawara, H. Sato, and H. Kitazawa, J. Phys. Soc. Jpn. 77 (2008) Suppl. A, p.153-158.

Multipole Phenomena and Superconductivity in Pr-based Filled Skutterudites , T. Sakakibara, K. Yano, H. Sato, T. Tayama, J. Custers, H. Sugawara, Y. Aoki, and H. Sato, J. Phys. Soc. Jpn. 77 (2008) Suppl. A, p.180-186.

^{31}P -NMR Study in Single Crystal $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$ S. Masaki, T. Mito, S. Wada, H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato, M. Takigawa, N. Takeda, and G.-q. Zheng, J. Phys. Soc. Jpn. 77 (2008) Suppl. A, p.206-208.

Elastic Property of $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ under Hydrostatic Pressures Y. Nakanishi, T. Fujino, F. Kikuchi, P. Sun, M. Nakamura, M. Ohashi, G. Ohmi, H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato, and M. Yoshizawa, J. Phys. Soc. Jpn. 77 (2008) Suppl. A, p.216-218.

^{31}P NMR Study of Filled Skutterudite $\text{ROs}_4\text{P}_{12}$ ($R = \text{La}$ and Pr) K. Magishi, Y. Iwahashi, H. Sugawara, T. Saito, K. Koyama, K. Tanaka, D. Kikuchi, and H. Sato, J. Phys. Soc. Jpn. 77 (2008) Suppl. A, p.222-224.

Different Spin-Echo Decay Rate Behavior of $\text{LaT}_4\text{P}_{12}$ and $\text{LaT}_4\text{Sb}_{12}$ ($T = \text{Fe}, \text{Ru}, \text{Os}$) Probed by La-NMR Y. Nakai, K. Ishida, H. Sugawara, D. Kikuchi, and H. Sato, J. Phys. Soc. Jpn. 77 (2008) Suppl. A, p.232-234.

Raman Scattering Study of Filled Skutterudite Compounds N. Ogita, R. Kojima, T. Hasegawa, Y. Takasu, M. Udagawa, T. Kondo, S. Narazu, T. Takabatake, N. Takeda, Y. Ishikawa, H. Sugawara, T. Ikeno, D. Kikuchi, H. Sato, C. Sekine, and I. Shirotni, J. Phys. Soc. Jpn. 77 (2008) Suppl. A, p.251-253.

Investigation of the Anharmonic Guest Modes in Filled Skutterudites Using Inelastic X-ray Scattering Techniques S. Tsutsui, H. Kobayashi, J.P. Sutter, H. Uchiyama, A.Q.R. Baron, Y. Yoda, D. Kikuchi, H. Sugawara, C. Sekine, I. Shirotni, A. Ochiai, and H. Sato, J. Phys. Soc. Jpn. 77 (2008) Suppl. A, p.257-259.

Optical Conductivity and Electronic Structures in Ce-Filled Skutterudites M. Matsunami, H. Okamura, K. Senoo, S. Nagano, C. Sekine, I. Shirotni, H. Sugawara, H. Sato, and T. Nanba, J. Phys. Soc. Jpn. 77 (2008) Suppl. A, p.315-317.

Magnetic Correlation in the Ordered Phase of CeOs₄Sb₁₂ K. Iwasa, S. Itobe, C. Yang, Y. Murakami, M. Kohgi, K. Kuwahara, H. Sugawara, H. Sato, N. Aso, T. Tayama, and T. Sakakibara, J. Phys. Soc. Jpn. 77 (2008) Suppl. A, p.318-320.

NQR Study of Filled Skutterudite CeT₄Sb₁₂ (T = Ru and Os) M. Yogi, H. Niki, H. Mukuda, Y. Kitaoka, H. Sugawara, H. Sato, and N. Takeda, J. Phys. Soc. Jpn. 77 (2008) Suppl. A, p.321-323.

Superconducting Double Transition in PrOs₄Sb₁₂ Probed by Local Magnetization Measurements and Magneto-Optical Imaging S. Kasahara, K. Hirata, H. Takeya, T. Tamegai, H. Sugawara, D. Kikuchi, and H. Sato, J. Phys. Soc. Jpn. 77 (2008) Suppl. A, p.327-329.

Sb-NQR Study of PrOs₄Sb₁₂ under High Pressure S. Kawasaki, K. Katayama, M. Nishiyama, H. Kotegawa, T.C. Kobayashi, H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato, and G.-q. Zheng, J. Phys. Soc. Jpn. 77 (2008) Suppl. A, p.330-332.

Evidence of the Bound States of the Vortex State in an s-Wave Superconductor Proved by NMR Measurements Y. Nakai, Y. Hayashi, K. Kitagawa, K. Ishida, H. Sugawara, D. Kikuchi, and H. Sato, J. Phys. Soc. Jpn. 77 (2008) Suppl. A, p.333-335.

Local Static Distortion of Rare Earth Ions in ROs₄Sb₁₂ (R = La, Ce, Pr, Nd, Sm) by Extended X-ray Absorption Fine Structure, K. Nitta, Y. Omori, D. Kikuchi, T. Miyanaga, K. Takegahara, H. Sugawara, and H. Sato, J. Phys. Soc. Jpn. 77 (2008) 063601

Magnetic Excitations in Heavy Electron State of Filled Skutterudite Pr_xLa_{1-x}Fe₄P₁₂ (x= 1:00 and 0.85), K. Iwasa, L. Hao, T. Hasegawa, K. Horiuchi, Y. Murakami, J. Otsuki, Y. Kuramoto, M. Kohgi, K. Kuwahara, Hitoshi Sugawara, Y. Aoki, and H. Sato, J. Phys. Soc. Jpn. 77 (2008) 063706

Sm-Sb Bond Length in Mixed-Valence System of SmOs₄Sb₁₂, M. Tsubota, S. Tsutsui, D. Kikuchi, H. Sugawara, H. Sato, Y. Murakami, J. Phys. Soc. Jpn. 77, No. 7 (2008) p. 073601-1 073601-4.

Anomalous Anisotropic Magnetoresistance in Heavy-Fermion PrFe₄P₁₂, H. Sugawara, E. Kuramochi, T. Namiki, T. D. Matsuda, Y. Aoki, and H. Sato, J. Phys. Soc. Jpn. Vol. 77, No. 8 (2008) p.085001-1 085001-2.

¹²³Sb-NQR study of unconventional superconductivity in the filled skutterudite heavy-fermion compound PrOs₄Sb₁₂ under high pressure up to 3.82 GPa, S. Kawasaki, K. Katayama, H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato, and Guo-qing Zheng, Phys. Rev. B 78 (2008) 064510-1-064510-7.

Electrical, Magnetic and NMR Studies of Ge-based Filled Skutterudites RPt₄Ge₁₂ (R = La, Ce, Pr, Nd), M. Toda, H. Sugawara, K. Magishi, T. Saito, K. Koyama, Y. Aoki, and H. Sato, J. Phys. Soc. Jpn. Vol. 77, No. 12 (2008) p.124702-1-124702-9.

Dual magnetic correlations in filled skutterudite compound NdRu₄P₁₂, S. Masaki, T. Mito, S. Wada, H. Sugawara, D. Kikuchi and H. Sato, Phys. Rev. B 78 (2008) 094414-1-094414-5.

Anomalous Electronic Behaviors in Ferromagnetic Kondo Lattice $\text{SmFe}_4\text{P}_{12}$, D. Kikuchi, H. Sugawara, K. Tanaka, H. Aoki, M. Kobayashi, S. Sanada, K. Kuwahara, Y. Aoki, H. Shishido, R. Settai, Y. Onuki, H. Harima, and H. Sato, *J. Phys. Soc. Jpn.* Vol. 77, No. 11 (2008) p. 114705-1-114705-7.

Fermi surface of the Pr-based filled skutterudite compound $\text{PrOs}_4\text{P}_{12}$, H. Sugawara, Y. Iwahashi, K. Magishi, T. Saito, K. Koyama, H. Harima, D. Kikuchi, H. Sato, T. Endo, R. Settai, and Y. Onuki, *Phys. Rev. B* **79**, (2009) p.035104 1-5.

Anomalous Duality of $4f$ Electrons in Filled Skutterudite $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$, M. Matsunami, R. Eguchi, T. Kiss, K. Horiba, A. Chainani, M. Taguchi, K. Yamamoto, T. Togashi, S. Watanabe, X.-Y. Wang, C.-T. Chen, Y. Senba, H. Ohashi, H. Sugawara, H. Sato, H. Harima, and S. Shin, *Phys. Rev. Lett.* **102**, (2009) 036403 1-4.

Quantized hyperfine field at implanted μ^+ site in PrPb_3 : Interplay between localized f-electrons and an interstitial charged particle, T. U. Ito, W. Higemoto, K. Ohishi, N. Nishida, R. H. Heffner, Y. Aoki, A. Amato, T. Onimaru, and H. S. Suzuki, *Phys. Rev. Lett.* **102** (2009) 096403 (4 pages).

Pressure-induced Kondo semiconductor: The filled skutterudite compound $\text{CeRu}_4\text{Sb}_{12}$, N. Kurita, M. Hedo, M. Koeda, M. Kobayashi, H. Sato, H. Sugawara, and Y. Uwatoko, *Phys. Rev. B* **79** (30 January, 2009) 014441

Superconductivity in layered pnictides BaRh_2P_2 and BaIr_2P_2 , D. Hirai, T. Takayama, R. Higashinaka, H. Aruga-Katori and H. Takagi, *J. Phys. Soc. Jpn.* **78** 023706

Novel features in filled skutterudites containing rare-earth elements with a plural number of $4f$ -electrons, H. Sato, Y. Aoki, D. Kikuchi, H. Sugawara, W. Higemoto, K. Ohishi, T. U. Ito, R. Heffner, S.R. Saha, A. Koda, K. H. Satoh, K. Nishiyama, R. Kadono, N. Nishida, LeiShu, D. E. MacLaughlin, *Physica B* **404** (15 April, 2009) 749–753.

Weak ferromagnetic ordering in the anomalous field-insensitive heavy-fermion state in $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$, Y. Aoki, W. Higemoto, Y. Tsunashima, Y. Yonezawa, K. H. Satoh, A. Koda, T. U. Ito, K. Ohishi, R. H. Heffner, D. Kikuchi, H. Sato, *Physica B* **404** (15 April, 2009) 757–760.

Possible low-energy excitations of multipoles in $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$ probed by muon spin relaxation, T. U. Ito, W. Higemoto, K. Ohishi, R. H. Heffner, N. Nishida, K. Satoh, H. Sugawara, Y. Aoki, D. Kikuchi, H. Sato, *Physica B* **404** (15 April, 2009) 761–764.

Anomalous Correlation between Cage Size and Valence State in $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$, S. Tsutsui, M. Mizumaki, M. Tsubota, H. Tanida, T. Uruga, Y. Murakami, D. Kikuchi, H. Sugawara, and H. Sato, *J. Physics: Conference Series* **150** (2009) 042220

Charge Fluctuation in Ce-based Filled-Skutterudite, M. Yogi, H. Niki, H. Mukuda, Y. Kitaoka, H. Sugawara and H. Sato, *J. Physics: Conference Series* **150** (2009) 042240

Crystal Field Excitations of Filled Skutterudite $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ by Raman Scattering, N. Ogita, R. Kojima, T. Hasegawa, M. Udagawa, H. Sugawara, and H. Sato, *J. Physics: Conference Series* **150** (2009) 042147.

Low temperature magnetic properties of unconventional superconductor $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$, Y. Karaki, M. Kubota, H. Ishimoto, H. Sugawara, D. Kikuchi and H. Sato, J. Physics: Conference Series **150** (2009) 052094.

Excitation spectrum of $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ under a magnetic field, S Raymond, K Kuwahara, K Kaneko, K Iwasa, M Kohgi, A. Hiess, J. Flouquet¹, N. Metoki, H. Sugawara, Y. Aoki and H. Sato, J. Phys.: Condens. Matter **21** (2009) 215702 (5pp)

Scalar Order in $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ Studied by Thermal Expansion and Magnetostriction, T. Tayama, Y. Isobe, T. Sakakibara, H. Sugawara, and H. Sato, J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) 044708-9.

2) 学会講演

日本物理学会第 63 回年次大会 2008 年 3 月 22 日～3 月 26 日 (近畿大学東大阪キャンパス)

武田賢樹, 田村駿, 青木勇二, 佐藤英行: TMR 素子における低周波電圧ノイズの磁場、電流依存特性.

正木了, 水戸毅, 藤秀樹, 和田信二, 菅原仁, 瀧川仁, 菊地大輔, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト化合物 $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$ の NMR/NQR III.

中井祐介, 石田憲二, 菅原仁, 菊地大輔, 佐藤英行: La 系スクッテルダイトにおけるラットリングの NMR/NQR による微視的測定.

宮永崇史, 新田清文, 大森悠佑, 菊地大輔, 竹ヶ原克彦, 菅原仁, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト化合物の EXAFS 解析.

小島隆介, 荻田典男, 長谷川巧, 高須雄一, 宇田川眞行, 菅原仁, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ のラマン散乱.

田平景輔, 日高宏之, 小手川恒, 小林達生, 菊池大輔, 菅原仁, 佐藤英行: $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ における圧力下の異常な秩序状態.

龍岡翔, 菊地大輔, 田中謙弥, 上田真, 齊藤隆志, 池生剛, 桑原慶太郎, 青木勇二, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト $\text{RFe}_4\text{As}_{12}$ の高圧下結晶育成と物性.

池生剛, 田中謙弥, 菊地大輔, 桑原慶太郎, 青木勇二, 佐藤英行, 石川義和: $\text{NdFe}_4\text{Sb}_{12}$ における強磁性転移の充填率効果と比熱の挙動 II.

齊藤隆志, 池生剛, 菊地大輔, 田中謙弥, 上田真, 龍岡翔, 桑原慶太郎, 青木勇二, 佐藤英行: 高圧合成法で作製された $\text{Yb}_x\text{Fe}_4\text{Sb}_{12}$ の圧力特性.

青木勇二, 戸田静香, 今村敦, 菊地大輔, 桑原慶太郎, 佐藤英行: $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$ 単結晶の低温秩序相の熱物性.

田中謙弥, 菊地大輔, 桑原慶太郎, 青木勇二, 佐藤英行: 高圧合成により作成された高充填率 $\text{PrT}_4\text{Sb}_{12}$ (T=Fe, Ru, Os) の電子輸送特性.

桑原慶太郎, 田中謙弥, 齊藤隆志, 龍岡翔, 岩佐圭祐, 渡辺慎, 青木勇二, 佐藤英行, 神木正史, 岩佐和晃, 菅原仁: 高圧合成により作成された $\text{PrFe}_4\text{Sb}_{12}$ の非弾性中性子散乱.

筒井智嗣, John P. Sutter, Alfred Baron, 菊地大輔, 菅原仁, 佐藤英行: $\text{ROs}_4\text{Sb}_{12}$ の X 線非弾性散乱.

伊藤孝, 髭本亘, 大石一城, 西田信彦, 青木勇二, 鬼丸孝博, 鈴木博之: μ SR 法による PrPb_3 における多極子秩序の研究 III.

日本物理学会第 63 回年次大会 2008 年 9 月 20 日~9 月 23 日 (岩手大学上田キャンパス)

今村敦, 斉藤隆志, 田中謙弥, 梅垣いづみ, 並木孝洋, 桑原慶太郎, 福原忠, 青木勇二, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ における超伝導特性の試料依存性.

宮崎亮一, 菅原仁, 青木勇二, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト超伝導体 $\text{Pr}(\text{Os}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sb}_{12}$ の高温比熱測定.

武田賢樹, 龍岡翔, 渡辺慎, 斉藤隆志, 上田真, 田中謙弥, 並木孝洋, 青木勇二, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト化合物 $\text{NdFe}_4\text{As}_{12}$ の高圧下結晶育成と物性.

並木孝洋, 龍岡翔, 田中謙弥, 武田賢樹, 青木勇二, 佐藤英行: 新充填スクッテルダイト $\text{NdT}_4\text{As}_{12}$ ($\text{T}=\text{Ru}, \text{Os}$) の高圧合成と電子物性.

龍岡翔, 田中謙弥, 上田真, 斉藤隆志, 武田賢樹, 渡辺慎, 並木孝洋, 桑原慶太郎, 青木勇二, 佐藤英行: 遍歴電子強磁性を示す La 系充填スクッテルダイト $\text{LaFe}_4\text{X}_{12}$ の電子輸送特性.

渡辺慎, 田中謙弥, 龍岡翔, 斉藤隆志, 宮崎亮一, 並木孝洋, 桑原慶太郎, 青木勇二, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト化合物 $\text{GdRu}_4\text{P}_{12}$ の比熱と電子輸送特性.

齊藤隆志, 田中謙弥, 上田真, 龍岡翔, 渡辺慎, 武田賢樹, 桑原慶太郎, 青木勇二, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト $\text{YbFe}_4\text{Sb}_{12}$ の高圧下单結晶育成とその物性評価.

真岸孝一, 戸田雅敏, 菅原仁, 斉藤隆志, 小山普之, 佐藤英行: $\text{RPt}_4\text{Ge}_{12}$ ($\text{R}=\text{La}, \text{Ce}$) の NMR.

與儀護, 二木治雄, 椋田秀和, 北岡良雄, 菅原仁, 佐藤英行, 武田直也: $\text{CeTx}_4\text{Sb}_{12}$ の Sb-NMR/NQR による研究 II.

中嶋健二, 吉澤正人, 神谷亮輔, 中西良樹, 中村光輝, 菊地大輔, 菅原仁, 佐藤英行: $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$ の弾性定数の磁場角度依存性 II.

柄木良友, 久保田実, 石本英彦, 菅原仁, 菊地大輔, 佐藤英行: $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ の臨界電流の異常と特異な反磁性.

北村領佑, 岡村英一, 松波雅治, 難波孝夫, 菅原仁, 佐藤英行: $\text{CeRu}_4\text{Sb}_{12}$ の高圧下における電子状態と赤外スペクトル.

菅原仁, 齊藤隆志 A, 龍岡翔 A, 田中謙弥, 佐藤英行, Gerald Giester, Peter Rogl 高圧合成により作製された高充填率 $\text{CeFe}_4\text{Sb}_{12}$ の電子輸送特性

田中謙弥, 並木孝弘, 斉藤隆志, 龍岡翔, 今村敦, 桑原慶太郎, 青木勇二, 佐藤英行: 高圧下で育成した高充填率単結晶 $\text{PrT}_4\text{Sb}_{12}$ ($\text{T}=\text{Fe}, \text{Ru}, \text{Os}$) の電子輸送特性.

田山孝, 磯部雄太, 榊原俊郎, 菅原仁, 佐藤英行: $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ の熱膨張の磁場角度依存性.

正木了, 小手川恒, 藤秀樹, 和田信二, 水戸毅, 菅原仁, 菊地大輔, 佐藤英行: P-NMR による単結晶 $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$ の多極子秩序の研究.

筒井智嗣, 河村直己, 水牧仁一郎, 石松直樹, 渡辺真二, 圓山裕, 菅原仁, 菊地大輔, 佐藤英行: $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ の圧力下 X 線吸収分光.

中西良樹, 伊藤寛吉, 上山徹, 藤野拓也, 中嶋健二, 吉澤正人, 菅原仁, 菊地大輔, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト化合物 $\text{EuRu}_4\text{Sb}_{12}$ の超音波を用いた弾性特性の研究.

柄木良友, 久保田実, 石本英彦, 菅原仁, 菊地大輔, 佐藤英行: $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ の臨界電流の異常と特異な反磁性.

東中隆二, 高木英典: ランダム磁場イジング強磁性体 $\text{R}_x\text{Y}_{1-x}(\text{OH})_3$ における異常基底状態の探索.

第 25 回 SRC 技術報告会 2008 年 5 月 28 日 (東京)

Y. Aoki, S. Tamura, K. Takeda, H. Sato: Noise and transport properties of TMR read heads

第 26 回 SRC 技術報告会 2008 年 11 月 19 日 (湯河原)

Y. Aoki, T. Midrikawa, Y. Ohoka, H. Ogawa, H. Sato: Noise and transport properties of TMR read heads

国際会議

11th International Conference on Muon Spin Rotation, Relaxation and Resonance $\mu\text{SR}2008$, July 21-25, 2008, Tsukuba, Japan

H. Sato, Y. Aoki, D. Kikuchi, H. Sugawara, W. Higemoto, K. Ohishi, T.U. Ito, R. Heffner, S.R. Saha, A. Koda, K.H. Satoh, K. Nishiyama, R. Kadono, N. Nishida, Lei Shu, D.E. MacLaughlin: Novel features in filled skutterudites containing rare-earth elements with a plural number of 4f-electrons

Y.Aoki, W.Higemoto, Y.Tsunashima, Y.Yonezawa, K.H.Satoh, A.Koda, T.U.Ito, K.Ohishi, R.H. Heffner, D.Kikuchi, H.Sato: Weak ferromagnetic ordering in the anomalous field-insensitive heavy-fermion state in $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$

Takashi U. Ito, Wataru Higemoto, Kazuki Ohishi, Robert H. Heffner, Nobuhiko Nishida, Kazuhiko Satoh, Hitoshi Sugawara, Yuji Aoki, Daisuke Kikuchi, Hideyuki Sato: Possible low-energy excitations of multipoles in $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$ probed by muon spin relaxation

the International Conference on Strongly Correlated Electron Systems SCES'08, August 17-22, 2008, Buzios, Brazil

Y. Aoki, S. Toda, D. Kikuchi, K. Kuwahara, H. Sato Itinerant multipolar ordering in the vicinity of a QCP in skutterudite $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$ (invited talk)

Kenya Tanaka, Takahiro Namiki, Takashi Saito, Sho Tatsuoka, Atsushi Imamura, Keitaro Kuwahara, Yuji Aoki, Hideyuki Sato Transport properties of $\text{Pr}_x\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$ single crystals with high Pr-site filling fraction grown under high pressure

Sho Tatsuoka, Kenya Tanaka, Takashi Saito, Takahiro Namiki, Keitaro Kuwahara, Yuji Aoki, Hideyuki Sato Transport properties of the itinerant-electron weak ferromagnet $\text{LaFe}_4\text{As}_{12}$

The 10th German-Japanese Symposium "Collective Quantum-Phenomena in Correlated Condensed Matter Systems", Sept. 28 -Oct. 1, 2008, Rottach-Egern, Germany

H. Sato Novel features in the Fe-based filled Skutterudites (invited talk)

3) 著書等

青木勇二、佐藤英行「熱電変換技術ハンドブック」監修 梶川武信（株式会社 NTS）第 2 章熱電変換材料 第 2 節化合物半導体 3 . スクッテルダイト化合物 3.5 低温物性 p 87 - 96.

ナノ物性サブグループ

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、ボロンクラスターなどのナノメートルサイズの構造を有する物質系は、従来のバルク物質とは異なった興味深い性質を示すことが期待される。本グループでは、このようなナノ構造物質系において、新規物性の探索と開発、および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。2008年度 (平成20年度) における主な研究・教育活動の概要は次のとおりである。

1) 単層カーボンナノチューブ (SWCNT) 内の水

1 cm³ の水も 1 mm³ の水もその性質はほとんど変わらない。さらにその 10 分の 1、100 分の 1 の体積の水でも、バルクの性質から僅かしか変化しないだろう。しかし、水分子数個分程度の長さ - 1 ナノメートル (nm) 程度 - まで極端に小さくしたらどうなるだろうか。このような空間内に“強く”束縛された水は、実際、生体内や地殻などに多数存在して、その性質や機能の発現に重要な役割を担っている。本研究グループでは、単層カーボンナノチューブ (SWCNT) 内に水を入れて、その性質を調べている。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有するため、円筒空洞内に束縛された水の挙動を系統的に調べる理想的な物質である。これまでの研究から、平均直径 1.17 ~ 1.44 nm の SWCNT 内に、水は室温・飽和蒸気圧以下で容易に吸着されること、こ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新しい構造の氷になること、このアイスナノチューブの融点の空洞径依存性は、よく知られたバルク領域における融点の空洞径依存性 (ケルビン式の変形で記述される) と逆の振る舞いを示すこと、などが明らかにされている。すなわち、バルク領域と極端に小さな空間内とで、水の性質が不連続的に変化するのである。(バルクとミクロのクロスオーバー)

本年度は、水分子が永久電気双極子モーメントをもつことに注目して、SWCNT 内部の水の誘電特性を調べた。本研究では、電場中において、水を内包した SWCNT の分子動力学計算を行った。その結果、細いチューブにおいては、電気分極の著しい時間的な揺らぎが観察されたが、十分低温では奇数員環アイスナノチューブは一定の自発分極を有する強誘電体 (フェリ誘電体) となり、偶数員環アイスナノチューブでは反強誘電体となることが明らかになった。この誘電体は、世界最小サイズの (強、反強) 誘電体であり、バルク物質では見られない階段状の分極ヒステリシスを示した (図 1 参照)。この階段状の分極ヒステリシスは、アイスナノチューブを構成する水チェーンの分極が 1 本ずつ反転することから生じる。本計算機実験はまた、X線回折実験および NMR 実験の結果を良く再現し、SWCNT 内に 20 単位以上の水のリングからなるアイスナノチューブの存在を示している。(三上修士論文)

2) 酸素内包カーボンナノチューブの電子状態

酸素はスピン 1 の磁性分子である。したがって、SWCNT 内部に酸素を吸着させ、新規配列の酸素固体を形成することは極めて興味深い。そこで本グループでは、まず、分子動力学計算を使って SWCNT 内部の酸素の構造を調べ、螺旋状の配列をもった酸素チューブが形成できることを予測した。さらに、酸素分子が 1 次元的に配列する細い SWCNT について、電子状態の第一原理計算を行った。その結果、直径が細くなると、酸素分子と SWCNT の電子状態が混成して、酸素は分子状形状を保ったまま磁性が消失してゆくことが明らかになった。(原田修士論文)

3) セメント超伝導体 C12A7 の核磁気共鳴

12CaO · 7Al₂O₃ (C12A7) は直径 0.5 nm 程度のケージが積み重なった結晶構造をとり、ケージ 6 個

に1個の割合で酸素イオン (O^{2-}) が内包されている ($C12A7:O^{2-}$)。 $C12A7:O^{2-}$ はアルミナセメントの成分として知られている典型的な絶縁体であるが、内包酸素イオンを電子で置換することにより金属 ($C12A7:2e^-$) となり、低温で超伝導が出現する。この金属化の機構を微視的な観点から明らかにするために、 ^{27}Al NMR を行った。その結果、内包酸素イオンが電子に置換することによりケージ構造の歪みが解消されること、さらにこの物質が示す金属的性質はケージ骨格による伝導ではなく、ケージ内部空間に形成されたケージ伝導バンドによることを明らかにした。また、 ^{27}Al 核スピン-格子緩和率の温度依存性が T^* 以下の低温で金属的振る舞いから外れることを見出し (図2参照) 電子-格子相互作用により一部の伝導電子がケージにトラップされることを明らかにした。(小中修士論文)

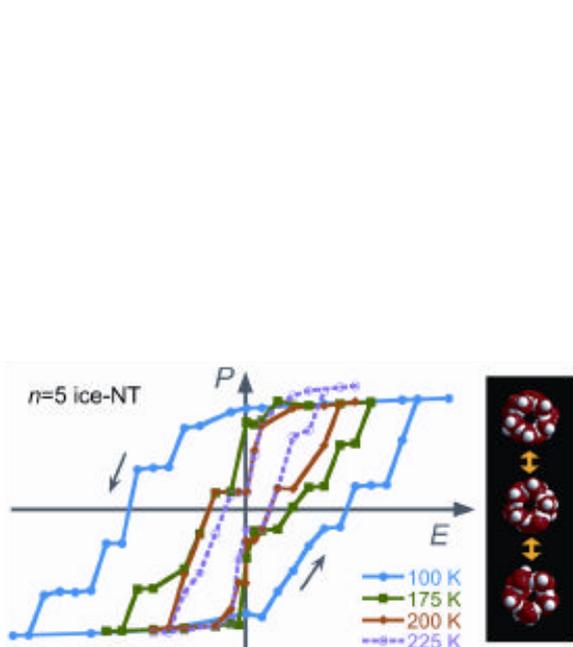


図 1: 水を吸蔵した指数 (9,8)SWCNT の分極ヒステリシス。横軸はチューブ軸方向に印加された電場。水は TIP3P モデルとして記述した。ステップ状の分極ヒステリシス、および有限の自発分極を有し、(9,8)SWCNT 内の 5 員環アイスナノチューブが世界最小の (フェリ) 強誘電体であることを示唆している。ステップはアイスナノチューブを構成する 5 本の 1 次元の水のチェーンの分極が 1 本ずつ反転することから生じる。

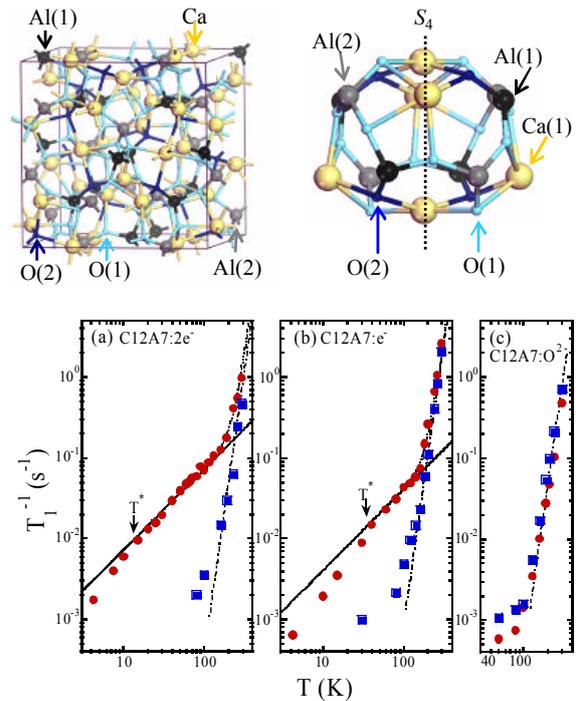


図 2: $C12A7$ の結晶構造と ^{27}Al 核スピン-格子緩和率の温度依存性。直径 0.5 nm のケージ (右上図) が面を共有して 3 次元的に連結した構造をしている。Al は結晶学的に異なる 2 つのサイト Al(1),(2) が存在する。金属試料 (a,b) の Al(1) では緩和率が温度に比例する金属的振舞い (実線) がみられるが、 T^* 以下でその振舞いから外れる。

4) 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): 第二世代カーボンナノチューブの構造研究 (2008G585)。

2. 研究業績

1) 論文

F. Mikami, K. Matsuda, H. Kataura, Y. Maniwa: Dielectric Properties of Water inside Single-Walled Carbon Nanotubes, *ACS Nano* (2009) DOI:10.1021/nm900221.

Y. Nakayama, S. Fujiki, Y. Hirado, H. Shiozawa, H. Ishii, T. Miyahara, Y. Maniwa, T. Kodama, Y. Achiba, H. Kataura, Y. Kubozono, M. Nakatake and T. Saitoh: Photoemission study of electronic structures of fullerene and metallofullerene peapods, *Phys. Stat. Sol. (b)* **245** (2008) 2025-2028.

Y. Miyata, K. Yanagi, Y. Maniwa, T. Tanaka, H. Kataura: Diameter analysis of rebundled single-wall carbon nanotubes using X-ray diffraction: verification of chirality assignment based on optical spectra, *J. Phys. Chem. C* **112** (2008) 15997-16001.

Y. Miyata, K. Yanagi, Y. Maniwa, and H. Kataura: Optical properties of metallic and semiconducting single-wall carbon nanotubes, *Phys. Stat. Sol. (b)* **245** (2008) 2233-2238.

Y. Miyata, K. Yanagi, Y. Maniwa, and H. Kataura: Optical evaluation of the metal-to-semiconductor ratio of single-wall carbon nanotubes, *J. Phys. Chem. C* **112** (2008) 13187-13191.

2) 学会講演

日本物理学会 63 回年次大会 2008 年 3 月 22 日 ~ 26 日 (近畿大学)

客野遥, 宮田耕充, 松田和之, 門脇広明, 真庭豊, 片浦弘道, 斎藤毅, 大嶋哲, 湯村守雄, 飯島澄男: 単層カーボンナノチューブへの水分子吸着; 吸着等温線.

廣津智之, 三上史記, 松田和之, 門脇広明, 真庭豊, 片浦弘道: 単層カーボンナノチューブに吸着したメタン分子の NMR.

小中雄介, 松田和之, 真庭豊, 松石聡, 細野秀雄: 無機エレクトライド $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ の ^{27}Al NMR.

宮田耕充, 柳和宏, 真庭豊, 片浦弘道: フォトルミネッセンスから求めた SWCNT カイラリティ分布の実験的評価.

中山裕二, 藤木伸一郎, 塩沢秀次, 石井廣義, 宮原恒晃, 真庭豊, 兒玉健, 鈴木信三, 阿知波洋次, 片浦弘道, 仲武昌史, 齋藤智彦: 金属内包フラーレンを内包した単層カーボンナノチューブの光電子分光.

第 35 回記念フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム 2008 年 8 月 27 日 ~ 29 日 (東京工業大学)

客野遥, 三上史記, 今泉利美, 松田和之, 斎藤毅, 大嶋哲, 湯村守雄, 飯島澄男, 宮田耕充, 片浦弘道, 真庭豊: 単層カーボンナノチューブ内部の水の相転移.

松田和之, 片浦弘道, 真庭豊: C_{60} ピーポッドの ^{13}C NMR.

宮田耕充, 柳和宏, 真庭豊, 片浦弘道: 光学測定による金属および半導体単層カーボンナノチューブの比率評価.

宮田耕充, 柳和宏, 真庭豊, 片浦弘道: 金属単層カーボンナノチューブ薄膜のシート抵抗.

日本物理学会秋季大会 2008 年 9 月 20 日 ~ 23 日 (岩手大学)

宮田耕充, 柳和宏, 真庭豊, 片浦弘道: 金属型および半導体型単層カーボンナノチューブの D-band ラマンスペクトル.

小中雄介, 松田和之, 真庭豊, 松石聡, 細野秀雄: セメント超伝導体 $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ の ^{27}Al NMR.

物性科学領域横断研究会 スピンが拓く物性科学の最前線 2008 年 11 月 29 日 ~ 12 月 1 日 (東京大学)

松田和之, 小中雄介, 真庭豊, 松石聡, 細野秀雄: セメント超伝導体 C_{12}A_7 の核磁気共鳴.

第 36 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム 2009 年 3 月 2 日 ~ 4 日 (名城大学)

三上史記、松田和之、真庭豊：単層カーボンナノチューブ内における水クラスタの誘電特性.

原田啓太郎、松田和之、真庭豊、手島正吾、中村壽：第一原理計算による酸素内包単層カーボンナノチューブの電子状態予測.

3) 学会誌等

松田和之、花見圭一、真庭豊：カーボンナノチューブ複合系の物性と計算機実験：RIST NEWS 46 (2008) 3-12.

Y. Maniwa, K. Matsuda, H. Kyakuno, S. Ogasawara, T. Hibi, S. Suzuki, Y. Achiba, H. Kadowaki, H. Kataura, Functional carbon nanotubes filled with water: Photon Factory Activity Report 2007, PART A Highlights and Facility Report, 12-13

粒子ビーム物性サブグループ

1. 研究活動の概要

フラストレートした磁性体、量子相転移、カーボンナノチューブの3テーマについて研究している。本年度のハイライトは、幾何学的にフラストレートした磁性体の代表例であるスピナイス $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ における素励起が、高エネルギー物理学における磁気モノポールに類似した現象として理解可能であることを実験的に示したことである。

1) 幾何学的フラストレーションを示す磁性体の研究

氷 (H_2O) の酸素原子は結晶格子上に規則正しく整列している。他方、氷の水素原子は、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。これは、最も古くから知られるフラストレーションの一例であり、氷は低温でゼロ点エントロピーを持つ物質としても良く知られている。スピナイス $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 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。水素原子の位置を、スピンの向きに読み替えると、完全に同一のフラストレーションが起こるため、スピナイスと言われている。実際スピナイスでは、ゼロ点エントロピーを比熱で測定可能ということが約10年前に示され、興味深い実験事実として受け止められた。しかし2008年、もっと驚くべきことに、スピナイスにおける励起状態は、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特徴を持つことが理論的に予測された。我々は、このスピナイスの中の磁気モノポール類似の準粒子を観測する目的で、中性子散乱実験と比熱測定を行い、磁気モノポールの理論的解釈を肯定する結果を得た。磁気モノポールは高エネルギー物理学の分野では、過去何十年にもわたって探索された未知の粒子であるが、未だその観測例はない。固体物理の領域でも、磁気モノポールに類似した現象があることが主として理論的に近年研究され興味を持たれている。

スピナイス $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ に、[111] 方向の磁場をかけて、それを少しだけ傾けるとカステレイン転移が起こり得る。カステレイン転移は、理論的には知られていたが、磁性体においてはほとんど研究されたことない相転移である。これはトポロジカルな性質を持つ、1次と2次相転移の中間型の性質を持つなど非常に興味深い転移である。昨年度は、この相転移が実験的に研究できるかどうか、シミュレーションで調べ、肯定的な結果を得たので、本年度はそれに従って磁化測定を行った。この実験は、磁場に平行な磁化と、垂直成分の磁化を同時に測定することが必要であり（このような実験は普通は行わない）、技術的にチャレンジングなものである。実験結果は、シミュレーションで予想した結果がほぼ出て来るように思えるものの、技術的に解決すべき問題があることも明確になった。この解決方法はすでに見つかったので、来年度早々にはカステレイン転移に関しても良い実験結果が出ることが期待される。

2) 遍歴電子反強磁性体の量子臨界現象

遍歴電子系における反強磁性磁気秩序相と常磁性フェルミ液体相の間の量子相転移の理論的研究は、1970年代にその原型が作られた。しかしこの量子相転移の実験的研究が、多くの研究者の興味の対象となり、同時に理論的な研究も進んだのは、1990年以降である。重い電子系や高温超伝導関連の酸化物等の強相関係において共通に観測される非フェルミ液体の振舞を、量子臨界現象として理解する考え方が提示された。その後、多くの研究がなされたが、この問題は未だ定説化されず hot topic として残されている。

量子相転移としては、弱相関の極限で正しいと考えられている SDW QPT と、強相関の極限から出発する locally critical QPT のどちらかであろうという説が有力視され、現在も様々に議論されている。我々が近年行なった f-電子系 $\text{Ce}(\text{Ru}_{1-x}\text{Rh}_x)_2\text{Si}_2$ および d-電子系 $(\text{V}_{1-x}\text{Ti}_x)_2\text{O}_3$ の中性子散乱実験は、

SDW QPT を支持するかなり強力な証拠になっていると考えている [H. Kadowaki et al., Phys. Rev. Lett. 96, 016401 (2006); ibid. 101, 096406 (2008)]. しかし、公平に見ると、2例の実験から普遍性を結論するのは相当に無理がある。そこで、f-電子系 $\text{Ce}(\text{Ni}_{1-x}\text{Pd}_x)_2\text{Ge}_2$ の中性子散乱実験を昨年度からスタートさせ、SDW QPT のユニバーサリティクラスに属するのか、それとも違うのかについての研究を進めた。本年度は詳細な中性子非弾性散乱実験を行ない、その結果非弾性散乱スペクトルが、SDW QPT で理解可能な $\text{Ce}(\text{Ru}_{1-x}\text{Rh}_x)_2\text{Si}_2$ とは、定性的に大きく違っていることを明らかにした。また簡単に考えると locally critical QPT も否定されるため、実験結果は新しいユニバーサリティクラスの QPT を示唆すると思われる。詳細については今後の解析 & 発展が待たれる。

3) カーボンナノチューブ

カーボンナノチューブの実験は、He ガス吸着の中性子回折実験を行うため ILL(グルノーブル) まで出かけて行ったが、技術上の問題で実験は不成功だった。このため、改めてこの研究の難しさを実感することとなった。そこで、低温における回折実験を実験室レベルでも行ことが可能になるように Xray 回折装置の整備を行ない、 $T=7\text{ K}$ or $T=1.5\text{ K}$ まで実験可能となるようにした。

2. 研究業績

1) 論文

H. Kadowaki, K. Motoya, T. J. Sato, J. W. Lynn, J. A. Fernandez-Baca, J. Kikuchi: Quantum phase transition in the itinerant antiferromagnet $(\text{V}_{0.9}\text{Ti}_{0.1})_2\text{O}_3$, *Phys. Rev. Lett.* **101** (2008) 096406-(1-4).

2) 学会講演

日本物理学会 第 63 回年次大会 2008 年 3 月 22-26 日 (近畿大学)

客野遥, 宮田耕充, 松田和之, 門脇広明, 真庭豊, 片浦弘道, 斎藤毅, 大嶋哲, 湯村守雄, 飯島澄男: 単層カーボンナノチューブへの水分子吸着: 吸着等温線

廣津智之, 三上史記, 松田和之, 門脇広明, 真庭豊, 片浦弘道: 単層カーボンナノチューブに吸着したメタンの NMR

日本物理学会 2008 年秋期大会 2008 年 9 月 20-23 日 (岩手大学)

福原忠, 桑井智彦, 石川義和, 門脇広明, 前澤邦彦: $\text{Ce}(\text{Ni}_{1-x}\text{Pd}_x)_2\text{Ge}_2$ の量子臨界点近傍のホール効果

土居直弘, 門脇広明, 田畑吉計, 室裕司, 元屋清一郎, 松平和之, 廣井善二: スピンアイス $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ におけるカステレイン転移

門脇広明, 土居直弘, 青木勇二, 田畑吉計, 佐藤卓, J.W. Lynn, 松平和之, 廣井善二: スピンアイス $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ における磁気モノポールの観測

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) 法を中心手段にして興味ある物質について研究を進めている。ESR というと、通常は市販の X-バンド (10 GHz) や Q-バンド (36 GHz) ESR スペクトロメーター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、本研究室では測定周波数を 10 ~ 24,000 MHz にわたって可変のスペクトロメーターに加え、分子科学研究所との共同研究による 94,000 MHz までの ESR を使い、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いる。

この様に広範な周波数にわたる ESR の研究が可能なグループは世界的に見ても例は多くない。本研究手段の特徴を幾つかあげてみよう。一つは、低次元電子系であれば、たとえ多結晶試料であってもスピンの微視的なダイナミクスの異方性を定量的に見積れる点。また、SQUID 磁束計は常磁性磁化 + 反磁性磁化の合計しか測定できないが、同一試料内の核スピンと電子スピンの磁気共鳴を同一周波数で観測すれば、反磁性に影響されない電子スピン磁化率のみを測定できる。更に、静水圧下或いは一軸変位下での ESR 実験も可能で、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ることができる。物構研の松本先生のご協力により、CrNiAl 材を内筒に用いた高压用セルを用いると 3 GPa までかけることができるが、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 までの高压下 ESR を開発している。

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デオキシリボ核酸 (DNA) 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、G-C と A-T の組み合わせにより 2 本の DNA が 2 重螺旋構造を構成する。これらのアミノ基の配列は任意に設計して合成できるフレキシビリティと、高い自己組織化能を示すことから任意の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 は 2 m にも及ぶことが知られているが、放射線照射により作られた欠陥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、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、この未知の物質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、ナノエレクトロニクス素材としての可能性の検証を目的として研究を進めている。

2 価の金属イオンが DNA の塩基対の間の水素結合と入れ替わる事を利用して、多くの 2 価の金属イオンを入れる事が出来る。これまでも、スピンを持つ Mn を含む Mn-DNA について、その電子状態を調べるために Mn の ESR や SQUID 磁化率などを利用してきた。水に溶解すると、Mn-DNA は熱運動をし、そのスペクトルに先鋭化が起こる。そうすると、Mn が核スピン $I=5/2$ を持つため、ESR 信号が核スピンの磁気量子数に応じた共鳴位置のシフトを示し、結果として図 1 に示すような 6 本のスペクトルに分裂する。Mn の *d*-電子と原子核は、原子核と Fermi 接触相互作用をする内殻の *s*-電子を介して相互作用している。それ故に、*d*-電子が周囲の原子とどのような結合をしているかに依存して、その強さが変化することが知られている。共有結合性が強い場合には、図 2 に示すように、*d*-電子の波動関数が結合原子との間に集まるため、核スピンとの結合が弱まり、イオン結合の場合は、球対称のコンパクトな分布を取り、核スピンとの結合が最も強くなる。Mn-DNA の値は、イオン結合の CaF_2 に近い値を取

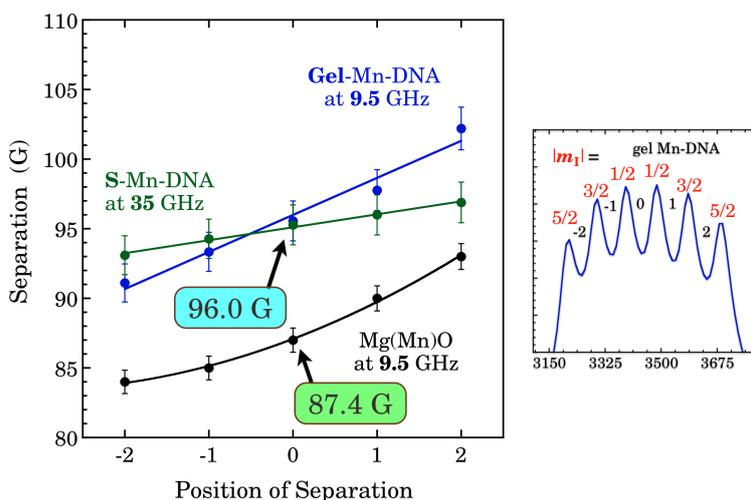


図 1: Mn-DNA の Mn の ESR 信号と超微細分裂。水溶液 (Gel) 或いは、Ca によって Mn を 1%以下に希釈した Mn_xCa_{1-x} -DNA (S) では、Mn の核スピン $I=5/2$ により 6 本の超微細分裂信号を与える。その分裂の大きさ、特に、 $I=1/2$ と $-1/2$ の間隔は、Mn の結合状態を敏感に反映する。共有結合の場合は分裂間隔が 70 G 程度であるが、イオン結合では約 100 G 程度になる。Mn-DNA の分裂間隔は約 96 G と、イオン結合していることを示唆する。

母結晶	A (G)
CaF ₂	100.5
CaO	91.8
MgO	87.3
ZnS	70.3

図 2: 異なる母結晶中に分散された Mn ESR の $I=1/2$ と $-1/2$ の超微細分裂間隔。共有結合性が強い ZnS では小さく、イオン結合性が強い CaF₂ では大きな分裂間隔を与える。

り、かなりイオン性が強いことを示唆する。Mn が、電気陰性度の高い窒素や酸素に囲まれた塩基対間に位置するという解釈から、合理的な結果を与えていると結論される。(分子研との共同研究)

2) (BEDT-TTF)₂ICl₂

有機電荷移動錯体 (BEDT-TTF)₂ICl₂ 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いる。常圧での電子状態がどの様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。高圧 (3GPa ~ 10GPa) での測定のために、キュービックアンビルセルを利用した ESR 装置の開発を進めている。外形 2.5 mm のテフロンカプセル内に、粉末試料を約 1.3 mg 入れた直径約 1mm のコイルをセットし、数百 MHz にて、数十秒間の積算によりきれいな吸収信号が得られた。圧力下において試料のスピン磁化率を較正するために、既知の磁性を持つ DPPH (diphenyl-picryl-hydrazyl) を試料コイルに埋め込む試みを進めている。今後、実際に加圧下で温度を変えながら DPPH 標準試料のスピン磁化率の較正、そして試料の測定を進めていく予定である。(埼玉大、産総研との共同研究)

3) β' -(DMe-DCNQI)₂M & β' -(DI-DCNQI)₂M

有機電荷移動錯体の 1 種である β' -(DMe-DCNQI)₂M は、平面構造を持つ DMe-DCNQI 分子がほぼ並行にスタックして高い 1 次元性を持つ π -バンドを構成している。4 つの分子が、金属原子 M を介して結合しており、金属の種類によりその異方性が制御できる。M=Li⁺ の場合は、完全なイオン結合であり、Li イオンを介した分子間の電子ホッピングは非常に遅い。一方、M=Cu の場合には、3d-軌道を介した方向性を持つ結合による混成が強く、3 次元的なバンドが形成されている。ところが、M=Ag の場合には 4d バンドが安定で E_F より深いため、Li⁺ の場合に近い物性を示す。ところが、我々の固体高分解能 NMR の結果によると、DMe-Ag 塩では、DMe-DCNQI 分子上のスピン磁化率が DMe-Li 塩より 2 割程度小さいことが明らかになっている。その原因を探るために、Ag-NMR の測定を準備中である。

予備的に、Li-NMR を調べた結果、1 価のイオンのはずにも関わらず、LiCl 水溶液の NMR シフトが

らざれることが分かった。シフトの方向は、見かけ上、1 価以上に相当する。しかし、その原因は、隣接する DMe-DCNQI 分子の両端に位置する窒素上の π 電子スピンの Li の $1s$ 殻を分極するために、内殻分極特有の負のシフトを生じていると理解している。Ag の電子状態を調べるためには、類似構造を持つ、メチル (Me) 基をヨウ素に変えた、DI-DCNQI 分子との比較が興味深い。この系は、大きなヨウ素のイオン半径のために DI-DCNQI 分子面間隔が開き、狭いバンド幅を持つモット絶縁体である。 ^1H および ^{13}C NMR、ESR などの結果によると、分子上の π 電子は、かなりの割合でヨウ素に集中していることが明らかになった。今後、Ag-NMR を実現し、更に電子状態を明らかにしていく。(中大、北大、学習院大、理研、分子研との共同研究)

4) ラジカル導電性高分子

TEMPO (tetramethylpiperidinoxyl-radical) は、 $> \text{N-O} \cdot$ 型のフリーラジカルとして ESR の標準試料にも使われる安定な不対電子スピンを持つ分子である。このフリーラジカルを種々の π -共役高分子に組み込んだ系は、秒のオーダーで充放電が可能なラジカル 2 次電池の材料として有効である。京大・高分子専攻の増田研究室で合成された種々の TEMPO-高分子についてその 2 次電池としての性能を村田製作所の佐藤氏が検証してきた。これらの系は通常の 2 次電池と異なり、2 段階充放電することも明らかにされた。この機構を検討するために、電子の出入りを ESR で、Li イオンの移動を Li-NMR で、TEMPO 分子のカチオン、中性ラジカル、アニオンの存在を IR で、又、これらの結果を MOPAC を用いた分子軌道計算で調べた。その結果、TEMPO 分子から 2 つの電子が出入りする、2 電子過程により 2 段階放電していることを立証した。(京大(現福井工大)、村田製作所、日本化成との共同研究)

5) Au-TTFCl 錯体

TTF-Cl を含む TTF ハライド塩は、ハライドが混合原子価状態の時は金属的であることが知られており、ナノデバイスの要素として期待されている。最近 Au を含む一次元的有機金属ハイブリッドナノワイヤー、 $(\text{TTF-Cl}_y)\text{Au}_x$ が合成された。SQUID、Q 及び W バンド ESR の結果、Au は微粒子として混じっているのではなく、TTF カラム間の電荷移動に本質的に関わっている可能性が示唆された。今年度は、W バンド ESR のパウダーパターンの温度変化から電子のホッピング率を見積ったところ、Au を含む試料の方がホッピング率が大きいことが示された。これは前記可能性を指示する結果である。(京都工繊大、分子研との共同研究)

2. 研究業績

1) 論文

J. Qu, R. Morita, M. Satoh, J. Wada, F. Terakura, K. Mizoguchi, N. Ogata, and T. Masuda: Synthesis and Properties of DNA Complexes Containing 2,2,6,6-Tetramethyl-1-piperidinoxy (TEMPO) Moieties as Organic Radical Battery Materials, *Chem. Eur. J.* **14**, 3250-3259 (2008).

T. Katsumata, J. Qu, M. Shiotsuki, M. Satoh, J. Wada, J. Igarashi, K. Mizoguchi, and T. Masuda: Synthesis, Characterization, and Charge/Discharge Properties of Polynorbornenes Carrying 2,2,6,6-Tetramethylpiperidine-1-oxyl Radicals at High Density, *Macromolecules* **41**, 1175-1183 (2008).

2) 国際会議報告

K. Mizoguchi: Physical properties of natural DNA and metal ion inserted M-DNA, *SPIE* **7040**, 70400Q (70401-70409) (2008).

3) 学会講演

日本物理学会 第 63 回年次大会 2008 年 3 月 22 日 - 3 月 26 日 (近畿大学)

遠藤航, 坂本浩一, 溝口憲治, 谷口弘三, 竹下直, 寺倉千恵子, 高木英典, 十倉好紀: β -(BEDT-TTF) $_2$ ICl $_2$ の圧力下 ESR V

加藤朝飛, 木原工, 溝口憲治, 坂本浩一, 今野信一, 風間重雄, 谷口弘三, 中村敏和, 古川貢: β -及び β' -(BEDT-TTF)(TCNQ) の ESR

藤田義人, 風間重雄, 溝口憲治, 坂本浩一, 中村敏和, 古川貢, 長谷川達生: ESR による Alkali-TCNQ の電子状態の研究 III

坂本浩一, 溝口憲治, 中建介, 中村敏和, 古川貢: (TTF-Cl $_y$)Au $_x$ の電子状態

永鳥舞, 溝口憲治, 坂本浩一, 尾島雅也, 射場はるか, 寺倉史晃, 風間重雄: 金属をドーピングした DNA の電子状態の湿度依存性 2

尾島雅也, 溝口憲治, 坂本浩一, 永鳥舞, 寺倉史晃, 臼井英正, 射場はるか, 田中俊輔, 風間重雄: 金属をドーピングした DNA の電子状態 III

寺倉史晃, 風間重雄, 溝口憲治, 坂本浩一, 林泰之, 増田俊夫: DNA の電子スピン共鳴法による研究: Co - DNA と TEMPO - DNA の電子状態

日本物理学会 2008 年秋季大会 2008 年 9 月 20 日 - 9 月 23 日 (岩手大学)

永鳥舞, 溝口憲治, 坂本浩一, 尾島雅也, 射場はるか: 金属をドーピングした DNA の電子状態の湿度依存性 III

林泰之, 坂本浩一, 溝口憲治, 寺倉史晃, 風間重雄, 森田竜平, 増田俊夫, 芥川奈緒, 佐藤正春: 有機ラジカル二次電池の充放電機構

坂本浩一, 溝口憲治, 中建介, 中村敏和, 古川貢: (TTF-Cl $_y$)Au $_x$ の電子状態 II

荒木理美, 溝口憲治, 坂本浩一, 川本徹, D. Mihailovic, A. Omerzu, 徳本圓: TDAE - C 60 の有機強磁性に対する一軸歪み効果

鈴木美香, 風間重雄, 溝口憲治, 坂本浩一, 内藤俊雄, 開康一, 高橋利宏, 加藤礼三: DCNQI 金属塩の NMR による電子状態

国際会議

International Conference of Science and Technology on Synthetic Metals (ICSM 2008),
Lecife-PE, Brazil, July. 6-11

Mai Nagatori, Masaya Ojima, Hidemasa Usui, Hirokazu Sakamoto, Kenji Mizoguchi: Electronic states of metal-ion doped DNA

Hiroyuki Hayashi, K.Mizoguchi, H. Sakamoto, J. Igarashi, F. Terakura, S. Kazama, T. Masuda, R. Morita, N. Akutagawa, M. Satoh: Charge and Discharge mechanism of Organic radical battery

Hirokazu Sakamoto, Wataru Endo, Kenji Mizoguchi, Hiromi Taniguchi, Nao Takeshita : Preparation of a new ESR system with a cubic anvil cell and its application to study of the electronic states of (BEDT-TTF)₂ICl₂

Kenji Mizoguchi, Asahi Kato, Takumi Kihara, Hirokazu Sakamoto, Hiromi Taniguchi, Kou Furukawa, Toshikazu Nakamura, Hiroshi M. Yamamoto, Reizo Kato : Electronic States of ' and '-(BEDT-TTF)(TCNQ) under ambient and pressure

Nanobiosystems: Processing, Characterization, and Applications, SPIE Optics+Photonics, SanDiego, USA, Aug. 10-14

K. Mizoguchi : Physical properties of natural DNA and metal ion inserted M-DNA (Invited Talk)

The 18th Iketani Conference, Yumebutai, Awaji, Hyogo, Oct. 21-23

Hidemasa Usui, Masaya Ojima, Mai Nagatori, Makoto Tsuburaya, Hirokazu Sakamoto, Kenji Mizoguchi : Peculiar Structures of DNA and M-DNA on HOPG by Scanning Probe Microscope

16th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM16), Atagawa, Shizuoka Dec. 11-13

Hidemasa Usui, Mai Nagatori, Makoto Tsuburaya, Yuzuru Shibata, Hirokazu Sakamoto, Kenji Mizoguchi : Peculiar Structures of DNA on HOPG by Scanning Probe Microscope

4) 学会誌等

有機材料として見た天然および金属イオンを導入した DNA の電子状態 : 溝口憲治 次世代共役ポリマーの超階層制御と革新機能 (シーエムシー出版、東京、2008) p.352-357

編集後記

宮原先生は偉大だ！学生達の個性は強烈だ！これが、私が今大きく感じる二つのことである。4月より着任し、もうすぐ2ヶ月となる。多くの人に対する感謝の思いがある。しかし、この編集後記を書くにあたり、今、率直に感じるのがこの冒頭の2点についてである。最初の1点に関しては、この原稿を書く一昨日に行われた、物理学教室懇親会での経験がもとになっている。その懇親会において、この3月末にご退職された宮原先生とお酒を飲む機会を頂いた。そこで宮原先生より様々なお話を聞く機会を得た。インフルエンザウイルスのワクチンの作り方、伝説的な先生方の武勇伝やこぼれ話、南部先生ノーベル賞受賞の背景、そしてもちろん物理の話等々、あらゆる分野について、理路整然とした大変内容の濃い話を頂いた。スペイン風邪の原因が鳥インフルエンザだと分かった理由を皆さんご存知だろうか？それは、永久凍土に埋もれていたその当時のロシア兵の遺体を検査した結果であるそうだ。この話など、シベリアの永遠に凍った大地が思い浮かぶロマンに満ちた話であった。その幅広い学識とその人柄に私はとても感銘を受けた。それが冒頭の言葉となっており、そしてこの感銘したことは常に心に意識していくべきと感じた。もうひとつのほうは、現在、学生に接していて常に感じることである。私が以前働いていた研究所では、その所柄、働いている人の方向性は大体同じ方向を向いていた。しかしながら、ここで接する学生達は、趣味・生活習慣・将来の目標などが全て一人一人独自の方向に向いており、強烈な個性の持ち主たちである。

この強烈な学生達と先生方が、物理学教室という場において、昨年度その情熱を傾けて生まれたものがこの年次報告に書かれてある。そう思って読むと、熱いものを感じる。そして、私もここで本当に良いものを生み出したいと素直に思う。懇親会では話に引き込まれついつい酒を飲みすぎてしまい、次の日の朝は頭が痛い状況に私はなってしまったが、そのような場合では無いのである。

(柳和宏 記)

平成 20 年度年次報告編集委員

鈴木徹 (2008 年度教室主任)

佐藤英行

柳和宏

田中篤司