

素粒子理論サブグループ

1. 研究活動の概要

1) ニュートリノ振動におけるパラメータ縮退の構造 (南方・内波)

ニュートリノ振動を用いるレプトン混合パラメータの決定において、ニュートリノ・反ニュートリノ振動確率の測定値に対して多重解が存在し、解がユニークに求まらないという問題がある。この「パラメータ縮退」と呼ばれている現象の全体構造を解明するための研究を行った。広く用いられているセルベラ達による振動確率公式を用いて、ミュー・電子ニュートリノを用いる CP、T、CPT 共役チャンネルの振動確率、さらには T 共役チャンネルとタウニュートリノ出現過程の振動確率の対を与えたときに存在するパラメータ縮退解を解析的に全て求めた。セルベラ公式が離散変換に対する不変性をもつことを指摘し、これをより一般化して「パラメータ縮退とは振動確率もつ離散変換不変性である」という新しい視点を提示した。パラメータ縮退の解析解を使って CP 共役チャンネルの縮退解の全体像を明らかにした。

2) 非標準的なニュートリノ相互作用の存在の下での 2 種類の CP 非保存効果の分離・検出 (南方・内波)

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、高次元演算子として表現されたニュートリノを含む非標準的相互作用の効果をニュートリノ振動を使って探索する可能性が盛んに議論されている。この非標準的相互作用の強さは、最も楽観的な次元 6 の演算子を仮定しても弱い相互作用の 1% 以下の微弱なものであるため、この探索には超精密実験が必要とされる。高輝度ミュオン蓄積リングを用いるニュートリノファクトリーがこの最有力候補である。非標準的なニュートリノ相互作用が存在する系の特徴は、この新しい相互作用に起因する CP 非保存効果が標準的なレプトン小林・益川位相によるものと共存し、この二つの効果が分離ができるかどうか大きなポイントである。2007 年度に我々が提案したニュートリノファクトリーを用いた 3000 km・7000 km の基線長をもつ 2 検出器系を用いて、この分離・検出が可能であることを示した。さらに、この系のシミュレーションに現れた非標準的相互作用が存在する系におけるパラメータ縮退の問題について、この解析的理解が可能であることを示した。(ペルー・カトリック大学 A. M. Gago 氏、リオデジャネイロ・カトリック大学 布川弘志氏、サンパウロ大学 R. Zukanovich-Funchal 氏との共同研究)

3) T2KK 長基線ニュートリノ実験計画における非標準的物質効果 (安田・大木)

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、ニュートリノの伝播中の物質効果に新たな項が存在する場合、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、どの程度まで新物理のパラメータを制限できるかを、電子ニュートリノとタウニュートリノの成分だけに注目して数値的に解析した。その結果、現在の制限より一桁ほど改善できることがわかった。さらに、この場合、標準的な CP 非保存位相と新物理によるものが 2 種類存在するが、標準的混合角 (13) と新物理のパラメータがある程度大きければ、別々に測定が可能であることを示した。又、上記の解析では、物質効果のミューニュートリノの成分が無視できる程度に小さいと仮定したが、その仮定を正当化するために、高エネルギー大気ニュートリノのデータが、ほぼ真空中の二世代のニュートリノ振動で記述されるという事実を用いて、ミューニュートリノの成分が小さいということを、解析的に推論した。

4) 物質中におけるニュートリノの吸収と不活性ニュートリノ混合 (安田・生田目)

通常のニュートリノは、エネルギーが非常に高くなると、弱い相互作用の断面積がエネルギーに比例して増加するため、地球を貫通することができなくなることが知られている。一方、不活性ニュートリノには、弱い相互作用もないため、そのような吸収の効果が存在しない。不活性ニュートリノと1種類の通常のニュートリノが混合する場合には、Naumovにより、ニュートリノが地球を貫通する確率が、不活性ニュートリノ混合の大きさによってどの程度変化するか調べられている。この研究では、ニュートリノの吸収がない場合にニュートリノ振動の確率を解析的に表す木村 - 高村 - 横枕の定式化を、ニュートリノの吸収がある場合に一般化することにより、不活性ニュートリノと3種類の通常のニュートリノが混合する場合を議論した。不活性ニュートリノ混合が存在する場合に、天体起源の高エネルギー宇宙ニュートリノが地球を貫通する様子から、どれだけ不活性ニュートリノ混合に制限をつけられるかを解析した。残念ながら結果は現在の制限を越えるほどではないことがわかった。

5) 三世代ニュートリノにおける非断熱遷移の取り扱い (山本)

超新星などの高密度物質の内部からニュートリノが放出される場合、三世代ニュートリノ混合の枠組では、高準位 - 中準位の過程と中準位 - 低準位の過程の非断熱遷移が起こる可能性があり、従来の研究では実際に起こる非断熱遷移はこれら二つの過程の組み合わせで記述できると考えられていた。この研究では、3準位における非断熱遷移が2準位における非断熱遷移の組み合わせで記述し得るか、又記述できない場合にはどういう場合に記述できないかを研究した。この論文では現実的なニュートリノ振動のパラメーターの値やニュートリノエネルギーの値 E にとらわれず、非断熱遷移が起こり得る色々なパラメーターの値と E について数值的・解析的に研究を行った。解析の結果、太陽ニュートリノと大気ニュートリノの質量二乗差が同程度であり、かつ混合角が適当な範囲にある場合に2準位の非断熱遷移の組み合わせによる記述が破綻すること、又、考察している2準位とは別なセクターの混合角の空間変化が2準位のエネルギー固有値差と比較して無視できないことが2準位による議論が破綻するための条件であることがわかった。

6) 低スケール弦模型における電弱対称性の動力的破れの可能性 (北澤)

素粒子の弦模型のなかで、弦の張力のエネルギースケールが小さいものは、今年度末に稼働を始めたLHC加速器による実験で検証、または排除できる可能性がある。重力理論としての弦理論においては、弦の張力のエネルギースケールは非常に大きなプランクスケールであることが自然である。しかし、自然界には電弱対称性の破れのエネルギースケールというものもあるので、弦の張力のエネルギースケールがそれに近いスケールである可能性もある。電弱対称性の破れが弦の動力学によって起これば、そのエネルギースケールは弦の張力のエネルギースケールで決定されることになる。また、この場合、模型によらず一般に、LHC加速器による実験で検証可能であるほどの軽いベクトル粒子 (anomalous $U(1)$ gauge boson) の存在が予言される。この軽いベクトル粒子が、テクニカラーシナリオという、強結合相互作用による電弱対称性の動力的破れの模型の決定的な困難の解決に一役買う可能性があることを示唆した。すでに実験で観測されているべきである強結合相互作用による束縛状態の特定の効果が観測されていないという決定的な問題が、軽いベクトル粒子の働きによってその効果が相殺されて観測されないという可能性を示唆した。

7) 弦模型におけるモジュライ安定化と宇宙のインフレーション (北澤)

弦理論は基本的に時空10次元での現象を表現するものである。したがって、我々の4次元時空での素粒子模型を構成する際には、余分の6次元空間を小さく「コンパクト化」しなければならない。コンパクト化された方向の空間はごく小さいために、未だ観測されていないと考える。コンパクト化された空間

の大きさは、4次元時空でのスカラー場（モジュライ場という）の真空期待値として表現され、その値を適切な値に安定に保つことが課題となる（モジュライ安定化の問題）。ひとつの可能性として KKLT (Kachru-Kalosh-Linde-Trivedi) のシナリオというものがある。弦理論の非摂動論の効果によるモジュライ場の指数関数のポテンシャルを利用するものである。このシナリオにおいて、モジュライ場が必然的に指数関数のポテンシャルの壁を駆け上るような解が存在しないことを発見し、モジュライ安定化が動力学的に達成される可能性を見いだした。また、指数関数のポテンシャルにしたがうモジュライ場は宇宙のインフレーションを起こすインフラトンの働きをする可能性もあり、その場合の宇宙密度揺らぎについて数値計算を行った。この研究は、ピサ高等師範学校の A.Sagnotti 氏と、パリ工科大学の E.Dudas 氏との共同研究で、昨年度の研究「超対称性を持たない弦模型における自然なインフレーション」を引き継いで、まだ進行中のものである。

2. 研究業績

1) 論文

A. Bandyopadhyay, N. Kitazawa, O. Yasuda et al.: Physics at a future Neutrino Factory and super-beam facility, *Report of Progress in Physics*, **72** (2009) 106201.

A. Donini, K. Fukui, D. Meloni, J. Lopez-Pavon, O. Yasuda: The Discovery channel at the Neutrino Factory: $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ pointing to sterile neutrinos, *Journal of High Energy Physics* **08** (2009) 041.

A. Gago, H. Minakata, H. Nunokawa, S. Uchinami, and R. Zukanovich Funchal: Resolving CP Violation by Standard and Nonstandard Interactions and Parameter Degeneracy in Neutrino Oscillations, *Journal of High Energy Physics* **01** (2010) 049-1-47.

2) 国際会議報告

H. Minakata: Large- θ_{13} Perturbation Theory of Neutrino Oscillation, *Acta Physica Polonica B* **40** (2009) 3023-3031.

H. Minakata: Neutrino's Non-Standard Interactions; Another Eel under a Willow?, in *Venice 2009, Neutrino Telescopes* 327-350.

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

3) 学会講演

日本物理学会 2009 年秋季大会 2009 年 9 月 10 日 ~ 9 月 13 日 (甲南大学)

A. Donini, 婦木健一, J. Lopez-Pavon, D. Meloni, 安田修: ニュートリノファクトリーにおけるステライルニュートリノ探索

国内研究会

実験・理論合同研究会「LHC が切り拓く新しい物理」、東京大学、2009 年 4 月 1 日 - 3 日

生田目春香: A New Problem of Virtual Kaluza-Klein graviton exchanges (口頭)

国際会議

Opening conference of the workshop “New Perspectives in String Theory”, Florence, Italy, April 6-8, 2009.

N. Kitazawa: Tadpole resummations and one-loop scalar masses in string models without supersymmetry

XXXIII International Conference of Theoretical Physics, Matter to the Deepest: Recent Developments in Physics of Fundamental Interactions, USTRON '09, September 11 - 16, 2009.

H. Minakata: Long-Baseline (LBL) Neutrinos; Looking Forward to the Future

22nd International Workshop on Weak Interactions and Neutrinos (WIN09), Perugia, Italy, September 14-19, 2009.

S. Uchinami: Resolving CP Violation by Standard and Nonstandard Interactions in Neutrino Oscillations

International School of Nuclear Physics in Erice, Sicily, 31st Course: “Neutrinos in Cosmology, in Astro, Particle and Nuclear Physics”, Erice/Sicily, September 16 - 24, 2009.

H. Minakata: Perturbation Theory of Neutrino Oscillations with and without Nonstandard Interactions

4th Plenary Meeting of the International Design Study for the Neutrino Factory, Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai, India, October 12–14, 2009

O. Yasuda: Tau detection and new physics (talk through video conference)

Madrid Neutrino NSI Workshop, Universidad Autonoma de Madrid, Madrid, Spain, December 10–11, 2009

O. Yasuda: Sterile neutrino mixings and near detectors (Invited talk)

A topical conference on elementary particle physics and cosmology (Miami 2009), Lago Mar Resort, Fort Lauderdale, Florida, USA, 15–20 December 2009

O. Yasuda: Sensitivity to sterile neutrino mixings at a Neutrino Factory (Invited talk)

5th International Conference on beyond the Standard Models of Particle Physics, Cosmology and Astrophysics (BEYOND 2010), Cape Town, South Africa, February 1–6, 2010

O. Yasuda: The Discovery Channel at a Neutrino Factory (Invited talk)

XLVth Rencontres de Moriond (Moriond EW 2010), La Thuile, Italy, March 6–13, 2010

H. Oki: T2KK and non-standard neutrino interactions

高エネルギー理論サブグループ

1. 研究活動の概要

2009年、当研究室では新しい補正重力理論及び超重力理論の枠内で、初期宇宙でのインフレーション及び現在の宇宙のダークマター・ダークエネルギーの理論的描像を得ることを目標として、全く新しい研究計画をスタートさせた。当該の研究計画での2009年度の日本学術振興会助成金(基盤B)への申請は認可されなかったが、他の機関からの非常に限られた経済的な支援によって、成功裏にスタートさせることができた。

スカラー曲率の高次項による、一般相対性理論のアインシュタイン-ヒルベルト重力作用の修正を基本的なアイデアとした新しい重力理論の考え方はかなり古くからある(最初の掲載論文はUSSRで1970年に言及した)。これをインフレーションの理論的描写に適用し、最初に成功したのは1980年A.Starobinsky博士(USSR)によるものである。現在の宇宙のダークエネルギーやダークマターに対する重要性や標準模型を超える素粒子物理学との整合性によって、最近10年(2000-2009)で補正重力モデルへの興味を取り戻されてきている(掲載された論文の数は世界中で500以上にのぼる)。

私達の研究(米メリーランド大学のS.J.Gates Jr.博士との共同研究)では補正重力理論を拡張した、局所的に $N=1$ 超対称性をもつものと考えられることのできる補正超重力理論を初めて構築した。新しい補正超重力理論の最初の適用として(米プリンストン大学のN.Yunes博士との共同研究)、ループ量子重力理論に対して行い、(場の他に)超空間においてHolst作用及びBarbiero-Immirziパラメータを含む新しい超重力作用を初めて導いた。研究初年度(平成21年度)の間の主な成果は、初めに曲がった超空間で(即ち、超場の項で)定式化された新しい補正超重力理論の場の理論的構造を調べたものについてであった。

1) 補正超重力の構造と宇宙項

私達の新しい超重力理論は、4次元時空での補正重力理論である $f(R)$ 理論の超対称性への拡張である。最小の(2次の)定式化においては、 $N=1$ ポアンカレ超重力の曲がった超空間を用いているので、 $F(R)$ 超重力作用は局所 $N=1$ 超対称性の下で明らかに不変である一方、補助場は伝播しない。私達は $F(R)$ 超重力理論と動的なカイラル“物質”超場と結合した標準的な $N=1$ ポアンカレ超重力理論とが、古典的には超空間でのルジャンドル-ワイル変換を通じて等価であることを証明した。この等価な、物質が結合した超重力場において、カイラル超場のケーラーポテンシャル・スーパーポテンシャル・スカラーポテンシャルを計算した結果、いずれも1つのホロモルフィックな関数によって支配されていることが分かった。また、ファインチューニングをせずに宇宙項が0になるための条件を見出し、これはノースケール $F(R)$ 超重力を定義するものである。

2. 研究業績

1) 論文

S.J. Gates, Jr., and S.V. Ketov, Superstring-induced supergravity as the universal source of inflation and quintessence, Phys. Lett. B674 (2009) 59–63

S.V. Ketov, Scalar potential in $F(R)$ supergravity, Class. and Quantum Grav. 26 (2009) 135006, 10 pages

S.J. Gates, Jr., S.V. Ketov and N. Yunes, Seeking the Loop Quantum Gravity Barbiero-Immirzi Parameter and Field in 4D, $N=1$ Supergravity, Phys. Rev. D80 (2009) 065003, 20 pages.

2) 国際会議報告

S.V. Ketov, f(R) supergravity, the “Invisible Universe” electronic Proceedings
<http://universe2009.obspm.fr/>

M. Iihoshi and S.V. Ketov, Type-II string R4 terms from the cosmological perspective, the
“Invisible Universe” Proceedings
<http://universe2009.obspm.fr/>

S.V. Ketov, Born-Infeld non-linear Electrodynamics and String Theory, electronic Proceedings PIERS-
2009
<http://www.emacademy.org/>, <http://www.piers.org/>

3) 学会講演

国際会議

International Conference “Invisible Universe”, Palais de l’UNESCO, Paris, France, June–July 2009

S.V. Ketov, Geometrical inflation in higher-derivative supergravity,

M. Iihoshi and S.V. Ketov, Gauss-Bonnet with dilaton in five dimensions

International Conference on Electromagnetism (PIERS-2009), MIREA, Moscow, Russia, August
2009

S.V. Ketov, Born-Infeld non-linear Electrodynamics and String Theory

原子核理論サブグループ

1. 研究活動の概要

1) 強度関数のゆらぎのウェーブレット解析

我々はこれまで、原子核の高励起状態における応答関数（強度関数）のゆらぎの分析を通して、巨大共鳴などの集団励起の減衰機構を調べてきた。その結果、比較的軽い ^{40}Ca のような原子核と ^{208}Pb のような重い原子核では減衰機構に違いがあることがわかってきた。ここで用いた方法は、強度のエネルギー依存性におけるフラクタル次元を利用しており、強度の自己相関関数の局所的ゆらぎを反映している。一方、最近の実験で用いられたウェーブレット解析の手法は、相関関数の種々のスケールにおける局所的平均によって表すことができる。そこで本年度は、典型的な強度関数を与える模型を用いて、ウェーブレットに基づくゆらぎの分析を行った。とくに、解析の一手法であるWTMM法によりピーク間隔分布を求めたところ、強度の分散幅によって間隔分布が大きく影響されることがわかった。この分析を ^{40}Ca 、 ^{208}Pb にも拡張した。

2) 極低温原子気体の静的・動的性質の研究

ポテンシャルにトラップされた極低温原子気体の研究は、有限量子多体系として、原子核物理学との共通点も多い。当研究室ではとくにボ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) 等核フェッシュバツハ分子による多成分ボース凝縮体の相分離

二成分ボース気体において、一方の原子が束縛分子状態（等核フェッシュバツハ分子）を形成するようなフェッシュバツハ共鳴を考え、それにより引き起こされる相分離現象のメカニズムを調べた。等核フェッシュバツハ分子形成・解離を含めたハミルトニアンから出発し、系の基底状態を記述するグロス・ピタエフスキー (GP) 方程式を数値的に解いた。密度分布を調べた結果、分子数とともに二成分間の有効斥力が大きくなり、相分離が引き起こされていく様子が確認された。これは相互作用エネルギーとポテンシャルエネルギーの拮抗から生じた結果であると言える。また、原子数比を変化させたときにトラップ中心部に現れる相構造の変化を調べた。分子形成している原子数を多く（少なく）すればするほど相分離が起きやすく（起きにくく）なる傾向が見られた。

b) 二成分ボース気体の集団励起の研究

多体系のダイナミクスは、まず多数の粒子が協調して運動する集団的励起状態に典型的にあらわれる。多成分の系の場合には構成する成分同士の相対運動の自由度があるため、集団励起も一般に多様な現れ方を示す。本研究では二成分ボース原子気体を対象として、トラップがない場合・ある場合に分けて、振動型の集団励起を調べた。トラップのない一様系の場合、ボース粒子間の斥力が強い場合には、二成分が逆位相で運動するモードの励起エネルギーが非常に低くなり、相分離との関連が示唆された。またトラップ系では、和則の方法により多重極型の集団励起を調べた。

c) ボース・フェルミ (BF) 混合原子気体における対生成と運動量分布

二成分フェルミ系では、粒子間の引力を変化させることにより、BCS型フェルミ対からフェルミ対分子のボース・アインシュタイン凝縮へのクロスオーバーが観測されている。一方、ボース・フェルミ (BF) 混合系でBF間の引力を徐々に強くすると、自由なBF混合気体から、複合フェルミ粒子 (BF対) の気体へのクロスオーバー過程が予想される。本年は、これまで検討してきた粒子間擬ポテンシャルの変化による複合粒子形成の機構に基づき、フェルミ粒子の運動量分布がどのように変化するかを調べた。引力が強くなると共に、複合粒子形成に伴う高運動量成分が増加することが見出された。

d) 光学格子中の双極子相互作用する二成分フェルミ気体の超流動

光学格子にトラップされた二成分フェルミ気体を示す種々の相について、粒子間に働く双極子相互作用の役割を調べた。このため、リング型ダイアグラムを足し上げて密度およびスピン相関関数を求め、相互作用によって相関関数がどの運動領域で増幅されるかを調べた。さらに、この相関によって誘起される有効相互作用を用いて、フェルミ粒子対形成と対応する超流動相を調べた。この結果、双極子相互作用がd波型超流動相を実現し得ることを示すとともに、実験的にこれを実現するための条件を見積もった。

2. 研究業績

1) 論文

T. Watanabe, Bose-Fermi Effect of dipole-dipole interaction on unpolarized ultracold fermionic gases in a two-dimensional optical lattice *Phys. Rev. A*, **80** (2009) 053621

2) 学会講演

日本物理学会「第64回年次大会」 2009年3月27-30日(立教大学、立教池袋中学・高校)

相場浩和、松尾正之、西崎滋、鈴野浩大、鈴木徹：巨大共鳴の強度関数ゆらぎの新しい分析手法の開発

渡辺隆之、鈴木徹、Peter Schuck：引力相互作用するボーズ・フェルミ混合原子気体における分子形成

日本物理学会「2009年秋季大会」 2009年9月25日~9月28日(熊本大学黒髪キャンパス)

柴藤亮介、西村拓史、渡辺隆之、鈴木徹：Feshbach分子を含むスピノルBECの相分離

渡辺隆之、鈴木徹、Peter Schuck：ボーズ・フェルミ混合原子気体での対相関と異種分子形成

国内研究会

基研研究会「熱場の量子論とその応用」2009年9月3~5日(京都大学基礎物理学研究所)

柴藤亮介、等核フェッシュバハ分子による多成分ボーズ凝縮体の相分離

国際会議

Cold Atoms and Molecules: Collisions, Field-Effects, and Applications, Kyoto, Japan, June 23 – 26, 2009

R. Shibato, T.Nishimura, T.Watanabe and T.Suzuki, Spin phase separation in spinor Bose-Einstein condensates with Feshbach molecules

International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials, Yokohama, Japan, March 9 – 12, 2010

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

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。2009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、2009年度に行った主な研究の概要である。

1) 銀河団ガスの熱的進化

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。銀河間にはピ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がHubble時間より短くなるため、圧力の低下を補うように外層部から中心部に大規模なガスの流入が起きているとするクーリングフローモデルが提唱された。しかし、このモデルは観測事実と矛盾する点も多い。これに対しわれわれは、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冷却モデルを提唱した。このような準静水圧平衡の下で放射冷却するガスは観測される中心部の温度分布をよく説明することが示されたが、密度分布については定量的な議論がされていない。また、冷却の効いていないガスはピリアル温度の等温分布にあると仮定されていた。

そこで、より一般的にガスをpolytropeとして扱い、準静水圧平衡冷却モデルを再構築した。銀河団全体の質量の約80%をダークマターが占めることが示唆されているので、重力ポテンシャルへの銀河・ガスの寄与は無視できると仮定し、KingモデルとNFWモデルの2種のダークマター分布について、重力と圧力勾配の局所平衡を満たす冷却ガスの温度分布と密度分布を求めた。さらに、熱制動放射が支配的と仮定してX線輝度分布を計算し、観測と直接比較できるように視線方向に積分して半径の関数として求めた。この結果を $(\Omega_M, \Omega_\Lambda) = (0.3, 0.7)$ 宇宙の下での多数の銀河団の放射測度分布(観測)と比較し、中心部での分布は準静水圧平衡の下で放射冷却するガスによってよく説明されることを示した。

2) 超新星残骸の再結合プラズマ

超新星残骸は、超新星爆発の運動エネルギーによって膨張する超新星物質と、周囲の物質、例えば星間物質との相互作用で生じた衝撃波が、星間物質中および超新星物質中に伝播し、物質を加熱して、高温のプラズマを形成した天体である。衝撃波によって高温に加熱される時間に比べ電離に要するタイムスケールが長いので、X線で明るい、比較的若い超新星残骸では電離平衡に到達せず、基本的に、電子温度が電離温度(電離度を温度に換算したもの)よりも高い、電離プラズマ状態(ionizing)にあると考えられてきた。実際、多くの若い超新星残骸から観測されるX線スペクトルは、電離が進行しつつある非平衡電離モデルでよく説明されている。典型的なシェル型とは異なる形態(mixed morphology)の超新星残骸から過電離状態が見つかったが、電子熱伝導で説明しうる範囲のずれでしかなかった。

しかし、X線天文学衛星*Suzaku*によって、少なくとも2例の超新星残骸から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、単に過電離状態というより、再結合しつつある(recombining)プラズマ状態にあることが明確に示された。熱伝導は定温化に向かう緩和過程であるから、電子温度と電離状態の勾配に起因する過電離状態を生じることがあっても、高い電離状態のイオンと低エネルギーの電子が混在するような非平衡電離状態が保たれることは考えにくい。*Suzaku*の観測結果は、まさにこの状態からの放射を検出したことを意味し、若い超新星残骸は電離プラズマ状態にある放射で特徴づけられるという従来の超新星残骸の進化の描像に大きなインパクトを与えるものになった。再結合状態を示す超新星残骸の形態的特徴に着目し、超新星～超新星残骸の進化において再結合プラズマ状態の起源となりうる物理過程を探っている。

3) 中高温銀河間ガスの検出可能性

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

2. 研究業績

1) 論文

H. Yamaguchi, M. Ozawa, K. Koyama, K. Masai, J. S. Hiraga, M. Ozaki, D. Yonetoku: Discovery of Strong Radiative Recombination Continua from the Supernova Remnant IC 443 with Suzaku, *Astrophys. J. Letters* **705** (2009) L6–L9

M. Ozawa, K. Koyama, H. Yamaguchi, K. Masai, T. Tamagawa: Suzaku Discovery of the Strong Radiative Recombination Continuum of Iron from the Supernova Remnant W49B, *Astrophys. J. Letters* **706** (2009) L71–L75

2) 学会講演

日本天文学会 2009 年秋季年会 2009 年 9 月 14–16 日 (山口大学)

山口弘悦, 小澤碧, 小山勝二, 政井邦昭, 平賀純子, 尾崎正伸, 米徳大輔: 「すざく」による超新星残骸 IC443 からの放射性再結合連続 X 線の発見

国内研究会

第 10 回宇宙科学シンポジウム, 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部, 2010 年 1 月 7–8 日

大西隆雄, 山口弘悦, 政井邦昭, 小澤碧, 澤田真理, 小山勝二: 「すざく」による超新星残骸からの強い放射再結合 X 線の発見

国際会議

High-resolution X-ray spectroscopy: past, present, and future, Utrecht, The Netherlands, March 15–17, 2010

H. Yamaguchi, M. Ozawa, K. Koyama, K. Masai, T. Ohnishi, M. Sawada: Discovery of recombining plasmas in mixed-morphology SNRs: recent Suzaku spectroscopy and future prospects

M. Ozawa, K. Koyama, H. Yamaguchi, K. Masai, T. Tamagawa: Suzaku Discovery of Strong Recombination Structures from the SNR W49B

非線形物理サブグループ

1. 研究活動の概要

1) 単純位相空間をもつ系における回折-トンネル効果のクロスオーバー

可積分領域とカオス領域とが自己相似的に混在する混合位相空間は、一般には非常に複雑な構造をもち、その上の動力学解析には古典、量子論いずれも大きな困難を伴う。カオスとトーラスを共存させながらも、自己相似構造を持たない「単純な位相空間 (sharply divided phase space)」における量子効果の研究を行った。自己相似構造をもたない単純混合位相空間は、量子系においては、可積分・カオス領域の境界に不連続性が存在することによって発生する強い回折効果が予想される。回折効果は、古典軌道が到達不可能な領域への波動効果、という意味では、トンネル効果と似たものであるが、カオス系においてその両者を論じた研究はほとんどない。ここでは、系の解析性を連続的に変化させることのできるモデルに対し、回折とトンネルのクロスオーバーが起こることを数値的に観察し、その背景を半古典的に解析した。

2) 多次元トンネル効果における自然境界の役割について

混合位相空間上のトンネル効果は、動力学を複素領域に拡張した複素力学系によって記述されるが、可積分領域とカオス領域との境界はその問題の中核を成す。特に、不変曲線 (KAM トーラス) は複素空間上でその解析接続可能な領域の境界 (自然境界) をもち、一般に自己相似状の構造をもつことが知られている。不変曲線の自然境界が混合位相空間上のトンネル効果にいかなる影響を及ぼすか? という点は長い間議論の的となってきたが、我々は高精度数値計算を実行し、自然境界を超えた領域においていわゆるインスタント近似が有効性を失う明確な証拠を見出した。この事実は、自然境界が、インスタントに象徴される従来の量子トンネル効果 (1次元トンネル効果) と、多次元・非可積分系におけるトンネル効果とを隔てる境界になっていることを意味する。また、単純位相空間をもつ系に対して、ジュリア集合と自然境界の関係に関する考察も併せて行った。

3) 双曲力学系における meeting time 分布

保存力学系において、近接するカオス軌道は時間とともに指数関数的に分離する。一方、Poincaré の再帰定理により、すべてのカオス軌道は初期点の任意の近傍に何度でも再帰することが知られている。ある領域から離れた軌道がその領域に再帰するまでの時間、再帰時間の分布は、カオス軌道の不安定性を特徴づける統計量のひとつである。一様双曲系における再帰時間分布は、領域の大きさが 0 の極限で指数分布になることが知られている。ここでは、再帰時間分布の類似物として、meeting time 分布を提案し、その分布の振る舞いとカオス軌道の統計的性質との関係性を議論した。 s 個の記号を持つ記号力学系における meeting time 分布を解析的に導出すると共に、非双曲力学系 (混合位相空間を持つ力学系) における meeting time 分布の数値的な観察を行った。

4) 全のアンホロノミー (新奇な量子ホロノミー)

周期的なパラメータ依存を持つ Hamiltonian に対し、その固有状態を始状態としてパラメータを断熱的に一周分変化させたときの時間発展は、断熱定理のため、動力的な位相を被った上で始状態に戻ると素朴には予想される。実は、これに加えて、幾何学的位相 (Berry 位相) が生じることが良く知られている。一方、全のアンホロノミーを持つ系では、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。

本年度の成果を列挙する。(1) 多準位系における可解なモデルの解析:これまで、階数 1 の摂動下の系について一般に全のアンホロノミーが起きることが示されていた (Miyamoto and Tanaka 2007) が、固有値問題の解は陽には得られていなかった。これに対し、ある多準位モデルにおいて、固有 vector の陽な表式を得、複素パラメーター空間中の例外点の構造を解析した。(2) 準位交差を持つモデルの解析:これまで、Hamiltonian での全のアンホロノミーを引き起こすには、スペクトルが上下に非有界であることが自明な要請だとされてきた。ここでは、準位交差下での断熱定理 (Kato 1950) を利用し、スペクトルが有界なモデルでの例を陽に示した。これらは、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ものである。

2. 研究業績

1) 論文

A. Shudo, Y. Ishii and K.S. Ikeda: Julia sets and chaotic tunneling I, *J. Phys.A: Math. Theor.* **42** (2009) 265101 (26 pages)

A. Shudo, Y. Ishii and K.S. Ikeda: Julia sets and chaotic tunneling II, *J. Phys.A: Math. Theor.* **42** (2009) 265102 (34 pages)

A. Akaishi, A. Shudo: Accumulation of unstable periodic orbits and the stickiness in the two-dimensional piecewise linear map, *Phys. Rev. E* **80** (2009) 066211 (12 pages)

A. Ishikawa, A. Tanaka, A. Shudo: Recovery of chaotic tunneling due to destruction of dynamical localization by external noise, *Phys. Rev. E* **80** (2009) 046204 (13 pages)

A. Tanaka and K. Nemoto: Adiabatic quantum computation along quasienergies, *Phys. Rev. A* **81** (2010) 022320-1–022320-8

T. Cheon, A. Tanaka and S. W. Kim: Exotic quantum holonomy in Hamiltonian systems, *Phys. Lett. A* **374** (2009) 144–149

A. Tanaka and T. Cheon: A Unified Theory of Quantum Holonomies, *Ann. Phys. (N.Y.)* **324** (2009) 1340–1359

2) 学会講演

日本物理学会 第 64 回年次大会 2009 年 3 月 27 日–3 月 30 日 (立教大池袋キャンパス)

赤石暁, 首藤啓: 双曲平面における局所秩序と構造緩和

田中岐王寛, 赤石暁, 首藤啓: 区分線形写像における古典作用間の相関と波動関数の動的局在

田中篤司, Sang Wook Kim (Pusan Nat. Univ.), 全卓樹 (高知工大): 固有値・固有空間ホロノミーの背後にあるリーマン面の構造

国内研究会

量子論の諸問題と今後の発展、KEK、2010 年 3 月 15–16 日

田中篤司: 弱値の半古典論 (ポスター)

The 3rd Tosa Yamada Theoretical Physics Mini-Workshop、高知工科大、2010年3月8–10日

田中篤司: Eigenvalue and eigenspace anholonomies in quantum systems (口頭)

「古典および量子ダイナミクス・非平衡統計力学」に関するワークショップ、東大、2010年2月12–14日

田中篤司: 固有値と固有空間のアンホロノミー (口頭)

第21回量子情報技術研究会 (QIT21)、電通大、2009年11月4–5日

田中篤司、根本香絵 (NII): 全の新奇なホロノミーに沿った断熱量子検索 (口頭)

国際会議

RIMS workshop on “New development of asymptotic analysis and dynamical systems”, RIMS, Kyoto University, June 15–19, 2009

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

3rd STINT summer school, International House, Tokyo Metropolitan University June 28–July 10, 2009

A. Ishii and A. Shudo: Open quantum system with mixed phase space

A. Ishikawa, A. Tanaka, and A. Shudo: Recovery of dynamical tunneling due to destruction of dynamical localization by external noise

International workshop on microcavities and their applications (WOMA), Seoul National University, Korea, August 25–29, 2009

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

MPIPKS Workshop, “Tunneling and Scattering in Complex Systems — from single to many particle physics—” Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme, Dresden, Germany, September 7–25, 2009

A. Shudo: Complex semiclassical approach to chaotic tunneling problem (4 lectures, invited)

12th Japan-Slovenia International Workshop on Nonlinear Dynamics, Maribor, Slovenia, October 6–10, 2009

A. Shudo: Flooding of wavefunctions and the Anderson transition (invited)

The International Conference on Quantum Information and Technology, National Institute of Informatics, Tokyo, December 2–5, 2009

A. Tanaka and K. Nemoto (NII): Adiabatic quantum search along Cheon’s anholonomies

3) 学会誌等

首藤 啓: 近可積分系の量子論と高次元複素力学系、別冊数理科学 1月号 181–187 (2010)

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。2009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

2002年に提唱された一般化 XY モデルの問題をとりあげた。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、一般化モデルについて、一般化パラメータ q を増加させると KT 転移に加えて 1 次転移が見られるという主張、KT 転移以外の転移はないという主張などがある。そこで、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、このモデルの相転移を精密に調べた。 q の値によらず KT 転移だけであることを示し、さらに転移温度によらない有限サイズスケーリング解析を行い、KT 転移のユニバーサリティーを示した。[岡部]

2) モンテカルロ法の画像処理問題への応用

統計力学分野での画像処理は確率的画像処理と呼ばれ、本格的な研究が行われ始めたのはごく最近のことである。従来モンテカルロ法などの確率的手法は実際的な計算効率がよくないとの理由で余りとりあげられてこなかったが、最近のモンテカルロ法の手法的な発展を応用すれば新しい展開が期待される。2009年度は、Mumford-Shah エネルギー汎関数による画像修復問題について、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考察した。まず、basin hopping 法を利用して精度よく領域分割を行い、それを初期値として、Mumford-Shah エネルギー汎関数を最小化することで、素早い探索ができた。パラメータの選び方、アニーリングのスケジュールについて、さらに検討を進めている。[岡部]

3) 磁化ダイナミクスによるスピン流生成と逆スピンホール効果による電流生成の理論

スピン軌道相互作用を用いれば、電流を流すことでスピンの流れ(スピン流)を発生し、結果として磁化を発生することが可能である(スピンホール効果)。一方、交換相互作用は磁化からスピン流や電流という電子の流れを生じるはたらきがある)。これらを組み合わせると磁化から発生したスピン流をスピン軌道相互作用を用いて電流に変換するという逆スピンホール効果が可能である。これにより磁場をかけるだけで電圧を全くかけずに電流が取り出せることになる。この問題を多体量子場の理論から定式化し、金属中の不純物によるスピン軌道相互作用の場合を考え解析を行った。電子の拡散による vertex 補正を Green 関数を用いて正しく考慮し、電流の保存則を満たした計算である。その結果、確かに磁化ダイナミクスから生じる電流があることがわかり、一部は局所的な寄与、つまり有効電場からの寄与で、残りは不均一電荷分布の誘起に伴う拡散的な電流と解釈されることがわかった。また、スピンポンピングによって生じるスピン流が、有効場により駆動されているのかどうかについても微視的解析を進め、その結果通常の場合では有効場の寄与は小さく、むしろ電子の拡散運動でスピン密度が伝搬することで生じるスピン流が主であることが明らかになった。すると強磁性体非磁性体の接合において大きなスピン流を得るためには、界面でのスピン密度を効率よく制御すればよいことになる。スピン流制御においてこの点は非常に重要である。[多々良]

4) アクチノイド化合物の磁性と超伝導

まず、二酸化アメリシウム AmO_2 の磁性を議論した。9K 付近に磁化率のピークがあるが、中性子回折実験では何も見えないことから、通常の磁気相ではないと予想されている。このような状況は NpO_2 と良く似ているが、結晶場基底状態が Γ_8 で多極子活性であった NpO_2 とは異なり、 AmO_2 の結晶場基底

状態は Γ_7 であるとされており、多極子秩序は考慮されてこなかった。そこで、 AmO_2 の結晶場基底状態を再検討した。 U^{4+} イオンの励起スペクトルからクーロン相互作用 U を決め、原子のスピン軌道相互作用 λ の値を用い、 UO_2 の結晶場状態から結晶場パラメーターを決めた。 NpO_2 と PuO_2 の結晶場状態はよく再現されるが、やはり AmO_2 は Γ_7 基底となる。 Am^{4+} は $5f$ 電子が 5 個であるが、実は f^5 の場合、 U と λ の兼ね合いで基底状態は容易に変化する。実際、 U と λ の大きさを変えると、 Γ_8 基底が得られることがわかった。そこで、結晶場基底状態を変えながら数値繰り込み群法によって 7 軌道アンダーソン模型の多極子感受率を計算し、 AmO_2 の多極子秩序の可能性を議論した。次に、 $j-j$ 結合描像に基づいて立方晶系ウラン化合物の磁性と超伝導を微視的観点から議論した。単純立方格子の格子点に f 電子軌道 (Γ_7 および Γ_8) を配置し、 σ ボンドを介する f 電子の跳び移り積分を考える。このとき、軌道の対称性から、 Γ_7 軌道は局在的、 Γ_8 軌道は遍歴的になる。結晶場により Γ_7 軌道のエネルギーが低くなり、フロント結合が結晶場分裂よりも強い場合、いわゆる二重交換機構によって金属強磁性が発現する。これにより、立方晶系ウラン化合物において、加圧や Th ドーピングによって反強磁性絶縁体相から金属強磁性相に転移する可能性が考えられる。さて、二重交換機構によって強磁性相が起こったとすると、強磁性相内の電子系は、 Γ_8 軌道縮退スピンレスハバードモデルで記述される。このモデルを乱雑位相近似で解析し、軌道揺らぎによる超伝導の可能性を調べた。その結果、軌道秩序相近傍の低温側に奇パリティ p 波超伝導相が現れるが、高温側で奇数周波数依存性をもつ偶パリティ d 波超伝導が現れるなど、軌道揺らぎによるエキゾチックな超伝導の可能性が示唆された。[堀田]

5) 非調和フォノンによる重い電子状態の逆同位体効果による検証

$\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ という物質では、通常金属の数百倍もの大きさの電子比熱係数が磁場によって殆ど変化しないが、この「磁場に鈍感な重い電子」現象は、スピンに関係する通常の近藤効果では理解することができない。 $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ において、Sm 原子は 12 個の Sb から成る 20 面体のカゴに内包されている。このカゴの中で、Sm 原子が比較的大きな振幅で振動していることが最近の研究で明らかになってきた。このような非調和性の強い原子振動は「ラットリング」と呼ばれ、このラットリングが伝導電子と結合しているとき、電子比熱係数が増強され、しかも磁場に鈍感であることが指摘されている。しかし、磁場に鈍感な重い電子状態の発現にラットリングが関与しているという証拠は、これまでに見つかっていない。今回、ラットリングと結合する伝導電子のモデルを解析し、振動する原子を同位体で置換して質量を変えると、近藤効果が起こる温度（近藤温度）が変化することを見出した。近藤温度は電子比熱係数と逆比例の関係で結びついているので、電子比熱係数に同位体効果が発現するのである。原子ポテンシャルの底が平らになって振動振幅が大きくなると、磁場に鈍感な重い電子状態が得られ、かつ、その場合に限り、原子の質量を増やすと電子比熱係数が小さくなる、つまり、近藤温度が増大することが明らかになった。通常、原子の質量が大きくなると振動数が減るので、関係するエネルギーも小さくなるが、それとは逆に近藤温度が増大するという「逆同位体効果」を理論的に予言した。この逆同位体効果の検出は、ラットリングによる重い電子状態発現の証拠になるので、近い将来の実験的検証が期待される。[堀田]

6) ボーズ・フェルミ混合系のモット状態の内部構造

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。レーザーの定存波による周期ポテンシャル中では、原子間の相互作用がモット転移を引き起こすこともあることが実験的に確認されている。とりわけ興味深いのは、ボーズ凝縮しているボーズ原子系にフェルミ原子を少数導入すると、ボーズ原子系が超流動性を失う様子が観測された実験である。

その理論的説明としてこれまでもいくつかの提案がなされてきた。我々のグループでは次のような新たな提案を行った。フェルミ原子とボーズ原子の間に引力相互作用が存在すると、周期ポテンシャルの各井戸にフェルミ原子が存在しているかどうかで井戸間のボーズ原子のホッピングの容易さ（すなわち強結合近似でのホッピングエネルギー）に影響があるはずである。そのため、ボーズ原子のホッピングエネルギーをフェルミ原子の有無によって有効的に変化させるモデルを考えた。すなわち実験で観測されるモット転移が、フェルミ原子が不在の場合に整わなかったモット転移の条件がフェルミ原子の導入により満たされることによって引き起こされる現象であると考えた。

この点を確認するため、上記のモデルに基づいた有効ハミルトニアンを解析的に導出し、量子モンテカルロシミュレーションによりフェルミ原子の導入がボーズ原子系のモット転移を引き起こすことを明らかにした。[森]

7) 異方的相互作用を持つ正方格子上ダイマー系の相転移と相構造

60年代初頭にカステレイン、テンパリー&フィッシャーらにより議論された所謂ダイマー模型はフラストレートした古典および量子スピン系などとの関連も深く今日でも多くの研究が継続して行われている。最近の興味は主に量子効果を持つダイマー系に現われる新奇相に集まっているが、例えばグラファイト上に吸着された棒状分子系にも見られるように、ダイマー間の相互作用がもたらす現象も注目されている。我々は正方格子上で相互作用するダイマー系を調べているが、低エネルギー長距離での振る舞いを記述する有効理論と数値的手法を組み合わせることにより大域的相構造を精密に決定した。更に異方性を与えることにより系に加わる摂動項のくりこみ群固有値に対する理論的予想を有限系の励起ギャップに対する有限サイズスケール解析により直接確認することが出来た。[大塚]

8) 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 を含む化合物の中には磁気異方性やスピン間相互作用の結果としてもたらされるアイスルールを各四面体で満たす所謂スピンア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取るが、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飽和しているがカゴメ格子上のスピンは示量的残留エントロピーを持つことが期待されおり、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予想されている。ウダガワらはカゴメアイスのスピン配置が六角格子ダイマー模型のダイマー配置と等価であることを指摘しているが、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なる。我々はアイスルールの破れを含むカゴメアイスの有効模型をモノマーダイマー混合系として作れないか、可能性を探っている。[大塚]

2. 研究業績

1) 論文

K. Hanami, T. Umesaki, K. Matsuda, Y. Miyata, H. Kataura, Y. Okabe, and Y. Maniwa: One-Dimensional Oxygen and Helical Oxygen Nanotubes inside Carbon Nanotubes, J. Phys. Soc. Jpn., **79** (2010) 023601-1-4.

Akihito Takeuchi, Kazuhiro Hosono, Gen Tatara: Diffusive versus local spin currents in dynamic spin pumping systems, cond-mat0912.3607, (2010). Phys. Rev. B **81**, 144405(1-12) (2010).

Kazuhiro Hosono, Akihito Takeuchi, and Gen Tatara: Perturbation theory of the dynamic inverse spin Hall effect with charge conservation, J. Phys. Soc. Jpn. **79** 014708 (1-8) (2010).

G. Tatara, H. Kohno and J. Shibata: Current-induced domain wall motion, in *Exitaxial ferromagnetic films and spintronic applications* (Eds. A. Hirohata, Y. Otani) (Research Signpost) 405-421 (2010).

Lutz Heyne, Gen Tatara, Hiroshi Kohno, J. Rhensius, Y.-J. Cho, D. Bedau, S. Krzyk, L. J. Heyderman, L. Joly, F. Nolting, S. Seo and M. Kl: Geometry-dependent scaling of critical current densities for current-induced domain wall motion and transformations, *Rev. B* **80**, 184405-1/4 (2009).

Yoshisuke Ban and Gen Tatara: Spin-transfer torque in disordered weak ferromagnets, *Phys. Rev. B* **80**, 184406-1/5 (2009).

Yann Le Maho, Joo-Von Kim and Gen Tatara: Spin-wave contributions to current-induced domain wall dynamics, *Phys. Rev. B* **79**, 174404-1-174404-17 (2009).

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

H. Kohno and G. Tatara: Theoretical Aspects of Current-Driven Magnetization Dynamics, in *Nanomagnetism and Spintronics* (Eds. Teruya Shinjo) (Elsevier Science Title) (2009).

T. Hotta: Weak-Coupling Theory for Multiband Superconductivity Induced by Jahn-Teller Phonons, *J. Phys. Soc. Jpn.* **79** (2010) 023709.

T. Hotta: Double-Exchange Ferromagnetism and Orbital-Fluctuation-Induced Superconductivity in Cubic Uranium Compounds, *J. Phys. Soc. Jpn.* **78** (2009) 123710.

T. Hotta: Inverse Isotope Effect of Kondo Temperature in Electron-Rattling System, *J. Phys. Soc. Jpn.* **78** (2009) 073707.

T. Hotta: Microscopic analysis of multipole susceptibility of actinide dioxides: A scenario of multipole ordering in AmO₂, *Phys. Rev. B* **80** (2009) 024408.

A. Masaki and H. Mori: Quasi-Long-Range-Order in Mott State of Bose-Fermi Mixtures on One-Dimensional Optical Lattice, *J. Phys. Soc. Jpn.* **78** (2009) 064303.

Hiromi Otsuka: Classical Dimer Model with Anisotropic Interactions on the Square Lattice, *Phys. Rev. E* **80** (2009) 011140.

Hiromi Otsuka: Field Theoretical Treatment of a Three-Spin Interaction Model on Triangular Lattice, *J. Phys. : Conf. Ser.* **200** (2010) 022045.

2) 学会講演

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

佐次田哲, 岡部豊: ベイズ理論に基づく画像処理における Wang-Landau 法を用いた尤度関数の計算

小村幸浩, 岡部豊, 大関真之: 2 次元 q 状態 Potts モデルのボンド希釈の相転移

堀田貴嗣: 軌道秩序相近傍の超伝導

正木晶子, 森弘之: 幅広い相互作用領域における光学格子上ボーズ・フェルミ混合系の数値解析

大塚博巳： 異方的相互作用をもつ正方格子上古典ダイマー模型の相構造

日本物理学会 2009 年秋季大会 2009 年 9 月 25 日～9 月 28 日 (熊本大学黒髪キャンパス)

佐次田哲, 岡部豊: モンテカルロ法による確率的画像領域分割

多々良源: スピン伝導現象: 微視的理論の現状

竹内祥人、細野一弘、多々良源: スピン流の生成と測定方法

堀田貴嗣: 二酸化アメリシウムが多極子秩序

正木晶子、森弘之: 光学格子上ボーズ・フェルミ混合系での引力相互作用によるモット転移の誘発

大塚博巳: 異方的相互作用をもつ正方格子上古典ダイマー模型の相構造 II

国内研究会

CMRC 研究会「相関電子と構造物性」 2010 年 2 月 22 日～23 日 (高エネルギー加速器研究機構)

堀田貴嗣: ウラン化合物の強磁性発現と軌道揺らぎ超伝導

国際会議

JST-EPSRC Workshop, Cambridge, UK, February 15-19, 2010

Gen Tatara, Novel magneto-electric effects : Current-induced domain wall motion and inverse spin Hall effect

Microscopic study International workshop on Spin Currents and Spin Caloritronics, Sendai, Japan, February 8-10, 2010

Gen Tatara: Spin pumping and inverse spin Hall effect

The International Conference of Magnetism 2009 (ICM2009), Karlsruhe, Germany, July 26 - 31, 2009

A. Takeuchi, K. Hosono, and G. Tatara: Spin-Charge Conversion via the Spin-Orbit Interaction

K. Taguchi and G. Tatara: Anomalous Hall Effect Induced by Vector Spin Chirality in the weak coupling limit

20th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS2009), Berlin, Germany, July 20 - 24, 2009

A. Takeuchi, K. Hosono, and G. Tatara: Theory of the inverse spin Hall effect by spin dynamics

5th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology (SPINTECH V), Cracow, Poland, July 7 - 11, 2009

K. Hosono, A. Takeuchi, and G. Tatara: Perturbation theory of the dynamic inverse spin Hall effect with charge conservation

Croatian-Japanese Workshop on Advanced Materials Science, Zagreb, Croatia, June 29 – 30, 2009.

T. Hotta: Kondo effect in electron-phonon system

Supercomputing in Solid State Physics (SciSSP) 2009, Chiba, February 16-19, 2009

A. Masaki and H. Mori: One-dimensionally Trapped Bose-Fermi Mixtures.

Cold Atoms and Molecules: Collisions, Field-Effects, and Applications,
Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto, Japan, 2009.6.23-25

A. Masaki and H. Mori: Trapped Bose-Fermi Mixtures with Attractive Interactions on One-dimensional Optical Lattices

International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials,
Yokohama, Japan, March 9-12, 2010

A. Masaki and H. Mori: Mott Transition of Bose-Fermi Mixtures in Optical lattices Induced by Attractive Interactions

The 18th International Conference on Magnetism ICM 2009, Karlsruhe, Germany, July 26-31, 2009

Hiromi Otsuka: Field Theoretical Treatment of a Three-Spin Interaction Model on Triangular Lattice

3) 著書等

森弘之:「標準模型」の宇宙、日経 B P (2009) (訳書)

多々良源:「スピントロニクス理論の基礎」培風館 新物理学シリーズ 40

4) 学会誌等

菊池誠、岡部豊「繰り込み群と物性物理学 - 臨界現象,そして多様な展開へ」数理科学 553 (2009) 29-35

高エネルギー実験サブグループ

1. 研究活動の概要

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

1) B ファクトリー実験 (Belle)

KEK-B 加速器は一昨年よりルミノシティーの向上を目指して導入した Crab Cavity が効果を発揮し、これまでのピークルミノシティーを超える $2.11 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$ を達成すると共に、積分ルミノシティーでは念願であった 1ab^{-1} を超えることができた。衝突エネルギーに関しても $\Upsilon(4s)$ だけでなく $\Upsilon(1s)$ 、 $\Upsilon(5s)$ などの共鳴状態に設定され、これらの共鳴状態からの様々な崩壊過程が詳細に研究された。特に $\Upsilon(5s)$ でのデータからは興味深い結果が得られている。

今年度の物理解析で得られた大きな成果としては、 $B \rightarrow K^* l^+ l^-$ 過程における forward-backward asymmetry の測定があげられる。この測定は超対称粒子の存在に敏感であるが、得られた forward-backward asymmetry の分布は標準モデルの予想と若干の食い違いを見せており、興味深い内容となっている。

一方、2010 年度から始まる KEK-B 加速器の性能向上に呼応して、Belle 検出器の粒子識別装置を改善するために、エアロゲルを輻射体としたリングイメージチェレンコフ検出器の開発を進めている。この検出器に使用する新型の高性能光センサーとして、HAPD (ハイブリッド・アヴァランシェ・フォト・ダイオード) と呼ばれる高性能の光検出器を浜松ホトニクス社と共同開発しているが、量子効率の改善が見られるなど性能の向上が得られている。この HAPD からの信号読み出しには、ASIC を用いた電子回路の開発が必要で、本研究室がその開発を担当している。今年度は SA01 を改良した SA02 を製作し、予定通りの性能が確認された。これらの電子回路を用いてプロトタイプ検出器のビームテストを行ったが、期待通りに $4 \text{GeV}/c$ の運動量領域で 4σ 以上で K/π 識別が可能であることが確認された。

今年度は 23 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) を担当している。2009 年 7 月に無事に実験装置への組み込みを終え、設置後の試験で全てが支障なく稼動していることが確認された。これら設置された光電子増倍管に高電圧を供給するための高電圧電源装置 2 台もエレクトロニクス小屋に設置された。それらを遠隔操作するためのソフトウェアも本研究室が担当しているが、期待通りに制御できることが確認されている。2010 年 7 月からいよいよニュートリノ振動実験が開始される。

3) DCBA 実験

ニュートリノ振動実験によりニュートリノに質量があることが判明した現在、ニュートリノが Majorana 粒子である可能性が益々大きくなっている。もし、ニュートリノが Majorana 粒子であるなら、ニュートリノを放出しない二重崩壊事象 ($0\nu\beta\beta$) が観測されるはずである。

当研究室は、この $0\nu\beta\beta$ 事象を、ドリフトチェンバー (DC) を利用して観測することを目指している DCBA 実験グループ (KEK、静岡大などとの共同実験) に参加している。DCBA - T2 と呼ばれる常

伝導電磁石と DC を組み合わせたスペクトロメーターで、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。これらは $2\nu\beta\beta$ 事象でありその崩壊確率はこれまでの NEMO 実験結果と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、超伝導電磁石の試運転が間もなく開始される。

4) 岩塩を用いた超高エネルギーニュートリノ観測のための基礎研究

宇宙由来の超高エネルギーニュートリノ ($> 10^{16}\text{eV}$) 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 電子ビームによる 435MHz 岩塩充填導波管中の岩塩照射場所からの電波電力反射率は、電子電流の 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。岩塩電波減衰長を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。その結果、10MHz に於ける電波減衰長は 7km と十分長いことが推定された。

入手可能な高電力出力スイッチング電源波形と同様な波形信号をアンテナへ供給して電波電力発生率を測定した結果、10MHz に於いて必要な尖頭電力 1GW のパルス電波発生が期待され、ニュートリノエネルギー 10^{19}eV において探索距離は 3km が可能となり、約 10 事象/年の検出が期待される。

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 $\pi^+\pi^-$ 原子の寿命測定と共に π^+K^- 及び π^-K^+ 原子の存在を世界で初めて確認し、その寿命測定のデータ取得を行った。

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^7 と α^8 の高次 QED 過程の検証を目的とした、ポジトロニウムの稀崩壊現象のデータ取得を長期間行おうと共に、モンテカルロシミュレーションを行った。実験データの解析から 5 光子消滅反応事象に於いては、バックグラウンドの抑制可能性が判明した。

2. 研究業績

1) 論文

Study of the $B \rightarrow X(3872)(\rightarrow D^*\bar{D}^0)K$ decay.

Belle Collaboration (T. Aushev *et al.*), Phys. Rev. D81: 031103, 2010

Measurement of CP asymmetries in $B^0 \rightarrow K^0\pi^0$ decays.

Belle Collaboration (M. Fujikawa *et al.*), Phys. Rev. D81: 011101, 2010

Measurement of the branching fractions for $B^0 \rightarrow D_s^{*+}\pi^-$ and $B^0 \rightarrow D_s^{*-}K^+$ decays.

Belle Collaboration (N.J. Joshi *et al.*), Phys. Rev. D81: 031101, 2010.

Search for Lepton Flavor and Lepton Number Violating tau Decays into a Lepton and Two Charged Mesons.

Belle Collaboration (Y. Miyazaki *et al.*), Phys. Lett. B682: 355-362, 2010

The DCBA experiment for studying neutrinoless double beta-decay.

N. Ishihara *et al.*, J. Phys. Conf. Ser.203: 012071, 2010.

Improved measurement of the polarization and time-dependent CP violation in the decay $B^0 \rightarrow D^{*+}D^{*-}$.

Belle Collaboration (K. Vervink *et al.*), Phys. Rev. D80: 111104-1~6, 2009.

Observation of $B^+ \rightarrow p\bar{\Lambda}\pi^+\pi^-$ at Belle.

Belle Collaboration (P. Chen *et al.*), Phys. Rev. D80: 111103-1~6, 2009.

Measurement of $D^+ \rightarrow K_S^0 K^+$ and $D_S^+ \rightarrow K_S^0 \pi^+$.

Belle Collaboration (E. Won *et al.*), Phys. Rev. D80: 111101-1~5, 2009.

Measurement of Inclusive Radiative B-meson Decays with a Photon Energy Threshold of 1.7GeV.

Belle Collaboration (A. Limosani *et al.*), Phys. Rev. Lett. 103: 241801-1~6, 2009.

Measurement of the $e^+e^- \rightarrow D^0 D^{*-} \pi^+$ cross section using initial-state radiation.

Belle Collaboration (G. Pakhlova *et al.*), Phys. Rev. D80: 091101-1~7, 2009.

Measurement of cross sections of exclusive $e^+e^- \rightarrow VP$ processes at $\sqrt{s} = 10.58\text{GeV}$.

Belle Collaboration (K. Belous *et al.*), Phys. Lett. B681: 400-405, 2009.

Study of an HAPD with 144 channels for the Aerogel RICH of the Belle upgrade.

Shohei Nishida *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A610: 65-67, 2009.

Measurement of the Differential Branching Fraction and Forward-Backward Asymmetry for $B \rightarrow K^{(*)}l^+l^-$.

Belle Collaboration (J.-T. Wei *et al.*), Phys. Rev. Lett. 103: 171801-1~6, 2009.

Measurement of y_{CP} in D^0 meson decays to the $K_S^0 K^+ K^-$ final state.

Belle Collaboration (A. Zupanc *et al.*), Phys. Rev. D80: 052006-1~11, 2009.

Measurement of $B \rightarrow D_s^{(*)} K \pi$ branching fractions.

Belle Collaboration (J. Wiechczynski *et al.*), Phys. Rev. D80: 052005-1~7, 2009.

Measurements of Charmless Hadronic $b \rightarrow s$ Penguin Decays in the $\pi^+ p i^- K^+ \pi^-$ Final State and Observation of $B^0 \rightarrow \rho^0 K^+ \pi^-$.

Belle Collaboration (S.-H. Kyeong *et al.*), Phys. Rev. D80: 051103-1~6, 2009.

Observation of the $\phi(1680)$ and the $Y(2175)$ in $e^+e^- \rightarrow \phi\pi + \pi^-$.

Belle Collaboration (C.P. Shen *et al.*), Phys. Rev. D80: 031101-1~7, 2009.

High-statistics study of $\eta\pi^0$ production in two-photon collisions.

Belle Collaboration (S. Uehara *et al.*), Phys. Rev. D80: 032001-1~17, 2009.

Dalitz analysis of $B \rightarrow K\pi^+\psi'$ decays and the $Z(4430)^+$.

Belle Collaboration (R. Mizuk *et al.*), Phys. Rev. D80: 031104-1~7, 2009.

Observation of the Doubly Cabibbo-Suppressed Decay $D_s^+ \rightarrow K^+ K^+ \pi^-$.

Belle Collaboration (B.R. Ko *et al.*), Phys. Rev. Lett. 102: 221802-1~5, 2009.

Search for the $X(1812)$ in $B^\pm \rightarrow K^\pm \omega \phi$.

Belle Collaboration (C. Liu *et al.*), Phys. Rev. D79: 071102-1~6, 2009.

Measurement of the $e^+e^- \rightarrow J/\psi c\bar{c}$ cross section at $\sqrt{s} \sim 10.6\text{GeV}$.

Belle Collaboration (P. Pakhlov *et al.*), Phys. Rev. D79: 071101-1~7, 2009.

Time-dependent Dalitz Plot Measurement of CP Parameters in $B^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$ Decays.

Belle Collaboration (J. Dalseno *et al.*), Phys. Rev. D79: 072004-1~17, 2009

Radar for salt ultra-high-energy neutrino detector and contribution of W-gluon fusion process to collision of neutrinos against protons

Masami Chiba, Yoko Arakawa, Toshio Kamijo, Fumiaki Yabuki, Osamu Yasuda, Yuichi Chikashige, Keisuke Ibe, Tadashi Kon, Yutaka Shimizu, Yasuyuki Taniuchi, Michiaki Utsumi, and Masatoshi Fujii Nucl. Inst. Meth. A604 (2009) S233-S235.

2) 学会講演

日本物理学会 2009 年秋季大会 2009 年 9 月 10 日 ~ 13 日 (甲南大学岡本キャンパス)

黒田英諒, 住吉孝行, 汲田哲郎, 岩田修一, 足立一郎, 西田昌平, 池田博一, 飯嶋徹, 椎塚晋, 鈴木歩武, 他 Belle Aerogel RICH グループ: 144Ch HAPD 信号読み出し用 ASIC の開発

椎塚晋, 飯嶋徹, 原康二, 今村美貴, 足立一郎, 西田昌平, 住吉孝行, 汲田哲郎, 植木泰生, 黒田英諒, 小川了, 河合秀幸, 鈴木歩, Samo Korpar, Peter Krizan, Rok Pestotink, Rok Dolenc, 他 Belle Aerogel RICH グループ: 144ch Hybrid Avalanche Photo-Detector の中性子耐性評価

門叶冬樹, 住吉孝行, 杉山浩之, 大村孝幸, 岡田晃行, 大石登, 櫻井敬久, 郡司修一: ガス電子増殖による新型光検出器の開発

石川高史, 五十嵐春紀, 住吉孝行, 石原信弘, 岩井剛, 岩瀬広, 稲垣隆雄, 小濱太郎, 加藤義昭, 高橋嘉右, 竹田繁, 春山富義, 榎田康博, 山田善一, 川井正徳, 田代英輔, 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, 田村詔生, 田中耕一, 伊藤倫太郎: DCBA による二重ベータ崩壊実験 X

川井正徳, 榎田康博, 春山富義, 石原信弘, 岩井剛, 岩瀬広, 稲垣隆雄, 小濱太郎, 加藤義昭, 高橋嘉右, 竹田繁, 山田善一, 石川高史, 五十嵐春紀, 住吉孝行, 田代英輔, 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, 田村詔生, 田中耕一, 伊藤倫太郎: 二重ベータ崩壊測定器 DCBA-T3 の無冷媒超伝導ソレノイド電磁石の開発 (2) - 冷却励磁試験結果

田代英輔, 石塚丈晴, 石原信弘, 岩井剛, 岩瀬広, 稲垣隆雄, 小濱太郎, 加藤義昭, 川井正徳, 高橋嘉右, 竹田繁, 春山富義, 榎田康博, 山田善一, 石川高史, 五十嵐春紀, 住吉孝行, 喜多村章一, 寺本吉輝, 坂本泰伸, 中野逸夫, 長坂康史, 田村詔生, 田中耕一, 伊藤倫太郎: DCBA 実験のデータ解析における Hough 変換適用の試み

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, 林理沙, 内海倫明, 平勝良, 藤井政俊: 岩塩ニュートリノ検出器の為の電子線照射による電波反射の干渉性

佐藤文孝, 住吉孝行, W. Brandon, Y.Kamyshkov 他 Double Chooz Japan メンバー: Double Chooz 実験における PMT 設置時の PMT 最終試験の報告

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)

片岡裕美, 林理沙, 清水裕, 秋山英俊, 近匡, 近重悠一, 渡辺大輔, 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岩塩電波減衰長測定

千葉雅美, 上條敏生, 安田修, 矢吹文昭, 渡辺大輔, 秋山英俊, 片岡裕美, 近匡, 清水裕, 近重悠一, 林理沙, 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電子ビーム照射した岩塩充填導波管の電波反射測定

渡辺大輔, 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, 林理沙, 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単パルス電源によるダイポールアンテナの励起効率

多賀井里枝, 足立一郎, 西田昌平, 飯嶋徹, 原康二, 椎塚晋, 今村美貴, 住吉孝行, 汲田哲郎, 黒田英諒, 岩田修一, 河合秀幸, 鈴木歩武, Samo Korpar, Peter Krizan, Rok Pestotink, Rok Dolenc, 小川了: Belle II 実験のための Aerogel-RICH 検出器プロトタイプのパルステストによる性能評価

岩田修一, 住吉孝行, 汲田哲郎, 黒田英諒, 足立一郎, 西田昌平, 池田博一, 鈴木歩武, 多賀井里枝, 飯嶋徹, 椎塚晋, 今村美貴: Aerogel-RICH 検出器のための読み出し用 ASIC のパルステストによる性能評価

今村美貴, 飯嶋徹, 原康二, 椎塚晋, 足立一郎, 西田昌平, Samo Korpar, Rok Pestotink, Rok Dolenc, 住吉孝行, 汲田哲郎, 黒田英諒, 岩田修一, 河合秀幸, 鈴木歩武, 小川了, 多賀井里枝: エアロジェル RICH 検出器に向けた光検出器 HAPD の中性子耐性についての評価

坂本泰伸, 今野智之, 石塚正基, 久世正弘, 阿部陽介, 長坂康史, 重森哲, 川崎健夫, 佐藤文孝, 前田順平, 住吉孝行, 他 Double Chooz Japan グループ: Double Chooz 実験オンラインソフトウェアシステムの開発

香山翔, 住吉孝行, 浜津良輔, 前田順平, 川崎健夫, 他 Double Chooz Japan グループ: シミュレーションを用いた Double Chooz 実験における θ_{13} 感度の評価

下島すみれ, 住吉孝行, 浜津良輔, 前田順平, 川崎健夫, 他 Double Chooz Japan グループ: Double Chooz 実験における宇宙線ミューオンの識別方法

第 70 回応用物理学学術講演会 2009 年 9 月 8 日 ~ 11 日 (富山大学)

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

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

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

谷内康行, 平勝良, 内海倫明, 松村義人, 千葉雅美, 白川利昭, 藤井政俊: 小型・低消費電力中性子源の開発

内海倫明, 平勝良, 谷内康行, 松村義人, 千葉雅美, 藤井政俊, 白川利昭: 低消費電力 IECF における陰極材料の効果

原子物理実験サブグループ

1. 研究活動の概要

本年度4月より、東俊行が理化学研究所・招聘主任研究員を兼務することになり、従来と同様に meV から GeV までの非常に広い衝突エネルギーにわたる原子衝突現象のダイナミクスを原子・分子・結晶などの様々な標的に対して実験的に解明するという本グループの研究がより広く展開される体制となった。

1) 高速多価重イオンのコヒーレント共鳴励起の研究

単結晶中を通過する高速イオンは、結晶周期ポテンシャルを振動電場として感じる。この振動数が入射イオンの原子準位エネルギー差と一致するとき、共鳴的な励起が期待される（この現象はオコロコフ効果もしくはコヒーレント共鳴励起 (RCE) と呼ばれている）。我々は、X 線領域の原子遷移制御を目標として、HIMAC (放射線医学総合研究所重イオン加速器) から供給される約 400 MeV/u の多価重イオンを Si 結晶に通過させ、出射イオンの電荷や脱励起 X 線を観測する実験研究を行ってきた。本年度は選択的に生成した 2 重励起状態の自動電離に伴う Auger 電子放出過程を初めて観測した。また、励起イオンが結晶原子と衝突して生成される 2 次電子のエネルギー幅が、束縛状態時の運動量分布を反映して狭くなる様子を詳細に観測した。さらに、ドイツ・GSI 重イオン研究所における精密分光研究のコミッションング実験も 9 月に実施され、ウランビームの共鳴観測に初めて成功するなど順調に研究が進展している。

(1) Ladder 型 2 重共鳴下での Auger 電子観測: 465 MeV/u He-like Ar¹⁶⁺ (1s² → 1s2p → 2p²)

He 様 (2 電子系) Ar¹⁶⁺ イオンを Si 薄膜結晶に入射し、通過原子面配列の周期性を利用する 3D-RCE (3 次元 RCE) 条件下で、振動電場の 2 つの周波数成分を同時に利用して最内殻軌道にある 2 つの束縛電子を連続的に励起させる (2 重励起) ことにより、エキゾチックな中空状態である 2 重励起状態の選択的生成に昨年度成功した。今年度は、引き続き起こることが期待される自動電離過程に伴って放出される Auger 電子の観測を試みた。結晶標的の下流数 10 cm の位置に設置した磁場型アナライザーと Si 半導体検出器を使ってイオン進行方向に放出される 2 次電子のエネルギースペクトルを観測したところ、2 重共鳴時には、イオンと等速の約 255 keV を中心とする、イオンの結晶原子衝突による電離によって生成されるコンボイ電子成分の両側に、イオンから前方および後方に放出された 2.3 keV の Auger 電子に起因する 313 keV と 204 keV の両ピークを明確に観測することに成功した。

(2) 1 重共鳴下でのコンボイ電子観測: 416 & 150 MeV/u He-like Ar¹⁶⁺ 1s² → 1s2p

上述のコンボイ電子のエネルギー分布は、RCE によって選択的に生成された励起状態の束縛電子運動量分布を反映したカスプ構造を持つため、基底状態からの 2 次電子放出に比べてそのエネルギー分布幅が先鋭化することが、昨年度観測されており、これにより励起イオンの波動関数の運動量情報を得られることが明らかになった。一方、3D-RCE では、特定の結晶原子面配列によって選択的に励起イオンをアライメントさせる、すなわち磁気副準位を選択することが可能である。そこで本年度は、コンボイ電子観測とアライメント操作とを組み合わせ、特定のアライメント状態にあるイオンから生成されるコンボイ電子のエネルギー分布の測定を開始した。実験では、進行方向にアライメントした 2p₀ 励起状態を選択的に生成する原子面配列を利用するために、入射イオンエネルギーを約 100 MeV/u に下げる必要がある。これに伴って数 10 keV の 2 次電子を高分解能で観測するため、アバランシェ型フォトダイオード (APD) を導入するとともに、このエネルギー領域での RCE の最適共鳴条件を探索した。

(4) GSI 重イオン研究所における RCE 実験: 190 MeV/u Li-like U⁸⁹⁺ 2s_{1/2} → 2p_{3/2}

ドイツ GSI 重イオン研究所を利用して、リチウム様 (3 電子系) U⁸⁹⁺ における 2s_{1/2} から 2p_{3/2} への共鳴励起 (遷移エネルギー: 4.4 keV) を精密測定することによる QED テストをめざした実験を本年度 9 月に実施した。SIS シンクロトロンより取り出された 191.5 MeV/u U⁸⁹⁺ ビームを数 10 m 輸送して実験工

リアに導入し、7 μm 厚さの Si 結晶に導入した。重イオンになると励起イオンは短寿命で X 線放出により脱励起するため、観測は X 線検出が主となる。ビーム強度、RCE 励起確率がともに弱いことから、高検出効率の X 線測定が必須であるため、大面積 (100 mm^2) Si ドリフト型 X 線検出器を 4 個標的結晶の周囲に配置し、脱励起 X 線を観測した。結晶内の結晶原子列の周期を利用する 2 次元 RCE(2D-RCE) 共鳴条件下で、X 線収量が増加する様子を明瞭に観測することに成功した。

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 (TMU E-Ring) は、蓄積イオンの崩壊に伴う中性粒子強度を周回毎に検出することによって、ミリ秒から秒オーダーまでの遅い過程を追跡できるのが特徴である。昨年度に引き続き、分子物質化学専攻・城丸グループとの共同研究のもと、小分子イオンから巨大分子イオンまで正負様々なイオンの分光実験および寿命測定を行った。また、次世代のイオン蓄積リング実験を目指した新たなイオン源およびイオン入射システムの開発を開始した。

(1) 酸素分子正イオンの準安定状態の寿命測定およびレーザー分光:

周回イオンに波長可変レーザーを入射して特定の内部状態のイオンのみを選択的に光解離させることにより、状態選択的な寿命測定が可能となる。昨年度までにその測定手法を確立し、 O_2^+ の準安定励起状態 $a^4\Pi_u$ の 100 ms 程度の寿命成分について報告した。本年度は測定系を改良して蓄積時間を延ばし、これまで報告されていない約 3 秒の非常に長い寿命を持つ準安定状態の存在を初めて確認した。この起源として、理論計算で長寿命が予測されている $a^4\Pi_u$ の回転基底状態の寄与がまず挙げられたが、長寿命成分の大きな相対強度と広い吸収バンド構造から、その可能性は低いと考えられる。また、等核の O_2^+ は赤外不活性であるため、基底電子状態の高振動励起状態が存在すれば、長い寿命が期待される。この寄与を探るため、赤外活性を持つ同位体分子イオン $^{16}\text{O}^{18}\text{O}^+$ との寿命比較を行った結果、寿命の変化は観測されず、高振動状態の寄与は無視できることが分った。以上の結果より、この長寿命成分は 6 重項などの高スピン状態、もしくは高軌道角運動量状態に起因するものと推定している。

(2) 巨大分子イオンのレーザー分光:

孤立状態における巨大分子イオンの分光学的研究および冷却過程の研究を行った。亜鉛フタロシアニン負イオンについては、多光子電子脱離のレーザー強度依存性が、輻射冷却により蓄積時間に依存して変化することを昨年度報告した。本年度、この測定結果から冷却速度を得るために、初期温度および多光子吸収確率を統計的に考慮したモデルに基づき解析を行った結果、1 光子吸収では中性化が不可能な系においても、冷却速度の導出が可能であることを示した。スウェーデン・イエテボリ大学のグループとの共同研究では、炭素クラスター負イオン C_4^- の 1 光子電子脱離スペクトルを測定し、近赤外領域にプラトー構造を見いだした。また、傾斜的研究費全学分「実用クラスター科学の開拓と大都市型化学産業の創出」の支援を得て、金クラスターの研究を開始した。まずは、Cs スパッタイオン源によって生成される小さなクラスター負イオン Au_n^- ($n=2, 3$) をリングで周回させた。イオンが高温であるために自動電子脱離による中性粒子が検出され、2 原子系であるにも拘わらず統計的な内部エネルギー広がりを示す $1/t$ 則に従った崩壊曲線が観測された。また、分子応用化学域・春田研究室の協力の下に、金コロイドのレーザー蒸発による金クラスターイオンの生成手法の確立にも着手しており、10 量体程度までのクラスターイオンの生成が確認されている。

(3) 新たな巨大分子イオン入射システムの開発:

生体分子を含む様々な巨大分子・クラスターイオンの導入を可能にするため、エレクトロスプレーイオン源およびマグネトロスパッタ型金属クラスターイオン源の開発を進めている。エレクトロスプレーイオン源では、四重極質量選別器と接続して各種イオンの質量スペクトルが得られており、多価のタンパク質イオンや複数の水分子が溶媒和したメチレンブルーイオンなどの生成を確認している。マグネトロ

ン型スパタイオン源では、プラズマ点火を確認し、本イオン源のための高周波イオン収束装置（イオンファネル）の製作を行った。今後は、生成されたイオンを予め温度制御した状態でリングに入射するために、温度制御可能なプリオントラップを設計・製作し、リングに接続する予定である。

3) 多価イオンの電荷交換分光

宇宙空間において太陽風に含まれる多価イオンが希薄な中性粒子と衝突することで電荷交換反応を起こし、それに伴って軟 X 線を放出する過程が多くの X 線観測衛星によって報告されている。この X 線は系外天体を狙った場合にも背景放射として観測されるので、十分に理解しておく必要がある。また、太陽系内の中性粒子分布や地磁気について、太陽風をプローブとして観測する手段になる可能性もあるので、宇宙物理学の立場では非常に重要な原子素過程といえる。本年度から、この発光過程を実験室で再現し、次期観測衛星に搭載予定の高分解能 X 線検出器 (TES 型マイクロカロリメータ) を用いて分光計測するプロジェクトを、宇宙物理実験サブグループとの共同研究として開始した。

今年度は、受光面積の小さな TES を用いた場合の X 線の観測強度を見積もるため、窓無しの Si(Li) 検出器を用いて、水素様イオンである O^{7+} および N^{6+} と He 標的との衝突による数 100 eV 程度の軟 X 線領域における発光スペクトルを観測した。共同研究者である L. Ling (IAPCM, Beijing, China) の原子軌道緊密結合法 (AOCC) による計算によれば、移行した電子は主量子数 $n = 3$ あるいは 4 の軌道に捕獲される筈であるが、カスケードによって 2p 準位に集まるため、1s-2p 遷移が最も強い発光であることが実験的に確認された。同時に、1s-2p と 1s-3p の発光強度比は衝突エネルギー依存性を含めて計算結果と定性的に一致し、一電子問題に還元する粗い近似を行っている AOCC 計算が二電子問題に対しても或る程度有効であることを示した。また、He 標的の結果ではあるが、TES を用いた場合でも 1 Hz 程度の信号強度が期待できることから、測定は現実的なものであることが確認できた。今後、多価イオンビームを太陽風と同程度にまで減速する機構、標的として水素原子を用いるための熱解離原子源などを開発・整備して、来年度中には太陽風の電荷交換反応を実験室で再現する予定である。

4) 低温ヘリウム気体中のイオン移動度

希薄な気体中におけるイオン移動度は、イオンと気体分子の間に働く相互作用ポテンシャルに非常に敏感であるため、粒子間ポテンシャルの決定手段として昔から活用されている。我々は液体窒素によって 77 K、液体ヘリウムによって 4.3 K にまで冷却したヘリウム気体中のイオン移動度を測定できる世界で唯一の装置を開発して、これまでに様々な種類のイオンについて移動度の測定を行ってきた。

昨年度までに、液体蒸気を導入してイオンを生成するイオン源の開発が完了しているので、本年度は装置全体の整備を行ってから、電子衝撃型イオン源によって液体試料であるアセトン $(CH_3)_2CO$ から生成したアセチルイオン CH_3CO^+ についての測定を行った。これまでに二原子・三原子分子イオンでは古典的極限値よりも小さな移動度を示すことが観測されているが、アセチルイオンではさらに小さな値を示し、しかも 4.3 K では弱電場領域において急激な低下が見られた。その原因としては、イオンの電気双極子モーメント、幾何学的に大きな断面積、小さな回転定数など、幾つかの可能性が考えられる。そこで、比較によって原因を特定するため、同程度の電気双極子モーメントと大きな回転定数をもつ OH^+ および H_2O^+ についての測定を開始した。77 K における測定で、これまでに観測例のないほど小さな移動度を示したため、より低温における測定を予定している。4.3 K では分子イオンとヘリウムの衝突エネルギーは分子イオンの回転エネルギーよりも小さいが、引力ポテンシャルによる運動エネルギーの増加の結果として量子化された回転を励起することで準安定状態が生成する Feshbach 共鳴が起こり、この量子効果による衝突断面積の増大が移動度の低下として現れると考えており、分子イオンにおける系統的な測定から機構の解明を進めている。

2. 研究業績

1) 論文

A. E. K. Sundén, M. Goto, J. Matsumoto, H. Shiromaru, H. Tanuma, T. Azuma, J. U. Andersen, S. E. Canton, K. Hansen : “Absolute cooling rates of freely decaying fullerenes”, *Phys. Rev. Lett.* **103** (2009) 143001.

R. D’Arcy, H. Ohashi, S. Suda, H. Tanuma, S. Fujioka, H. Nishimura, K. Nishihara, C. Suzuki, T. Kato, F. Koike, A. O’Connor and G O’Sullivan : “Identification of 4d–5p transitions in the spectra of Sn XV–Sn XIX recorded from collisions between Sn ions and He”, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **42** (2009) 165207.

R. D’Arcy, H. Ohashi, S. Suda, H. Tanuma, S. Fujioka, H. Nishimura, K. Nishihara, C. Suzuki, T. Kato, F. Koike, J. White, and G. O’Sullivan : “Transitions and the effects of configuration interaction in the spectra of Sn XV–Sn XVIII”, *Phys. Rev. A* **79** (2009) 042509.

C. Suzuki, T. Kato, H. A. Sakaue, D. Kato, K. Sato, N. Tamura, S. Sudo, N. Yamamoto, H. Tanuma, H. Ohashi, R. D’Arcy, and G. O’Sullivan : “Analysis of EUV spectra of Sn XIX–XXII observed in low-density plasmas in the Large Helical Device”, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **43** (2010) 074027.

H. Ohashi, S. Suda, H. Tanuma, S. Fujioka, H. Nishimura, A. Sasaki, and K. Nishihara : “EUV emission spectra in collisions of multiply charged Sn ions with He and Xe”, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **43** (2010) 065204.

L. Liu, Y. Q. Zhao, J. G. Wang, R. K. Janev, and H. Tanuma : “Polarization degree differences for the $3p\ ^2P_{3/2}$ – $3s\ ^2S_{1/2}$ transition of $N^{4+}(3p^2P_{3/2})$ produced in N^{5+} -He and N^{5+} -H₂ collisions”, *Phys. Rev. A* **81** (2010) 014702.

2) 国際会議報告

A. Sasaki, A. Sunahara, K. Nishihara, T. Nishikawa, F. Koike, and H. Tanuma : “The atomic model of the Sn plasmas for the EUV source”, *J. Phys. Conf. Ser.* **163** (2009) 012107.

Y. Nakano, T. Inoue, T. Azuma, A. Hatakeyama, Y. Nakai, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada, and T. Murakami : “Resonant coherent excitation of Li-like Ar¹⁵⁺ ions in a thin Si crystal”, *J. Phys. Conf. Ser.* **163** (2009) 012094.

H. Ohashi, S. Suda, H. Tanuma, S. Fujioka, H. Nishimura, K. Nishihara, T. Kai, A. Sasaki, H. A. Sakaue, N. Nakamura, and S. Ohtani : “Complementary spectroscopy of tin ions using ion and electron beams”, *J. Phys. Conf. Ser.* **163** (2009) 012071.

S. Suda, H. Ohashi, H. Tanuma, S. Fujioka, H. Nishimura, and K. Nishihara : “Vacuum ultraviolet spectra in charge transfer collisions of multiply charged Sn ions”, *J. Phys. Conf. Ser.* **163** (2009) 012053.

C. Suzuki, T. Kato, K. Sato, N. Tamura, D. Kato, S. Sudo, N. Yamamoto, H. Tanuma, H. Ohashi, S. Suda, G. O’Sullivan, and A. Sasaki : “EUV spectra from highly charged tin ions observed in low density plasmas in LHD”, *J. Phys. Conf. Ser.* **163** (2009) 012019.

A. Terasaki, T. Majima, and T. Kondow : “Zeeman splitting and Faraday rotation associated with $Mn^{+} \ ^7P_J \leftarrow \ ^7S_3$ absorption: Photon-trap spectroscopy and quantum-theory analysis”, *J. Phys. Conf. Ser.* **185** (2009) 012045.

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

A. Terasaki, T. Majima, C. Kasai, and T. Kondow : “Photoabsorption and magneto-optical spectroscopy of mass-selected atomic and cluster ions stored in an ion trap”, AIP Conf. Proc. 1197, 134-143 (2009).

3) 学会講演

レーザー研シンポジウム 2009, 2009年4月23日~24日 (大阪大学, 吹田市)

田沼肇 : レーザプラズマ放射における原子素過程の研究

ナノ学会第7回大会, 2009年5月9日~11日 (東京大学, 文京区)

寺崎亨, 笠井千晴, Christof Bartels, 間嶋拓也, 近藤保 :

イオントラップを利用したサイズ選別クラスターイオンのレーザー分光

第25回化学反応討論会, 2009年6月1日~3日 (大宮ソニックシティ, さいたま市)

後藤基, 外川茉実, 座間優, 間嶋拓也, 田沼肇, 東俊行, 松本淳, 城丸春夫, 阿知波洋次 :

Radiative cooling rate of stored zinc phthalocyanine anions produced by laser desorption

座間優, 後藤基, 松本淳, 城丸春夫, 阿知波洋次, 間嶋拓也, 田沼肇, 東俊行 :

Spectroscopic studies of methylene blue cations by using an electrostatic ion storage ring

Fundamental Physics using Atomic Physics 研究会, 2009年8月5日 (東京工業大学, 目黒区)

東俊行 : 結晶周期場を用いた高速重イオンの共鳴励起 (招待講演)

原子衝突研究協会第34回年会, 2009年8月28日~30日 (首都大学東京, 八王子市)

東俊行 : 首都大学原子衝突グループの多様化戦略: 多価イオンから生体分子イオンまで (招待講演)

座間優, 森本大輔, 後藤基, 松本淳, 城丸春夫, 阿知波洋次, 間嶋拓也, 田沼肇, 東俊行 :

静電型イオン蓄積リングを用いたメチレンブルーカチオンのレーザー分光

松本淳, 後藤基, 間嶋拓也, 田沼肇, 東俊行, 城丸春夫, 阿知波洋次 :

TMU E-ring を用いた炭化水素負イオンの準安定状態の寿命測定

後藤基, 松本淳, 城丸春夫, 阿知波洋次, 間嶋拓也, 田沼肇, 東俊行 :

静電型イオン蓄積リングで観測される巨大分子イオンのレーザー誘起遅延反応についての解析

川口瑛司, 間嶋拓也, 後藤基, 松本淳, 城丸春夫, 田沼肇, 東俊行 :

静電型イオン蓄積リングにおける状態選択的寿命測定: O_2^+ 準安定状態 $a^4\Pi_u$ の放射寿命

須田慎太郎, 中野祐司, 目時健一, 高野靖史, 畠山温, 中井陽一, 東俊行, 小牧研一郎, 山崎泰規, 高田栄一, 村上健 : コヒーレント共鳴励起にともなう電子放出

大月聡子, 高野靖史, 中野祐司, 間嶋拓也, 田沼肇, 東俊行 : ディレイライン 2 次元検出器の動作テスト

進藤大輝, 目時健一, 須田慎太郎, 中野祐司, 東俊行 :

大面積 Si ドリフト X 線検出器の温度制御および動作テスト

赤松弘規, 阿部祐輝, 横田渉, 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, 前野修平, 田沼肇, 篠崎慶亮, 満田和久 :

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

大橋隼人, 須田慎太郎, 田沼肇, 藤岡慎介, 西村博明, 西原功修 :

EUV 領域における多価 Fe イオンの電荷交換分光

奥野和彦, 山田充子, 松本淳, 城丸春夫, 阿知波洋次 :

光-電子脱離測定によるフラーレン負イオンの温度検定

的場史朗, 藤澤諒, 小泉哲夫, 小島隆夫, 田沼肇, 城丸春夫, 清水敏夫 :

ヘリウム気体中におけるカイラル分子イオンの移動度

第 3 回分子科学討論会, 2009 年 9 月 21 日 ~ 24 日 (名古屋大学, 名古屋市)

座間優, 森本大輔, 後藤基, 松本淳, 城丸春夫, 阿知波洋次, 間嶋拓也, 田沼肇, 東俊行 :

静電型イオン蓄積リングを用いたメチレンブルーカチオンのレーザー誘起反応

後藤基, 松本淳, 城丸春夫, 阿知波洋次, 間嶋拓也, 田沼肇, 東俊行 :

遅延電子脱離反応を利用した孤立分子イオンの内部エネルギー測定

日本物理学会 2009 年秋季大会, 2009 年 9 月 25 日 ~ 28 日 (熊本大学, 熊本市)

東俊行 : コヒーレント共鳴励起による結晶通過イオンの励起状態制御と固体内原子衝突 (招待講演)

田沼肇, 大橋隼人, 須田慎太郎, 藤岡慎介, 西村博明, 西原功修 :

極端紫外領域における多価 Fe イオンの電荷交換分光 II

須田慎太郎, 中野祐司, 目時健一, 東俊行, 高野靖史, 畠山温, 小牧研一郎, 中井陽一, 山崎泰規, 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 I

中野祐司, 目時健一, 須田慎太郎, 東俊行, 高野靖史, 畠山温, 小牧研一郎, 中井陽一, 山崎泰規, 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 II

的場史朗, 藤澤諒, 小泉哲夫, 小島隆夫, 田沼肇, 城丸春夫, 清水敏夫 :

カイラル分子イオン移動度におけるカイラリティ依存性

川口瑛司, 間嶋拓也, 後藤基, 松本淳, 城丸春夫, 田沼肇, 東俊行 :

TMU E-ring を用いた O_2^+ イオン準安定状態の寿命測定 II

平成 21 年度核融合科学研究所共同研究「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, 2010 年 1 月 18-19 日 (核融合科学研究所, 土岐市)

田沼肇 : 多価イオンの電荷移行における非統計的な微細構造と磁気副状態の分布

停止・低速不安定核ビームを用いた核分光研究会, 2010 年 3 月 1 日 ~ 2 日 (東京工業大学, 目黒区)

東俊行 : Atomic collision and spectroscopy using an electrostatic ion storage ring (招待講演)

間嶋拓也, 寺寄亨, 近藤保 : パルスレーザー光源によるスピン偏極生成 :
Cavity-assisted optical pumping 法の開発

2009 年度 JAXA 宇宙科学研究本部 宇宙空間原子分子過程研究会「原子衝突におけるコヒーレント相互作用」, 2010 年 3 月 1 日 (JAXA, 相模原市)

中野祐司 : 結晶周期場を用いた X 線領域の原子状態制御 (招待講演)

第 38 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム, 2010 年 3 月 2 日 ~ 4 日 (名城大学, 名古屋市)

J. Matsumoto, M. Goto, Y. Zama, T. Majima, H. Tanuma, T. Azuma, H. Shiromaru, Y. Achiba :
Detection and lifetime measurements of C_4H^- and C_6H^- metastables

日本物理学会 2010 年春季大会, 2010 年 3 月 20 日 ~ 33 日 (岡山大学, 岡山市)

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, 横田涉, 辺見香理, 江副祐一郎, 石崎欣尚, 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

佐藤智子, 間嶋拓也, 座間優, 後藤基, 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

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

高野靖史, 中野祐司, A. Braeuning-Demian, 金井保之, H. Braeuning, 東俊行, 池田時浩, 須田慎太郎, 進藤大輝, D. Dauvergne, R. Schuch, Th. Stohlker, 山崎泰規 : コヒーレント共鳴励起による U^{89+} 殻内遷移の観測

寺寄亨, C. Bartels, 笠井千晴, 江頭和宏, 間嶋拓也, G. Santambrogio, 近藤保 : 線形イオントラップを用いた銀 2 量体イオンのレーザー分光 : イオン空間分布の四極子・八極子依存性と光解離スペクトルの温度依存性

山添純一, 的場史朗, 田沼肇 : 低温ヘリウム気体中における多原子分子イオンの移動度

第 90 回日本化学会春季年会, 2010 年 3 月 26 日 ~ 29 日 (近畿大学, 東大阪市)

間嶋拓也, 川口瑛司, 花田勝彦, 後藤基, 松本淳, 城丸春夫, 田沼肇, 東俊行 :
静電型イオン蓄積リングを用いた酸素イオン準安定状態の寿命測定

田沼肇, 的場史朗, 小泉哲夫, 小島隆夫, 城丸春夫, 清水敏夫 : キラル分子イオンの移動度測定

国際会議

Third International Workshop on Electrostatic Storage Devices (ESD 2009), Aarhus, Denmark, June 21-25, 2009

T. Azuma : Excited states of large and small molecular ions studied by the TMU E-ring

T. Majima, K. Hanada, E. Kawaguchi, M. Goto, J. Matsumoto, H. Shiromaru, H. Tanuma, and T. Azuma : State dependent lifetimes of metastable O_2^+ measured by the TMU E-ring

J. Matsumoto, M. Goto, T. Majima, H. Tanuma T. Azuma, H. Shiromaru, and Y. Achiba :
Laser-induced dissociation of methylene blue cations stored in the TMU E-ring

J. Matsumoto, M. Goto, T. Majima, H. Tanuma T. Azuma, H. Shiromaru, and Y. Achiba :
Lifetime of metastable chain-form hydrocarbon anions stored in the TMU E-ring

4th International Symposium on Atomic Cluster Collisions (ISACC4), (Ann Arbor, USA, July 14-18, 2009)

M. Goto, Y. Zama, T. Majima, H. Tanuma, T. Azuma, J. Matsumoto, H. Shiromaru, and Y. Achiba :
Laser induced dissociation of stored dye ions produced by laser desorption

XXVI International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (ICPEAC 2009),
Kalamazoo, Michigan, USA, July 22-28, 2009

T. Azuma : Resonant Coherent Excitation of Highly Charged Ions in Crystals (Plenary Talk)

T. Majima, K. Hanada, E. Kawaguchi, M. Goto, J. Matsumoto, H. Shiromaru, H. Tanuma, and
T. Azuma: Lifetime measurement of the a $^4\Pi_u$ metastable state of O_2^+ using an electrostatic ion
storage ring

J. Matsumoto, M. Goto, Y. Zama, T. Majima, H. Tanuma, T. Azuma, H. Shiromaru, and Y. Achiba :
Detection of the metastable chain hydrocarbon anions by an electrostatic ion storage ring

M. Goto, M. Togawa, Y. Zama, T. Majima, H. Tanuma, T. Azuma, J. Matsumoto, H. Shiromaru,
and Y. Achiba: Internal energy of stored large molecular anions deduced from laser-induced electron
detachment yield

Y. Nakano, T. Azuma, K. Metoki, A. Hatakeyama, Y. Nakai, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada,
T. Murakami : Double K-shell excitation of He-like Ar^{16+} and Li-like Ar^{15+} using Periodic Crystal
Fields

H. Ohashi, S. Suda, H. Tanuma, S. Fujioka, H. Nishimura, and K. Nishihara :
Charge exchange spectroscopy of multi-charged Fe ions in EUV region

S. Suda, H. Ohashi, H. Tanuma, S. Fujioka, H. Nishimura, K. Nishihara, and F. Koike :
VUV emission spectra in charge-exchange collisions of multiply charged Sn ions with rare gases

XVI International Symposium on Electron Molecule Collisions and Swarms (EMS 2009), Toronto,
Canada, July 29-August 1, 2009

H. Tanuma, S. Matoba, and K. Ohtsuki :

Past and present : Ion swarm experiments with low temperature drift tube mass spectrometer in TMU

S. Matoba, T. Koizumi, T. M. Kojima, and H. Tanuma :
Mobility of a Li^+ ion attached to 2-butanol in He gas

The 3rd China-Japan Joint Seminar on Atomic and Molecular Processes in Plasma (AMPP 2009),
Xi'an, China, October 26–30, 2009

H. Tanuma, H. Ohashi, S. Suda, S. Fujioka, H. Nishimura, and K. Nishihara :
Charge exchange spectroscopy of multiply charged ions of astrophysical/industrial interest

4) 学会誌等

東俊行 : 結晶周期場によるイオンの極端紫外および X 線分光 (パリテイ, 2009 年 1 月号, pp.12-15)

宇宙物理実験サブグループ

1. 研究活動の概要

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

1) 銀河団・銀河間物質の観測

「すざく」のXIS検出器は軟X線領域でのエネルギー分解能にすぐれ、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。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。ビ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、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、銀河団によっては外縁部でより平坦な傾きに折れ曲がるのがわかった。ビ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。これは銀河団の多くがまだ加熱の途中にあることを示す結果と言える。

A2142 銀河団をビリアル半径より外側まで観測し、ガスの温度が中心付近の 10 keV に対して、約 2 keV にまで低下することを確認した。一方ガスの密度は β モデルで予想される減少傾向によく合っている。この結果も、ビリアル半径領域では電子温度が十分高くなっていないことを示唆するもので、銀河団の進化において、周辺部では現在もガスの加熱が進行していることを示すと考えられる。

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 ($z = 0.105$) を「すざく」で観測し、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。

2) 「すざく」による銀河系内コンパクト天体の観測

「すざく」による観測により、massive star binary である η -Carinae から、従来知られている温度 4 keV 程度の熱的なプラズマからの放射に加え、50 keV までの硬 X 線を検出した。6–7 keV に現れる鉄輝線の電離温度から、プラズマの温度は正確に決定できる。50 keV までの硬 X 線は、このプラズマ放射から明らかに超過しており、検出は疑いのないものと言える。この放射は軌道の位相にはよらず、また、2回の観測それぞれの中でも有意な変動を示しておらず、系に付随した定常的な放射であると考えられる。詳細なスペクトルの検討から、この放射は、連星系を構成する2つの星から放射された紫外光が、系内の高エネルギー電子で逆コンプトン散乱されたものか、あるいはより温度の高いプラズマからの熱制動放射であると考えられる。

「すざく」の観測により、正体不明のX線連星系 XSS J12270–4859 からは、100秒の継続時間を持つバーストや、強度の dip を複数検出した。この天体は、従来、自転周期 860 秒の Intermediate Polar と言われていたが、今回そのような周期性は検出されなかった。これらのことから、この天体は Intermediate Polar ではなく、むしろ II 型 X 線バーストを示す 3 つ目の天体である可能性が強くなった。

3) 「すざく」による惑星の観測

「すざく」の広がった X 線に対する感度に着目し、木星、火星のデータを解析した。そして木星からは内部磁気圏に空間的に一致する領域から広がった X 線放射を発見した (図 1)。放射スペクトルは非熱的放射を示唆し、磁気圏の MeV 電子が太陽光をたたき上げることで生じる逆コンプトン散乱と解釈することができる。これは X 線が探査衛星や地上観測で観測の難しい内部磁気圏を探る新たなプローブになることを示唆する。また火星では、超高層大気と太陽風の電荷交換反応から、太陽風極小期での高層大気の密度に制限をつけた。これは惑星環境における大気進化と流出モデルに大きなインパクトを持つ。

4) TES 型カロリメータの開発

将来の X 線天文衛星への搭載を目指し、JAXA 宇宙研等との共同で TES (Transition Edge Sensor) 型カロリメータの開発を進めている。最終目標は ~ 2 eV のエネルギー分解能と数 100 ピクセルからなる多ピクセルアレイである。首都大のスパッタ装置で約 30 枚の二層薄膜をつくり、Ti/Au の厚さを 40/80 nm とすることで、ほぼ 100 mK で転移することを確認し、製作上の再現性を確立することができた。また単素子でのエネルギー分解能は 2.8 eV に上昇し、世界記録 (1.8 eV) へ大きく近づいた。さらにアレイ型 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、400 素子ほどに対してほぼ実用可能な配線を作ることができた (図 2)。

5) 冷凍器の開発と電荷交換反応への応用

TES カロリメータの動作環境として、コンパクトかつ温度精度の高い断熱消磁冷凍器 (ADR) の開発を行なっている。宇宙研で製作された 2 段式 ADR の冷却試験を行い、冷却性能を確認した。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 をこの実験へ応用するための整備を行った。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。作られたヒートスイッチはオン/オフの間の熱伝導率の比は約 1000 倍、オフの熱伝導率が 2 K で約 $5 \mu\text{W}/\text{K}$ であり、2 段式 ADR などに使用可能な性能を出すことができた。

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。液体ヘリウムと機械式冷凍機が併用されるが、超流動ヘリウムの流出を阻止するための対策が必要である。Si の微細加工技術を応用し、超流動表面流を止めるナイフエッジデバイスを試作し、原子レベルの鋭いエッジを持つことを確かめた。これを含めたヘリウム排気系の試験を進めていく。また、SpaceWire という新しい規格のもとで、SXS 信号を処理するためのデジタル系の設計も、埼玉大、宇宙研、NASA/GSFC、三菱重工業、NEC とともに進めた。

また、大橋がサイエンスチームのまとめ役となり、サイエンス面からいろいろな検討を行なった。ターゲットのカテゴリー別に Science Task Force を編成して具体的な検討をはじめた他、サイエンスアドバイザーを講師として合宿形式で大学院生に宇宙物理の教育を行う、ASTRO-H School の企画を行った。

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、ミネソタ大と共同で、マイクロマシン技術を用いた独自のマイクロポアオプティクス (微細穴光学系) 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百 μm の薄い基板にあげ、側壁を反射鏡として利用する。基板が薄いため、原理的に世界最軽量が可能であり、しかも一体成形で大量に鏡を生産できる。今年度は、1 段型 Si 望遠鏡の試作品を完成させ、可視光を用いた集光の実証および、X 線を用いた結像

性能の評価を行って、この手法で世界で初めて可視光・X線結像を実証した。分解能は側壁の粗さで制限されており、改善の余地がある。引き続き、開発を進め、将来の小型衛星や探査衛星への搭載を目指す。

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。今年度から新たな取り組みとして、Si基板の塑性変形技術を用いた高性能の反射鏡基板の製作を開始した。日本のX線天文衛星に搭載されてきた多重薄板型X線望遠鏡は、極めて薄い反射鏡を可能な限り同心円状に多数積層し、X線の集光面積を極限まで追求した点に大きな特長がある。しかしながら反射鏡が薄いことによる形状誤差と、反射鏡を望遠鏡内に固定するときの位置決め誤差のために、角度分解能は大きな制約を受けてきた。近年X線望遠鏡には、高い確度分解能に加えて大型化も求められており、大有効面積を得意とする多重薄板積層型X線望遠鏡に使う軽量、高精度の反射鏡を開発することが喫緊の課題になっている。

Alフォイルを用いた鏡と並行して、次世代のX線観測衛星IXO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を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、角度分解能を1桁以上向上することができると考えられる。今年度は基板の平滑性を向上するため2つの新たなプロセスを試した。すなわち、 $< \mu\text{m}$ レベルにフラットにするためのケミカルメカニカルポリッシング、ミクロンスケールの粗さを落とすために高温アニール行程である。これらにより、6 inch 基板上で Peak to Valley $< \mu\text{m}$ のフラットネスと Å 台のミクロンスケール粗さを両立することに成功した。この超平滑化基板を用いてX線望遠鏡のための円錐変形を試した所、治具精度が分解能を制限していることが分かった。来年度は治具の精度を向上するための開発を進め、秒角の望遠鏡の完成を目指す。

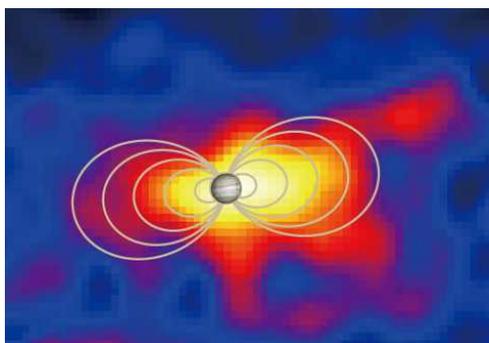


図 1: すざく衛星で取得した木星のX線イメージ (1-5 keV)。木星の磁力線を重ねて示した。木星の内部磁気圏に一致した広がったX線放射を発見した。

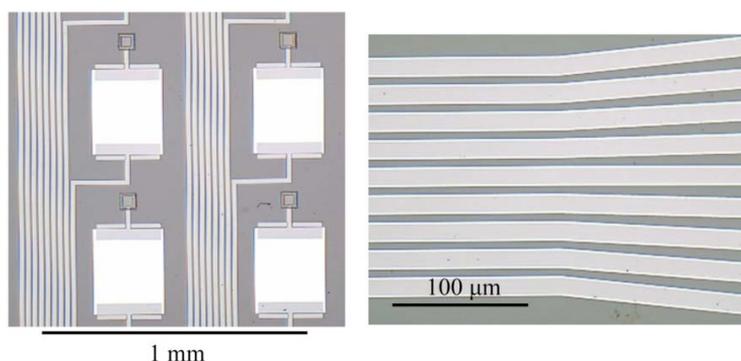


図 2: DIOS 衛星用に開発した省スペースの積層配線の (左) ピクセル部分および (右) 配線部分。 $< 1 \mu\text{m}$ 精度で Nb の上配線 (100 nm) と Al の下配線 (厚み 100 nm) が SiO_2 絶縁膜を介して重なっている。

2. 研究業績

1) 論文

K. Hamaguchi, M.F. Corcoran, Y. Ezoe, L. Townsley, P. Broos, R. Gruendl, K. Vaidya, S.M. White, T. Strohmayer, R. Petre, Y.-H. Chu: A Smoking Gun in the Carina Nebula, *The Astrophysical Journal Letters*, **695**, pp.L4-L9 (2009)

Y. Ezoe, T. Shirata, I. Mitsuishi, M. Ishida, K. Mitsuda, K. Morishita, K. Nakajima: Shaped silicon wafers obtained by hot plastic deformation: performance evaluation for future astronomical x-ray telescopes, *Applied Optics*, **48**, p.3830

E. Branchini, E. Ursino, A. Corsi, D. Martizzi, L. Amati, J.W. den Herder, M. Galeazzi, B. Gendre, J. Kaastra, L. Moscardini, F. Nicastro, T. Ohashi, F. Paerels, L. Piro, M. Roncarelli, Y. Takei, M. Viel: Studying the Warm Hot Intergalactic Medium with Gamma-Ray Bursts, *The Astrophysical Journal*, **697**, pp.328–344 (2009)

T.H. Reiprich, D.S. Hudson, Y.-Y. Zhang, K. Sato, Y. Ishisaki, A. Hoshino, T. Ohashi, N. Ota, Y. Fujita: Suzaku measurement of Abell 2204's intracluster gas temperature profile out to 1800 kpc, *Astronomy and Astrophysics*, **501**, pp.899–905 (2009)

Y. Maeda, Y. Uchiyama, A. Bamba, H. Kosugi, H. Tsunemi, E.A. Helder, J.Vink, N. Kodaka, Y. Terada, Y. Fukazawa, J. Hiraga, J.P. Hughes, M. Kokubun, T. Kouzu, H. Matsumoto, E. Miyata, R. Nakamura, S. Okada, K. Someya, T. Tamagawa, K. Tamura, K. Totsuka, Y. Tsuboi, Y. Ezoe, S.S. Holt, M. Ishida, T. Kamae, R. Petre, T. Takahashi: Suzaku X-Ray Imaging and Spectroscopy of Cassiopeia A, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **61**, pp.1217–1228 (2009)

S.H. Pravdo, Y. Tsuboi, A. Uzawa, Y. Ezoe: X-rays from the Power Sources of the Cepheus A Star-Forming Region, *The Astrophysical Journal*, **704**, pp.1495–1505 (2009)

Y. Ezoe, K. Ishikawa, T. Ohashi, Y. Miyoshi, N. Terada, Y. Uchiyama, H. Negoro: Discovery of Diffuse Hard X-Ray Emission Around Jupiter with Suzaku, *The Astrophysical Journal Letters*, **709**, pp. L178–L182 (2010)

I. Mitsuishi, Y. Ezoe, M. Koshiishi, M. Mita, Y. Maeda, N.Y. Yamasaki, K. Mitsuda, T. Shirata, T. Hayashi, T. Takano, R. Maeda: Evaluation of the soft x-ray reflectivity of micropore optics using anisotropic wet etching of silicon wafers, *Applied Optics*, **49**, p.1007 (2010)

2) 国際会議報告

Y. Ezoe, T. Shirata, T. Ohashi, M. Ishida, K. Mitsuda, K. Fujiwara, K. Morishita, K. Nakajima: Development of high-resolution and light-weight x-ray optics with deformed silicon wafers, *EUV and X-Ray Optics: Synergy between Laboratory and Space. Edited by R. Hudec, L. Pina, Proceedings of the SPIE*, **7360**, pp.73600B-73600B-8 (2009)

I. Mitsuishi, Y. Ezoe, U. Takagi, M. Mita, R. Riveros, H. Yamaguchi, F. Kato, S. Sugiyama, K. Fujiwara, K. Morishita, K. Nakajima, S. Fujihira, Y. Kanamori, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda, R. Maeda: Novel ultra-lightweight and high-resolution MEMS x-ray optics, *EUV and X-Ray Optics: Synergy between Laboratory and Space. Edited by R. Hudec, L. Pina, Proceedings of the SPIE*, **7360**, pp.73600C-73600C-8 (2009)

R.E. Riveros, H. Yamaguchi, I. Mitsuishi, U. Takagi, Y. Ezoe, F. Kato, S. Sugiyama, N. Yamasaki, K. Mitsuda: Magnetic field assisted finishing of ultra-lightweight and high-resolution MEMS x-ray micro-pore optics, *EUV and X-Ray Optics: Synergy between Laboratory and Space. Edited by R. Hudec, L. Pina, Proceedings of the SPIE*, **7360**, pp.736013-736013-8 (2009)

T. Hayashi, T. Sato, M. Ishida, Y. Maeda, H. Mori, R. Nakamura, T. Shirata, K. Someya, Y. Ogasaka, K. Torii: Improvement of the angular resolution of a thin-foil-nested x-ray telescope, *Advances in X-Ray/EUV Optics and Components IV. Edited by A.M. Khounsary, C. Morawe, S. Goto. Proceedings of the SPIE*, **7448**, pp.74480A-74480A-8 (2009)

- H. Yoshitake, Y. Ezoe, T. Yoshino, K. Mukai, K. Ishikawa, K. Mitsuda, N.Y. Yamasaki, Y. Ishisaki, H. Akamatsu, R. Maeda, T. Takano: Optimization of Structure of Large Format TES Arrays, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **19**, pp.456–459 (2009)
- N.Y. Yamasaki, K. Mitsuda, Y. Ezoe, T. Hagihara, K. Kimura, K. Masui, I. Mitsuishi, T. Ohashi, K. Sato, Y. Takei, T. Yoshino: Suzaku Detection of the Charge Exchange Emission and Observation for the Soft X-ray Diffuse Emission, *THE LOCAL BUBBLE AND BEYOND II: Proceedings of the International Conference, AIP Conference Proceedings*, **1156**, pp.74–84 (2009)
- Y. Ezoe; H. Yoshitake, K. Ishikawa, Y. Ishisaki, H. Akamatsu, T. Ohashi, N.Y. Yamasaki, K. Mitsuda, T. Takano, R. Maeda: Large Arrays of TES X-ray Microcalorimeters for Dark Baryon Search, *THE THIRTEENTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON LOW TEMPERATURE DETECTORS-LTD13. AIP Conference Proceedings*, **1185**, pp.60–63 (2009)
- F.S. Porter, R. Fujimoto, R.L. Kelley, C.A. Kilbourne, K. Mitsuda, T. Ohashi, and The ASTRO-H/SXS Collaboration: The Astro-H Soft X-ray Spectrometer (SXS), *THE THIRTEENTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON LOW TEMPERATURE DETECTORS-LTD13. AIP Conference Proceedings*, **1185**, pp.91–94 (2009)
- H. Akamatsu, Y. Ishisaki, A. Hoshino, Y. Ezoe, T. Ohashi, Y. Takei, N.Y. Yamasaki, K. Mitsuda, T. Oshima, K. Tanaka: Impedance Measurement of a Gamma-Ray TES Calorimeter with a Bulk Sn Absorber, *THE THIRTEENTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON LOW TEMPERATURE DETECTORS-LTD13. AIP Conference Proceedings*, **1185**, pp.191–194 (2009)
- H. Akamatsu, Y. Abe, K. Ishikawa, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, T. Ohashi, Y. Takei, N.Y. Yamasaki, K. Mitsuda, R. Maeda: Impedance measurement and excess-noise behavior of a Ti/Au bilayer TES calorimeter, *THE THIRTEENTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON LOW TEMPERATURE DETECTORS-LTD13. AIP Conference Proceedings*, **1185**, pp.195–198 (2009)
- R.L. Kelley, S.R. Bandler, W.B. Doriese, Y. Ezoe, R. Fujimoto, L. Gottardi, R. den Hartog, J.-W. den Herder, H. Hoovers, K. Irwin, Y. Ishisaki, C.A. Kilbourne, P. de Korte, J. der Kuur, K. Mitsuda, T. Ohashi, L. Piro, F.S. Porter, K. Sato, K. Shinozaki, P. Shirron, S.J. Smith, Y. Takei, P. Whitehouse, N.Y. Yamasaki: The X-Ray Microcalorimeter Spectrometer for the International X-Ray Observatory, *THE THIRTEENTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON LOW TEMPERATURE DETECTORS-LTD13. AIP Conference Proceedings*, **1185**, pp.757–760 (2009)
- H. Seta, M.S. Tashiro, Y. Terada, Y. Shimoda, K. Onda, Y. Ishisaki, M. Tsujimoto, T. Hagihara, Y. Takei, K. Mitsuda, K.R. Boyce, A.E. Szymkowiak: Development of a Digital Signal Processing System for the X-ray Microcalorimeter onboard ASTRO-H, *THE THIRTEENTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON LOW TEMPERATURE DETECTORS-LTD13. AIP Conference Proceedings*, **1185**, pp.278–281 (2009)
- Y. Ishisaki, H. Akamatsu, A. Hoshino, T. Numazawa, K. Kamiya, R. Fujimoto, Y. Kojima, K. Shinozaki, K. Mitsuda, P. Shirron: Performance test of Ti/Au bilayer TES microcalorimeter in combination with continuous ADR, *THE THIRTEENTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON LOW TEMPERATURE DETECTORS-LTD13. AIP Conference Proceedings*, **1185**, 442 (2009)

3) 学会講演

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

赤松弘規, 石崎欣尚, 阿部祐輝, 江副祐一郎, 石川久美, 大橋隆哉 (首都大理工), 吉武宏, 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性能向上を目指した基礎特性評価

竹井洋, 満田和久, 山崎典子, 辻本匡弘 (ISAS/JAXA), 篠崎慶亮, 杉田寛之, 佐藤洋一 (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), 田代信, 寺田幸功 (埼玉大), 玉川徹 (理研), 北本俊二, 村上弘志 (立教大), Richard L. Kelley, Gary A. Sneiderman (NASA/GSFC), ASTRO-H SXS チーム: ASTRO-H 衛星搭載マイクロカロリメータ SXS の開発

江副祐一郎, 石川久美, 長田翔, 大橋隆哉 (首都大理工), 土屋彰広, 山崎典子, 海老沢研, 満田和久 (ISAS/JAXA), 寺田直樹 (NICT): すざく衛星による地球外圏からの電荷交換反応輝線の観測

常深博, 林田清, 山崎典子 (ISAS/JAXA), 中澤知洋 (東大), 大橋隆哉 (首都大理工), 深澤泰司 (広島大), 鶴剛 (京都大): 高分解 X・ガンマ線撮像分光学の開拓

瀬田裕美, 田代信, 寺田幸功, 恩田香織, 下田優弥 (埼玉大), 石崎欣尚 (首都大理工), 萩原利士成, 辻本匡弘, 竹井洋 (ISAS/JAXA), ASTRO-H/SXS チーム: ASTRO-H 搭載用の X 線マイクロカロリメータの信号処理システムの開発

日本天文学会 2009 年春季年会 2009 年 3 月 26 日 ~ 28 日 (大阪府立大学)

川原田円 (理研), 北口貴雄, 中澤知洋 (東大), 牧島一夫 (東大/理研) 山崎典子 (ISAS), 太田直美 (ISAS/MPE), 深澤泰司 (広島大), 松下恭子 (東理大), 佐藤浩介 (金沢大), 大橋隆哉 (首都大): 「すざく」による MS 1512.4+3647 銀河団プラズマの重元素組成の研究

佐藤浩介 (金沢大), 松下恭子 (東理大), 川原田円 (理研), 中澤知洋 (東大), 山崎典子 (ISAS/JAXA), 石崎欣尚, 大橋隆哉 (首都大): 「すざく」で観測された Fossil group NGC1550 の重元素分布

星野晶夫, 赤松弘規, 横田涉, 石崎欣尚, 大橋隆哉 (首都大), 佐藤浩介 (金沢大), J.Patrick Henry (ハワイ大): 「すざく」衛星による Abell 1413 の温度と重力質量測定

横田 涉, 高岡 朗, 星野晶夫, 浅野健太郎, 石崎欣尚, 大橋隆哉 (首都大), 松尾 宏, 岡田 則夫, 大島 泰 (国立天文台), 篠崎慶亮 (ISAS/JAXA): 極低温冷凍機用ガスギャップ式ヒートスイッチの開発

竹井洋, 満田和久, 山崎典子, 辻本匡弘, 篠崎慶亮 (ISAS/JAXA), 杉田寛之, 佐藤洋一 (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), 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, P.J. Shirron, M.J.DiPirro (NASA/GSFC), D.McCammon (Wisconsin), J.-W. den Herder (SRON), ASTRO-H SXS チーム: ASTRO-H 衛星搭載マイクロカロリメータ SXS の開発

林 多佳由, 佐藤拓郎 (ISAS/JAXA, 首都大), 染谷 謙太郎, 中村良子, 関口 晶子 (ISAS/JAXA), 白田涉雪 (首都大), 森英之, 前田良知, 石田 學 (ISAS/JAXA), 大橋隆哉 (首都大): 反射鏡の改良による X 線望遠鏡の結像性能の向上 (2)

白田涉雪, 江副祐一郎, 大橋隆哉 (首都大), 石田学, 満田和久 (ISAS/JAXA), 藤原航三, 森下浩平, 中島一雄 (東北大): 高温塑性変形を用いた軽量・高角度分解能のシリコン X 線反射鏡の基礎開発

三石郁之 (宇宙航空研究開発機構), 江副祐一郎, 高木うた子 (首都大学東京), Raul Riveros, 山口ひとみ (フロリダ大), 加藤史樹, 杉山進 (立命館大学), 藤原航三, 森下浩平, 中嶋一雄, 藤平慎也, 金森義明 (東北大), 山崎典子, 満田和久 (宇宙航空研究開発機構), 前田龍太郎 (産総研): 超軽量・高角度分解能 新 MEMS X 線光学系の開発 (1)

大橋隆哉 (首都大), 田原 譲 (名古屋大), 須藤 靖 (東京大), 河合誠之 (東工大), 満田和久, 山崎典子 (ISAS/JAXA), DIOS ワーキンググループ, C. Kouveliotou (NASA/MSFC), L. Piro (INAF), J.-W. den Herder (SRON): ダークバリオン探査衛星計画: DIOS および Xenia

吉武宏 (ISAS/JAXA), 江副祐一郎, 石川久美, 石崎欣尚, 赤松弘規, 阿部祐輝 (首都大理工), 満田和久, 山崎典子, 竹井洋 (ISAS/JAXA), 大橋隆哉 (首都大理工), 前田龍太郎 (産総研): TES 型 X 線マイクロカロリメータ分解能改善に向けた超伝導電流の制御

日本物理学会 2009 年秋季大会 2009 年 9 月 10 日 ~ 13 日 (甲南大学 岡本キャンパス)

藤本龍一, 佐藤浩介 (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 (首都大理工), 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 (Wisconsin 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 (II)

山口弘悦, 江副祐一郎, 石川久美, 大橋隆哉 (首都大), 藤本龍一 (金沢大), 三石郁之, 吉武宏, 竹井洋, 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 (SHI), Peter Shirron, Mike DiPirro (NASA/GSFC), 他 SXS チーム: ASTRO-H 搭載 X 線マイクロカロリメータ SXS の冷却用ヘリウム排気系の検討および開発状況

赤松弘規, 阿部祐輝, 石川久美, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 大橋隆哉 (首都大理工), 吉武宏, 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エネルギー分解能の追求

日本天文学会 2009 年秋季年会 2009 年 9 月 14 日 ~ 16 日 (山口大学)

阿部祐輝, 赤松弘規, 石川久美, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 大橋隆哉 (首都大理工), 吉武宏, 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エネルギー分解能の追求

平社航, 竹井洋, 木村俊介, 山崎典子, 満田和久 (ISAS/JAXA): X 線マイクロカロリメータのアレイ化用高速駆動回路の性能評価

横田 渉, 高岡 朗, 辺見香理, 星野晶夫, 石崎欣尚, 大橋隆哉 (首都大), 松尾宏, 岡田則夫, 大島泰 (国立天文台), 篠崎慶亮 (JAXA): 極低温冷凍機用ガスギャップ式ヒートスイッチの開発 (2)

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): 「すざく」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, 赤松弘規, 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): 「すざく」衛星による銀河団外縁部の観測的研究

大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 佐々木 伸 (首都大), 田原 讓, 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

林多佳由, 佐藤拓郎, 塩野目雄 (ISAS/JAXA, 首都大), 前田良知, 石田學 (ISAS/JAXA), 國枝秀世 (名古屋大): 精密研磨マンドレルによる X 線反射鏡の改良

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

藤本龍一, 佐藤浩介 (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), 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. Kelly, C.A. Kilbourne, F. S. Porter (NASA/GSFC), D. McCammon (Wisconsin 大), A. Szymkowiak (Yale 大), J.-W. den Herder (SRON), 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 (III)

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

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)

国内研究会

原子衝突研究協会第34回年会 2009年8月28~30日(首都大学東京国際交流会館)

赤松弘規, 阿部祐輝, 横田涉, 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, 前野修平, 石田卓也, 田沼肇, 篠崎慶亮, 満田和久: 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

X線結像光学シンポジウム 2009年11月6~7日(筑波)

大橋隆哉(首都大理工): TESカロリメータ

三石郁之(ISAS/JAXA), 江副祐一郎, 高木うた子(首都大理工), 三田信(ISAS/JAXA), Raul Riveros, 山口ひとみ(フロリダ大), 加藤史樹, 杉山進(立命館大), 森下浩平, 中嶋一雄, 藤平慎也, 金森義明(東北大), 山崎典子, 満田和久(ISAS/JAXA), 前田龍太郎(産総研): 超軽量かつ高角度分解能新MEMS X線光学系の開発と現状

林多佳由, 佐藤拓郎, 江副祐一郎(首都大理工), 石田学, 満田和久(ISAS/JAXA), 大橋隆哉(首都大理工), 森下浩平, 中嶋一雄(東北大学): シリコン熱塑性変形を用いた軽量かつ高分解能X線望遠鏡の開発

第10回宇宙科学シンポジウム 2010年1月7~8日(ISAS/JAXA)

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(U. Wisconsin), A.E. Szymkowiak(Yale U.), J.-W. den Herder, C. de Vries(SRON), S. Paltani, M. Pohl(U. Geneva), SXSチーム: ASTRO-H搭載SXS-XCS検出器

吉武宏, 満田和久, 山崎典子, 竹井洋, 三石郁之, 関谷典夫, 平社航(ISAS/JAXA), 大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 星野晶夫, 赤松弘規, 石川久美, 横田涉, 阿部祐輝, 辺見香理, 入江敏弘, 大石詩穂子, 近川祥雄, 森田麻美(首都大), 藤本龍一, 佐藤浩介, 和田茜, 谷津貴裕(金沢大), 篠崎慶亮(JAXA): 高分光性能TES型X線マイクロカロリメータの開発現状

林多佳由, 佐藤拓郎, 塩野目雄, 石田学(首都大, ISAS/JAXA), 江副祐一郎, 大橋隆哉(首都大), 満田和久(ISAS/JAXA), 森下浩平, 中嶋一雄(東北大): シリコン熱塑性変形を利用した軽量高性能X線望遠鏡の開発

三石郁之(ISAS/JAXA), 江副祐一郎, 高木うた子, 石津健佑, 森山鉄平(首都大学東京), 三田信(ISAS/JAXA), Raul Riveros, Taylor Boggs, 山口ひとみ(フロリダ大学), 加藤史樹(産業技術総合研究所), 洞出光洋, 杉山進(立命館大学), 森下浩平, 中嶋一雄(東北大 金研), 藤平慎也, 金森義明(東北大工), 前田龍太郎(産業技術総合研究所), 山崎典子, 満田和久(ISAS/JAXA): 超軽量・高角度分解能新MEMS X線光学系の開発

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

大橋隆哉(首都大理工), R. Mushotzky(U. Maryland), 松下恭子(東理科大), 辻本匡弘, 馬場彩, 高橋忠幸(ISAS/JAXA), ほか ASTRO-H サイエンスチーム: ASTRO-H の目指すサイエンス

第 11 回惑星圏研究会 2010 年 03 月 15 ~ 17 日 (東北大学)

江副 祐一郎, 石川 久美, 大橋 隆哉 (首都大), 山崎典子, 満田 和久 (JAXA 宇宙研), 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): X 線天文衛星「すざく」で見た惑星

石川 久美, 江副 祐一郎, 大橋 隆哉 (首都大), 二穴喜文 (IRF), 寺田 直樹 (東北大), 他: 「すざく」衛星による太陽極小期における火星外圏からの X 線放射の検証

第 10 回高宇連研究会「高エネルギー宇宙物理学の最新成果と将来計画」2010 年 3 月 8 ~ 10 日 (ISAS/JAXA)

赤松弘規: X 線精密分光検出器 TES 型 X 線マイクロカロリメータの基礎特性と分光性能

国際会議

SPIE Optics + Optoelectronics, Prague, Czech, April 20-23, 2009

Y. Ezoe, T. Shirata, T. Ohashi, M. Ishida, K. Mitsuda, K. Fujiwara, K. Morishita, K. Nakajima: Development of high-resolution and light-weight x-ray optics with deformed silicon wafers

R. E. Riveros, H. Yamaguchi, I. Mitsuishi, U. Takagi, Y. Ezoe, F. Kato, S. Sugiyama, N.Y. Yamasaki, K. Mitsuda: Magnetic field assisted finishing of ultra-lightweight and high-resolution MEMS x-ray micro-pore optics

I. Mitsuishi, Y. Ezoe, U. Takagi, M. Mita, R. Riveros, H. Yamaguchi, F. Kato, S. Sugiyama, K. Fujiwara, K. Morishita, K. Nakajima, S. Fujihira, Y. Kanamori, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda, R. Maeda: Novel ultra-lightweight and high-resolution MEMS x-ray optics

Space Cryogenics, Arcadia, CA, USA, June 22-25, 2009

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.A. Kilbourne, J. Crow, A. Mattern, A. Kashani, D. McCammon, J.-W. den Herder: Cooling system for the soft X-ray spectrometer onboard Astro-H

K. Shinozaki, K. Mitsuda, N.Y. Yamasaki, Y. Takei, K. Masui, K. Asano, T. Ohashi, Y. Ezoe, Y. Ishisaki, R. Fujimoto, K. Sato, K. Kanao, S. Yoshida: Development of double-stage ADR for future space missions

K. Ishikawa, Y. Ezoe, H. Yamaguchi, I. Mitsuishi, H. Yoshitake, T. Ohashi, K. Mitsuda, M. Murakami, K. Kanao, S. Yoshida, P. Shirron, M. DiPirro, and the SXS team: Suppression of Superfluid Helium Film Flow in the X-ray Microcalorimeter Instrument onboard Astro-H

HARMST, Saskatoon, Canada, June 25-28, 2009

Y. Ezoe, I. Mitsuishi, U. Takagi, M. Koshiishi, K. Mitsuda, N.Y. Yamasaki, T. Ohashi, F. Kato, S. Sugiyama, R.E. Riveros, H. Yamaguchi, S. Fujihira, Y. Kanamori, K. Morishita, K. Nakajima, R. Maeda: Ultra light-weight and high-resolution X-ray mirrors using DRIE and X-ray LIGA techniques for Space X-ray Telescopes

The Energetic Cosmos from Suzaku to Astro-H, Otaru, Hokkaido, Japan, June 29–July 2, 2009

I. Mitsuishi, N.Y. Yamasaki, Y. Takei, T. Ohashi, K. Sato, M. Galeazzi, A. Gupta, J.P. Henry: Search for WHIM in the Shapley Supercluster with Suzaku

Y. Ezoe, K. Ishikawa, T. Ohashi, Y. Miyoshi, N. Terada, Y. Uchiyama, H. Negoro: Suzaku Detection of Diffuse Hard X-ray Emission around Jupiter: Inverse Compton Scattering by MeV electrons ?

K. Matsushita, Y. Fukazawa, K. Hayashi, S. Konami, R. Nagino, T. Ohashi, K. Sato, Y. Tawara: Metal enrichment histories from galaxies to clusters

K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, K. Shinozaki, Y. Takei, M. Tsujimoto, H. Sugita, Y. Satoh, R. Fujimoto, K. Sato, T. Ohashi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, M. Murakami, M. Tashiro, Y. Terada, T. Tamagawa, M. Kawaharada, H. Yamaguchi, S. Kitamoto, H. Murakami, R. L. Kelley, C. A. Kilbourne, F. S. Porter, G.A. Sneiderman, P.J. Shirron, M.J. DiPirro, K.R. Boyce, D. McCammon, A.E. Szymkowiak, J-W den Herder and the SXS team: The X-ray Microcalorimeter on Astro-H mission

Y. Ishisaki, K. Henmi, A. Hoshino, H. Akamatsu, T. Ohashi, K. Sato, Y. Takei, N.Y. Yamasaki: Observation of 1 deg East- and South-Offset of AWM7 with Suzaku: Implication of Filament of Pisces-Perseus Supercluster

T. Ohashi, H. Akamatsu, I. Mitsuishi, Y. Takei, N.Y. Yamasaki, K. Sato, M. Galeazzi: Search for WHIM with Suzaku and Future Prospects

A. Hoshino, J.P. Henry, K. Sato, H. Akamatsu, S. Sasaki, Y. Ishisaki, T. Ohashi: X-ray Study of the Mass Profile in the Outer Region of A1413

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

H. Murakami, K. Matsushita, M. Komiyama, K. Sato, R. Nagino, T. Ohashi, N. Yamasaki, Y. Takei, K. Nakazawa: Suzaku and XMM-Newton Observations of the Metallicity Distribution in the Intra-cluster Medium of the Fornax cluster

H. Akamatsu, Y. Abe, Y. Ishisaki, K. Ishikawa, Y. Ezoe, T. Ohashi, H. Yoshitake, T. Yoshino, K. Shinozaki, Y. Takei, N. Yamasaki, K. Mitsuda: Development of TES microcalorimeter array for DIOS mission

13th International Workshop on Low Temperature Detectors, Stanford, CA, USA, July 20–24, 2009

Y. Ezoe; H. Yoshitake, K. Ishikawa, Y. Ishisaki, H. Akamatsu, T. Ohashi, N.Y. Yamasaki, K. Mitsuda, T. Takano, R. Maeda: Large Arrays of TES X-ray Microcalorimeters for Dark Baryon Search

F.S. Porter, R. Fujimoto, R.L. Kelley, C.A. Kilbourne, K. Mitsuda, T. Ohashi, and The ASTRO-H/Sxs Collaboration: The Astro-H Soft X-ray Spectrometer (SXS)

H. Akamatsu, Y. Ishisaki, A. Hoshino, Y. Ezoe, T. Ohashi, Y. Takei, N.Y. Yamasaki, K. Mitsuda, T. Oshima, K. Tanaka: Impedance Measurement of a Gamma-Ray TES Calorimeter with a Bulk Sn Absorber

H. Akamatsu, Y. Abe, K. Ishikawa, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, T. Ohashi, Y. Takei, N.Y. Yamasaki, K. Mitsuda, R. Maeda: Impedance measurement and excess-noise behavior of a Ti/Au bilayer TES calorimeter

R.L. Kelley, S.R. Bandler, W.B. Doriese, Y. Ezoe, R. Fujimoto, L. Gottardi, R. den Hartog, J.-W. den Herder, H. Hoovers, K. Irwin, Y. Ishisaki, C.A. Kilbourne, P. de Korte, J. der Kuur, K. Mitsuda, T. Ohashi, L. Piro, F.S. Porter, K. Sato, K. Shinozaki, P. Shirron, S.J. Smith, Y. Takei, P. Whitehouse, N.Y. Yamasaki: The X-Ray Microcalorimeter Spectrometer for the International X-Ray Observatory

H. Seta, M.S. Tashiro, Y. Terada, Y. Shimoda, K. Onda, Y. Ishisaki, M. Tsujimoto, T. Hagihara, Y. Takei, K. Mitsuda, K.R. Boyce, A.E. Szymkowiak: Development of a Digital Signal Processing System for the X-ray Microcalorimeter onboard ASTRO-H

Y. Ishisaki, H. Akamatsu, A. Hoshino, T. Numazawa, K. Kamiya, R. Fujimoto, Y. Kojima, K. Shinozaki, K. Mitsuda, P. Shirron: Performance test of Ti/Au bilayer TES microcalorimeter in combination with continuous ADR

IAU General Assembly JD-1 Dark Matter in Early-type Galaxies, Rio de Janeiro, Brazil, August 3–5, 2009

T. Ohashi (invited): Dark matter and X-ray halos in early-type galaxies and clusters of galaxies

SPIE Advances in X-Ray/EUV Optics and Components IV, San Diego, USA, August 3–5, 2009

T. Hayashi, T. Sato, M. Ishida, Y. Maeda, H. Mori, R. Nakamura, T. Shirata, K. Someya, Y. Ogasaka, K. Torii: Improvement of the angular resolution of a thin-foil-nested x-ray telescope,

Optical MEMS, Clearwater Beach, FL, USA, August 16–20, 2009

Y. Ezoe, I. Mitsuishi, U. Takagi, K. Mitsuda: Micromachined Reflective X-ray Concentrator For Microanalysis

I. Mitsuishi, Y. Ezoe, U. Takagi, K. Ishizu, T. Moriyama, T. Hayashi, T. Sato, K. Morishita, K. Nakajima, N.Y. Yamasaki, K. Mitsuda: Optical Image Analysis of the Novel Ultra-Lightweight and High-Resolution MEMS X-ray Optics

American Astronomical Society (AAS) Division of Planetary Science (DPS), Puerto Rico, USA, October 3–11, 2009

Yuichiro Ezoe, K. Ishikawa, T. Ohashi, N. Terada, Y. Miyoshi, Y. Uchiyama: Discovery of Diffuse Hard X-ray Emission Around Jupiter

Astronomical X-ray Telescope (AXRO), Prague, Czech, December 6–10, 2009

Y. Ezoe (invited): Recent development of light-weight & high-resolution X-ray optics in Japan

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

Y. Ezoe, Y. Miyoshi, K. Ishikawa, T. Ohashi, N. Terada, Y. Uchiyama, H. Negoro: Discovery of diffuse hard X-ray emission associated with Jupiter

High-resolution X-ray spectroscopy, Utrecht, The Netherlands, March 15–17, 2010

T. Ohashi (invited): Future X-ray missions

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

4) 学会誌等

江副祐一郎, 篠崎慶亮, 竹井洋: 進化する X 線マイクロカロリメータ—精密 X 線分光で解き明かす宇宙の大規模構造—, 日本物理学会誌 64 (2009) pp.611–618

光物性サブグループ

1. 研究活動の概要

1) 金属型・半導体型カーボンナノチューブの光電子分光

金属型と半導体型の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を作製し、光吸収スペクトルと高分解能光電子スペクトルを測定し、電子状態を調べた。半導体型 SWCNT では、バンドル効果によって van Hove 特異点による構造の光吸収強度および光電子放出強度が著しく弱くなることが分かった。また、金属型 SWCNT では、低温で SWCNT 間相互作用による擬ギャップの存在を示唆する光電子スペクトルが得られた。この点は、試料の質を含めて追試する必要がある。

2) C₇₀ フラーレンピーポッドの逆光電子分光

C₇₀ フラーレン薄膜の研究は既に多く行われているが、実験条件によって価電子帯の HOMO ピークと伝導帯の LUMO ピークのエネルギー位置が異なっていた。そこで、C₇₀ フラーレンの蒸着基板依存性を測定した結果、金属 C₇₀ フラーレン界面に働く電気二重層によって、HOMO ピークと LUMO ピークの位置が基板の仕事関数に依存してエネルギーシフトすることが分かった。

3) CdSe/CdS 量子ドット増感太陽電池電極の分光増感特性評価

半導体量子ドット増感太陽電池を他研究機関 (電通大) と共同で作製し、光吸収測定、光化学電流測定、X 線光電子分光によって分光増感特性を評価した。今まで、増感剤である CdSe 量子ドットのクラスター化が問題となっていたが、CdS と CdSe を組み合わせることによってクラスター化を防ぐことができた。また、対極を Pt から Cu₂S にすることで対極 - 電解質間の抵抗が減少した。このような改良によって、光電変換効率は 3.2% まで向上した。

2. 研究業績

1) 論文

S. Fujiki, K. Tsuchiya, J. Ishikawa, H. Okuma, T. Miyahara, H. Sasaki, T. Shioya, T. Obina and S. Yamamoto: Compression of photon wave packets in the soft-x-ray region, *Phys. Rev. A* **80** (2009) 063804.

2) 学会講演

日本物理学会第 64 回年次大会 2009 年 3 月 27 日 ~ 30 日 (立教大学)

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

ナノ学会第 7 回大会 2009 年 5 月 9 日 ~ 11 日 (東京大学本郷キャンパス)

宮尾智章、奥村修一、中山裕二、藤木伸一郎、塩澤秀次、石井廣義、宮原恒昱、兒玉健、阿知波洋次、仲武昌史、片浦弘道、齋藤彦彦: フラーレンピーポッドの正・逆光電子分光

奥村修一、宮尾智章、平戸康晴、石井廣義、宮原恒昱、田村聡、吉田征央、沈青、豊田太郎、田中克昇、姜健、島田賢也、生天目博文、谷口雅樹、上田茂典、山下良之、吉川英樹、小林啓介: CdSe 量子ドットを吸着したナノ構造 TiO₂ 電極の硬 X 線光電子分光

物理学会 2009 年秋季大会 2009 年 9 月 25 日～28 日（熊本大学黒髪キャンパス）

宮尾智章、奥村修一、中山裕二、藤木伸一郎、石井廣義、宮原恒昱、真庭豊、兒玉健、阿知波洋次、塩澤秀次、仲武昌史、片浦弘道、齋藤智彦：フラーレンピーポッドの正・逆光電子分光

電子物性研究サブグループ

1. 研究活動の概要

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

1) f-電子系強相関伝導物質

本サブグループは、f-電子と伝導電子の強い相関効果に起因する新奇現象を探索し、見出された興味深い現象の機構を解明することを目的としており、興味深い物性が報告されている希土類系典型的化合物や新奇特性が期待される新たな化合物の純良単結晶を育成し、研究を進めている。ここ数年は、特に充填スクッテルライト構造を持つ化合物 RT_4X_{12} (R :希土類、 T :遷移金属、 X :15族元素) を主要な対象として研究を進め、多くの研究者との共同研究により、この物質系の特殊な構造が可能にした変化に富んだ特性を、統一的に理解するために必要な幾つかの重要な要素を抽出する計画が着実に進展した。しかし、常圧下での合成が困難な As 系充填スクッテルライトや重希土類系充填スクッテルライトは、純良な試料が得られず、本質的な特性が分かっていないものが残されてきた。従って、2009年度は、(1) 興味深い特性が期待されながら結晶が得られていない充填スクッテルライトの純良単結晶の育成とその物性評価、(2) 最も重点的に研究が行われた幾つかの充填スクッテルライトの理解を更に深めるためのサイト置換効果、(3) かご状物質に共通する普遍的な測定を解明するための新かご状物質の結晶育成と物性評価、の3つのテーマを同時に進めた。

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

特に、軽希土類を含む $FeAs$ 系充填スクッテルライトに重点を置き、高圧下フラックス法により単結晶育成を試み、 $R = La, Ce, Pr, Nd, Sm$ について単結晶育成に成功した。その中で、既に、多結晶試料で、転移温度 5.2 K を持つ弱い遍歴電子強磁性転移を見出した $LaFe_4As_{12}$ について、圧力印加による転移温度の低下を期待し、量子臨界点での特性評価を目指して、電気抵抗の温度依存性への圧力効果の測定を行った。その結果、転移温度は圧力増加とともに減少し、約 2 GPa で転移を反映する抵抗の曲がり は 0.5 K 以下となり、電気抵抗の温度依存性は SCR 理論から 3次元強磁性揺らぎから予想される $T^{5/3}$ となった。つまり、量子臨界点が 2 GPa 近傍にある証拠を得たといえる。さらなる低温、高圧での物性測定が共同研究者により進められている。一方、磁場効果には、中間温度領域 (~20 K) において異常な磁気抵抗の増強を見出した。低温領域の磁気抵抗の温度・磁場依存性の振舞は、これまで報告されている $ZrZn_2$ など遍歴電子強磁性体と同様、基本的にスピン揺らぎ散乱の磁場による抑制と通常の伝導電子のサイクロトロン運動による正常磁気抵抗により説明できるが、正常磁気抵抗が Kohler 則で期待されるものに比べ 2 倍以上になっているのである。この振舞いを理解する機構として、主要な散乱機構であるスピン揺らぎ散乱の大きな波数依存性の存在を提案した。

また、 $CeFe_4As_{12}$ について、ポーランド・米国の研究者グループは、低圧下フラックス法により育成して単結晶を用いて電気抵抗を測定し、試料の格子定数の顕著な試料依存性と、それに相関した電気抵抗の温度依存性を見出し、最近の国際会議の会議録中で、金属-絶縁体転移の可能性を提案している。我々の結果と矛盾するため、更に詳細に試料依存性の系統的な測定を行った。結果として、我々の高圧下育成単結晶では、格子定数は以前の他のグループの結果と一致し、試料依存性は僅かであり、金属-絶縁体転移の兆候は見られないことが確認された。従って、会議録報告は何らかの測定上の問題と判断さ

れる。一方、我々の結果として、(1) 種々物性が試料の結晶性に依存すること、(2) c-f 混成が大きく、純良単結晶ではキャリアが少ないことなどを明らかにした。更に、最近 GdFe₄As₁₂ の純良単結晶育成にも成功して物性評価を進めており、FeAs 系充填スクッテルダイトについては、興味深い特性を期待できる希土類の単結晶育成の締めくくり段階にある。

1-2) YbFe₄P₁₂、SmRu₄As₁₂ の純良単結晶育成と物性評価

YbFe₄P₁₂ は、多結晶試料を用いた測定で、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 μ_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た。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、研究が進んでいない。我々は、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。また、新奇特性が期待できる Sm 系充填スクッテルダイトのうち、SmRu₄As₁₂、SmOs₄As₁₂ については、誰も結晶合成に成功しておらず、物性がまだ知られていない。我々は、高圧下フラックス法により単結晶育成の試みを続け、最近、SmRu₄As₁₂ の単結晶育成に成功し、物性測定を開始した。

1-3) 超伝導体 Pr(Os_{1-x}Ru_x)₄Sb₁₂ おけるラトリングと 4f 電子結晶場励起

非従来型の重い電子超伝導体 PrOs₄Sb₁₂ と従来型超伝導体 PrRu₄Sb₁₂ との合金系 Pr(Os_{1-x}Ru_x)₄Sb₁₂ において、極低温における比熱測定や基礎物性測定を行い、局所原子振動ラトリングや 4f 電子結晶場励起が、本系の超伝導にどのように関与しているのか調べた。その結果、以下の 2 点が明らかとなった。(1) 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 とともに大きく増大し、中間濃度で両者の励起エネルギーが交差することを見出した。そこで両者が束縛状態を形成している可能性と、これが超伝導転移温度 T_c の極小に関与している可能性を指摘した。(2) 電子有効質量と超伝導ギャップが、わずかな Ru 置換により急激に減衰することを定量的に明らかにした。この成果から、結晶場励起が PrOs₄Sb₁₂ の重い電子超伝導状態の形成に重要な役割をしていることが明らかとなった。

1-4) (Sm_xLa_{1-x})Os₄Sb₁₂ における重い電子状態の Sm イオン濃度依存

SmOs₄Sb₁₂ における磁場の影響を受けない重い電子状態 (S. Sanada *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. 74, 246 (2005) にて発見を報告。第 15 回日本物理学会論文賞受賞) において、Sm イオンのラトリング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。この重い電子状態の形成メカニズム解明を目指し、4f 電子を含まない LaOs₄Sb₁₂ との合金系 (Sm_xLa_{1-x})Os₄Sb₁₂ の基礎物性測定を開始した。その結果、この重い電子状態の形成において、Sm イオン格子のコヒーレンスがさほど重要ではなく、~40% の La 置換でも依然として重い電子状態を保っていることが明らかとなった。

(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。)

1-5) 新規カゴ状物質 RT₂Al₂₀ (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 RT₂Al₂₀ は 16 個の Al サイトによって構成されるカゴの中に R サイトが位置するカゴ状構造をしており、一方、T サイトは三角形を基本とした幾何学的フラストレーションを内在したパイロクロア構造をしており、二つの特徴的な構造が共存している。そのため、両方の構造に起因する物理が絡み合った興味深い現象の実現が期待されている。

今まで、この物質系で興味深い現象が多々報告されているが、カゴ原子が Zn の系が中心であった。今回我々は、カゴ原子間の金属結合に電子密度が等方的な s 電子だけでなく異方的な p 電子も寄与する Al 系に注目した。そこで、Al 自己フラックス法により純良単結晶育成を試み、R=La, Pr, Yb について 1mm 弱の単結晶育成に成功した。磁化率測定、抵抗測定により、Yb 系では混成が強くほぼ Yb²⁺ で存在していることが明らかになり、Pr 系では 40 K 付近に結晶場に関連した肩状構造を、0.8 K 付近に転移を示唆する異常を観測した。今後、それらの単結晶試料を用いて極低温までの比熱測定、交流磁化

率測定を含めた詳細な物性測定を行う予定である。

2) ナノ磁性体の電気伝導

絶縁層を二つの強磁性層でサンドイッチした構造を持ち、スピン依存する電子の伝導現象を利用してハードディスクの磁気的情報読み取りヘッドとして実用化されている磁気センサー：TMR (Tunnel magnetoresistance) 素子の磁気抵抗および低周波電圧ノイズスペクトルの磁場-温度依存測定を、新たに作成したクライオスタットを使って 4 K の極低温まで行った。微細加工技術により作成された $\sim 70\text{nm} \times 100\text{nm}$ のサイズを持つ TMR 素子の、 $1/f$ 型ノイズに重ね合わされる形で発現するローレンツ型成分 (時間ドメインで観測される 2 準位型ノイズに対応) において、その特徴的な周波数 f_c が激しく温度依存する振る舞いを詳細に調べた。この結果を「2つの準安定状態間の熱活性型揺らぎ」のモデルで解析し、ノイズ源が持つ特徴を抽出することができた。今後のノイズ起源解明に役立つ情報となるはずである。

3) 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ン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、量子スピンアイス状態であるという理論的な提案がなされた。もしこのような新奇量子状態が実現しているのであれば、スピンアイス同様異方的な磁化が観測されるはずであるが、これまでの実験では 5 K で磁気異方性がないことが確認されているのみである。しかし、これまでの実験で明らかにされている第一励起状態のエネルギーギャップ (18 K)、最近接相互作用 ($J_{\text{nn}} \sim -0.88$ K, $D_{\text{nn}} \sim 0.8$ K) の大きさを考慮するとより低温での測定が必要である。

本年度は、量子スピンアイス状態の真偽を解明するため、この結晶構造に特徴的な [100], [110], [111] 方向の 100 mK, 5 T までの極低温磁化をファラデー法を用いた磁化測定装置により測定した。その結果、4.2 K において磁気異方性の存在を確認し、この系においてイジング異方性が存在していることを明らかにした。さらに、0.1 K の [111] 方向の磁化曲線においてスピンアイス物質と同様なカゴメプラトーを示唆する異常が存在することを発見し、最近接のスピン相関が、フラストレーション系ではあまり考慮されてこなかった量子効果により、キュリー-ワイス則から予想される反強磁性的なものから強磁性的に変化していることを見いだした。これらの結果より、基底状態においてほぼ間違いなく量子スピンアイス状態が実現していることを確認した。

2. 研究業績

1) 論文

Transport properties of the itinerant-electron weak ferromagnet $\text{LaFe}_4\text{As}_{12}$: S. Tatsuoka, K. Tanaka, T. Saito, T. Namiki, K. Kuwahara, Y. Aoki, H. Sato*, *Physica B: Condensed Matter*, **404** (2009) 2912-2915.

Anomalous properties in the low-carrier ordered phase of $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$: Consequence of hybridization between conduction and Pr 4f electrons: S. R. Saha, H. Sugawara, T. Namiki, Y. Aoki, and H. Sato, *Phys. Rev. B* **80** (2009) 014433-6. (July)

Transport properties of $\text{Pr}_x\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$ single crystals with high Pr-site filling fraction grown under high pressure: K. Tanaka, T. Namiki, T. Saito, S. Tatsuoka, A. Imamura, K. Kuwahara, Y. Aoki, H. Sato*, *Physica B: Condensed Matter*, **404**, (2009) 2999-3001.

- Magnetic Field Evolution of a Novel Phase Transition in $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$: ^{121}Sb NMR Study: M. Yogi, H. Niki, M. Yashima, H. Mukuda, Y. Kitaoka., H. Sugawara, and H. Sato, *J. Phys. Soc. Jpn.* **78** (2009), 053703.
- Crystal Field Effect on Superconducting Transition in $\text{Pr}_x\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$: K. Tanaka, T. Namiki, A. Imamura, M. Ueda, T. Saito, S. Tatsuoka, R. Miyazaki, K. Kuwahara, Y. Aoki, and H. Sato, *J. Phys. Soc. Jpn.* **78** (2009), 063701.
- de Haas-van Alphen Effect and Fermi Surface Properties in High-Quality Single Crystals YbCu_2Si_2 and YbCu_2Ge_2 : N. D. Dung, T. D. Matsuda, Y. Haga, S. Ikeda, E. Yamamoto, T. Ishikura, T. Endo, S. Tatsuoka, Y. Aoki, H. Sato, T. Takeuchi, R. Settai, H. Harima, and Y. Onuki, *J. Phys. Soc. Jpn.* **78** (2009), 084711(14 pages).
- Observation of Magnetic Monopoles in Spin Ice: H. Kadowaki, N. Doi, Y. Aoki, Y. Tabata, T. J. Sato, J. W. Lynn, K. Matsuhira, and Z. Hiroi, *J. Phys. Soc. Jpn.* **78** (2009) 103706 (4 pages).
- Systematic Study of Lattice Specific Heat of Filled Skutterudites: K. Matsuhira, C. Sekine, M. Wakeshima, Y. Hinatsu, T. Namiki, K. Takeda, I. Shirotni, H. Sugawara, D. Kikuchi, and H. Sato, *J. Phys. Soc. Jpn.* **78** (2009) 124601-6.
- Novel behaviors in rare-earth-filled skutterudites studied by bulk-sensitive photoemission spectroscopy: A. Yamasaki, S. Imada, A. Sekiyama, H. Fujiwara, M. Yano, J. Yamaguchi, T. Miyamachi, H. Sugawara, D. Kikuchi, and H. Sato, *International Journal of Materials Research (formerly Zeitschrift fuer Metallkunde)* **100** (2009) 1249-1251.
- X-ray magnetic circular dichroism at Os L-edge under multiple extreme conditions in $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$: N Kawamura, S. Tsutsui, M. Mizumaki, N. Ishimatsu, H. Maruyama, H. Sugawara, and H. Sato, *Journal of Physics Conference Series* **190** (2009) 012020.
- A New Proposal to Unravel the Magnetically Robust Heavy Fermion State in $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$: H. Sato, *JPSJ Online News and Comments* [July 10, 2009]
- Kondo scaling of the pseudogap in $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$ and $\text{CeFe}_4\text{P}_{12}$: P A Rayjada, A Chainani, M Matsunami, M Taguchi, S Tsuda, T Yokoya, S Shin, H Sugawara and H Sato, *J. Phys.: Condens. Matter* **22** (2010) 095502 (8pp).
- Crystal field excitations in $\text{PrFe}_4\text{Sb}_{12}$ synthesized under high pressure: 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, *J. Physics: Conference Series* **200** (2010) 012101 (4 p).
- Crossing of the crystalline-electric-field and rattling-phonon excitation energies in the filled skutterudite superconductor $\text{Pr}(\text{Os}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sb}_{12}$: R. Miyazaki, Y. Aoki, D. Kikuchi, H. Sugawara, and H. Sato, *Journal of Physics: Conference Series* **200** (2010) 012125 (5 p).
- Rare-earth Atom Motions in $R\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$ ($R = \text{La}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}$): S. Tsutsui, H. Uchiyama, J. P. Sutter, A. Q. R. Baron, H. Sugawara, J. Yamaura, Z. Hiroi, A. Ochiai, and H. Sato, *Journal of Physics: Conference Series* **200** (2010) 012213 (5 p).

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

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

2) 学会講演

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

宮崎亮一, 青木勇二, 菊地大輔, 菅原仁, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト化合物 $\text{Pr}(\text{Os}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sb}_{12}$ の超伝導特性.

菅原仁, 菊地大輔, 佐藤英行, Ilya Sheikin: $\text{SmFe}_4\text{P}_{12}$ の強磁場下 dHvA 効果.

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

渡辺慎, 田中謙弥, 龍岡翔, 齋藤隆志, 宮崎亮一, 武田賢樹, 並木孝洋, 桑原慶太郎, 青木勇二, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト化合物 $\text{GdRu}_4\text{P}_{12}$ の高圧フラックス法による単結晶育成と電子輸送特性.

緑川孝, 大岡要平, 小川裕康, 青木勇二, 佐藤英行: TMR 素子における低周波電圧ノイズ特性.

高木滋, 鈴木博之, 鈴木栄男, 吉川明子, 渡邊功雄, 松崎禎市郎, 青木勇二, 佐藤英行: 立方晶 TmAg_2In の μ SR と低温物性.

筒井智嗣, 李哲虎, 木方邦宏, Alfred Q.R. Baron, 関根ちひろ, 城谷一民, 菅原仁, 菊地大輔, 佐藤英行: $\text{RRu}_4\text{P}_{12}$ ($R = \text{Pr}, \text{Sm}$) の X 線非弾性散乱.

荻田典男, 長谷川巧, 菅原仁, 菊地大輔, 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.

岡村英一, 北村領佑, 宮田和明, 難波孝夫, 松波雅治, 菅原仁, 佐藤英行: $\text{CeRu}_4\text{Sb}_{12}$ の高圧赤外分光と電子状態.

伊藤孝, 髭本亘, 大石一城, 佐藤一彦, 青木勇二, 戸田静香, 菊地大輔, 佐藤英行: μ SR で観た $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$ の低温秩序相の磁性.

並木孝洋, 龍岡翔, 武田賢樹, 佐藤英行, 渡辺慎, 青木勇二, 摂待力生, 大貫惇睦: 遍歴電子強磁性を示す充填スクッテルダイト $\text{LaFe}_4\text{As}_{12}$ のドハース・ファンアルフェン効果.

東中隆二, 田山孝, M. Ramazanoglu, H.A. Dabkowska, 榊原俊郎, B.D. Gaulin, 高木英典: パイロクロア酸化物 $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ における量子スピンアイス状態.

日本物理学会 2009 年秋季大会 2009 年 9 月 25 日～9 月 28 日 (熊本大黒髪キャンパス)

荻田典男, 長谷川巧, 宇田川眞行, 菅原仁, 菊池大輔, 佐藤英行: 希土類充填スクッテルダイトのラマン散乱 IV.

浅木謙治, 藤秀樹, 小手川恒, 龍岡翔, 東中隆二, 佐藤英行, 並木孝洋: 充填スクッテルダイト $\text{LaFe}_4\text{As}_{12}$ の NQR/NMR による研究.

東中隆二, 上田真, 齋藤隆志, 龍岡翔, 田中謙弥, 青木勇二, 佐藤英行: 高圧下で育成した高充填率単結晶 $\text{LaFe}_4\text{Sb}_{12}$ の電子輸送特性.

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

河村直己, 筒井智嗣, 水牧仁一郎, 石松直樹, 圓山裕, 菅原仁, 佐藤英行: X 線磁気円二色性による $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ の Os 5d 電子状態の温度および圧力効果.

渡辺慎, 宮崎亮一, 武田賢樹, 並木孝洋, 桑原慶太郎, 東中隆二, 青木勇二, 佐藤英行: 高圧下で育成した単結晶における重希土類系スクッテルダイト $\text{GdRu}_4\text{P}_{12}$ の低温物性.

與儀護, 二木治雄, 八島光晴, 椋田秀和, 北岡良雄, 菅原仁, 佐藤英行: $\text{CeTx}_4\text{Sb}_{12}$ の Sb-NMR/NQR による研究 III.

根本祐一, 戸谷田貴志, 阿野元貴, 荒木幸治, 赤津光洋, 石井勲, 武田直也, 落合明, 菅原仁, 佐藤英行, 後藤輝孝: 充填スクッテルダイト $(\text{Pr}_{1-x}\text{La}_x)\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$ のラットリングとトンネリング.

東中隆二, 宮崎亮一, 青木勇二, M. Ramazanoglu, H.A. Dabkowska, B.D. Gaulin, 高木英典, 佐藤英行: 量子スピンアイス物質 $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ の極低温磁場中比熱.

伊藤孝, 髭本亘, 大石一城, 西田信彦, 青木勇二, 鬼丸孝博, 鈴木博之: 希土類金属間化合物における格子間水素周辺の f 電子状態.

国内研究会

第 27 回 SRC 技術報告会 2009 年 5 月 27 日 (東京)

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

新学術領域「重い電子系の形成と秩序化」第 2 回研究会 (広島大学 東広島キャンパス、2009 年 8 月 19 日)

Y. Aoki, T. Namiki, S.R. Saha, H. Sugawara, H. Sato: Small Energy Splitting of the Pr Triplet Crystalline-Electric-Field Ground State in $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$

R. Higashinaka, M. Watanabe, M. Ueda, T. Saito, S. Tatsuoka, K. Tanaka, Y. Aoki and H. Sato: Transport properties of $\text{LaFe}_4\text{Sb}_{12}$ single crystal with high filling factor grown under high-pressure

T. Namiki, M. Watanabe, K. Takeda, Y. Ogawa, Y. Aoki, H. Sato and K. Ooiwa: Physical properties of filled skutterudite $\text{SmFe}_4\text{As}_{12}$ single crystal grown by flux method under the high pressure

Y. Ogawa, S. Tatsuoka, K. Takeda, M. Watanabe T. Namiki, R. Higashinaka, Y. Aoki and H. Sato: Single crystal growth and physical properties in the filled skutterudite $\text{CeFe}_4\text{As}_{12}$

S. Tsutsui, H. Uchiyama, J. P. Sutter, A. Q. R. Baron, H. Sugawara, D. Kikuchi, J. Yamaura, A. Ochiai, H. Sato: Inelastic X-ray Scattering of $\text{ROs}_4\text{Sb}_{12}$

K.Asaki, H.Kotegawa, H.Tou, S.Tatsuoka, R.Higashinaka, H.Sato, T.Namiki: NMR/NQR studies of filled skutterudite $\text{LaFe}_4\text{As}_{12}$

H. Tou, Y. Inaoka, M. Sera, K. Asaki, H. Kotegawa, H. Sugawara and H. Sato: NMR study of $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$

M. Yogi, H. Niki, H. Mukuda, Y. Kitaoka, H. Sugawara and H. Sato: ^{121}Sb -NMR Study in $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$: Knight shift measurement

H. Kotegawa, K. Asaki, H. Tou, T.C Kobayashi, H. Sugawara and H. Sato: NMR/NQR Study on $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$

第 28 回 SRC 技術報告会 2009 年 11 月 18 日 (東京)

T. Midrikawa, Y. Aoki, M. Ishii, Y. Takeuchi, H. Sato: Noise and transport properties of TMR read heads

第 3 回物性科学領域横断研究会「凝縮系科学の最前線」(東京大学 武田ホール、2009 年 11 月 30 日)

東中隆二, 宮崎亮一, 青木勇二, M. Ramazanoglu, H.A. Dabkowska, B.D. Gaulin, 高木英典, 佐藤英行: 量子スピナイス物質 $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ の極低温磁場中比熱

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超伝導体 $\text{Pr}(\text{Os}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sb}_{12}$ の超伝導特性

渡辺慎, 宮崎亮一, 武田賢樹, 畠山和也, 並木孝洋, 東中隆二, 青木勇二, 佐藤英行: 高圧下で育成した単結晶における重希土類系スクッテルダイト $\text{GdRu}_4\text{P}_{12}$ の低温物性

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: 高圧合成法による充填スクッテルダイト化合物 $\text{SmFe}_4\text{As}_{12}$ の単結晶育成と電子物性

国際会議

Joint European Japanese Conference: Frustration in Condensed Matter, Ecole Normale Superieure, Lyon, France, May 12 – 15, 2005

R. Higashinaka, R. Miyazaki, T. Tayama, M. Ramazanoglu, H.A. Dabkowska, Y. Aoki, T. Sakakibara, B.D. Gaulin, H. Takagi and H. Sato: Investigation of Quantum Spin Ice State in $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$

The International Conference on Magnetism (ICM) 2009, July 26–August 1, 2009, Karlsruhe, Germany

Y. Aoki, T. Namiki, S.R. Saha, H. Sugawara, H. Sato: Small Energy Splitting of the Pr Triplet Crystalline-Electric-Field Ground State in $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$

K. Kuwahara, K. Tanaka, T. Saito, S. Tatsuoka, K. Iwasa, M. Watanabe, Y. Aoki, H. Sato, M. Kohgi, K. Iwasa, H. Sugawara, C. Stock and D. T. Adroja: Crystal field excitations in $\text{PrFe}_4\text{Sb}_{12}$ synthesized under high pressure

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 $\text{Pr}(\text{Os}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sb}_{12}$

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 $\text{GdRu}_4\text{P}_{12}$

9th International conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity M2S-IX, September 7–12, 2009, Tokyo, Japan

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 $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ (invited talk)

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 $\text{Pr}_x\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$

International symposium on physics of new quantum phases in superclean materials, March 9–12, 2010, Yokohama, Japan

Y. Aoki, A. Imamura, R. Miyazaki, T. Saito, I. Umegaki, R. Higashinaka, Y. Tunashima, H. Sato, T. Fukuhara, H. Sugawara, D. E. MacLaughlin, L. Shu, W. Higemoto, K. Ohishi, R. H. Heffner, A. Koda, R. Kadono, and A.D. Hillier: Pr site imperfection effect and doping effect on the spontaneous internal fields in the heavy fermion superconductor $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$

R. Miyazaki, Y. Aoki, R. Higashinaka, H. Sugawara and H. Sato: Specific heat measurement of the filled skutterudite compounds $\text{Pr}(\text{Os}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sb}_{12}$

3) 著書等

Magnetic Properties of Filled Skutterudites: H. Sato, H. Sugawara, Y. Aoki and H. Harima, In Handbook of Magnetic Materials vol. 18, pp.1-110, ed. by K. H. J. Buschow (Elsevier, North-Holland, 2009).

ナノ物性サブグループ

1. 研究活動の概要

カーボンナノチューブ(CNT)、ゼオライト、フラーレン、ボロンクラスターなどのナノメートルサイズの構造を有する物質系は、従来のバルク物質では見られない興味深い性質を示すと期待される。本グループでは、このようなナノ構造物質系において、新規物性の探索と開発、およびその発現機構を物性実験の種々の手法 - 核磁気共鳴(NMR)、X線回折、磁化測定、比熱、広帯域インピーダンス測定、計算機実験、光学実験など - を用いて研究している。2009年度(平成21年度)は、産総研より柳を迎え、協力して教育・研究およびグループ運営を行った。主な研究・教育活動の概要は次のとおりである。

1) 単層カーボンナノチューブ(SWCNT)内の水

1 cm³の水も1 mm³の水もその性質はほとんど変わらない。さらにその10分の1、100分の1の体積の水でも、バルクの性質から僅かしか変化しない。しかし、水分子数個分程度の長さ - 1ナノメートル(nm)程度 - まで極端に小さくしたらどうなるだろうか。このような空間内に強く束縛された水は、実際、生体内や地殻などに多数存在して、その性質や機能の発現に重要であると考えられる。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の応用科学の観点からも重要である。

本研究グループでは、単層カーボンナノチューブ(SWCNT)内に水を入れて、その性質を調べている。SWCNTは、原子レベルで均一な、サブナノメートルから数ナノメートル径の疎水的な円筒空洞を有するため、円筒空洞内に束縛された水の挙動を系統的に調べる理想的な物質である。これまでの研究から、平均直径1.17~1.44 nmのSWCNT内に、水は室温・飽和蒸気圧以下で容易に吸着されること、この水は低温でアイスナノチューブと呼ばれるチューブ状の新しい構造の氷になること、このアイスナノチューブの融点の空洞径依存性は、よく知られたバルク領域における融点の空洞径依存性(ケルビン式の変形で記述される)と逆の振る舞いを示すこと、などが明らかにされている。すなわち、バルク領域と極端に小さな空間内とで、水の性質が不連続的に変化するのである。(バルクとミクロのクロスオーバー)本年度は、このクロスオーバー領域での水の相挙動を明らかにする目的で、分子動力学計算と放射光X線回折実験による研究を行った。分子動力学計算の結果から、SWCNTの有限長効果が明らかになり、クロスオーバー領域のSWCNTでは、内包分子数により、質的に異なる構造の発現が明らかになった。また、柳らにより開発された、金属型CNTを高濃度にエンリッチした高純度試料を用いた水の吸着実験を開始した。(八尋修士論文)

2) 新しい酸素固体と磁性の研究

酸素はスピン1の磁性分子である。したがって、SWCNT内部に酸素を吸着させてバルクにない酸素配列を実現させ新規磁性体を作製できると期待される。本年度は、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、論文発表を行った(図1)。特に、細いCNT内部の酸素は反強磁性の量子1次元鎖となりうることを指摘し、実際、酸素を内包したCNTの磁性についての予備実験を開始した。(花見修士論文)今後、酸素ナノチューブの実験的検証とその磁性の解明が最重要課題である。

3) ナノ構造物質の核磁気共鳴(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による研究を行った。C12A7は、無機エレクトライドの導電体(超伝導体)であることが提案されているが、本研究により微視的な視点からその電子状態を検証した。ボロンクラ

スター固体では、理論的に Li や Mg をドーブすることによる高温超伝導の発現が期待されている。本年度は、Li や Mg をドーブした 菱面体ボロンの NMR 実験を行い、ボロンクラスター固体の金属化・超伝導化を妨げる要因に注目して局所電子状態を議論した。(神谷修士論文) SWCNT の研究では、高純度金属型 SWCNT の炭素 13 核の NMR 測定に初めて成功した。金属型 SWCNT においても、未分離試料と同様に、スピン格子緩和時間に異常がみられ、1次元の朝永 ラッティンジャー状態から3次元電子状態へのクロスオーバー現象を含む様々な可能性を議論した。また、SWCNT の空洞内や錯体結晶中の水の構造・相挙動を明らかにする 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が期待できる。

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た。

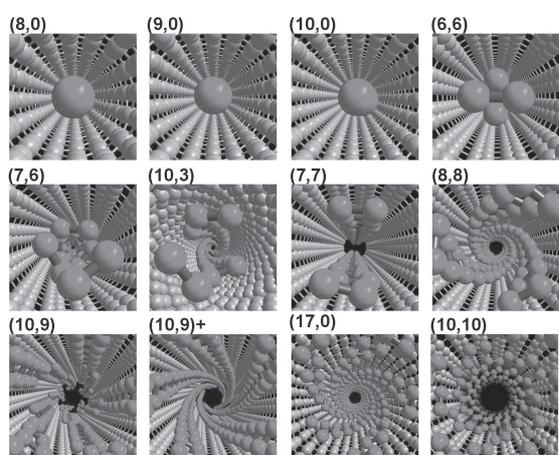


図 1: 様々な直径をもつ SWCNT 内部の酸素分子の低温凝縮構造。細い CNT 内部の酸素は、最近接分子間に反強磁性相互作用をもつ 1次元鎖となる。太い CNT では、多重螺旋の酸素ナノチューブとなる。

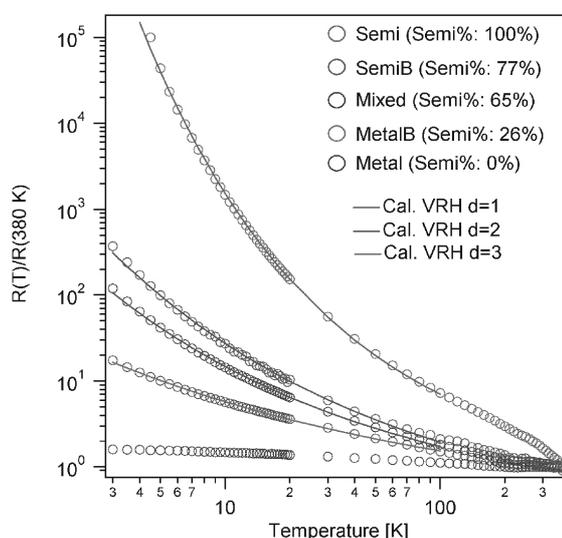


図 2: 様々な金属型・半導体型配合比の SWCNT ネットワークにおける電気伝導特性。

5) 金属型・半導体型 SWCNT ネットワークにおける電気伝導特性

SWCNT はその優れた電子特性から、透明導電膜や電界効果型トランジスタなどへの応用が期待されている。プリンタブルデバイスへの応用には、SWCNT がランダムに配列しネットワークを形成した状況において、良好な特性を発揮することが求められている。ランダムネットワーク系における電子輸送特性の背景は、従来は金属型・半導体型が混在していた為、詳細には分かっていなかった。今年度は、系統的に金属型・半導体型の配合比 (MS 比) を変えた SWCNT 紙状試料 (パッキーペーパー) を作成し、MS 比がどのように電子輸送特性に影響を及ぼすのかを明らかにした。高純度金属型 SWCNT においては、弱局在に由来する量子輸送が巨視的なネットワークにおいて観測された。一方、高純度半導体型 SWCNT においては、クーロン相互作用によってフェルミ面においてギャップが存在する局在電子由来の電子伝導機構であることが分かった。また、MS 比を系統的に変えていくことにより可変領域ホッピング伝導の次元が変わることも明らかにした。高純度金属型 SWCNT においては、SWCNT 間・バンドル間のコンタクトにおける障壁は、弱い disorder として働いており、電子は非局在していることを明らかにした。

6) SWCNT の色制御技術の開発

SWCNT を高純度精製を行うと、カイラリティに依存して鮮やかな色を形成する。本研究では、その

色の能動的な制御を目標に研究を行った。色が生じる背景としては、可視光領域のエネルギーに相当するバンド間遷移(エキシトン効果も含むがここでは省略する)に由来する。フェルミ面より上の伝導帯のバンドを電気化学ドーピングの手法を用いて、電子を埋めることにより、光吸収を抑制することを行った。今年度は、電気化学ドーピングと分光測定を組み合わせた系を構築し、青色を生じる直径 1.4nm の金属型 SWCNT 薄膜に対して、電気ドーピングを行い、吸収構造の変化・色の変化を明らかにした。半導体型 SWCNT 薄膜に対しても同様な測定を行い、印加するポテンシャルと吸収構造の変化を明らかにした。

7) SWCNT の高純度分離技術の開発

SWCNT は合成時においては、様々なカイラリティのものが混在する。SWCNT の高純度分離技術の開発の一環として、今年度は、SWCNT の新しい直径分離法を開発を行った。従来の密度勾配遠心分離法では iodixanol という密度勾配剤を使用していたが、この度は迅速・廉価分離を達成する為、セシウムクロライドという塩を密度勾配剤として用いて分離を行った。アーク放電法によって作成した直径 1.4nm 程の SWCNT に対して、直径分離を行った。光吸収スペクトルの構造から、平均直径の有意な差が見られ、同手法を用いて直径分離が可能であることを明らかにした。

8) 学外共同利用施設による研究、その他

高エネルギー加速器研究機構 (KEK PF) において放射光実験を行った。課題名 (課題番号): 第二世代カーボンナノチューブの構造研究 (2008G585)。

2. 研究業績

1) 論文

K. Matsuda, Y. Konaka, Y. Maniwa, S. Matsuishi, and H. Hosono: Electronic state and cage distortion in the room-temperature stable electride $[\text{Ca}_{24}\text{Al}_{28}\text{O}_{64}]^{4+}(\text{O}^{2-})_{2-x}(\text{e}^-)_{2x}$ as probed by ^{27}Al NMR, *Phys. Rev. B* **80** (2009) 245103-1–245103-5

K. Hanami, T. Umesaki, K. Matsuda, Y. Okabe, Y. Maniwa, Y. Miyata, H. Kataura: One-Dimensional Oxygen and Helical Oxygen Nanotubes inside Carbon Nanotubes, *J. Phys. Soc. Jpn.* **79** (2010) 023601-1 – 023601-4

R. Mitsunashi, Y. Suzuki, Y. Yamanari, H. Mitamura, T. Kambe, N. Ikeda, H. Okamoto, A. Fujiwara, M. Yamaji, N. Kawasaki, Y. Maniwa, Y. Kubozono: Superconductivity in alkali-metal-doped picene, *Nature* **464** (2010) 76–79

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) 016803–016806

K. Yanagi, Z. Liu, K. Suenaga, S. Okada, H. Kataura: Influence of Aromatic environment on physical properties of beta-Carotene, *J. Phys. Chem. C* **112** (2010) 2524–2530

S. Tao, Y. Miyata, K. Yanagi, H. Kataura, H. Okamoto: Subpicosecond coherent nonlinear optical response of isolated single-walled carbon nanotubes, *Phys. Rev. B* **80** (2009) 201405(R)–201408

P. Ayala, Y. Miyata, K. De Blauwe, H. Shiozawa, Y. Feng, K. Yanagi, C. Kramberger, S. Silva, R. Follath, H. Kataura, T. Pichler: Disentanglement of the electronic properties of metallicity-selected single-walled carbon nanotubes, *Phys. Rev. B* **80** (2009) 205427–205431

J. Arvanitidis, D. Christofilos, S. Souliou, K. Yanagi, H. Kataura, G. Kourouklis, S. Ves. S.: High pressure Raman study of carotene-encapsulating single-wall carbon nanotubes, *Phys. Stat. Sol. B* **246** (2009) 496–499

M. Fujiwara, K. Yamauchi, M. Sugisaki, K. Yanagi, A. Gall, B. Robert, R. Cogdell, H. Hashimoto: Third-order optical nonlinearity of beta-carotene homologues, *Phys. Stat. Sol. C* **6** (2009) S31–S33

H. Okimoto, T. Takenobu, K. Yanagi, Y. Miyata, H. Kataura, T. Asano, Y. Iwasa: Ink-jet printing of a single-walled carbon nanotube thin film transistor, *Jpn. J. Appl. Phys.* **48** (2009) 06FF03–06FF06

Y. Naitoh, K. Yanagi, H. Suga, M. Horikawa, T. Tanaka, H. Kataura, T. Shimizu: Non-volatile Resistance Switching using Single-Wall Carbon Nanotube Encapsulating Fullerene Molecule, *Appl. Phys. Express* **2** (2009) 035008–035010

K. Yanagi, Y. Miyata, T. Tanaka, S. Fujii, D. Nishide, H. Kataura: Colors of Carbon Nanotubes, *Diamond and Related Materials* **18** (2009) 935–939

D. Nishide, Y. Miyata, K. Yanagi, T. Tanaka, H. Kataura: Effective Separation of Carbon Nanotubes and Metal Particles from Pristine Raw Soot by Ultracentrifugation, *Jpn. J. Appl. Phys.* **48** (2009) 70150034–0150037

2) 国際会議報告

M. Ichida, S. Saito, Y. Feng, Y. Miyata, K. Yanagi, H. Kataura, H. Ando: Terahertz absorption spectra of high purity metallic and semiconducting single-walled carbon nanotube thinfilms, *IRMMW-THz 2009* (2009) 5324722

3) 学会講演

日本物理学会 64 回年次大会 2009 年 3 月 27 日～3 月 30 日 (立教大学)

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

三上史記, 松田和之, 真庭豊: カーボンナノチューブ (CNT) 内包水の誘電特性

三橋了爾, 久保園芳博, 神戸高志, 池田直, 太田洋平, 山成悠介, 鈴木雄太, 藤原明比古, 真庭豊: アルカリドーブ芳香族多環縮合炭化水素化合物の超伝導

原田啓太郎, 花見圭一, 松田和之, 真庭豊, 手島正吾, 中村壽: 単層カーボンナノチューブに内包された酸素の第一原理電子状態計算

宮田耕充, 柳和宏, 真庭豊, 片浦弘道: 単一カイラリティを濃縮したカーボンナノチューブの X 線回折

神谷謙光, 松田和之, 真庭豊, 兵藤宏, 木村薫: Li ドーブ β 菱面体晶ボロンの核磁気共鳴

日本物理学会秋季大会 2009 年 9 月 25 日～9 月 28 日 (熊本大学)

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: 金属型単層カーボンナノチューブの¹³C-NMR

花見圭一, 土居直弘, 梅崎智之, 松田和之, 柳和宏, 門脇広明, 真庭豊, 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物性

八尋瞳, 客野遥, 福岡智子, 松田和之, 真庭豊, 片浦弘道, 斎藤毅, 大嶋哲, 湯村守雄, 飯島澄男: 太い単層カーボンナノチューブに内包された水分子の相転移

神谷謙光, 松田和之, 真庭豊, 兵藤宏, 金泓基, 木村薫: Li, Mg, V ドープ β 菱面体晶ボロンの核磁気共鳴

宮尾智章, 奥村修一, 中山裕二, 藤木伸一郎, 石井廣義, 宮原恒, 真庭豊, 兒玉健, 阿知波洋次, 塩澤秀次, 仲武昌史, 片浦弘道, 齋藤智彦: フラレンピーポッドの正・逆光電子分光.

第 37 回フラレン・ナノチューブ総合シンポジウム 2009 年 9 月 1 日~9 月 3 日 (つくば国際会議場)

鵜戸口浩樹, 鷺谷智, 松田和之, 大島勇吾, 片浦弘道, 竹延大志, 柳和宏, 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伝導特性

松田和之, 八尋瞳, 客野遥, 福岡智子, 柳和宏, 真庭豊, 斎藤毅, 大嶋哲, 湯村守雄, 飯島澄男, 宮田耕充, 片浦弘道: 太い SWCNT 内の水の相転移

第 38 回フラレン・ナノチューブ総合シンポジウム 2010 年 3 月 2 日~3 月 4 日 (名城大学)

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

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

国内研究会

第 8 回産学官連携推進会議 2009 年 6 月 20 日~6 月 21 日 (京都国際会議場)

柳和宏: 金属型単層カーボンナノチューブ (BluMetal) の製品化

国際会議

1st International Symposium on Emergence of Highly Elaborated pi-space and its function, Japan, August 18-19, 2009

K. Yanagi, H. Udoguchi, S. Sagitani, R. Moriya, Y. Oshima, H. Kataura, T. Takenobu, K. Matsuda, Y. Maniwa: Tuning of Electronic States of Metallic and Semiconducting Single Wall Carbon Nanotubes

The 6th Korea-Japan symposium on carbon nanotube, Okinawa, Japan, August 26 - September 5, 2009

K. Yanagi, H. Udoguchi, S. Sagitani, Y. Oshima, H. Kataura, T. Takenobu, K. Matsuda, Y. Maniwa:
Electronic transport properties in metallic and semiconducting single wall carbon nanotube bucky-
paper

2009 AIChE Annual Meeting, Nashville, USA, November 8-13, 2009

Y. Maniwa: Ferroelectric Water Inside Single-Walled Carbon Nanotubes

4) その他

松田和之、真庭豊、日刊工業新聞 6月8日

粒子ビーム物性サブグループ

1. 研究活動の概要

フラストレートした磁性体、量子相転移、カーボンナノチューブの3テーマについて研究している。本年度前半は、サバティカル制度を利用し研究活動に専念させてもらい、同時に東京大学物性研究所において客員准教授をさせて頂きました。この機会を利用して、今後の研究に役立つであろうハードウェアの整備を行うと共に、あまり得意としてはいなかった低温磁化、低温比熱の測定等も経験させてもらいました。また昨年度実験を行った、「スピンアイスにおける磁気モノポール」の研究を論文にして発表すると共に、その宣伝活動を行った。

1) 幾何学的フラストレーションを示す磁性体の研究

氷 (H_2O) の酸素原子は結晶格子の上に規則正しく整列している。他方、氷の水素原子は、ふたつの酸素原子を結ぶ線分上にはあるものの、どちらの酸素の近くに位置するかということに関して、局所的に H_2O 分子を構成するというアイスルースが成立する以外は、ランダムな配置をとっている。これは、最も古くから知られるフラストレーションの一例であり、氷は低温でゼロ点エントロピーを持つ物質としても良く知られている。スピンアイス $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ は、氷における水素原子の役割を Dy^{3+} のスピンの担う系である。水素原子の位置を、スピンの向きに読み替えると、完全に同一のフラストレーションが起こるため、スピンアイスと言われている。実際スピンアイスでは、ゼロ点エントロピーを比熱で測定可能ということが約10年前に示され、興味深い実験事実として受け止められた。しかし2008年、もっと驚くべきことに、スピンアイスにおける励起状態は、磁気モノポール-反磁気モノポールの対生成現象と非常によく似ている特徴を持つことが理論的に予測された。我々は、このスピンアイスの中の磁気モノポール類似の準粒子を観測する目的で、中性子散乱実験と比熱測定を行い、磁気モノポールの理論的解釈を肯定する結果を得たので、本年度は論文にまとめると共に宣伝に努めた。アメリカ国立標準技術研究所 (NIST) と東大物性研中性子散乱研究施設の研究ハイライト、および Nature News 等に取り上げられた。

http://www.nist.gov/public_affairs/techbeat/tb2009_1006.htm#monopole

http://neutrons.issp.u-tokyo.ac.jp/modules/scientific_highlight/index.php?page=article&storyid=2

<http://www.nature.com/news/2009/090903/full/news.2009.881.html>

<http://www.opfocus.org/index.php?topic=story&v=7&s=3>

<http://www.2physics.com/2009/11/observation-of-magnetic-monopoles-in.html>

また、この磁気モノポールの研究を発展させるべく実験を継続している。

スピンアイス $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ に、[111] 方向の磁場をかけて、それを少しだけ傾けるとカステレイン転移が起こり得る。カステレイン転移は、理論的には知られていたが、磁性体においてはほとんど研究されることがない相転移である。これはトポロジカルな性質を持つ、1次と2次相転移の中間型の性質を持つなど非常に興味深い転移である。すでに行ったモンテカルロシミュレーションは、肯定的な結果を示しているため、磁化測定を行って実験データを出そうとしている。磁場に平行な磁化と、垂直成分の磁化を同時に測定する(このような実験は普通は行わない)技術に未だ問題があり、研究継続中である。またこの実験に用いる $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ の大型単結晶を作成するため、FZ炉を整備し、単結晶作成を試みた。モザイクネスの制御を改良する必要があるが、単結晶の作成が可能となる所まで到達した。

2) 遍歴電子反強磁性体の量子臨界現象

遍歴電子系における反強磁性磁気秩序相と常磁性フェルミ液体相の間の量子相転移の理論的研究は、1970年代にその原型が作られた。しかしこの量子相転移の実験的研究が、多くの研究者の興味の対象となり、

同時に理論的な研究も進んだのは、1990年以降である。重い電子系や高温超伝導関連の酸化物等の強相関係において共通に観測される非フェルミ液体の振舞を、量子臨界現象として理解する考え方が提示された。その後、多くの研究がなされたが、この問題は未だ定説化されず hot topic として残されている。

量子相転移としては、弱相関の極限で正しいと考えられている SDW QPT と、強相関の極限から出発する locally critical QPT のどちらかであろうという説が有力視され、現在も様々に議論されている。我々が近年行なった f-電子系 $\text{Ce}(\text{Ru}_{1-x}\text{Rh}_x)_2\text{Si}_2$ および d-電子系 $(\text{V}_{1-x}\text{Ti}_x)_2\text{O}_3$ の中性子散乱実験は、SDW QPT を支持するかなり強力な証拠になっていると考えている [H. Kadowaki et al., Phys. Rev. Lett. 96, 016401 (2006); ibid. 101, 096406 (2008)]。しかし、公平に見ると、2例の実験から普遍性を結論するのは無理がある。本年度は、 $\text{Ce}(\text{Ni}_{1-x}\text{Pd}_x)_2\text{Ge}_2$ と磁場 tuning により QCP を持つ $\text{Ce}(\text{Ru}_{1-x}\text{Rh}_x)_2\text{Si}_2$ の比熱測定を行った。磁場中比熱測定に問題点があり、研究を継続中である。

3) カーボンナノチューブ

カーボンナノチューブ+X、X=He, O₂, CH₄ 等の Xray 回折実験が T= 1.5K まで可能になるように、クライオスタット&サンプル周りの整備を行った。

2. 研究業績

1) 論文

H. Kadowaki, N. Doi, Y. Aoki, Y. Tabata, T. J. Sato, J. W. Lynn, K. Matsuhira, Z. Hiroi: Observation of Magnetic Monopoles in Spin Ice, *J. Phys. Soc. Jpn.* **78** (2009) 103706-(1-4).

2) 学会講演

日本物理学会 第64回年次大会 2009年3月27-30日(立教大学、立教池袋中学校・高等学校)

土居直弘, 門脇弘明, 室裕司, 元屋清一郎, 森永礼, 佐藤卓, 松平和之, 廣井善二: スピンアイス $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ における3次元カステレイン転移

門脇弘明, 田畑吉計, B. Fak, S. Raymond, A. Hiess, 阿曾尚文, 佐藤卓, 福原忠, 前沢邦彦: 重い電子系 $\text{Ce}(\text{Ni}_{1-x}\text{Pd}_x)_2\text{Ge}_2$ における量子相転移

日本物理学会 2009年秋季大会 2009年9月25-28日(熊本大学)

花見圭一, 土居直弘, 梅崎智之, 松田和之, 柳和宏, 門脇弘明, 真庭豊, 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物性

国内研究会

東京大学物性研究所談話会、2009年4月16日

門脇弘明: 重い電子系と d-電子遍歴磁性体における量子相転移: 中性子散乱による研究 (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: 成果報告会、京都大学基礎物理学研究所、2010年1月7-9日

門脇弘明: スピンアイスにおける磁気モノポールの観測 (口頭)

国際会議

International Conference on Neutron Scattering 2009, Knoxville, Tennessee, USA, May 3–7, 2009

H. Kadowaki, N. Doi, Y. Aoki, Y. Tabata, T. J. Sato, J. W. Lynn, K. Matsuhira, Z. Hiroi: Observation of Magnetic Monopoles in Spin Ice, Invited presentation.

ESR 物性サブグループ

1. 研究活動の概要

電子スピン共鳴 (ESR) 法を中心手段にして興味ある物質について研究を進めている。ESR というと、通常は市販の X-バンド (10 GHz) や Q-バンド (36 GHz) ESR スペクトロメーターが使われることが多い。これらの装置は感度が高く有用であるが、本研究室では 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。

この様に広範な周波数にわたる ESR の研究を実施できるグループは世界的に見ても例は多くない。本研究手段の特徴を幾つかあげてみよう。一つは、低次元電子系であれば、たとえ多結晶試料であってもスピンの微視的なダイナミクスの異方性を定量的に見積れる点。また、SQUID 磁束計は常磁性磁化 + 反磁性磁化の合計しか測定できないが、同一試料内の核スピンと電子スピンの磁気共鳴を同一周波数で観測すれば、反磁性に影響されない電子スピン磁化率のみを測定できる。更に、静水圧下或いは一軸変位下での ESR 実験も可能で、任意の軸のみ、或いは一様に格子定数を変えて、電子間、或いは電子-格子間の相互作用を変調し、物性発現に寄与する相互作用を調べることができる。物構研の松本先生のご協力により、CrNiAl 材を内筒に用いた高压用セルを用いると 3 GPa までかけることができるが、産総研との共同研究により、均一で更に高い圧力が発生できる cubic anvil セルを用いた 10 GPa までの高压下 ESR を開発している。

以下に今年度行われた研究の概要を整理する。

1) DNA

我々生物の遺伝情報をつかさどるデオキシリボ核酸 (DNA) は、燐酸、糖に加えて 4 種のアミノ基、グアニン (G)、シトシン (C)、アデニン (A)、チミン (T) の組合せによって構成される有機高分子であり、G-C と A-T の組み合わせにより 2 本の DNA が 2 重螺旋構造を構成する。これらのアミノ基の配列は任意に設計して合成できるフレキシビリティと、高い自己組織化能を示すことから任意の形状のナノサイズ構造物を DNA の 2 重螺旋で構成出来ることも報告されている。

一方で、人類の DNA の長さは 1 m にも及ぶことが知られているが、放射線照射により作られた欠陥からかなり離れた部分に遺伝情報の異常が発生したりする事から、ソリトン伝導など、何らかの高速な情報伝達機構があるのではないかと、その本質には未だ計り知れない神秘性が残されている。本研究グループでは、この未知の物質について報告される新規な現象を物性物理の立場からチェックしていくこと、これまでの研究から半導体であることが確認されてきた天然の DNA に電荷担体を導入し、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。

過剰の 2 価の金属イオン水溶液中においては、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 価金属イオンが挿入されることから、種々の 2 価金属イオンとの化合物を作成し、その物性を調べて来た。図 1 にその 1 例として Mn-DNA と Fe-DNA の Q-band (35 GHz) ESR スペクトルの比較を示す。どちらの場合も自由電子の $g=2$ に相当する共鳴磁場 (約 12,000 G) に信号が観測されているが、試料作成時に用いた 2 価金属のままであれば、 Fe^{2+} は $S=2$ (high spin 状態) 或は $S=0$ (low spin 状態) になり、 $S=2$ の場合でも生き残った軌道角運動量のために $g=2$ に信号を与えることは期待できない。すなわち、図 1 の結果は、 Fe^{2+} は DNA 中では Fe^{3+} になって軌道角運動量が消失していることの明確な証拠といえる。これに対応して、Fe-DNA 膜の色は 3 価の鉄イオン特有のカーキ色をしている。Fe-DNA の 2 K における磁化曲線を図 2 に示すが、それを再現するには Fe^{3+} に特徴的

な $S=5/2$ のブリルアン関数が必要になると同時に、low spin 状態に対応する $S=1/2$ の存在も不可欠であることを示している。これらのスピン数の比、1対3は良く再現する。一方、Fe を Ca に置換していくと比率が系統的に変化し、Fe が希薄な領域では殆どスピンが $S=5/2$ に変わる。その原因はまだ明らかになっていないが、酸素の存在が影響していることが分かって来た。現在、詳細に調べ始めた所である。(分子研との共同研究)

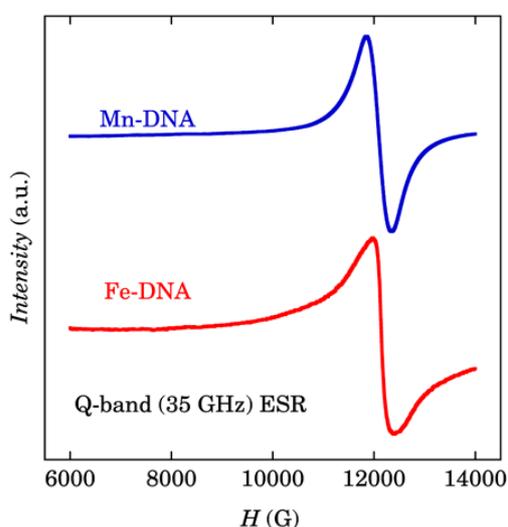


図 1: Mn-DNA と Fe-DNA の Q-band (35 GHz) ESR 信号の比較: どちらの信号も、ほぼ自由電子の g -値の 2.0 に近く、 FeCl_2 の 2 価の Fe が、DNA に取り込まれると 3 価の Fe^{3+} になることが確認される。

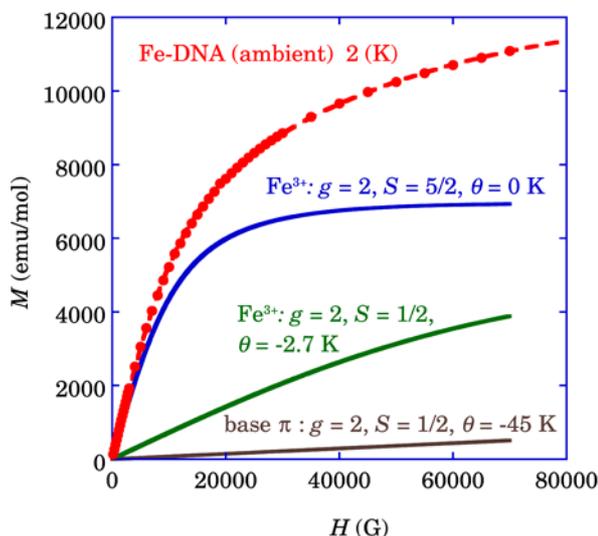


図 2: 空气中で合成した Fe-DNA の 2 K における磁化曲線 (丸印)。この磁化曲線を再現 (破線) するには、最低限、 Fe^{3+} に期待される $S=5/2$ と $S=1/2$ の両成分が必要。雰囲気中の酸素の有無で $S=5/2, 1/2$ の割合が変化する。

2) $(\text{BEDT-TTF})_2\text{ICl}_2$

有機電荷移動錯体 $(\text{BEDT-TTF})_2\text{ICl}_2$ は常圧、22K で反強磁性転移を起こす Mott 絶縁体であるが、8.2GPa 以上の圧力下で有機導体として最高の転移温度 14.2K で超伝導転移を示すことから注目されている。常圧での電子状態がどのように金属的状态に変化するかを圧力下 ESR を用いて調べている。高圧 (3GPa ~ 10GPa) での測定のために、キュービックアンビルセルを利用した ESR 装置の開発を進めている。外形 2.5 mm のテフロンカプセル内に、粉末試料を約 1.3 mg 入れた直径約 1mm のコイルをセットし、数百 MHz にて、数十秒間の積算によりきれいな吸収信号が得られた。圧力下において試料のスピン磁化率を較正するために、既知の磁性を持つ DPPH (diphenyl-picryl-hydrazyl) を試料コイルに埋め込むことに成功し、常温下で約 7GPa まで加えてみた。しかし、新たな問題点として、タングステンカーバイド製アンビルのバインダーに由来する強磁性的な振る舞いが重畳することが確認された。現在、アンビルの材質の変更や、金属板による高周波の遮蔽の効果等を検証中である。約 5GPa 程度までであれば測定は可能であり、温度依存性の測定準備も進めている。(埼玉大、産総研との共同研究)

3) $\beta^2\text{-(DMe-DCNQI)}_2\text{M}$ & $\beta^2\text{-(DI-DCNQI)}_2\text{M}$

有機電荷移動錯体の 1 種である $\beta^2\text{-(DMe-DCNQI)}_2\text{M}$ は、平面構造を持つ DMe-DCNQI 分子がほぼ並行にスタックして高い 1 次元性を持つ π -バンドを構成している。4 つの分子が、金属原子 M を介して結合しており、金属の種類によりその異方性が制御できる。M= Li^+ の場合は、完全なイオン結合であり、Li イオンを介した分子間の電子ホッピングは非常に遅い。一方、M= Cu の場合には、3d-軌道を介した方向性を持つ結合による混成が強く、3 次元的なバンドが形成されている。ところが、M= Ag の場合には 4d バンドが安定で E_F より深いため、 Li^+ の場合に近い物性を示す。ところが、我々の水素原子核の固体高分解能 NMR の結果によると、DMe-Ag 塩では、DMe-DCNQI 分子上のスピン磁化率が DMe-Li

塩より2割程度小さいことが確認されている。その原因を探るために Ag-NMR の測定を物材機構の協力を得て、常温における固体高分解能 NMR 装置により進めた。しかし、残念ながら、高分解能 NMR で観測に掛かる線幅の狭い信号は見出せなかった。このことは、Ag イオンの 3 d 軌道を介してホッピングする電子との相互作用によって NMR の緩和時間が短くなり、線幅の増大をきたしている可能性を示唆している。次の手段として、広幅用の NMR 装置による低温の測定を検討している。(中大、北大、学習院大、理研、分子研、物材機構との共同研究)

4) 有機強磁性体 TDAE-C₆₀

フラーレン分子 C₆₀ と電子供与体の TDAE (tetra-kis-dimethylaminoethylene) との電荷移動錯体である TDAE-C₆₀ は純粋に有機元素のみからなり、転移温度 16K の強磁性体として注目を浴びた。その強磁性発現機構にヤーンテラー効果で歪んだ C₆₀⁻ イオンの協力的な軌道秩序状態が関わっていることをこれまで示して来た。仮にこれが強磁性発現機構であるとする、どのような構造が実現されているのかを調べるために、一軸変位の実験を進めて来た。C₆₀ 分子はヤーンテラー歪みにより球形からラグビーボール状に伸びた回転楕円体になっており、伸びた軸が互いに直交することにより隣接 C₆₀ 上の電子スピン間に強磁性的な相互作用が働く。この条件を満たす C₆₀ 分子のヤーンテラー軸の配向には2つの方法が可能だが、一軸変位下の実験から、C₆₀ 分子の一次元鎖を構成する c-軸方向にアルファベットの「T」字上に配向していることが結論された。(Josef Stefan Inst、産総研との共同研究)

5) 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)₂I₃ 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 3 nm のぼんやりとした像が得られることが多い。しかし、その内の限られた本数の DNA は、HOPG のステップ構造に引っ掛かったような構造で、且つ途中から2つに分かれたような構造も見つかる。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子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、5eV 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 によって観測されたと考えられる。2価の金属イオンを導入した M-DNA においても金属イオンを囲むような構造の像が得られており、今後更に解析を進めていく。

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)₂I₃ 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衡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。現在、BEDT-TTF 分子の両端近くの硫黄原子の 3p 軌道を見ていると仮定して解析を進めている。(京都大学との共同研究)

2. 研究業績

1) 論文

H. Matsui, N. Toyota, M. Nagatori, H. Sakamoto, and K. Mizoguchi Infrared spectroscopic studies on incorporating the effect of metallic ions into a M-DNA double helix *Phys. Rev. B* **79**, (2009) 235201(1-8)

2) 学会講演

日本物理学会 第64回年次大会 2009年3月27日－3月30日(立教大学)

荒木理美, 溝口憲治, 坂本浩一, 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 II (27aYG-7)

林泰之, 坂本浩一, 溝口憲治, 寺倉史晃, 風間重雄, 森田竜平, 増田俊夫, 芥川奈緒, 佐藤正春: 有機ラジカル二次電池の反応機構の解明 (27pYG-8)

松井広志, 永鳥舞, 坂本浩一, 溝口憲治, 豊田直樹: 金属イオンをドーブした DNA の赤外分光測定 (27pYG-10)

永鳥舞, 溝口憲治, 坂本浩一, 尾島雅也, 圓谷淳, 柴田譲, 松井広志: 金属をドーブした DNA の電子状態の湿度依存性 III (27pYG-9)

鈴木美香, 風間重雄, 溝口憲治, 坂本浩一, 内藤俊雄, 開康一, 高橋利宏, 加藤礼三: DCNQI 金属塩の NMR による電子状態 II (27aYF-2)

日本物理学会 2009年秋季大会 2009年9月25日－9月28日(熊本大学)

臼井英正, 溝口憲治, 坂本浩一, 圓谷淳: SPM による DNA の構造解析 (26pPSB-60)

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 μ -(BEDT-TTF)₂ICl₂ の電子状態 (26aYC-2)

森英一, 臼井英正, 溝口憲治, 谷口弘三: μ -(ET)(TCNQ) の室温 SPM の研究 (25aYC-12)

荒木理美, 溝口憲治, 坂本浩一, 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歪み効果 III (25pYE-1)

国内研究会

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ー」 2009年12月18日－12月19日

溝口憲治: DNA および金属イオンを導入した DNA の物性 (口頭)

国際会議

International Symposium on Crystalline Organic Metals (ISCOM 2009), Niseco, Japan, Sept. 12-17

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

H. Usui, M. Tsuburaya, T. Yokoya, H. Sakamoto, K. Mizoguchi : Discovery of a new ladder form of DNA: potentiality of atomic assignment with STM

17th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM17), Atagawa, Shizuoka, Japan, Dec. 10-12

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

Eiichi Mori, Hirokazu Sakamoto, Kenji Mizoguchi, Toshio Naito, Yukihiro Shimoi, Toshikazu Nakamura : STM Study of $-(\text{ET})_2\text{I}_3$ at Room Temperature with Charge Disproportionation

編集後記

年次報告の編集に携わり、この物理教室の研究レベルの高さを改めて感じた。それぞれの分野で国内や世界のリーダー的存在となっている研究者がこれだけここで活躍しているという事実は、物理教室としても首都大理工系としてももっと積極的に宣伝してゆくべきであると思う。

研究と教育は強くリンクしているものであるので、本来は物理教室で提供できる教育レベルも非常に高いものであるはずである。教育成果は評価が難しいが、学部では卒業時点での物理学の理解度、就職先と活躍度、大学院では学振研究員取得率、修士博士号取得率、修士博士取得後の活躍度、などで総合的に判断すべきであろう。その観点から現状を見ると、研究成果と比べて教育面はかなり見劣りしているように思う。その状況の原因の大部分は、日本における大学(学部)の序列の固定化(つまり、非常に優秀な高校生はいくら研究レベルが高くても首都大には入学しないし、大企業は予備選抜段階でトップ大学以外は排除する)にあるであろう。この点は教員側の努力では如何ともし難い。

しかし、この状況に対して我々教員に責任がないのかということそうではなからう。私が一番問題とと思っているのは学部の講義内容の質の急速な低下及びそれを教員側から進めていることである。ある理論学生がM1のときに、極座標を使えないので愕然としたことがある。講義ではさっと紹介されたが具体的に計算をしたことはないという。(担当教官の方、勘違いであればすみません。)複素関数やフーリエ変換などの物理学の記述の基本的な「言語」を使えないのでは、物理学を大学で学んだとはいえない。例えばフランス語を一切理解できないままフランスに4年間住んだとして、それでフランスのもつ文化を学ぶことができようか? 物理を専攻してその4年間をただの「旅行者」としてすごすことは(有能な学生であれば)あまりにもったいないことである。自然科学を記述する言語を話すことがまず必須であることを教員側が自覚し、それを教えることから逃げてはいけないと思う。武道であれば、非常に基本的な体捌きや技ができないからといってごまかそうとしても、師匠に「道で使ったらお前死ぬぞ」と却下されて終わりである。実際、ごまかした者は昔ならこの世から淘汰されてしまって、正しい技だけが生き残ってきたのであろう。明らかに物理は間違えても死なないので、大きな甘えが出てしまう。生死と関わらない状況であっても、重要なのは指導者が甘えを許すか毅然として許さないかの差である。

この現状は、これまでの数学的科学的基礎が不十分な学生が講義受講生に増えたことへの対策として、平均的理解度を上げるために講義と演習のレベルを下けているためであるが、これではたしていいのであろうか?¹首都大の物理の一番の問題は、毎学年数人はいると思われる非常に優秀な学部学生が、今の講義内容では全く興味をもてず首都大に幻滅し、大学院で「有名大学」に行くことを選択してしまうことである。自分のときを思い出すと、大学の教養課程で電磁気学を学んだときに「これが真の物理学か」と初めて物理学の美しさに感銘を受けた。真の物理学を伝えるのが物理専攻の任務ではないか? たとえ伝えても受けとれない稽古生が多くても、彼らはもともとだけの技しか求めていないので、段位(卒業)をもらえれば満足であろう。首都大物理教室の将来を考えると、できる学生の知的欲求を刺激させるような講義と演習をすべきではないか? 学生の質低下に甘んじて教員側が本質を伝える努力を忘れるという事態は避けなければならない。

(多々良源 記)

平成 21 年度年次報告編集委員
鈴木徹 (2009 年度教室主任)
住吉孝行
汲田哲郎
多々良源

¹ちょうど 2010 年 5 月号の岩波「科学」に同様の疑問提起がのっていた。