

サブグループ活動状況 平成 22 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

LHC の稼働とともに、これまでニュートリノ物理を柱としてきた素粒子理論サブグループの研究活動に新しいコアが成長してきた。研究活動の概要の記述をこの新しい動きから始めたい。

1) 弦模型における宇宙論

一般に素粒子の弦模型は超対称性を持つとは限らない。超対称性を持たない場合、そのポテンシャルエネルギーが指数関数で記述されるスカラー場がいくつか現れる。指数関数型のポテンシャルの勾配が十分に緩やかな場合には宇宙のインフレーションを説明する可能性があることが知られている。弦模型は自然に宇宙のインフレーションを説明できる可能性を持つものである。指数関数型ポテンシャルを持つスカラー場がある場合の宇宙の時間発展を分類すると、ビッグバン特異点を時間の原点としたときに、スカラー場が指数関数型のポテンシャルを高いところから単純に下っていくものと、低いところから一度登らされてから下っていくものの2種類があることがわかる。

これらのスカラー場は「コンパクト化」された6次元空間の幾何学的状態（大きさや形）を反映するものである。超弦理論は時空10次元で定義されたものであり、6次元の「コンパクト」な空間の幾何学的状況により多様な素粒子の性質を説明しようとするものがある。したがって、これらのスカラー場の値は適切な値に固定されなければならない。1つの説得力のあるシナリオとしてKKLTのシナリオというものがあり、これは非摂動的効果により指数関数型のポテンシャルに「くぼみ」が作られ、スカラー場の値がそこに固定されるというものである。しかし、初期条件としてなぜ宇宙の最初にその「くぼみ」の位置にあるのかという問題がある。系の時間時間発展を詳しく調べると、スカラー場の動きは指数関数型のポテンシャルを駆け上るタイプであることがわかった。したがって、ポテンシャルを駆け上がってきたスカラー場が自然に「くぼみ」落ち込むということが可能で（もし上から落ちてきたとすると「くぼみ」が小さすぎるために捉えられない）、この問題が動力学により解決される可能性を示した。（ピサ高等師範学校の A.Sagnotti 氏と、パリ工科大学の E.Dudas 氏との共同研究）

2) 低スケール弦模型における電弱対称性の動力的破れ

素粒子の質量は電弱対称性の自発的破れに伴って生成される。電弱対称性の存在やそれが自発的に破れていることはこれまでの加速器実験等によって検証済みである。しかし、この自発的破れがどのようにして起きているのかということについては未知である。電弱対称性の自発的破れとそれともなう素粒子質量の起源について様々な仮説が理論的に提案されている一方で、今年度始まった欧州原子核研究機構（CERN）でのLHC加速器実験はそれらの仮説に審判を下そうとしている。素粒子物理学はその歴史上でもまれにみる注目すべき時代を迎えている。

未知の粒子群が存在してそれらが強結合相互作用をする結果として、電弱対称性の破れが起こるといふ仮説がある。このような動力的な対称性の破れは、強い相互作用を記述する量子色力学において実際に起きているものであり、この仮説は説得力がありまた理論的に美しいものである。しかし、強結合相互作用の必然の結果である結合状態が、電弱対称性ともなうゲージ粒子（相互作用を担う粒子）の間の運動項混合に及ぼすはずの影響が見えていないことが大きな問題とされている。

低スケール弦模型とは弦の張力のエネルギースケールが TeV のエネルギー領域にあるとする模型である（通常は、弦の張力のスケールはプランクスケール (10^{18} GeV) に取られる）。この場合には弦模型の必然的予言である「異常ゲージ粒子」の質量も TeV のスケールになる。この「異常ゲージ粒子」が一般に電弱対称性のゲージ粒子と必然的に運動項混合を起こすことを通じて、上記の問題が自然に解決す

る可能性を指摘した。弦模型において強結合相互作用を考えることは先入観として嫌われているが、これを打ち破ることにより新しい可能性があることを示した。

3) 低スケール弦模型のLHC加速器実験への予言

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

LHC加速器は陽子と陽子を衝突させる（現在の衝突エネルギーは 7 TeV）ものであるが、素過程は陽子を構成しているクォークやグルーオンの衝突である。この衝突によって励起状態が生成され、それが再びクォークやグルーオン 2 体崩壊するという過程を探索することが発見に向けて最も有望である。終状態は、互いに正反対の方向に生ずる 2 束の粒子群（ジェット）となる（カラーの閉じ込め現象のため、クォークやグルーオンは観測されず、かわりにそれを種として生成されるたくさんの結合状態（ハドロンジェット）として観測される）。観測されるたくさん 2 ジェット事象について、各事象ごとの 2 ジェットの不变質量を実験で測定してその分布を見ることができる。既知の強い相互作用は滑らかな分布を予言するが、もし何らかの新粒子が存在すればその上にガウス関数型の共鳴の分布が見えるはずである。

弦模型における励起状態が他の物理と本質的に異なる点は、質量は縮退しているがスピンの異なる複数の粒子がその共鳴に寄与することである。これは、共鳴を構成しているジェットについて、加速器のビーム方向に対する角度分布を分析すれば明らかにすることができる。弦模型が予言する角度分布を計算した結果、スピン 1/2 とスピン 3/2 の粒子の重なりとして見えるはずであり、どのような角度分布になるかということ明らかにした。弦の励起状態の生成における角度分布についての詳細な理論研究はこれが始めてである。

弦模型は上記のスピン以外の粒子の寄与も予言する。その共鳴への寄与は小さいものではあるが、スピン 0 の粒子については特殊事情がある。スピン 0 の粒子の質量は必然的に他とは大きくずれることを発見した。それは、スピン 0 の励起状態にある弦（開弦）が他の種類の弦（閉弦）と混合することによるもので、具体的な計算の結果、質量の 2 乗に 10% の補正があることを見いだした。その結果、共鳴は単純なガウス型の分布からわずかにずれることとなる。この現象を観測するために測定すべき観測量について考察を行った。

4) 仮想カルツァ・クライン粒子の交換過程における新たな問題点（生田目）

素粒子相互作用を記述する 4 次元目以上の空間次元（余剰次元）の存在を仮定する模型では、余剰次元の効果は 3 次元空間を伝播する無限個の素粒子（カルツァ・クライン粒子）列として取り扱う。この研究では、仮想カルツァ・クライン粒子を交換する過程の散乱断面積を余剰次元方向の運動量保存則を陽に破っている模型（Arkani-Hamed-Dimopoulos-Dvali の模型）を用いて求め、それらが非物理的な振る舞いをもつ事を解析的に示した。具体的には、摂動論的に支配的になるであろう過程であるカルツァ・

クライン粒子生成過程の散乱断面積と、その過程に摂動論的に高次の補正を加えた過程（カルツァ・クライン粒子の崩壊先を指定した過程）の散乱断面積を比較し、終状態が2体の場合は後者の散乱断面積が前者の散乱断面積に比べ摂動の効果を超えて小さくなり、終状態が3体以上の場合には後者の散乱断面積が前者の散乱断面積に比べ摂動の効果を超えて大きくなることを明らかにした。

5) T2KK 長基線ニュートリノ実験計画におけるステライルニュートリノの探索の現象論 (安田・生田目)

将来の長基線ニュートリノ実験では、標準的な三世代ニュートリノ混合のパラメーターを精密に決定出来るだけでなく、標準的なシナリオからのずれを測定することにより、新しい物理を探索することも可能であると期待されている。この研究では、標準模型を超える物理により、ステライルニュートリノが存在する場合、現在の T2K 長基線ニュートリノ実験の拡張構想である T2KK 計画で、どの程度までステライルニュートリノ振動のパラメーターを制限できるかを、(3+1)-スキームと呼ばれる枠内で研究した。解析は現在も進行中であるが、これまでの結果によると、T2KK に近距離測定器がない場合には、大気ニュートリノ振動で最大の質量二乗差 Δm_{41}^2 の寄与の度合いを表す角度 θ_{24} に関する感度が従来よりやや改善される程度であることがわかった。

6) 大きな 1-3 角をもつ 3 世代ニュートリノ振動の摂動論 (浅野・南方)

ここ数年前からニュートリノデータの総合的解析から 1-3 角が現在知られている制限 (Chooz limit) と同程度の大きな値をもつことが示唆されてきた。最近 T2K 実験で発見されたミューニュートリノから電子ニュートリノへの転換事象はこの (比較的) 大きな 1-3 角の仮説を支持している。この場合には過去に 1-3 角が小さいという仮定の下でなされた様々の議論を見直す必要がある。長基線ニュートリノ振動実験の理論的解析に有用なニュートリノ振動確率の近似公式として最も良く知られているものとしては、Cervera 達によって導かれたものがある。この公式は 1-3 角が質量二乗差の比 $\simeq 0.03$ と同程度の極小の値をとるという仮定の下で導かれている。1-3 角が大きい場合には、この公式に 1-3 角の高次の補正項が必要になる。これを体系的に計算するために新しい摂動論の枠組みを構築し、この補正項を全てのチャンネルについて求め、この項のもつ性質や解析において果たす役割についての解析を行った。

7) 新物理による最近の MINOS 実験のデータに対する解釈 (安田)

2010 年 6 月の Neutrino2010 の会議で、MINOS 実験のニュートリノと反ニュートリノのデータが、標準的な枠組みでは 2σ で矛盾するという報告があった。大気ニュートリノと太陽ニュートリノ観測の結果と矛盾なくこの事象を説明するには、ニュートリノに非標準的物質効果の電子成分を τ 成分を導入するという可能性と、ステライルニュートリノを加える可能性が考えられる。そこで、それぞれの可能性について、数値計算による詳細な検討を行った。前者に関しては、得られた最善のフィットが、標準的なシナリオの場合と比べて 0.07σ しか改善せず、しかもその最善のフィットを与えるパラメーターは大気ニュートリノのデータから好ましくない領域にあり、MINOS のデータを説明するには至らないことがわかった。一方、後者に関しては、いわゆる (3+1)-スキームの範囲内で、 θ_{24} を 0 とおき、 Δm_{41}^2 を $1eV^2$ に固定してその他のパラメーターに関してフィットした所、標準的な三世代の場合が最善となることがわかった。これは少し前に行われた Nelson たちの結果を正すものである。

8) 非標準的な相互作用の全ての要素が存在する系のニュートリノ振動解析 (南方)

高いエネルギースケールに存在する標準模型を超える新しい物理の反映として、非標準的相互作用 (NSI) の効果をニュートリノ振動を使って探索する可能性が議論されてきた。しかし、これまでの研究では、理論的には同程度の小さい値をとるのが自然な NSI 行列要素の内、特定のもの 1 つ (ないしは 2 つ) 以外は無視できるという勝手な仮定の下に解析が行われてきた。この研究では全ての NSI 要素が存在する系の解析を可能にするコードを開発し、標準および非標準相互作用のパラメーターの感度解析を行う。コー

ド開発は MonteCUBE を元にして、これに適当な変更を加えて成功裏に行われた。現在はこの解析コードに基づいて、ニュートリノ物質中の伝播における非標準的相互作用の効果、標準理論パラメターの決定精度への影響などについての研究を行っている。(マドリッド自治大学 Pilar Coloma 氏、バレンシア大学 Andrea Donini 氏、ダーラム大学 Jacobo Lopez-Pavon 氏との共同研究)

2. 研究業績

1) 論文

E. Dudas, N. Kitazawa and A. Sagnotti, On Climbing Scalars in String Theory, *Physics Letters* **B694** (2010) 80-88.

N. Kitazawa, A Closer Look at String Resonances in Dijet Events at the LHC, *Journal of High Energy Physics* **10** (2010) 051-1-12.

N. Kitazawa, Dynamical Electroweak Symmetry Breaking in String Models with D-branes, *International Journal of Modern Physics* **A25** (2010) 2679-2698.

H. Minakata and S. Uchinami: Parameter Degeneracy in Neutrino Oscillation – Solution Network and Structural Overview, *Journal of High Energy Physics* **04** (2010) 111-1-56.

H. Namatame: A Problem in Virtual Graviton Exchanges in Flat Large Extra Dimensions, *International Journal of Modern Physics A* **25** (2010) 4511-4523.

H. Oki and O. Yasuda: Sensitivity of the T2KK Experiment to the Non-standard Interaction in Propagation, *Physical Review D* **82** (2010) 073009.

2) 国際会議報告

A. Gago, H. Minakata, H. Nunokawa, S. Uchinami, and R. Zukanovich Funchal: Resolving Standard And Nonstandard CP Violation Phases In Neutrino Oscillations, *AIP Conference Proceedings* **1222** (2010) 140.

H. Minakata: Perturbation Theory of Neutrino Oscillations with and without Nonstandard Interactions, *Progress in Particle and Nuclear Physics* **64** (2010) 216-218.

3) 学会講演

国内研究会

● 基所研究会「場の理論と超弦理論の最前線」、京都大学基礎物理学研究所、2010年7月20日－24日
北澤敬章：Tadpole Resummations in String Theory

国際会議

● KEK Workshop on String Phenomenology 2010, Tsukuba, Japan, December 15-16, 2010.

N. Kitazawa: An Overview of D-brane Models

● KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2011), Tsukuba, Japan, March 2-5, 2011.

N. Kitazawa: Low-scale String Models and String Resonances in Dijet Events at the LHC

● Institute for Nuclear Theory Program “Long-Baseline Neutrino Physics and Astrophysics”, Seattle, University of Washington, July 26-August 27, 2010.

H. Minakata: Parameter Degeneracies in Neutrino Oscillations

● 24th International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2010), Megaron Athens International Conference Center, Athens, Greece, June 14 - 19, 2010

O. Yasuda: Some constraints on new physics by atmospheric ν 's (Poster).

● 6th Open Meeting of the Belle II Collaboration, KEK, Tsukuba, Japan, July 5 – 7, 2010

O. Yasuda: Constraints on new physics from neutrinos (Invited talk)

● Neutrino Oscillation Workshop (NOW 2010), Conca Specchiulla, Otranto, Italy, September 4 – 11, 2010

O. Yasuda: Sensitivity of T2KK to non-standard interactions

● 6th Plenary Meeting of the International Design Study for the Neutrino Factory, Rutherford Appleton Laboratory, Didcot, UK, September 22 – 25, 2010

O. Yasuda: MINOS anomaly and non-standard interactions etc.

● 12th International Workshop on the Neutrino Factories, Superbeams, and Beta Beams (NuFact10), Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai, India, October 20 – 25, 2010

O. Yasuda: Some attempts to explain MINOS anomaly (Invited talk)

● A topical conference on elementary particle physics and cosmology (Miami 2010), Lago Mar Resort, Fort Lauderdale, Florida, USA, 14–19 December 2010

O. Yasuda: Constraints on non-standard interactions in neutrino propagation from atmospheric neutrinos and T2KK long-baseline experiment (Invited talk)

4) 著書等

安田修: 「素粒子物理学ハンドブック」山田作衛他編, 朝倉書店 (2010)、2.10 章 ニュートリノ質量、p200 – p208

高エネルギー理論サブグループ

1. 研究活動の概要

近年の WMAP 衛星による宇宙背景放射の非等方性の観測やスローンデジタルスカイサーベイによる銀河の分布の観測等により、宇宙論は詳細な定量的議論が可能な段階に入りつつある。また、計算機の発達に伴い、宇宙の様々な構造がどのように形成されたのかシミュレーションを行うことも可能となった。このような研究の進展を受けて、初期宇宙の進化や構造形成の起源を基礎理論に基づいて説明しようとする試みが進みつつある。

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

＜研究の方法および結果 (ケトフ、渡邊、兼田)＞

平成 22 年、私達は補正重力理論並びに補正超重力理論の枠内でのカオティックインフレーション及びトポロジカルインフレーションの新しいモデルについての研究を続けた。スカラー及びテンソル曲率のゆらぎのスペクトル指数といった宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測可能量について、ネクストリーディングオーダーまでの補正を加えて計算を行った。 $(R+R^4)$ の補正重力モデルでのトポロジカルインフレーションの可能性を排除した。また、近年 S.Ketov によって提唱された $F(R)$ 超重力理論の枠内でのスローロールインフレーションについての研究も行った。

＜研究の方法および結果 (飯干)＞

またこれらに加え、飯干正雄さんが「超弦理論の有効重力作用と Einstein 重力の拡張理論におけるインフレーション解の研究」で、博士課程を取得した。

彼はヘテロティック弦理論から得られる有効理論であるディラトン Einstein-Gauss-Bonnet 重力理論を調べた。この有効理論は、曲率についての 2 次の補正項とディラトン場との非極小結合を含むことが知られているが、これまで用いられてきた座標系では曲率の 1 次の項とディラトン場の間に混合が残存し、結果として Einstein の等価原理 (EEP) を明白に破ることを初めて指摘した。曲率テンソルについての主要次数で EEP が明白に成立する Einstein 座標系を採用することを提案した。また、ディラトン場の運動項が正準な形に変換できることをも明らかにした。これらの研究は Einstein 座標系を一意的に定義し、弦理論に由来する重力理論に対して EEP に基づく物理的解釈が可能であることを明示したものである。

さらに、現象論的な $f(R, \square R)$ 型重力理論に基づく新たなるハイブリッドインフレーションシナリオを提唱した。本研究は、これまで良く研究されてきた $f(R)$ 型重力理論に基づくインフレーションモデルを、 $d'Alembert$ 演算子 \square により拡張するものである。waterfall field と呼ばれる場がインフラトンのポテンシャルの下限を与えるべしという要求に基づき、結果として得られるインフレーションモデルが、Linde によるカオス的インフレーションモデルと類似するものであることを発見した。また、彼のモデルに基づくインフレーション由来の観測量を求め、それらが最新の WMAP7 観測データと一致することも見出した。そして、パラメーター空間への新しい制限も明らかにした。

2. 研究業績

1) 論文

S.V. Ketov, Chaotic inflation in $F(R)$ supergravity, Phys. Lett. B692: 272-276, 2010.

S. Kaneda, S.V. Ketov, N. Watanabe, Slow-roll inflation in $(R+R^4)$ gravity. *Class. Quant. Grav.* 27:145016, 2010.

S. Kaneda, S.V. Ketov, N. Watanabe, Fourth-order gravity as the inflationary model revisited, *Mod. Phys. Lett. A*25: 2753-2762, 2010 (No.32).

M. Iihoshi, Mutated hybrid inflation in $f(R, \Box R)$ -gravity, *JCAP* 1102: 022, 2011.

M. Iihoshi, More on the dilatonic Einstein-Gauss-Bonnet gravity, *Gen. Rel. and Gravity* (2011): DOI: 10.1007/s10714-010-1141-y.

2) 学会講演

国際会議

● International Conference “Quantum Field Theory and Gravity”, Tomsk, Russia, July 2-7, 2010:

S. Ketov, Supergravity and Early Universe.

● International (European) Conference “Beyond the Standard Model”, Bad Honnef, Germany, March 13-17, 2011:

S. Ketov, Inflation in Supergravity.

国際的な活動

S. ケトフは招へい研究者として、2010年10月にドイツ（ミュンヘン）の Max-Planck-Institut fuer Physik 及びフランス（マルセイユ） Aix-Marseille の Mediterranee 大学 Centre de Physique Theorique にて、そして2011年3月にはドイツ（ポツダム）の Albert-Einstein-Institut にて、それぞれ同職の任を務めた。

原子核理論サブグループ

1. 研究活動の概要

1) 原子核の共鳴領域における強度関数のゆらぎの分析

原子核の高励起状態における応答関数（強度関数）は、そのバルクな性質が原子核特有の集団励起の特徴を反映する一方、個別の状態毎の揺らぎは量子系におけるユニバーサルな性質で特徴付けられると予想されている。これら両者の移行過程は、中間的なエネルギー・スケールにおいて現れることが期待される。我々は巨大共鳴領域の励起強度の揺らぎの分析を行い、とくに比較的軽い ^{40}Ca 領域と、重い原子核の典型である ^{208}Pb の強度関数を比較し、その機構の違いをフラクタル次元を利用して分析した結果を論文として出版した。一方ここで用いた分析方法と相補的な手法であるウェーブレット解析の手法が実験家によって用いられている。我々は、この手法を発展させた WTMM 法による研究を昨年度より開始した。ここでは強度関数のウェーブレット変換結果から疑似準位分布を導くことにより、励起エネルギー領域毎のゆらぎのスケールを調べることが可能であり、本年度はとくに巨大共鳴の強度減衰も模型を用いて、共鳴準位の減衰幅と分布関数との関係を調べた。またこの結果と、現実の原子核の模型における計算結果との比較検討を進めている。

2) 極低温原子気体の静的・動的性質の研究

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

a) 等核フェッシュバッハ共鳴による捕獲された多成分ボース・アインシュタイン凝縮体 (BECs) の相分離

2成分 BEC の研究は極低温原子気体研究の当初より実験的・理論的に進められてきたが、最近ではフェッシュバッハ共鳴を利用した分子形成の効果が注目されている。我々はポテンシャルに捕獲された多成分 BECs (2成分原子+フェッシュバッハ分子) における相分離現象の解析を行った。フェッシュバッハ共鳴による相関と全ての粒子間相互作用を含めた模型を利用して、球対称捕獲ポテンシャル下における秩序変数を計算した結果、フェッシュバッハ共鳴が2種類の相分離 (二相構造、三相構造) を引き起こすことがわかった。また、相分離における分子の役割の考察も行い、特に原子領域では、本模型から得られる有効相互作用が系を良く記述することがわかった。

b) ボース・フェルミ (BF) 混合原子気体における複合フェルミ対形成

極低温原子気体の最近の話題として、2成分フェルミ気体において、Feshbach 共鳴を用いて原子間相互作用を調整することによりフェルミ対凝縮を成功させるとともに、長らく電子系で探索されてきた BCS-BEC クロスオーバー現象を実現したことがある。我々は BF 混合気体において、同様な手段により BF 対形成を行う可能性と、その結果得られる BF 多体系の性質について、フランスのグループと共同研究を行ってきた。一様な BF 混合系においてはクーパー型の BF 対形成の問題を扱い、種々の重心運動量を持つ BF 対が順次形成されていくことを示した。これに対し、同様な問題について異なる結論を導く論文が出版されたため、共同研究者とともに反論を出版し、その誤りを指摘した。また1個のクーパー問題でなく BF 系全体の基底状態の変遷を調べるため、以前に考案した正確に解ける模型ハミルトニアンを拡張して分析し、熱力学的極限におけるそのふるまいを求めた。これらの成果をフランスにおける国際会議で発表した。

2. 研究業績

1) 論文

H.Aiba, M.Matsuo, S.Nishizaki and T.Suzuki, Fluctuation properties of the strength function associated with the giant quadrupole resonance in ^{208}Pb , *Phys.Rev.C* **83** (2011) 024314

J.Dukelsky, C.Esebbag, P.Schuck, and T.Suzuki, Comment on “Fermi-Bose Mixtures near Broad Interspecies Feshbach Resonances”, *Phys.Rev.Lett.* **106** (2011) 129601

2) 学会講演

● 日本物理学会「第65回年次大会」 2010年3月20-23日(岡山大学津島キャンパス)

相場浩和、松尾正之、西崎滋、鈴木浩大、鈴木徹：ウェーブレット変換を用いた ^{40}Ca と ^{208}Pb の巨大四重極共鳴強度関数のゆらぎの分析

柴藤亮介、西村拓史、鈴木徹：等核フェッシュバッハ分子による多成分 BEC の相分離 II

● 日本物理学会「2009年秋季大会」 2010年9月23日～9月26日(大阪府立大学中百舌鳥キャンパス)

相場浩和、松尾正之、西崎滋、鈴木浩大、鈴木徹：ウェーブレット変換を用いた ^{40}Ca と ^{208}Pb の巨大四重極共鳴強度関数のゆらぎの分析 II

国内研究会

● 基研研究会「熱場の量子論とその応用」 2010年8月30日～9月1日(京都大学基礎物理学研究所)

柴藤亮介、西村拓史、鈴木徹、等核フェッシュバッハ分子による多成分 BEC の相分離

国際会議

● Shell effect and its application, Erice, Italy, July 25-31, 2010

R. Shibato, T.Nishimura, T. Suzuki: Phase Separation of Multi-Component Bose Einstein Condensations induced by Homonuclear Feshbach Molecules

● Conference on Research Frontiers in Ultra-Cold Atomic and Molecular Gases, Goa, India, Jan 10-14, 2011

R. Shibato, T.Nishimura, T. Suzuki: Phase Separation of Multi-Component Bose Einstein Condensations induced by Homonuclear Feshbach Molecules

● Many-Body Correlations from Dilute to Dense Nuclear Systems, Paris, France, February 15-18, 2011

T. Suzuki: Boson-Fermion Pair Formation in the Mixture of Cold Atomic Gases

3) 学会誌等

柴藤亮介、西村拓史、鈴木徹：等核フェッシュバッハ共鳴による多成分ボーズ凝縮体の相分離, 素粒子論研究 **118** (2011) 207-213

宇宙物理理論サブグループ

1. 研究活動の概要

宇宙理論サブグループでは、高エネルギー天体现象、銀河・銀河団の形成と進化、宇宙プラズマの基礎的物理過程の3つを大きなテーマとして、様々な天体を対象に理論的研究を進めている。2010年度のグループ構成はスタッフ2名、大学院生3名。以下は、2010年度に行った主な研究の概要である。

1) 銀河団ガスの冷却と力学平衡

銀河団は10-1000個の銀河の集団で、宇宙で最大の自己重力系と見なせる構造である。銀河間にはビリアル温度程度の高温ガスが存在しX線を放射している。重力的に緩和した銀河団では中心部のガスの放射冷却時間はHubble時間より短い。圧力の低下を補うように外層部から中心部にガスの流入が起きると考えられるが、以前に提唱されたような大規模なクーリングフローが起きるのでなく、局所的に静水圧平衡が保たれながら緩やかにガスが流入する準静水圧平衡にあると考えられる。このような準静水圧平衡の下で放射冷却するガスの分布について、2009年度に続き研究を行った。冷却前のガスはビリアル平衡のisothermalまたはpolytropeとして扱い、ダークマターの分布としてKingモデルとNFWモデルを用いて冷却ガスの分布を計算した。密度分布の他、圧力分布、熱制動放射を仮定して視線方向に積分したX線輝度分布を計算し、観測されている多数の銀河団の $(\Omega_M, \Omega_\Lambda) = (0.3, 0.7)$ 宇宙の下での密度分布、圧力分布、X線輝度分布(β -model解析)との比較をさらに進めた。

2) 非一様物質と相互作用する超新星残骸の進化

超新星残骸は、爆発で放出された超新星物質と周囲の星間物質との相互作用で生じた衝撃波が、星間物質および超新星物質を加熱し高温プラズマを形成した天体である。基本的に衝撃波の伝播によって記述されシェル様の構造を示す。衝撃波加熱に比べ電子衝突電離のタイムスケールが長いいため、比較的若い超新星残骸では電離平衡に到達せず、電子温度が電離温度(電離度を温度に換算したもの)より高い、電離プラズマ状態(ionizing)にあると考えられてきた。しかし、X線天文学衛星Suzakuによって、再結合連続放射のエッジおよび再結合起源と思われる輝線放射が発見され、再結合プラズマ状態(recombining)にある超新星残骸の存在が明らかになった。これらは何れも、電波の強度分布はシェル様であるがX線は非対称な分布を示すmixed-morphology SNRに分類され、星形成領域でのコア崩壊型超新星と考えられる。再結合状態の起源として、 γ 線バーストなどの爆発時の高エネルギー光子による電離、恒星風物質中で爆発したことによる衝撃波のブレイクアウトが考えられる。後者の可能性を想定して、非一様な恒星風物質中で爆発した残骸の進化を3次元流体計算によって追い、衝撃波のブレイクアウトや再結合状態、X線輝度分布などについて研究を行った。

3) 銀河団と宇宙論

銀河団高温プラズマのX線観測と電波観測を組み合わせることで、宇宙の膨張率であるハッブル定数を求めることがよく行われている。高温プラズマの温度の較正がどの程度、最終結果に影響するのか詳細な議論を行った。

2. 研究業績

1) 論文

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

A. Hoshino, J.P. Henry, K. Sato, H. Akamatsu, W. Yokota, S. Sasaki, Y. Ishisaki, T. Ohashi, M. Bautz, Y. Fukazawa, N. Kawano, A. Furuzawa, K. Hayashida, T. Tawa, J. Hughes, M. Kokubun, and T. Tamura: X-ray Temperature and Mass Measurements to the Virial Radius of Abell 1413 with Suzaku, *Publ.Astron.Soc.Japan***62**2010 371–389

Erik. D. Reese, Hajime Kawahara, Tetsu Kitayama, Naomi Ota, Shin Sasaki, Yasushi Suto: Impact of Chandra Calibration Uncertainties on Galaxy Cluster Temperatures: Application to the Hubble Constant, *Astrophys.J.* **721**2010 653–669

2) 国際会議報告

T. Ohnishi, K. Koyama, T.G. Tsuru, K. Masai, H. Yamaguchi, M. Ozawa: Discovery of Strong Radiative Recombination Continua from the Supernova Remnant G359.1-0.5, *OMEG2010*, AIP Conf. Proc. **1269** (2010) 463–465

3) 学会講演

● 日本天文学会 2010 年春季年会 2010 年 3 月 24–27 日 (広島大学)

小澤碧, 小山勝二, 鶴剛, 松本浩典, 山口弘悦, 玉川徹, 政井邦昭: 超新星残骸 W49B からの異常に強い鉄の再結合構造の発見とその空間分布

大西隆雄, 小澤碧, 松本浩典, 鶴剛, 小山勝二, 山口弘悦, 政井邦昭: 「すざく」による超新星残骸 G359.1-0.5 からの放射性再結合連続 X 線の発見

● 日本天文学会 2010 年秋季年会 2010 年 9 月 22–24 日 (金沢大学)

澤田真理, 大西隆雄, 小山勝二, 山口弘悦, 政井邦昭: すざく衛星による再結合優勢な超新星残骸の探査 I – W44 と W28

国内研究会

● HEAP2010 高エネルギー宇宙物理学研究会, 高エネルギー物理学研究所 (KEK), 2010 年 10 月 13–16 日

政井邦昭: 再結合放射 SNR と GRB remnants – W49B (G43.3-0.2) をめぐって –

非線形物理サブグループ

1. 研究活動の概要

1) 動的トンネル効果における自然境界の役割

混合位相空間中の可積分領域とカオス領域とは複素領域において一般に自然境界をもって接すると考えられている。ここでは、自然境界が混合位相空間上の量子トンネル効果に果たす役割を知るために、単純位相空間をもつ区分線型写像の系の複素拡張を考え、その自然境界の性質を調べた。自然境界近傍では複素領域内においても実領域同様の淀み運動が起こることが見出されたが、これは一般の系において数値的に観察されていた事実と整合するもので、今後の理論構築の手がかりになることが期待される。また、自然境界を擬拡張したものと実面と不安定周期点の複素安定多様体との交点を求め、トンネル遷移をもっとも支配する複素軌道の同定を行った。

2) 混合系におけるフラクタルワイル則

フラクタルワイル則と呼ばれる、開いた量子系の共鳴状態に対する統計則を混合開放量子系へ拡張することを試みた。束縛状態をもつ閉じた量子系に対して成り立つ、いわゆるワイル則とは、系の平均累積状態数の増大度が系の次元によって決まることを主張するものである。一方、近年、開いた量子系に対しても、長寿命をもつ共鳴状態の個数に対してフラクタルワイル則と呼ばれる類似の統計則が成立することがわかってきた。ここでは、フラクタルワイル則が成立することが確認された双曲系ではなく、安定領域 (KAM トラスなど) とカオス領域とが位相空間に混在する混合系に対するフラクタルワイル則の定式化を行い、その妥当性を区分線型写像に関して検証した。

3) ケプラー写像における動的トンネル確率の異常増大

理想モデルに対して前年度見出された、アンダーソン転移に誘起された動的トンネル効果の異常増大がケプラー写像と呼ばれる振動電場中のイオン化過程を記述するミニマルなモデルにおいても同様に現れることを数値的に確認した。トンネル確率の増大はイオン化確率の増大をもたらす。このことにより、多自由度系における動的トンネル効果の異常増大は系の詳細に寄らず、実験的にも検証可能な普遍的なものであることが示唆された。

4) 双曲空間上におけるガラス動力学の Lyapunov-mode 解析

ガラス転移点近傍の過冷却液体における異常な粘性率の増加は、物理学の未解決問題の一つである。特に、力学系理論からガラス動力学を眺めるとその遅い緩和の発現は自明ではない。ここでは、定負曲率面上を運動する多粒子系のリアプノフスペクトルを調べることにより、長時間の構造緩和に関わる遅い運動の起源を力学系理論の観点から検討した。特に、低次のリアプノフスペクトルでは運動量の成分が支配的であり、高次になるほど相対的に位置の成分が大きくなること、また異なる時刻間でのリアプノフベクトルの相関は低次の Lyapunov ベクトルの方がより強く、高次になるほど弱まることが見出された。

5) 3 準位非断熱遷移におけるストークス幾何について

多準位の非断熱遷移の問題を完全 WKB 解析の観点から考察した。とくに、Landau-Zener のモデルを拡張した多準位非断熱遷移モデルにおける新しいストークス線の役割について以下の 2 つの可能性について検討した：(1) 新しいストークス線上の接続が必ず起こる可能性、(2) 新しいストークス線上の接続を避けることはできるものの、そのための接続経路に新しいストークス線の情報を必要とする可能性。(1) については、非摂動項が時間に関して多項式で与えられる系について調べた範囲ではその存在を確認できなかった。しかしながら、ストークス幾何の局所的な拘束条件のみからはその非存在性を排除する

ことができないこともわかった(その後、実際、数理解析研究所のグループによって発見された)。(2)については、適当な条件下で実際に現れることを確認した。以上の事実は、新しいストークス線が多準位非断熱遷移の遷移確率の計算になくしてはならないものであることを強く示唆するものであるが、定量的な考察は今後の計算の結果を待つ必要がある。

6) 全のアンホロノミー (新奇的量子ホロノミー) : **Aharonov-Bohm** リングと多キュービット系にて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、そこに幾何学的位相 (Berry 位相) が伴うことが良く知られている。一方、全のアンホロノミー (新奇的量子ホロノミーとも呼ばれる) を持つ系では、パラメータに対して周期的な依存性を持つ Hamiltonian の固有値 (固有エネルギー) が、そのパラメータの周期性に従わない (Cheon 1998)。このため、固有値の縮退が無い (つまり、Wilczek-Zee の幾何学的位相が発現し得ない) 場合においてすら、上述と同様の時間発展では、驚くべきことに、始状態と終状態は直交する。全のアンホロノミーは、幾何学的位相がそうであるように、量子物理の基礎概念として様々な場面に顔を出すことが期待される。本年度は、全のアンホロノミーの具体例を増やした。

Aharonov-Bohm リング : 一次元の輪に拘束された荷電粒子のエネルギースペクトル全体が、輪を貫く磁束に対して周期的に振舞うことは良く知られているが、この周期性と全のアンホロノミーの関係は不明瞭であった。これは、固有状態が電磁場のゲージに依存するためである。波動関数が一価となるようなゲージ下では、固有空間のアンホロノミーは起きないために、既知のアンホロノミーの統一的な定式化が無効である一方で、物理量の期待値ではアンホロノミーが起きる。また、波動関数が準周期境界条件を満たすゲージでは、既知のアンホロノミーの統一的な定式化が適用可能である。本研究は全教授 (高知工科大) との共同研究による成果である。

多キュービット上の量子回路 : 量子回路を大きさを、Born-Oppenheimer 類似の階層的関係を課しつつ増やすことで、全のアンホロノミーを持つ系の系統的な構築法を得た。このことから、量子系の断熱経路の構成における素材としての全のアンホロノミーの価値が増したと考えられる。本研究は、全教授 (高知工科大) および Kim 准教授 (Pusan Nat. Univ.) との共同研究による成果である。

2. 研究業績

1) 論文

Akiyuki Ishikawa, Atushi Tanaka and Akira Shudo: Dynamical Tunneling in Many-Dimensional Chaotic Systems, *Phys. Rev. Lett.* **104** (2010) 224102 (4pages)

Atushi Tanaka and Taksu Cheon: Quantum anholonomies in time-dependent Aharonov-Bohm rings, *Phys. Rev. A* **82** (2010) 022104 (6pages)

Sang Wook Kim, Taksu Cheon and Atushi Tanaka: Exotic quantum holonomy induced by degeneracy hidden in complex parameter space, *Phys. Lett. A* **374** (2010) 1958–1961

2) 学会講演

● 日本物理学会 第 65 回年次大会 2010 年 3 月 20 日～3 月 23 日 (岡山大学津島キャンパス)

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

● 日本物理学会 2010 年秋季大会 2010 年 9 月 23 日～9 月 26 日 (大阪府立大学中百下鳥キャンパス)

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

花田康高, 首藤啓, 池田研介: ケプラー写像における 動的トンネルと局在の効果

石井昭裕, 首藤啓: 開いた混合系におけるフラクタルワイル則

田中篤司, 全卓樹, Sang Wook Kim: 多準位系での固有値・固有空間のアンホロノミーの階層的構成

国内研究会

● 第5回ハミルトン力学系セミナー 2011年2月18日(京都大学)

首藤 啓: 複素力学系と高次元トンネル効果における転移現象

● 量子科学における双対性とスケール、京都大学基礎物理学研究所、2010年11月4-6日

田中篤司, 全卓樹, Sang Wook Kim: 固有値・固有空間のアンホロノミーの階層的構成 (口頭)

国際会議

● Tunneling Day, Lewiner Institute for Theoretical Physics, Haifa, Israel, May 9-11, 2010

A. Shudo: Julia sets and chaotic tunneling (3 lectures, invited)

● International School of Solid State Physics (50th Course) at the Ettore Majorana Foundation and Center for Scientific Culture, Erice (Sicily), Italy July 25- July 30, 2010

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

● International Workshop on Merged-Beam Experiments and 2nd TMU/SNU Joint Seminar on Nano-Science and Related Topics, Tokyo Metropolitan University, August 25-August 27, 2010

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

● The 13th Slovenia-Japan seminar on nonlinear science and Waseda AICS symposium on nonlinear and nonequilibrium phenomena in complex systems, Waseda University, November 4-6, 2010

A. Shudo: Interior and exterior problem in quantum billiards

A. Akaishi, M. Hirata, K. Yamamoto, and A. Shudo: The meeting time distribution in dynamical systems

A. Ishii and A. Shudo: Weyl law for an open piecewise linear map

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

● RIMS workshop on "Exponential asymptotics and virtual turning points", RIMS Kyoto University, March 9 - March 11, 2011

A. Shudo: A role of new Stokes curves and virtual turning points in multilevel non-adiabatic transition problems (invited)

3) 著書等

首藤 啓：「古典と量子の間」岩波講座 物理の世界（岩波書店 2011）

Akira Shudo and Kensuke S. Ikeda: Complex semiclassical approach to chaotic tunneling, in *Dynamical Tunneling* edited by Srihari Keshavamurthy and Peter Schlagheck (CRC Press, 2011) Chapter 7, pp.139-176.

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。2010年度における研究活動の概要は次の通りである。

1) 一般化 XY モデルの相転移

2次元 XY モデルは準長距離秩序を示す Kosterlitz-Thouless(KT) 転移を起こすが、一般化モデルの相転移について、ハイブリッドモンテカルロ法とエネルギー状態密度を直接測定する Wang-Landau 法を用い、精密に調べた。一般化パラメータ q の値によらず KT 転移を示すこと、さらに転移温度によらない有限サイズスケール解析を行い、KT 転移のユニバーサリティーを示し、公表した。すると、 q が大きい場合に 1 次転移となることを厳密に示したとのコメントが寄せられたが、それに対し、その証明は q が無限大の取り扱いによるものであるとの返答を行い、さらなる研究を進めている。[岡部]

2) モンテカルロ法の画像処理問題への応用

Mumford-Shah エネルギー汎関数による画像領域分割問題について、モンテカルロ法により低エネルギー解を安定して探索する方法を公表した。さらに、グラフカット法、レベルセット法との比較を行った。レベルセット法は、画像領域分割問題の解法として先駆的な方法であったが、その後進展したグラフカット法と比べると計算時間がかかる。グラフカット法は 2 値分割の場合には厳密で計算時間も短い、多値分割の場合には、ブロックスピン変換などの工夫をこらしたモンテカルロ法が、計算時間の面でグラフカット法と同程度となる。さらに、モンテカルロ法は、初期状態の選択によらず安定した解が得られる利点があることを示した。[岡部]

3) スピン輸送現象とエレクトロニクスとの統合の理論

スピントロニクスの重要な課題はスピン流の制御である。スピン流生成現象に関しては、スピン蓄積を用いたスピン注入、磁化ダイナミクスを用いたスピンプンピング効果、温度勾配を用いたスピン流生成の現象に関して、微視的な解析を進めた。その結果、スピン化学ポテンシャルの微視的な表式を得るなど、現象の物理的理論的理解を進めた。結果として、スピンプンピング効果は、磁化ダイナミクスがある一定の普遍性に基づきスピン流を生成するという現象ではなく、スピン軌道相互作用の詳細に依存するような現象であることも明らかになった。そうした点で、スピントロニクス現象をスピンの輸送としてみたばあい、電磁気学の普遍的法則にしたがっておきている電荷の輸送現象とは、物理現象としての意味が全く異なっている。このことはスピントロニクス現象の、スピン流による解釈の限界も示している。スピン流の測定に関しては、電氣的な検出を用いる逆スピンホール効果の解析を行った。その結果、逆スピンホール効果はスピン流を電流に変換しているという従来の描像は、近似的、現象論的なもので、物理的には正当性がないものであることがわかった。それらの研究成果を統合して考えると、スピンプンピングと逆スピンホール効果を組み合わせた現象は、磁化の運動がスピン流を生成しそれが電流に変化されているという見方よりは、むしろそれはモノポールを生成し、そのモノポールがアンペール則により電流を発生しているとみると、非常にすっきりした理解ができることもわかった。しかもこの場合の理論は、電磁気学の体系とスピン輸送現象が既存の理論の枠内でうまく融合した体系となっている。新種のモノポールの発見というこの研究成果により、スピン輸送現象の理解と発展の新たな可能性も見出されたことになる。[多々良]

4) 重希土類化合物の磁性の微視的理論研究

Yb³⁺には f 電子が 13 個あるので f ホールが 1 個、Tm³⁺には f 電子が 12 個あるので f ホールが 2 個となる。ナイーブに電子ホール対称性を考えれば、Yb 化合物や Tm 化合物において、Ce 化合物や Pr 化合物と似たような振る舞いが期待される。たとえば、Ce 系と同様に、Yb 系でも次々と超伝導が見つかってよさそうである。しかし、実際には Yb 系重い電子超伝導は極めて少なく、最近になって漸く、超伝導転移温度 $T_c=80\text{mK}$ の $\beta\text{-YbAlB}_4$ が発見された。Tm 系の超伝導もあまり知られていないが、Tm₅Rh₆Sn₁₈ において $T_c=2.2\text{K}$ の超伝導が発見されている。このような重希土類化合物の磁性や超伝導を、量子臨界現象の概念で理解するとしても、電子ホール対称性に基づいて単純に Ce 系や Pr 系との対比で考えるわけにはいかないように思われる。そこで本研究では、重希土類化合物の量子臨界現象を微視的観点から議論できるように、 j - j 結合描像に基づいて、重希土類化合物に対するミクロなモデルの構築方法を開発した。 f ホールが 1 個、2 個、... という場合を考えるので、 $j=7/2$ の状態に電子を詰めることになるが、対称性を考慮して結晶場ポテンシャルとクーロン相互作用を求め、有効局所ハミルトニアンを構成する。この j - j 結合モデルは、スピン軌道相互作用が現実的な値のときでも、7 軌道モデルの局所 f 電子状態をよく再現する。得られた微視モデルの妥当性の確認と応用の一例として、 j - j 結合描像を用いて構成したアンダーソンモデルを数値繰り込み群法によって解析し、Yb 系や Tm 系充填スクッテルダイト化合物の多極子状態を議論した。7 軌道アンダーソンモデルの解析結果と比較することにより、多 f 電子系の多極子状態のような波動関数に関する情報も、 j - j 結合描像で比較的良く再現されることを明らかにした。[堀田]

5) 電子・ラットリング系の超伝導の理論

近年、充填スクッテルダイト化合物や β パイロクロア酸化物、クラスレート化合物など、いわゆるカゴ状物質の磁性や超伝導現象が精力的に研究されている。これらの物質の特徴は、比較的軽い元素でできたカゴの中に別のイオン（ゲストイオン）が内包されていて、そのゲストイオンが振幅の大きな非調和振動をすることである。この振動は「ラットリング」と呼ばれ、磁場に鈍感な非磁性近藤効果の発現、超伝導転移温度の増大、さらには熱電変換効率の上昇などに重要な役割を果たしていると考えられている。本研究では、カゴ状物質に特徴的なラットリングによる電子の有効質量の増大と超伝導転移温度の上昇の可能性を調べた。非調和性の影響を考慮したホルスタイン模型において、フォノンのエネルギー ω が電子のバンド幅よりも十分小さい断熱近似の範囲で電子フォノン結合定数の 2 次摂動で電子の自己エネルギーを計算し、そこから電子の質量増強因子を見積もった。その結果、 ω がゼロ点振動エネルギー程度で、大きな振幅をもって振動する場合に、電子の質量増強因子が大きく増大することを見いだした。さらに、Eliashberg 方程式を解くことによって超伝導転移温度を計算し、非調和性の増大によってゲストイオンに対するポテンシャルの底が平らで幅が広がると、系が弱結合から強結合状態に移り変わり、質量増強因子が増大するとともに超伝導転移温度が上昇することを見出した。さらに非調和性が強くなって二重井戸型ポテンシャルに近くなると、質量増強因子が大きくなりすぎるために超伝導転移温度は抑制される。このようにして、ポテンシャルの底が平らで幅が広がるラットリング振動の状況において、超伝導転移温度が最大となることを示した。なお、本研究は大学院生の大柴邦洋君との共同研究である。[堀田]

6) フェルミ原子存在下のボーズ原子の特異な振る舞い

磁場やレーザーにより原子を閉じ込める技術が確立して以来、さまざまな極低温量子凝縮系が作成されてきた。とくにボーズ原子とフェルミ原子の混合系は、異なる量子統計に従う粒子の集まった系として、特異な振る舞いが期待されている。レーザーの定在波により準周期ポテンシャルやランダムポテンシャルも作成可能となってきたことから、局在問題に大きな注目が集まっている。そこで、解析手法および

数値手法の開発を基礎とした、光学格子上に閉じ込められたボーズ・フェルミ混合原子系が示す局在状態の成立条件の解析を行った。

とくに、光学格子上の混合原子系に特化した数値手法を開発する目的で、従来の量子モンテカルロシミュレーションの技法をボーズ・フェルミ混合系に拡張し、効率をよいコードを作成した。このコードに基づき、とくにランダムポテンシャルや準周期ポテンシャル中でボーズ・フェルミ混合系が示す特徴的な振る舞いについて、シミュレーションによりその存在を指摘し、メカニズムを議論した。

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

斥力相互作用の場合は、互いの粒子の存在により、局在が抑制され、金属状態（超流動状態）が実現された。たとえばボーズ粒子で局在状態を作り、そこにフェルミ粒子を導入することで、局在による絶縁体状態から超流動状態への転移が見られた。

一方、引力相互作用の場合は、ボーズ粒子とフェルミ粒子がともに局在するために相互作用を印加すると局在効果が強まるが、ある程度の強さの相互作用になると、新たなメカニズムにより非局在化が起きる。この新たに発見された非局在化のメカニズムについて数値シミュレーションにより明らかにするとともに、統計の異なる2種の粒子を混合させることによる単一種粒子と異なる物性について考察を行った。[森]

7) 磁場中イジングパイロクロア磁性体の有効模型に関する考察

四面体がコーナーを共有しながら形成する三次元的ネットワークの一例としてパイロクロア格子がある。Dy や Ho を含む化合物のなかに磁気異方性やスピン間相互作用の帰結であるアイスルールを各四面体で満たす所謂スピナイスと呼ばれる磁性体が知られている。[111] から見た格子は三角格子とカゴメ格子が交互にスタックした構造をとるが、この方向に磁場を掛けて行くと飽和磁化の $2/3$ で磁化プラトーが出現する。そこでは三角格子上のスピンは磁化されているがカゴメ格子上のスピンは残留エントロピーを持つとされており、所謂カゴメアイスと呼ばれる二次元臨界系が実現されていると考えられている。同アイスのスピン配置と六角格子ダイマー模型のダイマー配置とが等価であることが指摘されているが、実際には強磁場、有限温度において現われるアイスルール破れを表わす磁気単極子の励起が重要と考えられている。我々はアイスルール破れを含むカゴメアイスの性質を短距離相互作用をもつ六角格子モノマーダイマー混合系を用いて調べた。モノマー密度が低い領域では二次元双対サインゴールドン場の理論を用いた記述が可能であるが、それによると弱相関ではモノマードーピングの効果はレバントであり短距離相関をもつ無秩序相が安定化される。一方引力量が強い領域では磁気的秩序に対応したコラムナ相が安定化される。これら二つの相間の転移は共形場理論のユニタリ離散系列の M_5 に対応した固定点で支配されていると予想される。一方、モノマー密度が低くない領域では六角格子のもつ対称性から三状態ポッツ格子ガス模型の理論が適用可能であると予想される。ニーハウスの議論より上記 M_5 の固定点はユニタリ離散系列の別のモデルである M_6 に対する least relevant operator による摂動の結果として現われていると考えることができる。我々はこれら2つの有効理論を組み合わせることでモノマーダイマー混合系の全パラメータ領域にてくりこみ群フローを予測し、相転移の普遍性クラスを予言した。更に転送行列の固有値解析を数値的に行うことによりこれら理論予想を定量的に確かめることに成功した。尚、これに関連した論文を出版準備中である。[大塚]

2. 研究業績

1) 論文

M. Iwamatsu and Y. Okabe: Stability of critical bubble in stretched fluid of square-gradient density-functional model with triple-parabolic free energy, J. Chem. Phys. **133** (2010) 0444706-(1-8).

J. Yamamoto and Y. Okabe: Ab initio molecular dynamics simulation on SiN + CH and SiC + NH reactions, Comput. Theor. Chem. **963** (2011) 24-33.

Y. Komura and Y. Okabe: Phase transition of a two-dimensional generalized XY model, J. Phys. A: Math. Theor. **44** (2011) 015002 (12pp).

H. Watanabe, S. Sashida, Y. Okabe and H. K. Lee: Monte Carlo methods for optimizing the piecewise constant Mumford-Shah segmentation model, New J. Phys. **13** (2011) 023004 (14pp).

J. Yamamoto: Ab initio molecular dynamics simulation on H₂O+C⁺ reaction, J. Mol. Struct. THEOCHEM. **957** (2010) 55-60.

Ka Shen, Gen Tatara and Ming-Wei Wu, Existence of vertical spin stiffness in Landau-Lifshitz-Gilbert equation in ferromagnetic semiconductors, Phys. Rev. B **83**, 085203-(1-7) (2011).

Yuu Takezoe, Kazuhiro Hosono, Akihito Takeuchi and Gen Tatara, Theory of spin transport induced by a temperature gradient, Phys. Rev. B **82**, 094451-(1-9) (2010).

Ka Shen, Gen Tatara and Ming-Wei Wu, Effect of spin-conserving scattering on Gilbert damping in ferromagnetic semiconductors, Phys. Rev. B **81**, 193201 (1-4) (2010).

Noriyuki Nakabayashi, Akihito Takeuchi, Kazuhiro Hosono, Katsuhisa Taguchi, Gen Tatara, Theory of spin relaxation torque in metallic ferromagnets, Phys. Rev. B **82**, 014403 (1-10) (2010).

Current-driven domain wall motion across a wide temperature range in a (Ga,Mn)(As,P) device, Wang, K. Y.; Edmonds, K. W.; Irvine, A. C.; Tatara, G.; Ranieri, E. D.; Wunderlich, J.; Olejnik, K.; Rushforth, A. W.; Champion, R. P.; Williams, D. A.; Foxon, C. T. and Gallagher, B. L. , Appl. Phys. Lett. **97**, 262102-(1-3) (2010).

T. Hotta: Construction of a Microscopic Model for Yb and Tm Compounds on the Basis of a j - j Coupling Scheme, J. Phys. Soc. Jpn. **79** (2010) 094705.

2) 学会講演

●日本物理学会第 65 回年次大会 2010 年 3 月 20 日～3 月 23 日 (岡山大学津島キャンパス)

佐次田哲, 岡部豊: モンテカルロ法による Mumford-Shah エネルギー汎関数を用いた画像修復

堀田貴嗣: ウラン化合物における二重交換機構による強磁性発現と軌道揺らぎ超伝導

大塚博巳: 相互作用を持つ六角格子上ダイマー模型の相構造

●日本物理学会 2010 年秋季大会 2010 年 9 月 23 日～9 月 26 日 (大阪府立大学中百舌鳥キャンパス)

竹内祥人、多々良源: スピン軌道相互作用が起こすスピン流のホール効果

田口勝久、多々良源：スピン構造に伴うスピングージ場とマグノン輸送理論

田口勝久、多々良源：逆ファラデー効果による光誘起磁化・スピン流の微視的理論

堀田貴嗣：近藤効果の新展開：電子とラットリングの新たな出会い（シンポジウム講演）

堀田貴嗣： j - j 結合描像に基づく Yb 系および Tm 系化合物の微視的模型の構築と多極子状態の考察

大柴邦洋、堀田貴嗣：非調和格子振動による電子の繰り込み因子の増大

大塚博巳：六角格子上モノマーダイマー混合系の相構造

国内研究会

●日本磁気学会 第 175 回研究会「ナノ構造物質の電磁気学」 2010 年 12 月 17 日（中央大学）

多々良源：スピントロニクスにおける電磁気学：再考が必要か？

●奈良先端大学院大学未来開拓コロキウム 2010 年 12 月 9 日-11 日

多々良源：スピン輸送現象と電磁気学

●新学術ワークショップ「Yb 系重い電子化合物における電子状態と新しい物性」姫路市姫路商工会議所，2011 年 1 月 8 日

堀田貴嗣： f 電子系の磁性と超伝導の微視的理解を目指して（招待講演）

国際会議

●ARL forum "Future and Application of Spintronics", Hatoyama, Japan November 5, 2010

Gen Tatara, Spin relaxation in spin transport driven by electric field and temperature gradient (invited)

●SPIE NanoScience + Engineering Symposium, Spintronics III, San Diego, US, August 1, 2010

Gen Tatara, Spin relaxation torque and spin transport in metallic ferromagnets (invited)

●The 6th International Conference on the Physics and Applications of Spin Related Phenomena in Semiconductors (PASPS-VI), Tokyo, Japan, August 1, 2010

Nakabayashi, A. Takeuchi, K. Hosono, K. Taguchi, and G. Tatara, Spin current driven by magnetization dynamics in Rashba systems

●The International Conference on Frustrated Spin Systems, Cold Atoms and Nanomaterials, Hanoi, Vietnam, July 14 - 16, 2010

Gen Tatara, Spin transports induced by dynamic spin textures (invited)

●International Workshop on Merged-Beam Experiments and 2nd TMU/SNU Joint Seminar on Nano-Science and Related Topics, Minami-Osawa, Tokyo Metropolitan University, August 27, 2010.

Kunihiro Oshiba and Takashi Hotta: Electron mass enhancement due to anharmonic local phonons

●International Conference on Heavy Electrons (ICHE2010), Minami-Osawa, Tokyo Metropolitan University, September 19, 2010.

Kunihiro Oshiba and Takashi Hotta: Electron mass enhancement due to anharmonic local phonons

●1st ASRC International Workshop “New approach to the exotic phases of actinides compounds under unconventional experimental conditions”, February 18, 2011.

Takashi Hotta: Magnetism in Actinide Dioxides (Invited)

●22nd International Conference on Atomic Physics, Cairns, Australia, July 28, 2010.

Akiko Masaki and Hiroyuki Mori: Mott Transition of Bose-Fermi Mixtures in Optical Lattices Induced by Attractive Interactions

●Macroscopic Quantum Control Conference on Ultracold Atoms and Molecules, Tokyo University, January 25, 2011.

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

●Conference Computational Physics 2010 (CCP2010), Trondheim, Norway, June 23-26 2010.

Hiromi Otsuka: Phase transitions in square-lattice dimer model with anisotropic interactions

3) 著書等

森弘之：“理系英語マラソン基礎コース Input Lab,” アルク (2010) (翻訳、部分作成)

高エネルギー実験サブグループ

1. 研究活動の概要

高エネルギー実験サブグループでは、日本が世界をリードしている B ファクトリーにおける、粒子・反粒子対称性の破れの研究を始めとする高エネルギー衝突型加速器実験の他、原子炉を用いたニュートリノ振動実験、宇宙から飛来する高エネルギーのニュートリノ検出実験などの幅広い物理実験を展開している。

1) B ファクトリー実験 (Belle)

KEKB 加速器は 1999 年 6 月から運転を開始し、2010 年 6 月 30 日に 11 年の長期に亘る運転を終了した。その間に世界最高のピークルミノシティー、 $2.11 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$ を達成すると共に、積分ルミノシティーでは 1040fb^{-1} を蓄積し念願であった 1ab^{-1} を超えた。

Belle 実験は B 中間子系における CP 対称性の破れの発見、B 中間子の様々な崩壊過程による CP 対称性の検証、B 中間子の崩壊過程における多くの新しい共鳴状態の発見、 τ 粒子の稀崩壊事象の観測によるレプトン数非保存過程の探索、2 光子過程での新しい共鳴状態の発見など、数々の成果を挙げてきた。今後も蓄積されたデータを用いての物理解析は継続される。

今年度から始まった KEKB 加速器の 50 倍のルミノシティーを目指す super-KEKB の建設に呼応して、Belle 検出器の upgrade 版である Belle-II 検出器の建設が始まった。

当研究室ではこれまでの粒子識別装置を改善するために、エアロゲルを輻射体としたリングイメージチェレンコフ検出器 (A-RICH) の開発を進めている。

A-RICH 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が、Belle-II 実験では中性子の照射量が $10^{11} / \text{cm}^2 / \text{year}$ 以上におよぶことから HAPD の中性子損傷が懸念されている。そのために東京大学の研究用原子炉「弥生」(茨城県東海村) を用いて APD と HAPD の中性子損傷試験を行った。その結果、APD の p 層を薄くすることで、HAPD の中性子損傷が緩和されることがわかった。また、中性子損傷によるリーク電流の増加に対しては、整形回路の時定数を短くすることで対応できることがわかった。

HAPD からの信号読み出しに使用される ASIC の開発は本研究室が担当しているが、整形回路の時定数を改良した SA03 の作成に向けた作業を開始した。

今年度は Belle 実験で 21 編の欧文雑誌への投稿論文が出版された。

2) Double Chooz 実験

ニュートリノ振動実験パラメータ θ_{13} 角を測定するために、フランスの Chooz 原子力発電所を用いたニュートリノ振動実験グループ Double Chooz に参加している。当研究室は新潟大学・東北大学・神戸大学・東京工業大学などと協力して、Double-Chooz 実験でニュートリノ反応を検出するために最も重要となる、光電子増倍管 (PMT)、高電圧電源システム及びオンラインシステムを担当している。

2010 年夏には、これらのシステムの動作が確認された。2010 年 12 月には液体シンチレーターが容器に満たされ、実験開始に向けた試験的なデータ収集が開始された。宇宙線に起因する中性子が液体シンチレーター中の陽子とガドリニウムによって捕獲され、その終状態で生成される γ 線が観測されるなど検出器が期待通りに稼動していることが確認されている。

2011 年の夏までには Double-Chooz 実験の前身である Chooz 実験の上限値を超える結果が出せると期待されている。

3) DCBA 実験

ニュートリノ振動実験によりニュートリノに質量があることが判明した現在、ニュートリノが Majorana 粒子である可能性が益々大きくなっている。もし、ニュートリノが Majorana 粒子であるなら、ニュートリノを放出しない二重 β 崩壊事象 ($0\nu\beta\beta$) が観測されるはずである。この $0\nu\beta\beta$ 事象を、ドリフトチェンバー (DC) を利用して観測することを目指している DCBA 実験グループ (KEK、静岡大などとの共同実験) に参加している。

DCBA-T2 と呼ばれる常伝導電磁石と DC を組み合わせたスペクトロメーターで、二重ベータ崩壊を起こす ^{100}Mo を 9.6% 含んだ Mo 板から複数の 2 電子崩壊事象を検出した。今年度は収集されたデータ解析を精力的に継続した。得られた $2\nu\beta\beta$ 事象の数から計算された半減期は約 3×10^{18} 年となり、バックグラウンドが含まれているために若干短くなっているが、NEMO 実験結果 9×10^{18} 年と誤差の範囲で矛盾しないものであった。

現在、より高いエネルギー分解能を目指して超伝導電磁石を用いた大型の DCBA-T3 検出器の製作が始まっており、超伝導電磁石の磁場測定を行った結果検出器の設置される領域で 0.5% 以内の一様性が確認された。

4) 岩塩を用いた超高エネルギーニュートリノ観測のための基礎研究

超高エネルギーニュートリノ ($> 10^{16}\text{eV}$) は、宇宙空間で超高エネルギー宇宙線と宇宙背景輻射との衝突で生成される。飛来数が $1/\text{day} \cdot \text{km}^2$ と低いため、50Gton (体積 $3 \times 3 \times 3\text{km}^3$) の検出媒質が必要となる。巨大天然岩塩鉱中での超高エネルギーニュートリノ反応で惹起されたハドロンシャワー及び電磁シャワーを捉える方法として、我々の発見した電波反射効果を利用する研究を行なった。

日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所の 2MeV 電子ビームを照射した 435MHz 岩塩充填導波管及び同軸管からの電波電力反射率は、電子の加速電圧 \times 電流即ち照射エネルギーの 2 乗に比例して増加し、 10^{19}eV のエネルギーに対して 10^{-6} の反射率が得られた。我々が開発した試料挿入孔封鎖型摂動空洞共振器法で測定した岩塩電波減衰長からニュートリノエネルギー 10^{19}eV のシャワーサイズからの反射測定に適した 100MHz において探索距離はフェーズドアレイレーダーを利用して 1km が可能となる。

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

CERN の 24GeV 陽子シンクロトロン陽子ビームをターゲットへ衝突させ、その時発生する $\pi^+\pi^-$ 原子と共に π^+K^- 及び π^-K^+ 原子の寿命測定を行った。更に次年度測定する長寿命 $\pi^+\pi^-$ 原子の測定用の永久磁石の製作と磁場測定を行った。

6) ポジトロニウムの 4 光子、5 光子崩壊過程の研究

未だ検証されていない 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 5 光子稀崩壊現象のデータ取得を行った。実験データの解析から 5 光子消滅反応事象の候補を見つけた。

2. 研究業績

1) 論文

Search for Lepton Flavor Violating Tau Decays into Three Leptons with 719 Million Produced $\tau^+\tau^-$ Pairs.

Belle Collaboration (K. Hayasaka *et al.*). Phys.Lett.B687 (2010) 139-143.

Evidence for direct CP violation in the decay $B^\pm \rightarrow D^{(*)}K^\pm$, $D \rightarrow K_s^0\pi^+\pi^-$ and measurement of the CKM phase ϕ_3 .

Belle Collaboration (A. Poluektov *et al.*). Phys.Rev.D81 (2010) 112002.

Search for leptonic decays of D^0 mesons.

Belle Collaboration (M. Petric *et al.*). Phys.Rev.D81 (2010) 091102.

Measurement of $\Upsilon(5S)$ decays to B^0 and B^+ mesons

Belle Collaboration (A. Drutskoy *et al.*). Phys.Rev.D81 (2010) 112003

Measurements of Branching Fractions for $B^- D_s^+ \pi^-$ and $\bar{B}^0 \rightarrow D_s^+ K^-$.

Belle Collaboration (A. Das *et al.*). Phys.Rev.D82 (2010) 051103.

Evidence for $B^- \rightarrow \tau^- \bar{\nu}$ with a Semileptonic Tagging Method.

Belle collaboration (K. Hara *et al.*). Phys.Rev.D82 (2010) 071101.

Search for $B_s^0 \rightarrow hh$ Decays at the $\Upsilon(5S)$ Resonance.

Belle Collaboration (C.-C. Peng *et al.*). Phys.Rev.D82 (2010) 072007.

Measurement of CP violating asymmetries in $B^0 \rightarrow K^+ K^- K_S^0$ decays with a time-dependent Dalitz approach.

BELLE Collaboration (Y. Nakahama *et al.*). Phys.Rev.D82(2010) 073011.

Search for CP violating charge asymmetry in $B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm$ decays.

Belle Collaboration (K. Sakai *et al.*). Phys.Rev.D82 (2010) 091104.

Measurement of the form factors of the decay $B_s^0 \rightarrow D^{*-} \ell^+ \nu$ and determination of the CKM matrix element $|V_{cb}|$.

Belle Collaboration (W. Dungen *et al.*). Phys.Rev. D82 (2010) 112007.

Measurement of eta eta production in two-photon collisions.

Belle Collaboration (S. Uehara *et al.*). Phys.Rev.D82 (2010) 114031.

Measurement of $e^+e^- \rightarrow D_s^{(*)+} D_s^{(*)-}$ cross sections near threshold using initial-state radiation.

Belle Collaboration (G. Pakhlova *et al.*). Phys.Rev. D83 (2011) 011101.

Study of the decays $B \rightarrow D_{s1}(2536)^+ \bar{D}^{(*)}$.

Belle Collaboration (T. Aushev *et al.*). Phys.Rev. D83 (2011) 051102.

Observation of $B_s^0 \rightarrow J/\psi f_0(980)$ and Evidence for $B_s^0 \rightarrow J/\psi f_0(1370)$.

Belle Collaboration (J. Li *et al.*). Phys.Rev.Lett. 106 (2011) 121802.

Study of the $K^+ \pi^+ \pi^-$ Final State in $B^+ \rightarrow J/\psi K^+ \pi^+ \pi^-$ and $B^+ \rightarrow \psi' K^+ \pi^+ \pi^-$.

Belle Collaboration (H. Gulerc *et al.*). Phys.Rev. D83 (2011) 032005.

Search for a Low Mass Particle Decaying into $\mu^+ \mu^-$ in $B^0 \rightarrow K^{*0} X$ and $B^0 \rightarrow \rho^0 X$ at Belle.

Belle Collaboration (H.J. Hyunv *et al.*). Phys.Rev.Lett.105 (2010) 091801

Search for Lepton Flavor Violating τ^- Decays into $\ell^- K_s^0$ and $\ell^- K_s^0 K_s^0$

Belle Collaboration (Y. Miyazaki *et al.*). Phys.Lett.B692 (2010) 4-9.

Observation of $B_s^0 \rightarrow D_s^{*-} \pi^+$ and $B_s^0 \rightarrow D_s^{(*)-} \rho^+$ Decays and Measurement of $B_s^0 \rightarrow D_s^{*-} \rho^+$ Longitudinal Polarization Fraction.

Belle Collaboration (R. Louvot *et al.*) Phys.Rev.Lett.104 (2010) 231801.

Search for CP violation in the decays $D_{(s)}^+ \rightarrow K_s^0 \pi^+$ and $D_{(s)}^+ \rightarrow K_s^0 K^+$.
Belle collaboration (B.R. Ko *et al.*).Phys.Rev.Lett.104 (2010) 181602.

Study of 144-channel hybrid avalanche photo-detector for Belle II RICH counter.
S.Shiizuka, I.Adachi, R.Dolenec, K.Hara, T.Iijima, H.Ikeda, M.Imamura, S.Iwata, S.Korpar, P.Krizan
et al., Nucl.Instrum.Meth. A628 (2011) 315-318

The DCBA experiment for studying neutrinoless double beta-decay.
N. Ishihara *et al.* J.Phys.Conf.Ser.203 (2010) 012071.

Three-dimensional drift chambers of the DCBA experiment for neutrinoless double beta decay search.
T. Ishikawa, H. Igarashi, T. Sumiyoshi, N. Ishihara, G. Iwai, H. Iwase, Y. Kato, M. Kawai, Y. Kondou,
T. Haruyama *et al.* Nucl.Instrum.Meth. A628 (2011) 209-211

Review of particle physics.

Particle Data Group (K Nakamura *et al.*). J.Phys.G37 (2010) 075021.

2) 国際会議報告

Status of neutrinoless double beta decay experiment DCBA.

Takashi Ishikawa *et al.*, Tsukuba 2010, Radiation detectors and their uses, 110-119

Readout electronics of 144 channel HAPD developed for Belle-II aerogel RICH system.

E. Kuroda, I. Adachi, S. Nishida, H. Ikeda, T. Sumiyoshi, T. Kumita, Y. Ueki, T. Iijima, S. Shiizuka, A.
Suzuki,

PoS PD09:032,2010. International Workshop on New Photon Detectors PD09

First Measurement of Inclusive $B \rightarrow X_s \eta$ Decays. Belle Collaboration (I. Adachi *et al.*).

Contributed to 24th International Symposium on Lepton-Photon Interactions at High Energy (LP09),
Hamburg, Germany, 17-22 Aug 2009.

Development of the readout ASIC for the 144 channel HAPD for aerogel RICH.

Shohei Nishida *et al.*, 1st International Conference On Technology and Instrumentation In Particle
Physics (TIPP09), Tsukuba, Japan, 12-17 Mar 2009.

Nucl.Instrum.Meth.A623:504-506,2010.

Development of transparent silica aerogel over a wide range of densities.

Makoto Tabata *et al.*, 1st International Conference On Technology and Instrumentation In Particle
Physics (TIPP09), Tsukuba, Japan, 12-17 Mar 2009.

Nucl.Instrum.Meth.A623:339-341,2010.

Study of 144-channel multi-anode hybrid avalanche photo-detector for the Belle RICH counter.

I. Adachi *et al.*, 1st International Conference On Technology and Instrumentation In Particle Physics
(TIPP09), Tsukuba, Japan, 12-17 Mar 2009.

Nucl.Instrum.Meth.A623:285-287,2010.

Imaging characteristics of glass capillary plate gas detector.

F. Tokanai *et al.*, 1st International Conference On Technology and Instrumentation In Particle Physics

(TIPP09), Tsukuba, Japan, 12-17 Mar 2009.

Nucl.Instrum.Meth.A623:138-140,2010.

Double Chooz status

J. Maeda, PoS(HQL 2010)035, 2010. Xth International Conference on Heavy Quarks and Leptons.

3) 学会講演

● 日本物理学会 2010 年秋季大会 2010 年 9 月 11 日～14 日 (九州工業大学戸畑キャンパス)

Double Chooz 検出器におけるエネルギー測定の実験位置依存性

棚田祐介, 前田順平, 住吉孝行, 早川知克, 川崎健夫, 他 Double Chooz Japan グループ

Double Chooz 実験における光電子増倍管用 HV システムの構築

前田順平, 佐藤文孝, 塚越健人, 住吉孝行, Lindley Winslow, 他 Double Chooz Japan グループ

DCBA による二重ベータ崩壊実験の現状

五十嵐春紀, 住吉孝行, 石原信弘, 稲垣隆, 小濱太郎, 加藤義昭, 高橋嘉右春山富義, 槇田康博, 山田善一, 川井正徳, 近藤良也, 岩井剛, 岩瀬広, 竹田繁, 石塚丈晴, 喜多村章一, 寺本吉輝, 坂本泰伸, 中野逸夫, 長坂康史, 田村詔, 田中耕一, 伊藤倫太郎, 殿岡衛

超高エネルギーニュートリノ岩塩検出器のための UHF 空洞共振器による岩塩電波減衰長

秋山英俊, 片岡裕美, 近 匡, 清水 裕, 近重悠一, 上條敏生, 千葉雅美, 安田 修, 矢吹文昭, 内海倫明, 藤井政俊

超高エネルギーニュートリノ岩塩検出器のためのレーダー法の研究

千葉雅美, 上條敏生, 安田 修, 矢吹文昭, 秋山英俊, 片岡裕美, 近 匡, 清水 裕, 近重悠一, 内海倫明, 藤井政俊

● 第 71 回応用物理学会学術講演会 2010 年 9 月 14 日～17 日 (長崎大学文教キャンパス)

IECF 中性子源の中性子生成領域についての研究

谷内康行, トーン ゲン, 松村義人, 内海倫明, 千葉雅美, 白川俊昭, 藤井政俊

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

Belle-II 実験における Aerogel-RICH 検出器用 HAPD の中性子損傷への対策

岩田修一, 住吉孝行, 汲田哲郎, 高垣英幸, 足立一郎, 西田昌平, 飯嶋徹, 原康二, 今村美貴, 池田博一, 田端誠, 河合秀幸, 久保将人, 小川了, 多賀井里枝

Belle II 実験のための Aerogel-RICH 検出器読み出し用 ASIC の開発

高垣英幸, 住吉孝行, 汲田哲郎, 岩田修一, 足立一郎, 西田昌平, 飯嶋徹, 原康二, 今村美貴, 池田博一, 田端誠, 河合秀幸, 久保将人, 小川了, 多賀井里枝

先端計測器からのスピノフ:エアロジェルの開発と社会での実用 Spin off from Advanced Detector Technology: Development of aerogel and its application to industries

住吉孝行

Double Chooz 実験における Maximum Likelihood 法を用いた宇宙線ミュオンの再構成方法の開発

下島すみれ, 住吉孝行, 前田順平, 川崎健夫, 他 Double Chooz Japan グループ

超高エネルギーニュートリノ岩塩検出器のための VHF-UHF 空洞共振器による電波減衰長測定
秋山英俊、片岡裕美、近 匡、清水 裕、近重悠一、中矢聖華、谷川孝浩上條敏生、千葉雅美、安田
修、矢吹文昭、内海倫明、藤井政俊

超高エネルギーニュートリノ岩塩検出器のためのパルス電子ビームの照射による岩塩温度上昇と電波反
射測定

谷川孝浩、上條敏生、千葉雅美、安田 修、矢吹文昭、秋山英俊、片岡裕美、近 匡、清水 裕、近重
悠一、中矢聖華、内海倫明、藤井政俊

ポジトロニウムの 5 光子消滅事象の測定

坂下嘉徳 千葉雅美

● 第 58 回応用物理学関係連合講演会 2011 年 3 月 24 日～27 日 (神奈川工科大学)

IECF 中性子源の中性子生成領域についての研究 (II)

谷内 康行、西垣卓馬、本間 惟彦、松村義人、内海倫明、白川利昭、千葉雅美、藤井 政俊

MEASUREMENT OF THE POTENTIAL DISTRIBUTION BETWEEN CATHODE AND ANODE
IN THE IECF DEVICE

グエン トーン ズイ、谷内 康行、松村 義人、千葉 雅美、藤井 雅俊、白川 利明、時枝孝典、白幡 誠
也、安藤光雄、内海倫明

国際会議

● 4th International workshop on Acoustic and Radio EeV Neutrino detection Activities (ARENA
2010), Nantes, France, June 29-July 2, 2010

Radar for Detection of Ultra-High-Energy Neutrinos Reacting in a Rock Salt Dome

Masami Chiba, Toshio. Kamijo, Fumiaki Yabuki, Osamu Yasuda, Hidetoshi Akiyama Yuichi Chikashige,
Hiromi Kataoka, Tadashi Kon, Yutaka Shimizu, Yasuyuki Taniuchi, Michiaki Utsumi, and Masatoshi
Fujii

● 7th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH 2010), Cassis, France,
May 3-7, 2010

Development of a gaseous PMT with micro-pattern gas detectors

Takayuki Sumiyoshi, Fuyuki Tokanai, Hiroyuki Sugiyama, Teruyuki Okada, Noboru Ohishi, Takayuki
Ohmura, Hirohisa Sakurai, Shuichi Gunji

● 2010 Topical Workshop on Electronics for Particle Physics (TWEPP-10), Aachen, Germany, Sep.
20-24, 2010.

Readout electronics for an HAPD detector.

A. Seljak, H. Ikeda, S. Iwata, S. Korpar, P. Krizan, R. Pestotnik, S. Nishida, T. Sumiyoshi.

● Xth International Conference on Heavy Quarks and Leptons (HQL2010), Frascati, Italy, Oct. 11-
15, 2010

Double Chooz status

J. Maeda on behalf of the Double Chooz collaboration

● International Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics 2010 (CHEP2010),
Taipei, Taiwan, Oct. 18-22, 2010

Online Data Acquisition and the Control System for the Double Chooz Experiment

J. Maeda on behalf of the Double Chooz collaboration

原子物理実験サブグループ

1. 研究活動の概要

昨年度末に東俊行が退職し、理化学研究所・主任研究員となったが、連携大学院教授としてこれまでと同様に共同研究を行っていくことになった。さらに、8月には間嶋拓也が京都大学工学研究科助教に転出したが、客員研究員として首都大において、精力的な共同研究を継続している。また、7月には井上洋子が特任研究員として赴任した。このように体制は大きく変化したが、従来通りに meV から GeV までの非常に広い衝突エネルギー領域のイオンを用いた原子衝突実験を、内外の研究者と共同で、さらに手広く展開することになった。

1) 高速多価重イオンのコヒーレント共鳴励起の研究

単結晶中を通過する高速イオンは、結晶周期ポテンシャルを振動電場として感じる。この振動数が入射イオンの原子準位エネルギー差と一致するとき、共鳴的な励起が期待される（この現象はオコロコフ効果もしくはコヒーレント共鳴励起 (RCE) と呼ばれている）。本年度は HIMAC (放射線医学総合研究所重イオン加速器) において励起イオンが結晶原子と衝突して生成される 2 次電子を詳細に観測するとともに、ドイツ・GSI 重イオン研究所において、イオン蓄積リングによる電子冷却を利用したウランイオンの精密分光実験を、1 昨年に引き続いて行った。

(1) Ladder 型 2 重共鳴下での Auger 電子観測: $445 \text{ MeV/u Li-like Ar}^{15+} 1s^2 2s \rightarrow 1s 2s 2p \rightarrow 2s 2p^2$:

昨年度の 2 重共鳴励起状態の He 様 (2 電子系) イオンからの Auger 電子測定成功を受けて、Li 様 (3 電子系) イオンの Ladder 型 2 重共鳴によって K-shell 電子を両方とも $n = 2$ 励起状態に励起し、束縛 3 電子のすべてが $n = 2$ 励起状態にあるホロアトムを観測することを試みた。前方に放出される 2 次電子スペクトルを観測したところ、共鳴条件下で、入射イオンの結晶原子との衝突によるイオン化に起因するコンボイ電子ピークの両肩に、多重励起準位からの Auger 電子ピークが表れる様子を明瞭に観測した。

(2) 1 重共鳴下でのコンボイ電子観測: $412 \text{ MeV/u He-like Fe}^{25+} 1s^2 \rightarrow 1s 2p$:

磁気副量子数を指定した配向量子状態イオンの、結晶原子との衝突によるイオン化に起因するコンボイ電子の観測を行った。イオン進行方向に垂直な原子面配列を採用することによって、He 様 (2 電子系) Fe^{25+} イオンにおける $1s^2$ から $1s 2p_0$ への励起に成功した。その結果、共鳴によるコンボイ電子収量の増加が、電荷における入射イオンの生き残り割合の変化に比べて、極めて大きいことを見いだした。この観測結果は、励起状態から放出されたコンボイ電子に対する磁場分析器の幾何学的検出効率が、基底状態からのコンボイ電子に対するものより大きいことを意味し、ビーム進行方向に対して横方向の運動量成分が、 $2p$ 励起状態からの放出電子の場合、 $1s$ からの電子の場合より狭いことで説明される。

(3) GSI 重イオン研究所における RCE 実験: $190 \text{ MeV/u Li-like U}^{89+} 2s_{1/2} \rightarrow 2p_{3/2}$:

ドイツ GSI 重イオン研究所を利用して、Li 様 (3 電子系) U^{89+} における $2s_{1/2}$ から $2p_{3/2}$ への共鳴励起を精密測定することによる QED テストをめざした実験を昨年度に引き続き実施した。今回は、SIS シンクロトロンより取り出された He 様 (2 電子系) U^{90+} ビームを、まず ESR イオン蓄積リングに蓄積し、等速の電子ビームと合流させることにより冷却 (ビームエネルギー幅を狭窄化する) した上で、さらにこの等速電子を捕獲して生成される Li 様 (3 電子系) U^{89+} ビームを、リングより引き出して利用した。この手法により、前回の SIS からの取り出し実験と比較して 1 桁以上エネルギー幅の狭いビームが得られた。しかしながら、脱励起 X 線の観測により得られた共鳴幅は、入射イオンの角度拡がりや結晶中でのエネルギー損失を反映して、期待されたほどの狭窄化は達成されなかった。

2) 静電型イオン蓄積リングによる原子分子衝突の研究

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

(1) 水和メチレンブルーイオン $MB^+(H_2O)_n$ の生成と幾何構造の量子化学的研究 :

昨年度に開発を行ったエレクトロスプレーイオン源では、メチレンブルー分子に複数の水分子が吸着した $MB^+(H_2O)_n$ の生成に成功していた。真空中に孤立した溶媒和分子は、溶液中の溶媒和の構造を微視的に研究するための重要な標的である。 $MB^+(H_2O)_n$ イオンは、水分子の付加が $n = 4$ 以上でしか見られず、また $n = 24$ が明らかな魔法数になるという特異的な分布を持つことを見出した。この特徴を検証するため、分子物質化学専攻の橋本健朗准教授の協力のもと、密度汎関数法を用いて $MB^+(H_2O)_n$ ($n = 1 - 5$) の幾何構造とエネルギー状態の計算を行った。その結果、 $MB^+(H_2O)_4$ から、全ての水分子が一度に脱離してしまうために $MB^+(H_2O)_3$ 以下のものが観測されなかったものとして説明できた。また、 $MB^+(H_2O)_{20}$ が安定なかご状構造を持つことが知られているため、これが $MB^+(H_2O)_4$ に吸着することによって安定な構造を形成しているものと考えられる。

(2) メチレンブルーイオン MB^+ の TMU E-ring への導入とレーザーマージング実験 :

エレクトロスプレーイオン源で生成した分子イオンを TMU E-ring へ導入するため、イオンビームをバンチ化して周回イオン量を増大させるためのイオントラップの設置と、リングを周回させるための 15 keV 以上のイオン加速システムの設置を行った。また、TMU E-ring は常に 10^{-9} Pa 台の超高真空中で運転されており、イオン源の大気圧部との 14 桁の差を作ることが要求されるため、差動排気システムを確立した。最初の実験として、 MB^+ の入射およびリング周回を行った。ここに波長可変のレーザーパルスを経直線部に入射し、周回イオンとの合流実験を行った。レーザーパルスは、近赤外から可視・近紫外領域の照射が可能である。 MB^+ の光解離によって生成される中性粒子を測定した。その結果、数百 μ 秒以上の遅延過程が引き起こされていることが分かった。また、レーザー波長を変えながらレーザー誘起信号の強度を測定することにより、励起スペクトルを得た。溶液中の光吸収スペクトルと比較すると大きく短波長へシフトしたようなスペクトルを持つことが分かった。更に今後、分子の内部温度をあらかじめ制御した状態で TMU E-ring へに導入することを目的に、4 K までの冷却が可能な温度可変イオントラップの製作を行い、現在テスト運転を進めている。

(3) 直鎖炭化水素負イオン C_nH^- の寿命測定 :

直鎖炭化水素負イオン C_nH^- は、最近になって宇宙空間で観測された負イオンとして非常に注目されている分子イオンである。 C_4H^- 、 C_6H^- をセシウムスパッタイオン源で生成し、TMU E-ring に入射した。電子脱離によって中性化した粒子強度を周回ごとにモニターすることにより、ミリ秒程度の寿命を持つ準安定状態が生成されていることを確認した。

(4) 極低温冷却可能な小型静電型イオン蓄積リングのイオン軌道計算 :

現在、理化学研究所の東原子分子物理研究室に設置予定の、液体ヘリウム温度に冷却可能な新しい静電型イオン蓄積リングの設計を行っている。解析的な軌道計算と SIMION コードによるシミュレーションを相補的に活用し、電極配置の最適化およびそれに対する安定軌道の条件を導出し、TMU E-ring よりも小型な装置でも十分にイオン蓄積できることを見いだした。

3) 多価イオンの電荷交換分光

太陽風に含まれている多価イオンと宇宙空間の希薄な中性粒子と衝突することで電荷移行反応を起こし、そこから放出される 1 keV 以下の脱励起軟 X 線が多くの X 線観測衛星によって観測されている。この衝突発光過程を実験室で再現し、その発光スペクトルを高分解能の TES 型マイクロカロリメータによって測定するというプロジェクトを、昨年度から宇宙物理実験サブグループとの共同で行っている。

今年度は裸のイオンである $^{18}\text{O}^{8+}$ と $^{13}\text{C}^{6+}$ を入射ビームとして用意し、He および H_2 気体を標的とし、窓無しの Si(Li) 検出器を用いた測定を行った。分解能 100 eV 程度ではあるが、1s-2p と 1s-3p 遷移を分離して観測することは可能である。観測されるのは 1s-2p 遷移が全体の 80%以上を占めているが、これは上準位からのカスケードによって 2p 準位に占有数が集中するという現象が起こるためと考えられる。共同研究者である L. Liu (IAPCM, 北京) の AOCC 法による電子捕獲断面積と励起準位間の遷移確率の文献値を用いて求めたスペクトルが結果を再現することから、モデルの妥当性が確認されている。

分光測定だけでなく、気体圧力を正確に測定できるガスセルを通過したイオンの価数変化率を測定することで、電荷移行断面積の絶対値を求める装置を開発し、幾つかの多価イオンについて実際に測定を行った。過去の文献値が有る場合には、それをほぼ再現するような結果が得られている。

4) 低温ヘリウム気体中のイオン移動度

昨年度から、蒸気圧の高い液体試料を電子衝撃型イオン源に導入する差動排気型のイオン入射システムを使用して、これまでのイオン源では生成できなかった種類のイオンについての測定を開始した。今年度は、まず H_2O から生成した OH^+ 、 H_2O^+ 、 H_3O^+ について、液体窒素および液体ヘリウム温度のヘリウム気体中におけるイオン移動度の測定を行った。何れのイオンでも実効温度 T_{eff} が低い領域で分極極限 K_{pol} より小さな値を取るという典型的な分子イオン移動度の特徴を示したが、 OH^+ では $T_{\text{eff}} \rightarrow 0$ K の極限で多くの原子イオンと同様に K_{pol} に近づく様子が観測された。このような挙動を示す分子イオンは初めてであったので、電通大の大槻一雅氏に粒子間ポテンシャルの計算を依頼した。その結果、 $(\text{O-H-He})^+$ と直線構造を取ったときに、ポテンシャルは O_2^+ などに比べて 10 倍ほど深くなり、直線構造から外れると極端に相互作用が小さくなることが判った。この極端に大きな配向依存性が分子イオンの回転を妨げるため、 $T_{\text{eff}} \rightarrow 0$ K の極限で原子イオンの様に振る舞うことが理解できた。この考察に基づいて、He との Born-Oppenheimer 近似が成り立つ範囲では相互作用ポテンシャルが OH^+ と完全に一致する OD^+ について測定を行ったところ、 K_{pol} に漸近する点では OH^+ と同じであったが、移動度の極小付近では違いが見られた。これは質量の違い、即ち慣性モーメントの違いによって、低エネルギーでの回転励起の起こりやすさに顕著な差があるためと考えられる。

5) イオン移動度分析装置の開発

文部科学省・科学技術振興調整費「安全・安心な社会のための犯罪・テロ対策技術等を実用化するプログラム」に科学警察研究所などと共同で「化学剤の網羅的迅速検知システムの開発」というテーマで申請し採択された。イオン移動度が物質毎に異なることを利用して、大気中でイオン化したイオンの大気中での移動度を測定することで物質の同定を行う技術を移動度分析 (Ion Mobility Spectrometry, IMS) と呼ぶ。この IMS と、理化学研究所で行われている ECR イオン源による物質分析と組み合わせることによって、様々な種類の化学剤 (化学兵器) を迅速に検出する装置を開発するというプロジェクトである。この中で首都大は、これまでに蓄積してきたイオン移動度研究の経験を活かして、大気圧で動作する移動度分析装置と差動排気型質量分析装置を組み合わせ、イオンの質量を分離した到着時間スペクトルを測定することで、物質の同定に必要な基礎的データを採取する装置の開発を担当している。本年度は基本となる設計を行い、試作装置の製作を開始した。

2. 研究業績

1) 論文

S. Matoba, T. Koizumi, T. M. Kojima, and H. Tanuma : “Mobility of Li^+ ion attached to 2-butanol in He gas”, *J. Phys. Conf. Ser.* **204** (2010) 012008.

Y. Zhao, L. Liu, P. Xue, J. Wang, H. Tanuma, and R. Janev : “Polarization degrees for $2p\ ^2P_{3/2}-3s\ ^2S_{1/2}$ transition of $\text{C}^{3+}(1s^23p)$ produced in collisions of C^4 with He and H_2 ”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **79** (2010) 064301.

A. Sasaki, A. Sunahara, H. Furukawa, K. Nishihara, S. Fujioka, T. Nishikawa, F. Koike, H. Ohashi, and H. Tanuma : “Modeling of radiative properties of Sn plasmas for extreme-ultraviolet source”, *J. Appl. Phys.* **107** (2010) 113303.

T. Sato, T. Majima, K. Hashimoto, K. Hashimoto, Y. Zama, J. Matsumoto, H. Shiromaru, K. Okuno, H. Tanuma, and T. Azuma : “Microhydration of the methylene blue cation in an electrospray ion source”, *Eur. Phys. J. D*, Published online.

2) 学会講演

● レーザー研シンポジウム 2010 2010年4月27日～28日 (大阪大学・吹田キャンパス)

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 -多価 Xe イオンの EUV 発光線の同定-

● 原子衝突研究協会 第35回年会 2010年8月9日～11日 (奈良女子大学)

井上洋子, 田沼肇：化学剤検知のための大気圧で動作する小型移動度分析装置の開発計画

石田卓也, 神田拓真, 田沼肇, 榎崇利, 辺見香理, 赤松弘規, 江副祐一郎, 石崎欣尚, 大橋隆哉, 篠崎慶亮, 満田和久：軽元素多価イオンの軟 X 線領域における電荷交換分光

森本航, 間嶋拓也, 東俊行：金属クラスタービーム集束のためのイオンファネル開発

進藤大輝, 中野祐司, 高野靖史, 池田時浩, 金井保之, 須田慎太郎, 東俊行, H. Bräuning, A. Bräuning-Demian, Th. Stöhlker, D. Dauvergne, 山崎泰規：シリコンドリフト検出器による $\text{U}^{89+} [1s^22s-1s^22p]$ 遷移の観測

佐藤智子, 間嶋拓也, 橋本浩平, 座間優, 松本淳, 城丸春夫, 奥野和彦, 田沼肇, 東俊行：孤立メチレンブルー正イオンの水和構造

須田慎太郎, 中野祐司, 目時健一, 進藤大輝, 大月聡子, 高橋聡樹, 森本航, 東俊行, 高野靖史, 畠山温, 中井陽一, 小牧研一郎, 高田栄一, 村上健：ゼロ度放出電子測定によるコヒーレント共鳴励起の観測

座間優, 松本淳, 城丸春夫, 阿知波洋次, 間嶋拓也, 田沼肇, 東俊行, 石田玉青, 春田正毅：金微粒子凝集体レーザーアブレーションによる金クラスター負イオンの生成とイオンビーム蓄積

大月聡子, 中野祐司, 須田慎太郎, 進藤大輝, 森本航, 高橋聡樹, 間嶋拓也, 田沼肇, 東俊行：ディレイライン検出器による HIMAC 重イオンビームの BUNCH 構造の観測

● 日本物理学会 2010年秋季大会 2010年9月23日～26日 (大阪府立大学・中百舌鳥キャンパス)

神田拓真, 石田卓也, 田沼肇, 赤松弘規, 榎崇利, 辺見香理, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 大橋隆哉, 篠崎慶亮, 満田和久: Si(Li) 検出器による多価イオンの電荷交換分光 II

山添純一, 伊澤亮介, 大槻一雅, 田沼肇: 極低温ヘリウム気体中における OH^+ , H_2O^+ の移動度

● 理研シンポジウム「第1回 広がる原子分子物理研究: 宇宙空間における原子分子進化過程」 2010年12月3日 (理化学研究所・基幹研究所)

田沼肇: Laboratory experiments on SWCX - 太陽風を起源とする軟 X 線発光に対する地上実験

● 原子分子光の素過程とプラズマ分光の研究フロンティア研究会 2011年2月2日~4日 (核融合科学研究所)

田沼肇: 太陽風を起源とする軟 X 線観測への原子物理の寄与

● 2010年度 宇宙空間原子分子過程研究会 2011年2月16日 (JAXA 宇宙科学研究所)

田沼肇: 低温ヘリウム気体中における分子イオンの移動度 - 分子回転の移動度への影響

● 日本原子力研究開発機構「原子分子データ活動に関する研究会」 2011年3月11日 (航空会館)

田沼肇: 炭素多価イオンと水素原子・分子の電荷移行断面積

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

石田卓也, 神田拓真, 田沼肇, 赤松弘規, 榎崇利, 辺見香理, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 大橋隆哉, 大橋隼人, 篠崎慶亮, 満田和久: Si(Li) 検出器による多価イオンの電荷交換分光 III

須田慎太郎, 中野祐司, 目時健一, 進藤大輝, 大月聡子, 森本航, 高橋聡樹, 高野靖史, 畠山温, 中井陽一, 東俊行, 小牧研一郎, 高田栄一, 村上健: コヒーレント共鳴励起にともなう電子放出の観測 IV

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

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

森本航, 中野祐司, 東俊行: 極低温静電型イオン蓄積リングの開発

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

● 日本化学会第91春季年会 2011年3月26~29日 (神奈川大学)

松本淳, 橋本浩平, 間嶋拓也, 城丸春夫, 阿知波洋次: 卓上静電型イオン蓄積リング (μE -ring) の開発

国際会議

● 24th International Conference on Atomic Collisions in Solids (ICACS-24), Krakow, Poland, July 18-23, 2010

T. Azuma, Y. Nakano, S. Suda, A. Hatakeyama, Y. Nakai, K. Komaki, E. Takada, T. Murakami :
Convoy and Auger electrons emitted from fast heavy ions excited by resonant coherent excitation

● 19th International Conference on Ion Mobility Spectrometry (ISIMS 2010), Albuquerque, NM,
USA, July 19-22, 2010

H. Tanuma: Small molecular ions and helium cluster ions in cooled helium gas

● International Workshop on Merged-Beam Experiments, Tokyo Metropolitan University, Hachioji,
Japan, August 25-26, 2010

H. Tanuma : Spectroscopy and collision experiments in the TMU-E-ring

T. Majima : State-selective lifetime measurement of metastable ions by an electrostatic ion storage
ring

● 15th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions (HIC-2010), Shanghai, China,
August 30 - September 3, 2010

T. Kanda, H. Ohashi, T. Ishida, H. Tanuma, H. Akamatsu, Y. Abe, W. Yokota, K. Henmi, Y. Ishisaki,
Y. Ezoe, T. Ohashi, K. Shinozaki, and K. Mitsuda : Laboratory experiments of soft X-ray emissions
from the solar wind

R. D'Arcy, H. Ohashi, S. Suda, H. Tanuma, S. Fujioka, H. Nishimura, K. Nishihara, C. Suzuki,
T. Kato, F. Koike, O. Morris and G. Osullivan : Configuration interaction in cascade spectra of Tin
and Xenon

H. Ohashi, S. Suda, H. Tanuma, S. Fujioka, H. Nishimura, K. Nishihara, H.A. Sakaue, N. Nakamura
and S. Ohtani : EUV emission spectra of Iron ions following charge exchange collisions with He

H. Ohashi, T. Ishida, H. Tanuma, S. Fujioka, H. Nishimura, and K. Nishihara : Non-statistical fine
structure distribution of Xe^{7+} ions in charge-transfer collisions

S. Suda, Y. Nakano, K. Metoki, T. Azuma, Y. Takano, A. Hatakeyama, Y. Nakai, K. Komaki,
E. Takada, and T. Murakami : Electron emission from fast heavy ions associated with resonant
coherent excitation

Y. Nakano, Y. Takano, T. Ikeda, Y. Kanai, S. Suda, T. Azuma, H. Bräuning, A. Bräuning-Demian,
Th. Stöhlker, D. Dauvergne, Y. Yamazaki : Resonant coherent excitation of Li-like Uranium

● 15th International Symposium on Small Particles and Inorganic Clusters (ISSPIC), Oaxaca, Mex-
ico, September 19-24, 2010

T. Sato, T. Majima, K. Hashimoto, Y. Zama, M. Goto, J. Matsumoto, H. Shiromaru, K. Okuno,
H. Tanuma, T. Azuma : Microhydration of methylene blue cations in an electrospray ion source

Y. Zama, J. Matsumoto, H. Shiromaru, Y. Achiba, E. Kawaguchi, T. Majima, H. Tanuma, T. Azuma :
Electron detachment of gold cluster anions in an electrostatic ring

● Charge Exchange Madrid, Madrid, Spain, September 29 - October 1, 2010

H. Tanuma : Laboratory Experiments of Solar Wind Charge Exchange in Soft X-Ray Spectroscopy

● 9th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics (AISAMP 9), Seoul, Korea, October 4-8, 2010

J. Yamazoe, R. Isawa, K. Ohtsuki, and H. Tanuma : Mobility of H_nO^+ ($n = 1 - 3$) ions in cooled helium gas

● 2010 International Workshop on Extreme Ultraviolet Sources, Dublin, Ireland, November 13-15, 2010

H. Tanuma : Are the extremely high oxygen and nitrogen plasmas the debris-less soft X-ray light source?

3) 学会誌等

中野祐司, 東俊行 : 周期場を使った X 線領域の原子状態制御 (日本物理学会誌, 2010 年 7 月号, pp.516-523)

宇宙物理実験サブグループ

1. 研究活動の概要

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

1) 銀河団・銀河間物質の観測

「すざく」の XIS 検出器は軟 X 線領域でのエネルギー分解能にすぐれ、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他、バックグラウンドが低いため、銀河団の周辺部などの低温・低密度領域についても高い感度をもっている。ピリアル半径付近までの温度と密度が 5 個ほどの銀河団について調べられており、本グループによる A1413 と A2142 銀河団の研究からも、ガスのエントロピー ($kTn^{-2/3}$) の勾配が、力学平衡の時に予想される $r^{1.1}$ より平坦なベキになることがわかった。ピリアル半径付近では高温ガスが平衡状態に十分達しておらず、特に電子温度がイオン温度より低い可能性が高い。これは銀河団の周辺部がまだ加熱の途中にあることを示す結果と言える。

ダークバリオンである中高温の銀河間物質を、銀河団周辺や超銀河団領域で探す研究を進めた。Shapley 超銀河団 (赤方偏移 $z = 0.043$) と、Sculptor 超銀河団 ($z = 0.105$) の「すざく」の観測結果から、X 線超過成分の上限値を求めた。また、赤方偏移した酸素の輝線の上限値も求め、超銀河団に付随する中高温銀河間物質の密度が、宇宙の平均密度の 300 倍より低いという結果を出した。また、大構造フィラメントが重なる領域を「すざく」で探査し、未知の銀河群からの X 線放射を発見した。

広がった電波放射 (電波リリック) を示す衝突銀河団 A3667 の「すざく」データを解析し、電波リリックの位置でガスの温度が 5 keV から 2 keV へ下がることを確認した。すでに XMM-Newton による報告があるが、今回 2 倍近く高い精度で温度を決定し、この領域に衝撃波があることを確かなものとした。

2) X 線による高密度星の観測

強磁場の白色矮星連星 V1223 Sgr を「すざく」で観測し、鉄の輝線のエネルギーが白色矮星の自転とともに変化することを発見した (図 1 参照)。磁極に流れ込むガスから輝線が出ており、自転によって降着流と視線のなす角度が変化するために、輝線エネルギーのドップラーシフトが変わると解釈される。強磁場白色矮星へは、磁極へと絞られたガス降着が起きていることをはじめて明確に示す結果である。

3.8 秒の自転周期をもつパルサー CXOU J171405.7-381031 を XMM-Newton で観測し、スピンドウンの割合を決めた。その結果磁場が 5×10^{14} G ときわめて強いことがわかり、この X 線はマグネターであることがはっきりした。これは超新星残骸中にあり、スピンドウンから推定される年齢 950 年は、超新星残骸の年齢ともよく合っている。この他、 γ Cas 型天体を「すざく」で観測し、鉄輝線とコンプトン散乱成分の情報から、白色矮星をとりまく降着円盤のモデルでよく説明できることを明らかにした。

3) 「すざく」による太陽系天体の観測

「すざく」は広がった X 線に対して最高レベルの感度を持つ。今年度、我々は昨年度発見した木星からの内部磁気圏に空間的に一致する広がった硬 X 線放射の観測的検証を進めるべく、「すざく」に追加観測を提案し採択された。また地球惑星研究者らと共同で、放射が磁気圏 MeV 電子が太陽光をたたき上げる逆コンプトン散乱で説明がつくかを、木星磁気圏粒子モデルを用いて検証を開始した。さらに 2020 年代を目指す国際的木星探査計画 EJSM の日本衛星 JMO へ、本研究室で開発中の軽量 X 線望遠鏡の

搭載検討を開始した。また地球の磁気嵐における超高層大気と太陽風との電荷交換反応 X 線や、火星大気からの X 線の研究を進めた。地球の高層大気と太陽風の相互作用による X 線については、超小型専用衛星も検討中で、次年度は将来衛星の実現に向けた検討や実験および理論的な研究を一層、展開する。

4) TES 型カロリメータの開発

JAXA 宇宙研等との共同で TES (Transition Edge Sensor) 型カロリメータの開発を進めている。最終目標は ~ 2 eV のエネルギー分解能と数 100 ピクセルからなる多ピクセルアレイである。アレイ型 TES 素子の駆動と読み出しに必須となる積層配線の試作を行い、1 cm 四角の中に 400 素子の配線を作り込むことに成功した。この基板上に TES を形成する実験を進め、配線の厚みや酸化膜が TES 薄膜の機能に問題を与えることがわかり、TES の厚さを調整するなどの解決策を講じた。

5) 冷凍器の開発と電荷交換反応への応用

原子物理グループと共同で、電荷交換 X 線の TES カロリメータによる地上測定を目指して準備を進め、2 段式 ADR によって TES を冷却するための予備実験や、さまざまな整備を行った。一方、小型のガスギャップ型ヒートスイッチの製作を、国立天文台との共同で進めた。ガスを吸着するチャコールに熱を導入する部分の構造が、熱スイッチの動作に問題を生じることがわかり、改良の方法を検討した。

6) Astro-H へ向けた作業

2014 年の打ち上げをめざす Astro-H に搭載されるマイクロカロリメータ (SXS) の開発へ向けて、さまざまな検討を行なった。超流動ヘリウムの流出を阻止する Porous Plug の検討を行い、初期運用から定常状態まで 1 種類のデバイスで要求性能を満足できることを確認し、排気系全体の試験を進めた。SXS の信号を処理するためのデジタル系 PSP の開発を、埼玉大、宇宙研、NASA/GSFC、三菱重工業、NEC とともに進め、比較的小規模の構成で、処理速度の要求を満たせることを確認した。

サイエンスチームのまとめ役という立場で、ASTRO-H の検討を行なった。第一回の ASTRO-H Summer School を、放射過程と宇宙論をテーマとして 4 名の講師をお願いし、8 月に水上で開催し 65 名の参加があった。また、8 月のスタンフォードでのサイエンス会議をはじめ、小規模の研究会も開催した。

7) 超軽量 X 線光学系の開発

次世代の宇宙 X 線観測衛星に向けて、従来よりも一桁軽くかつ秒角の角度分解能を達成する新しい光学系の開発を進めた。我々は宇宙研、産総研、東北大、立命館大、フロリダ大らと共同で、マイクロマシン技術を用いた独自のマイクロポアオプティクス (微細穴光学系) の開発を進めている。マイクロマシン技術を用いて μm スケールの微細な穴を数 100 μm の薄い基板にあげ、側壁を反射鏡として利用する (図 2 参照)。基板が薄いため、原理的に世界最軽量が可能であり、しかも一体成形で大量に鏡を生産できる。今年度は、1 段型 Si 望遠鏡の X 線を用いた結像実験の結果を精査し、角度分解能向上のための側壁の粗さ改善に着手した。そしてシリコンドライエッチングやアニールの条件を最適化することで、改善が可能であることを明らかにした。また将来の木星探査衛星への搭載を目指し、本格的な 2 段型望遠鏡のデザインを計算機シミュレーションを用いて行い、さらに望遠鏡組み立てのための高精度基板位置合わせシステムを完成した。次年度は 2 段望遠鏡の完成と分解能 < 5 分角を目指す。

8) 高い空間分解能を有する X 線望遠鏡の開発

前年度に引続き「薄板多重積層型 X 線望遠鏡」の高解像度化に取り組んだ。昨年度までに、望遠鏡全体の角分解能は 1.08 分角が達成されている。今年度はガラスマンドレルを研磨することで形状誤差の改善に取り組んだ。研磨されたマンドレルは母線方向の長さ 10 cm の範囲で表面のうねりは $\pm 1 \mu\text{m}$ の範囲に入っており、これにより 0.52 分角という角分解能が得られることがわかった。また製作された反射鏡

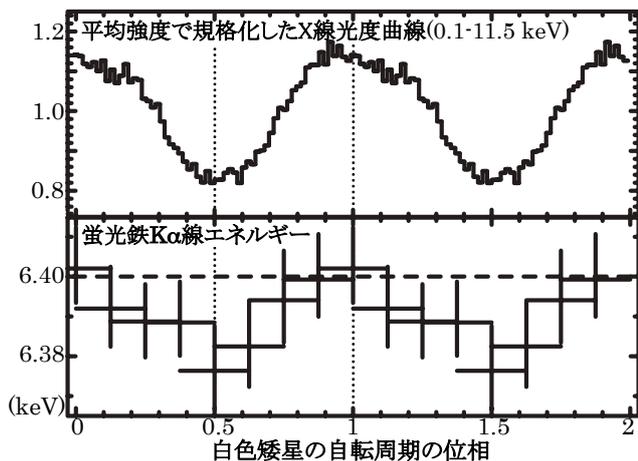


図 1: V1223 Sgr の白色矮星の自転にともなう鉄の輝線エネルギーの変化。降着流を見る角度が変わるため、輝線のドップラーシフトが変化する。



図 2: 4 インチ基板にドライエッチングで製作され、曲率半径 1 m に高温塑性変形された Si 光学系。

は X 線の反射率も良好であった。表面粗さは約 4 \AA で、単層膜としては十分よいが多層膜を形成する上では、まだ改善すべきであることがわかった。

一方、ASTRO-H に搭載される Pt/C 多層膜反射鏡に対する耐熱特性を、サンプルを用いて測定したところ、 50°C までは問題がなかったが、 60°C では表面にしわのような変形が発生することがわかった。これはエポキシ接着剤の熱膨張が関係していると考えられる。

Al フォイルを用いた鏡と平行して、次世代の X 線観測衛星 Athena や DIOS 向けに薄いシリコン基板を高温塑性変形して作る新しい望遠鏡の開発も、東北大と共に進めている。Al フォイルと同程度の厚みでありながら剛性が高く、しかも平滑な基板を商業的に得ることが可能なため、軽量性を保ちつつ、角分解能を 1 桁以上向上することができると考えられる。昨年度までに平坦な基板の製作に成功したため、今年度は数 μm 以下の精度で理想曲面と一致する超高精度治具の製作をメーカーと共同で進め、要求精度を満たす治具の製作に成功した。来年度は本治具で基板を変形し、秒角の望遠鏡の完成を目指す。

9) 将来の X 線天文衛星へ向けた検討

温度 10^6 K ほどの中高温の銀河間ガスは、宇宙のバリオン全体の約半分を占め、宇宙の大構造を非常に良くトレースして分布すると考えられているが、まだその分布はほとんどわかっていない。これを酸素の輝線 (O_{VII} , O_{VIII}) を使ってサーベイするために、専用小型衛星 DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) を 2016 年頃の打ち上げを目指して検討した。熱的な検討を行い、ASTRO-H と同様の冷凍機で冷却はできるものの、電力が 280 W となり大幅に削減する必要のあることがわかった。さらに DIOS をスケールアップし、 γ 線バーストの X 線残光を光源として、銀河間物質による吸収線も見られる機能を追加した衛星 ORIGIN を、米、オランダ、イタリアとの協力でヨーロッパの Cosmic Vision 中型機へ提案したが、採択には至らなかった。

さらに、2020 年以降の打ち上げを目指す、NASA, ESA, JAXA 協力の大型ミッション IXO (International X-ray Observatory) の科学的検討をおこなった。その後、2011 年 3 月にミッション規模を削減することが ESA から要請され、ヨーロッパの主導のもとに Athena という名前で検討を続けることになり、本グループからも科学的検討に参加している。

2. 研究業績

1) 論文

- A. Hoshino, J. P. Henry, K. Sato, H. Akamatsu, W. Yokota, S. Sasaki, Y. Ishisaki, T. Ohashi, M. Bautz, Y. Fukazawa, N. Kawano, A. Furuzawa, K. Hayashida, N. Tawa, J. P. Hughes, M. Kokubun, T. Tamura: X-Ray Temperature and Mass Measurements to the Virial Radius of Abell 1413 with Suzaku, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **62**, 371-389 (2010)
- M. Kawaharada, N. Okabe, N., K. Umetsu, M. Takizawa, K. Matsushita, Y. Fukazawa, T. Hamana, S. Miyazaki, K. Nakazawa, T. Ohashi: Suzaku Observation of A1689: Anisotropic Temperature and Entropy Distributions Associated with the Large-scale Structure, *The Astrophysical Journal*, **714**, 423-441 (2010)
- Y. Fujii, H. Kawahara, Y. Suto, A. Taruya, S. Fukuda, T. Nakajima, E. L. Turner: Colors of a Second Earth: Estimating the Fractional Areas of Ocean, Land, and Vegetation of Earth-like Exoplanets, *The Astrophysical Journal*, **715**, 866-880 (2010)
- H. Kawahara: The Axis Ratio Distribution of X-ray Clusters Observed by XMM-Newton, *The Astrophysical Journal*, **719**, 1926-1931 (2010)
- R. Fujimoto, K. Mitsuda, N. Yamasaki, Y. Takei, M. Tsujimoto, H. Sugita, Y. Sato, K. Shinozaki, T. Ohashi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, M. Murakami, S. Kitamoto, H. Murakami, T. Tamagawa, M. Kawaharada, H. Yamaguchi, K. Sato, K. Kanao, S. Yoshida, M. DiPirro, P. Shirron, G. Sneiderman, R. L. Kelley, F. S. Porter, C. Kilbourne, J. Crow, A. Mattern, A. Kashani, D. McCammon, J. -W. den Herder: Cooling system for the soft X-ray spectrometer onboard Astro-H, *Cryogenics*, **50**, 488-493 (2010)
- H. Kawahara, Y. Fujii: Global Mapping of Earth-like Exoplanets From Scattered Light Curves, *The Astrophysical Journal*, **720**, 1333-1350 (2010)
- E. D. Reese, H. Kawahara, T. Kitayama, N. Ota, S. Sasaki, Y. Suto: Impact of Chandra Calibration Uncertainties on Galaxy Cluster Temperatures: Application to the Hubble Constant, *The Astrophysical Journal*, **721**, 653-669 (2010)
- Y. Terada, Y., M. Ishida, A. Bamba, K. Mukai, T. Hayashi, A. Harayama: X-ray Observation of AM Herculis in a Very Low State with Suzaku, *The Astrophysical Journal*, **721**, 1908-1918 (2010)
- T. Sato, A. Bamba, A., R. Nakamura, M. Ishida: Identification of CXOU J171405.7–381031 as a New Magnetar with XMM-Newton, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **62**, L33-L36 (2010)
- T. Ohashi: Future X-ray Missions for High Resolution Spectroscopy, *Space Science Reviews*, **157**, 25-36 (2010)
- K. Sato, R. L. Kelley, Y. Takei, T. Tamura, N. Y. Yamasaki, T. Ohashi, A. Gupta, M. Galeazzi: Study of the Intracluster and Intergalactic Medium in the Sculptor Supercluster with Suzaku, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **62**, 1423-1433 (2010)

K. Sato, M. Kawaharada, K. Nakazawa, K. Matsushita, Y. Ishisaki, N. Y. Yamasaki, T. Ohashi: Metallicity of the Fossil Group NGC 1550 Observed with Suzaku, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **62**, 1445-1454 (2010)

Y. Ezoe, K. Ishikawa, T. Ohashi, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda, R. Fujimoto, Y. Miyoshi, N. Terada, Y. Uchiyama, Y. Futaana: Solar system planets observed with Suzaku, *Advances in Space Research*, **47**, 411-418 (2011)

H. Kawahara, H. Yoshitake, T. Nishimichi, T. Sousbie: Suzaku Observation of a New Merging Group of Galaxies at a Filamentary Junction, *The Astrophysical Journal*, **727**, L38-L42 (2011)

2) 国際会議報告

Y. Terada, A. Harayama, K. Morigami, M. Ishida, A. Bamba, T. Dotani, T. Hayashi, S. Okada, R. Nakamura, K. Makishima, K. Mukai, S. Naik: Systematic surveys of the non thermal emission from white dwarfs with Suzaku and INTEGRAL, *American Institute of Physics Conference Series*, **1248**, 215-216 (2010)

N. E. White, A. Parmar, H. Kunieda, K. Nandra, T. Ohashi, J. Bookbinder: The International X-ray Observatory, *American Institute of Physics Conference Series*, **1248**, 561-566 (2010)

T. Takahashi and the ASTRO-H Collaboration: The ASTRO-H Mission, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, **7732**, 77320Z-77320Z-18 (2010)

K. Mitsuda, R. L. Kelley, K. R. Boyce, G. V. Brown, E. Costantini, M. J. Dipirro, Y. Ezoe, R. Fujimoto, K. C. Gendreau, J. -W. den Herder, A. Hoshino, Y. Ishisaki, C. A. Kilbourne, S. Kitamoto, D. McCammon, M. Murakami, H. Murakami, M. Ogawa, T. Ohashi, A. Atsushi; S. Stphane; M. Pohl, F. S. Porter, Y. Sato, K. Shinozaki, P. J. Shirron, G. A. Sneiderman, H. Sugita, A. Szymkowiak, Y. Takei, T. Tamagawa, M. Tashiro, Y. Terada, M. Tsujimoto, C. de Vries, H. Yamaguchi, N. Y. Yamasaki: The high-resolution x-ray microcalorimeter spectrometer system for the SXS on ASTRO-H, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, **7732**, 773211-773211-10 (2010)

J. -W. den Herder, R. L. Kelley, K. Mitsuda, L. Piro, S. R. Bandler, P. Bastia, K. R. Boyce, M. Bruin, J. A. Chervenak, L. Colasanti, W. B. Doriese, M. Dipirro, M. E. Eckart, Y. Ezoe, E. Figueroa-Feliciano, L. Ferrari, R. Fujimoto, F. Gatti, K. C. Gendreau, L. Gottardi, R. den Hartog, G. C. Hilton, H. Hoovers, K. D. Irwin, Y. Ishisaki, A. Kashani, C. A. Kilbourne, P. de Korte, J. van der Kuur, C. Macculi, T. Mineo, J. H. Nieland, T. Ohashi, S. Paltani, E. Perinati, F. S. Porter, P. J. Shirron, S. J. Smith, Y. Takei, M. Tashiro, G. Torrioli, M. Tsujimoto, H. van Weers, N. Y. Yamasaki: The x-ray microcalorimeter spectrometer onboard of IXO, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, **7732**, 77321H-77321H-10 (2010)

T. Ohashi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, S. Sasaki, H. Kawahara, K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, Y. Takei, M. Ishida, Y. Tawara, I. Sakurai, A. Furuzawa, Y. Suto, K. Yoshikawa, N. Kawai, R. Fujimoto, T. G. Tsuru, K. Matsushita, T. Kitayama: DIOS: the diffuse intergalactic oxygen surveyor: status and prospects, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, **7732**, 77321S-77321S-9 (2010)

D. N. Burrows, D. Hartmann, C. Kouveliotou, L. Piro, J. -W. den Herder, T. Ohashi: Xenia: cosmo-chemical evolution of the Universe, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, **7732**, 77321T-77321T-12 (2010)

M. Ozaki, M., M. Ohno, Y. Terada, S. Watanabe, T. Mizuno, T. Takahashi, M. Kokubun, M. Tsujimoto, N. Y. Yamasaki, H. Odaka, Y. Takei, T. Yuasa, A. Furuzawa, H. Mori, H. Matsumoto, T. Okajima, C. A. Kilbourne, H. Tajima, Y. Ishisaki: The Monte Carlo simulation framework of the ASTRO-H X-ray Observatory, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series* **7732**, 773239-773239-7 (2010)

R. Fujimoto, K. Mitsuda, N. Yamasaki, Y. Takei, M. Tsujimoto, H. Sugita, Y. Sato, K. Shinozaki, A. Okamoto, T. Ohashi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, K. Ishikawa, M. Murakami, S. Kitamoto, H. Murakami, T. Tamagawa, M. Kawaharada, H. Yamaguchi, K. Sato, A. Hoshino, K. Kanao, S. Yoshida, M. Miyaoka, M. DiPirro, P. Shirron, G. Sneiderman, R. L. Kelley, F. S. Porter, C. Kilbourne, J. Crow, A. Mattern, A. Kashani, D. McCammon, J. -W. den Herder: Cooling system for the soft x-ray spectrometer (SXS) onboard ASTRO-H, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, **7732**, 77323H-77323H-7 (2010)

F. S. Porter, Authors: J. S. Adams, G. V. Brown, J. A. Chervenak, M. P. Chiao, R. Fujimoto, Y. Ishisaki, R. L. Kelley, C. A. Kilbourne, D. McCammon, K. Mitsuda, T. Ohashi, A. E. Szymkowiak, Y. Takei, M. Tashiro, M. and N. Yamasaki: The detector subsystem for the SXS instrument on the ASTRO-H Observatory, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, **7732**, 77323J-77323J-13 (2010)

T. Ohashi: Dark matter and X-ray halo in early-type galaxies and clusters of galaxies, *Highlights of Astronomy*, **15**, 89-90 (2010)

K. Matsushita, Y. Fukazawa, K. Hayashi, S. Konami, R. Nagino, T. Ohashi, Y. Tawara, M. Tozuka: Suzaku observations of early-type galaxies, *Highlights of Astronomy*, **15**, 274-274 (2010)

3) 学会講演

日本物理学会 2010 年春季大会 2010 年 3 月 20 日～23 日 (岡山大学)

満田和久, 山崎典子, 竹井洋, 辻本匡弘 (ISAS/JAXA), 杉田寛之, 佐藤洋一, 篠崎慶亮 (ARD/JAXA), 藤本龍一, 佐藤浩介 (金沢大), 大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎 (首都大), 村上正秀 (筑波大), 田代信, 寺田幸功 (埼玉大), 北本俊二, 村上弘志 (立教大), 玉川徹, 三原建弘, 川原田円, 山口弘悦 (理研), R.L.Kelley, C.A.Kilbourne, F.S. Porter, G.A. Sneiderman, P.J. Shirron, M.J.DiPirro, K.R. Boyce (NASA/GSFC), D.McCammon (ウイスコンシン大), A.E. Szymkowiak (イエール大), J.-W. den Herder, C. de Vries (SRON), S. Paltani, M. Pohl (ジュネーブ大), 他「ASTRO-H」SXS-XCS チーム Astro-H 衛星搭載 X 線マイクロカロリメータ分光検出器システムの開発

辺見香理, 石崎欣尚, 大橋隆哉, 赤松弘規, 横田渉, 阿部祐輝, 入江敏弘 (首都大), 篠崎慶亮 (ARD/JAXA), 満田和久 (ISAS/JAXA): 宇宙 X 線観測を目指した二段式断熱消磁冷凍機の開発

大橋隆哉 (首都大): 西野玄記氏の受賞理由説明講演

神田拓真, 大橋隼人, 石田卓也, 前野修平, 田沼肇, 赤松弘規, 阿部祐輝, 横田渉, 辺見香理, 江副祐一郎, 石崎欣尚, 大橋隆哉 (首都大), 篠崎慶亮 (ARD/JAXA), 満田和久 (ISAS/JAXA): Si(Li) 検出器による多価イオンの電荷交換分光

大橋隆哉 (首都大): はじめに

神頭知美, 寺田幸功, 田代信, 岩瀬かほり (埼玉大), 湯浅孝行 (東大), 能町正治 (大阪大), 石崎欣尚 (首都大), 高橋忠幸, 国分紀秀, 尾崎正伸 (ISAS/JAXA), ASTRO-H Collaborations: ASTRO-H 衛星の時刻配信における時刻精度の定量化

日本天文学会 2010 年春季年会 2010 年 3 月 24 日~27 日 (広島大学)

○竹井洋 (ISAS/JAXA)、佐藤浩介 (金沢大)、大橋隆哉 (首都大)、三石郁之、山崎典子 (ISAS/JAXA)、Massimiliano Galeazzi, Anjali Gupta (マイアミ大), Richard L. Kelley(NASA/GSFC): 「すぎく」による銀河団、超銀河団に付随する中高温銀河間物質の探査

○星野晶夫、赤松弘基、石崎欣尚、大橋隆哉 (首都大)、J.P.Henry(ハワイ大)、佐藤浩介 (金沢大): 「すぎく」衛星による銀河団外縁部の観測的研究

○坪井陽子、鶴澤明子 (中央大学)、Steve, H. Pravdo (JPL)、江副祐一郎 (首都大学東京) : Cep A 駆動領域からの X 線

○大橋隆哉、石崎欣尚、江副祐一郎、佐々木 伸 (首都大)、田原 譲、桜井郁也、杉田聡司 (名古屋大)、満田和久、山崎典子、竹井 洋 (ISAS/JAXA)、篠崎慶亮 (ARD/JAXA)、須藤 靖、河原 創 (東京大)、藤本龍一、佐藤浩介 (金沢大)、河合誠之 (東工大)、吉川耕司 (筑波大)、DIOS ワーキンググループ: ダークバリオン探査を目指す小型衛星 DIOS の開発の現状

○赤松弘規、阿部祐輝、入江敏弘、大石詩穂子、石崎欣尚、江副祐一郎、大橋隆哉 (首都大理工)、L. Gottardi (SRON)、吉武宏、関谷典央、平社航、竹井洋、山崎典子、満田和久 (ISAS/JAXA)、前田龍太郎 (産総研): TES 型 X 線マイクロカロリメータの物理特性と超過雑音との相関

○大石詩穂子、阿部祐輝、赤松弘規、入江敏弘、江副祐一郎、石崎欣尚、大橋隆哉 (首都大)、関谷典央、吉武宏、竹井洋、山崎典子、満田和久 (ISAS/JAXA) : TES 型 X 線マイクロカロリメータ素子製作の再現性の評価

○篠崎慶亮 (ARD/JAXA)、赤松弘規、辺見香理、阿部裕輝、横田渉、入江敏弘 (首都大学東京)、満田和久、山崎典子、竹井洋 (ISAS/JAXA)、石崎欣尚、大橋隆哉 (首都大学東京): 次世代天文衛星搭載を目指した小型 2 段式断熱消磁冷凍機の開発

○佐藤拓郎、林多佳由、塩野目雄、江副祐一郎 (首都大学東京)、石田学、満田和久 (ISAS/JAXA)、森下浩平、中嶋一雄 (東北大学)、松本善文 (浜井産業): 次世代 X 線衛星搭載を目指した高温塑性変形を用いたシリコン X 線反射鏡の開発と性能評価

○石川久美、江副祐一郎、森田麻美、大橋隆哉 (首都大)、山口弘悦 (理研)、藤本龍一 (金沢大)、三石郁之、満田和久 (ISAS/JAXA)、村上正秀 (筑波大)、金尾憲一、吉田誠至、恒松正二 (住友重機械)、Michael DiPirro, Peter Shirron (NASA/GSFC)、他 SXS チーム: ASTRO-H 搭載 精密軟 X 線分光装置 SXS 用ヘリウム排気系の開発の現状

○下田優弥、田代信、寺田幸功、瀬田裕美、朝比奈正人 (埼玉大)、石崎欣尚、阿部祐輝 (首都大)、辻本匡弘、満田和久 (ISAS/JAXA)、松田健司、益川一範 (三菱重工)、ASTRO-H/SXS チーム: ASTRO-H 搭載 精密軟 X 線分光装置 SXS の波形処理システム PSP の開発の現状

○神頭知美、寺田幸功、田代信、岩瀬かほり (埼玉大学)、湯浅孝行 (東京大学)、能町正治 (大阪大学)、高橋忠幸、国分紀秀、尾崎正伸 (ISAS/JAXA)、石崎欣尚 (首都大学東京)、ASTRO-H collaborations: ASTRO-H 衛星における SpaceWire を用いた時刻配信方法の検証 (2)

日本物理学会 2010 年秋季大会 2010 年 9 月 11 日～14 日 (九州工業大学)

川原田円 (ISAS/JAXA)、岡部信広、梅津敬一 (ASIAA)、滝沢元和 (山形大)、松下恭子 (東京理科大)、深沢泰司 (広島大)、浜名崇、宮崎聡 (NAOJ)、中澤知洋 (東大)、大橋隆哉 (首都大): Abell1689 銀河団周辺部の高温ガスの観測的研究

石崎欣尚、大橋隆哉、江副祐一郎 (首都大)、満田和久、山崎典子、竹井洋、辻本匡弘 (ISAS/JAXA)、杉田寛之、佐藤洋一、篠崎慶亮、岡本篤 (ARD/JAXA)、藤本龍一、星野晶夫 (金沢大)、村上正秀 (筑波大)、田代信、寺田幸功 (埼玉大)、玉川徹、三原建弘、川原田円、山口弘悦 (理研)、北本俊二、村上弘志 (立教大)、R.L. Kelley, C.A. Kilbourne, F.S. Porter (NASA/GSFC)、D.McCammon (ウイスコンシン大)、J.-W. den Herder (SRON)、他 ASTRO-H SXS チーム: ASTRO-H 搭載 精密軟 X 線分光装置 SXS の開発の現状 (III)

石崎欣尚、江副祐一郎、阿部祐輝、大石詩穂子、赤松弘規、大橋隆哉 (首都大)、吉武宏、関谷典央、竹井洋、山崎典子、満田和久 (ISAS/JAXA)、師岡利光 (SII)、田中啓一 (SIINT): 大規模ピクセル TES 型 X 線マイクロカロリメータアレイのための超伝導積層配線の開発

赤松弘規、榎崇利、辺見香理、石崎欣尚、江副祐一郎、大橋隆哉、大橋隼人、神田拓真、石田卓也、田沼肇 (首都大)、篠崎慶亮 (ARD/JAXA)、満田和久 (ISAS/JAXA): TES 型 X 線マイクロカロリメータで挑む電荷交換反応機構の解明－実験計画と進捗状況－

神田拓真、石田卓也、田沼肇、赤松弘規、榎崇利、辺見香理、石崎欣尚、江副祐一郎、大橋隆哉 (首都大)、篠崎慶亮 (ARD/JAXA)、満田和久 (ISAS/JAXA): Si(Li) 検出器による多価イオンの電荷交換分光 II

日本天文学会 2010 年秋季年会 2010 年 9 月 22 日～24 日 (金沢大学)

○赤松弘規、石崎欣尚、大橋隆哉 (首都大)、中澤知洋 (東大): 衝突銀河団 Abell 3667 の温度構造と merger shock による電波レリク

○星野晶夫 (金沢大学)、辺見香里、石崎欣尚、大橋隆哉、河原創 (首都大学東京): 「すざく」衛星による AWM7 銀河団外縁部の観測的研究

○田原 譲、桜井郁也、杉田聡司、紅林優樹 (名古屋大)、大橋隆哉、石崎欣尚、江副祐一郎、佐々木伸、河原創 (首都大)、満田和久、山崎典子、竹井洋 (ISAS/JAXA)、篠崎慶亮 (ARD/JAXA)、須藤 靖 (東京大)、藤本龍一、佐藤浩介 (金沢大)、河合誠之 (東工大)、吉川耕司 (筑波大)、DIOS ワーキンググループ: ダークバリオン探査を目指す小型衛星 DIOS の開発の現状

○大橋隆哉、石崎欣尚、江副祐一郎 (首都大)、藤本龍一、星野晶夫 (金沢大)、満田和久、山崎典子、竹井洋、辻本匡弘 (ISAS/JAXA)、杉田寛之、佐藤洋一、篠崎慶亮、岡本 篤 (ARD/JAXA)、村上正秀 (筑波

大)、田代 信、寺田幸功 (埼玉大)、北本俊二、村上弘志 (立教大)、玉川 徹、山口弘悦 (理研)、太田直美 (東京理科大)、R. L. Kelley, C. A. Kilbourne, F. S. Porter, M. J. DiPirro, P. J. Shirron (NASA/GSFC), D. McCammon (Wisconsin 大), A. Szymkowiak (Yale 大), J.-W. den Herder, C. de Vries (SRON), S. Paltani, M. Pohl (Geneva 大), ほか ASTRO-H SXS チーム: ASTRO-H 搭載 精密軟 X 線分光装置 SXS の開発の現状 (IV)

○石川久美、江副祐一郎、大橋隆哉 (首都大)、山口弘悦 (理研)、藤本龍一 (金沢大)、満田和久 (ISAS/JAXA)、村上正秀 (筑波大)、金尾憲一、吉田誠至、恒松正二 (住友重機械)、Michael DiPirro、Peter Shirron (NASA/GSFC)、他 ASTRO-H SXS チーム: ASTRO-H 搭載 精密軟 X 線分光装置 SXS 用ヘリウム排気系の開発の現状

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

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

○江副祐一郎、大石詩穂子、阿部祐輝、赤松弘規、石崎欣尚、大橋隆哉 (首都大学東京)、吉武宏、関谷典央、竹井洋、山崎典子、満田和久 (JAXA 宇宙研)、師岡利光 (セイコーインスツル)、田中啓一 (エスアイアイナノテクノロジー): 400 ピクセル TES 型 X 線マイクロカロリメータ用超伝導積層配線の開発

極低温冷凍機用ガスギャップ式ヒートスイッチの開発 (3): ○辺見香理、赤松弘規、榎崇利、石崎欣尚、大橋隆哉 (首都大)、星野晶夫 (金沢大)、篠崎慶亮、満田和久 (JAXA)、松尾宏、岡田則夫、大島泰 (国立天文台)

第 11 回宇宙科学シンポジウム、2010 年 1 月 5~7 日 (ISAS/JAXA)

○大橋 隆哉 (首都大理工)、田原 譲 (名大エコトピア研)、満田 和久、山崎 典子 (ISAS/JAXA)、他 DIOS ワーキンググループ: ダークバリオン探査小型衛星 DIOS の開発の現状

○石川久美、江副祐一郎、大橋隆哉 (首都大)、山崎典子、満田和久 (ISAS/JAXA)、藤本龍一 (金沢大)、三好由純 (名古屋大)、寺田直樹 (東北大)、内山泰伸 (スタンフォード大)、二穴喜文 (IRF): 「すざく」衛星による惑星 X 線の観測

○大橋隆哉 (首都大)、R. Mushotzky (U. Maryland)、松下恭子 (東京理科大)、上田佳宏 (京都大)、久保田あや (芝浦工大)、太田直美 (奈良女子大)、内山泰伸 (スタンフォード大)、R. Smith (CfA/SAO)、辻本匡弘、馬場 彩、高橋忠幸 (ISAS/JAXA): ASTRO-H の目指すサイエンス 1

○大橋隆哉 (首都大)、R. Mushotzky (U. Maryland)、松下恭子 (東京理科大)、上田佳宏 (京都大)、久保田あや (芝浦工大)、太田直美 (奈良女子大)、内山泰伸 (スタンフォード大)、R. Smith (CfA/SAO)、辻本匡弘、馬場 彩、高橋忠幸 (ISAS/JAXA): ASTRO-H の目指すサイエンス 2

○満田和久、山崎典子、竹井 洋、辻本匡弘、小川美奈 (ISAS/JAXA)、杉田寛之、佐藤洋一、篠崎慶亮、岡本 篤 (ARD/JAXA)、藤本龍一、星野晶夫 (金沢大)、大橋隆哉、石崎欣尚、江副祐一郎 (首都大)、村上正秀 (筑波大)、田代 信、寺田幸功 (埼玉大)、北本俊二、村上弘志 (立教大)、玉川徹、山口弘悦 (理研)、太田

直美 (東京理科大), R.L. Kelley, C.A. Kilbourne, G. V. Brown, F.S. Porter, G. A. Sneiderman, K. R. Boyce, M. J. DiPirro, P. J. Shirron, K. C. Gentreau (NASA/GSFC), D. McCammon (Wisconsin 大), A. Szymkowiak (Yale 大), J.-W. den Herder, C. de Vries, E Costantini (SRON), S. Paltani, M. Pohl (Geneva 大), 他 ASTRO-H SXS チーム: ASTRO-H 衛星搭載 SXS-XCS 検出器

○藤本龍一 (金沢大), 満田和久, 山崎典子, 竹井洋, 辻本匡弘 (ISAS/JAXA), 杉田寛之, 佐藤洋一, 篠崎慶亮 (ARD/JAXA), 大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎 (首都大), 田代信 (埼玉大), 他 IXO XMS チーム: IXO 搭載 X 線マイクロカロリメータ分光装置 XMS と冷却系

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

○森山 鉄平 (1), 江副 祐一郎 (1), 三石 郁之 (2), 石津 健佑 (1), 小川 智弘 (1), 満田 和久 (2), 山崎 典子 (2), 大橋 隆哉 (1), 洞出 光洋 (3), 杉山 進 (3), Raul Riveros (4), 山口 ひとみ (4), 金森 義明 (5), 森下 浩平 (6), 中嶋 一雄 (6), 前田 龍太郎 (7), (1) 首都大学東京, (2) ISAS/JAXA, (3) 立命館大学, (4) フロリダ大学, (5) 東北大学, (6) 京都大学, (7) 産業技術総合研究所: マイクロマシン技術を用いた超軽量・高角度分解能 X 線光学系の開発

○大石詩穂子, 大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 赤松弘規, 石川久美, 阿部祐輝, 辺見香理, 榎崇利, 榎島陽介, 細谷竜治 (首都大), 満田和久, 山崎典子, 竹井洋, 吉武宏, 関谷典央, 平社航, 酒井和広 (ISAS/JAXA), 藤本龍一, 星野晶夫, 谷津貴裕, 國久哲平, 山本亮 (金沢大), 篠崎慶亮 (JAXA/ARD), 佐藤浩介 (MIT), 前田龍太郎 (産総研), 師岡利光 (セイコーインスツル), 田中啓一 (エスアイアイ・ナノテクノロジー): TES 型 X 線マイクロカロリメータの開発の現状

○平社航, 酒井和広, 満田和久, 山崎典子, 竹井洋, 吉武宏, 関谷典央 (ISAS/JAXA), 大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 赤松弘規, 石川久美, 阿部祐輝, 辺見香理, 大石詩穂子, 榎崇利 (首都大), 原徹 (物質・材料研究機構), 田中啓一 (エスアイアイ・ナノテクノロジー), 師岡利光 (セイコーインスツル): TES 型マイクロカロリメータの信号読み出し系の開発

国際会議

IXO Science Meeting, Paris, France, April 27–29, 2010

T. Ohashi: Missing Baryons and the WHIM (Invited)

Exploring the Extreme Universe, Leicester, UK, July 6–8, 2010

T. Ohashi: The ASTRO-H Mission (Invited)

SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation San Diego, USA Jun 27 – Jul 02, 2010

K.Mitsuda, R.L.Kelley, K.R.Boyce, M.J.DiPirro, Y.Ezoe, R.Fujimoto, J.-W. den Herder, Y.Ishisaki, M.Kawaharada, S.Kitamoto, C.A.Kilbourne, D.McCammon, H.Murakami, M.Murakami, T.Ohashi, M.Pohl, S.Paltani, F.S.Porter, K.Sato, Y.Sato, P.J.Shirron, K.Shinozaki, G.A.Sneiderman, H.Sugita, A.E.Szymkowiak, Y.Takei, T.Tamagawa, S.Tashiro, Y.Terada, M.Tsujimoto, C. de Vries, H.Yamaguchi, N.Y.Yamasaki: The high-resolution x-ray microcalorimeter spectrometer system for the SXS on ASTRO-H

J.W.den Herder, R.Kelley, K.Mitsuda, L.Piro, S.Bandler, P.Bastia, K.Boyce, M.Bruin, L.Colasanti, W.B.Doriese, M.DiPirro, Y.Ezoe, L Ferrari, E.Figueroa-Feliciano, R.Fujimoto ,F.Gatti, K.Gendreau, L.Gottardi, R.den Hartog, H.Hoovers, K.Irwin, Y.Ishisaki, A.Kashani, C.Kilbourne, P.A.J.de Korte, J.van der Kuur, C.Macculi, T.Mineo, T.Ohashi, E Perinati, F.S.Porter, P.Shirron, S.Smith, Y.Takei, M.Tashiro, G.Torrioli , M. Tsujimoto, H.van Weers, N.Y.Yamasaki: The X-ray Microcalorimeter Spectrometer onboard of IXO

R.Fujimoto, K.Mitsuda, N.Yamasaki, K.Shinozaki, Y.Takei, H.Sugita, Y.Sato, T.Ohashi, Y.Ishisaki, Y.Ezoe, K.Ishikawa, M.Murakami, S.Kitamoto, T.Tamagawa, H.Yamaguchi, K.Sato, K.Kanao, S.Yoshida, M.DiPirro, P.Shirron, G.Sneiderman, R.L.Kelley, F.S.Porter, C.A.Kilbourne, J.Crow, A.Mattern, A.Kashani, D.McCammon : Cooling system for the Soft X-ray Spectrometer (SXS) on- board Astro-H

F.S. Porter, J.S. Adams, G.V. Brown, J.A. Chervenak, M.P. Chiao, R. Fujimoto, Y. Ishisaki, R.L. Kelley, C.A. Kilbourne, D. McCammon, K. Mitsuda, T. Ohashi, A.E. Szymkowiak, Y. Takei, M. Tashiro, N. Yamasaki, The detector subsystem for the SXS instrument on the ASTRO-H Observatory

D.N. Burrows, D. Hartmann, C. Kouveliotou, L. Piro, J.-W. den Herder, T. Ohashi, Xenia: cosmo-chemical evolution of the Universe

T. Ohashi, Y. Ishisaki, Y.Ezoe, S. Sasaki, H. Kawahara, K. Mitsuda, N.Y. Yamasaki, Y. Takei, M. Ishida, Y. Tawara, and 9 coauthors DIOS: the diffuse intergalactic oxygen surveyor: status and prospects

T.Takahashi, K. Mitsuda, R.L. Kelley, F. Aharonian, F. Akimoto, S. Allen, N. Anabuki, L. Angelini, K. Arnaud, H. Awaki, and 167 coauthors The ASTRO-H Mission

COSPAR Bremen, German July 18 – July 25, 2010

K. Sato, K. Matsushita, Y. Ishisaki, N. Yamasaki, M. Ishida, T. Ohashi: Suzaku observations of the metallicity in the intracluster medium of groups and clusters of galaxies

Y.Ezoe, K.Ishikawa, T.Ohashi, N.Y.Yamasaki, K.Mitsuda, R.Fujimoto, Y.Miyoshi, N.Terada, Y.Uchiyama, Y.Futaana: Solar system planets observed with Suzaku

Applied Superconductivity Conference Washington D.C., USA August 1–6, 2010

Y.Ezoe, Y.Ishisaki, S.Oishi, Y.Abe, T.Ohashi, H.Yoshitake, N.Sekiya, N.Y.Yamasaki, K.Mitsuda, T.Morooka, K.Tanaka: Development of Multilayer Readout Wiring for Large-format TES X-ray Microcalorimeter Arrays

Optical MEMS, Sapporo, Japan August 9–12, 2010

Y.Ezoe, I.Mitsuishi, K.Ishizu, T.Moriyama, K.Mitsuda, N.Y.Yamasaki, T.Ohashi, M.Horade, S.Sugiyama, R.E.Riveros, T.Boggs, H.Yamaguchi, Y.Kanamori, N.T.Gabriel, J.J.Talghader, K.Morishita, K.Nakajima, R.Maeda: MEMS-Based X-ray Optics for Future Astronomical Missions

I.Mitsuishi, Y.Ezoe, K.Ishizu, T.Moriyama, Y.Maeda, T.Hayashi, T.Sato, M.Mita, N.Y.Yamasaki, K.Mitsuda, M.Horade, S.Sugiyama, R.E.Riveros, T.Boggs, H.Yamaguchi, Y.Kanamori, K.Morishita, R.Maeda: X-Ray Imaging Test for a Single-Stage MEMS X-Ray Optical System

Optical MEMS, Sapporo, Japan August 9–12, 2010

Y.Ezoe, I.Mitsuishi, K.Ishizu, T.Moriyama, K.Mitsuda, N.Y.Yamasaki, T.Ohashi, M.Horade, S.Sugiyama, R.E.Riveros, T.Boggs, H.Yamaguchi, Y.Kanamori, N.T.Gabriel, J.J.Talghader, K.Morishita, K.Nakajima, R.Maeda: MEMS-Based X-ray Optics for Future Astronomical Missions

I.Mitsuishi, Y.Ezoe, K.Ishizu, T.Moriyama, Y.Maeda, T.Hayashi, T.Sato, M.Mita, N.Y.Yamasaki, K.Mitsuda, M.Horade, S.Sugiyama, R.E.Riveros, T.Boggs, H.Yamaguchi, Y.Kanamori, K.Morishita, R.Maeda: X-Ray Imaging Test for a Single-Stage MEMS X-Ray Optical System

Charge Exchange Madrid Madrid, Spain September 29– October 1, 2010

Y.Ezoe, R.Fujimoto, N.Y.Yamasaki, K.Mitsuda, T.Ohashi, K.Ishikawa, S.Oishi, Y.Miyoshi, N.Terada, Y.Futaana, S.F.Porter, G.Brown: Suzaku observations of charge exchange emission from solar system objects

H. Akamatsu, T. Enoki, K. Henmi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, T. Ohashi, T. Kanda, T. Ishida, H. Tanuma, H.Ohashi, K.Shinozaki, K.Mitsuda: Challenge to reveal Solar Wind Charge Exchange mechanism with TES X-ray microcalorimeter and TMU-ECRIS

H. Tanuma, H. Akamatsu, T. Enoki, K. Henmi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, T. Ohashi, T. Kanda, T. Ishida, H.Ohashi, K.Shinozaki, K.Mitsuda: Laboratory Experiments of Solar Wind Charge Exchange in Soft X-Ray Spectroscopy

item NASA LAW Gatlinburg, USA October 25–28, 2010

H. Akamatsu, T. Enoki, K. Henmi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, T. Ohashi, T. Kanda, T. Ishida, H. Tanuma, H.Ohashi, K.Shinozaki, K.Mitsuda: Laboratory Experiments of Solar Wind Charge Exchange with TMU-ECRIS and TES Micro-calorimeter

International Workshop on Astronomical X-ray Optics, Prague, Czech December 8–10, 2010

Y.Ezoe, K.Mitsuda, T.Ohashi, M.Mita, I.Mitsuishi, U.Takagi, K.Ishizu, T.Moriyama, K.Morishita, K.Nakajima, Y.Kanamori, R.E.Riveros, H.Yamaguchi, M.Horade, S.Sugiyama, R. Maeda: Recent progress in MEMS X-ray Optics

AGU Fall meeting, San Francisco, CA, USA December 14–18, 2009

K. Ishikawa, Y. Ezoe, T. Ohashi, N. Terada, Y. Futaana: Investigation of X-ray emission from Martian exosphere at solar minimum with Suzaku

Present Status and Future Prospects in X-ray Astronomy, Rome, Italy, March 14–16, 2011

T. Ohashi: IXO and WHIM (Invited)

光物性サブグループ

1. 研究活動の概要

1) 単層カーボンナノチューブの光電子分光

直径約 0.8 nm の極細単層カーボンナノチューブ (SWCNT) の高純度バッキーペーパー (主にカイラリティ (6, 5) と (7, 5) の SWCNT) を作製し、光吸収と高分解能光電子分光で電子状態を調べた。van Hove 特異点 (VHS) による構造のエネルギー位置は、理論計算から予想される位置とは最大 0.2 eV 程度異なっていた。また、VHS のエネルギー位置の実験値と理論値との違いは、SWCNT の直径が細くなるほど大きくなることも分かった。これは状態密度への曲率の影響によると考えられる。さらに、VHS のエネルギー位置の試料基板依存性も調べた。仕事関数の異なる Cu と Y 金属の試料基板を用いて、SWCNT の光電子スペクトルを測定した。基板金属によって VHS 位置がシフトすることが分かったので、今後は Pt などの試料基板を用いた実験も行う予定である。

2) 逆光電子分光

逆光電子分光装置の制御コンピュータの更新にともない制御プログラムを改良した。具体的には、デジタル電圧計とステッピングモーター使用による入射電子のエネルギー精密制御方法、測定中におけるディスプレイへの経過表示方法などの改良である。その結果、以前より自動測定がしやすくなったので、今後は金属型カーボンナノチューブの非占有電子状態の観測などを行う。

2. 研究業績

1) 論文

J. Ishikawa, T. Miyahara, Y. Hirato, H. Ishii, T. Kodama, K. Kikuchi, T. Nakamura, K. Kodama, D. Asakura and T. Koide: MCD study on Ce@C₈₂ and Ce₂@C₈₀ in the soft X-ray region, *J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena* Online February 8 (2011).

2) 学会講演

● 日本物理学会第 65 回年次大会 2010 年 3 月 20 日～3 月 23 日 (岡山大学津島キャンパス)

宮尾智章, 奥村修一, 松本和也, 石井廣義, 真庭豊, 柳和宏, 片浦弘道: 金属及び半導体カーボンナノチューブの光電子分光

● 第 24 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム 2011 年 1 月 7 日～1 月 10 日 (つくば国際会議場)

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

国際会議

● The 15th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation, March 3-4, 2011, Hiroshima, Japan

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

● 37th international Conference on Vacuum Ultra Violet and X-ray Physics, July 11-16 2010, Vancouver, Canada

J. ishikawa, T. Miyahara, Y. Hirato, H. Ishii, T. Kodama, K. Kikuchi, T. Nakamura, K. Kodama, D. Asakura and T. Koide: MCD study on Ce@C₈₂ and Ce₂@C₈₀ in the soft X-ray region

電子物性研究サブグループ

1. 研究活動の概要

1) *f*-電子に起因する新規な強相関現象や量子状態の探索と究明

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

1-1) $YbFe_4P_{12}$ の純良単結晶育成と物性評価

$YbFe_4P_{12}$ は、多結晶試料を用いた測定から、近藤効果を示唆する電気抵抗極小が ~ 50 K に現れ、帯磁率の温度依存性から見積もった有効ボーア磁子数が $3.58\mu_B$ と中間原子価的であることなど、興味深い特性を示唆する報告がなされている。しかし、電気抵抗の絶対値が大き過ぎるなどの問題点が指摘され、十分な研究が進んでいない。我々は、これまで単結晶化の試みを続けていたが、最近ようやく単結晶育成に成功し、物性測定を開始した。

1-2) $SmRu_4As_{12}$ 及び $SmOs_4As_{12}$ の新奇特性の探索

これらの化合物については、誰も成功していなかった結晶合成に昨年度初めて成功した。本年度、両者の初めての磁気特性、比熱、電子輸送特性の測定を行い、ともに2段階相転移を示すことを見出した。高温側 (~ 9 K) の転移は、両物質でほぼ同じ転移温度を持ち、磁場に鈍感であり、比熱の温度変化が類似していることから、構造相転移の可能性を検討している。一方、低温側の相転移では、後者は単純な強磁性転移 (~ 5 K) を示すのに対し、前者の転移 (~ 2.3 K) の磁場-温度相図の振舞いは、磁気双極子以外の自由度によることを示しており、より詳細な検討を進めている。

1-3) $Yb_xFe_4Sb_{12}$ の磁氣的基底状態に関する矛盾の解明

RFe_4Sb_{12} (R:希土類) とその一部置換系は熱電材料としての可能性の観点から研究されてきた。その中で $Yb_xFe_4Sb_{12}$ は基礎物理学的にも興味深い特性が報告されたため多くの研究がなされたが、報告者により磁気基底状態が強磁性、非磁性と大きく異なり、その原因としての Yb の充填率の違いが議論された。我々は、高圧下で充填率のほぼ完全な単結晶試料の育成に成功し、基礎物性の詳細な評価を行った。その結果、基底状態が非磁性であること、磁気基底状態と電子状態密度充填率の明確な相関を明らかにした。

1-4) $YbOs_4Sb_{12}$ の純良単結晶育成と初めての基礎物性評価

ROs_4Sb_{12} は、初めての Pr 系重い電子超伝導体 $PrOs_4Sb_{12}$ 、磁場に鈍感な重い電子物質 $SmOs_4Sb_{12}$ など、興味深い物質系でありながら、結晶育成の困難さから格子定数以外の報告は成されていなかった。我々は、常圧下・高圧下での単結晶育成に成功し、磁化測定を行い Yb 価数がほぼ 2 価である結果を得た。

1-5) $(Sm_xLa_{1-x})Os_4Sb_{12}$ における重い電子状態の Sm イオン濃度依存

$SmOs_4Sb_{12}$ における磁場の影響を受けない重い電子状態は、我々が 2005 年に見出した現象である (S.

Sanada *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 246 (2005) にて報告。第 15 回日本物理学会論文賞受賞)。この重い電子状態の形成メカニズムとして、Sm イオンのラトリング原子振動、または、Sm イオンが持つ 4f 電子の多極子等の自由度が重要な役割を果たしている可能性が指摘されているが、現在未解明の状況にある。昨年度に引き続き、4f 電子を含まない $\text{LaOs}_4\text{Sb}_{12}$ との合金系 $(\text{Sm}_x\text{La}_{1-x})\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$ の単結晶試料を用いた基礎物性測定により、重い電子状態の Sm 濃度依存を調べた。 x の減少と共に、重い電子の有効質量を反映する電子比熱係数 γ が徐々に減少していくことがわかった。この γ 値は、全ての Sm イオン濃度領域で磁場依存を見せないことから、磁場の影響を受けない準粒子の特性が Sm 低濃度領域まで残っていることが明らかとなった。

1-6) 超伝導体 $\text{Pr}(\text{Os}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sb}_{12}$ のピーク効果とラトリング-4f 電子結晶場励起の束縛状態の探索

非従来型の重い電子超伝導体 $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ と従来型超伝導体 $\text{PrRu}_4\text{Sb}_{12}$ との合金系 $\text{Pr}(\text{Os}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sb}_{12}$ の単結晶試料を用いて、その超伝導機構の解明を目指した研究を昨年度に引き続き行った。今年度は、交流帯磁率測定によるピーク効果の x 依存性を調べ、非従来型超伝導を特徴付けると考えられるピーク効果が、 $x > 0.2$ において消失していることを見出した。この振る舞いは、電子比熱係数 γ や強結合性の x 依存とも良く相関していることが明らかとなった。また、昨年度、Pr イオンの局所原子振動（ラトリング）の励起エネルギーがほとんど Ru 濃度 x に依存しない一方で、結晶場励起エネルギーが x とも大きく増大し、 $x = 0.68$ 近傍で両者の励起エネルギーが交差することを見出した。ここでは両者が束縛状態を形成している可能性があることを指摘した（超伝導転移温度 T_c がこの濃度で極小を示すことから、超伝導機構に関与している可能性がある）。その後、P.Thalmeier 氏により理論計算が報告されたように、ラトリング励起がエネルギー分裂している可能性があり、このことを確認するために、非弾性 X 線散乱実験による $\text{Pr}(\text{Os}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sb}_{12}$ のラトリング励起の測定を、高輝度光科学研究センターの筒井智嗣氏と共に、SPring-8 のビームライン BL35XU を用いて開始した。観測された $x = 0.68$ のフォノンスペクトルから、ラトリング励起のピークの半値巾が低温で増大することを観測した。このような半値巾の温度依存性は、これまでに $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ において観測されておらず、束縛状態の形成に起因した異常である可能性がある。今後、ラトリング励起の x 依存性や温度依存性を詳細に調べ、本現象の初めての実験的観測を目指す予定である。

1-7) $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ における 4f 電子と原子核スピンの複合状態形成の発見

$\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ の低温電荷秩序相内において、Pr イオンの 3 重縮退した結晶場基底状態が、原子核スピン状態（6 重縮退）と超微細相互作用を通して結合することにより、両者が複合した特異な量子状態が形成されていることを見出した。この複合状態を持つイオンが結晶中で規則正しく配列している状態の観測は、固体中では初めてである。不純物の非常に少ない純良な $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ 単結晶試料を用いて比熱と磁化の高精度測定を行い、この新奇な複合状態の形成の証拠となる振る舞いを観測した。比熱の温度依存に現れるピーク（ゼロ磁場中では 0.3K）は、分裂した複数の多重項が形成されていることの証拠であり、磁場を印加していくと、約 0.3T を境に高温側へ移動し始める。この振る舞いは、超微細相互作用が支配的な低磁場領域から、外部磁場が支配的な高磁場領域への移り変わりとして理解できる（Paschen-Back 効果）。磁化の温度依存や磁場依存に見られる特徴的な異常も、同様にほぼ定量的に説明された。

なお、本年度の充填スクッテルダイトに関する研究は、東京医科大学：並木孝洋講師、茨木大学：桑原慶太郎准教授ほか、国内外の多くの方々との共同研究として進められた。

1-8) 新規カゴ状物質 $\text{RT}_2\text{Al}_{20}$ (R :希土類、 T :遷移金属) の純良単結晶育成と物性評価

新規カゴ状物質 $\text{RT}_2\text{Al}_{20}$ は 16 個の Al サイトによって構成されるカゴの中に R サイトが位置するカゴ状構造をしており、一方、 T サイトは三角形を基本とした幾何学的フラストレーションを内在したパイクロア構造をしており、二つの特徴的な構造が共存している。そのため、両方の構造に起因する物理が絡み合った興味深い現象の実現が期待されており、実際に様々な物質において強相関電子物性の発

現が相次いで報告されている。今年度は、昨年度単結晶合成に成功した $\text{PrNb}_2\text{Al}_{20}$, $\text{SmTi}_2\text{Al}_{20}$ について、抵抗、ホール係数、磁化、比熱測定を行い、詳細に研究を行った。実験結果より、 $\text{PrNb}_2\text{Al}_{20}$ については、40 K 付近から近藤効果を示唆する抵抗の上昇が観測され、非磁性基底状態を持つにもかかわらず重い電子状態を示すことを明らかにした。また、150 mK まで秩序を示さないため、四極子 (非磁性) 近藤効果が実現する候補物質として期待される。 $\text{SmTi}_2\text{Al}_{20}$ についてはこの物質も同様に近藤効果を示唆する抵抗の上昇を示し、 $T = 6.5$ K に何らかの磁気転移を起こすことを見いだしたが、その転移温度がほとんど磁場に依存しないため、その基底状態の詳細に興味を持たれる。今後、これらの物質の研究をさらに進める予定である。

1-9) 幾何学的フラストレート磁性体における異常基底状態の探索

パイロクロア酸化物 $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ は、 $\theta_{\text{CW}} \sim -14$ K のキュリーワイス温度を持つにも関わらず 20 mK まで長距離秩序を示さず、スピン液体状態を実現していると考えられているが、詳細な基底状態はまだ理解されていない。最近、この物質の基底状態は、結晶場第一励起状態の混成によって古典的なスピニアイス配置状態が量子力学的に重ね合わさった状態で表現される、量子スピニアイス状態であるという理論的な提案がなされた。昨年度の我々の極低温磁化測定実験より本研究物質においてもスピニアイス同様異方的な磁化を観測し、幾何学的フラストレーションを示唆する磁気プラトーが存在することを確認した。それより、ほぼ間違いなく量子スピニアイス状態が実現していることを明らかにしたが、その描像では一見説明できない異常がまだ存在する。本年度は、[100], [110], [111] 方向の極低温磁場中比熱測定を行い、量子スピニアイス状態の詳細の研究を行った。その結果、通常のスピニアイスと類似した磁気温度相図を示すことを見出し、未解明であった異常が量子スピニアイス状態への相転移である可能性を示唆する実験結果を得た。

2. 研究業績

1) 論文

S. Tatsuoka, M. Watanabe, B. Suemitsu, Y. Ogawa, A. Yamada, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko, R. Higashinaka, Y. Aoki, T. Namiki, K. Kuwahara, and H. Sato: Response of Itinerant-Electron Weak Ferromagnet $\text{LaFe}_4\text{As}_{12}$ to Pressure and Magnetic Field, *J. Phys. Soc. Jpn.* **79** (2010) 063704 (4 p).

P A Rayjada, A Chainani, M Matsunami, M Taguchi, S Tsuda, T Yokoya, S Shin, H Sugawara and H Sato: Kondo scaling of the pseudogap in $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$ and $\text{CeFe}_4\text{P}_{12}$, *J. Phys.: Condens. Matter* **22** (2010) 095502 (8 p).

K. Kuwahara, K. Tanaka, T. Saito, S. Tatsuoka, K. Iwasa, M. Watanabe, Y. Aoki, H. Sato, M. Kohgi, K. Iwasa, H. Sugawara, C. Stock, D. T. Adroja: Crystal field excitations in $\text{PrFe}_4\text{Sb}_{12}$ synthesized under high pressure, *J. Physics: Conference Series* **200** (2010) 012101 (4 p).

R. Miyazaki, Y. Aoki, D. Kikuchi, H. Sugawara, and H. Sato: Crossing of the crystalline-electric-field and rattling-phonon excitation energies in the filled skutterudite superconductor $\text{Pr}(\text{Os}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sb}_{12}$, *Journal of Physics: Conference Series* **200** (2010) 012125 (5 p).

S. Tsutsui, H. Uchiyama, J. P. Sutter, A. Q. R. Baron, H. Sugawara, J. Yamaura, Z. Hiroi, A. Ochiai, and H. Sato: Rare-earth Atom Motions in $\text{ROs}_4\text{Sb}_{12}$ ($R = \text{La}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}$), *Journal of Physics: Conference Series* **200** (2010) 012213 (5 p).

M. Watanabe, K. Tanaka, S. Tatsuoka, T. Saito, R. Miyazaki, K. Takeda, T. Namiki, K. Kuwahara, R. Higashinaka, Y. Aoki and H. Sato: Transport Properties in Filled Skutterudite $\text{GdRu}_4\text{P}_{12}$, Journal of Physics: Conference Series **200** (2010) 012222 (4 p).

T. Osakabe, K. Kuwahara, D. Kawana, K. Iwasa, D. Kikuchi, Y. Aoki, M. Kohgi, and H. Sato: Pressure-Induced Antiferromagnetic Order in Filled Skutterudite $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ Studied by Single-Crystal High-Pressure Neutron Diffraction, J. Phys. Soc. Jpn. **79** (2010) 034711 (7 p).

T. U. Ito, W. Higemoto, K. Ohishi, K. Satoh, Y. Aoki, S. Toda, D. Kikuchi, H. Sato, and C. Baines: Microscopic study of antiferromagnetic ground state and possible high-field ordered state in $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$ using muon spin rotation and relaxation, Phys. Rev. B **82** (2010) 014420.

E. Bauer, H. Michor, T. Muramatsu, T. Kanemasa, T. Kagayama, K. Shimizu, Y. Aoki, H. Sato and M. Giovannini: Occurrence of two quantum critical points in $\text{Yb}_2\text{Pd}_2\text{Sn}$ or, Yb systems do not behave mirror-like to Ce compounds, J. Optoele. Adv. Mater. **10** (2008) 1633.

D. E. MacLaughlin, A. D. Hillie, J. M. Mackie, Lei Shu, Y. Aoki, D. Kikuchi, H. Sato, Y. Tunashima and H. Sugawara: Comment on "Pronounced Enhancement of the Lower Critical Field and Critical Current Deep in the Superconducting State of $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ ", Phys. Rev. Lett. **105**, 019701 (2010) [1 pages].

H. Sato, K. Tanaka, D. Kikuchi, T. Namiki, R. Higashinaka, Y. Aoki, M. Kohgi, H. Sugawara, K. Kuwahara, K. Iwasa: Current understanding of the heavy fermion superconductivity in $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$, PhysicaC **470** (2010) S525-S528.

Y. Aoki, A. Imamura, R. Miyazaki, T. Saito, R. Higashinaka, I. Umegaki, T. Fukuhara, and H. Sato: Pr deficiency effect on the heavy fermion superconductor $\text{Pr}_x\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$, PhysicaC **470** (2010) S545-S547.

T. Yamashita, S. Ohara, Y. Aoki, R. Miyazaki, I. Sakamoto: Non-Fermi-Liquid Behavior in Electronic Specific Heat of Heavy-Fermion Superconductor Ce_2CoIn_8 , PhysicaC **470** (2010) S556-S557.

Lei Shu, W. Higemoto, Y. Aoki, A. D. Hillier, K. Ohishi, K. Ishida, R. Kadono, A. Koda, O. O. Bernal, D. E. MacLaughlin, Y. Tunashima, Y. Yonezawa, S. Sanada, D. Kikuchi, H. Sato, H. Sugawara, T.U. Ito and M. B. Maple: Suppression of time reversal symmetry breaking superconductivity in $\text{Pr}(\text{Os,Ru})_4\text{Sb}_{12}$ and $(\text{Pr,Lu})\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$, Phys. Rev. B **83**, 100504(R) (2011).

2) 学会講演

● 日本物理学会第 65 回年次大会 2010 年 3 月 20 日～3 月 23 日 (岡山大学津島キャンパス)

青木勇二, 並木孝洋, S.R. Saha, 菅原仁, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ の低温非金属相における Pr 三重項基底状態

松平和之, 関根ちひろ, 分島亮, 日夏幸雄, 並木孝洋, 武田圭生, 城谷一民, 菅原仁, 菊池大輔, 佐藤英行: 充填スクッテルダイトの格子比熱に関する系統的研究

龍岡翔, 渡辺慎, 末光文也, 山田篤, 松林和幸, 上床和也, 小河誉典, 東中隆二, 桑原慶太郎, 青木勇二, 佐藤英行: 遍歴電子強磁性体 $\text{LaFe}_4\text{As}_{12}$ 単結晶の圧力効果と異方性

浅木謙治, 小手川恒, 藤秀樹, 龍岡翔, 東中隆二, 並木孝洋, 佐藤英行: 遍歴強磁性体 $\text{LaFe}_4\text{As}_{12}$ の圧力下 NQR/NMR による研究

並木孝洋, 武田賢樹, 小河誉典, 龍岡翔, 東中隆二, 青木勇二, 佐藤英行, 大岩潔: 充填スクッテルダイト化合物 $\text{SmFe}_4\text{As}_{12}$ の高圧合成法を用いた単結晶育成と電子物性

深澤英人, 近藤健二, 長島亮, 小堀洋, 渡辺慎, 東中隆二, 青木勇二, 佐藤英行: 単結晶 $\text{GdRu}_4\text{P}_{12}$ の ^{101}Ru -NQR

荻田典男, 長谷川巧, 菅原仁, 菊池大輔, 佐藤英行, 宇田川眞行: Pr スクッテルダイト化合物のラマン散乱 II

宮崎亮一, 東中隆二, 青木勇二, 菅原仁, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト $\text{Pr}(\text{Os}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sb}_{12}$ における重い電子超伝導特性

畠山和也, 宮崎亮一, 青木勇二, 東中隆二, 佐藤英行: 高圧フラックス法で作製された充填スクッテルダイト $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$ の低温物性

小河誉典, 龍岡翔, 武田賢樹, 渡辺慎, 並木孝浩, 東中隆二, 青木勇二, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト化合物 $\text{CeFe}_4\text{As}_{12}$ の高圧下单結晶育成と物性評価

武田賢樹, 小河誉典, 渡辺慎, 並木孝洋, 東中隆二, 青木勇二, 佐藤英行: As 系充填スクッテルダイト化合物の高圧下における単結晶育成と物性評価

末光文也, 宮崎亮一, 青木勇二, 東中隆二, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ の磁場に鈍感な重い電子状態の La 置換効果

宮澤和己, 荒木新吾, 小林達生, 小手川恒, 菊池大輔, 菅原仁, 佐藤英行: $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ の高圧下比熱測定

松村政文, 東中隆二, 青木勇二, 佐藤英行: 高圧フラックス法による充填スクッテルダイト $\text{YbFe}_4\text{P}_{12}$ の結晶育成とその物性

● 日本物理学会第 2010 年秋季大会 2010 年 9 月 23 日~9 月 26 日 (大阪府立大中百舌鳥キャンパス)

松村政文, 渡辺慎, 畠山和也, 小河誉典, 末光文也, 武田賢樹, 中間章浩, 並木孝洋, 東中隆二, 青木勇二, 佐藤英行: 高圧フラックス法による充填スクッテルダイト $\text{YbFe}_4\text{P}_{12}$ の単結晶育成とその物性

中間章浩, 佐藤英行, 青木勇二, 東中隆二, 渡辺慎, 安藤誠: $\text{YbT}_2\text{Al}_{20}$ ($\text{T}=\text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}$) の単結晶育成と物性測定

東中隆二, 中間章浩, 安藤誠, 渡辺慎, 青木勇二, 佐藤英行: カゴ状物質 $\text{RNb}_2\text{Al}_{20}$ ($\text{R}=\text{La}, \text{Pr}$) の単結晶育成と低温物性測定

畠山和也, 青木勇二, 東中隆二, 並木孝洋 A, 佐藤英行: 高圧フラックス法によって作製された充填スクッテルダイト化合物 $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$ の低温物性

小河誉典, 龍岡翔, 武田賢樹, 並木孝浩, 末光文也, 畠山和也, 松村政文, 東中隆二, 青木勇二, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト化合物 $\text{CeFe}_4\text{As}_{12}$ の高圧下单結晶育成と物性評価

折原敏彦, 岩佐和晃, 村上洋一, 菅原仁, 桑原慶太郎, 田中謙弥, 齊藤隆志, 龍岡翔, 岩佐圭祐, 渡辺慎, 青木勇二, 佐藤英行, 神木正史: 合成法の異なる $\text{Pr}_x\text{Fe}_4\text{Sb}_{12}$ の磁性に関する中性子散乱実験による研究

並木孝洋, 前田達矢, 小河誉典, 東中隆二, 青木勇二, 佐藤英行, 大岩潔: 新規充填スクッテルダイト化合物 $\text{SmRu}_4\text{As}_{12}$ の高圧合成法による単結晶育成とその特性評価

前田達矢, 並木孝洋, 東中隆二, 青木勇二, 佐藤英行: 高圧フラックス法による新物質 $\text{SmOs}_4\text{As}_{12}$ の単結晶育成と電子物性測定

末光文也, 宮崎亮一, 青木勇二, 東中隆二, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト $\text{Sm}_x\text{La}_{1-x}\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$ の磁場に鈍感な重い電子状態

川崎靖広, 宮澤和己, 荒木新吾, 池田陽一, 小林達生, 小手川恒, 菅原仁, 菊池大輔, 佐藤英行: 高圧下における $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ の交流比熱測定

筒井智嗣, 内山裕士, John P. Sutter, Alfred Q.R. Baron, 菅原仁, 山浦淳一, 佐藤英行: $\text{ROs}_4\text{Sb}_{12}$ (R: 軽希土類) の X 線非弾性散乱

吉澤正人, 七宮史崇, 三田村裕幸, 中西良樹, 菅原仁, 榊原俊郎, 金道浩一, 佐藤英行: $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$ のパルス磁場中の弾性定数測定

松島育夫, 宮田和明, 正司康, 岡村英一, 菅原仁, 佐藤英行, 森脇太郎, 池本夕佳: $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ の高圧下における光学伝導度と金属絶縁体転移

大原繁男, 山下哲朗, 宮崎亮一, 青木勇二, 宗像孝司, 松林和幸, 上床美也, 坂本功: 近藤格子反強磁性体 YbNi_3Al_9 の磁性と伝導

宮崎亮一, 青木勇二, 山下哲郎, 大原繁男, 坂本功: 近藤格子反強磁性体 YbNi_3Al_9 の比熱および磁気熱量測定

青木勇二: Sm スクッテルダイトにおける磁場に鈍感な重い電子状態 (シンポジウム主題「ラットリングと超伝導・重い電子」)

国内研究会

● 新学術領域研究「重い電子系の形成と秩序化」ワークショップ 2010年8月1日～8月2日 (高知大学 朝倉キャンパス)

東中隆二、中間章浩、宮崎亮一、安藤誠、渡辺慎、青木勇二、佐藤英行: Single crystal growth and physical properties of $\text{YbT}_2\text{Al}_{20}$ ($T = \text{Ti, V, Cr}$) and $\text{PrNb}_2\text{Al}_{20}$

● 第4回物性科学領域横断研究会—凝縮系科学の最前線— 2010年11月13日～11月15日 (東京大学武田ホール)

東中隆二、中間章浩、末光文也、宮崎亮一、青木勇二、佐藤英行: カゴ状物質 $\text{PrNb}_2\text{Al}_{20}$ の単結晶育成と低温物性測定

中間章浩、東中隆二、宮崎亮一、末光文也、青木勇二、佐藤英行: カゴ状金属間化合物 $\text{LaNb}_2\text{Al}_{20}$ の超伝導特性

宮崎亮一、青木勇二、東中隆二、菅原仁、佐藤英行: 非従来型超伝導体 $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ における Ru 置換効果

国際会議

● International conference on Strongly Correlated Electron Systems 2010 (SCES 2010) Santa Fe, New Mexico, USA, June. 28 – July 2, 2010

R. Higashinaka, A. Nakama, M. Ando, M. Watanabe, Y. Aoki and H. Sato: Magnetic and transport properties of $RT_2\text{Al}_{20}$ (R = rare earth, T = transition metal, X = V, Cr, Nb)

● International conference on Heavy Electrons 2010 (ICHE2010) Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Sep. 17 – 20, 2010

Y. Aoki, S. Sanada, D. Kikuchi, H. Sugawara and H. Sato: Temperature-dependent development of the magnetic-field-insensitive heavy-fermion state in $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$

R. Higashinaka, A. Nakama, M. Ando, M. Watanabe, Y. Aoki and H. Sato: Single crystal growth and low temperature properties of $R\text{Nb}_2\text{Al}_{20}$ (R = La, Pr)

B. Suemitsu, R. Miyazaki, Y. Aoki, R. Higashinaka and H. Sato: La-substitution effect on the heavy fermion state in filled skutterudite $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$

Y. Ogawa, S. Tatsuoka, T. Namiki, K. Hatakeyama, M. Matsumura, R. Higashinaka, Y. Aoki, and H. Sato: Physical properties of $\text{CeFe}_4\text{As}_{12}$ single crystal grown under high pressure

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

K. Hatakeyama, Y. Aoki, R. Higashinaka, H. Namiki and H. Sato: Physical properties of Filled skutterudite $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$ grown under high pressure

A. Nakama, R. Higashinaka, M. Ando, M. Watanabe, Y. Aoki and H. Sato: Physical properties in single crystals of $\text{YbT}_2\text{Al}_{20}$ (T = Ti, V, Cr)

M. Matsumura, M. Watanabe, K. Hatakeyama, Y. Ogawa, B. Suemitsu, K. Takeda, A. Nakama, T. Namiki, R. Higashinaka, Y. Aoki and H. Sato: Single crystal growth of $\text{YbFe}_4\text{P}_{12}$ by the flux method under high pressure (~ 4 GPa)

● International Conference on Core Research and Engineering Science of Advanced Materials & Third International Conference on Nanospintronics Design and Realization, Osaka, Japan, May 30 - June 5, 2010

H. Sato: Recent results on filled skutterudite single crystals flux-grown under high pressures (Invited talk)

● International Workshop on “On the Heavy-Fermion road”, Paris, France, August 30 - September 1, 2010

H. Sato: Possible multipole order in new filled skutterudites (Invited talk)

● The International Workshop on “ Resonating Valence Bond Physics: Spin Liquids and Beyond ” ,
Budapest, Hungary, October 13 -15, 2010

H. Sato: Attractive behaviors of 4f-electrons in the cage-type compounds: Filled skutterudite $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$
(Invited talk)

ナノ物性Iサブグループ

1. 研究活動の概要

カーボンナノチューブ (CNT)、ゼオライト、フラーレン、ボロンクラスターなどのナノメートルサイズの構造を有する物質系は、バルク物質では見られない興味深い性質を示す。本グループでは、このようなナノ構造物質系において、新規物性の探索と開発、およびその発現機構を物性実験の種々の手法—核磁気共鳴 (NMR)、X線回折、磁化測定、比熱、広帯域インピーダンス測定、計算機実験など—を用いて研究している。2010年度 (平成22年度) の主な研究・教育活動の概要は次のとおりである。

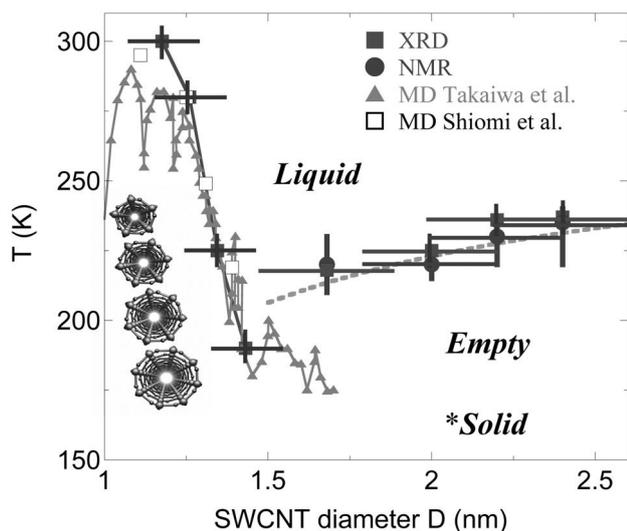
1) 単層カーボンナノチューブ (SWCNT) 内の水

1 cm³ の水も 1 mm³ の水もその性質はほとんど変わらない。さらにその10分の1、100分の1の体積の水でも、バルクの性質からほんの僅かしか変化しないだろう。しかし、水分子数個分程度—1ナノメートル (nm) 程度—の極端に小さな空間に閉じ込めたらどうなるか。このよう微小な空間内に “強く” 拘束された水は、実際、生体内や地殻などに多数存在し、その性質や機能の発現に重要な役割を担っている。また、燃料電池で使われるプロトン伝導膜などにおけるプロトン伝導機構の研究や極微小の誘電体の設計など、応用科学の観点からも興味深い。

本研究グループでは、単層カーボンナノチューブ (SWCNT) と水の複合系の研究を行っている。SWCNTは、原子レベルで均一な、サブナノメートルから数ナノメートル径の疎水的な円筒空洞を有するため、円筒空洞内に束縛された水の挙動を系統的に調べる理想的な物質である。これまでの研究により、平均直径1.17~1.44 nmのSWCNT内に、水は室温・飽和蒸気圧以下で容易に吸着されること、この水は低温でアイスナノチューブと呼ばれるチューブ状の新しい構造の氷になること、このアイスナノチューブの融点の空洞径依存性は、よく知られたバルク領域における融点の空洞径依存性 (ケルビン式の変形で記述される) と逆の振る舞いを示すこと、などを明らかにしてきた。すなわち、SWCNT直径をどんどん大きくするとバルク領域の振る舞いにつながると考えられるから、バルク領域と分子スケール領域との間で、水の性質が不連続的に変化するものと予測される。(バルクとミクロのクロスオーバー) このクロスオーバー領域での水の相挙動の詳細を明らかにする目的で、これまで分子動力学計算、放射光を用いたX線回折実験、NMR実験などを行ない、SWCNTの有限長効果など質的に新しい構造や現象の発現が明らかになりつつあるが、本年度は特に、これまで行ってきた、クロスオーバー領域を含む平均直径2.4 nmまでのSWCNTの研究を総合して、SWCNT直径と温度に関する、水のグローバル相図の提案を行った (図)。図に示すように、直径が1.5 nm以上のSWCNT内の水では、バルクのキャピラリー内の水と類似した、直径に反比例する相転移挙動が見られたが、詳細な解析の結果、この相転移は、バルク水におけるような液体-固体転移ではなく、CNT内の水の wet-dry 転移であることが明らかとなった。すなわち、この相転移線より高温では、水は液体的でありSWCNT内に内包されているが、低温側では、SWCNT内から外部に放出されることがわかった。また、SWCNTの開口処理として行われる空气中酸化処理がSWCNTのバンドル構造などに及ぼす効果を調べ、太いSWCNTで見出された相挙動がSWCNTの開口処理の条件によらないことを確認した (石田卒業研究、伊波修士論文)。一方、1次元空洞の単層カーボンナノチューブ (SWCNT) に対して、グラフェン構造壁からなる3次元多孔性物質、グラファイト鋳型炭素 (ZTC) を用いた比較研究もスタートした。

2) 新しい酸素固体とその磁性研究

酸素はスピン1の磁性分子である。酸素分子同士の磁氣的相互作用は、その大きさが分子間距離に依存するだけでなく、分子の相対的な配向に依存して強磁性的にも反強磁性的にもなる。したがって、



SWCNT 内部の水のグローバル相図。横軸は SWCNT の直径。細い SWCNT 内部の水は、低温でアイスナノチューブ構造へと変化する。太い SWCNT では、水が SWCNT 内部から外部に放出される wet-dry 転移を示すことが提案された。SWCNT 内部の水の融点は、チューブ直径に極めて敏感で、27 °C から -70 °C 以下まで変化する。バルク氷と異なり、アイスナノチューブは水素原子が秩序化しており、関連して興味深い誘電的性質を示す (F. Mikami, et al., ACS nano., 3 (2009)pp.1279-1287.)。すなわち、奇数員環アイスナノチューブは有限の電気分極を有する (フェリ) 強誘電体となり、偶数員環アイスナノチューブは反強誘電体となる。また、これらのアイスナノチューブのチューブ軸方向に電場を印加すると、ステップ状の分極過程を示すと予測されている。

SWCNT 内部に酸素を吸着させて、バルクにない新規分子配列を実現することにより、新しい酸素磁性体の創製が可能になると期待される。実際、本研究グループでは、古典分子動力学計算により、SWCNT 内部の酸素の低温凝縮構造の全体像を明らかにし、特に細い CNT 内部の酸素が反強磁性的な量子 1 次元鎖となりうることを指摘している。本年度は、太い SWCNT を用いて、SWCNT バンドルの 3 本の SWCNT に囲まれたチューブ間に 1 次元酸素配列の実現を目指した実験的研究を行った (山村卒業研究)。

3) ナノ構造物質の電子状態および核磁気共鳴 (NMR) 法による研究

セメント超伝導体 C12A7、ボロンクラスター固体、SWCNT などの電子状態を明らかにする目的で、微視的プローブである NMR による研究を行っている。本年度は、高純度金属型および半導体型 SWCNT の炭素 13 核の NMR 測定を行った。両タイプの試料について、高精度の粉末 NMR スペクトルの観測に成功し、シフトテンソルを詳細に議論することが可能になった。また、フラーレン C60 を内包した SWCNT (ピーポッド) を高温加熱すると 2 層カーボンナノチューブ (DWCNT) に変換されるが、本研究では変換過程を炭素 13 核の NMR により追跡した。幾何学的に束縛された水の研究では、SWCNT、錯体結晶、ZTC 内の水について NMR 実験を行った。これらの水においては、原子スケールの強い幾何学的束縛効果のため、異常プロトン伝導を含む、バルクに無い特異な物性の発現を期待している。3 次元グラファイトというべき ZTC の電子状態に関しては、粉末試料を押し固めて電気抵抗を調べ、金属的な性質を有する可能性が示された (山田卒業研究)。今後、炭素核の NMR 実験による検討を計画している。

4) CNT-FET デバイスの開発など

CNT のナノ空洞内の物質では、バルクに無い磁氣的、電氣的な性質や相挙動を示す。そこで、この内部空洞への物質の内包現象を利用した、新規 FET デバイスの開発を行っている (阿久津修士論文)。

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。課題名 (課題番号): 複合ナノ炭素材料の構造物性 (2010G667)。

2. 研究業績

1) 論文

H. Kyakuno, K. Matsuda, H. Yahiro, T. Fukuoka, Y. Miyata, K. Yanagi, Y. Maniwa, H. Kataura, T. Saito, M. Yumura, S. Iijima: Global phase diagram of water confined on a nanometer scale, *J. Phys. Soc. Jpn.* **79** (2010) 083802-1-4. (DOI:10.1143/JPSJ.79.083802)

K. Yanagi, H. Udoguchi, S. Sagitani, Y. Oshima, T. Takenobu, H. Kataura, T. Ishida, K. Matsuda, Y. Maniwa: Transport Mechanisms in Metallic and Semiconducting Single-Wall Carbon Nanotube Networks, *ACS Nano* **4** (2010) 4027-4032. (DOI: 10.1021/nn101177n)

2) 学会講演

国内会議

● 日本物理学会第 65 回年次大会 2010 年 3 月 20 日 - 23 日 (岡山大学津島キャンパス)

花見圭一、梅崎智之、松田和之、柳和宏、門脇広明、岡部豊、真庭豊、宮田耕充、片浦弘道：酸素を内包したカーボンナノチューブの構造と磁性

松田和之、福岡智子、鵜戸口浩樹、鷺谷智、柳和宏、真庭豊、片浦弘道：金属型単層カーボンナノチューブの ^{13}C -NMR

鵜戸口浩樹、柳和宏、鷺谷智、大島勇吾、竹延大志、片浦弘道、松田和之、真庭豊：金属型・半導体型単層カーボンナノチューブバッキーペーパーの電気伝導特性

守屋理恵子、鈴木拓也、柳和宏、内藤泰久、片浦弘道、松田和之、真庭豊：金属型・半導体型単層カーボンナノチューブ薄膜の光電気化学測定

宮尾智章、奥村修一、松本和也、石井廣義、真庭豊、柳和宏、片浦弘道：金属及び半導体カーボンナノチューブの光電子分光

● 第 39 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム 2010 年 9 月 5 日-7 日 (京都大学)

客野遙、松田和之、八尋瞳、福岡智子、宮田耕充、柳和宏、真庭豊、片浦弘道、斎藤毅、湯村守雄、飯島澄男：SWNT 内に内包された水のグローバル相図

守屋 理恵子、柳 和宏、片浦 弘道、竹延大志、内藤 泰久、松田 和之、真庭 豊：Control of Colors of Single - Wall Carbon Nanotube Thin Films

松田 和之、福岡 智子、鷺谷 智、鵜戸口 浩樹、柳 和宏、真庭 豊、片浦 弘道： ^{13}C NMR study of metallic single - Walled carbon nanotubes

● 日本物理学会平成 22 年度秋季大会 2010 年 9 月 23 日-26 日 (大阪府立大学)

松田和之、福岡智子、鵜戸口浩樹、鷺谷智、柳和宏、真庭豊、片浦弘道：金属型・半導体型単層カーボンナノチューブの ^{13}C -NMR

守屋理恵子、柳和宏、鈴木拓也、内藤泰久、竹延大志、片浦弘道、松田和之、真庭豊：金属型・半導体型単層カーボンナノチューブ薄膜の光電気化学測定 II」

● 第4回物性科学領域横断研究会 2010年11月13日-15日 (東京大学)

松田和之、福岡智子、鷺谷智、鵜戸口浩樹、柳和宏、真庭豊、片浦弘道：金属型と半導体型に分離した単層カーボンナノチューブの¹³C-NMR

● 第40回記念フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム 2011年3月8日-10日 (名城大学)

鵜戸口浩樹、柳和宏、大島勇吾、竹延大志、片浦弘道、石田敬雄、松田和之、真庭豊：金属型・半導体型含有量を制御した単層カーボンナノチューブネットワークにおける電気伝導機構

鷺谷智、米森啓太、柿原隆介、羽淵隆文、平山大裕、林博和、姜健、岩澤英明、島田賢也、生天目博文、谷口雅樹、石井廣義、門脇広明、松田和之、柳和宏、真庭豊：金属型単層カーボンナノチューブから作製した二層カーボンナノチューブの光電子分光

鈴木拓也、柳和宏、尾崎裕之、片浦弘道、真庭豊：直径1.4nm近傍の単層カーボンナノチューブ試料における直径選択分離法の開発

客野遙、松田和之、八尋瞳、伊波悠、福岡智子、宮田耕充、柳和宏、真庭豊、高井和之、榎敏明、片浦弘道、斎藤毅、湯村守雄、飯島澄男：有限長SWCNTに内包された水の構造：SWCNTエッジ効果

松田和之、福岡智子、佐藤康史、客野遙、柳和宏、真庭豊、西原洋知、京谷隆：ゼオライト鑄型カーボンに吸着した水の挙動

守屋理恵子、柳和宏、竹延大志、内藤泰久、片浦弘道、松田和之、真庭豊：エレクトロクロミックなカーボン電極：金属型単層カーボンナノチューブの色制御

● 第57回応用物理学関係連合講演会 2010年3月17日～3月20日 (東北大学湘南キャンパス)

柳和宏1, 鵜戸口浩樹1, 鷺谷智1, 大島勇吾2, 竹延大志3, 片浦弘道4,5, 松田和之1, 真庭豊1,5 (首都大理1, 理研2, 東北大金研3, 産総研4, JST-CREST5)：金属型・半導体型単層カーボンナノチューブバッキーペーパーの電気伝導特性

● 第71回応用物理学会学術講演会 2010年9月14日～9月17日 (長崎大学文教キャンパス)

柳和宏1, 守屋理恵子1, 竹延大志2, 片浦弘道3,4, 真庭豊1,4(首都大理工1, 早大理工2, 産総研3, JST-CREST4)：単層カーボンナノチューブカラー薄膜の色制御

● 第24回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム 2011年1月7日～1月10日 (つくば国際会議場)

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

国際会議

● Institute of Materials Structure Science Symposium 2010, December 7-8, 2010 Tsukuba International Congress Center (Tsukuba, JAPAN), December 7, 2010

H. Kyakuno, K. Matsuda, H. Yahiro, T. Fukuoka, Y. Miyata, K. Yanagi, Y. Maniwa, H. Kataura, T. Saito, M. Yumura, S. Iijima: Anomalous Phase Behavior of Water Confined in Single-Walled Carbon Nanotubes

● The 15th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation, March 3-4, 2011, Hiroshima, Japan

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

● A3 Symposium on Emerging Materials: Nanocarbons and nanowires for Energy, Jeonju, South Korea, November 7-11, 2010

Kazuhiro Yanagi, H. Udoguchi, S. Sagitani, Y. Oshima, T. Takenobu, H. Kataura, T. Ishida, K. Matsuda, Y. Maniwa: Transport Mechanisms in Metallic and Semiconducting Single-Wall Carbon Nanotube Networks (ポスター)

3) 学会誌等

Y. Maniwa and H. Kataura: Synthesis and Applications of Water Nanotubes, T. Kijima (Ed.): INORGANIC AND METALLIC NANOTUBULAR MATERIALS, *Topics in Applied Physics* **117** (2010) 247–259 (DOI 10.1007/978-3-642-03622-4_18), Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010

ナノ物性IIサブグループ

1. 研究活動の概要

2010年度より独立したサブグループとして、ナノ領域における光物性を主要なテーマに、ナノ物質およびその集合体の光物性・電子物性に着目して研究を行っている。主として、単層カーボンナノチューブ(SWCNT)を研究材料として用いて、SWCNT単体、分子内包複合体、およびそれらの凝集相における新奇物性探索・物質創製・技術開発・デバイス開発を進めている。

1) SWCNTの光物性

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

2) ランダムネットワーク系における電気伝導機構

SWCNTの電界効果型デバイス(FET)応用において、ネットワーク系における電気伝導機構を明らかにすることは極めて重要である。本研究では、系統的に金属型・半導体型含有率の異なるSWCNTバッキーペーパーを作成し、おのおのの電気伝導特性を明らかにした。その結果、高純度金属型SWCNTでは弱局在が散乱中心となり、半導体型含有量を系統的に増やすに従って、ホッピング伝導へと変わっていくことを明らかにした。この変化は、磁場印加による負の磁気抵抗効果からも立証された。またホッピング伝導の次元が含有量によって変化し、3次元から1次元へと高純度半導体型SWCNTになるに従って変化することを明らかにした。ホッピング特性温度から、金属型含有量を見積もることを可能とさせ、新しい純度評価法を提案した。

抵抗の温度変化率(TCR値)という指標は、赤外線受光素子としての性能指標となっており、SWCNTを同目的で応用する為には重要な値となっている。これまでは、この値とSWCNTの電気伝導機構との関連性が明確ではなかった。本研究において、抵抗の温度変化を定式化したことにより、TCR値を定式化することに成功し、改善の指針を得ることに成功した。その結果、半導体純度の高純度化がTCR値の向上に直結することを理論的に明らかにし、次年度以降の共同研究(NEC avio 株式会社)に繋げている。現状のTCR値は0.9程となっており、理論的には高純度化により4倍程改善可能と予想されている。

また、高純度半導体型SWCNTを用いたFET応用も進めている。早稲田大学竹延研究室と共同で、イオンゲルをゲート絶縁体として用いることで、高純度半導体型SWCNT厚膜(厚み:300nm程)の試料において、ON/OFF比 $=10^4$ 、移動度 $\sim 100\text{ cm}^2/\text{VS}$ 程のデバイス素子が形成可能であることを

明らかにした。今までは、SiO₂を用いたバックゲート方式が一般的であるが、その場合、表面第一層のSWCNTにしかキャリアを注入することが出来ない。イオンゲルを用いることで、全てのSWCNTにドーピング可能となりFET特性を向上させることに成功した。

3) SWCNTの高純度精製

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

4) 一次元πナノ空間に束縛された分子の光物性

光反応性分子や光誘起相転移が可能な分子を、チューブ内部に配列させることで、ナノ空間における光物性（光励起緩和過程、表面増強過程）を解き明かすことを目標に研究を行っている。今年度は、シストランス異性化において典型的なアゾベンゼン分子を金属型・半導体型分離した試料に内包し、物性を明らかにすることを目標に研究を行った。分離精製、アニーリング処理を適切に行うことで、同分子を内包可能であることを、ラマン・X線回折散乱測定を用いて明らかにした。金属型SWCNTに内包することにより、分子を取り囲むSWCNTによる励起光吸収を少なくさせることで、内包分子を選択的に励起させることに成功し、内包分子のラマン振動モードを検出することに成功した。また、化学専攻の藤田渉先生より頂いた光誘起相転移可能なTTTA (1,3,5-trithia-2,4,6-triazapentalenyl) 分子に対しても、内包実験を行った。TTTA分子は、水分の存在によって分解しやすいといった取り扱いが非常に困難であり、定量的な評価は極めて困難であったが、ラマン・X線回折散乱測定において内包可能であることを明らかにした。

5) 金属型SWCNTインク開発、赤外線受光素子開発

十条ケミカル株式会社と共同でスクリーン印刷法に利用可能な金属型SWCNTインクの開発を行っている。NEC avio株式会社と共同で半導体型SWCNTを用いた赤外線受光素子の開発を行っている。

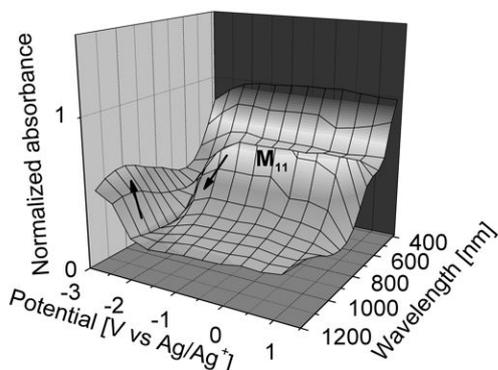


図 1: 青緑を示す直径 1.4nm の金属型 SWCNT の色制御

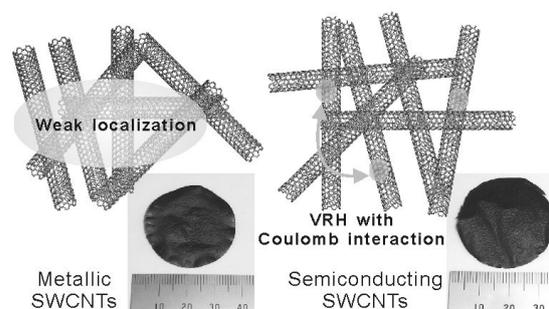


図 2: 金属型 SWCNT では弱局在が、半導体型 SWCNT ではクーロン相互作用を伴うホッピング伝導が起きていることを明らかにした。

2. 研究業績

1) 論文

M. Havlicek, W. Jantsch, M. Rummeli, R. Schonfelder, K. Yanagi, Y. Miyata, H. Kataura, F. Simon, H. Peterlik, H. Kuzmany: Electron spin resonance from semiconductor-metal separated SWCNTs, *PHys.Stat. Soli. B247* (2010) 2851–2854

N. Tschirner, K. Brose, J. Maultzsch, K. Yanagi, H. Kataura, C. Thomsen: The influence of incorporated beta-carotene on the vibrational properties of single wall carbon nanotubes, *Phys.Stat. Soli. B247* (2010) 2871–287

K. Brose, N. Tschirner, A. Zouni, F. Muh, K. Yanagi, H. Kataura, C. Thomsen, J. Maultzsch: Polarised Raman measurements of beta-carotene encapsulated in SWNTs, *Phys.Stat. Soli. B247* (2010) 2871–2874

F. Simon, C. Kramberger, H. Peterlik, R. Pfeiffer, K. De Blauwe, T. Pichler, H. Kuzmany, K. Yanagi, Y. Miyata, Y.;Kataura, H: Raman response from double-wall carbon nanotubes based on metallicity selected host SWCNTs, *Phys.Stat. Soli. B247* (2010) 2880–2883

H. Okimoto, T. Takenobu, K. Yanagi, Y. Miyata, H. Shimotani, H. Kataura, Y. Iwasa: Tunable Carbon Nanotube Thin-Film Transistors Produced Exclusively via Inkjet Printing, *Advanced Materials* **22** (2010) 3981-3986

H. Kyakuno, K. Matsuda, H. Yahiro, T. Fukuoka, Y. Miyata, K. Yanagi, Y. Maniwa, H. Kataura, T. Saito, M. Yumura, S. Iijima: Global Phase Diagram of Water Confined on the Nanometer Scale, *J. Phys. Soc. Jpn.* **79** (2010) p0833802

K. Yanagi, H. Udoguchi, S. Sagitani, Y. Oshima, T. Takenobu, H. Kataura, T. Ishida, K. Matsuda, Y. Maniwa: Transport Mechanisms in High-Purity Metallic and Semiconducting Single-Wall Carbon Nanotube Networks, *ACS Nano* **4** (2010) 4027-4032

K. Yanagi, H. Kataura: Carbon nanotubes: Breaking Kasha's rule, (News and Views) *Nature Photonics* **4** (2010) 200-201 (査読無しのリビュー記事)

K. Yanagi, Z. Liu, K. Suenaga, S. Okada, H. Kataura: Influence of Aromatic environment on physical properties of beta-Carotene, *J. Phys. Chem. C* **114** (2010) 2524-2530

Y. Oshima, T. Takenobu, K. Yanagi, Y. Miyata, H. Kataura, K. Hata, Y. Iwasa, H. Nojiri: Intrinsic magnetoresistance of single-walled carbon nanotubes probed by a noncontact method, *Phys. Rev. Lett.* **104** (2010) 016803

2) 学会講演

● 第38回フラーレンナノチューブシンポジウム 2010年3月2日～3月4日 (名城大学 共通抗議棟北館)

守屋理恵子、柳和宏、鈴木拓也、内藤泰久、片浦弘道、松田和之、真庭豊: 電気化学ドーピングによる金属型・半導体型単層カーボンナノチューブ薄膜の色制御 (ポスター)

鵜戸口浩樹、柳和宏、鷺谷智、大島勇吾、竹延大志、片浦弘道、松田和之、真庭豊: 金属型・半導体型単層カーボンナノチューブバッキーペーパーの電気伝導特性 (ポスター)

● 高次 π 空間の創発と機能開発 第3回公開シンポジウム 2010年3月15日~3月16日 (自然科学研究機構 岡崎コンファレンスセンター)

柳 和宏、守屋 理恵子、鷺谷智: 金属型・半導体型単層カーボンナノチューブの色制御と分子内包 (ポスター)

● 第57回応用物理学関係連合講演会 2010年3月17日~3月20日 (東北大学 湘南キャンパス)

柳 和宏 1, 鵜戸口浩樹 1, 鷺谷 智 1, 大島勇吾 2, 竹延大志 3, 片浦弘道 4,5, 松田和之 1、真庭 豊 1,5 (首都大理 1, 理研 2, 東北大金研 3, 産総研 4, JST-CREST5): 金属型・半導体型単層カーボンナノチューブバッキーペーパーの電気伝導特性

● 日本物理学会第65回年次大会 2010年3月20日~3月23日 (岡山大学津島キャンパス)

花見圭一 A, 梅崎智之 A, 松田和之 A, 柳和宏 A, C, 門脇広明 A, 岡部豊 A, 真庭豊 A, C, 宮田耕充 B, 片浦弘道 B, C (首都大理工 (A), 産総研ナノテク (B), CREST-JST(C)): 酸素を内包したカーボンナノチューブの構造と磁性

松田和之 A, 福岡智子 A, 鵜戸口浩樹 A, 鷺谷智 A, 柳和宏 A, C, 真庭豊 A, C, 片浦弘道 B, C (首都大理工 (A), 産総研ナノテク (B), CREST-JST(C)): 金属型単層カーボンナノチューブの ^{13}C -NMR

鵜戸口浩樹 A, 柳和宏 A, 鷺谷智 A, 大島勇吾 B, 竹延大志 C, 片浦弘道 D, E, 松田和之 A, 真庭豊 A, E (首都大理 A, 理研 B, 東北大金研 C, 産総研 D, JST-CRESTE): 金属型・半導体型単層カーボンナノチューブバッキーペーパーの電気伝導特性

中野匡 A, 市田正夫 A, B, 齋藤伸吾 C, 宮田耕充 D, 柳和宏 E, 馮叶 F, 片浦弘道 F, 安藤弘明 A, B (甲南大自然 A, 甲南大量子ナノ B, 情通機構 C, 名大院理 D, 首都大院理 E, 産総研ナノテク F): 高純度分離金属単層カーボンナノチューブ薄膜の THz 吸収スペクトル

守屋理恵子 A, 鈴木拓也 A, 柳和宏 A, 内藤泰久 B, 片浦弘道 B, C, 松田和之 A, 真庭豊 A, C (首都大理 A, 産総研 B, JST-CRESTC): 金属型・半導体型単層カーボンナノチューブ薄膜の光電気化学測定

宮尾智章, 奥村修一, 松本和也, 石井廣義, 真庭豊, 柳和宏, 片浦弘道 A (首都大理工, 産総研 A): 金属及び半導体カーボンナノチューブの光電子分光

● 高次 π 空間の創発と機能開発 第4回公開シンポジウム 2010年7月16日~7月17日 (つくば国際会議場)

柳 和宏・守屋 理恵子: 色素内包金属型・半導体型単層カーボンナノチューブにおける光電気化学測定 (ポスター)

● 高次 π 空間の創発と機能開発 第2回国際シンポジウム 2010年11月13日~11月14日 (つくば国際会議場)

Kazuhiro Yanagi, Rieko Moriya: Control of the Colors of Single-Wall Carbon Nanotubes and Optical Properties of Encapsulated Molecules (ポスター)

- 第39回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム 2010年9月5日～9月7日 (京都大学 百周年記念ホール)

守屋理恵子、柳和宏、内藤泰久、竹延大志、片浦弘道、松田和之、真庭豊: 単層カーボンナノチューブカラー薄膜の色制御 (ポスター)

- 第71回応用物理学会学術講演会 2010年9月14日～9月17日 (長崎大学 文教キャンパス)

柳 和宏 1, 守屋理恵子 1, 竹延大志 2, 片浦弘道 3,4, 真庭 豊 1,4(首都大理工 1, 早大理工 2, 産総研 3, JST-CREST4): 単層カーボンナノチューブカラー薄膜の色制御

- 日本物理学会 2010年秋季大会 2010年9月23日～9月26日 (大阪府立大学 中百舌鳥キャンパス)

松田和之 A, 福岡智子 A, 鶴戸口浩樹 A, 鷺谷智 A, 柳和宏 A, C, 真庭豊 A, C, 片浦弘道 B, C(首都大理工 A, 産総研ナノテク B, CREST-JSTC): 金属型・半導体型単層カーボンナノチューブの¹³C-NMR

守屋理恵子, 柳和宏, 鈴木拓也, 内藤泰久 A, 竹延大志 B, 片浦弘道 A, C, 松田和之, 真庭豊 (首都大理工, 産総研 A, 早稲田理工 B, JST-CRESTC): 金属型・半導体型単層カーボンナノチューブ薄膜の光電気化学測定 II(ポスター)

国内研究会

- 2nd TMU/SNU Joint Seminar on Nano-Science and Related Topics, Tokyo Metropolitan University, November 7, 2010

H. Udoguchi, K. Yanagi: Transport Mechanisms in Metallic and Semiconducting Single-Wall Carbon Nanotube Networks (ポスター)

国際会議

- ICSM (International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals 2010) 2010年7月4日～7月9日 (Kyoto)

Kazuhiro Yanagi: "Electrical Conduction in Metallic and Semiconducting Single-Wall Carbon Nanotube Buckypaper: Crossover from Weak Localization to Exponential Localization"

- A3 Symposium on Emerging Materials: Nanocarbons and nanowires for Energy, Jeonju, South Korea, November 7-11, 2010

Kazuhiro Yanagi, H. Udoguchi, S. Sagitani, Y. Oshima, T. Takenobu, H. Kataura, T. Ishida, K. Matsuda, Y. Maniwa: Transport Mechanisms in Metallic and Semiconducting Single-Wall Carbon Nanotube Networks (ポスター)

粒子ビーム物性サブグループ

1. 研究活動の概要

本年度は、新たなメンバーとして高津浩氏を助教に迎え、これまで行ってきた中性子&X線散乱法を用いた物性実験に加え、フラストレートした金属磁性体の研究や、新しい物性を示す物質の開発と単結晶作成の方向にも研究の展開ができるようになった。本年度の特筆すべき研究成果は、非自明な異常ホール効果を示す新しい金属的三角格子反強磁性体 PdCrO_2 の磁気構造解析に成功したことと、数年前より量子スピナイス基底状態ではなかろうか？と理論的に予言されていた $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ の、不思議な量子揺らぎ観測に成功したことである。

1) 幾何学的フラストレーションを示す磁性体の研究

パイロクロア構造を持つ磁性体 $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ は、短距離磁気相関が数 K の温度領域で発達しているが、極低温領域の 50 mK まで長距離磁気秩序を持たないことが、約 10 年前に示され、その後多くの興味を集めてきた。 $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ の基底状態が、Tb 原子間距離程度の短距離秩序しか示さない理由は何なのか？という問題は、幾何学的フラストレーションを示す多くの磁性体の研究の中で、非常に興味深い、大いなる難問だと考えられている。ひとつの面白い理論的な考え方は、多くの縮退したスピナイス状態間を、量子力学的に揺らいでいる基底状態であって、量子スピナイス状態と呼べるようなものではなかろうか？という仮説である。我々は、 $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ の低温状態について実験的に理解する糸口を見出すべく、中性子非弾性散乱実験を行い、今迄に知られていなかったが 0.4K で転移現象のようなものが起こった後に、スピン揺らぎを持つ基底状態に移行していくことを発見した。この転移現象が、何かの相転移なのか？それとも連続的に状態が変化するクロスオーバーなのかを明確にすれば、量子スピナイス状態なのかどうか？という難問にも、今後の発展で解答が得られることを期待したい。

水 (H_2O) の水素原子は、ふたつの酸素原子を結ぶ線分上にはあるものの、どちらの酸素の近くに位置するかということに関して、局所的に H_2O 分子を構成するというアイスルースが成立する以外は、ランダムな配置をとっている。これは、最も古くから知られるフラストレーションの一例であり、氷は低温でゼロ点エントロピーを持つ物質としても良く知られている。スピナイス $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ は、氷における水素原子の役割を Dy^{3+} のスピンの担う系である。このスピナイスにおける励起状態を考察すると、磁気モノポール-反磁気モノポールの対生成現象と非常によく似ていることが最近興味を集めている。磁気モノポールの考え方を導入すると、フラストレーションがあるため単に現象が複雑に見えるということではなく、磁気モノポールに注目することにより、より単純に理解することが可能な現象があることが面白い。このような研究の方向性を指向して、スピナイス $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ に、[111] 方向の磁場をかけて、それを少しだけ傾けると起こるであろうカステレイン転移や、[111] 方向に垂直な AC 磁化の研究を計画した。カステレイン転移を調べる磁化測定実験は、磁化とトルクの同時測定実験に数年前よりトライしていたが、本年度ようやく実験データを出すことに成功した。今後は、 $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ の大型単結晶を作りも本格化させて中性子回折実験、AC 磁化測定実験等に発展させたい。

2) 遍歴電子反強磁性体の量子臨界現象

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

本年度は、磁場 tuning により QCP を持つ $\text{Ce}(\text{Ru}_{1-x}\text{Rh}_x)_2\text{Si}_2$ の中性子散乱実験を行った。

3) 導電性三角格子反強磁性体の異常ホール効果と磁気構造

幾何学的にフラストレートした磁性体では、結晶構造の幾何学的特徴のために、局所的なスピンの安定配置が系全体では同時に実現できない。このためスピンの熱的な揺らぎが抑えられる低温領域において様々な特異現象が期待される。特にフラストレートした局在スピンを持つ“金属的な”フラストレート磁性体においては、従来のスピン-軌道相互作用に基づく異常ホール効果に加えて、「スピンの幾何学性」に起因する新奇な異常ホール効果の発現の可能性が議論され、注目を集めている。我々は、この研究の流れの中で、最も基本的なフラストレート格子の「二次元三角格子」を成す PdCrO_2 という物質に着目し、スピン構造と新奇なホール効果発現の関係性について研究を行っている。

我々は約1年間にわたる試行錯誤を経て、 PdCrO_2 の単結晶育成に成功した(図1(a))。そして、その単結晶を用いてホール抵抗や磁化、中性子弾性散乱等の実験を行った。その結果、反強磁性秩序化温度 $T_N \sim 38$ K より十分低温において、ホール抵抗が従来の異常ホール効果では説明できない磁場や磁化に対して非線形な振る舞いをするを見出した(図1(b))。更に、その非線形性が現れ始める 20 K 近傍には、磁化率や比熱の磁気成分にも異常があることを見出した。これらのことは、磁気秩序相内のスピン配置の変化に伴う新奇なホール効果の出現の可能性を示唆させる。中性子散乱実験から解析したゼロ磁場で 3 K の磁気構造は、右巻き、左巻きの 120 度スピン構造が有限の角度で交互に積層する構造をとることが分かった(図1(c))。これは類縁の反強誘電体 LiCrO_2 とよく似た構造であり、単純な三角格子 Cr スピン間の交換相互作用を考えただけでは実現が難しい。このため、それに関連した高次の項が低温のホール効果に影響を与えている可能性が考えられる。今後は、ホール効果に非線形性が現れ始める 20 K 近傍を境に磁気構造に変化があるのか、また、磁気抵抗など他の電気輸送量にもフラストレート磁性の効果が現れるのか等を明らかにしていきたいと考えている。

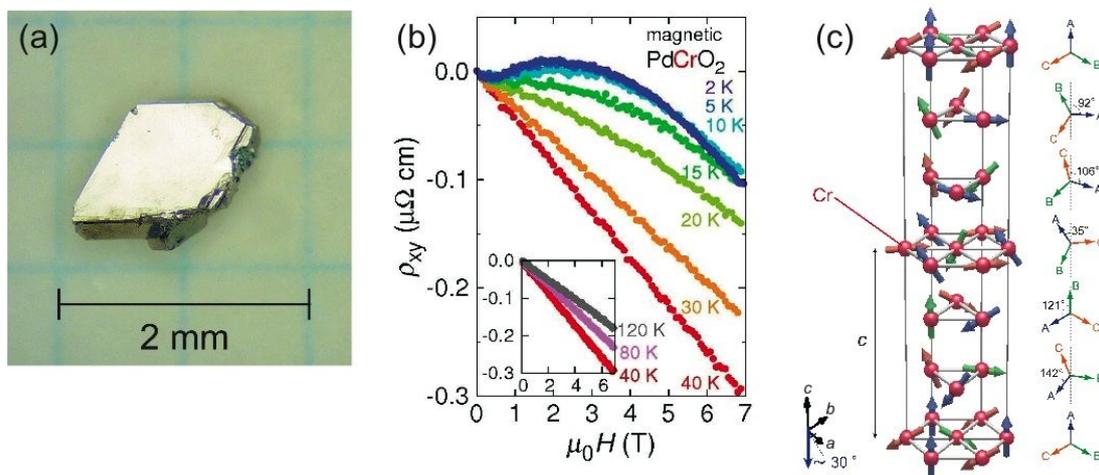


図 1: (a) PdCrO_2 の単結晶の写真、(b) 異常ホール効果の磁場依存性と (c) ゼロ磁場 3 K での磁気構造。

2. 研究業績

1) 論文

H. Takatsu, Y. Shingo, F. Satoshi, Y. Maeno: Unconventional Anomalous Hall Effect in the Metallic Triangular-Lattice Magnet PdCrO_2 , *Phys. Rev. Lett.* **105** (2010) 137201-(1-4).

H. Takatsu, Y. Maeno, : Single crystal growth of the metallic triangular-lattice antiferromagnet PdCrO₂, *J. Cryst. Growth* **312** (2010) 3461–3465.

2) 学会講演

● 日本物理学会 第 65 回年次大会 2010 年 3 月 20-23 日 (岡山大学)

花見圭一, 梅崎智之, 松田和之, 柳和宏, 門脇広明, 岡部豊, 真庭豊, 宮田耕充, 片浦弘道: 酸素を内包したカーボンナノチューブの構造と磁性

● 日本物理学会 2010 年秋季大会 2010 年 9 月 23-26 日 (大阪府立大学)

高津浩, 石川洵, 米澤進吾, 前野悦輝, 門脇広明, Xiofeng Xu, Patrick Rourke, Nigel Hussey: 導電性二次元三角格子酸化物 PdMO₂(M=Co, Cr) の巨大な磁気抵抗

国内研究会

● 特定領域研究: フラストレーションが創る新しい物性: 全体会議、理化学研究所、2010 年 5 月 10-12 日

門脇広明、高津浩: フラストレート系におけるトポロジカルな励起の研究 (口頭)

● 特定領域研究: フラストレーションが創る新しい物性: 第 6 回トピカルミーティング「フラストレーションと量子輸送」、宮島、2010 年 10 月 15-16 日

高津浩: 導電性三角格子磁性体 PdCrO₂ の異常なホール効果と磁気抵抗 (ポスター)

● 第 39 回化合物新磁性材料研究会: 東京大学物性研究所、2010 年 12 月 15 日

高津浩: 三角格子反強磁性体 PdCrO₂ の異常ホール効果 (口頭)

ESR 物性サブグループ

1. 研究活動の概要

電子スピン共鳴 (ESR) 法や SQUID 磁束計を中心手段として興味ある物質について研究を進めている。通常、ESR というと市販の 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 10~24,000 MHz にわたって周波数可変なスペクトロメーターに加え、分子科学研究所との共同研究による 94,000 MHz までの ESR を用い、温度、周波数、圧力をパラメーターとした電子状態の解明を目指している。圧力に関しては、静水圧下或いは一軸変位下での ESR 装置を用い、任意の軸のみ、或いは一様に格子定数を変えて、電子間、或いは電子-格子間の相互作用を変調し、物性発現に寄与する相互作用を調べている。現在更に、産総研との共同研究により、均一で更に高い圧力が発生できる cubic anvil セルを用いた 10 GPa までの高圧下 ESR を開発しており、多くの壁を乗り越えつつ、一步ずつ進めている。

また、物質の状態を知る方法は多くあるが、その中で、走査型探針顕微鏡 (SPM) を用いた研究もこの 4~5 年続けている。興味深いデータは得られてきているが、論文としての成果はこれから報告する努力をしていきたい。

以下に今年度行われた研究の概要を整理する。

1) DNA

我々生物の遺伝情報をつかさどる DNA (デオキシリボ核酸) は、磷酸、糖に加えて 4 種のアミノ基、グアニン (G)、シトシン (C)、アデニン (A)、チミン (T) の組合せによって構成される有機高分子であり、2 本の DNA が G-C 或は A-T の組み合わせの塩基対によって連結されて、良く知られた 2 重螺旋構造を構成する。この塩基対は、任意に設計・合成が可能な配列のフレキシビリティと高い自己組織化能を併せ持つことから、任意形状のナノサイズ構造物を DNA の 2 重螺旋で構成出来ることも報告されている。

一方で、人類の DNA の長さは 1 m にも及ぶことが知られているが、放射線照射などにより発生した欠陥の位置から、かなり離れた部分に遺伝情報の異常が発生したりする事から、ソリトン伝導など、何らかの高速な情報伝達機構があるのではないかと、その本質には未だ計り知れない神秘性が残されている。本研究グループでは、物性的には未知である DNA について報告される新規な現象を、物性物理の立場からチェックしていくこと、これまでの研究から半導体であることが確認されてきた天然の DNA に電荷担体を導入し、その物性を明らかにすることを通して、ナノエレクトロニクスの素材としての可能性の検証も目的の一つとして研究を進めている。

2 価の金属イオン水溶液中の DNA は、2 つの Na^+ カウンターイオンの代わりに DNA の塩基対の間の水素結合位置に 2 価金属イオンを取り込み化合物を作る。中でも、鉄を導入した Fe-DNA は Fe^{3+} イオンとして存在する事が示唆されており、鉄から出た電子が DNA にドーピングされている可能性がある。しかし、この 3 価の鉄の成因は未だ明確になっていない。そこで、光学吸収スペクトルで鉄の電子状態を探った。図 1 に種々の鉄イオンの光学吸収スペクトルを示す。2 価の FeCl_2 は、薄緑色の結晶の色から推測できる様に、比較的高いエネルギー領域に弱い吸収を示す。一方、3 価の FeCl_3 や $\text{FeO}(\text{OH})$ (酸化水酸化鉄) では、結晶のカーキ色を反映して、 FeCl_2 より低いエネルギーで吸収を示す。更に特徴的なのは、2 価の FeCl_2 が加水分解された後、空気中の酸素によって生成する 3 価の $\text{FeO}(\text{OH})$ が共有結合性を持つため、イオン結合性の FeCl_3 とは明確に区別が可能である。また、図 2 に示す DNA と FeCl_2 の混合水溶液中の反応時間依存性から、生成される 3 価の鉄が、DNA と反応していない FeCl_2 が酸化

されたのではなく、Fe-DNA になることによって始めて生成することを示している。このことから、今後、Fe-DNA 中の鉄が3価に変わる際に、電子が何処に移動したのかが興味深い。

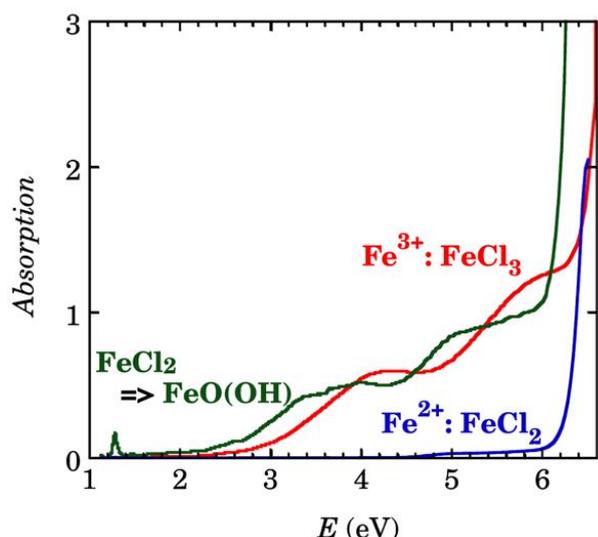


図 1: Fe イオンの光学吸収スペクトル。Fe²⁺ の吸収は、2 価の鉄の薄緑色に対応して 5 eV 以上で現れる。FeCl₃、FeO(OH) は共に Fe³⁺ イオンであり、カーキ色に相当する 3-5 eV 辺りに吸収が現れる。しかし、両者のスペクトルは容易に分離が出来る程度に吸収がシフトしている。FeCl₃ は、水溶液中でほぼ完全に電離した球形のイオンだが、FeO(OH) は、水には溶解しにくく、共有結合性を持つため、吸収スペクトルがシフトする事は容易に理解される。

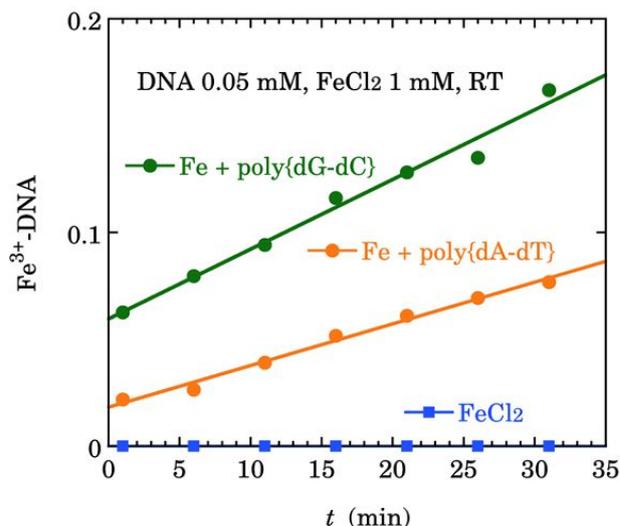


図 2: DNA 水溶液に FeCl₃ 水溶液を混合後の時間に対して、Fe-DNA の Fe³⁺ の光学吸収スペクトルの変化を示す。比較のために、FeCl₂ 水溶液のみの場合も示す。空気中でも室温では全く Fe³⁺ は観測されない。この事実は、FeCl₂ が加水分解されて出来た Fe(OH)₂ の酸化による Fe³⁺(O(OH))³⁻ は、生成しない事を示しており、Fe-DNA で観測される 3 価の鉄イオンの光学吸収スペクトルが、Fe-DNA 由来の吸収である事を示唆する。

一方、通常の 2 価金属イオン M と DNA の反応によって生ずる M-DNA 中では、金属イオンは 2 価のまま保たれることも知られている。その 1 例が ZnCl₂ と DNA の水溶液から生成される Zn-DNA である。我々の生成法で得られる Zn-DNA においては、Zn イオンの導入が DNA の電子状態には強く影響しないことが確認されている。しかし、最近、別の方法、支持塩に希薄に Zn-DNA を含む水溶液の凍結乾燥法により作成した試料では、やはり 2 価の Zn²⁺ が入っていることが確認され、且つ、金属に特有な Pauli 的な常磁性が強く観測されることが報告された。この報告は、試料の作成手順によって同じ 2 価の Zn イオンが DNA 中に導入されるが、最終生成物の電子状態が大きく異なり得ることを示唆する。現在、この差異の本質がなんであるのか、追試実験を試みながら詰めている。今後の展開が興味深い系である。

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おり、常圧における電子状態がどの様に金属的状态に変化するかを圧力下 ESR を用いて調べている。そのために、高圧下 (3GPa~10GPa) の測定用のキュービックアンビルセルを利用した ESR 装置開発を進めている。これまで、外形 2.5 mm のテフロンカップセル内に、粉末試料を約 1.3 mg 入れた直径約 1mm のコイルをセットし、数百 MHz にて、数十秒間の積算によりきれいな吸収信号が得られている。圧力下において試料のスピン磁化率を較正するために、既知の磁性を持つ DPPH (diphenyl-picryl-hydrazyl) を試料コイルに埋め込み、100 トンプレスで 80 トン (約 8 GP) まで信号の SN 比を落とさずに安定に測定出来る様になった。これまでは、タングステンカーバイド製のアンビルのバインダーの磁性とラジオ波コイルとの結合により、信号の測定が困難になるほどのベースラインの歪みに妨げられていたが、コイル上下に設置したシールド用銅板により、SN 比は保ったままアンビルとの相互作用を十分に減衰可

能となった。また、加圧時に、アルミナ製のガスケットがアンビルの形状に変化する際に（クラッシュと呼ぶ）、ラジオ波コイルの銅線が切断されやすかったが、リード線を通す位置や形状を改善することにより、高い再現性が得られるようになった。今後、スピン磁化率の温度依存性の測定に注力していく。（埼玉大、産総研（千葉大）との共同研究）

3) STM による構造と電子状態の研究

走査型トンネル顕微鏡は、単結晶表面の構造や電子状態を探る手段として有効であることは良く知られている。今年度は2つの対象に適用し、興味深い結果を得て来た。一つはDNA及び金属イオンを導入したM-DNAであり、もう一つは有機電荷移動結晶の α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ の単結晶である。

DNAは生体中、或は水溶液中では良く知られた2重螺旋構造を取る。親水性を持たない基盤であるHOPG (Highly Oriented Pyrolytic Graphite) 上にDNA水溶液から掬い取り、STMの試料とした。通常は直径が2nmもある2重螺旋構造を取るため、明確な構造を持たない周期が約3nmのぼんやりとした像が得られることが多い。しかし、その内の限られた本数のDNAは、HOPGのステップ構造に固定され、途中から2つに分かれたような構造も見つかる。トポグラフィから、HOPGのステップ構造でないことは明確に区別可能である。このような三つ又構造の内の1つの枝に、幅は2nm程度で、直線的で1nm以下の周期性を示す構造も見つかった。これは、二重螺旋構造が引き延ばされて螺旋構造が解けた縄梯的な平面構造であると結論付けられた。HOPG基盤と平面上の分子は、互いの波動関数が重なり易く、相互作用が強くなると考えられる。そのために、4eV程度のエネルギーギャップを持つDNAの原子レベルの構造がSTMによって観測されると理解される。2価の金属イオンを導入したMn-DNAやCo-DNAにおいては、塩基対の中央に位置する金属イオンを囲むような構造の像が得られた。Mn-DNAのESRにおける超微細分裂の解析などの結果から、われわれの手法によって作成されたM-DNAにおいては、金属イオンがイオン結合していることが示唆されている。一方で、Mnイオンは、塩基対に含まれる窒素と相対しているが、両者は共有結合を好むため、ESRの解析結果と、STM像の解釈から、金属イオンが複数の水イオンに囲まれていることが示唆される。この点は、2種のZn-DNAの存在を理解する上で、重要なヒントを与えていると考えられる。

電荷移動結晶の単結晶表面をSTMにより観察すると、格子定数に近い周期を持つ構造が観測される。 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ は常温でユニットセル内の4つのBEDT-TTF分子間で電子数が異なる電荷の不均化が起っていることで知られる。X線の構造解析データから提案された構造と比較をしながら解析を進めている。得られたSTM像には4種類の異なる形状、高さを持つ周期的な構造が観察され、結晶の*a*-*b*面を観測していると結論した。BEDT-TTF分子の両端近くの硫黄原子の3*p*軌道を見ていると仮定して解析をすると、X線解析で決定された構造・電荷分布では理解出来ない何らかの表面再構成が起っていることが明らかになった。BEDT-TTF層とI $_3$ 層の電氣的相互作用を考察すると、構造的な再構成では理解出来ず、電荷の再分配が起っていると結論される。今後、さらに解析を進めて行く。

一方、分子構造の変化を伴う電荷秩序転移を室温近辺で起こす(EDO-TTF) $_2$ PF $_6$ のSTM観察も行った。室温近辺の電荷秩序転移に伴う表面状態の変化が興味深い。本来、固有抵抗が大きい系であり、STM測定に困難が予想されたが、構造を再現する像が得られて来た。また、 π 電子が存在しないPF $_6$ アニオン層と思われる対称性の高い像もある確率で観測されることが分かって来た。今後、更に解析を進めて行く。（北海道大学、京都大学との共同研究）

4) β'' -(DODHT) $_2$ PF $_6$

β'' -(DODHT) $_2$ PF $_6$ は1/4-fillingのバンドを持ち、常圧下255Kで金属絶縁体転移を、さらに、1.3GPaの圧力下で転移温度2.3Kの超伝導転移を示す。常圧でのX線回折とSQUIDによる磁化率の結果から、常圧、255K以下の絶縁相では電荷秩序の存在が報告されている。このことから、圧力-温度相図で超

伝導相と隣接する絶縁相が電荷秩序状態である可能性があり、超伝導と電荷揺らぎの関係から興味を持たれている。そこで、絶縁相から超伝導相への電子状態の変化を磁性の面から調べる目的で、常圧～1.5 GPa での加圧下 ESR により電子スピン磁化率の温度変化を測定している。これまで、常圧と 0.5 GPa 下での測定を行い、常圧では報告されている SQUID 磁化率を再現する結果が得られた。また、0.5 GPa では、180 K 以下で一次元的電子（スピン）間相互作用を示唆する結果が得られ、これは電荷秩序状態の存在の可能性を示している。さらに種々の圧力下での測定を行っていく。測定と平行して、磁場変調を用いず、吸収曲線を測定する低周波 ESR 装置の開発を進めている。静磁場用に、デュワーに固定したヘルムホルツ型の空芯コイルを用いるので掃引をすばやくでき、短時間に多数の積算ができる特徴がある。これまで、常温、常圧での測定に成功している。今後、 β'' -(DODHT)₂PF₆ の測定に利用する予定である。(茨城大との共同研究)

2. 研究業績

1) 国際会議報告

K. Mizoguchi: Electronic states of M-DNA incorporated with divalent metal ions, *Proc. SPIE* **7765**, (2010) 77650R-1 (1-12)

2) 学会講演

● 日本物理学会 第 65 回年次大会 2010 年 3 月 20 日－3 月 23 日 (岡山大学)

荒木理美, 溝口憲治, 坂本浩一, 山内文貴, 川本徹, D. Mihailovic, A. Omerzu, 徳本圓, 神戸高志: TDAE-C₆₀ の有機強磁性に対する一軸性歪み効果 IV (20aGR-6)

森英一, 白井英正, 坂本浩一, 溝口憲治, 内藤俊雄, 矢持秀起, 谷口弘三: トンネル分光による分子性導体の室温構造解析 (21pGT-10)

白井英正, 横矢貴秀, 坂本浩一, 溝口憲治: SPM を用いた金属をドーブした DNA の構造解析 (21pPSA-42)

谷口尚, 坂本浩一, 溝口憲治, 竹下直, 谷口弘三: 超高压下 ESR 装置の開発と β' -(BEDT-TTF)₂ICl₂ の電子状態 II (22pGT-17)

圓谷淳, 白井英正, 伊吹依利子, 坂本浩一, 溝口憲治: 金属をドーブした DNA の光吸収 (23aGR-3)

● 日本物理学会 2010 年秋季大会 2010 年 9 月 23 日－9 月 26 日 (大阪府立大学)

谷口尚, 坂本浩一, 溝口憲治, 竹下直, 谷口弘三: 高压下 ESR 装置の開発と β' -(BEDT-TTF)₂ICl₂ の電子状態の解明 III (23pRB-11)

横矢貴秀, 白井英正, 溝口憲治, 坂本浩一: STM による HOPG 表面における Metal-DNA の新規構造の発見 (25aRL-10)

圓谷淳, 伊吹依利子, 白井英正, 坂本浩一, 溝口憲治: 金属をドーブした DNA の光吸収 II (25aRL-11)

伊吹依利子, 坂本浩一, 溝口憲治: 3d 遷移金属 Fe をドーブした DNA の電子状態の解析 (25aRL-12)

森英一, 坂本浩一, 溝口憲治, 内藤俊雄: STM による α -ET₂I₃ の室温電荷量解析 (26pRB-7)

● 第 49 回電子スピンサイエンス学会年会 (SEST2010) 2010 年 11 月 11 日－11 月 13 日 (名古屋大学)

溝口憲治：Electronic states of M-DNA studied by ESR (招待講演)

国内研究会

● 第4回生物物質科学フォーラム 2010年5月26日

溝口憲治：2価金属を入れた M-DNA の物性と水分子の役割 (口頭)

● α -(ET)₂I₃ の Dirac 電子相、電荷不均化金属相、電荷秩序絶縁相に関する討論会 (新学術領域研究 A01 班拡大討論会) 2010年10月22日

溝口憲治：Molecular charge density in α -ET₂I₃ estimated by STM analysis in the a-b plane (口頭)

● 第3回東北大 G-COE 研究会 「金属錯体の固体物性科学最前線—錯体化学と固体物性物理と生物物性の連携新領域創成を目指して—」 2010年12月3日—12月5日

溝口憲治：2価金属イオンを導入した DNA の物性：Fe-DNA (口頭)

国際会議

● International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals (ICSM 2010), Kyoto, Japan, July 4-9

K. Mizoguchi: Physical Properties of metal-ion incorporated M-DNA (Oral)

H. Sakamoto, S. Araki, F. Yamauchi, K. Mizoguchi, T. Kawamoto, A. Omerzu, D. Mihailovic, M. Tokumoto, T. Kambe: ESR study on α -TDAE-C₆₀ with Uniaxial Strain

M. Tsuburaya, H. Usui, Y. Ibuki, H. Sakamoto, K. Mizoguchi: Optical absorption and Field induced ESR in M-DNA

T. Yokoya, H. Usui, H. Sakamoto, and K. Mizoguchi: Visualization of two different forms of DNA by STM

S. Taniguchi, K. Mizoguchi, H. Sakamoto, M. Hirabayashi, H. Taniguchi, N. Takeshita: ESR Study of the electronic states in β' -(BEDT-TTF)₂ICl₂ under up to 10 GPa in a cubic anvil cell

● Nanobiosystems: Processing, Characterization, and Applications, SPIE Optics+Photonics, San Diego, USA, Aug. 2-5

K. Mizoguchi: Electronic states of M-DNA incorporated with divalent metal ions (Invited Talk)

T. Yokoya, H. Usui, K. Mizoguchi, H. Sakamoto: Visualization of two different forms of DNA on HOPG by STM (Invited Talk)

● TMU/SNU Joint Seminar, Tokyo, Japan, Aug. 28

K. Mizoguchi: Physical properties of divalent metal ion incorporated M-DNA (Oral)

● 18th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM18), Atagawa, Shizuoka, Japan, Dec. 9-11

T. Yokoya, H. Usui, H. Sakamoto, K. Mizoguchi: Visualization of two different forms of DNA by STM

E. Mori, H. Sakamoto, K. Mizoguchi, T. Naito: Molecular Charge Analysis in α -(ET)₂I₃ with STM

編集後記

普遍的な事実を調べることを生業とする者にとっては、報告書という形で過渡的な事象をまとめることが多々あるとは言え、個人的な意見や感情までも公にする機会はそう多くはない。そういう意味で編集後記は貴重なので、普段は文章にすることのできないことを書かせて頂く。

2011年5月現在「未曾有」と「想定外」が流行語である。年度末の2011年3月11日に東日本を襲った大地震による被害は2ヶ月以上経っても収束の兆しささえ見せていない。私の母校・東北大学も致命的なダメージを受け、懸命な復旧作業が進んでいるが、建物自体の損壊が激しく、研究活動の再開がままならない研究室もあると聞く。2001年9月11日の同時多発テロから丁度10年半が過ぎた日に起きた天災を、あの歴史的な犯罪と並べることは不適切かも知れないが、9.11と同じように3.11は我々にとって生涯忘れられない日付になってしまった。天災ではあるが、その直後に起きた福島第一原子力発電所の事故は、人災としての側面も持ち合わせている。そして、我々物理学者が信奉している(かも知れない)科学神話の崩壊とみなす人もいるだろう。しかし、科学がもたらした災害を解決するのも、やはり科学しかない。物理教室で行われている研究は直ちに社会に還元されるものではないが、この年次報告に記載されている数多くの成果が、何時の日にか学問という文化から技術という文明に昇華されることを期待したい。私自身も昨年度の原研委託研究や今年度からの核融合研との共同研究で、核融合プラズマの診断に必要な原子物理学的データの供給に協力している。私の記憶では学生だった25年前に「あと25年」と言われていた“夢の”核融合発電を実現する助けができれば、と思っている。

多くの人にとって2010年度は東日本大震災の年として記憶されるのだろうが、私にとってはその前後の短い間に相次いで共同研究者でもある親しい友人と尊敬する先輩を失ったことも辛い思い出として残ってしまいそうである。48と67という年齢は急逝という言葉だけではとても言い表せない。忙しい毎日を送っていると自分のことだけで手一杯で周りのことをみる余裕がないのだが、ふとしたときに現実に気付いてしまうことがある。既に複数の家族を亡くしている私は、悲しいかな喪失感には慣れてきた筈なのだが、それでも居るべき人が居ないことの無常さには平常心を保つことができていない。やらなければならない仕事に現実逃避の手段を求めるという不自然な日々である。

悲嘆にくれながらも忙殺されて、自分が消費されているように感じることが多いが、そのような個人的な問題どころではない重要な案件が沢山ある。現在は夏の電力不足に向けた節電対策と大学全体を揺るがす教員の定数削減問題が突如浮上ってきて戸惑っているが、少し前から大量定年退職後を睨んだ物理教室の人事計画の議論も徐々に佳境に入ってきた。来年度の年次報告作成時期には、おそらく新しい体制が見えてきているのはないだろうか。学生の多様化に対応したカリキュラムの変更の効果も評価できる時期になるかと思う。首都大・物理学教室の将来を厳しく、そして暖かく見守って頂きたい。

(田沼肇 記)

平成22年度年次報告編集委員
住吉孝行(2010年度教室主任)
南方久和
大塚博巳
田沼肇