

サブグループ活動状況 平成 18 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

以下に素粒子理論サブグループの研究活動を (1-8):ニュートリノ物理の現象論、(9, 10):それ以外の研究項目の順序で記述する。

1) 神岡・韓国 2 検出器系 (T2KK) による (2-3) 角パラメータ縮退の分解 (南方)

昨年度の研究において、東海村に建設中の Japan Accelerator Research Complex (J-PARC) からのニュートリノビームをそれぞれ 0.5 メガトンの水体積を持つ神岡・韓国に設置された同一 2 検出器系によって受ける設定 (Tokai-to-Kamioka-Korea、略して T2KK と呼ばれる) によって、ニュートリノ質量パターン (質量階層性) とレプトン CP 位相の同時決定が可能であることを示した。これはこの設定が南方・布川によって発見された質量階層性に関するパラメータ縮退を分解できることによって可能となった。今年度はこの研究を継続し、T2KK によって残された (2-3) 角にまつわるパラメータ縮退を分解できるかどうかを検討した。韓国検出器は約 1000 km の基線長を持ち、さらに J-PARC からのニュートリノビームが低エネルギー (ピーク値 0.7 GeV) をもつことの二つの理由から太陽ニュートリノ振動に感度がある。この太陽振動項は係数に s_{23}^2 をもつ大気振動項と異なり、係数 c_{23}^2 に比例する。この特徴を利用し、神岡・韓国の検出器が太陽項に対して感度が違うことを使って 2 検出器の比較によって太陽項の効果を取り出し、(2-3) 角パラメータ縮退の分解が可能であることを示した。

この 2 年間の研究によって、(1-3) 角が次世代の加速器・原子炉実験によって探索できる範囲にある限り、T2KK は全てのニュートリノパラメータ 8 重縮退を分解する能力を備えていることが示された。神岡・韓国 2 検出器系のアイデアは今や国際的に認知された存在で、2005 年 11 月に行われた第 1 回に引き続き、2006 年 7 月 13-14 日の両日ソウル国立大学において第 2 回 T2KK 国際ワークショップが開催された。(東大宇宙線研 梶田隆章氏、中山昭英氏、およびリオデジャネイロカトリック大学 布川弘志氏との共同研究)

2) 原子炉実験と T2K 加速器実験の組み合わせによる 2-3 角パラメータ縮退の分解法 (南方)

2-3 角パラメータ縮退を分解する方法は T2KK のように太陽項を特定する方法が唯一ではない。2003 年に南方・杉山・安田・井上・末包は原子炉 1-3 角実験を提案すると同時に、これと加速器ニュートリノ実験の組み合わせによって 2-3 角パラメータ縮退の分解が可能であることを指摘した。この提案に依拠して、T2K 実験の実験家の参加を得てこの詳細なシミュレーション結果と整合的な解析コードを開発し、2-3 角縮退の分解能力があるパラメータ領域の精密な評価を行った。この結果、この方法が $\sin^2 2\theta_{13} = 0.5 - 0.6$ の比較的大きな 1-3 角の領域で知られている限りでの既存の全ての方法を上回る縮退分解能力をもつ事を明らかにした。(京都大学 中家剛氏、平出克樹氏、素粒子原子核研究所 杉山弘晃氏、リオデジャネイロカトリック大学 布川弘志氏、およびサンパウロ大学 R. Zukanovich-Funchal 氏、W. J. C. Teves 氏との共同研究)

3) ニュートリノ振動による新しい物理の探求 (安田・北澤)

標準模型を超える新しい物理をニュートリノを通して研究するために、現象論的にフェルミオンの 4 体有効相互作用を仮定し、このニュートリノ振動に与える影響を考察する試みがここ数年、世界中で行われている。我がサブグループでも、昨年度からこの研究に取り組んでいて、ニュートリノの伝播中における新しい物理の効果が存在する場合、現在進行中のアメリカの MINOS 実験 ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$) で、標準的なニュートリノ振動では説明できない大きな振動確率が観測される可能性があることを指摘した。今年度の研究では、新しい物理で説明される有意性を、新しい物理のパラメータの値の関数として求

め、そのパラメーターの値が現在他の実験で制限されている上限値近くにあり、かつパラメーターの位相が運の悪い値にない場合には、MINOS 実験で新しい物理による効果が存在することを言える可能性があることを示した。(高エネルギー加速器研究機構 杉山弘晃氏との共同研究)

4) ニュートリノファクトリーにおけるユニタリー性の破れの探求 (安田)

標準模型を超える物理が存在する場合、3世代の枠組みでユニタリー性の破れと解釈されるような現象が起こりうる。そのような可能性のうち、最も簡潔な場合(標準模型でニュートリノに関する部分に非ユニタリー性の源が存在し、かつ3種類の軽いニュートリノのみがある場合)について、将来のニュートリノファクトリーにおけるニュートリノ振動実験においてユニタリー性の破れが測定できるかどうかを吟味した。基線の長さ 100km で $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ のチャンネルを測定すれば、ユニタリー性の破れのパラメーターの位相が測定できる可能性があることを示した。この研究では、木村-高村-横枕の方法を拡張して得られた振動確率の近距離の極限の展開による解析的方法と、近似を使わない数値的方法を用いたが、ともに同じ結論を与えている。(マドリッド自治大学の Fernandez Martinez 氏、Gavela 氏、Lopez Pavon 氏との共同研究)

5) 近似的 $\mu - \tau$ 対称性からのニュートリノ混合角への示唆 (婦木)

ニュートリノ振動実験の結果から混合角 θ_{13} が他の混合角 θ_{12} 、 θ_{23} に比べて非常に小さく、太陽ニュートリノの質量二乗差 Δm_{\odot}^2 が大気ニュートリノの質量二乗差 Δm_{atm}^2 に比べて非常に小さい事が分かっている。この小さな混合角と質量二乗差の比の起源はニュートリノ質量を生成する物理を考えると興味深い。小さな混合角の起源として近似的 $\mu - \tau$ 対称性が知られていたが、CP 位相がない場合についてはあるが、一般的な解析をする事により小さな質量二乗差の比を与えるこれまで知られていなかった新しい解を得た。また、この別解において成り立つ混合角間の関係式があることを示した。さらに、電子数保存則の微小な破れをがあるときは小さな混合角 θ_{13} と小さな質量二乗差の比が同時に導かれる可能性があることを明らかにした。(東海大学 安江正樹氏との共同研究)

6) メスバウアー増幅された共鳴吸収反応による質量二乗差の測定精度 (南方・内波)

最近 Raghavan によって束縛ベータ崩壊 ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \text{orbital } e^- + \bar{\nu}_e$ からでる反電子ニュートリノを時間反転の関係にある共鳴吸収反応 $\bar{\nu}_e + {}^3\text{He} + \text{orbital } e^- \rightarrow {}^3\text{H}$ によって観測する方法が提案されている。ビーム源のトリチウム、ターゲットのヘリウムの双方を冷却して結晶中に埋め込むことができれば、メスバウアー効果によって共鳴反応断面積が 10 桁も増幅されることから注目を浴びている。これにより 18.6 keV の単色エネルギーの反電子ニュートリノを使って基線長約 10 m の 1-3 角測定実験が可能であることになる。この実験が可能であるとすると、ビームの単色性によって大気振動の質量二乗差 Δm_{31}^2 の精密測定が可能になることを指摘した。この実験を想定し、かつ移動可能な検出器の存在を仮定して測定精度の精密な評価を行った。その結果、 $0.3 (\sin^2 2\theta_{13}/0.1)^{-1}\%$ (1σ CL) 程度の今までどの方法で得られたものよりも高い精度を達成できることが分った。また、この評価方法を確立するために安田・杉山等による統計的解析手法に従ってカイ二乗の解析的表式を求めた。

7) 二つの大気ニュートリノ振動の質量二乗差の精密測定による質量階層性の決定 (南方)

二つの大気ニュートリノ振動に関係した質量二乗差 (Δm_{31}^2 と Δm_{32}^2) の両方を精密に測定することによってニュートリノの質量階層性を決定できることが知られている。この原理に基づき、上記のメスバウアー増幅された共鳴吸収反応によって主に Δm_{31}^2 を、T2K II 実験によって主に Δm_{32}^2 を測定することを想定して質量階層性の決定感度の評価を行った。この両方の測定の系統誤差を 0.5%程度まで低減できれば、この決定が比較的大きな θ_{13} の領域において可能であることを指摘した。この質量階層性の決定法における定量的感度評価はこの我々が行ったものが初めてである。(リオデジャネイロカトリック大学

布川弘志氏、フェルミ国立加速器研究所 S. J. Parke 氏、およびサンパウロ大学 R. Zukanovich-Funchal 氏との共同研究)

8) ニュートリノファクトリーとスーパービームに関する国際検討調査 (安田)

2005年9月から2006年8月の間、ニュートリノファクトリーとスーパービームに関する国際検討調査 (International Scoping Study of a future neutrino factory and super-beam facility; 略して ISS) という活動が立ち上がり、過去日米欧で個別に行われていたニュートリノ研究の将来計画スタディを、国際的にかつ統一的に行う試みが行われた。ISSは物理、測定器、加速器の3部会よりなり、さらに物理部会は理論、現象論、実験、ミューオン物理の4小部会よりなっていた。安田は現象論小部会の世話人として、主として将来の大強度ニュートリノ長基線実験において、3種類の質量を持つニュートリノの標準模型からのずれを探る可能性について調査を行った。この物理部会の調査の結果は、近い将来報告書として公表される予定である。

9) 弦模型における電弱対称性の自発的破れ (北澤)

素粒子の質量は「電弱対称性の自発的破れ」に伴って「湯川相互作用」を通じて生成される。現在の素粒子物理学のもっとも重要な問題のひとつは、この「電弱対称性の自発的破れ」の機構の解明である。様々な機構が提案される中で、「電弱対称性の自発的破れ」が「必然的」に起きるようなものはきわめて少ない。これまで提案された「電弱対称性の自発的破れ」の機構のほとんどが場の量子論の枠内で提案されたものであることから、場の量子論の枠組みを越えて弦理論の枠組みでこの問題に取り組みれば、新たな解が見えてくると考えた。そこで、弦理論の枠組みで「電弱対称性の自発的破れ」を論じるべく、「超対称性のない特異点上のDブレーン」という系について調べた。具体的に非自明な「湯川相互作用」を実現している現実に近い模型を構成し、ヒッグス粒子の質量に対する量子補正の計算を試みた。量子補正の結果、ヒッグス粒子の質量の2乗が負になれば「電弱対称性の自発的破れ」が起きることになる。具体的な計算の結果、ヒッグス粒子の質量の2乗が負になる結果を得て、弦理論における輻射補正によって「必然的」に弦の張力のスケールで「電弱対称性の自発的破れ」が起きる機構を提案した。

10) NS-NS タドポール問題 (北澤)

超対称性のない弦模型においては「NS-NS タドポール問題」の解決が必要である。「NS-NS タドポール」が存在するということは真空からひとつの粒子が突然生成され得るということで、物理的には背景時空や背景場が正しい解になっていないことを意味する。この問題の発見は古く、根本的な解決はきわめて難しいが、A.Sagnotti 氏のグループが、真の真空を知らなくても「タドポール再足し上げ」という操作を行うことにより、真の真空での物理量を計算できることを場の理論の範囲で提案している。この「タドポール再足し上げ」を弦理論において実現するべく、まずボゾン弦理論のDブレーンにおいて実際に彼らの「タドポール再足し上げ」に相当する操作を考案し実行した。その結果、タドポールがあるときのもともとのDブレーンの真空のエネルギーと「タドポール再足し上げ」の寄与を加えると、Dブレーンの真空のエネルギーは合計でゼロになることを示すことができた。真の真空のエネルギーがゼロになることは、「タキオン凝縮」の議論によって示唆されているものである。この結果は、超弦に拡張する等、さらに検討すべきものである。(この研究はピサ高等師範学校の A.Sagnotti 氏と議論しつつ進めたものである。ローマ大学の G.Pradisi 氏とも議論し、アドバイスを受けた。)

2. 研究業績

1) 論文

K. Fuki, M. Yasue: What does $\mu - \tau$ symmetry imply in neutrino mixings? *Physical Review D* **73** (2006) 055014-1-8.

T. Kajita, H. Minakata, S. Nakayama, and H. Nunokawa: Resolving Eight-Fold Neutrino Parameter Degeneracy by Two Identical Detectors with Different Baselines, *Physical Review D*, **75** (2007) 013006-1-12.

N. Kitazawa, Radiative Symmetry Breaking on D-branes at Non-supersymmetric Singularities, *Nuclear Physics* **B755** (2006) 254-271.

H. Minakata, H. Nunokawa, S. J. Parke, and R. Zukanovich Funchal: Determining Neutrino Mass Hierarchy by Precision Measurements in Electron and Muon Neutrino Disappearance Experiments, *Physical Review D* **74** (2006) 053008-1-8.

H. Minakata and S. Uchinami: Recoilless Resonant Absorption of Monochromatic Neutrino Beam for Measuring Δm_{31}^2 and θ_{13} , *New Journal of Physics* **8** (2006) 143-1-23.

K. Hiraide, H. Minakata, T. Nakaya, H. Nunokawa, H. Sugiyama, W. J. C. Teves and R. Zukanovich Funchal: Resolving θ_{23} Degeneracy by Accelerator and Reactor Neutrino Oscillation Experiments, *Physical Review D* **73** (2006) 093008-1-13.

2) 国際会議報告

T. Kajita, M. Ishitsuka, H. Minakata and H. Nunokawa: Resolving mass hierarchy and CP degeneracy by two identical detectors in Kamioka and Korea, *Journal of Physics Conference Series* **39** (2006) 332-334.

N. Kitazawa: Electroweak Symmetry Breaking in TeV-scale String Models, *AIP Conference Proceedings* **881** (2007) 73-81.

H. Minakata: Do Neutrinos Violate CP?, *Venice 2006, Neutrino oscillations*, pp 49-63.

H. Minakata: Resolving Degeneracy in Neutrino Oscillation Parameters, *Physica Scripta T* **127** (2006) 73-77.

H. Minakata, H. Nunokawa, S. J. Parke, and R. Zukanovich Funchal: Determining ν Mass Hierarchy by Precise Measurements of two Δm^2 in ν_e and ν_μ Disappearance Experiments, *Physica Scripta T* **127** (2006) 33-34.

H. Minakata: Neutrinos: Opportunities and strategies in the future, Proceedings of International Conference on Heavy Quarks and Leptons (HQL 06), pp 523-556, Munich, Germany, 16-20 Oct 2006, eConf C0610161, 036, 2007.

3) 学会講演

日本物理学会第 61 回年次大会 2006 年 3 月 27 日 ~ 3 月 30 日 (愛媛大学)

婦木健一 : $\mu - \tau$ 対称性の破れからの帰結とニュートリノ混合

日米及び環太平洋地域 2006 ハワイ素粒子物理学会 2006 年 10 月 29 日 ~ 11 月 3 日
(ハワイ、ホノルル、シェラトンワイキキホテル)

T. Kajita, H. Minakata, S. Nakayama, and H. Nunokawa: T2KK Solves 8-fold Parameter Degeneracy

S. Uchinami and H. Minakata: Recoilless Resonant Absorption of Monochromatic Neutrino Beam for Measuring Δm_{31}^2 and θ_{13}

国内研究会

素粒子物理学の進展 2006 :

2006 年 7 月 31 日-8 月 3 日 (京都大学基礎物理学研究所)

安田修 : ニュートリノ振動研究の現在と未来 (招待講演)

婦木健一 : 近似的 $\mu - \tau$ 対称性とニュートリノ振動 (ポスター発表)

第 20 回宇宙ニュートリノ研究会 2007 年 2 月 20 日 (東京大学宇宙線研究所)

内波生一 : 地球の物質密度測定を使う MSW 理論のテスト

Graduate Lectures in Sapporo & Winter School in Niseko '06
2006 年 3 月 5-7 日 (北海道 ニセコ憩いの村)

婦木健一 : What Does $\mu - \tau$ Symmetry Imply Neutrino Mixing? (ポスター発表)

国際会議

3rd International Scoping Study Meeting of Neutrino Factory and Super-beam Facility,
Rutherford Appleton Laboratory, Didcot, UK, April 25-27, 2006

O. Yasuda: Model independent analysis of new physics interactions and implications for long baseline experiments,

2nd Scandinavian Neutrino Workshop (SNOW2006)

AlbaNova University Center, Stockholm, Sweden, May 2-6 2006

H. Minakata: Resolving Degeneracy in Neutrino Oscillation Parameters (Invited talk)

H. Minakata, H. Nunokawa, S. J. Parke, and R. Zukanovich Funchal: Determining ν Mass Hierarchy by Precise Measurements of two Δm^2 in ν_e and ν_μ Disappearance Experiments

2nd World Summit on Physics "Beyond the Standard Model"

Galapagos Islands, Ecuador, June 22-25, 2006

H. Minakata: Neutrinos; Future Opportunities (Invited talk)

2nd International Workshop on a Far Detector in Korea for the J-PARC Neutrino Beam
Seoul National University, Seoul, Korea, July 13 - 14. 2006

H. Minakata: T2KK Solves 8-fold Parameter Degeneracy (Invited talk)

6th Rencontres du Vietnam, Challenges in Particle Astrophysics
Hanoi, Vietnam, August 6-12, 2006

H. Minakata: T2KK Solves All the Neutrino Parameter Degeneracy

4th International Scoping Study Meeting of Neutrino Factory and Super-beam Facility,
University of California, Irvine, USA, August 21-23, 2006

O. Yasuda: Summary of Phenomenology Subgroup (Invited talk)

8th International Workshop on the Neutrino Factories, Superbeams, and Beta Beams
University of California, Irvine, USA, August 24-30, 2006

H. Minakata: Getting the Most from Neutrino Oscillation Experiments (Invited talk)

H. Minakata, H. Nunokawa, S. J. Parke, and R. Zukanovich Funchal: Determining the Neutrino Mass Hierarchy by Precise Measurements in Disappearance Experiments

O. Yasuda: Summary of WG1 (Theoretical Part) (Invited talk)

International Conference “Heavy Quarks and Lepton
Munich, Germany, October 16-20, 2006

H. Minakata: Strategy of Neutrino Experiments (Invited talk)

International Workshop on “Origin of Mass and Strong Coupling Gauge Theories
Nagoya, Japan, 21-24 November 2006

N. Kitazawa: Radiative Electroweak Symmetry Breaking in TeV-Scale String Models

International Workshop on Neutrino Masses and Mixings – Toward Unified Understanding of
Quark and Lepton Mass Matrices, Shizuoka, Japan, December 17-19, 2006

H. Minakata: Neutrinos; Looking Forward to the Future (Invited talk)

XII International Workshop on Neutrino Telescopes, Istituto Veneto di Scienze
Lettere ed Arti, Venice, Italy, March 6-9, 2007

H. Minakata: Measuring Earth Matter Density and Testing the MSW Theory (Invited talk)

A topical conference on elementary particle physics and cosmology,
Coral Gables and Key Biscayne, Florida, USA, December 15 - 19, 2006

O. Yasuda: Possibility to probe new physics in the future long baseline neutrino experiments (Invited talk)

4) 学会誌等

田村詔生、末包文彦、安田修：原子炉を用いたニュートリノ混合角 θ_{13} の精密測定
日本物理学会誌 **61** (2006) 799-806.

高エネルギー理論サブグループ

1. 研究活動の概要

Our research during the year 2006 was concentrated on two scientific projects. The first project is devoted to physical applications of the perturbative low-energy effective action of compactified type-II superstrings and M-theory to early cosmology and inflationary Universe. That research was financially supported by the JSPS grant (Kiban C) # 18540283 during the year. The second research project is devoted to formal studies of new models in the non-anti-commutative supersymmetric field theory. That research was done jointly in collaboration with the german team of Professor Olaf Lechtenfeld at Leibniz University in Hannover, Germany, while it was financially supported in 2006 by the joint german-japanese grant from JSPS (= Japanese Society for Promotion of Science) and DFG (= Deutsche Forschungsgemeinschaft).

1) コンパクト化されたタイプ II 型超弦理論とM理論の低エネルギー有効理論

We found a new family of non-separable coordinate transformations bringing the standard Friedman-Robertson-Walker (FRW) metrics (describing a large-scale structure of a time-dependent Universe) into the manifestly conformally flat form. We also calculated all the FRW curvatures, including the Weyl tensor. We found by a direct calculation that the Weyl tensor of any FRW Universe vanishes.

After the FRW metric is brought into the conformally flat form, there exist the 15-parametric group of four-dimensional conformal transformations that keeps the conformally flat form of the metric. Therefore, the one-parametric transformations found can be combined with the conformal transformations in four space-time dimensions, in order to get a much larger non-trivial 16-parametric family of the coordinate transformations bringing the standard FRW metrics to the manifestly conformally-flat form.

Our results are going to have interesting physical applications in cosmology and early Universe, because the FRW metrics are fully determined (up to a scale factor) by the symmetry, being independent upon equations of motion. All modern theories of quantum gravity, and especially string theory imply modifications of Einstein equations, while they are going to include the higher-curvature (or higher-derivative) terms in the effective gravitational equations of motion. Those equations include the full curvature, not just the Ricci tensor, so that all the FRW curvature components we found are needed.

The FRW curvatures take their simplest form in the ‘conformally flat’ coordinates, but it comes with the price: in such coordinates the matter is not static anymore and is not even homogeneous in general, though it still appears to be centrally-symmetric with respect to an arbitrary point in space.

2) 非可換超対称場の理論

We constructed a new supergravity model in an arbitrary (non-constant) self-dual gravi-photon background, in four Euclidean bosonic dimensions. It was achieved by freezing out the gravi-photon field strength in the standard $N=(1,1)$ extended supergravity with two non-chiral gravitini. Our model has a local $N=1/2$ supersymmetry, being the first model of that type. Consistency of our model requires the background gravi-photon field strength to be equal to the self-dual (bilinear) anti-chiral gravitino condensate.

2. 研究業績

1) 論文

T. Hatanaka and S.V. Ketov: C-deformation of supergravity, *Class. Quantum Grav.* 23 (2006) L45–L50.

M. Irisawa, Y. Kobayashi and S. Sasaki: Drinfel'd twisted superconformal algebra and structure of unbroken symmetries, hep-th/0606207; to appear in *Progr. Theor. Phys.* (2007)

2) 学会講演

国際会議

Our subgroup hosted and organized the International Workshop on "Non-commutativity in Strings, Gravity and Field Theory", at Tokyo Metropolitan University, in November 16–18, 2006. The total number of participants were 30, while 10 participants came to us from the overseas countries: from Germany (5), from USA (2), from France (1), Spain (1) and Sweden (1). Our subgroup was represented by the talks given by the doctor-course students, T. Hatanaka and M. Irisawa, based on the publications above.

原子核理論研究室

1. 研究活動の概要

1) ウェーブレットを用いた強度関数の分析

原子核の高励起状態は集団状態と多数の核子の自由度が関与する無秩序な状態を併せ持ち、それらの結合の仕方にはある種の階層性があるために、巨大共鳴領域の強度関数は異なるエネルギースケールごとに異なるゆらぎ構造を持つ。このゆらぎを分析するためのアプローチとしてウェーブレット解析、特にその一手法である WTMM(ウェーブレット変換絶対値最大法) を用いた方法を検討した。WTMM は与えられた関数の自己相似的構造を強調し、大スケールにおける大域的構造と小スケールにおける微細構造を段階的に捉えることができる。本研究では比較的簡単な構造を持つ強度関数のモデルに対してウェーブレット変換を施し、WTMM の分岐構造に着目することによって強度関数の構造の特徴づけを行った。またウェーブレット解析の結果に準位統計の手法を援用することで、異なるスケールでのゆらぎの特徴を取り出せる可能性を示した。

2) 極低温原子気体の静的・動的性質の研究

トラップで閉じこめられた極低温原子気体は、有限な量子多体系として原子核との共通性が多い。様々な外部パラメータを制御しやすいことは原子気体の特徴であり、とりわけ磁場を変化させて粒子間相互作用をあやつることによって、量子多体系の様々な問題への新しいアプローチが可能になって来ている。我々はとくにボソンやフェルミオンの種々の混合気体の特徴を、基底状態の種々の相や安定性・粒子間相関・集団励起などに注目して研究している。

a) 変形捕獲ポテンシャル中の極低温 2 成分原子気体の理論的研究

球形調和振動子ポテンシャルから大きく変形した捕獲ポテンシャル中の極低温 2 成分原子気体の物理を理論的に研究した。変形は量子気体の集団運動に大きな影響を与え、その動的な振る舞いは時間発展平均場近似により記述されて、スケーリング法により単純化される。本研究では、それらの微小振動を様々な環境において詳細に調べることにより、変形による単極子振動と四重極子振動の混合の移り変わり、大きな変形における 3 次元気体から擬低次元気体への移り変わり等の現象を明らかにした。

b) ボソン・フェルミオン (B F) 混合原子気体系における P 波-超流動状態と相分離

B F 混合原子気体系においては、金属中の電子・フォノン系のように、ボソン原子の密度揺らぎがフェルミオン間に引力を生み出して、フェルミ系の超流動を引き起こすことが期待される。この機構は B F 間相互作用が斥力でも成立するが、その場合には、系がボソン相とフェルミオン相に分離する相分離現象も存在し得る。

我々はスピン偏極した B F 混合原子気体系 (フェルミ対は P 波となる) を考え、超流動状態と相分離状態の競合について調べた。まず B F 原子間に斥力がはたらくモデルハミルトニアンから、超流動転移に寄与するフェルミオンの有効ハミルトニアンを導出し、ギャップ方程式を解いて、超流動転移の条件と特徴を調べた。また、超流動状態における自由エネルギーを計算し、系の相構造に与える影響について調べた。その結果、弱結合状態においては相分離することで系が安定化するのに対し、対相関が強くなるとともに P 波-超流動相が出現することがわかった。

c) 極低温原子気体系での分子形成における化学平衡

極低温原子気体系において 2 原子分子を形成した時の化学平衡状態を、粒子間散乱による背景エネルギーの寄与に焦点をあてて理論的に研究した。まず理想混合量子気体の化学平衡状態は、原子の量子統計

性から決まる運動エネルギーの損得と分子の束縛（共鳴）エネルギーとの均衡により、簡単に記述できる。これに粒子間散乱の背景エネルギーが加わると、系の様相は複雑化し、複数の化学平衡状態が発生する等の現象が起こる。本研究では、それらの様相を様々な環境において網羅的に記述することで系の巨視的な振る舞いの全貌を明らかにした。

d) B F 混合原子気体における複合粒子対形成と運動量分布

昨年に引き続き、ボソン・フェルミオン間に分離型相互作用が働くハミルトニアンに基づいて、一様 B F 混合系における二体散乱方程式の解とそれに基づく B F 複合粒子対の形成過程を調べた。とくに、二体グリーン関数のスペクトル表示を利用して得られたフェルミ粒子状態の占有確率（運動量分布）が、新たなフェルミ面を形成する過程を詳しく調べた。これにより、占有確率のフェルミ運動量以上の成分が、B F 対相関による複合粒子励起からの寄与である事が分かった。この段階では混合系中に多くの B F 対が形成される強い相関の領域には適用できない。このため、上の二体散乱方程式を運動方程式として含み正確に解くことのできるモデルを構築した。

e) ユニタリ極限近傍における B F 混合原子気体の不安定性

B F 混合原子気体において B F 間に引力が働く場合には、粒子密度が大きくなるときの系の崩壊現象が実験的に示唆されている。近年になって B F 間のフェッシュバツハ共鳴が観測され、このような異核種粒子間の相互作用の強さの制御が可能になってきたため、近い将来に相互作用を変化させて崩壊現象の詳細な実験的研究が期待される。そこで我々は、粒子間の散乱長が大きくなる強相関領域での崩壊に対する不安定性を理論的に研究した。まず系のエネルギーと密度をダイアグラムを用いて計算することにより、フェルミ粒子に対して、ボーズ粒子の密度が大きいとき、また、質量が小さいときに、不安定性が強く現れてくることを見出した。また、ボーズ粒子の密度が小さいときには、ボーズ粒子とフェルミ粒子による分子が形成され、崩壊とは異なった転移現象を引き起こす可能性があることがわかった。

2. 研究業績

1) 論文

T.Maruyama and T.Nishimura:

Coupled breathing oscillations of two-component fermion condensates in deformed traps
*Phys.Rev.***A75** (2007) 033611.

H.Aiba and T.Suzuki:

Analysis of the Nodal Structure for a Nonintegrable Two-Dimensional Quartic Oscillator
J.Kor.Phys.Soc. **50** (2007) 191-195.

2) 学会講演

日本物理学会「第 6 1 回年次大会」 2006 年 3 月 27-30 日（愛媛大学・松山大学）

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強度関数のゆらぎ

西村拓史、藪博之、鈴木徹、P.Schuck：Boson-Fermion 混在原子気体における Feshbach 共鳴点周辺の物理 2 自己無矛盾の計算

鈴木和典、藪博之、鈴木徹：有限ボース・フェルミ混合原子気体系の不安定性に対する複合フェルミオンの効果

日本物理学会「2006 年秋季大会」 2006 年 9 月 20-23 日（奈良女子大学）

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強度関数のゆらぎ II

日本物理学会「2006年秋季大会」 2006年9月23-26日(千葉大学西千葉キャンパス)

渡辺隆之、鈴木徹：ユニタリ - 極限に2成分原子気体のふるまい

基研研究会「熱場の量子論とその応用」 2006年8月23-25日(京都大学基礎物理学研究所)

西村拓史：複合フェルミ粒子経路フェシュバツハ共鳴を有する極低温原子気体

立命館ワークショップ「凝縮物質系におけるトポロジーの役割とその応用」

2007年3月15,16日(立命館大学)

鈴木徹：強度関数のゆらぎの指標について

国際会議

2nd German-Japanese Workshop on Nuclear Structure and Astrophysics

Oct.4-7,2006 (RIKEN, Japan)

H. Aiba, M.Matsuo, S.Nishizaki and T.Suzuki: Fluctuation of the strength function of giant resonances: A comparison of light and heavy nuclei

Int.Conf. on Quantum Mechanics and Chaos Sept.19-21,2006 (Osaka City Univ., Japan)

H. Aiba, T. Suzuki: Statistical Properties of the Nodal Domains for a Nonintegrable Two-Dimensional Quartic Oscillator

宇宙物理理論サブグループ

1. 研究活動の概要

宇宙理論サブグループでは、高エネルギー天体現象、銀河・銀河団の形成と進化、宇宙プラズマの基礎的物理過程の3つを大きなテーマとして、様々な天体を対象に理論的研究を進めている。以下は、2006年度に行った主な研究の概要である。

1) 銀河団の熱的・力学的進化

ガスの放射冷却に伴って銀河団の力学平衡は変化していくと考えられる。ダークマター・銀河をN体計算、ガスを3次元流体 (SPH) 計算するコードを用いて、初期にビリアル平衡にある銀河団の進化をシミュレーションし、放射冷却の下での質量分布の研究を行った。時間の経過とともに放射冷却によって小さなコア半径の重力平衡に移行 (準静水圧平衡) していくトラックを調べ、ガスの温度分布、コアのガス質量比を求めて観測結果との比較を行った。

2) 銀河団-銀河群衝突と粒子加速

現在観測される銀河団は、少なからず、重力コラプスを経てビリアル平衡に至るといった単純な形成・進化を辿ったのではなく、進化の過程で小規模銀河群などとの衝突・合体を経ていると考えられる。その際のダークマターやガスの運動、衝撃波の振る舞いなどを調べることを目的として、N体+3次元流体シミュレーションによる予備的研究を行った。また、衝撃波面による1次のオーダーの粒子加速、衝撃波の通過後に残される不規則な磁場による2次のオーダーの加速の可能性について研究を行った。

3) 宇宙の大規模構造における解析的質量分布関数

密度ゆらぎの成長による質量分布の研究において、N体シミュレーションが非線形効果を調べるのに有効である一方、解析的な質量分布関数は関連分野の研究に応用しやすいという利点をもつ。後者の代表的なものに、線形成長に基づいた Press-Schechter 分布関数があるが、ゆらぎ分布として与えた Gauss 分布の定義域が物理的意味のない領域まで含んでいる不自然さがある。このことに起因する適用限界を評価するとともに、ゆらぎが比較的小さい段階で既に Gauss 分布から外れむしる Gamma 分布に近いというシミュレーション結果を参考にして、Gamma 分布に基づく解析的質量分布関数を導出した。

4) 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

N. Ota, T. Kitayama, K. Masai and M. Mitsuda: $L_X - T$ Relation and Related Properties of Galaxy Clusters, *Astrophys. J.* **640** (2006) 673-690.

T. Akahori and K. Masai: Core Structure of Intracluster Gas: Effects of Radiative Cooling on Core Sizes, *Publ. Astron. Soc. Japan* **58** (2006) 521-527.

M. Shimizu, T. Kitayama, S. Sasaki and Y. Suto: Systematic Bias in an Estimate of the Cluster Mass and the Fluctuation Amplitude from Cluster Statistics, *Publ. Astron. Soc. Japan* **58** (2006) 291-297.

K. Yoshikawa and S. Sasaki: Non-Equilibrium Ionization State of Warm-Hot Intergalactic Medium, *Publ. Astron. Soc. Jpana* **58** (2006) 641-656.

H. Kawahara, K. Yoshikawa, S. Sasaki, Y. Suto, N. Kawai, K. Mitsuda, T. Ohashi, N. Yamasaki: Soft X-ray Transmission Spectroscopy of Warm/Hot Intergalactic Medium with XEUS, *Publ. Astron. Soc. Japan* **58** (2006) 657-671.

2) 学会講演

日本天文学会 2006 年春季年会, 2006 年 3 月 27 日-29 日 (和歌山大学)

赤堀卓也, 政井邦昭: 銀河団ガスのコア構造: ガス分布の熱的進化とダークマター分布の影響

日本地球惑星科学連合 2006 年大会, 2006 年 5 月 14 日-18 日 (幕張メッセ)

政井邦昭: 高エネルギー宇宙プラズマの放射過程

日本天文学会 2006 年秋季年会, 2006 年 9 月 19 日-21 日 (九州国際大学)

赤堀卓也, 政井邦昭: 銀河団ガスのコア構造: ガス質量比の熱的進化と自己重力の影響

赤堀卓也: 小規模銀河群捕捉の流体シミュレーションに向けた SPH コードの最適化

国際会議

Heating vs. Cooling in Galaxies and Clusters of Galaxies, Garching, Germany, August 6-11, 2006

T. Akahori and K. Masai: Core Structure of Intracluster Gas: Effects of Radiative Cooling on Core Sizes

The 2nd East Asia Numerical Astrophysics Meeting, Daejeon, Korea, November 1-4, 2006

T. Akahori: Optimization of SPH for Numerical Simulation of Subcluster Acquisition in Formation of Galaxy Clusters

The Extreme Universe in the Suzaku Era, Kyoto, Japan, December 4-8, 2006

K. Masai: Suprathermal Electrons in Hot Interstellar/Intracluster Media

T. Akahori, N. Ota and K. Masai: Effects of Radiative Cooling on Core Sizes and Gas-Mass Fraction in Galaxy Clusters

EDGE General Meeting, CNR Headquater, Rome, Italy, December 19-21, 2006

Shin Sasaki: Absorption line analysis of WHIM towards bright sources

ワークショップ・研究会

Korea-Japan Young Astronomers Meeting, Gyeongju, Korea, August 21-23, 2006

T. Akahori and K. Masai: Core Structure of Intracluster Gas: Thermal Evolution of Gas?Mass Fraction

第 19 回理論懇シンポジウム, 2006 年 12 月 25-27 日 (立教大学)

赤堀卓也: 銀河団ガスの放射冷却によるコア構造の進化

高エネルギー天体現象と粒子加速の理論, 2006 年 11 月 9-11 日 (大阪大学)

政井邦昭: 加速粒子のフィードバックとインジェクション

実験室宇宙物理学の創成, 2007 年 3 月 12-13 日 (大阪大学)

政井邦昭: 非平衡電離プラズマの原子過程, 輻射輸送

非線形物理サブグループ

1. 研究活動の概要

1) 量子多項式写像のストークス幾何学における新しいストークス曲線の役割

3階以上の微分方程式のWKB解析においては、従来から知られる転回点およびストークス曲線に加えて、仮想的転回点(当該微分方程式の陪特性曲線の自己交差点として定まる)と、そこから延びる新しいストークス線とがストークス幾何学の新しい構成要素として加わる。その妥当性は、近年の完全WKB解析の研究により明らかになった。これら仮想的転回点、新しいストークス線といった新しい対象が果たして物理現象として顕わに現れるものか?もし、現れるとすれば、どのような条件下で現れ、そしてその物理的意味は何か?といった問題はたいへん興味深くかつ重要である。本年度は、量子多項式写像におけるストークス幾何学を詳しく調べ、あるクラスの量子写像では新しいストークス曲線がストークス幾何学のなかに現れたとしても、その上での接続が起こり得ないことを示した。この範囲では、新しいストークス曲線は「物理的な現象」としては観測されないことを意味する。

2) 動的局在の無効化によるカオスのトンネル効果の顕在化

カオスの発生する非可積分系には、完全可積分系には存在しない非可積分系固有の量子現象が多くある。ランダム系のアンダーソン局在に類似した「動的局在現象」は位相空間(あるいは運動量空間)上でおこる波動関数の局在現象であり、非可積分系固有の量子効果としてよく知られる。また、カオス存在下でおこる多次元トンネル効果はカオスのトンネル効果と呼ばれるが、通常のトンネル効果とは多くの点で異なった性質をもつ。こういったカオス系固有の量子効果は、これまで、それぞれについての研究は盛んに行われたが、相互の関連についての踏み込んだ議論はあまりされなかった。われわれは、「両生固有状態」と呼ばれる非可積分系の新しい固有状態の発見に触発され、一昨年より動的局在とカオスのトンネル効果との間の関係の詳しい解析を開始した。今年度明らかになったことは、動的局在を無効化するほとんどすべての操作に対してカオスのトンネル確率が著しく増大すること、とくに、動的局在が起こらなくなる2次元系ではカオスのトンネル効果が大きく強調される数値計算結果を得た。

3) 混合位相空間をもつハミルトン系の再帰時間分布

非双曲的なハミルトン系ではしばしば遅い緩和現象が観測される。その発生機構や普遍則の存在については既に多くの議論がなされてきたところであるが、依然として単純な2自由度系ですら完全な理解に至っていない。緩和の様子を測る方法として相関関数やパワースペクトルが用いられることが多いが、経験上、カオス・トーラスの共存するハミルトン系では必ずしも最良の方法とは限らない。ここでは、再帰時間分布に注目し、中立周期点族を位相空間中にもつ、いくつかの簡単な2次元力学系に対し数値計算を行い、以下の点を明らかにした。1. 再帰時間分布は、再帰領域の位置・大きさに依存し、位相空間の非一様性を強く反映する。2. 中立周期点の族が位相空間に存在する場合でも、再帰領域の面積を小さくした極限で指数分布が現れる。指数分布は、双曲力学系(理想的なカオス系)において典型的に見られる再帰時間分布である。以上より、中立周期点の族をもつ系の従来よりの予想(再帰時間分布がべき則に従う)は再帰領域の有限サイズ効果によるものである可能性が示唆される。

4) 強レーザー場における分子のイオン化過程の半古典的定式化

強外場中における原子がイオン化する際の散乱行列の半古典論的定式化をおこない、またその散乱行列の数値計算に取り組んだ。本定式化により、摂動論では扱えない極めて大きな外場が非断熱的に印加されるような場合であっても、散乱行列を計算することができるようになった。また散乱行列の半古典

論的な数値計算のコストを大幅に削減したことにより、イオン化におけるカオスの影響を定量的に議論できるようになった。数値計算では最も単純な場合としてシングルパルスの外場を取り扱い、複数のトンネル過程が散乱行列に寄与することがわかった。

5) Rzażewski-Mostowski 写像の多準位への拡張

原子・分子中に束縛された電子の、時間変化する外場の下での挙動を単純化した記述として、外力の撃力近似が知られている。この近似の下では、系の時間発展写像を厳密に求めることが容易なため、数値実験上便利である。また、理論な興味のみならず、近年では量子写像系が実験的にも実現されている。束縛状態から連続状態への解離を記述するモデルの数値計算では、量子写像系においても、一般には、連続状態に関する truncation の問題から逃れることはできない。これに対して、Rzażewski と Mostowski は、この問題を克服する量子写像 (以下 RM 写像と呼ぶ) を導入した。

従来 of RM 写像では、近似的な束縛状態を記述する系は一準位のため、無解離の条件下の動力学は自明であった。ここに、非自明 (例えば chaotic) な動力学を導入するため、RM 写像を多準位へ拡張した。まず、これを定式化するため、準安定減衰の問題で有用な非直交基底を用いることで、RM 写像の新しい導出法を見いだした。この結果、RM 写像の多準位拡張のみならず、多 channel への拡張も自明となった。さらに、chaotic な系の減衰率に対して、線型応答理論 (cf. Fujisaki et al., 2003) を用いた理論的な評価を得た。これは、標準写像のような一般的な量子写像を埋め込んだ拡張 RM 写像の数値計算を定量的に説明する一方で、鋸歯写像を埋め込む系を説明しない。後者の解明が今後の課題として残っている。(宮本学氏 (早大理工) との共同研究)

6) 量子写像における全の anholonomy 達

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、動力学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 anholonomy (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、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 anholonomy は、幾何学的位相とは異なり、微分幾何学的でのホロノミーとしての解釈が確立していない (Wilczek-Zee 的な幾何学位相では無い) 一方で、パラメータに対して周期的な依存性を持つ系 (ハミルトニアン) の物理的理論的根幹を危ういものにする: 例えば、エネルギーバンドの波数依存性や、断熱ポテンシャル面の核の配位に関する一価性は、通例は疑問にすらならないが、全の anholonomy はこれらを壊してしまう。しかし、既知の、全の anholonomy を持つ系は、特異性を持つ potential と波動関数の非自明な接続条件を要求するため、実現が疑われる例のみであった。

これに対し、我々は、撃力的な周期外力系を使い、全の anholonomy を持つ系の系統的な構成法を示した。さらに、応用として、Farhi らの断熱量子計算の新しい実装を提案した。(宮本学氏 (早大理工) との共同研究)

2. 研究業績

1) 論文

H. Tanaka and A. Shudo: Recurrence time distribution in mushroom billiards with parabolic hat, *Phys. Rev. E* **74** (2006) 036211 (5 pages).

2) 学会講演

日本物理学会 第 61 回年次大会 2006 年 3 月 27 日-30 日 (愛媛大学・松山大学)

赤石暁, 奥島輝昭, 首藤啓: 箱の中の 2 剛体粒子系における緩和過程

石川明幸, 田中篤司, 首藤啓: トンネル現象と動的局在

宮本学, 田中篤司: Rzażewski-Mostowski 写像の spectrum 解析 (2)

日本物理学会 2006 年秋季大会 2006 年 9 月 23 日-26 日 (千葉大学)

赤石暁, 奥島輝昭, 首藤啓: 多体剛体粒子系における中立周期軌道族と長時間相関

石川明幸, 田中篤司, 首藤啓: 動的トンネル現象におけるカオス領域の役割について

田中篤司, 宮本学: Rzażewski-Mostowski 写像の多準位への拡張,

国内研究会

特定領域研究「強レーザー光子場における分子制御」研究成果報告会, 2006 年 9 月 14 日-16 日, 東京大学本郷キャンパス

首藤啓: カオス系のトンネル軌道の特性について

大西孝明: 簡単なモデルによるトンネルイオン化の軌道理論

赤石暁, 奥島輝昭, 首藤啓: 多体剛体粒子系における中立周期軌道族と長時間相関

石川明幸, 田中篤司, 首藤啓: 動的トンネル現象におけるカオス領域の役割について

数理解析研究所「高階微分方程式の完全ストークス幾何の研究」2006 年 10 月 16 日-17 日, 京都大学数理解析研究所

首藤 啓: 量子多項式写像のストークス幾何学における新しいストークス曲線の役割

物性研究所研究会「ガラス転移の統一概念」2006 年 11 月 20 日-22 日, 東京大学物性研究所

赤石暁, 首藤啓: bouncing ball orbits のあるビリヤード系の再帰時間分布

第二回 連成シミュレーションフォーラム「階層的な時間スケールが作り出す非平衡非定常性をどうとらえるか」2007 年 2 月 2 日-3 日, 九州大学

首藤 啓: ハミルトン系における遅い緩和: その数値的検証を巡るいくつかの話題

国際会議

Quantum Mechanics and Chaos 2006 (QMC 2006) Osaka City University, Osaka, Japan, Sep 19 - 21, 2006,

A. Akaishi, T. Okushima and A. Shudo: Recurrence Time Distribution in Billiard Systems with Bouncing Ball Orbits

A. Ishikawa, A. Tanaka and A. Shudo: Strong Enhancement of Tunneling Amplitude due to Destruction of Coherence in Chaotic Tunneling Trajectory

Manabu Miyamoto and Atushi Tanaka: Spectrum analysis of Rzążewski-Mostowski mapping

Atushi Tanaka and Manabu Miyamoto: Decaying “chaotic” quantum maps with unitarity: Generalizations of soluble Rzążewski-Mostowski map,

Novacella Autumn Conference 2006 “Chaos and Complex Systems”, October 8–12, 2006, Novacella, Italy

A. Shudo: Chaotic Tunneling and Dynamical Localization (invited)

Joint Symposium on “Initiatives for Attractive Education in Graduate School of Physics and Chemistry” and “Application of Advanced Techniques to Chemical Substances”, January 31–February 2, Tokyo Metropolitan Univ.

A. Ishikawa, A. Tanaka and A. Shudo: Strong Enhancement of Tunneling Amplitude due to Destruction of Coherence in Chaotic Tunneling Trajectory

21st COE 5th International Conference, “Perspectives in Nonlinear Physics”, November, 20–22, 2006, Univ. of Tokyo

T. Onishi: On the Crossover between Tunnel and Chaotic Ionizations

3) 学会誌等

A. Shudo: Complex dynamics and quantum tunneling in the presence of chaos, 数理解析研究所講究録 **1493** (2006) 118–134.

Y. Okada and A. Shudo: Inside-outside duality and isospectrality of planar billiards, 数理解析研究所講究録 **1500** (2006) 81–94.

首藤 啓: 多準位非断熱遷移問題における仮想的変わり点と新しいストークス曲線の役割について, 数理解析研究所講究録 **1516** (2006) 9–20.

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。2006年度より、それまでの凝縮系理論サブグループと固体理論サブグループが合同したサブグループ構成をとることとした。2006年度における研究活動の概要は次の通りである。

1) 希釈系における Kosterlitz-Thouless 転移と双対性

ランダム性により相転移・臨界現象がどのような影響を受けるか、古くから研究が行われてきた。ランダム系では、理論的に厳密な議論はむずかしいが、1976年に Wu と Wang により定式化された多体スピンの双対性の理論をランダム系に応用し、特別な2次元系については転移点や内部エネルギーの厳密な議論がなされてきた。議論の多くは2次相転移を示す系に対してであるが、最近、Kosterlitz-Thouless (KT) 転移を示す系についても議論が拡張された。2次元正方格子上的ボンド希釈した q 状態 Villain モデルの場合、2回 KT 転移を示すが、双対性の関係より2つの転移温度を関係付ける予想式が提唱されている。本研究では、モンテカルロシミュレーションを用いて、この双対関係式を定量的に調べた。具体的には、クラスターフリップモンテカルロ法を用いて、異なる距離の相関関数の比の有限サイズスケールリングやその他の解析を行い、2つの KT 転移温度を定量的に見積もり、その結果と双対関係式を比較した(図1参照)。その結果、双対関係式は非常によく近似となっているが、わずかにずれを生ずることを確認した。これは、KT 転移を示す系に対しては初めての研究であり、2次相転移の場合の議論とも対応している興味深い結果である。[岡部]

2) 正方格子上的反強磁性 3 状態ポッツモデルにおける交替分極場の効果

正方格子上的反強磁性 3 状態ポッツモデルの基底状態は Gaussian universality に属する臨界状態にあり、様々な摂動により、低対称の相に転移する。以前にこのモデルに交替分極場が加わった系を転送行列法を用いて議論したが、本研究では、Wang-Landau タイプのモンテカルロ法を用いて、同じ問題を調べた。大きなサイズの系を直接扱えること、スピン配置や order parameter の分布関数などを直接に調べることができるなどの利点がある。精度の高いモンテカルロ計算を行い、強磁性 3 状態ポッツ universality class に属する相とイジング universality class に属する相への2つの相転移を確認した。転送行列法による結果と定量的に一致し、さらに、エネルギー状態密度の詳細な検討を行った。[岡部, 大塚]

3) 三体相互作用を持つ三角格子上的 Z_p スピン模型の有効場の理論

70年代後半、Kosterlitz-Thouless-Halperin-Nelson-Young らによって議論されたディフェクトを媒介とした二次元三角格子メルティングの理論 (KTHMY 理論) は、その後の二次元古典粒子系の研究の理論的基礎を与えるものとなっている。ディフェクトはバーガスベクトルにより記述される為、主にベクトルチャージをもつクーロンガス模型がメルティング転移の理論的記述に用いられてきた。一方、Alcaraz-Cardy-Ostlund らにより導入された三体相互作用を持つ三角格子上的 Z_p スピン模型は、上記メルティング転移と同じユニバーサリティクラスに属することが指摘されているが、その低エネルギー領域での完全な有効理論およびその定量的な検証については行われていなかった。我々は、特に $p \geq 5$ の場合につき当模型の長距離での振る舞いに対する有効理論を Kondev-Henley らの所謂 ideal-state graph の考え方および系のもつグローバルな対称性に基づき考察した。結果として、二次元ベクトル双対サインゴルドン模型 [ベクトルクーロンガス模型のローカル描像] が低エネルギー領域での振る舞いを与えることが明らかとなったが、我々はその理論の導く帰結と Alcaraz らの議論と対応関係を詳しく検証した。更に格子模型の転送行列に対する大規模数値計算を用いた固有値解析により上記有効理論を支持する証拠

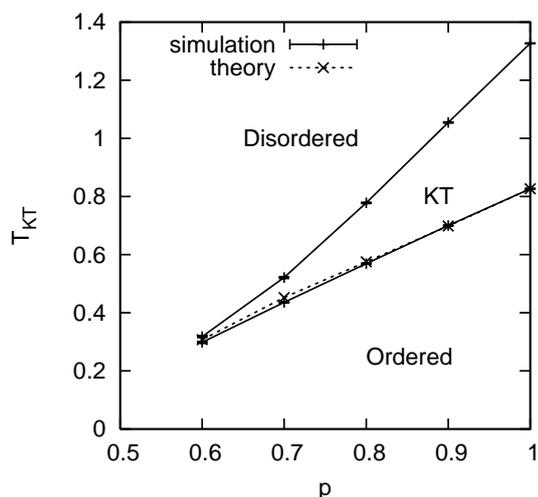


図 1: 希釈 6 状態 Villain モデルの相図。シミュレーションで得た 2 つの KT 転移温度を双対関係式と比較している。

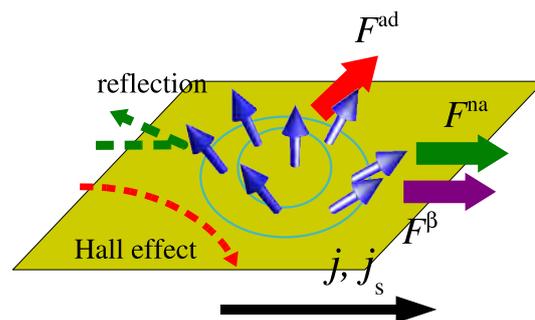


図 2: 電流下で磁気構造にはたらく力。電子反射による力 F^{na} とスピン緩和による力 F^{β} は電流方向、Berry 位相によるホール効果の反作用力 F^{ad} は垂直方向にはたらく。

を与えた：具体的にはその存在が期待される中間相の持つ臨界性、およびベクトルチャージを用いて定義される低エネルギー励起スペクトル構造のチェックなどを行った。これらによりベクトルチャージの物理について、具体的模型に対する有効場の理論および数値的アプローチを用いて定量的に議論することに成功した。[大塚]

4) 電流下で伝導電子が磁化に与えるトルクの微視的計算

磁性体に電流を流すと伝導電子から磁化に対してトルクが発生し磁化ダイナミクスが変化を受ける。これにより電流による直接の（磁場によらない）磁化反転が可能である。さて、伝導電子にスピン反転散乱やスピン軌道相互作用などのスピン緩和機構がはたらいっている場合にはこのトルクも影響を受ける。この効果は磁化に対する摩擦項 (α , Gilbert damping) と、スピン移行トルクとは直交した方向にはたらく新たなトルク項 (β 項) が生じることが現象論的議論により指摘されていた。こうした項の大きさは磁化反転の効率を決める重要なファクターであるが、これらの現象論的議論ではその定量的評価はできなかった。我々は、微視的モデルから、スピン緩和機構のもとでのトルクの評価を厳格に行い、 α と β がたしかに生じ、それらの値は独立であることを初めて示した。これによりスピン緩和まで含めた曖昧性のない理論記述が可能となり、同時に磁壁駆動の効率をあげるための指標が与えられた。また、磁化構造に対して電流がおよぼす 3 つの力を見だし解析した。(図 2) [多々良、河野 (阪大) 柴田 (理研)]

5) 多重極秩序変数の NMR 信号による同定の理論

核スピン共鳴 (NMR) は物質の構成原子の核上の磁場や電気 4 重極場を謂わば直接的に見ることの出来る手段であり、多重極秩序状態の観測に有力な方法である。本研究では、どのような多重極が核スピんにどのような微細分裂を与えるかを不変式で概念で群論的に整理した。これにより、簡便な式で微細分裂と多重極秩序を結びつけることを可能にした。PrFe₄P₁₂ につき、本学実験グループによって作成された純良単結晶についての測定をもとに、新奇な恒等表現型多重極能率の反強制的秩状態が出現している可能性の大きいことを導いた。[酒井、椎名、佐藤 (首都大)、菅原 (首都大及び徳島大)、菊地 (明治大及び東大物性研) 瀧川 (東大物性研) 斯波 (IPAP)]

6) 強相関物質のバンド構造の理論

希土類やウラン化合物では f -電子間の相互作用が強いため、電子が相互に避け合いながら物質中を遍歴していると考えられ、磁性や超伝導など、様々な物性にその効果が現われている。電子間相互作用の動的な効果をバンド計算に取り入れることは従来からの課題であった。これを取り入れる1つの方法として、動的平均場法 (DMFT) が提唱され、様々なモデル計算で成功をおさめている。本研究はこの方法を、実際の物質のバンド計算に取り入れ、汎用のプログラムを作ろうとするものである。この方向の研究は世界各地で競争的に進められているが、本研究は、補助的1不純物問題の解法に NCAf2vc 法という新しい手法を発展させ、実際の f 電子系への適用に必須であるスピン軌道相互作用や結晶場分裂を高い精度で取り入れる計算を初めて可能にしている点に特徴がある。典型的な $4f$ 物質である Ce 金属, Ce プニクタイトへの適用を行い、第一原理計算と光電効果の実験などとの直接比較により、有効性を検証した。[酒井, 清水 (東北大)]

7) スクッテルダイト化合物 $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ における磁場誘起秩序と圧力効果

Pr スクッテルダイト化合物では f^2 配置が安定であり、結晶場 1 重項基底が共通の性質であることが実験的に明らかになってきた。ここ数年の課題として、我々は $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ における多重極相互作用について調べている。これまでに、スピンドイマー系との類似性に着目した多重極相互作用の擬スピン表示が、 $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ の磁場誘起秩序の特性を調べる上で非常に有用であることを示してきた。本年度は、ゼロ磁場での四重極秩序の可能性とその性質へと解析を進めた。これは最近の圧力実験において 1 重項-3 重項ギャップの減少が観測されたことを念頭に置いている。擬スピンのユニタリー変換によって、ゼロ磁場の四重極相互作用がある条件のもとで量子反強 Potts モデルにマップ出来ることを示した。Potts モデルの縮退や相の競合に関する知見に基づき、ゼロ磁場四重極相の可能な性質について調べた。[椎名]

8) 中性子散乱における磁気形状因子の理論

磁性体における中性子散乱では、通常、磁気双極子が主要な寄与を与えるが、実験結果には必ず高次補正が含まれており、それが価電子の軌道自由度に関する情報を担っている。 d 電子系の軌道秩序の問題については、このことを利用した高精度の中性子散乱実験による研究が以前から知られていたが、一方、 f 電子系における多重極による中性子散乱の詳しい研究は理論実験ともに行われていなかった。そこで、最近我々は、散乱断面積に関する対称性の考察に基礎を置く一般論を展開し、具体例として $\text{Ce}_{1-x}\text{La}_x\text{B}_6$ と NpO_2 の八極子秩序相の磁気形状因子の定量計算を行った。対称性が低くかつ大きな波数の超格子点において、実験的に有意な大きさの散乱強度が得られることが分かった。 $\text{Ce}_{1-x}\text{La}_x\text{B}_6$ に関してごく最近、桑原 (首都大) 等により実験が行われ、中性子散乱による八重極の初めての観測が報告されたことを付記しておく。[椎名, 酒井, 斯波 (IPAP)]

9) 1次元ボーズ・フェルミ混合系における相互作用およびポテンシャルの効果

磁気光学トラップにより閉じ込められた原子系に関し、とくにボーズ・フェルミ混合系を中心として理論解析を進めた。はじめに光学格子の存在下で 1次元領域に閉じ込めた場合のモット転移の可能性や崩壊の可能性を、数値シミュレーションにより幅広いパラメータ領域で探り、相図を完成させた。そしてこれまで解析的な計算により得られていた相図に不備がある点などが、これにより明らかにされた。

これに加え、トラップポテンシャルの影響を直接考慮する研究を行なった。無限系において特定の粒子密度および特定の相互作用強度により出現するモット絶縁体状態が、トラップポテンシャル下では局所的に発生することが確認された。すなわち、局所的にモット絶縁体出現条件が満たされ、その領域ではボーズ・フェルミ混合系の全粒子数密度が固定される。しかし、各成分 (ボーズおよびフェルミ) の

密度は固定されないため、一方の密度揺らぎをもう一方が吸収する形で合計の密度を一定に保つという新しい量子液体の存在を指摘した。[森、竹内(広大)]

2. 研究業績

1) 論文

H. Otsuka, Y. Okabe and K. Okunishi: Field-induced Berezinskii-Kosterlitz-Thouless Transition and String-Density Plateau in Anisotropic Triangular Antiferromagnetic Ising Model, *Phys. Rev. E* **73** (2006) 035105(R)-(1-4).

H. K. Lee and Y. Okabe: Exchange Bias with Interacting Random Antiferromagnetic Grains, *Phys. Rev. B* **73** (2006) 140403(R)-(1-4).

X. Z. Cheng, M. B. A. Jalil, H. K. Lee and Y. Okabe, Precessional and thermal relaxation dynamics of magnetic nanoparticles: A time-quantified Monte Carlo approach, *J. Appl. Phys.* **99** (2006) 08B901 (1-4).

H. K. Lee and Y. Okabe: Multispin Coding Technique for Nonequilibrium Reweighting, *Int. J. Mod. Phys. C* **17** (2006) 157-166.

H. K. Lee, Y. Okabe and D.P. Landau: Convergence and refinement of the Wang-Landau algorithm, *Comp. Phys. Commun.* **175** (2006) 36-40.

Y. Okabe and H. Otsuka: Monte Carlo study of the antiferromagnetic three-state Potts model with staggered polarization field on the square lattice, *J. Phys. A* **39** (2006) 9093-9105.

H. Otsuka, Y. Okabe and K. Nomura: Global phase diagram and six-state clock universality behavior in the triangular antiferromagnetic Ising model with anisotropic next-nearest-neighbor coupling: Level-spectroscopy approach, *Phys. Rev. E* **74** (2006) 011104-(1-7).

K. Ohno, T. Sakamoto, T. Minagawa, and Y. Okabe: Entropy of Polymer Brushes in Good Solvents: A Monte Carlo Study, *Macromolecules* **40** (2007) 723 - 730.

H. Otsuka, Y. Okabe and K. Okunishi: Phase diagram and string-density plateau state of the anisotropic triangular antiferromagnetic Ising model, *J. Phys.: Condens. Matter* **19** (2007) 145236.

H. Otsuka and M. Nakamura: Two-Dimensional Ising Transition in One-Dimensional Interacting Electrons, *J. Mag. Mag. Matt.*, 310 (2007) 1119.

Hiroshi Kohno and Gen Tatara, Introduction to a theory of current-driven domain wall motion, in "Spintronic Materials and Technology" (Taylor & Francis Group, 2006).

Gen Tatara, Toshihiko Takayama, Hiroshi Kohno, Junya Shibata, Yoshinobu Nakatani and Hidetoshi Fukuyama, Threshold Current of Domain Wall Motion under Extrinsic Pinning, β -Term and Non-Adiabaticity, *J. Phys. Soc. Jpn.* **75**, 64708-1-64708-7 (2006).

Gen Tatara and Hiroshi Kohno, Tatara and Kohno Reply – (to Comment on "Theory of Current-Driven Domain Wall Motion: Spin Transfer versus Momentum Transfer" by S. E. Barnes), *Phys. Rev. Lett.* **96**, 189702-1 (2006).

- E. Saitoh, M. Ueda, H. Miyajima, and G. Tatara, Conversion of spin current into charge current at room temperature: Inverse spin-Hall effect, *Appl. Phys. Lett.* **88**, 182509-1-182509-3 (2006).
- Hiroshi Kohno, Gen Tatara, Junya Shibata, Microscopic Calculation of Spin Torques in Disordered Ferromagnets, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **75**, 113706-1-113706-4 (2006).
- Gen Tatara, Hiroshi Kohno, Junya Shibata and Eiji Saitoh, Theory of Current-Driven Domain Wall Dynamics, in *"Foundations of Quantum Mechanics in the light of new technology"*, eds. S. Ishioka and K. Fujikawa (World Scientific), 177-182.
- Gen Tatara, Hiroshi Kohno, Junya Shibata and Eiji Saitoh, Theory of Current-Driven Domain Wall Dynamics, in *TOPOLOGY IN ORDERED PHASES*, edited by S. Tanda, T. Matsuyama, M. Oda, Y. Asano & K. Yakubo
- Gen Tatara, Hiroshi Kohno, Junya Shibata, Yann Lemaho and Kyung-Jin Lee, Spin torque and force due to current for general spin textures, *J. Phys. Soc. Jpn.* to appear.
- Gen Tatara, Hiroshi Kohno and Junya Shibata, Theory of current-driven domain wall dynamics, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40** 1257-1260 (2007).
- Hiroshi Kohno, Gen Tatara, Junya Shibata and Yoshishige Suzuki, Microscopic calculation of spin torques and forces, *J. Magn. Magn. Mater.* **310** 2020-2022 (2007).
- O.Sakai, J.Kikuchi, R.Shiina, H.Sato, H.Sugawara, M.Takigawa and H.Shiba: Experimental and Theoretical Studies on NMR in $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ - Suggestion of Antiferro-momopole Type Ordering -, *J. Phys. Soc. Jpn.* **76** (2007) 024710.
- O.Sakai and Y.Shimizu: DMFT band calculation for Ce compounds, *J. Magn. Magn. Mater* **310** (2007) 374-376.
- O.Sakai and Y.Shimizu: Band Calculation for Ce-pnictides on the basis of Dynamical Mean Field Theory, *J. Phys. Soc. Jpn.* **76** (2007) 044707.
- K. Kaneko, N. Metoki, T. D. Matsuda, K. Kuwahara, M. Kohgi, R. Shiina, J-M. Mignot, A. Gukasov and N. Bernhoeft, Field-induced antiferroquadrupolar order in the heavy fermion superconductor $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$, *Physica B*, **378-380** 189-191 (2006).
- R. Shiina, Frustrating Quadrupolar Interaction and Possible Pressure Effects in $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$, *J. Phys. Soc. Jpn.* **74** 114708-1-9 (2006).
- K. Kaneko, N. Metoki, R. Shiina, T. D. Matsuda, M. Kohgi, K. Kuwahara, and N. Bernhoeft, Neutron Scattering Study on the Field-Induced O_{xy} -type Antiferroquadrupolar Ordering of Heavy-Fermion Superconductor $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$, *Phys. Rev. B.* **75** (2007) 094408-1-7.
- R. Shiina, Field-Induced Quadrupolar Order and Possible Pressure Effect in $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$, *J. Magn. Magn. Mat.* **310** (2007) 732-734.
- Y. Takeuchi and H. Mori Mott transition in 1D Boson-Fermion mixtures, *Int. J. Mod. Phys. B* **20** 1617-1625 (2006).

Y. Takeuchi and H. Mori Collapse in Boson-Fermion mixtures of cold atoms trapped in one-dimensional space, J. Phys. Soc. Jpn. **76** 034401-1-6 (2007).

2) 学会講演

日本物理学会第60回年次大会 2006年3月27日~3月30日(愛媛大学・松山大学)

高山利彦, 岡部豊, 笹本智弘, 西森秀稔: 希釈 Villain モデルと双対性

大塚博巳, 岡部豊, 野村清英: Kitatani-Oguchi 模型の相構造と空間的異方性の効果 II

多々良源, 高山利彦, 河野浩, 柴田絢也, 福山秀敏: 電流駆動磁壁移動における臨界電流: 内的, 外的ピン止めおよび beta 項の役割

清水幸弘, 酒井治: $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ の重い電子状態における多重極近藤効果の役割

竹内陽介, 森弘之: 1次元ボーズ・フェルミ混合系における demixing およびモット転移

日本物理学会2006年秋季大会 2006年9月23日~9月26日(千葉大学)

高山利彦, 岡部豊, 笹本智弘, 西森秀稔: 希釈 Villain モデルと双対性 II

大塚博巳: 三体相互作用を持つ三角格子 Z(N) スピン模型の解析

多々良源: スピン流による磁化制御: 磁壁移動デザインと実証 (領域10, 領域3, 領域4, 領域8 合同シンポジウム)

酒井治, 清水幸弘: Ce 化合物の DMFT バンド計算

椎名亮輔: $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ における圧力効果とゼロ磁場四重極相の理論

森弘之, 竹内陽介: 1次元ボーズ・フェルミ混合系における崩壊領域

第26回表面科学講演大会、日本真空協会合同シンポジウム「スピントロニクス表面科学」
平成18年11月6日-9日大阪大学コンベンションセンター

多々良源: 磁壁の電流駆動の理論

東大物性研究所短期研究会「計算物性科学におけるスーパーコンピュータ利用の現状と展望」

2006年12月11日~12月13日

岡部豊, 高山利彦: フラストレーションのある系の Kosterlitz-Thouless 転移

特定領域スクッテルダイト研究会 2006年6月1日~6月3日

椎名亮輔: $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ の圧力効果とゼロ磁場四重極秩序の理論

特定領域スクッテルダイト主催「若手夏の学校」 2006年8月7日~8月10日

椎名亮輔: f 電子系の相転移 - 多極子モーメント、対称性、揺らぎ

特定領域スクッテルダイト研究会 2007年1月5日~1月7日

椎名亮輔：PrOs₄Sb₁₂における結晶場励起、四極子ゆらぎ、超伝導

特定領域スクッテルダイト理論研究会 2007年3月1日~3月3日

椎名亮輔：CeB₆、スクッテルダイト及び関連物質における多極子自由度の役割

国際会議

StatPhys-Taiwan-2006, Academia Sinica, Taipei, June 22-26, 2006

Y. Okabe: Duality in the phase transition of two-dimensional diluted spin models (invited talk)

US-Japan Bilateral Seminar, Simulation of Complex Behavior from Simple Models,
Maui, July 17-20, 2006

Y. Okabe: Duality in diluted spin models (invited talk)

ISSP International Symposium on Computational Approaches to Quantum Critical Phenomena,
ISSP, Kashiwa, August 9-11, 2006

Y. Okabe: Duality and finite-size scaling analysis of the two-dimensional diluted Villain model (invited talk)

6th Rencontres du Vietnam, Nanophysics: from fundamentals to applications
Hanoi (Vietnam) , 6-12 August 2006

Gen Tatara: Thoery of Current-driven Domain Wall Motion (invited talk)

19th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS 2006)
Sendai International Conference Center, August 15-18, 2006

Gen Tatara: Threshold of current-driven domain wall motion (theory)(invited talk)

378th International Wilhelm and Else Heraeus Seminar, Spin Torque in Magnetic Nanostructure
Physikzentrum Bad Honnef (Germany) 23-26 October 2006

Gen Tatara, Theory of current-driven domain wall dynamics(invited talk)

K. Obata, Spin torque in Rashba systems (poster)

10th joint MMM/Intermag conference, Baltimore Maryland U.S.A., January 7-11 2007

Gen Tatara: Microscopic theory of currend-induced magnetization dynamics(invited talk)

日仏先端科学シンポジウム (JFFoS)(日本学術振興会、フランス外務省、MENESR, CNRS)
湘南国際村, January 27-30, 2007

Gen Tatara: Theory of nanomagnets(invited talk)

International Conference on Magnetism, Kyoto, August 20-25, 2006

O. Sakai and Y. Shimizu: DMFT band calculation for Ce compounds (poster)

R. Shiina: Field-Induced Quadrupolar Order and Possible Pressure Effect in $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ (oral)

H. Otsuka and M. Nakamura: Two-Dimensional Ising Transition in One-Dimensional Interacting Electrons

Highly Frustrated Magnetism 2006 (HFM2006), Osaka, August 15-19, 2006

H. Otsuka, Y. Okabe and K. Okunishi: Phase diagram and string-density plateau state of the anisotropic triangular antiferromagnetic Ising model

Advances in Neutron, Synchrotron Radiation, μSR and NMR Researches -complementary probes for magnetism -, Tokai, August 28-30, 2006

O. Sakai, R. Shiina and H. Shiba: Analysis of Hyperfine Interactions in NMR studied of Pr Skutterudites (poster)

International Workshop on First Principles Calculation of Correlated Electrons (FPCCE), University of Tokyo, November 28 - December 1, 2006

O. Sakai and Y. Shimizu: First-principles Calculation for Ce compounds on the basis of the Dynamical Mean Field Method (poster)

International Conference on Quantum Simulations and Designs, Higashi-Hiroshima, December 3-6, 2006

O. Sakai and Y. Shimizu: Band Calculation for 4f Systems based on the dynamical Mean Field Theory (invited talk)

The 2nd Indo-Japan Seminar Novel Magnetic Materials and their Electronic Structures, University of Tokyo, February 27- March 1, 2007

O. Sakai: First Principle Calculation of Electronic state for Ce-compounds based on the Dynamical Mean Field Theory (invited talk)

3) 学会誌等

森弘之：1次元を動く電子たち, 固体物理 41, 15, 2006

高エネルギー実験サブグループ

1. 研究活動の概要

本研究室では、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、将来計画のための加速器研究や、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) 衝突型加速器実験

粒子加速器によって、電子・陽電子・陽子などの素粒子を高エネルギーに加速して衝突させる実験である。陽子の構造の探求や日常には存在しない重い素粒子の生成、さらには理論的に予言されているが未だに発見されていない新粒子の探索などの研究が行なわれている。

B ファクトリー実験 (Belle)

KEK-B 加速器は今年度も順調に稼動し、ルミノシティーは $16 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ から $17 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ に積分ルミノシティーも 570 fb^{-1} から 710 fb^{-1} へと増加した。米国スタンフォード線形加速器センターの Babar とあわせると、積分ルミノシティーは 1 ab^{-1} を超えており、世界中から賞賛されている。冬期のシャットダウン中に KEK-B 加速器には Crab Cavity が設置され、今後のルミノシティーの更なる向上が期待されている。

今年度の物理解析で得られた成果としては、 $B \rightarrow \tau \nu$ 事象を世界で初めて確認することに成功したことが挙げられる。終状態がすべてレプトンであるため、これにより f_B と呼ばれる B 中間子の崩壊定数の測定精度が大きく向上した。また最近では、大量の B 中間子からの崩壊で生成された中性 D 中間子を使って、 $D^0 \bar{D}^0$ 混合が世界で初めて確認され注目を浴びている。

一方、将来の KEK-B 加速器の性能向上に呼応して Belle 検出器の性能改善のための開発研究を進めている。特に本研究室では将来の粒子識別装置として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 KEK、名古屋大、千葉大、リュブリアナ大学などと協力して進めている。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いる。この ASIC もほぼ期待通りの性能が確認されており、今後は大量生産にあわせた設計を行う予定である。

今年度は 47 編の欧文雑誌への投稿論文、78 編の国際会議への contribution 論文が出版された。

電子-陽子衝突型加速器 HERA による ZEUS 国際共同研究

ドイツ電子シンクロトロン研究所に建設された世界で唯一の電子 (陽電子)・陽子衝突型加速器 HERA は、2000 年までの運転期間 HERA-I の後、1 年間のシャットダウンの中で高輝度化と電子ビームを縦偏極させる改良を行い、HERA-II として運転を始めた。特に、2004 年 12 月から 2006 年 6 月までのデータ取得では、HERA-I で取得困難であった電子・陽子衝突データを HERA-I と比べて 10 倍以上取得することができた。これらの点に着目し、電子・陽子間で光子もしくは Z ボソンが交換される中性流深非弾性散乱 (NC-DIS) の断面積を測定した。

HERA では超短距離で電子とクォークが散乱するため新しい物理が現れる可能性があり、特に空間分解能に対応する交換ボソンの四元運動量移行 Q^2 が高い領域で標準理論の検証を行う事が重要である。測定された断面積は Q^2 で 2 桁以上、断面積で 5 桁に渡って標準理論で良く記述される事がわかり、HERA で到達可能な高い Q^2 まで QCD の発展方程式が正しい事が確かめられた。

また、高い Q^2 では電弱相互作用の効果によって電子ビームの偏極度に依存して断面積に違いが現れる。電子ビーム偏極度が正の場合と負の場合とで計算した断面積の非対称度を Q^2 の関数で測定した結果、 Z の効果が大きくなる高い Q^2 において、非対称度、つまりパリティの破れの効果が標準理論の予想どおり大きくなっている事を確かめ、HERA のエネルギースケールにおいて NC-DIS におけるパリティ非保存の効果を世界で初めて測定した。

さらに、反応に関与したパートンが陽子内で持っていた運動量比を表す x についても断面積を微分して測定した。この結果を HERA-I で得られた陽電子・陽子断面積と差を取ることで、陽子内バレンスクォーク分布のみに比例する陽子構造関数 xF_3 を、HERA の高い Q^2 の領域において、最も良い精度で測定した。HERA 以前の固定標的実験においても xF_3 は測定されているが、HERA の場合、陽子と衝突させているため原子核補正がない、高い Q^2 のため摂動論的 QCD が有効、低い x (~ 0.02) まで測定できる、などの利点がある。特に、高い Q^2 におけるバレンスクォーク分布の精度が向上した事は、同じ x の領域で新粒子探索を行う LHC にとって大きな意義を持つ。

2) 将来加速器の研究

2010 年代の実験開始を目標としている電子-陽電子リニアークライダー・ILC (International Linear Collider) や KEK-B 加速器の次期計画である、Super KEK-B をはじめとする将来の加速器に用いられる加速器技術に関する様々な研究を行っている。

レーザーとプラズマによる電子ビーム加速

高エネルギー加速器研究機構・電力中央研究所・中国工程物理研究院・清華大学・ヘブライ大学と共同研究で、電子ビームのレーザー・プラズマ加速に関する研究を行なった。現在用いられている高周波電場を利用した電子ビーム加速では、数十 MeV/m 程度の加速勾配が限界であるが、高強度レーザーをプラズマ中に照射して励起されるプラズマ波を用いれば、2桁程度以上大きな加速勾配を得ることが可能である。このため、将来的に小型高エネルギー加速器の実現が期待される。

現在まで、他の研究グループが行ってきたガス・ジェットを利用したプラズマ・レーザー加速実験では、長さ数 mm 程度のプラズマしか加速に利用できなかったが、ヘブライ大学が開発した、放電キャピラリー方式のプラズマ導波管を使用することにより、長さ数 cm のプラズマを利用できる。工程物理研究院の 200TW レーザーと長さ 4cm のプラズマ導波管を用いて、電子を 100MeV 以上のエネルギーに加速することに成功した。

単結晶を用いた陽電子源の開発

KEK-B 入射器において、タングステン単結晶を利用した陽電子源の実用化に世界で初めて成功した。このことにより、従来の多結晶タングステン標的に比べ、約 25%の陽電子強度の増大を観測した。また、結晶標的の熱負荷は、従来標的に比べ約 20%低減することを確認した。再開した KEK-B の運転においても連続的に使用され、過去最高の陽電子ビーム強度を実現している。単結晶標的の実用化は、高エネルギー電子-陽電子加速器としては、世界で初めての試みである。この成果は、現在稼働中の KEK-B ファクトリーのみならず、スーパー B ファクトリーやリニアークライダーなど、次世代高エネルギー加速器の陽電子源への応用にも貢献するものと期待される。

3) ニュートリノ観測実験

KASKA/Double-Chooz 実験

昨年度までは、柏崎・刈羽原子力発電所からのニュートリノを用いた、ニュートリノ振動実験パラメータ θ_{13} 角を測定する実験 KASKA を進めていたが、より早期の実現を目指して今年度からフランスの Chooz 原子力発電所を用いた実験計画 Double-Chooz に参加することになった。当研究室は新潟大学・東北大学・神戸大学・東京工業大学などと協力して、Double-Chooz 実験でニュートリノ反応を検出する

ために最重要となる、約 800 本の光電子増倍管の設置を担当することになった。特に光電子増倍管の受け入れ及びそれらの性能評価システムを構築するという重要な役割を担うことになり、そのプロトタイプシステムを完成させた。評価項目は、 1×10^7 のゲインを得るための高電圧値、単光電子事象に対する Peak-to-Valley Ratio、バックグランド計数、検出率の一様性、などである。

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

宇宙から飛来する超高エネルギーニュートリノ ($> 10^{16}$ eV) のうち超高エネルギー宇宙線と宇宙背景輻射との衝突で生成する GZK ニュートリノは存在が確実視されている。飛来数は非常に稀なため検出するためには 50Gton(体積 $3\text{km} \times 3\text{km} \times 3\text{km}$) の巨大質量の検出器が必要となる。天然岩塩鉱中でのニュートリノ反応で惹起した電磁シャワーによって発生した干涉チェレンコフ電波(アスカラヤン効果)を捉える方法の基礎研究を行なった。岩塩中での電波減衰長を摂動空洞共振器法で測定した結果、利用可能な 200m ~ 300m の減衰長をもつ岩塩鉱があることが明らかとなった。建設費の大半を占めるアンテナ挿入用ボアホールの掘削数を減少させるためにパルスレーダー波を電磁シャワーへ照射し、その反射波を測定する能動的方法の可能性追求した。パルスレーダーは MW 近い電力を利用可能で、10 減衰長の往復距離の受信も可能となる。KEK-PF-AR の放射光と同時にマイクロ波を岩塩試料へ照射を行ったところ、マイクロ波の反射波が観測された。反射強度は X 線強度を考慮した生成自由電子数、マイクロ波強度、トムソン散乱断面積による計算値と矛盾しない結果が得られている。

4) 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研究を行った。大立体角化した検出器でデータ取得を継続した。弱いポジトロンビームにより、偶然同時計数の少ない良質のデータを取得した。

2. 研究業績

1) 論文

Review of Particle Physics: Particle Data Group (W.-M. Yao *et. al.*)

J. Phys. G33: 1-1232 (2006)

Improved Constraints on $D^0\bar{D}^0$ Mixing in $D^0 \rightarrow K^+\pi^-$ Decays from the Belle detector: L.M.Zhang *et. al.* (The Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 96, 151801 (2006)

Evidence for Large Direct CP Violation in $B^\pm \rightarrow \rho(770)^0 K^\pm$ from Analysis of the Measurement of the branching fraction, polarization, and CP asymmetry for $B^0 \rightarrow \rho^+\rho^-$ decays, and determination of the CKM phase ϕ_2

A. Somov, A. J. Schwartz *et. al.* (The Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 96, 171801 (2006)

Tests of the Burle 85011 64-anode MCP PMT as a detector of Cherenkov photons

P. Krizan *et. al.* Nucl. Instr. Meth. A567: 124-128 (2006)

Observation $b \rightarrow d\gamma$ and Determination of $|V_{td}/V_{ts}|$

D. Mohapatra *et. al.* (The Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 96, 221601 (2006)

Measurement of Branching Fraction and Direct CP Asymmetry in $B^0 \rightarrow \rho^0\pi^0$ Decays

J. Dragic *et. al.* (The Belle Collaboration), Phys. Rev. D 73, 111105(R) (2006)

Three-Body Charmless $B^\pm \rightarrow K^\pm\pi^\pm\pi^\mp$ Decay

A.Garmash *et. al.* (The Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 96, 251803 (2006)

Charge Asymmetry of Same-Sign Dileptons in B^0 - \bar{B}^0 Mixing

E. Nakano *et al.* (The Belle Collaboration), Phys. Rev. D 73, 112002 (2006)

Search for the h_c meson in $B^\pm \rightarrow h_c K^\pm$

F. Fang, T.E. Browder *et al.* (The Belle Collaboration), Phys. Rev. D 74, 012007 (2006)

Search for lepton flavor violating τ decays with a K_S meson

Y.Miyazaki *et al.* (The Belle Collaboration), Phys. Lett. B 639, 159 (2006)

Observation of New States Decaying into $\Lambda_c^+ K^- \pi^+$ and $\Lambda_c^+ K_S^0 \pi^-$

Ruslan Chistov *et al.* (The Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 97, 162001 (2006)

Observation of near-threshold enhancement in the $D^0 \bar{D}^0 \pi^0$ invariant mass in $B \rightarrow D^0 \bar{D}^0 \pi^0 K$ Decay

G.Gokhroo, G.Majumder *et al.* (The Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 97, 162002 (2006)

Study of J/ψ to $p\bar{p}$, $\Lambda\bar{\Lambda}$ and observation of η_c to $\Lambda\bar{\Lambda}$ at Belle

C.-H. Wu, M.-Z. Wang *et al.* (The Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 97, 162003 (2006)

Improved Measurements of Color-suppressed Decays $\bar{B}^0 \rightarrow D^0 \pi^0$, $D^0 \omega$, $D^{*0} \pi^0$, $D^{*0} \eta$ and $D^{*0} \omega$

S. Blyth *et al.* (The Belle Collaboration), Phys. Rev. D 74, 092002 (2006)

Observation of $B^+ \rightarrow \Lambda_c^+ \Lambda_c^- K^+$ and $B^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \Lambda_c^- K^0$ decays

N.Gabyshev *et al.* (The Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 97, 202003 (2006)

Study of decay mechanisms in $B^- \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{p} \pi^-$ decay and observation of anomalous structure in the $(\Lambda_c^+ \bar{p})$ system

N.Gabyshev *et al.* (The Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 97, 242001 (2006)

Improved measurements of branching fractions and CP partial rate asymmetries for $B \rightarrow \omega K$ and $B \rightarrow \omega \pi$

Chun-Min Jen, P. Chang *et al.* (The Belle Collaboration), Phys. Rev. D 74, 111101 (2006)

Evidence of the Purely Leptonic Decay $B^- \rightarrow \tau \nu$

K. Ikado *et al.* (The Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 97, 251802 (2006)

Observation of $B^+ \rightarrow \Xi_c^0 \Lambda_c^+$ and Evidence for $B^0 \rightarrow \Xi_c^- \Lambda_c^+$

R.Chistov *et al.* (The Belle Collaboration), Phys. Rev. D(RC) 74, 111105

Dalitz Analysis of Three-body Charmless $B^0 \rightarrow K^0 \pi^+ \pi^-$ Decay

A. Garmash *et al.* (The Belle Collaboration), Phys. Rev. D 75, 012006 (2007)

Measurement of inclusive D_s , D^0 and J/ψ rates and determination of the $B_s^{(*)} \bar{B}_s^{(*)}$ production fraction in $b\bar{b}$ events at the $\Upsilon(5S)$ resonance

A. Drutskoy *et al.* (The Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 98, 052001 (2007)

Search for $B^+ \rightarrow J/\psi \eta K^+$ and $B^0 \rightarrow J/\psi \eta K_S^0$ Decays

Q. L. Xie *et al.* (The Belle Collaboration), Phys. Rev. D 75, 017101 (2007)

Study of the charmed baryonic decays $\bar{B}^0 \rightarrow \Sigma_c^{++} \bar{p} \pi^-$ and $\bar{B}^0 \rightarrow \Sigma_c^0 \bar{p} \pi^+$

K.S.Park and H.Kichimi *et al.* (The Belle Collaboration), Phys. Rev. D(RC) 75, 011101 (2007)

Observation of time-dependent CP violation in $B^0 \rightarrow \eta'K^0$ decays and improved measurements of CP asymmetries in $B^0 \rightarrow \phi K^0$, $B^0 \rightarrow K_s K_s K_s$ and $B^0 \rightarrow J/\psi K^0$ decays
K.-F. Chen, *et. al.* (The Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 98, 031802 (2007)

Moments of the Hadronic Invariant Mass Spectrum in $B \rightarrow X_c \ell \nu$ Decays at Belle
C. Schwanda *et. al.* (The Belle Collaboration), Phys. Rev. D 75, 032005 (2007)

Observation of a new charmonium state in double charmonium production in e^+e^- annihilation at $\sqrt{s} \sim 10.6 GeV$
K. Abe *et. al.* (The Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 98, 082001 (2007)

Moments of the electron energy spectrum and partial branching fraction of $B \rightarrow X_c e \nu$ decays at Belle
P. Urquijo, E. Barberio *et. al.* (The Belle Collaboration), Phys. Rev. D 75, 032001 (2007)

Search for Invisible Decay of the $\Upsilon(1S)$
O. Tajima, *et. al.* (The Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 98, 132001 (2007)

Observation of the decay $B^0 \rightarrow J/\psi \eta$
M. C. Chang *et. al.* (The Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 98, 131803 (2007)

High statistics study of the $f_0(980)$ resonance in $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-$ production
T. Mori *et. al.* (The Belle Collaboration), Phys. Rev. D 75, 051101(R) (2007)

Inclusive-Jet and Dijet Cross Sections in Deep Inelastic Scattering at HERA
S. Chekanov *et. al.* (ZEUS Collaboration), Nucl. Phys. B 765 (2007) 1-30

Measurement of Prompt Photons with Associated Jets in Photoproduction at HERA
S. Chekanov *et. al.* (ZEUS Collaboration), Euro. Phys. J. C49 (2007) 511-522

Measurement of Neutral Current Cross Sections at High Bjorken-x with the ZEUS Detector at HERA
S. Chekanov *et. al.* (ZEUS Collaboration), Euro. Phys. J. C49 (2007) 523-544

Event Shapes in Deep Inelastic Scattering at HERA
S. Chekanov *et. al.* (ZEUS Collaboration), Nucl. Phys. B767 (2007) 1-28

Measurement of High- Q^2 Deep Inelastic Scattering Cross Sections with a Longitudinally Polarised Positron Beam at HERA
S. Chekanov *et. al.* (ZEUS Collaboration), Phys. Lett. B637 (2006) 210-222

On-site underground background measurements for the KASKA reactor-neutrino experiment
H. Furuta *et. al.* Nucl. Instr. Meth. A568 (2006) 710-715

Observation of nonlinear Thomson scattering at BNL-ATF
T.Kumita, Y.Kamiya *et. al.*, Int'l J. Mod. Phys. B 21 (2006) 473-480

2) 国際会議報告

Y. Watanabe, M. Chiba, O. Yasuda, T. Kamijo, Y. Chikashige, T. Kon, A. Amano, Y. Takeoka, Y. Shimizu, S. Mori, S. Ninomiya

Structure Function of Excess Charge in Rock Salt

Proc. of the International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2005: New Horizon of Nuclear Astrophysics and Cosmology, AIP Conference Proceedings Vol.847. pp.491-493 April(2006), ISBN 0-7354-0342-2

Y. Watanabe, M. Chiba, Y. Takayama, M. Fujii, O. Yasuda, F. Yabuki, Y. Shibasaki, T. Kamijo, Y. Chikashige, T. Kon, A. Amano, Y. Takeoka, Y. Shimizu, S. Mori, S. Ninomiya

Simulation of Salt Neutrino Detector Performance for Ultra High Energy Neutrino Detection

Proc. of the International Workshop on Energy Budget in the High Energy Universe, Kashiwa, Japan 22-24 February 2006, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., pp315-318, March (2007) ISBN-13 978-981-270-010-0, ISBN-10 981-270-010-2

M. Chiba, Y. Watanabe, Y. Takayama, M. Fujii, O. Yasuda, F. Yabuki, Y. Shibasaki, T. Kamijo, Y. Chikashige, T. Kon, A. Amano, Y. Takeoka, Y. Shimizu, S. Mori, S. Ninomiya

Measurement of Attenuation Length for UHF Radio Wave in Natural Rock Salt Samples concerning Ultra High Energy Neutrino Detection

Proc. of the International Workshop on Energy Budget in the High Energy Universe, Kashiwa, Japan 22-24 February 2006, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., pp319-322, March(2007) ISBN-13 978-981-270-010-0, ISBN-10 981-270-010-2

3) 学会講演

第 43 回アイソトープ・放射線研究発表会 2006 年 7 月 5 日～7 月 7 日 (日本青年館)

谷内康行、石川潤、小林和優、山本宏朗、内海倫明、千葉雅美、藤井政俊、白川利昭

「小型中性子発生装置の製作と検討」

小林和優、石川潤、谷内康行、山本宏朗、内海倫明、千葉雅美、藤井政俊、白川利昭、橋本トモ子、白石文夫

「誘電体の破砕過程における核反応の研究」

第 67 回応用物理学学会学術講演会 2006 年 8 月 29 日～9 月 1 日 (立命館大学・びわこ・くさつキャンパス)

谷内康行、小林和優、石川潤、山本宏朗、内海倫明、千葉雅美、藤井政俊、白川利昭

「小型中性子発生装置の検討 (2)」

小林和優、谷内康行、鈴木将、内海倫明、千葉雅美、藤井政俊、白川利昭、橋本トモ子、白石文夫

「誘電体の破砕過程における核反応の研究」

日本物理学会 2007 年春季大会 2007 年 3 月 25 日～3 月 28 日 (首都大学東京・南大沢キャンパス)

西澤勲 ほか

「Aerogel-RICH 検出器のための HAPD 読み出し用 ASIC の開発」

春名毅 ほか

「原子炉ニュートリノ振動実験 Double Chooz における PMT Test Bench の製作」

天野晶夫、近 匡、清水 裕、竹岡義人、近重悠一、二宮壮介、荒川葉子、上條敏生、柴崎祐治、高山泰弘、千葉雅美、中村俊介、藤井政俊、安田修、矢吹文昭、内海倫明

「超高エネルギーニュートリノ検出のための UHF 帯における天然岩塩試料の複素誘電率測定」

中村俊介、荒川葉子、上條敏生、柴崎祐治、高山泰弘、千葉雅美、藤井政俊、安田 修、矢吹文昭、天野晶夫、近 匡、清水 裕、竹岡義人、近重悠一、二宮壮介、内海倫明

「超高エネルギーニュートリノの検出のための岩塩中電磁シャワーからの電波検出シミュレーション」

荒川葉子、上條敏生、柴崎祐治、高山泰弘、千葉雅美、中村俊介、藤井政俊、安田 修、矢吹文昭、天野晶夫、近 匡、清水 裕、竹岡義人、近重悠一、二宮壮介、内海倫明

「超高エネルギーニュートリノ検出のための岩塩中電磁シャワーからの電波反射の研究」

千葉雅美、上條敏生、柴崎祐治、高山泰弘、中村俊介、藤井政俊、安田 修、矢吹文昭、荒川葉子、天野晶夫、近 匡、清水 裕、竹岡義人、近重悠一、二宮壮介、内海倫明

「岩塩超高エネルギーニュートリノ検出のためのダイポールアンテナでのファインマン公式を用いた新しい放射電場計算法」

国際会議

PASCOS2006, Sept.10-15, 2006, Columbus, Ohio, USA

T. Sumiyoshi "Elements of the CKM matrix" ,

The Joint Meeting of Pacific Region Particle Physics Communities (DPF2006+JPS2006)

Oct.29-Nov.3, Honolulu, Hawaii, USA

T. Sumiyoshi "Opening Remarks"

ARENA2006, Acoustic & Radio EeV Neutrino detection Activities, University of Northumbria, UK

June 28-30, 2006

M.Chiba, M.Fujii, T.Kamijo, Y.Shibasaki, Y.Takayama, F.Yabuki, O.Yasusda, A.Amano, Y.Chikashige, T.Kon, S.Mori, S.Ninomiya, Y.Shimizu, Y.Takeoka, M.Utsumi, Y.Watanabe

"Measurement of Attenuation Length for Radio Wave in Natural Rock Salt and Performance of Detecting Ultra High-Energy Neutrinos"

XXXIII International Conference on High Energy Physics, Moscow, Russia, July 26-Aug. 2, 2006

Yondok Ri, "Combined QCD and Electro-Weak Fits at HERA"

原子物理実験サブグループ

1. 研究活動の概要

今年度も、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独自の装置と測定手法を開発しながら実験的に解明する、という本グループの特徴を生かした研究が展開された。

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実験研究を行ってきたが、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 重共鳴の成功によって、研究は大きな進展を遂げた。

(1) 3D-RCE における精密共鳴プロファイルの観測: $390 \text{ MeV/u H-like Ar}^{17+} 1s \rightarrow 2p_{1/2}, 2p_{3/2}$

昨年度初めてこの系の 3D-RCE を観測した際、共鳴プロファイルには、特異な構造が見られることに加え、 $2p_{1/2}$ 、 $2p_{3/2}$ の遷移強度比が理論から逸脱しているという問題を抱えていた。今年度、共鳴ピークの同定を確かなものとするため、389.77 と 391.00 MeV/u のふたつの入射エネルギーの下で、共鳴プロファイルを詳細に再測定した。その結果、 $(k, l, m) = (0, 8, 0)$ という非常に高次の周波数成分による $n = 2$ から $n = 3$ への遷移に相当する鋭いピークが混入していることをつきとめた。

(2) 3D-RCE における Λ 型 2 重共鳴の脱励起 X 線による観測 (Autler-Townes 2 重項): $416 \text{ MeV/u He-like Ar}^{16+} 1s^2 1^1S \rightarrow 1s2p 2^1P \rightarrow 1s2s 2^1S$

原理的に、同一のイオン入射条件の下でも、通過イオンが感じる異なる振動電場に対応する、複数の共鳴励起が可能である。3D-RCE 共鳴条件は入射ビームに対する 2 方向への結晶回転の自由度が利用できるため、2 重共鳴条件を入射イオン速度を調節せずに満足することができる。我々は、この 2 つの角度を独立に操作することで ($1^1S \rightarrow 2^1P \rightarrow 2^1S$) の Λ 型 2 重共鳴を通過イオンの電荷分布より観測することに成功している。その結果、2 つの励起準位間が強くカップリングしていることに起因するドレスド原子に特徴的な Autler-Townes 2 重項を確認した。このドレスド原子について詳細な情報を得るために、同じ入射イオン系において脱励起 X 線測定による Autler-Townes 2 重項の観測をおこなった。実験条件では、イオン進行方向を z 方向とし、結晶の (220) 面を水平に設置し、この面の法線方向を x 方向と定義した場合、カップリング電場は x 方向に偏光しているので、 2^1P_x 成分のみが 2^1S 準位と結合する。従って、y 方向に設置した X 線検出器で測定した共鳴プロファイルのみに、明確に Autler-Townes 2 重項が観測された。本年度は、カップリング周波数が共鳴周波数に一致する場合のみならず、離調させた場合の共鳴スペクトル変化を詳細に観測した。また、様々なミラー指数をもつ原子面を利用して、振動電場強度や偏光方向を制御しその依存性を観測した。

(3) 3D-RCE における Λ 型 2 重共鳴を利用した準安定状態の寿命測定: $416 \text{ MeV/u He-like Ar}^{16+} 1s^2 1^1S \rightarrow 1s2p 2^1P \rightarrow 1s2s 2^1S$

昨年度、2 重共鳴条件下で Al 薄膜を標的結晶の後方に設置するという手法を用いて、He-like Ar^{16+} 準安定状態の 2^1S 成分をイオン化させた。これは、 2^1P 成分が数 μm の距離を走るあいだに脱励起してしまう一方で、準安定準位の 2^1S 成分は脱励起せずに約 70 cm もの距離を生き残ることを利用したものである。この薄膜を挿入する距離を変化させることにより、準安定状態の寿命を正確に評価するが可

能となり、新しい寿命測定手法として期待される。本年度は、薄膜位置の精密制御機構を導入し、具体的な誤差要因の評価と可能性を探った。

2) 高速多価重イオンと分子衝突の研究

数 100 MeV/u 領域の高速イオンと原子・分子の衝突における標的イオン化過程では、入射イオンと標的との間のイオン進行方向の運動量のやりとりは非常に小さく、きわめて短かつ高強度の光レーザーパルス照射した場合と同等に半サイクルの電磁波パルスによってイオン化が起こると考える描像が提案されている。ところが、従来の実験では入射イオンの衝突後の偏向角度やエネルギー変化が小さいために詳細な衝突過程を観測できなかった。近年、実験観測技術が急激な進歩を遂げ、静電磁場と高精度 2 次元位置時間検出器を組み合わせることにより、標的から生成した反跳イオンや、放出電子の総てを同時に検出し、それらの高精度位置・時間情報から移行運動量を再構成するいわゆる反跳イオン・電子運動量分光法が利用されるようになった。これを用いることで 1 回の衝突で起こるすべての事象を完全に同時計測し、衝突ダイナミクスを理解することを目的として、HIMAC において、高速多価重イオンと分子衝突の研究を開始した。

本年度は、 N_2 分子を標的分子として選び、実際に HIMAC から供給される 400 MeV/u の Ar^{18+} を入射イオンとして用い、製作した分子線ビーム装置、解離イオンペアの放出角度分布観測装置ならびに計測回路の動作テストや今後の実験の基礎となるデータの収集を行なった。

3) 静電型イオン蓄積リングによる原子分子衝突の研究

我々が、化学科・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) 実験は、数秒にまで及ぶ長い時間スケールでの準安定状態の寿命測定、リング冷却による黒体放射の影響の観測、波長可変レーザーによる照射、さらに希ガス原子のリング内導入による断面積測定などが本格的に開始され、さまざまな成果が実り始めた。

(1) 負炭素原子イオンの環境温度依存性および希ガスとの散乱断面積測定：Cs スパッターイオン源で生成した C^- を 20 keV に加速し、リング内に入射・蓄積した。基底状態 $^4S_{3/2}$ の成分に加えて、励起状態 $^2D_{5/2}$ に起因する数 10 ms の短寿命成分が観測された。この励起状態の束縛エネルギーは数 10 meV と小さく、大部分黒体放射によって中性化していると考えられる。そこでビーム軌道周辺を液体窒素温度にまで冷却し、黒体放射の影響を極端に低減させた環境を作り出すことにより、この短寿命成分の寿命が実際に長くなることを実際に観測した。また、基底状態の希ガスに対する衝突誘起電子脱離断面積も、様々な希ガスを導入し、寿命の数密度依存性を観測することから測定した。

(2) 負炭素クラスターイオンの蓄積： C^- イオンと同様に、Cs スパッター型イオン源によって小型の負炭素クラスターイオン C_n^- ($n = 2 - 8$) の生成・蓄積にも成功した。従来炭素数 n の偶奇による寿命依存性が報告されていたが、我々は全ての種類で準安定励起状態の存在を確認した。これは、我々のイオン源では高励起状態の成分も生成されていることに起因すると推定される。

(3) O_2^+ 分子イオン-レーザー合流実験：電子衝撃型イオン源によって生成した酸素分子正イオン O_2^+ を 20 kV に加速し、リングにパルス入射・蓄積した。その後、波長 480nm のレーザーをイオン生成から 100-400 ms 後にリング直線部に合流衝突させると、直後に鋭く中性粒子数が増加するピークが観測された。この波長では、励起状態 $a^4\Pi_u$ のイオンは光子を吸収して中性の O と O^+ にただちに解離する一方、基底状態のイオンではこのような解離は起こらないため、観測されたピークは励起状態のイオンに起因すると考えられる。このように、長寿命の励起状態イオンの存在が、レーザー合流照射により明らかになった。

4) 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中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。さらに数年前から、古典論に基づいて移動度を計算するプログラムを開発し、測定した移動度データを再現する粒子間ポテンシャルを求める試みも行っている。特に、閉殻構造を持つイオンではヘリウム原子との衝突対の電子状態が $^1\Sigma^+$ に限定されるために理論的取扱が単純化できるので、アルカリイオンについて移動度測定を進めてきた。今年度は Na^+ の測定に着手したが、理論的に気体圧力には依存しない筈のイオン移動度がヘリウム圧力によって異なるという現象が起きた。これは実験装置の故障が原因であることが判明し、その対策に半年以上を費やした。年度内に修復がほぼ完了したので、次年度は Li^+ から Cs^+ までのアルカリイオンに関する系統的な測定を完了させる予定である。

また、イオン移動度が粒子間ポテンシャルに鋭敏であることを利用して、鏡像異性体を分離して検出する新しい分析手法の開発を、首都大・立教大・理研の共同研究として開始した。これは「自然界には 1 種類の鏡像異性体しか存在しない」という分子生物化学の分野での重大な問題を解決する糸口になる可能性を秘めた研究であり、今後は精力的に進めていく。

5) 多価イオンの電荷交換分光

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注目されており、そのための光源として Xe あるいは Sn のレーザープラズマあるいは放電プラズマが精力的に研究されている。しかしながら、プラズマ内部で EUV 領域での発光に寄与している多価イオンに関しては、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原子物理の手法を活かした実験を開始した。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した。これまでに Xe については 7 価から 18 価、Sn については 5 価から 15 価のイオンについて標的を He あるいは Xe にした場合の EUV 領域の発光スペクトルを測定してきた。15 価の Sn は Br 様イオンであり、これは Xe の 19 価に相当する。等電子系でのスペクトルの比較をする目的で、Xe イオンについては 18 価以上での測定を行い、23 価までの入射イオンを用いて実験を行った。Sn イオンについても次年度に同等な高価数まで実験を行う予定である。

一方、斜入射型分光器と CCD カメラから構成される測定系の検出感度の波長依存性が不明であったため、過去に発光断面積が測定されている衝突系を用いることで、相対的な検出効率の測定を試みた。具体的には、 $\text{O}^{6+}\text{-He}$ および $\text{e}^-\text{-He}$ の衝突における $\text{O}^{5+}(n\ell)$ および $\text{He}^+(np)$ からの発光を観測した。原理的に検出効率の測定が可能であることは確認できたが、分光器の真空漏れが原因で再現性に乏しく、定量的な測定は次年度に持ち越すことになった。今年度は EUV 領域だけでなく、可視・紫外領域での発光スペクトル測定にも着手した。本来は Sn の EUV 光源で問題になっている 130–400 nm の帯域外発光に関する基礎データを得ることが目的であるが、予備実験として Xe イオンを用いた測定を行った。最初に行った 9 価の Xe と中性 Xe 標的での測定において、全角運動量 J だけが異なる微細構造準位の生成比が統計重率から極端にずれるという結果が得られた。この結果を受けて改めて EUV 領域での発光スペクトルについて検討したところ、同様な現象が観測されていたことが判明した。これらは未知の現象であり、電荷移行反応の詳細な理解が必要な問題であると考えられる。

2. 研究業績

1) 論文

C. Kondo, S. Masugi, Y. Nakano, A. Hatakeyama, T. Azuma, K. Komaki, Y. Yamazaki, T. Murakami, and E. Takada : “Three-dimensional resonant coherent excitation of nonchanneling ions in a crystal”, *Phys. Rev. Lett.* **97** (2006) 135503.

T. Azuma, Y. Takabayashi, C. Kondo, T. Muranaka, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada, and T. Murakami : “Anisotropic X-Ray emission from heliumlike Fe²⁴⁺ ions aligned by resonant coherent excitation with a periodic crystal potential”, *Phys. Rev. Lett.* **97** (2006) 145502.

S. Jinno, T. Takao, K. Hanada, M. Goto, K. Okuno, H. Tanuma, T. Azuma, and H. Shiromaru : “Storage and mass-selective control of ions in an electrostatic ion storage ring”, *Nucl. Instrum. Meth. A*, **572** (2007) 528–579.

C. Kondo, S. Masugi, T. Muranaka, A. Ishikawa, Y. Nakano, T. Azuma, A. Hatakeyama, K. Komaki, Y. Nakai, Y. Yamazaki, E. Takada, and T. Murakami : “Trajectory dependent resonant coherent excitation of planar-channeled ions in a thin Si crystal”, *Nucl. Instrum. Meth. B*, **256** (2007) 157–161.

2) 国際会議報告

T. Kagawa, H. Tanuma, H. Ohashi, and K. Nishihara : “RCI simulation for EUV spectra from Sn ions”, *J. Phys. Conf. Ser.* **58** (2007) 149–152.

H. Tanuma, H. Ohashi, S. Fujioka, H. Nishimura, A. Sasaki, and K. Nishihara : “4d-4f unresolved transition arrays of xenon and tin ions in charge exchange collisions”, *J. Phys. Conf. Ser.* **58** (2007) 231–234.

H. Ohashi, H. Tanuma, S. Fujioka, H. Nishimura, A. Sasaki, and K. Nishihara : “Charge exchange spectroscopy in Sn^{q+} (q = 6 – 15)-He collisions”, *J. Phys. Conf. Ser.* **58** (2007) 235–238.

Y. Nakano, S. Masugi, T. Muranaka, T. Azuma, C. Kondo, A. Hatakeyama, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada, and T. Murakami : “Double-resonant coherent excitation of HCI planar channeled in a Si crystal”, *J. Phys. Conf. Ser.* **58** (2007) 359–362.

3) 学会講演

第22回化学反応討論会 2006年6月7日～9日(岡崎コンベンションセンター, 岡崎)

城丸春夫, 後藤基, 神野智史, 高雄智治, 花田勝彦, 奥野和彦, 阿知波洋次, 田沼肇, 東俊行 : 静電型リングによるイオンの蓄積, 制御および反応実験

後藤基, 安田有里, 神野智史, 高雄智治, 花田勝彦, 田沼肇, 東俊行, 杉浦健一, 城丸春夫, 阿知波洋次 : 静電型イオン蓄積リングにおけるポルフィリン負イオンの超励起状態の寿命測定

文部科学省リーディングプロジェクト「極端紫外(EUV)光源開発等の先進半導体製造技術の実用化」平成17年度成果報告会 2006年6月12日(日本科学未来館, 江東区青海)

田沼肇 : 価数分離した多価スズイオンの電荷交換 EUV 分光

原子・分子・光科学 (AMO) 第 3 回討論会 2006 年 6 月 16 日～17 日 (東京大学・駒場キャンパス)

佐々木明, 西原功修, 砂原淳, 西川亘, 小池文博, 香川貴司, 田沼肇: EUV 光源の原子過程モデル

大橋隼人, 田沼肇, 奥野智晴, 藤岡慎介, 西村博明, 佐々木明, 西原功修: EUV 領域における多価 Sn イオンの電荷交換分光

中野祐司, 東俊行, 近藤力, 畠山温, 小牧研一郎, 中井陽一, 山崎泰規, 高田栄一, 村上健: 結晶周期場により形成された重イオンのドレスト状態

高雄智治, 神野智史, 安田有里, 花田勝彦, 後藤基, 清宮明, 石川佳宏, 田沼肇, 東俊行, 城丸春夫, 奥野和彦: TMU E-Ring によるイオン-レーザー合流実験

第 16 回 EUV 光源開発技術委員会 2006 年 7 月 5 日 (東京八重洲ホール)

田沼肇: 電荷交換分光

レーザー研シンポジウム 2006 2006 年 7 月 31 日～8 月 1 日 (阪大レーザー研, 吹田)

田沼肇: レーザープラズマ放射における原子素過程の研究

EUV 理論モデリングワークショップ 2006 年 8 月 1 日～3 日 (あずみ荘, 乗鞍高原)

田沼肇: 首都大における電荷交換分光

原子衝突研究協会第 31 回研究会 2006 年 8 月 10 日～11 日 (岡崎コンファレンスセンター, 岡崎)

中野祐司, 井上岳史, 近藤力, 東俊行, 畠山温, 中井陽一, 小牧研一郎, 山崎泰規, 高田栄一, 村上健: 結晶周期場により形成された重イオンのドレスト状態

近藤力, 中野祐司, 真杉三郎, 村中友子, 東俊行, 畠山温, 中井陽一, 小牧研一郎, 山崎泰規, 高田栄一, 村上健: 薄膜結晶を用いたチャネリング条件下のコヒーレント共鳴励起

大橋隼人, 田沼肇, 藤岡慎介, 西村博明, 佐々木明, 西原功修: EUV 領域における多価 Sn イオンの電荷交換分光

佐々木明, 西原功修, 砂原淳, 西川亘, 小池文博, 香川貴司, 田沼肇: EUV 光源の原子過程モデル

花田勝彦, 神野智史, 高雄智治, 後藤基, 押切航希, 間宮佑介, 林知里, 田沼肇, 東俊行, 城丸春夫, 奥野和彦: TMU E-ring における O_2^+ のレーザー合流実験

後藤基, 安田有里, 神野智史, 高雄智治, 花田勝彦, 田沼肇, 東俊行, 杉浦健一, 城丸春夫, 阿知波洋次: TMU E-ring におけるポルフィリン負イオンのレーザー分光

高雄智治, 神野智史, 花田勝彦, 後藤基, 押切航希, 間宮佑介, 林知里, 田沼肇, 東俊行, 城丸春夫, 奥野和彦: TMU E-ring における負イオンの寿命測定

的場史朗, 田沼肇, 大槻一雅: 極低温ヘリウム気体中におけるアルカリ原子イオンの移動度

井上岳史, 中野祐司, 近藤力, 東俊行, 中井陽一, 水野智也, 土田秀次, 伊藤秋男: 相対論的重イオン衝突による分子反応イメージング計画

分子構造総合討論会 2006 2006年9月20日~23日(静岡県コンベンションアーツセンター, 静岡)

城丸春夫, 後藤基, 神野智史, 高雄智治, 花田勝彦, 奥野和彦, 阿知波洋次, 田沼肇, 東俊行: 静電型イオン蓄積リング (TMU E-ring) の現状

後藤基, 安田有里, 神野智史, 高雄智治, 花田勝彦, 田沼肇, 東俊行, 杉浦健一, 城丸春夫, 阿知波洋次: 静電型イオン蓄積リングにおけるポルフィリン負イオンビームとレーザーの合流実験

日本物理学会 2006年秋季大会 2006年9月23日~26日(千葉大学・西千葉キャンパス)

的場史朗, 田沼肇, 大槻一雅: 極低温ヘリウム気体中におけるアルカリ原子イオンの移動度 III

花田勝彦, 神野智史, 高雄智治, 後藤基, 押切航希, 間宮佑介, 林知里, 田沼肇, 東俊行, 城丸春夫, 奥野和彦: TMU E-ring における正負分子イオンのレーザー合流実験

大橋隼人, 田沼肇, 藤岡慎介, 西村博明, 佐々木明, 西原功修: 多価 Xe イオンの電荷移行衝突 IV

小池文博, 佐々木明, 西原功修, 砂原淳, 西川亘, 香川貴司, 田沼肇: EUV 光源プラズマのイオンおよびその周辺の原子番号を持つイオンの 4d-4f 遷移のシステムティックス

東俊行, 中野祐司, 近藤力, 畠山温, 小牧研一郎, 中井陽一, 山崎泰規, 高田栄一, 村上健: 3次元コヒーレント共鳴励起を利用した2重共鳴

中井陽一, 中野祐司, 池田時浩, 金井保之, 神原正, 福西暢尚, 近藤力, 東俊行, 小牧研一郎, 山崎泰規: チャネリング条件下におけるリチウム様 Fe イオンのコヒーレント共鳴励起 - エネルギー付与との同時計測

中野祐司, 近藤力, 東俊行, 畠山温, 小牧研一郎, 山崎泰規, 中井陽一, 高田栄一, 村上健: 結晶周期場により形成される重イオンのドレスト状態の観測

加藤隆子, 佐藤国憲, 舟場久芳, 村上泉, 加藤大治, 田沼肇, 山本則正, G. O'Sullivan: 低密度プラズマからの Xe イオンの EUV スペクトル

佐々木明, 西原功修, 砂原淳, 西川亘, 小池文博, 香川貴司, 田沼肇: EUV 光源用 Sn, Xe の詳細原子モデル

理研 RIBF ミニワークショップ「レーザー光利用の次世代加速器実験 ~その発展と物理学への貢献~」
2006年11月30日~12月1日(理化学研究所, 和光)

中野祐司: 結晶場による多価重イオンのコヒーレント共鳴励起

第7回「イオンビームによる表面・界面解析」特別研究会 2006年12月8日~9日(岡山理科大学)

東俊行: 高エネルギー重イオンと結晶: オコロコフ効果研究における新展開

第6回重粒子医科学センターシンポジウム「放射線ガン治療を支える基礎研究」2006年12月14-15日
(放射線医学総合研究所, 千葉)

東俊行: 放射線と原子物理学

原子衝突研究協会設立30周年記念講演会 2006年12月16日(東京大学・駒場キャンパス)

東俊行：極める原子衝突と拡がる原子衝突

Joint Symposium on “Initiatives for Attractive Education in Graduate School of Physics and Chemistry”
and “Application of Advanced Techniques to Chemical Substances”, 2007 年 1 月 30 日～2 月 2 日
(首都大学東京・南大沢キャンパス)

T. Azuma : Development of electrostatic ion storage ring for studying dynamics of large-sized molecular ions

2006 年度宇宙空間原子分子過程研究会「形を有する量子多体系の立体衝突」 2007 年 3 月 1 日
(JAXA 宇宙科学研究本部, 相模原)

東俊行：TMU E-ring を使った準安定原子・分子イオンの研究 — 炭素負イオンから生体分子イオンまで —

日本物理学会 2007 年春季大会 2007 年 3 月 18 日～21 日 (鹿児島大学・郡元キャンパス, 鹿児島)

橋本公瑛, 坂巻雄輔, 小島隆夫, 清水敏夫, 田沼肇, 城丸春夫, 小泉哲夫：Li⁺·(2-ブタノール) イオン移動度のカイラリティ依存性

高雄智治, 神野智史, 花田勝彦, 後藤基, 押切航希, 間宮佑介, 林知里, 田沼肇, 東俊行, 城丸春夫, 奥野和彦：TMU E-ring における C⁻ の衝突誘起電子脱離断面積の測定

神野智史, 高雄智治, 花田勝彦, 後藤基, 押切航希, 間宮佑介, 林知里, 田沼肇, 東俊行, 城丸春夫, 奥野和彦：TMU E-ring における正負分子イオンのレーザー合流実験 II

中野祐司, 井上岳史, 近藤力, 東俊行, 畠山温, 小牧研一郎, 中井陽一, 山崎泰規, 高田栄一, 村上健：結晶場による 3 次元コヒーレント共鳴励起 III

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

日本化学会第 87 春季大会 2007 年 3 月 25 日～28 日 (関西大学・千里山キャンパス)

後藤基, 林知里, 神野智史, 高尾 智治, 花田勝彦, 押切航希, 間宮祐介, 田沼肇, 東俊行, 奥野和彦, 兒玉健, 杉浦健一, 城丸春夫, 阿知波 洋次：静電型イオン蓄積リングを用いたポルフィリン負イオンの冷却過程の研究

EUV 理論モデリングワークショップ 2007 年 3 月 26 日～27 日 (阪大レーザー研, 吹田)

田沼肇：電荷交換分光法による EUV スペクトルとその評価

国際会議

US-Japan Symposium on Collision-Induced X-ray Emission and Antimatter Physics,
Tokyo, Japan, April 13 – 15, 2006

H. Tanuma : EUV light emission from multiply-charged ions in collisions with He

H. Shiromaru : The electrostatic ion storage ring at TMU

T.Azuma : Crystal-dressed atom observed through doubly-resonant coherent excitation

22th International Conference on Atomic Collision in Solids (ICACS),
Berlin, Germany, July 21 – 26, 2006

T. Azuma : Autler-Townes doublet observed through doubly resonant coherent excitation

C. Kondo, S. Masugi, T. Muranaka, A. Ishikawa, Y. Nakano, T. Azuma, A. Hatakeyama, K. Komaki, Y. Nakai, Y. Yamazaki, E. Takada, T. Murakami : Trajectory dependent resonant coherent excitation of planar-channeled ions in a thin Si crystal

13th International Symposium on Small Particles and Inorganic Clusters (ISSPIC XIII),
Göteborg, Sweden, July 23 – 28, 2006

M. Goto, Y. Yasuda, S. Jinno, T. Takao, K. Hanada, H. Tanuma, T. Azuma, K. Sugiura, H. Shiromaru, and Y. Achiba : Electron detachment of super-excited porphyrin anions in an electrostatic ion storage ring

13th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions (HCI 2006),
Belfast, Northern Ireland, UK, August 28 – September 1, 2006

T. Azuma : Crystal-dressed HCI observed through doubly resonant coherent excitation

T. Kagawa, H. Tanuma, H. Ohashi, and K. Nishihara : RCI simulation for EUV spectra from Sn ions

H. Tanuma, H. Ohashi, S. Fujioka, H. Nishimura, A. Sasaki, and K. Nishihara : 4d-4f unresolved transition arrays of xenon and tin ions in charge exchange collisions

H. Ohashi, H. Tanuma, S. Fujioka, H. Nishimura, A. Sasaki, and K. Nishihara : Charge exchange spectroscopy in Sn^{q+} ($q = 6 - 15$)-He collisions

Y. Nakano, S. Masugi, T. Muranaka, T. Azuma, C. Kondo, A. Hatakeyama, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada, and T. Murakami : Double-resonant coherent excitation of HCI planar channeled in a Si crystal

5th International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography (EUVL 2006),
Barcelona, Spain, October 16–19, 2006

H. Tanuma, H. Ohashi, S. Fujioka, H. Nishimura, A. Sasaki, and K. Nishihara : EUV emission spectra of charge selected Sn ions in charge exchange spectroscopy

7th International Seminar on Atomic and Molecular Physics (AISAMP-7),
Chennai, India, December 4–7, 2006

H. Tanuma : Spectroscopic study of multiply charged xenon and tin ions in charge exchange collisions

3rd Stored Particles Atomic Physics Research Collaboration Workshop (SPARC),
Paris, France, February 12–15, 2007

T. Azuma : Three-dimensional resonant coherent excitation of nonchanneling heavy ions travelling in a crystal at high energy

4) 学会誌等

東俊行，田沼肇，城丸春夫：静電型イオン蓄積リングによる原子分子衝突研究，放射線化学 81 (2006) 9-20.

田沼肇：第 24 回原子衝突物理国際会議報告，放射線化学 81 (2006) 54-56.

宇宙物理実験サブグループ

1. 研究活動の概要

X線天文衛星を用いて宇宙の観測的研究を行なうとともに、将来の衛星搭載を目指した次世代 X 線観測機器の開発を行っている。2005 年 7 月 10 日に我が国 5 番目の X 線天文衛星「すざく」が軌道に投入され、XIS および HXD の 2 つの観測装置が稼働を続け多くの観測データが得られつつある。当研究室では「すざく」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、「すざく」では果たせなかった、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、新しい検出器や冷凍機システムの開発も引き続き進めている。

1) 銀河・銀河団の観測

銀河団や銀河群の中心領域にはキャビティと呼ばれる X 線の空洞がしばしば存在し、電波ハローがその空間を満たしていることもある。非熱的な圧力のために銀河団の高温ガスが外へ押し退けられて空洞が作られ、非熱的なエネルギー源として中心の活動銀河のジェットが考えられている。しかし、電波ハローも活動銀河も無い状態で、X 線空洞だけが存在するシステムがあり、空洞の生成維持機構はよく分かっていない。この例として銀河群 HCG 62 をとりあげ、チャンドラ、ニュートン衛星のデータを解析した。X 線空洞を維持するには宇宙線などによる未確認の大きなエネルギー密度が必要であることを明らかにし、将来の高温ガスの運動や硬 X 線観測が重要であることを議論した。この天体は「すざく」でも観測され、詳しい重元素分布などの解析が行われている。

「すざく」は酸素の輝線に対して他の衛星よりも優れたエネルギー分解能を持つため、宇宙を満たす約 100 万度の銀河間ガス (WHIM) の探索に適している。赤方偏移 0.2 にある銀河団 A2218 を観測し、その周辺に存在する WHIM の出す酸素輝線を調べた。WHIM の放射については上限値を得るにとどまったが、酸素強度の上限値は、これまで他の領域で報告された値の約 1/10 で、「すざく」の高い感度を示す結果である。

「すざく」では、これまでの鉄、シリコン以外に、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 (図 1)。比較的低温の銀河団と銀河群あわせて 4 つのシステムの元素存在量について、Ia 型および II 型超新星で生成される各元素の存在比と比較した。その結果、II 型超新星が Ia 型に対して 3 倍多く発生したとすれば、これら銀河団の重元素量をほぼ統一的に説明できることがわかった。これは宇宙の歴史のなかで発生したすべての超新星爆発に対して制限を与える、意義の高い結果である。

2) 「すざく」による激変星の観測

矮新星 SS Cyg: 「すざく」衛星の観測より、矮新星 SS Cyg の quiescence 期の鉄の蛍光 6.4keV 輝線が、エネルギー幅の狭い成分と広い成分から構成されていることがわかった。このうち幅の狭い成分は白色矮星表面からの反射と考えられる。この等価幅を定量的に評価することにより、矮新星境界層の動径方向の厚みが、白色矮星の半径の 15%以下と極めて薄いことがわかった。

強磁場激変星 AE Aqr: 磁場を持ち高速で自転する白色矮星は、中性子星なみのローレンツ電位差を生むことができるので、高エネルギー宇宙線加速の現場として期待されている。「すざく」による観測の結果、10keV よりも高いエネルギー帯で、白色矮星の自転に同期した X 線パルスを捉えることに成功した。パルス放射の光度は自転エネルギーロスの 0.1%であり、回転駆動型パルサー (高速回転する磁場の強い中性子星) の放射エネルギー転換効率に一致する。パルスの形も数 keV 以下では正弦波的だが、高

エネルギーに行くほどかにパルサーに似た double horn 状に変化して行くこともわかった。この結果は、白色矮星で粒子加速が起きていることを示す初めての直接的観測結果として注目に値する。

3) 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、宇宙研、早稲田大学、SII ナノテクノロジー等との共同で 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 ~ 1000 素子からなる多ピクセルアレイである。昨年度に引き続き、本研究室のスパッタ装置で成膜した Ti/Au の超伝導 2 層薄膜を、宇宙研の装置でプロセスし TES カロリメータを in-house で製作した。X 線吸収体は 0.1 mm 角と小さめではあるが、この素子により 5.9 keV でのエネルギー分解能 4.8 eV (FWHM) が達成された (図 2)。これは日本としての記録更新かつ、世界の最高性能 (2.4 eV) に迫るものであり、首都大・宇宙研での今後の自作素子の開発に大きなはずみを与える結果である。

4) 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の開発を行なっている。従来の鉄ミョウバンに比べて到達温度を低くすることが可能であり、強酸を溶媒として必要としないため取り扱い易いクロムカリウムミョウバンを用い、溶液を 36 と 15 の間で連続循環させることで、約 1 週間で磁性塩結晶全体を製作した。これをウイスコンシン大学の装置と組み合わせて冷却実験を行い、64 mK まで冷えることを確認した。

5) 高い空間分解能を有する X 線望遠鏡の開発

前年度に引き続き「薄板多重積層型 X 線望遠鏡」の高解像度化に取り組んだ。今年度は、反射鏡の上下段を一体にして加工した、厚さ 0.5 mm と 1.0 mm のアラインメントプレートを 13 個のスロットにとりつけてレーザー変位計で位置を測定しながら精密に位置決めし、反射鏡を挿入後に、0.5 mm のプレートを動径方向に押し引きして反射鏡の位置を正しい位置に固定する方法を採用した。また、これと並行して反射鏡自体を in house で試作し続けてきたが、今年度になりようやく十分な性能を持ったものが製作できるようになってきたので、10 セットの反射鏡を自前で製作して使用することにした。

反射鏡の位置を正確に決めて、宇宙科学研究本部の標準 X 線光源で性能試験測定を行なったところ、角分解能は 4.51keV の X 線に対して HPD で 1.47 分角となった。これは Astro-E1 衛星の 2.1 分角、Astro-E2 衛星の 1.9 分角を凌ぐ値であるが、昨年度に 3 組の反射鏡で達成した 1.0 分角には及ばなかった。原因を追及したところ、10 セットの反射鏡の中に極端に厚さの厚いものが混ざっており、これがプレートのスライドによる反射鏡の位置決め精度を制限していることがわかった。今後は反射鏡の厚さをコントロールする方法を確立する必要がある。

6) 「すざく」衛星の軌道上較正とデータ解析システムの開発

首都大グループは「すざく」チームにおいて主に、X 線望遠鏡 (XRT) の較正、および XRT/XIS を組み合わせたデータ解析用ソフトウェアの開発を担当している。XRT の較正に関しては、石田がヨーロッパの XMM-Newton 衛星やアメリカの Chandra 衛星との国際協力を取り持ち、6 月には X 線衛星の相互較正に関する集まりに参加した。ソフトウェア開発は石崎が中心となって、宇宙研および NASA/GSFC と連絡を取りつつプログラム開発を行なっており、特に XRT のレイトレーシングプログラム用いたモンテカルロシミュレーションにより検出器の応答関数を計算するツールを作成、「すざく」の標準解析パッケージの一部として無償で配布されている。銀河団のような空間的に広がった天体の解析には必ず必要となるソフトウェアであり、首都大グループを中心に実際の A1060 銀河団への解析へ適用、標準的な解析手法を確立した。

7) 次期X線天文衛星の提案

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 (OVII, OVIII) を使ってサーベイするために、専用小型衛星 DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) を提案してきたが、これをスケールアップしたものを EDGE (Explorer for Diffuse emission and Gamma-ray burst Explosions) という名で、ヨーロッパの次期科学衛星シリーズ Cosmic Vision に提案する作業を進めた。オランダ、イタリア、日本の3者が中心となり、衛星の科学目的とハードウェアを議論するための会合が、ヨーロッパで3回行われた。日本は銀河間物質の観測計画の立案、および冷却系を中心とするマイクロカロリメータを担当している。

さらに、2011年に打ち上げ予定のロシアの大型衛星 Spectrum-Röntgen-Gamma (SRG) 衛星に、日米欧の協力でカロリメータを搭載する可能性がでてきたため、日本は宇宙研、首都大を中心とするワーキンググループを組織して技術的な検討を始めた。

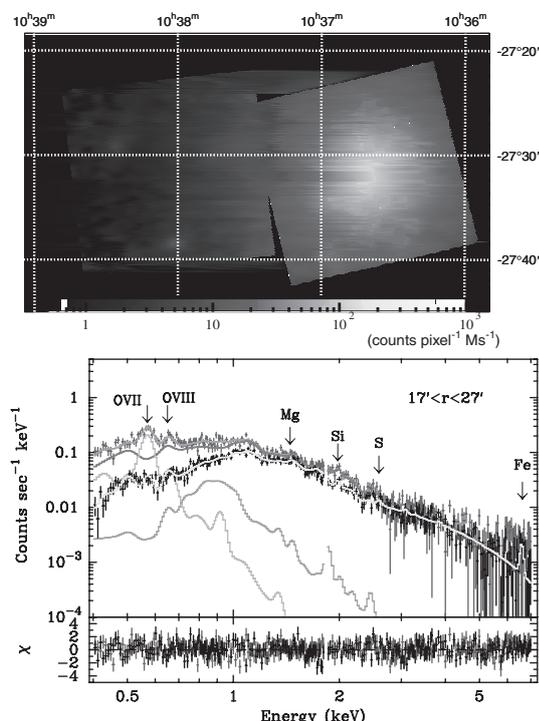


図 1: X線天文衛星「すざく」で観測した A1060 銀河団の画像 (上) と銀河団中心から $17' < r < 27'$ 領域の XIS 検出器 (X線 CCD カメラ) によるエネルギースペクトル。銀河団の周辺部においても、十分な統計のスペクトルが得られ、O, Mg, Si, S, Fe の存在量を決定することが可能である。

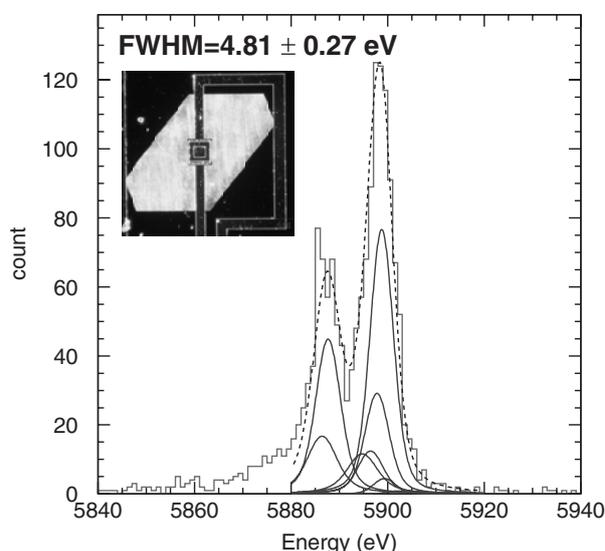


図 2: 本研究室のスパッタ装置で成膜した Ti/Au 超伝導 2 層薄膜を利用した TES 型カロリメータの写真 (図中) と、カロリメータで取得した X線エネルギースペクトル。写真の中心部の小さな四角の部分が $120 \mu\text{m}$ 角、 $1.5 \mu\text{m}$ 厚の金の X線吸収体で、この部分で吸収された X線による温度の上昇を超伝導体の抵抗変化を検知することで精密に入射 X線のエネルギーを測定できる。このスペクトルでは、 $\Delta E = 4.8 \text{ eV}$ のエネルギー分解能を実現しており、 $E/\Delta E \sim 1200$ に達する。ふた山のヒストグラムは、それぞれ Mn の $K\alpha_1$ (5899 eV) と $K\alpha_2$ (5888 eV) 特性 X線に対応する。

2. 研究業績

1) 論文

N. Ota, Y. Fukazawa, A.C. Fabian, T. Kanamaru, M. Kawaharada, N. Kawano, R.L. Kelley, T. Kitaguchi, K. Makishima, K. Matsushita, K. Murase, K. Nakazawa, T. Ohashi, J.S. Sanders, T. Tamura, Y. Urata: Suzaku Observations of the Centaurus Cluster: Absence of Bulk Motions in the Intracluster Medium, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **59** SP1 (2007) pp.351–359

Y. Takei, T. Ohashi, P.J. Henry, K. Mitsuda, R. Fujimoto, T. Tamura, N.Y. Yamasaki, K. Hayashida, N. Tawa, K. Matsushita, M.W. Bautz, J.P. Hughes, G.M. Madejski, R.L. Kelley, K.A. Arnaud: Search

for Oxygen Emission from Warm-Hot Intergalactic Medium around A2218 with Suzaku, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **59** SP1 (2007) pp.339–349

K. Matsushita, Y. Fukazawa, J.P. Hughes, T. Kitaguchi, K. Makishima, K. Nakazawa, T. Ohashi, N. Ota, T. Tamura, M. Tozuka, T.G. Tsuru, Y. Urata, N.Y. Yamasaki: Suzaku Observation of the Metallicity Distribution in the Intracluster Medium of the Fornax Cluster, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **59** SP1 (2007) pp.327–338

S. Yamauchi, K. Ebisawa, A. Bamba, M. Ishida, K. Iwasawa, Y. Tanaka, M. Kokubun, K. Koyama, H. Takahashi, Y. Tsuboi: Discovery of a New X-Ray Transient Source in the Scutum Region with Suzaku, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **59** SP1 (2007) pp.215–220

K. Mukai, M. Ishida, C. Kilbourne, H. Mori, Y. Terada, K. Chan, Y. Soong: An Apparent Hard X-Ray Decline of CH Cygni, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **59** SP1 (2007) pp.177–183

R.K. Smith, M.W. Bautz, R.J. Edgar, R. Fujimoto, K. Hamaguchi, J.P. Hughes, M. Ishida, R. Kelley, C.A. Kilbourne, K.D. Kuntz, D. McCammon, E. Miller, K. Mitsuda, K. Mukai, P.P. Plucinsky, F.S. Porter, S.L. Snowden, Y. Takei, Y. Terada, Y. Tsuboi, N.Y. Yamasaki: Suzaku Observations of the Local and Distant Hot ISM, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **59** SP1 (2007) pp.141–150

R. Fujimoto, K. Mitsuda, D. Mccammon, Y. Takei, M. Bauer, Y. Ishisaki, F.S. Porter, H. Yamaguchi, K. Hayashida, N.Y. Yamasaki: Evidence for Solar-Wind Charge-Exchange X-Ray Emission from the Earth's Magnetosheath, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **59** SP1 (2007) pp.133–140

Y. Ishisaki, Y. Maeda, R. Fujimoto, M. Ozaki, K. Ebisawa, T. Takahashi, Y. Ueda, Y. Ogasaka, A. Ptak, K. Mukai, K. Hamaguchi, M. Hirayama, T. Kotani, H. Kubo, R. Shibata, M. Ebara, A. Furuzawa, R. Iizuka, H. Inoue, H. Mori, S. Okada, Y. Yokoyama, H. Matsumoto, H. Nakajima, H. Yamaguchi, N. Anabuki, N. Tawa, M. Nagai, S. Katsuda, K. Hayashida, A. Bamba, E.D. Miller, K. Sato, N.Y. Yamasaki: Monte Carlo Simulator and Ancillary Response Generator of Suzaku XRT/XIS System for Spatially Extended Source Analysis, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **59** SP1 (2007) pp.113–132

R.L. Kelley, K. Mitsuda, C.A. Allen, P. Arsenovic, M.D. Audley, T.G. Bialas, K.R. Boyce, R.F. Boyle, S.R. Breon, G.V. Brown, J. Cottam, M.J. Dipirro, R. Fujimoto, T. Furusho, K.C. Gendreau, G.G. Gochar, O. Gonzalez, M. Hirabayashi, S.S. Holt, H. Inoue, M. Ishida, Y. Ishisaki, C.S. Jones, R. Keski-Kuha, C.A. Kilbourne, D. McCammon, U. Morita, S.H. Moseley, B. Mott, K. Narasaki, Y. Ogawara, T. Ohashi, N. Ota, J.S. Panek, F.S. Porter, A. Serlemitsos, P.J. Shirron, G.A. Sneiderman, A.E. Szymkowiak, Y. Takei, J.L. Tveekrem, S.M. Volz, M. Yamamoto, N.Y. Yamasaki: The Suzaku High Resolution X-Ray Spectrometer, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **59** SP1 (2007) pp.77–112

P.J. Serlemitsos, Y. Soong, K. Chan, T. Okajima, J.P. Lehan, Y. Maeda, K. Itoh, H. Mori, R. Iizuka, A. Itoh, H. Inoue, S. Okada, Y. Yokoyama, Y. Itoh, M. Ebara, R. Nakamura, K. Suzuki, M. Ishida, A. Hayakawa, C. Inoue, S. Okuma, R. Kubota, M. Suzuki, T. Osawa, K. Yamashita, H. Kunieda, Y. Tawara, Y. Ogasaka, A. Furuzawa, K. Tamura, R. Shibata, Y. Haba, M. Naitou, K. Misaki: The

X-Ray Telescope onboard Suzaku, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **59** SP1 (2007) pp.9–21

K. Mitsuda, M. Bautz, H. Inoue, R.L. Kelley, K. Koyama, H. Kunieda, K. Makishima, Y. Ogawara, R. Petre, T. Takahashi, H. Tsunemi, N.E. White, N. Anabuki, L. Angelini, K. Arnaud, H. Awaki, A. Bamba, K. Boyce, G.V. Brown, K. Chan, J. Cottam, T. Dotani, J. Doty, K. Ebisawa, Y. Ezoe, A.C. Fabian, E. Figueroa, R. Fujimoto, Y. Fukazawa, T. Furusho, A. Furuzawa, K. Gendreau, R.E. Griffiths, Y. Haba, K. Hamaguchi, I. Harrus, G. Hasinger, I. Hatsukade, K. Hayashida, P.J. Henry, J. Hiraga, S. Holt, A. Hornschemeier, J.P. Hughes, U. Hwang, M. Ishida, Y. Ishisaki, N. Isobe, M. Itoh, N. Iyomoto, S.M. Kahn, T. Kamae, H. Katagiri, J. Kataoka, H. Katayama, N. Kawai, C. Kilbourne, K. Kinugasa, S. Kissel, S. Kitamoto, M. Kohama, T. Kohmura, M. Kokubun, T. Kotani, J. Kotoku, A. Kubota, G.M. Madejski, Y. Maeda, F. Makino, A. Markowitz, C. Matsumoto, H. Matsumoto, M. Matsuoka, K. Matsushita, D. McCammon, T. Mihara, K. Misaki, E. Miyata, T. Mizuno, K. Mori, H. Mori, M. Morii, H. Moseley, K. Mukai, H. Murakami, T. Murakami, R. Mushotzky, F. Nagase, M. Namiki, H. Negoro, K. Nakazawa, J.A. Nousek, T. Okajima, Y. Ogasaka, T. Ohashi, T. Oshima, N. Ota, M. Ozaki, H. Ozawa, A.N. Parmar, W.D. Pence, F.S. Porter, J.N. Reeves, G.R. Ricker, I. Sakurai, W.T. Sanders, A. Senda, P. Serlemitsos, R. Shibata, Y. Soong, R. Smith, M. Suzuki, A.E. Szymkowiak, H. Takahashi, T. Tamagawa, K. Tamura, T. Tamura, Y. Tanaka, M. Tashiro, Y. Tawara, Y. Terada, Y. Terashima, H. Tomida, K. Torii, Y. Tsuboi, M. Tsujimoto, T.G. Tsuru, M.J.L. Turner, Y. Ueda, S. Ueno, M. Ueno, S. Uno, Y. Urata, S. Watanabe, N. Yamamoto, K. Yamaoka, N.Y. Yamasaki, K. Yamashita, M. Yamauchi, S. Yamauchi, T. Yaqoob, D. Yonetoku, A. Yoshida: The X-Ray Observatory Suzaku, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **59** SP1 (2007) pp.1–7

Y. Ezoe, M. Koshiishi, M. Mita, K. Mitsuda, A. Hoshino, Y. Ishisaki, Z. Yang, T. Takano, R. Maeda: Micropore x-ray optics using anisotropic wet etching of (110) silicon wafers, *Applied Optics IP* **45** (2006) pp.8932–8938

S. Watanabe, M. Sako, M. Ishida, Y. Ishisaki, S. Kahn, T. Kohmura, F. Nagase, F. Paerels, T. Takahashi: X-Ray Spectral Study of the Photoionized Stellar Wind in Vela X-1, *The Astrophysical Journal* **651** (2006) pp.421–437

U. Morita, Y. Ishisaki, N.Y. Yamasaki, N. Ota, N. Kawano, Y. Fukazawa, T. Ohashi: Chandra and XMM-Newton Observations of a Group of Galaxies, HCG 62, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **58** (2006) pp.719–742

A. Hayakawa, A. Hoshino, M. Ishida, T. Furusho, N.Y. Yamasaki, T. Ohashi: Detailed XMM-Newton Observation of the Cluster of Galaxies Abell 1060, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **58** (2006) pp.695–702

H. Kawahara, K. Yoshikawa, S. Sasaki, Y. Suto, N. Kawai, K. Mitsuda, T. Ohashi, N.Y. Yamasaki: Soft X-Ray Transmission Spectroscopy of a Warm/Hot Intergalactic Medium with XEUS, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **58** (2006) pp.657–671

M. Ozaki, S. Watanabe, Y. Terada, T. Itoh, M. Kitsunozuka, T. Kishishita, Y. Ishisaki, T. Takahashi: Framework for a Geant4-Based Simulator of the Radiation Background and Detector Responses of

the Space X-Ray Observatory Suzaku (Astro-E2), *Nuclear Science, IEEE Transactions on* **53** (2006) pp.1310–1316

K. Shinozaki, T. Miyaji, Y. Ishisaki, Y. Ueda, Y. Ogasaka: Spectral Statistics and Local Luminosity Function of a Complete Hard X-Ray Sample of the Brightest Active Galactic Nuclei, *The Astronomical Journal* **131** (2006) pp.2843–2858

K. Shinozaki, A. Hoshino, Y. Ishisaki, U. Morita, T. Ohashi, T. Mihara, K. Mitsuda, K. Tanaka, Y. Yagi, H. Koguchi, Y. Hirano, H. Sakakita: Soft x-ray measurement of the toroidal pinch experiment RX reversed field pinch plasma using transition edge sensor calorimeter, *Review of Scientific Instruments* **77** (2006) pp.043104–043104-12

2) 国際会議報告

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, *Space Telescopes and Instrumentation II: Ultraviolet to Gamma Ray*. Edited by M.J.L. Turner, G. Hasinger, *Proceedings of the SPIE* **6266** (2006) pp.62661Z-1–11

Y. Ezoe, M. Koshiishi, M. Mita, K. Mitsuda, Y. Ishisaki, A. Hoshino, Z. Yang, T. Takano, H. Mekar, R. Maeda: Recent development of micropore optics using MEMS technologies, *Space Telescopes and Instrumentation II: Ultraviolet to Gamma Ray*. Edited by M.J.L. Turner, G. Hasinger, *Proceedings of the SPIE* **6266** (2006) pp.62661B-1–9

Y. Ogasaka, K. Tamura, R. Shibata, T. Okajima, A. Furuzawa, H. Kunieda, Y. Maeda, M. Ishida, H. Awaki: Design and technology review of the xray telescope system onboard NeXT mission, *Space Telescopes and Instrumentation II: Ultraviolet to Gamma Ray*. Edited by M.J.L. Turner, G. Hasinger, *Proceedings of the SPIE* **6266** (2006) pp.626615-1–9

T. Ohashi, M. Ishida, S. Sasaki, Y. Ishisaki, K. Mitsuda, N.Y. Yamasaki, R. Fujimoto, Y. Takei, Y. Tawara, A. Furuzawa, Y. Suto, K. Yoshikawa, H. Kawahara, N. Kawai, T.G. Tsuru, K. Matsushita, T. Kitayama: DIOS: the diffuse intergalactic oxygen surveyor, *Space Telescopes and Instrumentation II: Ultraviolet to Gamma Ray*. Edited by M.J.L. Turner, G. Hasinger, *Proceedings of the SPIE* **6266** (2006) pp.62660G-1–9

K. Shinozaki, A. Hoshino, Y. Ishisaki, U. Morita, T. Ohashi, T. Mihara, K. Mitsuda, K. Tanaka, Y. Yagi, H. Koguchi, Y. Hirano, H. Sakakita: First application of a TES microcalorimeter to a thermonuclear fusion plasma experiment, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **559** (2006) pp.760–762

K. Shinozaki, A. Hoshino, Y. Ishisaki, T. Mihara: Demonstration of the improved PID method for the accurate temperature control of ADRs, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **559** (2006) pp.663–665

C.A. Kilbourne, K.R. Boyce, G.V. Brown, J. Cottam, E. Figueroa-Feliciano, R. Fujimoto, T. Furusho, Y. Ishisaki, R.L. Kelley, D. McCammon, K. Mitsuda, U. Morita, F.S. Porter, N. Ota, T. Saab, Y. Takei, M. Yamamoto: Analysis of the Suzaku/XRS background, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **559** (2006) pp.620–622

J. Cottam, K.R. Boyce, G.V. Brown, R. Fujimoto, T. Furusho, Y. Ishisaki, R.L. Kelley, C.A. Kilbourne, D. McCammon, K. Mitsuda, U. Morita, N. Ota, F.S. Porter, T. Saab, Y. Takei, M. Yamamoto: Ground calibration of the XRS microcalorimeter onboard Suzaku, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **559** (2006) pp.617–619

N. Ota, K.R. Boyce, G.V. Brown, J. Cottam, R. Fujimoto, T. Furusho, Y. Ishisaki, R.L. Kelley, C.A. Kilbourne, D. McCammon, K. Mitsuda, U. Morita, F.S. Porter, Y. Takei, M. Yamamoto: Performance verification of the Suzaku X-ray Spectrometer in the flight configuration, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **559** (2006) pp.614–616

U. Morita, Y. Yamakawa, T. Fujimori, Y. Ishisaki, T. Ohashi, Y. Takei, K. Yoshida, T. Yoshino, K. Mitsuda, N.Y. Yamasaki, R. Fujimoto, H. Sato, Y. Minoura, N. Takahashi, T. Homma, S. Shoji, Y. Kuroda, M. Onishi: Evaluation of 256-pixel TES microcalorimeter arrays with electrodeposited Bi absorbers, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **559** (2006) pp.539–541

A. Hoshino, K. Shinozaki, Y. Ishisaki, T. Ohashi, K. Tanaka, T. Mihara, Y. Tawara: Evaluation of the IR UV blocking filters for ADR with a TES microcalorimeter, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **559** (2006) pp.471–473

T. Yoshino, K. Yoshida, T. Hagihara, K. Sato, U. Morita, Y. Ishisaki, R. Fujimoto, N.Y. Yamasaki, K. Mitsuda: Properties of vacuum-evaporated bismuth absorber, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **559** (2006) pp.432–435

3) 学会講演

日本天文学会 2006 年春季年会 2006 年 3 月 27 日 ~ 3 月 29 日 (和歌山大学)

松下恭子 (東京理科大)、大橋隆哉 (首都大)、鶴剛 (京大)、深沢泰司、戸塚都 (広島大)、山崎典子、中澤知洋、田村隆幸 (JAXA)、太田直美、磯部直樹、浦田裕次 (理研)、北口貴雄、佐藤光浩、牧島一夫 (東大): すざく衛星による Fornax 座銀河団の観測 [T01a]

竹井洋、満田和久、藤本龍一、田村隆幸、山崎典子 (ISAS/JAXA)、大橋隆哉 (首都大理)、J. P. Henry (ハワイ大)、松下恭子 (理科大理)、田和憲明、林田清 (阪大理)、Greg Madejski (SLAC): 銀河団周辺の Warm-Hot Intergalactic Medium の X 線分光観測 [T03a]

早川彰、石田学、(都立大理)、山崎典子、古庄多恵 (JAXA/ISAS)、大橋隆哉 (都立大理): XMM-Newton 衛星による銀河団の重力質量分布の系統的研究 [T06a]

土屋彰広、山崎典子 (宇宙研)、佐藤浩介、大島泰 (首都大): X 線検出器としての磁気量子熱量計の開発 [W40b]

星野晶夫、篠崎慶亮、石崎欣尚、山川善之、倉林元、大橋隆哉 (都立大/首都大)、三原建弘 (理研): 地上 X 線/ γ 線分光実験にむけた断熱消磁冷凍機システムの開発 [W41b]

榎原匡俊、森英之、飯塚亮、伊藤昭治、岡田俊策、井上裕彦、前田良知 (ISAS/JAXA)、小賀坂康志、古澤彰浩、國枝秀世 (名大)、石田学、石崎欣尚 (首都大)、他 Suzaku XRT-team: 「すざく」搭載 X 線望遠鏡の軌道上データを用いた応答関数の構築 [W50a]

江副祐一郎、輿石真樹、三田信、満田和久 (宇宙研)、星野晶夫、石崎欣尚 (首都大)、楊振 (都立産技研)、高野貴之、前田龍太郎 (産総研): 将来衛星に向けた MEMS X 線光学系の開発 (1) [W68a]

輿石真樹、江副祐一郎、三田信、満田和久 (宇宙研)、星野晶夫、石崎欣尚 (首都大)、高野貴之、銘苅春隆、前田龍太郎 (産総研)、楊振 (都立産技研): 将来衛星に向けた MEMS X 線光学系の開発 (2) [W69a]

倉林元、山川善之、石崎欣尚、大島泰、大橋隆哉 (首都大理工)、田中啓一 (SII ナノテクノロジー): TES 型 γ 線マイクロカロリメータの開発と性能評価 [W73a]

藤森玉行、大島泰、石崎欣尚、山川善之、倉林元、大橋隆哉 (東京都立大学)、輿石真樹、江副祐一郎、山崎典子 (ISAS): X 線マイクロカロリメータの製作プロセスの構築 [W74a]

伊藤由美、岡田俊策、中村良子 (東京工業大学)、國枝秀世 (名大)、前田良知、森英之、飯塚亮、伊藤昭治、井上裕彦、榎原匡俊 (ISAS/JAXA)、石田学、早川彰、大熊哲、窪田廉 (首都大): イオンビームスパッタ装置を用いた多層膜 X 線反射鏡の高性能化 [W78a]

日本物理学会第 61 回年次大会 2006 年 3 月 27 日 ~ 3 月 30 日 (愛媛大学・松山大学)

竹井洋、満田和久、藤本龍一 (ISAS/JAXA)、大橋隆哉 (首都大)、J.P. Henry (ハワイ大)、田村隆幸、山崎典子 (ISAS/JAXA): 銀河団周辺に存在する Warm-hot intergalactic medium の X 線観測 [27pSD-9]

日本地球惑星科学連合 2006 年大会 U054 物理・天文・地球惑星 合同プラズマ科学シンポジウム
2006 年 5 月 14 日 ~ 5 月 18 日 (幕張メッセ 国際会議場)

石崎欣尚: X 線マイクロカロリメータを使ったプラズマ放射の分光計測技術

Measurement technology of plasma emission spectroscopy with X-ray microcalorimeters

日本天文学会 2006 年秋季年会 2006 年 9 月 19 日 ~ 9 月 21 日 (北九州国際大学)

森田うめ代、石崎欣尚、大橋隆哉 (首都大理工)、山崎典子 (ISAS/JAXA)、太田直美 (理研)、川埜直美、深沢泰司 (広島大理): Chandra・XMM-Newton で探る銀河群 HCG62 の X 線キャビティの性質 [T01a]

佐藤浩介 (都立大理)、山崎典子 (ISAS/JAXA)、石崎欣尚、石田学、大橋隆哉 (首都大理工)、北口貴雄、川原田円、国分紀秀、牧島一夫 (東大理)、太田直美 (理研)、中澤知洋、田村隆幸 (ISAS/JAXA)、松下恭子 (東京理科大)、川埜直美、深沢泰司 (広島大理)、John P. Hughes (Rutgers University)、他 すざくチーム: すざく衛星で観測された銀河団 A 1060 の温度構造と重元素分布 [T02a]

竹井洋、満田和久、藤本龍一、田村隆幸、山崎典子 (ISAS/JAXA)、大橋隆哉 (首都大理工)、J. P. Henry (ハワイ大)、松下恭子 (理科大)、田和憲明、林田清 (阪大理)、G. Madejski (SLAC)、国分紀秀、佐藤光浩 (東大理)、M. W. Bautz (MIT)、J. P. Hughes (Rutgers 大)、R. L. Kelley (NASA/GSFC)、他 「すざく」チーム: 「すざく」による銀河団 A2218 の観測 [T03a]

太田直美 (理研)、深沢泰司、川埜直美 (広島大)、牧島一夫、川原田円、北口貴雄、佐藤光浩 (東大理)、松下恭子、金丸武弘 (東京理科大)、浦田裕次、村瀬弘一 (埼玉大)、中澤知洋、田村隆幸 (ISAS/JAXA)、大橋隆哉 (首都大)、A. C. Fabian, J. S. Sanders (Cambridge 大)、他 「すざく」チーム: すざく衛星による Centaurus 銀河団中のガスバルク運動測定 [T04a]

松下恭子 (東京理科大)、大橋隆哉 (首都大)、鶴剛 (京大)、深沢泰司、戸塚都 (広島大)、山崎典子、中澤知洋、田村隆幸 (JAXA)、太田直美、浦田裕次 (理研)、北口貴雄、牧島一夫 (東大)、John Huges: すざく衛星による Fornax 座銀河団の観測 – 重元素の分布と起源 – [T05a]

川埜直美、深澤泰司 (広島大学)、北口貴雄、川原田円、国分紀秀、牧島一夫 (東京大学) 中澤知洋、山崎典子 (ISAS/JAXA)、太田直美 (理化学研究所)、佐藤浩介、大橋隆哉 (首都大学)、村瀬弘一、浦田裕次、田代信 (埼玉大学): 「すざく」衛星による銀河団からの非熱的硬 X 線放射の探査 [T06a]

尾崎正伸、山崎典子、クリス=バルータ、海老沢研、田村隆幸、藤本龍一、高橋忠幸 (宇宙航空研究開発機構)、石崎欣尚 (首都大)、寺田幸功 (理研)、松本浩典、上田佳宏 (京大理)、日米「すざく」チーム: 「すざく」観測データの一般配布体制 [W39c]

林田清、勝田哲、穴吹直久、鳥居研一、長井雅章、常深博 (大阪大学)、山口弘悦、松本弘典 (京都大学)、馬場彩 (理研)、E. Miller、B. LaMarr (MIT)、竹井洋 (宇宙航空研究開発機構)、武井大 (立教大学)、国分紀秀 (東大)、佐藤浩介、石崎欣尚、石田学 (首都大学東京)、他 XIS チーム: すざく衛星搭載 XIS の軟 X 線検出効率の経年変化 [W42b]

向井一馬、吉野友崇、江副祐一郎、藤本龍一、山崎典子、満田和久 (ISAS/JAXA)、倉林元、石崎欣尚 (首都大学東京)、前田龍太郎、高野貴之 (産総研): TES 型 X 線マイクロカロリメータ用の吸収体の開発 [W66a]

倉林元、石崎欣尚、大橋隆哉 (首都大理工)、吉野友崇、萩原利士成、満田和久 (ISAS/JAXA)、田中啓一 (SIINT): 超伝導磁気シールドを設けた TES 型マイクロカロリメータの性能評価 [W67a]

前田良知 (JAXA/ISAS)、國枝秀世、山下廣順、田原譲、小賀坂康志、田村啓輔、古澤彰浩、幅良統 (名大理)、石田学 (首大理)、Peter J. Serlemitsos、Yang Soong、Kai-Wing Chan、John P. Lehan、岡島崇 (GSFC/NASA)、見崎一民 (MPE)、柴田亮 (ニコン)、森英之 (京大理)、飯塚亮 (西播磨天文台)、すざく XRT チーム: X 線天文衛星「すざく」搭載 X 線望遠鏡「XRT」 [W69a]

岡田俊策、伊藤昭治、井上裕彦、鈴木健介、前田良知 (JAXA/ISAS)、森英之 (京大)、飯塚亮 (西はりま天文台)、榎原匡俊 (NTS)、石田学、石崎欣尚 (首都大)、小賀坂康志、古澤彰浩、國枝秀世 (名大)、他 Suzaku XRT チーム: 「すざく」搭載 X 線望遠鏡の応答関数の現状 [W70a]

鈴木健介、岡田俊策、井上裕彦、前田良知 (JAXA/ISAS)、石田学 (首都大理)、中嶋大、山口弘悦、森英之、松本浩典 (京大理)、すざく XIS & XRT チーム: かに星雲を用いた「すざく」XRT/XIS の有効面積キャリブレーション [W71a]

石崎欣尚 (首都大)、前田良知、海老沢研、藤本龍一、尾崎正伸、高橋忠幸 (ISAS)、上田佳宏、森英之 (京都大)、古澤彰浩、小賀坂康志 (名古屋大) 他「すざく」XRT & XIS チーム: 「すざく」XRT + XIS のモンテカルロシミュレーションを用いた ARF レスポンスの計算手法 [W72a]

中村良子、岡田俊策、前田良知 (JAXA/ISAS)、林多佳由、石田学 (首都大)、宮澤拓也、深谷美博、岩原知永、小賀坂康志、國枝秀世 (名古屋大)、柴田亮 (Nikon)、ISAS XRT チーム: NeXT 衛星に向けた Pt/C 多層膜反射鏡の開発 [W80a]

石田学 (首都大学)、岡田俊策、中村良子 (ISAS/JAXA)、寺田幸功 (理研)、向井浩二、濱口健二 (NASA/GSFC)、他「すざく」チーム: 「すざく」による矮新星 SS Cyg の観測 [J10a]

山内茂雄 (岩手大人社)、海老沢研 (ISAS/JAXA)、馬場彩 (理研)、岩澤一司、田中靖郎 (MPE)、石田学 (首都大理)、国分紀秀 (東大理)、小山勝二 (京大理)、高橋弘充 (広大理)、坪井陽子 (中央大理工)、すざくチーム: すざく衛星による銀河面領域観測時に発見されたトランジェント天体 [J21b]

日本物理学会第 61 回年次大会 2006 年 3 月 27 日～3 月 30 日 (愛媛大学・松山大学)

北口貴雄, 川原田円, 国分紀秀 (東京大), 牧島一夫 (東京大・理研), 太田直美 (理研), 深沢泰司, 川埜直美 (広島大), 中澤知洋, 山崎典子 (ISAS/JAXA), 佐藤浩介, 大橋隆哉 (首都大), 村瀬弘一, 浦田裕次, 田代信 (埼玉大): 「すざく」衛星による銀河団からの硬 X 線放射の探査 [23pSH-5]

川原田円, 北口貴雄, 国分紀秀 (東京大), 牧島一夫 (東京大・理研), 太田直美 (理研), 田村隆幸, 山崎典子 (ISAS/JAXA), 佐藤浩介, 大橋隆哉 (首都大), 松下恭子 (東京理科大), 深沢泰司 (広島大), ほか「すざく」チーム: 銀河団中の重元素および銀河の空間分布から探る銀河団の進化 [23pSH-11]

江副祐一郎, 輿石真樹, 三田信, 満田和久 (ISAS/JAXA), 星野晶夫, 石崎欣尚 (首都大), 高野貴之, 前田龍太郎 (産総研): 半導体微細加工技術 MEMS を用いた超軽量 X 線光学系の開発 (1) [22pSH-10]

輿石真樹, 江副祐一郎, 三田信, 満田和久 (ISAS/JAXA), 石崎欣尚, 星野晶夫 (首都大), 高野貴之, 前田龍太郎 (産総研): 半導体微細加工技術 MEMS を用いた超軽量 X 線光学系の開発 (2) [22pSH-11]

星野晶夫, 山川善之, 倉林元, 石崎欣尚, 大島泰, 大橋隆哉, 篠崎慶亮 (首都大), 満田和久 (ISAS/JAXA), 熊谷和博, 中井泉 (東京理科大), 亀掛川卓美 (高エネ研), 田中啓一 (セイコーインスツル), 三原建弘 (理研): TES 型 線マイクロカロリメータの開発と地上 X 線結晶回折実験への応用 [22pSH-12]

藤本龍一, 満田和久, 竹井洋 (ISAS/JAXA), D. McCammon (Wisconsin 大), M. Bauer (MPE), F.S. Porter (NASA/GSFC), 石崎欣尚 (首都大), 他「すざく」チーム: X 線天文衛星「すざく」がとらえた太陽風の電荷交換反応による輝線放射 [23aSB-12]

前田良知, 伊藤啓, 伊藤昭治, 井上裕彦, 岡田俊策, 横山裕士, 伊藤由実, 榎原匡俊, 鈴木健介 (ISAS/JAXA), 國枝秀世, 山下廣順, 田原譲, 小賀坂康志, 田村啓輔, 古澤彰浩, 柴田亮, 幅良統, 田中武, 石井邦明, 内藤聖貴, 酒井知晶, 山田伸明 (名古屋大), 石田学, 石崎欣尚, 早川彰, 井上智暁, 林篤志, 清水智央, 大熊哲 (首都大), 森英之 (京都大), 飯塚亮 (西播磨天文台), Peter J. Serlemitsos, Yang Soong, Kai-Wing Chan, John P. Lehan, Takashi Okajima, Curtis Odell, Dale Arbogast, Larry Oslen, Melinda Hong, Henry Garrett, John Kearney, Larry Lozipone, Marton Sharpe, Clark Welsh, Gary Sneiderman (NASA/GSFC), Kazutami Masaki (MPE), 他 Suzaku XRT-team: X 線天文衛星「すざく」搭載 X 線望遠鏡 “XRT” [23aSH-12]

田和憲明, 林田清, 山口弘悦 (大阪大), 竹井洋, 藤本龍一, 海老沢研, 中澤知洋 (ISAS/JAXA), 石崎欣尚 (首都大), 水野恒史, 深沢泰司 (広島大): 「すざく」衛星搭載 X 線 CCD カメラ XIS のバックグラウンド特性 [23pSH-2]

榎戸輝揚 (東京大), 寺田幸功 (理研), 石崎欣尚 (首都大), 宮脇良平 (東京大), 千田篤史 (理研), 海老沢研 (ISAS/JAXA), 国分紀秀 (東京大), 牧島一夫 (東京大・理研), 他「すざく」HXD チーム: X 線パルサーを用いた「すざく」衛星 硬 X 線検出器の時刻較正 [23pSH-9]

国内研究会

第7回宇宙科学シンポジウム、宇宙科学研究本部/JAXA、2006年12月21-22日

大橋隆哉(首都大) 山崎典子(ISAS/JAXA) ほか DIOS WG: 小型衛星計画 DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) [P3-69]

国際会議

US-Japan Symposium on Collision-induced X-ray Emission and Antimatter Physics

International House, Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan, April 13 – 15, 2006

Takaya Ohashi: X-ray Astronomy in Japan

Astronomical Telescopes and Instrumentation 2006:

Space Telescopes and Instrumentation II: Ultraviolet to Gamma Ray

Orlando World Center Marriott Resort & Convention Center, Orlando, Florida, USA, May 24 – 31, 2006

T. Ohashi, M. Ishida, S. Sasaki, Y. Ishisaki, K. Mitsuda, N.Y. Yamasaki, R. Fujimoto, Y. Takei, Y. Tawara, A. Furuzawa, Y. Suto, K. Yoshikawa, H. Kawahara, N. Kawai, T.G. Tsuru, K. Matsushita, T. Kitayama: DIOS: the diffuse intergalactic oxygen surveyor [6266-18]

Y. Ogasaka, K. Tamura, R. Shibata, T. Okajima, A. Furuzawa, H. Kunieda, Y. Maeda, M. Ishida, H. Awaki: Design and technology review of the xray telescope system onboard NeXT mission [6266-43]

Y. Ezoe, M. Koshiishi, M. Mita, K. Mitsuda, Y. Ishisaki, A. Hoshino, Z. Yang, T. Takano, H. Mekaruru, R. Maeda: Recent development of micropore optics using MEMS technologies [6266-48]

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 [6266-72]

International Working Group on cross-calibration and the definition of X-ray standards

Fosshótel Nesbúd, Nesjavellir, Reykjavík, Iceland, June 14 – 16, 2006

M. Ishida: XMM/CXO/Suzaku using PKS2155

High Energy Astrophysics in the Next Decade

International House, Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan, June 21 – 23, 2006

M. Ishida: High Resolution Spectroscopy

T. Ohashi: Summary (3)

Heating vs. Cooling in Galaxies and Clusters of Galaxies

Garching, Germany, August 6-11, 2006

T. Ohashi, U. Morita, Y. Ishisaki, N.Y. Yamasaki, N. Ota, N. Kawano, Y. Fukazawa: Chandra and XMM-Newton Observations of the Group of Galaxies HCG62

K. Sato, N.Y. Yamasaki, Y. Ishisaki, M. Ishida, T. Ohashi: Suzaku observation of the cluster of galaxies A1060

TES III: International Workshop on Transition Edge Sensor Device Physics

University of Florida, Florida, USA, August 17 – 18, 2006

A. Hoshino, Y. Yamakawa, T. Oshima, H. Kurabayashi, Y. Ishisaki, T. Ohashi (TMU), K. Shinozaki, K. Mitsuda (ISAS/JAXA), K. Kumagai, I. Nakai (Science University of Tokyo, Department of Applied Chemistry), K. Tanaka (SII Nano-Technology):

First result of EDXRD experiment using a gamma-ray TES calorimeter with Sn absorber

T. Oshima, Y. Yamakawa, H. Kurabayashi, A. Hoshino, Y. Ishisaki, T. Ohashi, (TMU), K. Mitsuda (ISAS/JAXA), K. Tanaka (SII Nano-Technology):

A high energy resolution gamma-ray TES calorimeter with 0.5 ms response time

The 6th International "Hiroshima" Symposium on the Development and Application of Semiconductor

Tracking Detectors, Carmel Mission Inn, California September 11 – 15, 2006

Y. Ezoë, M. Koshiishi, K. Mitsuda, M. Mita, Y. Ishisaki, A. Hoshino, T. Takano, R. Maeda:

Silicon Micro-pore X-ray Optics

The Extreme Universe in the Suzaku Era, Kyoto TERRSA, Kyoto, Japan, December 4 – 8, 2006

Y. Takei (ISAS/JAXA), T. Ohashi (TMU), J. Patrick Henry (U. Hawaii), K. Mitsuda (ISAS/JAXA):

Study of the Warm-Hot Intergalactic Medium in the Suzaku Era

T. Ohashi (TMU) and J.P. Henry (Univ. of Hawaii): Summary Talk of Clusters

K. Tokoi, K. Sato, Y. Ishisaki, T. Ohashi (TMU), N.Y. Yamasaki, K. Nakazawa (ISAS/JAXA), K. Matsushita (Tokyo U. of Science), Y. Fukazawa (Hiroshima U.):

Suzaku observation of HCG62: temperature, abundance, and the extended hard X-ray

M. Kawaharada (University of Tokyo), K. Makishima, N. Yamasaki, K. Matsushita, N. Ota, T. Ohashi, Y. Fukazawa, K. Sato: Suzaku Study on Spatial Oxygen Distribution in the Centaurus Cluster

K. Sato (TMU), N.Y. Yamasaki (ISAS/JAXA), Y. Ishisaki, M. Ishida, T. Ohashi (TMU):

Temperature and abundance profiles of the cluster of galaxies A1060

T. Ohashi (TMU), K. Mitsuda, N.Y. Yamasaki (ISAS/JAXA):

Science expected from X-ray microcalorimeters

N.Y. Yamasaki, K. Mitsuda (ISAS/JAXA), T. Ohashi (TMU), Y. Tawara (Nagoya U.), Y. Suto (U. of Tokyo): DIOS Project

R. Fujimoto (ISAS/JAXA), K. Mitsuda (ISAS/JAXA), D. McCammon (Wisconsin University), Y. Takei (ISAS/JAXA), M. Bauer (MPE), Y. Ishisaki (TMU), F.S. Porter (NASA/GSFC), and Suzaku NEP team: Evidence for solar-wind charge-exchange X-ray emission from the Earth's magnetosheath

D. McCammon (Univ. of Wisconsin), R. Fujimoto (ISAS), Y. Ishisaki (TMU), K. Mitsuda (ISAS), L. Rocks (Univ. of Wisconsin), R. Smith (GSFC), D. Wang (Univ. of Massachusetts), N. Yamasaki (ISAS): Suzaku Observations of the Diffuse X-ray Background at High Galactic Latitudes

T. Miyaji (Carnegie Mellon University), Y. Ishisaki, G.C. Dewangan, K. Shinozaki, Y. Ueda: Kaz 102: a radio-quiet broad-line QSO with an occasional X-ray hard state

K. Shinozaki (ISAS/JAXA), Y. Ishisaki (TMU), T. Miyaji (Carnegie Mellon Univ), Y. Ueda (Kyoto Univ), G.C. Dewangan (Carnegie Mellon Univ): Suzaku High Quality and Wide-Band X-ray Observation of the Radio-Quiet QSO Kaz 102

T. Enoto (U-Tokyo), Y. Terada (RIKEN), Y. Ishisaki (Tokyo Metro-U), R. Miyawaki (U-Tokyo), K. Kokubun, (U-Tokyo), K. Makishima (U-Tokyo/RIKEN), M. Itoh (Kobe-U), G. Hasinger (MPE): The HXD timing calibrations and applications to X-ray pulsars

Y. Ishisaki (TMU), Y. Maeda, R. Fujimoto, M. Ozaki, K. Ebisawa, T. Takahashi, Y. Ueda, K. Hamaguchi: Monte-Carlo Simulator and Ancillary Response Generator for the Suzaku XRT/XIS System

M. Ozaki (ISAS/JAXA), Y. Ishisaki (TMU), Y. Terada (RIKEN), H. Matsumoto (Kyoto University), R. Fink (NASA/GSFC) and the Suzaku Software team: Suzaku observation data processing system

EDGE General Meeting, CNR Headquarter, Rome, Italy, December 19 – 21, 2006

T. Ohashi: Detection strategies for WHIM in emission

Joint Symposium on “Initiatives for Attractive Education in Graduate Schools of Physics and Chemistry” and “Application of Advanced Analytical Techniques to Chemical Substances”

International House, Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan, January 30 – February 2, 2007

A. Hoshino, K. Tokoi, H. Kurabayashi, K. Sato, Y. Ishisaki, T. Ohashi, K. Mitsuda, N. Yamasaki: Development of Microcalorimeters for X-ray Astronomy

K. Sato: X-ray Study of Temperature and Metallicity in Groups of Galaxies with Suzaku

4) 学会誌等

伊藤真之、馬場 彩、寺田幸功、鶴 剛、小澤 碧、松下恭子、大橋隆哉、太田直美、深沢泰司、中澤和洋：
X線天文衛星「すざく」による観測速報 (4)、天文月報 99-6 (2006) 332

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 (MCD) を用いた局所帯磁率の温度依存性

SmFe₄Sb₁₂ を試料として、Sm の 3d-4f 励起、および Fe の 2p-3d 励起にともなう MCD から磁気モーメントを見積もり、その温度変化を SQUID の結果と比較した。SmFe₄Sb₁₂ は 45 K 以下で強磁性転移するので、それより低温で MCD を測定したところ、Fe の MCD から見積もられる磁気モーメントはそれを 4 倍しても Sm の磁気モーメントより十分小さい。すなわち後者が打ち勝っている。ところが Sm では軌道モーメントの平均値が磁場のほうを向いているので、もし Hund 則にしたがって 4f⁶ という配置をとるとすれば、 $L+S$ はかなりゼロに近いが、磁気モーメント $L+2S$ は磁場と逆向きということになる。これはエネルギー的にはあり得ないので、異なる J に対応するエネルギー差が kT より小さくて、インコヒーレントに異なる J の状態 (しかし MJ は同じ) が混ざるといことが考えられる。ところが、Hund 則の範囲で 4f⁵ および 4f⁷ 等を考慮しても我々の MCD データを説明することは定性的にも困難であることが分かっている。これを解決するには、球対称場を破る結晶場が強く、異なる J や MJ の状態がコヒーレントに混ざるとの可能性を考慮する必要がある。以上の実験事実はカゴが内部の原子に大きな影響を与える可能性を示唆している。

2) 量子光学

まず 17 年度に引き続いて、放射光のみによる 2 次高調波発生を試みた。これは、位相整合条件と薄膜の光学定数を利用して、さらに 2 つのビームの変調を用いて、10 桁以上も小さい非線型効果を抽出する試みであり、2 次高調波を発生しているとして矛盾のないデータを得た。光子エネルギーは約 280 eV であるから、これは群を抜いた世界記録と言える。さらに新しい試みとして、放射光パルスの短縮化の研究に取り組んだ。現在得られている短パルスは 200 フェムト秒であるが、この研究はテーパーを付加したアンジュレータと 2 重回折格子を利用して 10 フェムト秒オーダーの短パルスを得ようとする、野心的な試みである。18 年度はアンジュレータにテーパーを付加しても蓄積ビームに影響のないことを種々のスタディで確認し、また測定エレクトロニクスの調整を行った。

3) フラーレンピーポッドの光電子分光

カーボンナノチューブの関連物質である C₇₀ フラーレンピーポッド (C₇₀ PPD) と Gd@C₈₂ (Gd 金属を内包した C₈₂) PPD の光電子分光を、高エネルギー加速器研究機構フォトンファクトリーの BL-11D で行った。C₇₀ PPD の内包された C₇₀ の電子状態は、固体の C₇₀ のそれとほとんど変わらず、理論的に指摘されていた LUMO バンドのフェルミ準位直下への沈み込みは観測されなかった。Gd@C₈₂ PPD では、内包された Gd の 4f 電子状態を調べるために Gd 4d-4f 共鳴光電子分光を行った。Gd 4f 準位の位置は、固体の Gd@C₈₂ のそれと比べ、フェルミ準位から遠ざかることが分かった。

4) 色素増感太陽電池電極の X 線光電子分光

色素や半導体量子ドットなどを増感剤として吸着させたナノ構造 TiO₂ 太陽電池 (色素増感太陽電池) は、比較的高い光変換効率が期待できるが、光変換効率をさらに向上させるには、電極の電子構造を知ることが重要である。そこで、CdSe 量子ドットを吸着させた TiO₂ 電極の電子構造を、SPring-8 の放射光 (光子エネルギーは約 3500 eV) を利用し、硬 X 線光電子分光によって調べた。ナノ構造 TiO₂ 電極は、平均粒径 27 nm の TiO₂ ナノ粒子に CdSe 量子ドットを 24 時間から 49 時間成長させて準備した。CdSe の吸着時間が増すと、可視光のエネルギー領域に対応する結合エネルギー 1.6 eV から 3.2 eV まで

の状態密度が増大することが分かった。この増大は電極構成元素の内殻スペクトルの測定から、主として Se 4p 状態によることが明らかになった。

5) 角度分解逆光電子分光

物質の非占有電子状態は逆光電子分光で調べられるが、バンド分散も求められる角度分解逆光電子分光は今までほとんど行われていなかった。そこで、逆光電子分光装置を改良し、装置のテストとして Si を測定した。角度分解能などに改良の余地があることが分かった。

2. 研究業績

1) 論文

S. Nakamura, T. Yoshida, Y. Takayama, T. Miyahara, H. Ishii, H. Sugawara, H. Sato and T. Nakamura: MCD Study on $Ce_xLa_{1-x}Ni$: Difference between the "Local" and "Coherent" Kondo Effect, *J. Phys. Soc. Jpn.* **75** (2006) 044707.

Y. Takayama, T. Yoshida, S. Nakamura, N. Sasaki, H. Ishii and T. Miyahara: Interpretation of Magnetic Circular Dichroism of X-ray Emission Spectra, *J. Phys. Soc. Jpn.* **75** (2006) 124709.

2) 国際会議報告

H. Kimura, T. Hirono, T. Miyahara, M. Yamamoto and T. Ishikawa: A New Beamline Apparatus for Polarimetry and Ellipsometry using Soft X-ray Multilayers, *Proc. Eighth International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation*, American Institute of Physics 0-7354-0180-2 (2006) 537-540.

Y. Takayama, K. Shibasaki, N. Sasaki, Y. Nakayama, K. Nishihata, Y. Yoneda, T. Yoshida, S. Nakamura, H. Ishii, T. Miyahara, J. Okabayashi, K. Kanai, M. Oshima and S. Yamamoto: Second Harmonic Generation with the GaAs Thin Film in the Soft X-ray Region, *Proc. Eighth International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation*, American Institute of Physics 978-0-7354-0373-4 (2006) 698-701.

3) 学会講演

物理学会第 61 回年次大会 (愛媛大学・松山大学、2006 年 3 月 27 日-30 日)

上窪雅清、高山泰弘、佐々木直也、宮原恒昱、石井廣義、竹田幸治、藤森伸一、岡根哲夫、斎藤裕児、小林啓介、菅原仁、佐藤英行：PrFe₄Sb₁₂ の Fe $L_{2,3}$ および Pr $M_{4,5}$ 吸収端領域における内殻吸収磁気円二色性

高山泰弘、佐々木直也、吉田徹夫、中村聡、石井廣義、宮原恒昱：Gd 薄膜の軟 X 線発光 MCD の解釈

芝崎公達、高山泰弘、佐々木直也、宮原恒昱、石井廣義、吉田徹夫、中村聡、中山裕二、西畑敬介、米田雄一、岡林潤、金井謙、尾嶋正治、山本樹：エックス線領域における GaAs 薄膜による二次高調波生成

石井廣義、木原英夫、塩澤秀次、佐々木直也、中山裕二、藤木伸一郎、高山泰弘、宮原恒昱、児玉健、鈴木信三、阿知波洋次、片浦弘道、有田将司、仲武昌史、島田賢也、生天目博文、谷口雅樹：フラーレンピーポッドの光電子分光

宮原恒昱：X-FEL 放射の t 空間における変換と短パルス化 II

物理学会 2006 年秋季大会 (千葉大学西千葉キャンパス、2006 年 9 月 23 日-26 日)

宮原恒昱、高山泰弘、中村聡、吉田徹夫、塩澤秀次、佐々木直也、上窪雅清、石井廣義、佐藤英行、齋藤裕児、室隆桂之、中村哲也、竹田幸治、岡根哲夫、小林啓介、菅原仁：Classification of behaviors of temperature dependence of local and bulk magnetic moments detected with MCD and SQUID

芝崎公達、高山泰弘、佐々木直也、宮原恒昱、石井廣義、吉田徹夫、中村聡、中山裕二、西畑敬介、米田雄一、岡林潤、金井謙、尾嶋正治、山本樹：軟 X 線領域における GaAs 薄膜および ZnTe 薄膜による二次高調波生成

中山裕二、藤木伸一郎、佐々木直也、木原英夫、塩澤秀次、高山泰弘、石井廣義、宮原恒昱、児玉健、鈴木信三、阿知波洋次、片浦弘道、仲武昌史、齋藤智彦：C₇₀ ピーポッドの光電子分光

第 20 回放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム（広島国際会議場、2007 年 1 月 12 日 14 日）

藤木伸一郎、中山裕二、大熊隼人、平戸康晴、宮原恒昱、石井廣義、高山泰弘：角度分解共鳴逆光電子分光装置の開発

芝崎公達、大熊隼人、中山裕二、西畑敬介、米田雄一、佐々木直也、高山泰弘、石井廣義、宮原恒昱、岡林潤、金井謙、尾嶋正治、山本樹：GaAs 薄膜および ZnTe 薄膜を用いた軟 X 線領域における二次高調波生成

中山裕二、藤木伸一郎、佐々木直也、木原英夫、塩澤秀次、高山泰弘、石井廣義、宮原恒昱、児玉健、鈴木信三、阿知波洋次、片浦弘道、仲武昌史、齋藤智彦：C₇₀ ピーポッドの光電子分光

電子物性サブグループ

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と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、超高真空ゾーンメルト法、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、これまで 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、その機構を解明することを目的として、希土類やアクチナイド元素を含む典型的化合物や新化合物の純良単結晶を育成し研究を進めてきた。最近、特に充填スクッテルダイト構造を持つ化合物 $RE_4T_2X_{12}$ (RE:希土類、T:遷移金属、X:P、As、Sb) に注目して純良単結晶の育成を行い、研究を進めている。平成 18 年度には、多くの充填スクッテルダイト化合物の育成と物性探索を進めたが、ここでは成果のうち、幾つかの例を取り上げて説明する。注目物質である Pr 系 (重い電子超伝導体 $PrOs_4Sb_{12}$ 、非磁性秩序と磁場誘起重い電子状態を示す $PrFe_4P_{12}$ 、金属・非金属相転移を示す $PrRu_4P_{12}$) の興味深い特性の更なる解明を進めながら、特に Sm 系スクッテルダイト ($SmOs_4Sb_{12}$ 、 $SmRu_4P_{12}$ 、 $SmFe_4P_{12}$) の良質単結晶の育成とその基礎物性の評価に重点をおいた。

a) 高圧下での充填スクッテルダイト化合物の良質結晶育成

充填スクッテルダイト化合物は、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。興味深い物性が期待される軽希土類に限れば、(T=Fe、Ru、X=P) (T=Ru、Os、X=Sb) の組み合わせでは、フラックス法で純良単結晶の育成が可能であるのに対し、その他の組み合わせでは育成が困難であるため、高圧合成法により新しい組み合わせでの試料育成が進められている。しかし、高圧合成された焼結体試料では、育成時間の制限があることから純良性に問題が残されている。我々は、この二つの手法の利点を組み合わせ、高圧合成法による長時間合成に挑んできた。特定領域研究費で導入した高圧炉による合成が軌道にのり、これまで希土類サイトの完全充填が不可能であった $PrFe_4Sb_{12}$ の純良試料の育成に初めて成功した。この物質は、これまで 3 つのグループが、単結晶または多結晶を育成し、全て、低温で磁気秩序することを報告しているが、磁気構造がグループにより異なっている。また、これらの試料では希土類サイトの充填率が 80% であり、そのことを反映して試料の純良性を表す RRR も最高でも 4 と小さい。注目物質を多く含む Pr 系スクッテルダイトを統一的に理解するためにも、良質結晶での物性測定が不可欠であった。我々は、EPMA 測定・中性子散乱実験により充填率の評価を行い、実験誤差内で Pr サイトの完全充填を確認し、基礎物性測定を行った。純良性は、抵抗測定評価から RRR が 4 倍以上に向上した。純良試料で得られた重要な情報は、基底状態が“非磁性”という、これまでとは全く異なる結果を得たことである。この結果は、これまでの Pr スクッテルダイトに共通する性質であり、統一的理解という観点からも重要である。希土類サイトの非充填により、磁気秩序状態を安定化することは、Fe の 3d バンドがフェルミエネルギー近傍に大きな状態密度を持つというバンド計算に基づいて理解された。また、単結晶化の試みを行い、微細ながらも物性測定が可能な単結晶の育成にも成功し、詳細な実験と解析が行われている。更に、この実績をもとに、As 系スクッテルダイトの純良多結晶の育成に成功し、物性評価を進めている。(徳島大:菅原氏との共同研究)

b) $PrFe_4P_{12}$ の圧力誘起絶縁相のミクロスコピックな解明

PrFe₄P₁₂ は高圧下で金属絶縁体転移する。この圧力誘起絶縁相において低温・高圧下でのダイヤモンドアンビルを用いた単結晶 X 線回折実験を行うことにより、結晶の対称性が、立方晶から斜方晶に低下していることを見出した。更に、原子力機構との共同研究による 3GPa 以上での高圧下单結晶中性子回折実験により、この圧力誘起非金属相が $2\mu_B/\text{Pr}$ という大きな磁気モーメントを持つ反強磁性秩序相であることを初めて微視的に明らかにした。

c) Pr(Fe_xRu_{1-x})₄P₁₂ における結晶場と強相関電子状態の関係

PrFe₄P₁₂ は約 6.5K で、PrRu₄P₁₂ は 63K で、ともに非磁性の高次多極子が秩序化すると考えられる相転移を示す。転移温度は一桁違うものの、波数 $q = (100)$ のネスティング不安定性に起因する相転移のためフェルミ面の大部分が消滅し、大きな抵抗変化が生じる等の共通点がある。両物質の示す相転移の本質を理解するため、Pr(Fe_xRu_{1-x})₄P₁₂ の物性測定を進めた。これまでに、両方の秩序相共に低濃度の置換で相転移が消失することを見出し、遷移金属サイトの周期性が両物質の秩序化に対して重要な役割を果たしていることを指摘している。今年度は、中間濃度領域の物性測定を進め、(1)4f 電子の結晶場 Γ_1 一重項基底状態と $\Gamma_4^{(1)}$ 三重項励起状態のエネルギー差が、 x 増加とともに小さくなっていくこと、(2) これに伴い低温に重い電子状態が成長してくること、(3) 伝導電子と 4f 電子の混成に基づく近藤効果が急激に顕著になることを見出した。低エネルギーにおける結晶場縮重度が、この近藤効果に重要な役割を果たしていること、質量増強は Fulde-Jensen の機構で定性的には理解することができることが明らかとなった。さらにここから、PrFe₄P₁₂ の基底状態が Γ_1 と $\Gamma_4^{(1)}$ で形成される擬似四重項である状況証拠を得ることができた。

d) (Pr_xLa_{1-x})Os₄Sb₁₂ の超伝導

充填スクッテルダイト PrOs₄Sb₁₂ は、Pr 化合物では初となる重い電子超伝導を示す化合物であり、その超伝導の特異性ゆえに、現在精力的に研究が進められている。この超伝導特性の解明を旨とし、La イオンにより Pr サイトを部分置換した化合物 (Pr_xLa_{1-x})Os₄Sb₁₂ の基礎物性測定を行い以下のことを明らかにした。(1) 超伝導転移温度、上部臨界磁場などの超伝導特性を調べ、超伝導を担う電子の有効質量が Pr 濃度に大きく依存することを明らかにした。このことは、PrOs₄Sb₁₂ で見られる重い電子的超伝導において、Pr イオンが重要な役割を果たしていることを示唆する明白な結果である。(2) PrOs₄Sb₁₂ の常伝導状態に、磁場印加により電気四極子秩序相が現れるが、これが La 置換により抑制される振る舞いを観測した。このことから、電気四極子秩序相の発現において、Pr イオンの周期性が重要であることを指摘した。(3) Sb で形成されるカゴ内の希土類イオンの異常な振動モード（一般にラトリングと呼ばれる）を、比熱測定により見出した。この振動数が、イオン質量よりも、4f 電子により決定されているという、従来にない特性を持っていることが明らかとなった。

e) 中性子散乱実験

PrFe₄P₁₂ およびその La 置換形について、非磁性秩序相の転移温度上下で、磁気励起スペクトル測定を進め、新たな解析により Γ_1 型の秩序パラメーターである可能性を示した。更に、重要な議論の対象となっているラトリングの寄与が大きいとされている PrRu₄Sb₁₂、PrOs₄Sb₁₂ について、非弾性散乱測定を行い、低エネルギーフォノンに異常なソフト化を観測した。解析の結果、主に Pr イオンの大きな振幅のカゴ内振動によることを示した。

(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：菅原仁助教授、東北大学：岩佐和晃助教授ほか、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

電子は電荷とスピン磁気モーメントの二つの特性を持つが、通常物質中では、電荷は伝導現象のみ、スピンは磁性にのみ現れ、伝導にスピンが直接顔を出すことはなかった。近年の微細加工技術を利用すると、電子がスピンの記憶を保持する長さに比較して微細な磁性体と非磁性体を組み合わせたナノ構造の作製が可能になり、スピンと電荷が共に主役を務める舞台が用意された。最近、特に、スピンの方向を揃えた電流をナノ強磁性体に流すことにより、その磁気モーメントの向きを変える“スピントランスファー効果”が、注目されている。これは、電流を運ぶ電子が同時に磁気モーメントを運び、その量が大きくなるとナノ磁性体全体の磁化を反転することによる。これにより、外か磁場を加えなくとも、ハードディスクの記録領域の磁気モーメントの向きを制御できることから、応用の観点からの研究が進められている。これを実現するには、微細なナノ強磁性体と、それと磁気的には独立したスピン分極電流源からなるナノ回路が必要になるが、これは基礎物理学的観点からも興味深い対象である。本年度は、ナノサイズの二つの強磁性体で、スピン拡散長より薄い通常金属を挟んだスピンバルブ型 CPP (Current Perpendicular to Plane) 素子を用いて、磁気抵抗の磁場の角度と強度依存性、および時間依存伝導現象に着目して研究を進めた。我々は、その断面の寸法が最小で $\sim 50\text{nm} \times 70\text{nm}$ のサンプルで、電気抵抗の電流密度と磁場への依存性を詳しく測定した。その結果、電流の増加に伴い、スピントランスファーによる磁化回転を反映する明白な抵抗変化と、それに伴うナノ磁石の振動をノイズとして観測することに成功した。さらに、温度の効果の検証を進めている。ハードディスクの磁気記録の高密度化が進み、これ以上は現在の読み取りヘッドでは対応が困難であり、CPP スピンバルブ素子は次世代素子としても期待されている。従って、スピントランスファー効果の理解に挑むことは、物理的な興味だけでなく、応用の観点からも必要であろう。(このテーマは、SRC からの試料提供と支援を受けて研究が進められた)。

2. 研究業績

1) 論文

Transport and Magnetic Properties of Pressure- Induced Insulating Phase in $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$, H. Hidaka, H. Kotegawa, S. Fukushima, N. Wada, T.C. Kobayashi, H. Harima, K. Fujiwara, D. Kikuchi, H. Sato and H. Sugawara, *J. Phys. Soc. Jpn.* **75** (2006) 094709 (8pages).

Ultrasonic study of the ferromagnetic heavy fermion system $\text{SmFe}_4\text{P}_{12}$, Y. Nakanishi, T. Tanizawa, T. Fujino, H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato and M. Yoshizawa, *J. Phys. Soc. Jpn.* **75** Suppl.(2006) 192-194.

Heavy fermion behaviors in the Pr-based filled skutterudites, Y. Aoki, H. Sugawara, H. Sato, *Journal of Alloys and Compounds* 408–412 (2006) 21–26.

Elastic behavior around metal-insulator transition in $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}\text{Y}$. Nakanishi, T. Kumagai, S.R. Saha, H. Sugawara, H. Sato and M. Yoshizawa, *J. Magn. Magn. Mater.* **298** (2006) 132-134.

Pressure effect on superconductivity and antiferroquadrupolar order in $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$, T. Tayama, T. Sakakibara, H. Sugawara and H.Sato, *J. Phys. Soc. Jpn.* **75** (2006) 043707.

Magnetic and Transport Properties of $\text{Gd}_3\text{Ir}_4\text{Sn}_{13}$ with Unique Crystal Structure, C. Nagoshi, R. Yamamoto, K. Kuwahara, H. Sagayama, D. Kawana, M. Kohgi, H. Sugawara, Y. Aoki, H. Sato, T. Yokoo and M. Arai, *J. Phys. Soc. Jpn.* **75** (2006) 044710 (6pages).

MCD Study on $Ce_xLa_{1-x}Ni$: Difference between the “Local” and “Coherent” Kondo Effect, S. Nakamura, T. Yoshida, Y. Takayama, T. Miyahara, H. Ishii, H. Sugawara, H. Sato and T. Nakamura, J. Phys. Soc. Jpn. **75** (2006) 044707 (7pages).

Ultrasonic study of the filled skutterudite compound $PrRu_4P_{12}$, Y. Nakanishi, T. Kumagai, O. Masafumi, T. Tanizawa, M. Yoshizawa, S. R. Saha, H. Sugawara, and H. Sato, Phys. Rev. B **73** (2006) 165115-1-7.

Detailed study of the $CePd_{2-x}Ni_xAl_3$ magnetic phase diagram around its critical concentration, J.G. Sereni, P. Pedrazzini, E. Bauer, A. Galatanu, Y. Aoki and H. Sato, J. Phys. **18** (2006) 3789–3802.

Drastic Change in Transport of Entropy with Quadrupolar Ordering in $PrFe_4P_{12}$, A. Pourret, K. Behnia, D. Kikuchi, Y. Aoki, H. Sugawara, and H. Sato, Phys. Rev. Lett. **96** (2006) 176402 (4pages).

Superconducting Gap of Filled Skutterudite Superconductor $LaRu_4P_{12}$ Studied by Sub-meV Resolution Photoemission Spectroscopy, S. Tsuda, T. Yokoya, T. Kiss, T. Shimojima, S. Shin, T. Togasi, S. Watanabe, C. Q. Zhang, C. T. Chen, H. Sugawara, H. Sato and H. Harima, J. Phys. Soc. Jpn. **75** (2006) 064711.

A Possible Novel Magnetic Ordering in $SmRu_4P_{12}$, S. Tsutsui, Y. Kobayashi, T. Okada, H. Haba, H. Onodera, Y. Yoda, M. Mizumaki, H. Tanida, T. Uruga, C. Sekine, I. Shirovani, D. Kikuchi, H. Sugawara and H. Sato, J. Phys. Soc. Jpn. **75** (2006) 093703 (4pages).

Transport and Magnetic Properties of Pressure-Induced Insulating Phase in $PrFe_4P_{12}$, H. Hidaka, H. Kotegawa, S. Fukushima, N. Wada, T.C. Kobayashi, H. Harima, K. Fujiwara, D. Kikuchi, , H. Sato and H. Sugawara, J. Phys. Soc. Jpn. **75** (2006) 094709 (8pages).

Crystal field effects in $CeOs_4Sb_{12}$ as determined by inelastic neutron scattering, C. P. Yang, H. Wang, K. Iwasa, M. Kohgi, H. Sugawara, and H. Sato, Apl. Phys. Let. **89**, (2006) 082508.

A Possible Novel Magnetic Ordering in $SmRu_4P_{12}$, S. Tsutsui, Y. Kobayashi, T. Okada, H. Haba, H. Onodera, Y. Yoda, M. Mizumaki, H. Tanida, T. Uruga, C. Sekine, I. Shirovani, D. Kikuchi, H. Sugawara and H. Sato, J. Phys. Soc. Jpn. **75** (2006) 093703 (4pages).

Transport and Magnetic Properties of Pressure-Induced Insulating Phase in $PrFe_4P_{12}$, H. Hidaka, H. Kotegawa, S. Fukushima, N. Wada, T.C. Kobayashi, H. Harima, K. Fujiwara, D. Kikuchi, , H. Sato and H. Sugawara, J. Phys. Soc. Jpn. **75** (2006) 094709 (8pages).

Structural Transformation on the Pressure-Induced Metal-Insulator Transition in $PrFe_4P_{12}$, D. Kawana, K. Kuwahara, M. Sato, M. Takagi, Y. Aoki, M. Kohgi, H. Sato, H. Sagayama, T. Osakabe, K. Iwasa and H. Sugawara, J. Phy. Soc. Jpn. **75** (2006) 113602 (4 pages).

Low-Lying Optical Phonon Modes in the Filled Skutterudite $CeRu_4Sb_{12}$, C.H. Lee, I. Hase, H. Sugawara, H. Yoshizawa and H. Sato, J. Phys. Soc. Jpn. **75** (2006) 123602 (5 pages).

Multiband Superconductivity in Filled-Skutterudite Compounds $(Pr_{1-x}La_x)Os_4Sb_{12}$: An Sb Nuclear-Quadrupole-Resonance Study, 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. **75** (2006) 124702 (9 pages).

- Novelty and variety of the characteristics found in the filled skutterudites, H. Sato, H. Sugawara, D. Kikuchi, S. Sanada, K. Tanaka, H. Aoki, K. Kuwahara, Y. Aoki, M. Kohgi, *Physica B* **378-380** (2006) 46-50.
- Anomalous field-insensitive heavy-fermion state in $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$, Y. Aoki, S. Sanada, H. Aoki, D. Kikuchi, H. Sugawara and H. Sato, *Physica B* **378-380** (2006) 54-55.
- Nature of the double superconducting transition in $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$?, M.-A. Méasson, D. Braithwaite, B. Salce, J. Flouquet, G. Lapertot, J. Pécaut, G. Seyfarth, J.-P. Brison, H. Sugawara and H. Sato, *Physica B* **378-380** (2006) 56-57
- Thermoelectric properties in $\text{Ce}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_4\text{P}_{12}$, H. Sugawara, S. Yuasa, A. Tsuchiya, Y. Aoki, H. Sato, T. Sasakawa and T. Takabatake, *Physica B* **378-380** (2006) 173-174 .
- Photoemission spectroscopy of Ce-filled skutterudites, M. Matsunami, K. Horiba, M. Taguchi, K. Yamamoto, A. Chainani, Y. Takata, Y. Senba, H. Ohashi, H. Sugawara, H. Sato et al., *Physica B* **378-380** (2006) 177-178
- Field-orientation dependence of the specific heat of $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$, Jeroen Custers, Yukie Namai, Takashi Tayama, Toshiro Sakakibara, Hitoshi Sugawara, Yuji Aoki and Hideyuki Sato, *Physica B* **378-380** (2006) 179-181
- Evidence for nodes in the superconducting energy gap of the skutterudite compound $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$, M. Nishiyama, T. Kato, H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato, H. Harima and G.-Q. Zheng, *Physica B* **378-380** (2006) 192-193
- Large softening of acoustic phonons in $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$, K. Iwasa, M. Kohgi, H. Sugawara and H. Sato, *Physica B* **378-380**(2006) 194-196
- p-f hybridization effect on the metal-nonmetal phase transition in $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$, L. Hao, K. Iwasa, T. Hasegawa, T. Takaagi, K. Horiuchi, Y. Mori, Y. Murakami, K. Kuwahara, M. Kohgi, H. Sugawara , S.R. Saha, Y. Aoki, H. Sato, *Physica B* **378-380** (2006) 204-205.
- Raman scattering investigation of filled skutterudite $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$, N. Ogita, M. Udagawa, S.R. Saha, H. Sato and H. Sugawara, *Physica B* **378-380** (2006) 206-208
- Surface impedance studies of $\text{PrT}_4\text{Sb}_{12}$ (T=Os, Ru), H. Tou, Y. Nakai, M. Doi, M. Sera, H. Sugawar and H. Sato, *Physica B* **378-380** (2006) 209-210
- Anisotropy in the electrical transport properties of the high-field heavy-fermion state in $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$, Hidekazu Aoki, Daisuke Kikuchi, Hitoshi Sugawara, Yuji Aoki and Hideyuki Sato, *Physica B* **378-380** (2006) 215-216
- High-pressure X-ray diffraction study of $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$, D. Kawana, H. Sagayama, M. Sato, K. Kuwahara, Y. Aoki, M. Kohgi, H. Sato, K. Iwasa and H. Sugawara, *Physica B* **378-380** (2006) 217-219.
- On the puzzling low-temperature phenomena in $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$, M. Yoshizawa, Y. Nakanishi, T. Tanizawa, A. Sugihara, M. Oikawa, P. Sun, H. Sugawara, S.R. Saha, D. Kikuchi and H. Sato, *Physica B* **378-380** (2006) 222-223

NMR study of unique properties in $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$, T. Mito, S. Masaki, N. Oki, S. Noguchi, S. Wada, N. Takeda, D. Kikuchi, H. Sato, H. Sugawara and G.-q. Zheng, *Physica B* **378-380** (2006) 224-225

Magnetoresistance in the filled skutterudite $\text{SmFe}_4\text{P}_{12}$, D. Kikuchi, H. Sugawara, H. Aoki, K. Tanaka, S. Sanada, Y. Aoki and H. Sato, *Physica B* **378-380** (2006) 226-227

Raman scattering investigation of skutterudite compounds, N. Ogita, T. Kondo, T. Hasegawa, Y. Takasu, M. Udagawa, N. Takeda, K. Ishikawa, H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato, C. Sekine and I. Shirotni., *Physica B* **378-380** (2006) 128.

Determination of the valence in Sm-based filled skutterudite compounds, M. Mizumaki, S. Tsutsui, H. Tanida, T. Uruga, D. Kikuchi, H. Sugawara and H. Sato, *Physica B* **378-380** (2006)144.

^{149}Sm nuclear resonant inelastic scattering of Sm-based filled-skutterudite compounds, S. Tsutsui, J. Umemura, H. Kobayashi, Y. Yoda, H. Onodera, H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato, C. Sekine and I. Shirotni, *Physica B* **378-380** (2006) 142.

Low-Lying Optical Phonon Modes in the Filled Skutterudite $\text{CeRu}_4\text{Sb}_{12}$, C.H. Lee, I. Hase, H. Sugawara, H. Yoshizawa and H. Sato, *J. Phys. Soc. Jpn.* **75** (2006) 123602 (5 pages).

Study of Phonon Anomalies of Rare Earth Hexaborides RB_6 , M. Kohgi, K. Kuwahara, N. Ogita, M. Udagawa and F. Iga, *J. Phys. Soc. Jpn.* **75** (2006) 085003 (2 pages).

Field-induced antiferroquadrupolar order in the heavy fermion superconductor $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$, K. Kaneko, N. Metoki, T. D. Matsuda, K. Kuwahara, M. Kohgi, R. Shiina, J.-M. Mignot, A. Gukasov and N. Bernhoeft, *Physica B* **378-380** (2006) 189-191.

Inelastic neutron scattering study on low-energy excitations of the heavy-fermion superconductor $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$, K. Kuwahara, K. Iwasa, M. Kohgi, K. Kaneko, N. Metoki, S. Raymond, M.-A. Measson, J. Flouquet, H. Sugawara, Y. Aoki, H. Sato, *Physica B* **385-386** (2006) 82-84.

Field-induced antiferroquadrupolar order in the heavy fermion superconductor $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$, K. Kaneko, N. Metoki, T. D. Matsuda, K. Kuwahara, M. Kohgi, R. Shiina, J.-M. Mignot, A. Gukasov and N. Bernhoeft, *Physica B* **378-380** (2006) 189-191.

Spin-triplet superconductivity in $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ probed by muon Knight shift: W. Higemoto, S.R. Saha, A. Koda, K. Ohishi, R. Kadono, Y. Aoki, H. Sugawara and H. Sato, *Phys. Rev. B* **75** (2007) 020510(R).

Evidence for Point Nodes in the Superconducting Gap Function in the Filled Skutterudite Heavy-Fermion Compound $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$: ^{123}Sb -NQR Study under Pressure, K. Katayama, S. Kawasaki, M. Nishiyama, H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato, and G.-q. Zheng, *J. Phys. Soc. Jpn.* **76** No. 2 (2007) 023701 (4 pages).

Universal Scaling in the Dynamical Conductivity of Heavy Fermion Ce and Yb Compounds, H. Okamura, T. Watanabe, M. Matsunami, T. Nishihara, N. Tsujii, T. Ebihara, H. Sugawara, H. Sato, Y. Onuki, Y. ISikawa, T. Takabatake, and T. Nanba, , *J. Phys. Soc. Jpn* **76** (2007) 023703.

Experimental and Theoretical Studies of NMR in $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ -Suggestion of Antiferro-monopole Type Ordering- O. Sakai, J. Kikuchi, R. Shiina, H. Sato, H. Sugawara, M. Takigawa and H. Shiba, J. Phys. Soc. Jpn. **76** (2007) 024710 (13 pages).

On the Symmetry of Low-Field Ordered Phase of $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$: ^{31}P NMR, J. Kikuchi, M. Takigawa, H. Sugawara, and H. Sato J. Phys. Soc. Jpn. **76** (2007) 043705 (4 pages).

Effect of uniaxial stress on pressure-induced metal-insulator transition in $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$, H. Hidaka, N. Wada, H. Kotegawa, T. C. Kobayashi, D. Kikuchi, H. Sato and H. Sugawara J. Magn. Magn. Mat., **310** (2007) e228-e230.

Magnetic anisotropy around the successive two transitions in $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$, D. Kikuchi, K. Tanaka, H. Aoki, K. Kuwahara, Y. Aoki, H. Sugawara and H. Sato, J. Magn. Magn. Mat., **310** (2007) e225-e227.

Resonant X-ray scattering of $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$, K. Ishii, S. Tsutsui, L. Hao, T. Hasegawa, K. Iwasa, M. Tsubota, T. Inami, Y. Murakami, S.R. Saha, H. Sugawara and H. Sato, J. Magn. Magn. Mat., **310** (2007) e178-e180.

NMR study of the successive two phase transitions in $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$, S. Masaki, T. Mito, S. Wada, N. Takeda, D. Kikuchi, H. Sato, H. Sugawara and G.-q. Zheng J. Magn. Magn. Mat., **310** (2007) e175-e177.

^{121}Sb -NMR study of filled skutterudite $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$, M. Yogi, H. Niki, H. Mukuda, Y. Kitaoka, H. Sugawara and H. Sato J. Magn. Magn. Mat., **310** (2007) 941-943.

Muon Knight shift measurements on PrPb_3 in paraquadrupolar state, T.U. Ito, W. Higemoto, K. Ohishi, R.H. Heffner, N. Nishida, Y. Aoki, T. Onimaru and H.S. Suzuki, J. Magn. Magn. Mat. **310** (2007) 743-745.

The superconducting gap structure of $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ and CeRu_2 probed by $C(H, \theta)$, J. Custers, A. Yamada, T. Tayama, T. Sakakibara, H. Sugawara, Y. Aoki, H. Sato, Y. Onuki and K. Machida J. Magn. Magn. Mat., **310** (2007) 700-702.

Pressure dependence of the double superconducting transition of the filled skutterudite $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$, M.-A. Measson, D. Braithwaite, B. Salce, J. Flouquet, G. Lapertot, H. Sugawara, H. Sato and Y. Onuki J. Magn. Magn. Mat., **310** (2007) 626-628.

Sb-NQR study on novel superconductivity in $(\text{Pr}_{1-x}\text{La}_x)\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$, T. Nagai, M. Yogi, Y. Imamura, H. Mukuda, Y. Kitaoka, D. Kikuchi, H. Sugawara and H. Sato J. Magn. Magn. Mat., **310** (2007) 623-625.

Knight shift measurements in the superconducting state of $\text{Pr}_{1-x}\text{La}_x\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$ ($x=0.4$) probed by μSR , W. Higemoto, Y. Aoki, K. Ohishi, T.U. Ito, R.H. Heffner, S.R. Saha, A. Koda, K.H. Satoh, R. Kadono, D. Kikuchi, H. Sugawara, H. Sato J. Magn. Magn. Mat., **310** (2007) 620-622.

Sb nuclear spin-lattice relaxation rate in filled skutterudite superconductor $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$, Y. Inaoka, H. Tou, M. Sera, H. Sugawara and H. Sato J. Magn. Magn. Mat., **310** (2007) 596-598.

Time reversal symmetry breaking in superconducting $(\text{Pr,Lu})\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$ and $\text{Pr}(\text{Os,Ru})_4\text{Sb}_{12}$, L. Shu, W. Higemoto, Y. Aoki, N.A. Frederick, W.M. Yuhasz, R.H. Heffner, K. Ohishi, K. Ishida, R. Kadono, A. Koda, D. Kikuchi, H. Sato, H. Sugawara, T.U. Ito, S. Sanada, Y. Tunashima, Y. Yonezawa, M.B. Maple, D.E. MacLaughlin *J. Magn. Magn. Mat.*, **310** (2007) 551-553.

Giant Nernst effect in heavy-electron metals, K. Behnia, R. Bel, A. Pourret, K. Izawa, J. Flouquet, Y. Nakajima, Y. Matsuda, D. Kikuchi, Y. Aoki, H. Sugawara, H. Sato, *J. Magn. Magn. Mat.*, **310** (2007) 446-448.

Single crystal growth and electrical and magnetic measurements on $\text{CeFe}_4\text{Sb}_{12}$, I. Mori, H. Sugawara, K. Magishi, T. Saito, K. Koyama, D. Kikuchi, K. Tanaka and H. Sato *J. Magn. Magn. Mat.*, **310** (2007) 277-279.

Low temperature magnetization of $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ under pressure, T. Tayama, T. Sakakibara, H. Sugawara and H. Sato *J. Magn. Magn. Mat.*, **310** (2007) 274-276.

Substitution effect on the multipolar transitions in $\text{Pr}(\text{Fe}_x\text{Ru}_{1-x})_4\text{P}_{12}$, Y. Aoki, Y. Motomura, D. Kawana, D. Kikuchi, K. Kuwahara and H. Sato, *J. Magn. Magn. Mat.*, **310** (2007) 271-273.

Antiferromagnetic ordering in the filled skutterudite semiconductor $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$, K. Iwasa, C.P. Yang, M. Kohgi, H. Sugawara, H. Sato and N. Aso *J. Magn. Magn. Mat.*, **310** (2007) 268-270.

Ultrasonic measurement on the La-substituted $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ system, Y. Nakanishi, T. Tanizawa, T. Fujino, P. Sun, M. Nakamura, M. Yoshizawa, H. Sugawara, D. Kikuchi and H. Sato *J. Magn. Magn. Mat.*, **310** (2007) 263-265.

Rattling phonons in the filled skutterudite $\text{LaT}_4\text{X}_{12}$ ($\text{T}=\text{Fe,Ru,Os}; \text{X}=\text{P,Sb}$) studied with La-NMR, P-NMR/Sb-NQR, Y. Nakai, K. Ishida, K. Magishi, H. Sugawara, D. Kikuchi and H. Sato *J. Magn. Magn. Mat.*, **310** (2007) 255-257.

Magnetism of filled skutterudites under high magnetic fields, T. Yamada, H. Nakashima, K. Sugiyama, M. Hagiwara, K. Kindo, K. Tanaka, D. Kikuchi, Y. Aoki, H. Sugawara, H. Sato, R. Settai, Y. Onuki, H. Harima *J. Magn. Magn. Mat.*, **310** (2007) 252-254.

Inelastic X-ray scattering of Sm-filled Skutterudite compounds, S. Tsutsui, H. Kobayashi, A.Q.R. Baron, J.P. Sutter, Y. Yoda, H. Onodera, D. Kikuchi, H. Sugawara, H. Sato, C. Sekine and I. Shirotnani *J. Magn. Magn. Mat.*, **310** (2007) 241-242.

Specific heat properties of filled skutterudite compound $\text{PrRu}_4\text{As}_{12}$, T. Namiki, Y. Aoki, H. Sato, C. Sekine, I. Shirotnani and T. Yagi, *J. Magn. Magn. Mat.* **310** (2007) 232-234.

Sm-based filled skutterudite $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ studied by specific heat, K. Matsuhira, M. Wakeshima, Y. Hinatsu, C. Sekine, I. Shirotnani, D. Kikuchi, H. Sugawara and H. Sato *J. Magn. Magn. Mat.*, **310** (2007) 226-228.

Optical study on metal-insulator change in $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ under high pressure, A. Irizawa, K. Sato, M. Kobayashi, T. Nanba, M. Matsunami, H. Sugawara and H. Sato *J. Magn. Magn. Mat.*, **310** (2007) 221-222.

Novel electronic states realized in the filled skutterudites containing rare earth elements with more than one 4f-electrons, H. Sato, D. Kikuchi, K. Tanaka, H. Aoki, K. Kuwahara, Y. Aoki, M. Kohgi, H. Sugawara and K. Iwasa J. Magn. Magn. Mat., **310** (2007) 188-194.

Photoemission study on Sm-based filled skutterudites, A. Yamasaki, S. Imada, H. Higashimichi, H. Fujiwara, T. Saita, T. Miyamachi, A. Sekiyama, H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato, A. Higashiya, M. Yabashi, T. Ishikawa, S. Suga J. Magn. Magn. Mat., **310** (2007) e956-e958.

NMR study of magnetic properties in filled skutterudite compound $\text{EuRu}_4\text{P}_{12}$, K. Magishi, Y. Iwahashi, T. Horimoto, H. Sugawara, T. Saito, K. Koyama J. Magn. Magn. Mat., **310** (2007) 951-953.

Raman scattering study of the skutterudite compounds, N. Ogita, R. Kojima, Y. Takasu, T. Hasegawa, T. Kondo, M. Udagawa, N. Takeda, T. Ikeno, K. Ishikawa, H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato, C. Sekine, I. Shirotnani J. Magn. Magn. Mat., **310** (2007) 948-950.

Observation of Symmetry Lowering Associated with the Metal-insulator transition in $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$ by ^{101}Ru -NQR, S. Masaki, T. Mito, M. Takemura, S. Wada, H. Harima, D. Kikuchi, H. Sato, H. Sugawara, N. Takeda, G.-q. Zheng, J. Phys. Soc. Jpn., **76** (2007) 043714 (4 pages).

Elastic properties of the non-Fermi-liquid metal $\text{CeRu}_4\text{Sb}_{12}$ and dense Kondo semiconductor $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$, Y. Nakanishi, T. Kumagai, M. Oikawa, T. Tanizawa, M. Yoshizawa, H. Sugawara and H. Sato, Phys. Rev. B, **75** (2007) 134411.

Coexistence of Strongly Mixed Valence and Heavy-Fermion Character in $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$, Studied by Soft and Hard X-Ray Spectroscopy, A. Yamasaki, S. Imada, H. Higashimichi, H. Fujiwara, T. Saita, T. Miyamachi, A. Sekiyama, H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato, A. Higashiya, M. Yabashi, K. Tamasaku, D. Miwa, T. Ishikawa and S. Suga, Phys. Rev. Lett., **98** (2007) 156402.

Elastic anomalies of UGe_2 , K. Kuwahara, T. Sakai, M. Kohgi, Y. Haga and Y. Onuki, J. Magn. Magn. Mat., **310** (2007) 362-364.

Inelastic neutron scattering measurements in a quadrupolar ordering compound YbSb , A. Oyamada, K. Kuwahara, K. Ohoyama, K. Iwasa, M. Kohgi and S. Maegawa, J. Magn. Magn. Mat., **310** (2007) 766-767.

Development of a hybrid-anvil type high-pressure device and its application to magnetic neutron scattering studies, T. Osakabe, K. Kakurai, D. Kawana and K. Kuwahara, J. Magn. Magn. Mat., **310** (2007) 2725-2727.

Neutron scattering study on the field-induced Oxy-type antiferroquadrupolar ordering of the heavy-fermion superconductor $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$, K. Kaneko, N. Metoki, R. Shiina, T. D. Matsuda, M. Kohgi, K. Kuwahara, and N. Bernhoeft, Phys. Rev. B **75** (2007) 094408.

2) 学会講演

日本物理学会第 61 回年次大会 2006 年 3 月 27 日 ~ 3 月 30 日 (愛媛大学城北キャンパスおよび松山大学文京キャンパス)

菊地大輔，田中謙弥，青木英和，桑原慶太郎，青木勇二，菅原仁，佐藤英行: 単結晶 $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$ の磁気的特性.

為ヶ井強，松本洋一，菊地大輔，菅原仁，佐藤英行: $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ における弱強磁性の局所磁場測定.

水牧仁一郎，筒井智嗣，谷田肇，宇留賀朋哉，菊池大輔，菅原仁，佐藤英行: $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ の Sm イオンの価数の温度依存性.

小手川恒，日高宏之，小林達生，菊地大輔，菅原仁，佐藤英行: $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ の Sb-NQR による研究.

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

荻田典男，小島隆介，近藤歳久，長谷川巧，高須雄一，宇田川眞行，武田直也，石川義和，菅原仁，菊地大輔，佐藤英行，関根ちひろ，城谷一民: 希土類充填スクッテルダイト RT_4X_{12} のラマン散乱 III.

中井祐介，石田憲二，真岸孝一，菅原仁，菊地大輔，佐藤英行: $\text{LaOs}_4\text{Sb}_{12}$ ， $\text{LaFe}_4\text{Sb}_{12}$ の La-NMR，Sb-NQR によるラトリングの研究.

桑井智彦，梶原利昌，水島俊雄，石川義和，福原忠，菊地大輔，佐藤英行: 強相関 f 電子系化合物における 1K 以下の極低温領域熱電能.

藤秀樹，土居昌弘，稲岡慶彦，世良正文，菅原仁，佐藤英行: $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ の多極子自由度に関する NMR/NQR による研究.

金子真一，古山昌治，菅原仁，青木勇二，佐藤英行，西田信彦: 走査トンネル分光法による $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ の研究.

中西良樹，谷澤知章，藤野拓也，孫培傑，吉澤正人，菅原仁，菊地大輔，佐藤英行: $\text{Pr}_{1-x}\text{La}_x\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$ ($x=0.2$) の弾性定数.

笠原成，平田和人，為ヶ井強，菅原仁，菊地大輔，佐藤英行: 微小ホール素子アレイを用いた $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ における局所磁化測定.

柄木良友，久保田実，石本英彦，菅原仁，佐藤英行: $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ の巨視的な自発磁化探索.

田山孝，榊原俊郎，菅原仁，佐藤英行: $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ における磁気相図の圧力効果.

青木英和，菊地大輔，田中謙弥，菅原仁，青木勇二，佐藤英行: 充填スクッテルダイト化合物 $\text{ROs}_4\text{Sb}_{12}$ における一軸性圧力効果.

上野高文，根本祐一，武田直也，柳澤達也，後藤輝孝，菅原仁，佐藤英行: Th 対称性をもつ充填スクッテルダイト $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ における磁気音響複屈折.

稲岡慶彦，土居昌弘，藤秀樹，世良正文，菅原仁，佐藤英行: $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ における Sb-NMR 核スピン格子緩和率の磁場・温度依存性.

正木了，水戸毅，沖直美，和田信二，菊地大輔，佐藤英行，菅原仁，武田直也，鄭国慶: 単結晶 $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$ の NMR.

真岸孝一, 尾崎拓雄, 菅原仁, 斎藤隆仁, 小山晋之, 佐藤英行: $\text{CeFe}_4\text{X}_{12}$ ($\text{X} = \text{P}, \text{Sb}$) の核磁気共鳴 II.

米澤佑樹, 青木勇二, 綱島慶乃, 菊地大輔, 菅原仁, 佐藤英行: $\text{Pr}_x\text{La}_{1-x}\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$ の磁場中物性.

永井孝幸, 八島光晴, 與儀護, 椋田秀和, 北岡良雄, 菊地大輔, 佐藤英行: $\text{Pr}_{1-x}\text{La}_x\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$ の Sb-NQR による超伝導状態の研究.

なら津翔太, 林克行, 松岡英一, 高畠敏郎, 菅原仁, 佐藤英行: $(\text{La}, \text{Ce})\text{T}_4\text{Sb}_{12}$ ($\text{T} = \text{Fe}, \text{Ru}, \text{Os}$) の熱電物性.

綱島慶乃, 米澤佑樹, 青木勇二, 髭本亘, 佐藤宏樹, 幸田章宏, 伊藤孝, 大石一城, Robert Heffner, 菊地大輔, 佐藤英行: 磁場に鈍感な重い電子系 $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ の muSR による観測.

佐藤和幸, 入澤明典, 小林昌代, 松波雅治, 岡村英一, 難波孝夫, 菅原仁, 佐藤英行: $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ における光学応答の圧力変化 II.

東道啓聡, 山崎篤志, 今田真, 関山明, 東谷篤志, 矢橋牧名, 石川哲也, 菊地大輔, 菅原仁, 佐藤英行, 菅滋正: 高エネルギー光電子分光で見た $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ における Sm 価数の温度変化.

松波雅治, 堀場弘司, 田口宗孝, 山本和矢, 江口律子, A. Chainani, 高田恭孝, 仙波泰徳, 大橋治彦, 菅原仁, 佐藤英行, 播磨尚朝, 辛埴: Ce 系充填スクッテルダイト化合物の軟 X 線光電子分光.

渡邊彦睦, 上野高文, 根本祐一, 武田直也, 柳沢達也, 後藤輝孝, 菅原仁, 佐藤英行: 超音波による充填スクッテルダイト $\text{Pr}(\text{Os}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sb}_{12}$ の結晶場とラットリングの研究.

佐藤英和, 田山孝, 榊原俊郎, 菅原仁, 佐藤英行: $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ の磁化の磁場方向依存性.

松平和之, 分島亮, 日夏幸雄, 関根ちひろ, 城谷一民, 網塚浩, 菅原仁, 菊地大輔, 佐藤英行: Sm 系充填スクッテルダイトの比熱測定による研究.

山田勉, 中島弘, 宮内裕一郎, 杉山清寛, 萩原政幸, 金道浩一, 菊池大輔, 青木勇二, 菅原仁, 佐藤英行, 摂待力生, 大貫惇睦, 播磨尚朝: スクッテルダイト化合物の強磁場磁性.

菅原仁, 岩橋由典, 森育子, 真岸孝一, 斎藤隆仁, 小山晋之, 菊地大輔, 佐藤英行, 宍戸寛明, 摂待力生, 大貫惇睦: $\text{NdRu}_4\text{P}_{12}$ の低温物性.

本村瑤子, 川名大地, 米澤佑樹, 菊地大輔, 桑原慶太郎, 青木勇二, 佐藤英行: 重い電子系 $\text{Pr}(\text{Fe}_x\text{Ru}_{1-x})_4\text{P}_{12}$ の比熱.

川人祐介, 田中謙弥, 菊地大輔, 青木英和, 青木勇二, 佐藤英行: 高圧下でのフラックス法による充填スクッテルダイト化合物の単結晶育成 II.

三木猛, 小手川恒, 小林達生, 菅原仁, 佐藤英行, 水戸毅, 和田信二, M.Reiffers, B.Ildzikowski: YbPd_2Si_2 と YbCu_5 の圧力効果.

川名大地, 長壁豊隆, 桑原慶太郎, 菊地大輔, 青木勇二, 神木正史, 佐藤英行: $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ の圧力誘起絶縁相における単結晶中性子回折.

石井賢司, 坪田雅己, 稲見俊哉, 筒井智嗣, ハオリジェ, 長谷川朋生, 岩佐和晃, 村上洋一, 菅原仁, S.R.Saha, 佐藤英行: $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ の共鳴 X 線散乱.

田中謙弥, 川人祐介, 米澤祐樹, 菊地大輔, 青木英和, 桑原慶太郎, 菅原仁, 青木勇二, 佐藤英行: 高圧合成された $\text{PrFe}_4\text{Sb}_{12}$ における 4f 電子状態の研究.

桑原慶太郎: $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ の四極子励起と超伝導.

日本物理学会第 61 回年次大会 2006 年 9 月 23 日~9 月 26 日 (千葉大学西千葉キャンパス)

西山迪孝, 水口拓也, 青木勇二, 佐藤英行: スピンバルブ CPP-GMR 素子におけるスピントランスファー効果.

米澤祐樹, 青木勇二, 菊池大輔, 菅原仁, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト化合物 $(\text{Pr}_{1-x}\text{La}_x)\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$ の磁場中物性 II.

三宅厚志, A.T. Holmes, 加賀山朋子, 清水克哉, 関根ちひろ, 城谷一民, 菊池大輔, 菅原仁, 佐藤英行: $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ の高圧下電気抵抗, 交流比熱測定.

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

渡邊彦睦, 根本佑一, 武田直也, 柳澤達也, 後藤輝孝, 落合明, 菅原仁, 佐藤英行: 超音波による充填スクッテルダイト $\text{Pr}(\text{Os}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sb}_{12}$, $\text{LaOs}_4\text{Sb}_{12}$ のラットリングの研究.

青木英和, 菊地大輔, 田中謙弥, 菅原仁, 青木勇二, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト化合物 $\text{ROs}_4\text{Sb}_{12}$ における一軸性圧力効果 II.

森育子, 菅原仁, 真岸孝一, 斉藤隆仁, 小山晋之, 菊地大輔, 田中謙弥, 佐藤英行: 単結晶 $\text{RFe}_4\text{Sb}_{12}$ ($\text{R}=\text{La}, \text{Ce}, \text{Pr}$) の電子輸送効果.

田中謙弥, 菊地大輔, 青木英和, 桑原慶太郎, 青木勇二, 佐藤英行: 高圧合成された $\text{PrFe}_4\text{Sb}_{12}$ における電子輸送特性.

上田真, 菊地大輔, 田中謙弥, 川人祐介, 青木英和, 桑原慶太郎, 菅原仁, 青木勇二, 佐藤英行: 高圧合成された $\text{SmFe}_4\text{Sb}_{12}$ の低温物性.

正木了, 水戸毅, 沖直美, 和田信二, 菊地大輔, 佐藤英行, 菅原仁, 武田直也, 鄭国慶: 充填スクッテルダイト化合物 $\text{RRu}_4\text{P}_{12}$ の NMR による研究.

長壁豊隆, 川名大地, 桑原慶太郎, 岩佐和晃, 菊地大輔, 青木勇二, 神木正史, 佐藤英行: $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ の圧力誘起絶縁相における単結晶中性子回折 II.

本村瑤子, 川名大地, 米澤祐樹, 菊地大輔, 桑原慶太郎, 青木勇二, 佐藤英行: $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ の非磁性秩序状態の Ru 置換効果.

磯部雄太, 田山孝, 榊原俊郎, 菅原仁, 青木勇二, 佐藤英行: 磁化から見た $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ の La 希釈効果.

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

水牧仁一郎, 筒井智嗣, 宇留賀朋哉, 菊地大輔, 菅原仁, 佐藤英行: $\text{RFe}_4\text{P}_{12}$ の EXAFS スペクトルの温度変化.

菊地大輔, 田中謙弥, 上田真, 川人佑介, 青木英和, 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 RT_4As_{12} の純良結晶育成と物性.

中西良樹, 藤野拓也, 孫培傑, 中嶋健二, 吉澤正人, 菅原仁, 菊地大輔, 佐藤英行: $PrFe_4P_{12}$ の高磁場相における弾性特性.

青木勇二, 本村瑤子, 川名大地, 米澤佑樹, 菊地大輔, 桑原慶太郎, 佐藤英行: $Pr(Fe_xRu_{1-x})_4P_{12}$ のおける重い電子状態の濃度依存.

日高宏之, 和田直樹, 小手川恒, 小林達生, 菊地大輔, 佐藤英行, 菅原仁: $PrFe_4P_{12}$ における圧力誘起絶縁相の研究 II.

菅原仁, 菊地大輔, 佐藤英行, 摺待力生, 大貫惇睦: $PrOs_4P_{12}$ の dHvA 効果.

稲岡慶彦, 藤秀樹, 世良正文, 菅原仁, 佐藤英行: $PrOs_4Sb_{12}$ における NMR 縦緩和率の磁場依存性.

髭本亘, 青木勇二, 伊藤孝, 大石一城, R.H.Heffner, 菅原仁, 佐藤英行: μ SR による $PrOs_4Sb_{12}$ のナイトシフト測定 II.

片山功多, 川崎慎司, 西山昌秀, 鄭国慶, 播磨尚朝, 菅原仁, 菊地大輔, 佐藤英行: $PrOs_4Sb_{12}$ の圧力下 Sb-NQR による研究.

笠原成, 平田和人, 為ヶ井強, 菅原仁, 菊地大輔, 佐藤英行: $PrOs_4Sb_{12}$ における正の局所磁化.

柄木良友, 久保田実, 石本英彦, 菅原仁, 佐藤英行: $PrOs_4Sb_{12}$ の新しい渦糸.

森嘉昭, 岩佐和晃, 八才麗傑, 村上洋一, 神木正史, 菅原仁, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト系 $PrOs_4Sb_{12}$ 及び $PrRu_4Sb_{12}$ におけるフォノン異常の研究.

小手川恒, 日高宏之, 小林達生, 菊地大輔, 菅原仁, 佐藤英行: 重い電子系 $SmOs_4Sb_{12}$ における Sb-NMR/NQR による研究.

筒井智嗣, John P. Sutter, Alfred Q.R. Baron, 菊地大輔, 菅原仁, 佐藤英行: $SmOs_4Sb_{12}$ の X 線非弾性散乱.

松平和之, 分島亮, 日夏幸雄, 関根ちひろ, 城谷一民, 菅原仁, 菊地大輔, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト $SmOs_4Sb_{12}$ の比熱測定による研究.

山崎篤志, 今田真, 東道啓聡, 藤原秀紀, 宮町俊生, 関山明, 菅原仁, 菊地大輔, 佐藤英行, 東谷篤志, 矢橋牧名, 玉作賢治, 三輪大五, 石川哲也, 菅滋正: Sm 充填スクッテルダイトの軟 X 線・硬 X 線光電子分光.

今田真, 東道啓聡, 山崎篤志, 関山明, 菊地大輔, 菅原仁, 佐藤英行, 菅滋正: 充填スクッテルダイト $NdOs_4Sb_{12}$ の価電子帯 Nd3d-4f 共鳴光電子分光.

岩佐和晃, 八才麗傑, 森嘉昭, 糸部将平, 菅原仁, 桑原慶太郎: RFe_4Sb_{12} ($R = Ce, Pr, Nd$) の磁気励起.

四極子秩序物質 $YbSb$ における結晶場の温度変化: 小山田明, 前川覚, 桑原慶太郎, 神木正史, 大山研司, 岩佐和晃.

SRC 第 12 回総会・第 21 回技術報告会 ヘッド部会 2006 年 6 月 8 日 (東京コンファレンスセンター)

Y. Aoki, M. Nishiyama, T. Mizuguchi, H. Sato: Analyzing noise and transport properties of CPP-spin-valves

第 24 回化合物新磁性材料研究会「強磁性相関を内在する超伝導体の最近の話題」 2007 年 3 月 2 日 (学習院大学)

青木勇二: 充填スクッテルダイト $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ の重い電子超伝導: 時間反転対称性の破れと電気四極子自由度の役割

国際会議

The 8th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity (M2S-HTSC VIII), July 10-14, 2006, Dresden, Germany

Y. Aoki, A. Tsuchiya, T. Namiki, H. Sugawara and H. Sato: Thermodynamical studies on Pr-based Heavy fermion superconductivity in filled skutterudite $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$, (Invited)

The 17th International Conference on Magnetism, August 20-25, 2006, Kyoto,

H. Sato: Novel electronic states realized in the filled skutterudites containing rare earth elements with more than one 4f-electrons, (Invited)

Effect of uniaxial stress on pressure-induced metal-insulator transition in $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$: H. Hidaka, N. Wada, H. Kotegawa, T. C. Kobayashi, D. Kikuchi, H. Sato and H. Sugawara

Magnetic anisotropy around the successive two transitions in $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$: D. Kikuchi, K. Tanaka, H. Aoki, K. Kuwahara, Y. Aoki, H. Sugawara and H. Sato

Resonant X-ray scattering of $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$: K. Ishii, S. Tsutsui, L. Hao, T. Hasegawa, K. Iwasa, M. Tsubota, T. Inami, Y. Murakami, S.R. Saha, H. Sugawara and H. Sato

NMR study of the successive two phase transitions in $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$: S. Masaki, T. Mito, S. Wada, N. Takeda, D. Kikuchi, H. Sato, H. Sugawara and G.-q. Zheng

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

Muon Knight shift measurements on PrPb_3 in paraquadrupolar state: T.U. Ito, W. Higemoto, K. Ohishi, R.H. Heffner, N. Nishida, Y. Aoki, T. Onimaru and H.S. Suzuki

The superconducting gap structure of $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ and CeRu_2 probed by $C(H, \theta)$: J. Custers, A. Yamada, T. Tayama, T. Sakakibara, H. Sugawara, Y. Aoki, H. Sato, Y. Onuki and K. Machida

Pressure dependence of the double superconducting transition of the filled skutterudite $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$: M.-A. Measson, D. Braithwaite, B. Salce, J. Flouquet, G. Lapertot, H. Sugawara, H. Sato and Y. Onuki

Sb-NQR study on novel superconductivity in $(\text{Pr}_{1-x}\text{La}_x)\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$: T. Nagai, M. Yogi, Y. Imamura, H. Mukuda, Y. Kitaoka, D. Kikuchi, H. Sugawara and H. Sato

Knight shift measurements in the superconducting state of $\text{Pr}_{1-x}\text{La}_x\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$ ($x=0.4$) probed by μSR : W. Higemoto, Y. Aoki, K. Ohishi, T.U. Ito, R.H. Heffner, S.R. Saha, A. Koda, K.H. Satoh, R. Kadono, D. Kikuchi, H. Sugawara, H. Sato

Sb nuclear spin-lattice relaxation rate in filled skutterudite superconductor $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$: Y. Inaoka, H. Tou, M. Sera, H. Sugawara and H. Sato

Time reversal symmetry breaking in superconducting $(\text{Pr},\text{La})\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$ and $\text{Pr}(\text{Os},\text{Ru})_4\text{Sb}_{12}$: L. Shu, W. Higemoto, Y. Aoki, N.A. Frederick, W.M. Yuhasz, R.H. Heffner, K. Ohishi, K. Ishida, R. Kadono, A. Koda, D. Kikuchi, H. Sato, H. Sugawara, T.U. Ito, S. Sanada, Y. Tunashima, Y. Yonezawa, M.B. Maple, D.E. MacLaughlin

Giant Nernst effect in heavy-electron metals: K. Behnia, R. Bel, A. Pourret, K. Izawa, J. Flouquet, Y. Nakajima, Y. Matsuda, D. Kikuchi, Y. Aoki, H. Sugawara, H. Sato

Single crystal growth and electrical and magnetic measurements on $\text{CeFe}_4\text{Sb}_{12}$: I. Mori, H. Sugawara, K. Magishi, T. Saito, K. Koyama, D. Kikuchi, K. Tanaka and H. Sato

Low temperature magnetization of $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ under pressure: T. Tayama, T. Sakakibara, H. Sugawara and H. Sato

Substitution effect on the multipolar transitions in $\text{Pr}(\text{Fe}_x\text{Ru}_{1-x})_4\text{P}_{12}$: Y. Aoki, Y. Motomura, D. Kawana, D. Kikuchi, K. Kuwahara and H. Sato

Antiferromagnetic ordering in the filled skutterudite semiconductor $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$: K. Iwasa, C.P. Yang, M. Kohgi, H. Sugawara, H. Sato and N. Aso

Ultrasonic measurement on the La-substituted $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ system: Y. Nakanishi, T. Tanizawa, T. Fujino, P. Sun, M. Nakamura, M. Yoshizawa, H. Sugawara, D. Kikuchi and H. Sato

Rattling phonons in the filled skutterudite $\text{LaT}_4\text{X}_{12}$ ($\text{T}=\text{Fe},\text{Ru},\text{Os};\text{X}=\text{P},\text{Sb}$) studied with La-NMR, P-NMR/Sb-NQR: Y. Nakai, K. Ishida, K. Magishi, H. Sugawara, D. Kikuchi and H. Sato

Magnetism of filled skutterudites under high magnetic fields: T. Yamada, H. Nakashima, K. Sugiyama, M. Hagiwara, K. Kindo, K. Tanaka, D. Kikuchi, Y. Aoki, H. Sugawara, H. Sato, R. Settai, Y. Onuki, H. Harima

Inelastic X-ray scattering of Sm-filled Skutterudite compounds: S. Tsutsui, H. Kobayashi, A.Q.R. Baron, J.P. Sutter, Y. Yoda, H. Onodera, D. Kikuchi, H. Sugawara, H. Sato, C. Sekine and I. Shirotnani

Specific heat properties of filled skutterudite compound $\text{PrRu}_4\text{As}_{12}$: T. Namiki, Y. Aoki, H. Sato, C. Sekine, I. Shirotnani and T. Yagi

Sm-based filled skutterudite $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ studied by specific heat: K. Matsuhira, M. Wakeshima, Y. Hinatsu, C. Sekine, I. Shirotnani, D. Kikuchi, H. Sugawara and H. Sato

Optical study on metal-insulator change in $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ under high pressure: A. Irizawa, K. Sato, M. Kobayashi, T. Nanba, M. Matsunami, H. Sugawara and H. Sato

Photoemission study on Sm-based filled skutterudites: A. Yamasaki, S. Imada, H. Higashimichi, H. Fujiwara, T. Saita, T. Miyamachi, A. Sekiyama, H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato, A. Higashiya, M. Yabashi, T. Ishikawa, S. Suga

NMR study of magnetic properties in filled skutterudite compound $\text{EuRu}_4\text{P}_{12}$: K. Magishi, Y. Iwahashi, T. Horimoto, H. Sugawara, T. Saito, K. Koyama

Raman scattering study of the skutterudite compounds: N. Ogita, R. Kojima, Y. Takasu, T. Hasegawa, T. Kondo, M. Udagawa, N. Takeda, T. Ikeno, K. Ishikawa, H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato, C. Sekine, I. Shirovani

Elastic anomalies of UGe_2 : K. Kuwahara, T. Sakai, M. Kohgi, Y. Haga and Y. Onuki

Inelastic neutron scattering measurements in a quadrupolar ordering compound YbSb : A. Oyamada, K. Kuwahara, K. Ohoyama, K. Iwasa, M. Kohgi and S. Maegawa

Development of a hybrid-anvil type high-pressure device and its application to magnetic neutron scattering studies: T. Osakabe, K. Kakurai, D. Kawana and K. Kuwahara

9th Japanese-German Symposium- Collective Quantum Phenomenon in Strongly Correlated Electron Systems: Electronic Instabilities, Dimensionality Effects, and Novel Phases, Aug. 26-28, 2006, Hikone

H. Sato: Filled skutterudites: their attractive features and their synthesis, (Invited)

First Swiss Japan Workshop on the applications and on new developments in muon spectroscopy on novel materials, September 28-30, 2006, KEK Tsukuba

Y. Aoki: Strongly correlated electron states in filled skutterudites, (Invited)

ナノ物性サブグループ

1. 研究活動の概要

本グループは、カーボンナノチューブ(CNT)などのナノ構造物質系の基礎物性を、核磁気共鳴(NMR)、磁化測定、電気伝導度測定、X線回折等の手法を用いて研究している。また、ナノ領域の微細試料を研究する新しい方法としてのNMRの研究を行っている。2006年度(平成18年度)における研究・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内の水の運動(NMR実験)

CNTは、サブナノメートルの直径を持った疎水性の均一円筒空洞を有する。このような空洞内の物質の構造と相転移挙動は極めて興味深い。CNTの直径は原理的にほぼ連続的に制御可能であるから、CNTは円筒空洞内部の物質の構造とその性質が系のサイズに対してどのように変化するかを系統的に調べる絶好のシステムである。さらに水については、バイオチャネルのモデル系として有望である。

本グループでは、核磁気共鳴(NMR)法を用いて平均直径13.5Åの高純度単層カーボンナノチューブ(SWNT)試料に吸着された軽水(H₂O)および重水(D₂O)の¹H、²H-NMRを行い、以下の結果を得た。(1)220K以上では、NMRスペクトルは十分シャープであり、水分子は10⁻⁵秒の時間スケールで高速回転運動と並進運動を行なっている。これは、220KまでCNT内部の水は液体的であるためであると考えられる。(2)しかし、²H-NMRスペクトルは弱い構造をもち、液体状態においてもCNT壁との相互作用によって、水分子の配向は完全な等方性から僅かにずれている。(3)220K以下では、²H-NMRの信号強度の減少および¹H-NMRに幅広の信号成分が現れる。以上のNMR実験より、直径13.5Å程度の疎水的CNT内部の水は220K以下まで液体的であり、220K以下ではアイスナノチューブが形成され、全ての水素原子の運動が凍結することが明らかになった。

2) 交換転移、ナノバルブ機構の発見

本グループでは、高圧力の印加など特別の手段を用いることなく、通常条件下においてSWNT内部へ水が容易に吸着されることを見出している。しかしCNTは疎水壁からできており、このような疎水的なサブナノメートルの空洞内部に水が吸着可能か否かという問題は極めて微妙な問題であり、理論的には十分慎重に扱う必要がある。本年度、この問題に関連して、以下のとおり著しい進展があった。

水を吸着したSWNTは、ガス雰囲気下において電気抵抗、NMR、X線回折パターンに異常を示す。この異常の起源として、これまでCNT内部に水とガスの新規化合物(ナノチューブハイドレート)が生成することを検討してきた。しかし、実験データの詳細な解析から、この異常は別の原因によることが明らかになった。すなわち、ガス中では、雰囲気ガスとCNT内部の水が交換する「交換転移」が起こるのである。転移温度以上(または転移圧力以下)で水はCNT内部の方が安定であるが、転移温度以下(または転移圧力以上)になると、雰囲気ガス分子がCNT内部の水を追い出し、水分子とガス分子の交換が起こる(交換転移)。交換転移温度(圧力)はガスの種類に極めて敏感である。このような交換転移は、古典分子動力学計算によって、ミクロな観点から再現し実証することに成功した。交換転移の応用として、ガス選択的なナノバルブやガスセンサーを提案した。本成果は首都大学東京よりプレス発表され、読売新聞、フジサンケイビジネスアイ、日刊工業新聞、日経産業新聞、科学新聞、電波新聞などに掲載された。

3) CNT内部のガスの構造と相転移

直径、11~20ÅのSWNT内部のガス(メタン、アルゴンなど)の構造と相転移挙動をX線回折実験、NMR、計算機実験などの手法を用いて系統的に調べ、相転移挙動について興味深い予備の結果を得た。

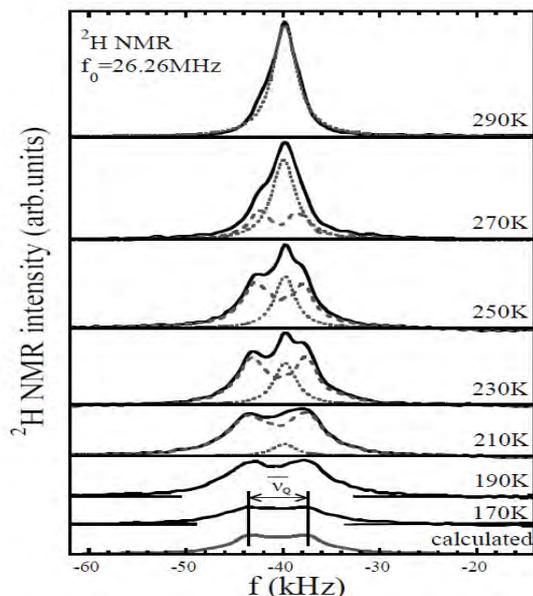


図 1: 平均直径 13.5Å の SWCNT 内部の重水の ^2H - NMR スペクトル。220K 以下では 7 員環アイスナノチューブが形成され、水の運動が凍結する。220K 以上では、ほとんどの水の分子は早い回転運動を行なっているが、CNT 壁との相互作用のため僅かな構造が残る。(完全に運動が凍結している重水の NMR スペクトルは 100kHz 以上の幅になる。) K. Matsuda, T. Hibi, H. Kadowaki and Y. Maniwa: *Phys. Rev. B* **74** (2006) 073415 に発表。

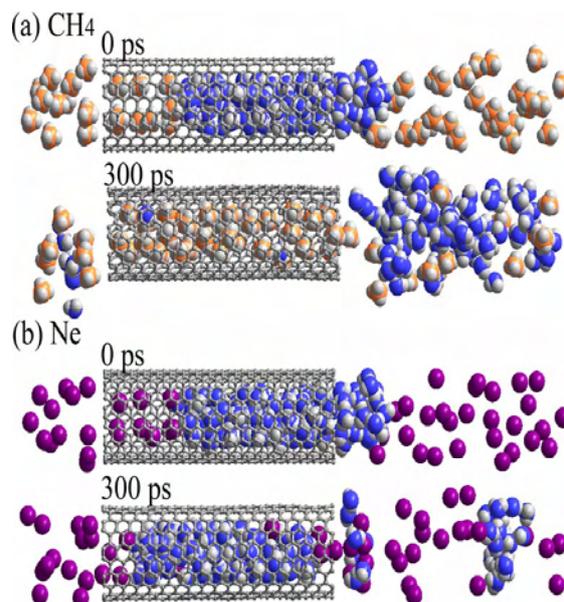


図 2: 交換転移の分子動力学計算によるデモンストレーション。(a) メタン雰囲気、(b) ネオン雰囲気。上は 0 ピコ秒における初期配置で、水は CNT 内部に入っている。300 ピコ秒後、メタン雰囲気では水とメタン分子が交換し、CNT 内部がメタンで満たされる。一方ネオン雰囲気では、300 ピコ秒後も水は CNT 内部に安定に留まっている。(Y. Maniwa et al., *Nature Materials* **6** (2007) 135-141.)

4) 卒業研究

今井顕治 (特別研究): PEFC 型燃料電池の特性と MEA 作製・評価

小笠原崇 (特別研究): Na 吸蔵ゼオライトとサーモクロミズム

三島隆洋 (特別研究): PEFC 型燃料電池の特性と MEA 作製・評価

5) 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。以下の 2 課題の申請を行って採択された。課題名 (課題番号): カーボンナノチューブ複合体の構造研究 (2006G258、2006 年秋より 2 年間)。課題名 (課題番号): アルカリ吸蔵ゼオライトの着色現象と構造 (2006G259、2006 年秋より 2 年間)。ナノバルブ機構などについて nano tech 2007 (2007 年 02 月 21 日 - 23 日、東京ビッグサイト) に出展した。

2. 研究業績

1) 論文

Yutaka Maniwa, Kazuyuki Matsuda, Haruka Kyakuno, Syunsuke Ogasawara, Toshihide Hibi, Hiroaki Kadowaki, Shinzo Suzuki, Yohji Achiba, Hiromichi Kataura: Water-filled single-wall carbon nanotubes as molecular nanovalves, *Nature Materials* **6** (2007) 135-141.

Kazuhiro Yanagi, Konstantin Iakoubovskii, Said Kazaoui, Nobutsugu Minami, Yutaka Maniwa, Yasumitsu Miyata and Hiromichi Kataura: Light-harvesting function of β -carotene inside carbon nanotubes, *Phys. Rev. B* **74** (2006) 155420-5.

Kazuyuki Matsuda, Toshihide Hibi, Hiroaki Kadowaki, Hiromichi Kataura and Yutaka Maniwa: Water dynamics inside single-wall carbon nanotubes: NMR observations, *Phys. Rev. B* **74** (2006) 073415.

Shinji Matsumoto, Hiroyuki Matsui, Atsushi Maeda, Taishi Takenobu, Yoshihiro Iwasa, Yasumitsu Miyata, Hiromichi Kataura, Yutaka Maniwa and Hiroshi Okamoto: Optical Stark Effect of Exciton in Semiconducting Single-Walled Carbon Nanotubes, *Jpn. J. App. Phy.* **45** (2006) L513-L515. (Express Letter)

Yutaka Maniwa, Shin-ichi Masubuchi, Toshifumi Minamisawa, Hiroshi Kira, Testuya Kodaira, Shigeo Kazama: Thermochromism in sodium-loaded zeolite FAU(1.25), *Chem. Phys. Lett.* **424** (2006) 97-100.

2) 学会講演

日本物理学会第 61 回年次大会 2006 年 3 月 27 日～30 日 (愛媛大・松山大)

坪根徳明, 日比寿栄, 鷹子貴之, 谷津祥明, 西森努, 松田和之, 片浦弘道, 鈴木信三, 阿知波洋次, 真庭豊: 単層カーボンナノチューブバンドルに吸着された分子の構造

日比寿栄, 松田和之, 真庭豊, 門脇広明, 片浦弘道, 鈴木信三, 阿知波洋次: 単層カーボンナノチューブに吸着された水の NMR による研究

松本真二, 松井弘之, 前田充史, 岡本博, 竹延大志, 岩佐義宏, 宮田耕充, 片浦弘道, 真庭豊: ポリマー中に分散した単層カーボンナノチューブの非線形光学応答

久保寺利光, 門脇広明, M.A. Adams, 真庭豊, 松田和之, 鈴木信三, 阿知波洋次, 片浦弘道: カーボンナノチューブに吸着された水分子の運動状態

真庭豊: ナノチューブ内に束縛された水分子の構造 (シンポジウム講演)

日本物理学会秋季大会 2006 年 9 月 23 日～26 日 (千葉大学)

鷹子貴之, 宮田耕充, 谷津祥明, 客野遥, 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: 直径 2nm-SWNT のガス吸着と構造

谷津祥明, 日比寿栄, 松田和之, 鷹子貴之, 客野遥, 門脇広明, 真庭豊, 片浦弘道: 水を吸蔵した SWNT へのガス吸着 -NMR による研究-

真庭豊: 複合体化ナノチューブ様物質の可能性 (吸着・結合・内包, テンプレート) -はじめに- (シンポジウム講演)

宮田耕充, 柳和宏, 岡崎俊也, 真庭豊, 片浦弘道: 化学ドーピングされた単層カーボンナノチューブの光物性

第 67 回応用物理学会学術講演会 2006 年 8 月 29 日～9 月 1 日 (立命館大学びわこ・くさつキャンパス)

柳和宏, コンスタンチン・ヤコボフスキー, 南信次, 宮田耕充, 真庭豊, 片浦弘道: 単層カーボンナノチューブに内包された色素による光増感発光

第 32 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム 2007 年 2 月 13 日～15 日 (名城大学 天白キャンパス)

宮田耕充，河合孝純，宮本良之，柳和宏，真庭豊，片浦弘道: 単層カーボンナノチューブにおける結合曲率に依存した酸化プロセス

松田和之，真庭豊，片浦弘道，鈴木信三，阿知波洋次: C₆₀ ピーポッドの ¹³C NMR

分子研研究会 2007 年 3 月 19 日 (分子研、愛知県岡崎市)

カーボンナノチューブ内の水：アイスナノチューブと交換転移

粒子ビーム物性サブグループ

1. 研究活動の概要

昨年度の引き続いて、量子相転移、フラストレートした磁性体、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。本年度はカーボンナノチューブ内の水に関して、分子動力学シミュレーションを使った研究手法を本格的に始め、中性子散乱実験で得られたデータを定量的に解析する手段として使うことを可能にした。また、この数年間に行ったカゴメアイスの研究成果をまとめてPRLに発表すると共に、ICMにおいて宣伝を行った。

1) 遍歴電子反強磁性体の量子臨界現象

反強磁性-非磁性境界の近傍に位置する遍歴電子反強磁性体の量子臨界点 ($T_N=0$) はどの臨界固定点により支配されているのか? という問題、すなわち、従来言われているようにフェルミ面が連続的に変わるSDW typeのQCPなのか?、フェルミ面が不連続に変化するlocally critical QCPなのか? それ以外の全く異なるQCPの可能性はどうか? という論点で様々な研究がなされている。我々は、重いf電子系Ce(Ru_{1-x}Rh_x)₂Si₂ ($x_c \sim 0.04$)におけるQCPを明らかにした実験に続いて、d電子系の弱い遍歴電子反強磁性体(V_{1-x}Ti_x)₂O₃を用いた中性子非弾性散乱実験に着手した。まだ最終結論には到達していないが、E/T-scalingよりは、E/T³-scaling (SDW QCP)を支持する実験データを得ている。

2) 幾何学的フラストレーションを示す磁性体の磁気揺動

結晶格子の幾何学的な形によりフラストレーションを示す磁性体は、正三角形や正四面体を基本単位となる結晶格子を持つ物質に見られる。磁気的な相互作用の条件により、通常の長距離秩序を示すもの、磁気的相転移を絶対零度まで起こさないもの、有限温度でスピン凍結を起こすもの、スピン液体状態などの量子的基底状態を持つものなどがある。パイロクロア型酸化物Dy₂Ti₂O₇に[111]方向の磁場をかけた場合に出現するといわれていた、カゴメアイス状態のスピン相関の実験結果を、モンテカルロシミュレーションを用いて解析した。その結果、双極子相互作用が大きいDy₂Ti₂O₇においても磁場下で空間次元の低下とカゴメアイス状態が実現することを実験、理論の両面から結論した。

3) 単層カーボンナノチューブに吸蔵された水分子の状態

単層カーボンナノチューブ内の水分子は自己組織化されて低温領域でチューブ構造(アイスナノチューブ)を持つことに興味を持たれている。しかし現在実験に用いられる直径分布のあるカーボンナノチューブにおいて、実際に何が起きているのかという問題に関しては、はっきりしない点も多い。そこで、中性子回折実験をレオンブリュアン研究所で行うと共に分子動力学を用いた計算を行い、実験データを定量的に解析することにより包括的な理解に到達することを目指して研究を進めた。その結果、直径の大きいカーボンナノチューブの内部では、アイスナノチューブ構造ではなく、アモルファス氷になる場合もある等の新しい可能性が分かって来た。今後の発展が期待される。

2. 研究業績

1) 論文

Y. Tabata, H. Kadowaki, K. Matsuhira, Z. Hiroi, N. Aso, E. Ressouche, B. Fak: Kagome ice state in the dipolar spin ice Dy₂Ti₂O₇, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 257205 (2006).

Y. Maniwa, K. Matsuda, H. Kyakuno, S. Ogasawara, T. Hibi, H. Kadowaki, S. Suzuki, Y. Achiba, H. Kataura: Water-filled single-wall carbon nanotubes as molecular nanovalves, *Nature Materials*, **6**, 135-141 (2007).

K. Matsuda, T. Hibi, H. Kadowaki, H. Kataura, Y. Maniwa: Water dynamics inside single-wall carbon nanotubes: NMR observations, *Phys. Rev. B* **74**, 073415-(1-4) (2006).

2) 国際会議報告

Y. Tabata, H. Kadowaki, K. Matsuhira, Z. Hiroi, N. Aso, E. Ressouche, B. Fak: Spin correlation in kagome ice state: Neutron scattering study of the dipolar spin ice $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ under magnetic field along [111], Proceedings of the 17th International Conference on Magnetism, Kyoto, Japan, August 20-25, 2006, *J. Magn. Magn. Mater.* **310**, 1311-1313 (2007).

H. Kadowaki, Y. Tabata, M. Sato, N. Aso, S. Raymond, S. Kawarazaki: Quantum Critical Point of Itinerant Antiferromagnet in the Heavy Fermion $\text{Ce}(\text{Ru}_{1-x}\text{Rh}_x)_2\text{Si}_2$, Proceedings of 24th International Conference on Low Temperature Physics, Orlando, Florida, USA, August 10-17, 2005, *AIP Conference Proceedings*, Vol. **850**, 1167-1170 (2006).

3) 学会講演

日本物理学会 第 61 回年次大会 2006 年 3 月 27-30 日 (愛媛大学)

門脇広明, 田畑吉計, 松平和之, 廣井善二, 阿曾尚文, B. Fak: モンテカルロシミュレーションを用いたカゴメアイス等の実験データ解析

田畑吉計, 門脇広明, 松平和之, 廣井善二, 阿曾尚文, B. Fak: カゴメアイスにおけるスピン相関 II

日比寿栄, 松田和之, 真庭豊, 門脇広明, 片浦弘道, 鈴木信三, 阿知波洋次: 単層カーボンナノチューブに吸着された水の NMR による研究

久保寺利光, 門脇広明, M.A. Adams, 真庭豊, 松田和之, 鈴木信三, 阿知波洋次, 片浦弘道: カーボンナノチューブに吸着された水分子の運動状態

日本物理学会 2006 年秋季大会 2006 年 9 月 23-26 日 (千葉大学)

鷹子貴之, 宮田耕充, 谷津祥明, 客野遥, 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: 直径 2nm-SWNT のガス吸着と構造

谷津祥明, 日比寿栄, 松田和之, 鷹子貴之, 客野遥, 門脇広明, 真庭豊, 片浦弘道: 水を吸蔵した SWNT へのガス吸着: NMR による研究

国際会議

The 17th International Conference on Magnetism
Kyoto, Japan, August 20-25, 2006

H. Kadowaki, Y. Tabata, K. Matsuhira, Z. Hiroi, N. Aso, E. Ressouche, B. Fak: NEUTRON SCATTERING STUDY OF FRUSTRATED PYROCHLORE COMPOUNDS.

Highly Frustrated Magnetism 2006
Osaka, Japan, August 15-19, 2006

Y. Tabata, H. Kadowaki, K. Matsuhira, Z. Hiroi, N. Aso, E. Ressouche, B. Fak: Evidence of the kagome ice state in the dipolar spin ice material $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$: neutron scattering study.

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幾つかの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て、分子科学研究所との共同研究による 94,000 MHz までの ESR を用い、温度、周波数、圧力をパラメーターとした電子状態の情報を得ることを目的としている。

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、たとえ多結晶試料であっても低次元電子系であれば、通常は平均値しか測定できない様な、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である。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圧用セルを用いると 3 GPa までかけることが出来るが、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 までの高圧下 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。これらの性質に加えて電気伝導度が付与されれば、ナノエレクトロニクス材料として有望であることから、最近、物性面からのアプローチも盛んになってきている。

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の素材としての可能性を調べることを目的として研究を進めている。

図 1 は、Mn を DNA の塩基対間に導入した Mn-DNA の ESR スペクトルを示す。通常、DNA は多湿条件下では細胞内で取る B-form 構造だが、乾燥下では A-form 構造に転移する。B-form では Mn がほぼ 1 次元鎖構造を取り、隣接する 2 重螺旋の中心に配位する Mn 鎖との距離は 2nm にもなる。これは鎖内の Mn イオン間の距離 0.34nm の十倍近くであり、磁氣的相互作用としてはその 3 乗、或いはもっと異方性が大きくなる。この様な構造の違いを反映して、多湿下の B-form Mn-DNA は、2K まで磁気秩序の兆候は示さないが、3 次元的な磁気相互作用を持つ乾燥下の A-form Mn-DNA は図 2 に示すような比熱の山が 0.4K に観測され、ESR 線幅の 100K 以下の急激な増大と合わせて考えると、反強磁性、或いはスピングラス的な秩序相があると考えられる。

また、多くの2価金属イオンは Mn と同じように DNA の塩基対間に挿入される。ESR 信号や SQUID 磁化率の大きさから、DNA 内の金属イオンの電子状態がやはり 2 価であることが推測でき、DNA 本体と金属イオンの間で電荷のやり取りが起こらないことが分かった。しかし、Fe の場合だけは塩基対のバンドに電子が移動して、3 価の Fe になっていることが確かめられた。

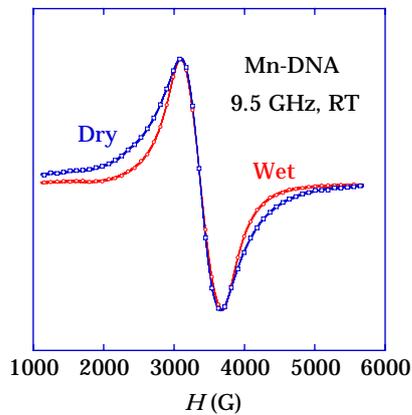


図 1: Mn-DNA の ESR スペクトル。Wet の B-form と、乾燥状態の A-form とでは ESR スペクトルの形が変化する。前者はスピン間に 1 次元的な交換相互作用がある時に特徴的な線形で、後者は 3 次元的なスピン間の結合がある時に再現可能なローレンツ型の線形で再現できる。

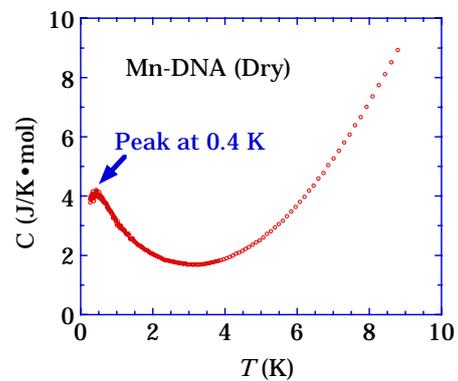


図 2: 乾燥状態の A-form の Mn-DNA の低温比熱。DNA 2 重螺旋を縄ばしごに喩えると、A-form は縄ばしごを円筒の表面にコイルを巻くような構造を取るため、B-form の 1 次元的な Mn の配置に対して 3 次元的な Mn スピン間の結合が生ずる。0.4K の比熱のピークは AF 或いはスピングラス的な 3 次元磁気秩序を示すと考えられる。

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ように金属的状态に変化するかを圧力下 ESR を用いて調べている。高压 (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。2mm の圧力セル内に直径 1mm 程度のコイルを巻き、単結晶一つで信号の観測を行った。しかし、アンビルの周囲に巻いた磁場発生コイルで信号を観測するまでには未だ至っていない。(産総研との共同研究)

3) β'- & β''- ET-TCNQ

有機の電荷移動錯体の 1 種である、(BEDT-TTF)TCNQ は、数種の異なる構造を持つ。β'-相は、BEDT-TTF (ET と略称) の構成する 2 次元シートと TCNQ 鎖のシートからなるが、互いの分子面がほぼ直交している。一方、β''-相は、構成要素は全く同じだが、互いの分子面はほぼ平行であり、両者の構造の違いが電子状態や物性に与える影響が興味深い。どちらの構造でも、ET 分子から TCNQ 分子にほぼ $\frac{1}{2}$ 個の電子が移っており、β'-相はユニットセルにそれぞれ 2 分子含む $\frac{1}{2}$ -充填バンドを、β''-相はそれぞれ 1 分子を含み $\frac{1}{4}$ -充填バンドを持つ。これまでに、β'-相は、常圧、330 K 以下ではモット絶縁相と考えられ、分子面の直交性のため相互作用は極端に弱く、それぞれ 20 K、3.5 K で独立に反強磁性秩序を起こすことを g 値とスピン磁化率から明らかにしてきた。一方、β''-相は、300 K 以下の抵抗の温度変化は金属的であるが 180、80、20、10 K で異常が見られる。両分子のスピン磁化率の分離から、180 K は、ET 分子面で電荷秩序が融け、金属へ転移すると考えられるが、TCNQ 鎖はダイマー型モット絶縁体と考えられる。しかし、80 K 以下の異常の原因は不明であった。これまでに得られた大事な実験事実は、20K 以下で単結晶試料にもかかわらず ESR スペクトルに非対称な異方性が出現・成長し、約 10K でほぼ一

定の幅になることである。単結晶の異方的なスペクトルは、TCNQ 分子上の磁気秩序の可能性が最も高いが、同じ温度領域で TCNQ の陽子 NMR スペクトルには異常が見られなかった。これらのことから得られた結論は、ET の 2 次元シートはフェルミ面が観測されていることから金属的だが、TCNQ 鎖はスピンパイエルズ転移を 20K で起こす。有限長のドメイン構造に起因する TCNQ 鎖の欠陥がスピンを持ち、交換相互作用により隣接する ET シートの伝導電子を分極し、欠陥スピン間の RKKY 相互作用により ESR スペクトルを異方的に広げる、と言うモデルが考えられる。今後、このモデルを検証していく。(埼玉大、中大、分子研との共同研究)

4) 交互積層型電荷移動錯体

交互積層型錯体ドナー分子、アクセプター分子が交互に並んだ柱から成っており、中性相、イオン性相の二種の相が存在する特徴を持つ。中性-イオン性転移は 1 次転移であるが、(BEDT-TTF)(ClMeTCNQ) においては、両相の間のエネルギー障壁の大きさが転移温度程度であるために短時間で熱平衡になり、クロスオーバー的な転移になること等を明らかにした。常温・常圧で中性相にある BO(EtO)₂TCNQ の常温での常磁性磁化率の圧力依存性を調べた結果、(BEDT-TTF)(ClMeTCNQ) がイオン性相に転移し磁化率が飽和する 1.5GPa でも、中性のままであることがわかった。これは、この系の電荷移動バンドエネルギーが若干大きく、中性・イオン性両相の境界からより離れていることに対応する。さらに、常温・常圧でイオン性相にある (BEDO-TTF)(Cl₂TCNQ) の圧力-温度相図を求めた。120K での分子変位を伴う転移の圧力依存性を、圧力を少しずつ増加させながら調べたところ、0.1GPa の圧力で転移温度が大きく減少し、高温相が安定化されることが確認された。(産総研、京大との共同研究)

5) ラジカル導電性高分子

TEMPO (Hydroxy-tetramethylpiperidine-radical) は >N-O・型をした、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フリーラジカルである。TEMPO を構成要素とした分子結晶が、0.1K 近辺で強磁性を示すことも知られている。このフリーラジカルを導電性高分子のポリアセチレン等に枝として付けたポリ TEMPO プロピオレート等は、フリーラジカルと伝導鎖の組み合わせを目指した系である。この組み合わせが効果的に働くと、秒のオーダーで充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 NEC の佐藤氏が検証してきたが、同じ構成であっても電池としての可使用容量に大きな差が生じていた。その原因を ESR、SQUID による高分子内のフリーラジカル量の定量から確認を行った。その結果、TEMPO ラジカルは定量的に入っていることから、容量の差が他の構造的な因子に依拠している可能性を示した。(京大、日本化成との共同研究)

6) 導電性高分子による活性酸素発生メカニズムの解明

企業との共同研究により、表記のテーマで導電性高分子のスピン数および曝水時間によりそれがどのように変化するかを調べた。活性酸素発生は、曝水時に起こることが報告されているが、その現象に導電性高分子自体がどのような関与をしているのかを明らかにするために導電性高分子を流水に晒し、ESR 強度と排水中の pH やドーパント成分などを解析して、起こっている反応を推測した。その結果、水中の酸素分子が直接反応している可能性が低いことが明らかになった。今後、実際に起こっている現象の解明を進めていく。

2. 研究業績

1) 論文

K. Mizoguchi, S. Tanaka, M. Ojima, S. Sano, M. Nagatori, H. Sakamoto, Y. Yonezawa, Y. Aoki, and H. Sato: AF-like Ground State of Mn-DNA and Charge Transfer from Fe to Base- π -Band in Fe-DNA, J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 043801 (1-4) (2007).

M. Hiraoka, H. Sakamoto, K. Mizoguchi, R. Kato, T. Kato, T. Nakamura, K. Furukawa, K. Hiraki, T. Takahashi, T. Yamamoto, and H. Tajima: Electron spin dynamics in (DMe-DCNQI)₂M (M = Li_{1-x}Cu_x (x < 0.14), Ag), J. Low Temp. Phys. **142**, 617-620 (2007).

H. Sakamoto, K. Mizoguchi, and T. Hasegawa: Neutral-Ionic transition of (BEDT-TTF)(CIME TCNQ) studied by ESR under pressure, J. Low Temp. Phys. **142**, 637-640 (2007).

K. Mizoguchi: EPR study of the electronic states in natural and doped DNA, Electroactive polymers: Materials & Devices, edited by S. A. Hashmi (Allied Publishers, Dalhausie, India, 2007), Vol. **1**, p. 1-10.

K. Mizoguchi, S. Tanaka, and H. Sakamoto: Electronic States of natural and metal-ion doped DNAs, J. Low Temp. Phys., **142**, 379-382 (2007).

K. Mizoguchi, Y. Shinohara, S. Kazama, M. Hiraoka, H. Sakamoto, R. Kato, K. Hiraki, and T. Takahashi: Determination of the π -charge distribution of DMe-DCNQI molecule in (DMe-DCNQI)₂M, M=Li, Ag, and Cu, J. Low Temp. Phys. **142**, 625-628 (2007).

S. Konno, S. Kazama, M. Hiraoka, H. Sakamoto, K. Mizoguchi, H. Taniguchi, T. Nakamura, and K. Furukawa: EPR study on the electronic states of β' -(BEDT-TTF)(TCNQ), J. Low Temp. Phys. **142**, 621-624 (2007).

2) 学会講演

日本物理学会 第 61 回年次大会 2006 年 3 月 27 日 - 3 月 30 日 (愛媛大学・松山大学)

井上政信, 溝口憲治, 坂本浩一, 徳本圓, 川本徹, A.Omerzu, D. Mihailovic : 有機強磁性体 TDAE-C60 の一軸歪み ESR

田中俊輔, 溝口憲治, 坂本浩一, 尾島雅也, 佐野さやか : 金属をドーブした DNA の ESR による電子状態解析 IV

木原工, 坂本浩一, 溝口憲治, 今野信一, 風間重雄, 谷口弘三, 中村敏和, 古川貢, 平岡牧: β' -ET(TCNQ) の電子状態

今野信一, 風間重雄, 平岡牧, 坂本浩一, 溝口憲治, 谷口弘三, 中村敏和, 古川貢: β' -(BEDT-TTF)(TCNQ) の ESRIV

坂本浩一, 遠藤航, 溝口憲治, 谷口弘三 : β' -(BEDT-TTF)₂ICl₂ の圧力下 ESR III

高分子学会 06-2 ポリマーフロンティア 21 「導電性高分子の歴史とサイエンス」 2006 年 6 月 2 日 (東京工業大学立)

溝口憲治：基礎編 -導電性高分子の基礎理論-

応用物理学会 2006 年秋期第 67 回学術講演会 2006 年 8 月 31 日 (命館大学、びわこ・くさつキャンパス)

溝口憲治：DNA の電子・光機能 (シンポジウム講演： 共役高分子の超階層制御と革新機能の探索)

日本物理学会 2006 年秋季大会 2006 年 9 月 23 日 - 9 月 26 日 (千葉大学)

尾島雅也，溝口憲治，坂本浩一，永島舞，田中俊輔：金属をドーピングした DNA の電子状態

加藤朝飛，木原工，坂本浩一，溝口憲治，今野信一，風間重雄，谷口弘三，中村敏和，古川貢，平岡牧：
 β' -(BEDT-TTF)(TCNQ) の圧力下低周波 ESR

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)₂ICl₂
の圧力下 ESR IV

木原工，加藤朝陽，坂本浩一，溝口憲治，今野信一，風間重雄，谷口弘三，中村敏和，古川貢，平岡牧：
 β'' -(BEDT-TTF)(TCNQ) の電子状態

国際会議

Symposium on DNA nanoelectronics -Theory and Experiments (DNA06), Regensburg, Germany,
April 7-8, 2006

K. Mizoguchi, S. Tanaka, H. Sakamoto: Electronic states of DNA: study on magnetic properties. (Oral presentation)

International Symposium on Macro- and Supramolecular Architectures and Materials (MAM-06),
Waseda Univ., Japan, May 28-June 1

K. Mizoguchi, S. Tanaka, M. Ojima, S. Sano and H. Sakamoto: Electronic states of salmon and metal doped DNA. (Oral presentation)

The International Conference on Synthetic Metals (ICSM2006), Dublin, Ireland, July 2 - 7, 2006

K. Mizoguchi, S. Tanaka, M. Ojima, S. Sano, H. Sakamoto: Nature of natural DNA and a possibility of charge carrier doping

Hirokazu Sakamoto, Wataru Endo, Kenji Mizoguchi, and Hiromi Taniguchi: Magnetic properties of β' -(BEDT-TTF)₂ICl₂ studied by ESR under pressure

T. Kihara, K. Mizoguchi, H. Sakamoto, S. Konno, A. Kato and H. Taniguchi: Magnetic study of the electronic states in β'' -(BEDT-TTF)(TCNQ)

先日私はヘルシンキ大学の理学部を訪問した。フィンランドはたいへん小国であるにもかかわらず教育では世界の先端を行っている。

私はヘルシンキで、本学の高エネルギー理論グループを終了した 2 人のポスドクに会った。私は彼らが外国でどうしているか興味があった。卒業生がその後どのような成果をあげるかは、おそらく本学の教育の質の最終的な評価といえるからだ。また、私は現地に到着するとすぐ、フィン語はきわめて難解であるが、大学内は言うに及ばず、道行くフィン人たちもみな英語がうまいことに気づいた。フィンランドのテレビも多国語放送 (少なくとも 5 カ国語) である。さらに私は、ヘルシンキ大学理学部の主任がイラン人であることにも驚いた。彼はモスクワ大学を卒業後 30 年以上にわたってフィンランドに在住し、ペルシア語、ロシア語、英語、フィン語に堪能だ。彼の学生にはルーマニア人や日本人もいる。ヘルシンキでの理学講義には何語を用いるのか彼に尋ねたところ、理学部には非フィン人の学生もたいへん多いため、英語だという (ヘルシンキ大学にはおよそ 2000 人も留学生がいる)。

よい教育は多様性や国際コミュニケーション、そして選択の自由を前提とする。国際的な大学はよりオープンであるべきだ。その結果、その学生たちは覚えが早く、グローバル社会において高い競争能力をもつ。フィン人の成功のよい例は通信産業における NOKIA の活躍ではないだろうか。

現在ヘルシンキ大学で研鑽中の本学卒業生たちは極めて優秀である。実際彼らに対し海外からポスドクのポジションのオファーがあった事がそのことを証明している。しかし彼らはヨーロッパの学生たちのとの競争において大きな困難に接しているようである。私は、この事の一部は国際経験不足がその原因であると思っている。また一方でこれは、ヨーロッパ (フランスや英国など) では能力ある学生に対して特別教育を行うという確固たる伝統があるのに対し、日本では能力にかかわらずすべての学生に同等の注意を向けるという教育の習慣があることに起因しているとも思える。第 2 次世界大戦後、能力ある学生に対する特別教育を政治的理由により廃止したドイツでさえ、上位 10 位の名門大学に資金を拠出する国家プログラムが最近ドイツ政府によって採択された。

1944 年から 47 年における日本の歴史を見ると、1944 年、科学および数学における才能ある学生に特別教育を施すことを衆議院が提唱した。とりわけ、1949 年にノーベル賞を授与された湯川秀樹博士が京都の 2 箇所の特別学校で理学と数学の特別教育にあっていたが、終戦後、こうした特別クラスは廃止されてしまった。今日、基礎物理学において学術的成功を追うことは高いリスクを伴うが (実際その分野のポジションは甚だ少ない)、我々はそういった学生で能力ある者達 (そう多くはいないのだ!) に対してもっと多くのことをなすべきである。例えば短期留学や国際学会の参加などを含む、より多様で国際的な教育を行う必要がある。

(セルゲイ・ケトフ 記)

平成 18 年度年次報告編集委員

大橋隆哉 (2006 年度教室主任)

宮原恒昱

セルゲイ・ケトフ

大塚博巳