

研究室活動状況 平成 27 年度

研究室の活動状況を，以下順を追って報告する．記載されている項目は，次の通りである．

1. 研究活動の概要

2. 研究業績

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

素粒子理論研究室

1. 研究活動の概要

1) 大気ニュートリノによる非標準的相互作用探索の現象論 (安田・深澤)

近年の実験により三種類のニュートリノの間の標準的混合が確立されてきており、近未来に計画されているニュートリノでは、精密測定により標準的混合からのずれを探ることが出来ると期待されている。そのようなずれを与える可能性の一つにレプトンのフレーバーを保存しない非標準的相互作用がある。そのような非標準的相互作用はニュートリノの伝播における物質効果に修正項をもたらす。最近、太陽ニュートリノと長基線原子炉ニュートリノ実験カムランドの質量自乗差に違いがあることが指摘されており、その違いが非標準相互作用からのニュートリノの物質効果によるものではないかという仮説がある。この質量自乗差の違いは、標準的な三世代の枠組みからのずれ、ひいては新しい物理の可能性を示唆するものであり、この仮説を検証することが重要となる。そこで以前我々が大気ニュートリノで非標準的相互作用を探索した研究を、太陽ニュートリノの議論に使われているパラメーターに焼き直し、再度解析した。その結果、近未来のハイパーカミオカンデの場合には統計量の多さから上述の仮説をかなりの信頼度でテストできることがわかった。

2) 近未来の長基線実験の非標準的相互作用への感度 (安田)

近未来の長基線加速器ニュートリノ実験としては日本の T2HK と米国の DUNE が主なものとなっており、これに日本のハイパーカミオカンデ・南極の PINGU の大気ニュートリノ観測を組み合わせると三世代ニュートリノ混合の標準的枠組みにおけるパラメーターが決定されるというのが現実的なシナリオと考えられている。この研究ではそれらの現実的なシナリオの範囲内でこれら長基線実験の、ニュートリノ伝播における非標準的相互作用に対する感度を議論した。その際、非標準物質効果の成分のうち、既に制限が強いミュー成分を無視し、電子・タウ成分のみを残してかつ高エネルギー大気ニュートリノからの制約も考慮に入れ、統計誤差のみを入れて解析を行った。その結果、上記長基線実験の感度は、近未来のハイパーカミオカンデによる大気ニュートリノ観測には勝らないことがわかった。

3) 弦模型における宇宙論 (北澤)

重力相互作用を自然に含む弦模型において、弦の張力のエネルギースケールは非常に大きい（プランクスケール程度である）ことが自然であるので、弦模型に固有の物理現象の発現は宇宙のごく初期の高エネルギーの時代（宇宙のインフレーションの初期の時代）に限られる。弦模型の中でも特に超対称性が“brane supersymmetry breaking”という機構によって破られている模型においては、宇宙のインフレーションを起こすスカラー場（インフラトン）がインフレーションの始まりの時期に特殊な動き（“climbing phenomena”）をする場合がある。これは、宇宙背景輻射のゆらぎの大きなスケール（長波長）の領域に独特の予言をすることになるが、それが実際に観測されている宇宙背景輻射の大きなスケールでのゆらぎの異常な振る舞い（宇宙標準模型（ Λ CDM 模型）からのずれ）を説明する可能性があることについて詳細に研究した。

この研究はピサ高等師範学校の A.Sagnotti 氏との共同研究である。

4) 宇宙背景輻射の大きなスケールでのゆらぎの観測 (北澤)

宇宙のインフレーションの過程で生成される宇宙背景輻射の長波長領域（大スケール領域）には異常な振る舞いがあると指摘されてきた。そのひとつとして WMAP および PLANCK 実験による観測結果における宇宙背景輻射の長波長成分が宇宙標準模型（ Λ CDM 模型）の予言に比べて小さいのではないかと

ということが指摘されてきたが、それが統計的に有意なものであるかどうかは意見の分かれるところであった。

本年度内に終了した PLANCK 実験のすべての観測データを用い、宇宙背景放射の観測の際に重要である「銀河マスク」(背景放射の観測の際に邪魔になる我々の銀河面からの放射を遮る手続き)について詳細に考察し、統計的に有意にその長波長成分が Λ CDM 模型の予言に比べて小さいことを示した。行った解析は PLANCK collaboration によって正式に承認されているものである。

この研究はピサ高等師範学校の A.Sagnotti 氏, および PLANCK collaboration に属する A.Gruppuso 氏 と P.Natoli 氏との共同研究である。

5) 弦模型におけるゲージ対称性の自発的破れ (北澤)

素粒子の「弱い相互作用」はゲージ対称性が自発的に破れた結果として生じる質量を持つゲージ粒子によって媒介されることが実験によって検証されている。この「電弱対称性の自発的破れ」という現象は場の量子論を基本的な枠組みとする素粒子の標準模型によって正確に記述されている。しかし、現状の素粒子の標準模型は素粒子とその相互作用を表現する最終的なものとは考えづらく(例えば重力相互作用が入っていない), より最終的な表現に近づくひとつの方向として弦理論を基本的な枠組みとする模型に移行するという試みがある。

しかし、弦理論の枠組みにおけるゲージ対称性の自発的破れの理解は未だ不十分である。10次元時空を仮定する弦理論におけるDブレーンという多次元に広がりを持つ物体を用いた模型において、ゲージ対称性はそのDブレーンの占める部分時空内に実現される。我々の経験している時空間は4次元なので、余分の6次元空間は「コンパクト空間」と表現される閉じた観測できないほど小さな空間でなければならない。「電弱対称性の自発的破れ」で要求されるようなゲージ対称性の自発的破れを実現するためには、いくつかのDブレーンが消滅しなければならないが、その過程はこれまで明確にされてこなかった。そこで、コンパクト空間内の離散回転対称性を利用して複数のDブレーンを同一視することによって実質上のDブレーンの消滅を実現することを提案した。さらに、その状態を安定な定常状態として実現する可能性として、コンパクト空間内でDブレーンに働く中心力を導入してDブレーンを公転させ、遠心力と中心力の釣り合いによってそれを実現する動力学を提案した。

この研究は高エネルギー加速器研究機構の磯暁氏との共同研究である。

2. 研究業績

1) 論文

Shinya Fukasawa and Osamu Yasuda: Constraints on the non-standard interaction in propagation from atmospheric neutrinos, *Advances in High Energy Physics* **2015** (2015) 820941.

Noriaki Kitazawa and Yuki Sakai: Constraints on gauge-Higgs unification models at the LHC, *Modern Physics Letters A* **31** (2016) 1650041.

A. Gruppuso, N. Kitazawa, N. Mandolesi, P. Natoli and A. Sagnotti: Pre-Inflationary Relics in the CMB ? *Physics of the Dark Universe* **11** (2016) 68-73.

Satoshi Iso and Noriaki Kitazawa: Revolving D-branes and Spontaneous Gauge Symmetry Breaking, *Progress of Theoretical and Experimental Physics* **2015** (2015) 123B01.

Noriaki Kitazawa and Augusto Sagnotti: A String-Inspired Model for the Low- l CMB, *Modern Physics Letters A* **30** (2015) 1550137.

2) 国際会議報告

Osamu Yasuda: Constraints on non-standard flavor-dependent interactions from Superkamiokande and Hyperkamiokande, *Proceedings of Science Nufact2014* (2015) 045.

Noriaki Kitazawa and Augusto Sagnotti: String Theory clues for the low- l CMB ? *EPJ Web of Conferences* **95** (2015) 0303.

3) 学会講演

● 日本物理学会 2015 年秋季大会 2014 年 9 月 25 日 (日) – 28 日 (水) (大阪市立大学)

酒井裕企, 北澤敬章: LHC 実験によるゲージヒッグス統一モデルへの制限

国内研究会

● “New Physics Forum (第 8 回)” 2015 年 12 月 14 日 (高エネルギー加速器研究機構)

北澤敬章: “Extra Dimensions in String Phenomenology” (招待講演)

● 第 29 回宇宙ニュートリノ研究会, 2016 年 2 月 20 日, 東大宇宙線研

深澤信也: Constraints on the Nonstandard Interaction in Propagation from Atmospheric Neutrinos

国際会議

● Neutrino Theory and Phenomenology Workshop (Nu@Fermilab), 21–25 July 2015, Fermilab, USA

O. Yasuda: Non-Standard interactions in propagation through atmospheric neutrinos

● XIV International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP 2015), 7–11 September 2015, Torino, Italy

O. Yasuda: Constraints on the flavor-dependent non-standard interaction in propagation from atmospheric neutrinos

● A topical conference on elementary particle physics and cosmology (Miami2015), 16–22 December 2015, Fort Lauderdale, Florida, USA

O. Yasuda: Searching for non-standard interactions at the future long baseline experiments

4) 学会誌等

安田修: ニュートリノ振動—量子力学的干渉効果の一例—, 日本物理学会誌 **70** (2015) 242

安田修: 素粒子物理学に大きな進展をもたらしたニュートリノ振動の発見, 化学 (化学同人) **70** (2015) 12 月号, 19

安田修: 2015 年ノーベル物理学賞, 数学セミナー (日本評論社) 2016 年 3 月号, 43

高エネルギー理論研究室

1. 研究活動の概要

Publicised (in our research papers or conference talks) research activities of the Laboratory members during the academic year H27 (2015/2016) were in two different directions (and on two research subjects):

(a) we considered an extension of the Starobinsky model, whose parameters are functions of an extra scalar field. Our motivation was to test the robustness (or sensitivity) of the Starobinsky inflation against mixing scalaron with another (matter) scalar field. We found that the extended Starobinsky model is (classically) equivalent to the two-field inflation, and studied its cosmological perturbations. For the sake of fully explicit calculations, we performed a numerical scan of the parameter space. Our numerical calculations support the viability of the Starobinsky-like two-field inflation for the certain range of its parameters, which are characterised by the scalar index $n = 0.96$, the tensor-to-scalar ratio $r < 0.06$, and small running of the scalar index at the pace < 0.05 (兼田, ケトフ);

(b) the large-field inflation in supergravity requires the approximate global symmetry needed to protect flatness of the scalar potential. In the helical-phase inflation, the U(1) symmetry of the Kähler potential is assumed, the phase part of the complex scalar of a chiral superfield plays the role of inflaton, and the radial part is strongly stabilized. The original model of helical phase inflation, proposed by Li, Li and Nanopoulos (University of Texas, USA), employed an extra (stabilizer) superfield. We proposed a more economical new class of the helical phase inflationary models without a stabilizer superfield. As the specific examples, we studied in detail the quadratic, the natural, and the Starobinsky-type inflationary models in our minimalistic approach (ケトフ).

Both research subjects belong to High Energy Theoretical Physics beyond the Standard Model of elementary particles, including Supergravity Theory (which is a supersymmetric extension of Einstein Gravity Theory), and are closely related to the on-going physical observations of the Cosmic Microwave Background radiation by the Planck collaboration.

The research (a) and (b) was supported by the a Grant-in-Aid of the Japanese Society for Promotion of Science (JSPS) under No.26400252 and the World Premier International Research Center Initiative (WPI Initiative), MEXT, Japan (ケトフ). During the year 2015 we continued our collaboration in joint research with the theoretical high-energy physics group at the University of California in Los Angeles (Prof. A. Kusenko) and the gravitational theory group at California Institute of Technology (Prof. S. M. Carroll) in Los Angeles, USA, in our studies of the gravitational low-energy effective action of type II superstrings compactified on Calabi-Yau spaces. We also continued our joint research with the high-energy physics group (Dr. A. Wagner) of Tomsk Polytechnic University in Russia, in our studies of cosmological models of inflation in early Universe and their unification with high-energy physics of elementary particles. In addition, S. Ketov was invited as a Visiting Professor for a month (March 2016) to Chulalongkorn University in Bangkok, Thailand, where he delivered a course of lectures about his research in modern cosmology to the physics staff and graduate students. As a result, we started a new research collaboration with the theoretical physics laboratory of Prof. A. Chatrabhuti at Chulalongkorn University, in the area of theoretical cosmology and astro-particle physics.

2. 研究業績

1) 論文

S. Kaneda and S.V. Ketov, Starobinsky-like two-field inflation, *Eur. Phys. Journal C* **76:26** (2016) 1-14.

S.V. Ketov and T. Terada, Single-superfield helical-phase inflation, *Phys. Lett. B* **752** (2016) 108-112.

S.V. Ketov, Economic and Social Impact of Advanced Research at Universities, *Journalism and Mass Communication*, **Vol. 5, Number 5** (2015) 250-254.

2) 学会講演

国際会議

● International Conference and School on Mathematical Physics (トムスク, ロシア, 2015 年 8 月)

S.V. Ketov: Introduction to Superstring Cosmology (invited)

S. Kaneda: Starobinsky-like two-field inflation (invited)

H. Kuwabara: Time-dependent Pais-Uhlenbeck oscillator (invited)

H. Nakada: Randall-Sundrum brane world (invited)

● International Symposium "Pacific 2015" on Particle Astrophysics and Cosmology including Fundamental Interactions" (モーレア, 仏領ポリネシア, 2015 年 9 月)

S.V.Ketov: Superstring Cosmology (invited)

原子核理論研究室

1. 研究活動の概要

1) KN 相互作用と核媒質中の K 中間子 (青木, 慈道)

これまでに、深く束縛された π 中間子の分光実験や $\pi^\pm$ -原子核弾性散乱の解析から束縛状態、散乱状態の双方についてカイラル対称性が30%程度回復するという事が明らかにされつつある。しかし、その他の中間子-原子核系でカイラル対称性が回復に向かう際の影響がどのように現れるかについては未だに十分な理解には至っていない。そこで、 π 中間子に関して見えた事が他の中間子ではどのように見えるかという系統性の観点から、その他の中間子として Nambu-Goldstone ボソンの1つである K^+ 中間子と原子核の弾性散乱においてカイラル対称性の部分的回復の影響がどのように現れるかを調べた。 K^+ と原子核の弾性散乱を考えた時、核媒質中における K^+ の平均自由行程は原子核の典型的な大きさと同程度なので K^+ と核子ひとつひとつとが散乱すると考えられる。したがって、近似的には $P_{LAB} < 800 \text{ MeV/c}$ の範囲で $\sigma_{K+A} \simeq A\sigma_{K+N}$ が成り立つと予想される。しかし、 ^{12}C 標的と重陽子 d 標的の核子1つ当りの散乱断面積比が1より大きくなる事が実験的に知られている。つまり、線形密度近似が破綻しており真空中の K^+N 相互作用よりも原子核中における K^+N 相互作用は大きくなっているのである。この事を真空構造の相転移の観点から理解するためにカイラル対称性の部分的回復と密接な関係がある波動関数くりこみの計算を行った。その結果、波動関数くりこみから、 K^+ と原子核の弾性散乱振幅は真空中に比べて、10%程度増大することが分かった。

2) クォーク・ダイクォーク模型による重いバリオンの (坂下, 慈道)

ハドロンが、クォーク・グルーオンのどのような有効自由度によって記述されるかは、ハドロンの内部構造やその励起スペクトルを理解する上で重要である。クォーク二つからなるダイクォーク相関は、スカラーアイソスカラーでカラー $\bar{\mathbf{3}}$ を持つ組に強い引力があると期待され、ダイクォークはハドロン中の有効自由度の候補として長年期待されている。近年、重いハドロンの生成実験が盛んに行われ、数多くの良質なデータが得られつつある。重いクォークを一つ持ったバリオン系では、軽いクォーク二つがダイクォークとして振る舞う可能性がある。その内部構造に注目が集まっている。本研究では、重いクォークを一つ持つ Λ_c と Λ_b について、クォークとダイクォークの2体の束縛状態と仮定して、クォークとダイクォーク間の相互作用について研究を行った。クォークとダイクォークのカラー構造は、クォークと反クォークと同じことであることから、charmonium や D 中間子系の励起スペクトルを再現する閉じ込めポテンシャルを用いて、バリオン系の励起エネルギーの計算を行った。閉じ込めを起こすカラー電磁ポテンシャルは、カラーに依存しフレーバーに依存しないと考えられることから、メソン系を再現するポテンシャルでバリオン系も再現できると期待していたが、結果は、閉じ込めポテンシャルの張力はメソン系に比べて半分でない、バリオン系の励起スペクトルが再現できないことが分かった。単純な模型での考察ではあるが、クォークポテンシャル模型を取る限り、考えにくい結果であるので、今後、その理由を解明していく必要がある。

3) 光核反応による η' 原子核束縛状態の観測についての QMD による研究 (丸山, 慈道)

NJL 模型をはじめとする様々なカイラル理論は、対称性の回復による有限密度中での η' の質量低下を予想している。最近、これを実証するため、 γ 線を ^{12}C 標的に入射し、そこから back-to-back に放出される η と核子を同時計測することで、残留核内の η' のエネルギー状態を観測するという実験が計画されている。計測された粒子は光子と反応してから観測される間に残留核と相互作用を行ない、観測量だけで純粋な情報を得る事ができない。そこで、本研究では、核子入射反応等で大きな成功を示しているで量

子的分子動力学法 (QMD) を用いて、 γ 吸収から η' の崩壊という素過程の終了後の時間発展を QMD でシミュレーションすることで、終相互作用の効果を理論的に解析することを行った。計算は現在進行中であるが、終相互作用の効果は小さくないが、放出核子のエネルギーの最低エネルギーを設定し、イベントを制限すれば核媒質中の情報を得られるという結果を得られている。

4) BaBar や LHCb のデータによる B 中間子崩壊にとける $D_{s0}^*(2317)$ 中間子と DK 散乱 (慈道)

本研究は、スペインバレンシア大学粒子物理研究所の Miguel Albaladejo 氏, Juan Nieves 氏と Eulogio Oset 氏との共同研究である。本研究では、BaBar で測られた $B^+ \rightarrow \bar{D}^0 D^0 K^+$, $B^0 \rightarrow D^- D^0 K^+$ 崩壊過程と LHCb で測定された $B_s \rightarrow \pi^+ \bar{D}^0 K^-$ 崩壊における DK 不変質量分布を用いて、 $D_{s0}^*(2317)$ の存在とその性質について、研究を行った。 B 中間子の崩壊過程での DK 不変質量分布には、しきい値近傍にスペクトルの増大が見えており、本研究では、この増大は、 $I(J^P) = 0(0^+)$ の量子数を持つ DK 束縛状態としての $D_{s0}^*(2317)$ が存在していることが起因していることを示した。本研究では、重い中間子を含むカイラル摂動論に基づいた相互作用をユニタリー化した散乱振幅を用い、実験データを再現するようにパラメータを調節した結果、 $D_{s0}^*(2317)$ の質量として $M_{D_{s0}^*} = 2315_{-17}^{+12} {}_{-5}^{+10}$ MeV を得て、ワインバーグの複合性指標として $P_{DK} = 70_{-6}^{+4} {}_{-8}^{+4}\%$ を得るに至った。

5) γd 反応における $\eta' N 2$ 体束縛状態の観測可能性について (慈道)

η' の質量生成には $U_A(1)$ 量子異常の効果が不可欠であるが、その効果が η' の質量生成に影響を与えるためには、SU(3) カイラル対称性が破れている必要がある。このことにより、 η' は σ 場との強い結合が予想され、核子も σ 場との結合が強いので、 σ 交換による $\eta' N$ の 2 体束縛状態の存在が期待されている。本研究では、大阪大学核物理研究センター 関原隆泰氏と 京都大学理学研究科 酒井俊太郎氏との共同研究のもと、重水素標的における η' や η の光生成反応を考えることで、 $\eta' N$ 束縛状態のシグナルを観測する可能性を検討した。その目的のために、 $\eta' N$ 相互作用を線形 σ 模型から取り、 $\gamma p \rightarrow \eta p$ と $\gamma p \rightarrow \eta' p$ の散乱振幅は測られている散乱断面積を再現するように決めた。陽子が超前方に射出される $\gamma d \rightarrow \eta n p$ 及び $\gamma d \rightarrow \eta' n p$ 反応の散乱断面積の計算を行った。結果として、 $\eta' N$ の束縛状態が存在すれば、そのシグナルは上記反応の $\eta' N$ しきい値の下にピークとして現れることを確認した。また、しきい値より上のエネルギーでは、同規模の quasi free η' 生成が起こることが分かった。さらに、束縛状態の有無が $\eta' N$ 不変質量分布のしきい値近傍の構造に顕著に表れることが分かった。

6) マグネターの強い磁場の起源に対するカイラル非対称模型 (大西)

中性子星の中にマグネターといわれ、表面に $\sim 10^{15}$ G 程度の強い磁場が観測されていて、その説明にいろいろの提案されている。中でもカイラルプラズマの不安定性の観点からその起源に迫る論文があり、果敢な議論が交わされている。そこで、典型的なマグネターとして質量 $1.5 M_\odot$ 倍で半径が 12 km の中性子星を考察し、簡単な模型を提案する。電子の Fermi エネルギーはおよそ 100 MeV で、超相対論的で量子凝縮していると結論した。量子凝縮している電子系は Fermi 統計による非局所性のため長距離相関が生じ、Dirac 方程式にしたがう波動として取り扱う必要がある。温度をゼロとして、Dirac-Hartree-Fock 近似で、平均場としての電磁場と結合させ、Dirac 方程式と Maxwell 方程式を自己無撞着に、 $j-j$ 結合の Rose 基底として結合チャンネル模型を取り扱う。Rose 基底は、対称性の考慮に便利である。Fermi エネルギーが 100 MeV の電子を閉じ込めるため、核子球 (陽子) の外に電子がでる単極分極が生じるが、電子の分布が星の半径位だと、電荷は 150 C となるが星の表面での陽子にかかる Coulomb 斥力は重力とほぼ同じになる。核子球外電子の厚みが半径に比べて薄いと、厚さと半径に逆比例して電荷が増え表面での Coulomb 力が重力を上回り、比電荷の大きい陽子が電子に引かれて外に出て電子の厚みを増加させる。この分極を考慮すると核物質の「状態方程式の困難」が解決する可能性がある。星は回転してい

るので、電子は角運動量を核子と分担してもつ。クラック項をいれて電子に角運動量をあたえる。このとき、角速度は Lagrange 係数と考えられる。クラック項は粒子の回転軸を量子化軸として磁気量子数の大きい成分のエネルギーを下げ、負の磁気量子数の成分のエネルギーが上がる。したがって、非占有状態の正の量子数の軌道が占有状態になり、占有状態の負の大きい量子数の軌道が非占有状態に入れ替わる。回転軸に垂直な面（赤道面）に回転する環状の流れが生じ、それとは逆に Gordon 電流 (convection current) が流れる。この電流はポロイダル磁場に作り、その磁場によって電流を自己収縮し管内の電子の密度を増加させる。そこでの運動量はほとんど円輪の接線方向である。管状の電子のスピンは回転軸に向いているが、陽子に弱い相互作用で捕獲されるとき、ヘリシティ負の状態だけ反応に寄与し、プラスヘリシティの電子は残される。ヘリシティは良い量子数でないため、カイラリティを破る質量項によって振動が起こるが、超相対論的状态ではその効果が小さく磁気モーメントのために管に沿って磁化がおこる。この磁化は、Dirac 電流のスピン電流によるもので、この電流による磁場はヘリシティを良い量子数に近づけ、磁化が安定する。その結果質量項によるヘリシティの振動がさらに減少し、磁化が安定し、スピン整列による強いトロイダル磁場が形成さる。これがマグネターの強い磁場の起源と考えられる。

2. 研究業績

1) 論文

Eulogio Oset, Wei-Hong Liang, Melahat Bayar, Ju-Jun Xie, Lian Rong Dai, Miguel Albaladejo, Marina Nielsen, Takayasu Sekihara, Fernando Navarra, Luis Roca, Maxim Mai, Juan Nieves, Morais Jorgivan Dias, Alberto Feijoo, Volodymyr K. Magas, Angels Ramos, Kenta Miyahara, Tetsuo Hyodo, Daisuke Jido, Michael Doring, Raquel Molina, Hua-Xing Chen, En Wang, Li Sheng Geng, Natsumi Ikeno, Redro Fernandez-Soler, and Zhi Feng Sun: Weak decays of heavy hadrons into dynamically generated resonances, *Int. J. Mod. Phys. E* **25** (2016) no.01, 1630001, DOI:10.1142/S0218301316300010.

Takayasu Sekihara, Tetsuo Hyodo, Daisuke Jido: Comprehensive analysis of the wave function of a hadronic resonance and its compositeness, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2015**, **063D045** (2015), DOI: 10.1093/ptep/ptv081.

2) 国際会議報告

Y.K. Tanaka, Y. Ayyad, J. Benlliure, K. -T. Brinkmann, S. Friedrich, H. Geissel, J. Gellanki, C. Guo, E. Gutz, E. Haettner, M.N. Harakeh, R.S. Hayano, Y. Higashi, S. Hirenzaki, C. Hornung, Y. Igarashi, N. Ikeno, K. Itahashi, M. Iwasaki, D. Jido, N. Kalantar-Nayestanaki, R. Kanungo, R. Knoebel, N. Kurz, V. Metag, I. Mukha, T. Nagae, H. Nagahiro, M. Nanova, T. Nishi, H.J. Ong, S. Pietri, A. Prochazka, C. Rappold, M.P. Reiter, J.L. Rodriguez-Sanchez, C. Scheidenberger, H. Simon, B. Sitar, P. Strmen, B. Sun, K. Suzuki, I. Szarka, M. Takechi, H. Fujioka, I. Tanihata, S. Terashima, Y.N. Watanabe, H. Weick, E. Widmann, J.S. Winfield, X. Xu, H. Yamakami, J. Zhao: η' mesic nucleus spectroscopy with (p, d) reaction at GSI, DOI: 10.3204/DESY-PROC-2014-04/106, *Proceedings for Particles and Nuclei International Conference 2014 (PANIC' 14)*, 18-24 August 2014, Hamburg, Germany.

H. Fujioka, Y. Ayyad, J. Benlliure, K. -T. Brinkmann, S. Friedrich, H. Geissel, J. Gellanki, C. Guo, E. Gutz, E. Haettner, M.N. Harakeh, R.S. Hayano, Y. Higashi, S. Hirenzaki, C. Hornung, Y. Igarashi, N. Ikeno, K. Itahashi, M. Iwasaki, D. Jido, N. Kalantar-Nayestanaki, R. Kanungo, R. Knoebel, N. Kurz, V. Metag, I. Mukha, T. Nagae, H. Nagahiro, M. Nanova, T. Nishi, H.J. Ong, S. Pietri, A.

Prochazka, C. Rappold, M.P. Reiter, J.L. Rodriguez-Sanchez, C. Scheidenberger, H. Simon, B. Sitar, P. Strmen, B. Sun, K. Suzuki, I. Szarka, M. Takechi, Y.K. Tanaka, I. Tanihata, S. Terashima, Y.N. Watanabe, H. Weick, E. Widmann, J.S. Winfield, X. Xu, H. Yamakami, J. Zhao (Super-FRS Collaboration): Spectroscopy of η' -nucleus bound states at GSI and FAIR – very preliminary results and future prospects –, *Hyperfine Interactions* **234**, 1-3, 33-39 (2015), Proceedings for 5th International Conference on Exotic Atoms and Related Topics (EXA2014), 15-19 Sep 2014, Vienna, Austria, DOI: 10.1007/s10751-015-1145-9 .

Shuntaro Sakai, Daisuke Jido: The $\eta'N$ interaction from a chiral effective model and $\eta'-N$ bound state, *Hyperfine Interactions* **234**, 1-3, 71-76 (2015), Proceedings for 5th International Conference on Exotic Atoms and Related Topics (EXA2014), 15-19 Sep 2014, Vienna, Austria, DOI: 10.1007/s10751-015-1162-8.

3) 学会講演

● 日本物理学会年会 第71回年次大会 2016年3月19日–3月22日 (東北学院大学 泉キャンパス)

慈道大介: 原子核を舞台に探る量子色力学のカイラル対称性 (シンポジウム講演, 19pAW-5)

大西直毅, 丸山智幸: マグネターのカイラル非対称模型 III (19aAB-12)

丸山智幸, 慈道大介: 光核反応による η' 原子核束縛状態の観測についての QMD による研究 (22pAC-6)

● 日本物理学会年会 秋期大会 2015年9月25日–9月28日 (大阪市立大学 杉本キャンパス)

大西直毅, 丸山智幸: マグネターのカイラル非対称模型 II (28aSR-7)

国内研究会

● スペインとの二国間交流事業研究会 2016.2.20, 東京工業大学

慈道 大介, 坂下みのり: クォーク・ダイクォーク模型による重いバリオンに対するコメント

● 滞在型研究会@ JPARC 「原子核媒質中のハドロン研究 III」 2015.10.17–20, KEK 東海キャンパス

慈道 大介: Mesons in nuclei and partial restoration of chiral symmetry

● RIKEN symposium 「Comprehensive Studies of Neutron Stars」, 2015.11.24–25, 理化学研究所

大西 直毅: カイラリティの破れによるトロイダル磁場

● 新学術研究領域「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」第四回ウィンタースクール・中性子星の核物質, 2016.2.24–26, 国立天文台

大西 直毅: A Chiral Asymmetry Model for Magnetars (ポスター)

国際会議

● 12th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2015), September 7–12, 2015, Tohoku University, Sendai, Japan.

D. Jido: Mesons in nuclei and partial restoration of chiral symmetry (Invited talk).

宇宙理論研究室

1. 研究活動の概要

宇宙理論研究室では、高エネルギー天体现象、銀河・銀河団の形成と進化、および関連する宇宙プラズマの基礎的物理過程をテーマとして、様々な天体や現象を対象に理論的研究を進めている。2015年度のグループ構成はスタッフ2名、大学院生2名、客員研究員1名である。

1) 星の爆発に伴う相対論的衝撃波のブレイクアウト

超新星爆発の際に、衝撃波が星表面から希薄な星間空間に抜けるブレイクアウトによって軟X線フラッシュが起こることが早くから理論的に言われており、最近、超新星爆発から数日内に可視域でブレイクアウトの痕跡が観測されている。一般的な超新星ではこの過程は非相対論的であるが、相対論的なブレイクアウトが起きたらどのような放射になるか、 γ 線バーストとの類似性に着目して、相対論的ジェットが星表面を抜ける過程を調べてきた。 γ 線バーストは銀河系外から突発的に γ 線放射が観測される現象で、うち継続時間の長いバーストは、質量の大きな星の重力崩壊に伴って形成されたブラックホールからのジェットの可能性が言われている。星の黒体放射光子は衝撃波加熱されたジェット電子のバルク運動によってCompton散乱され、ベキ型のスペクトルを形成することは以前の研究でも確認しているが、ブレイクアウト前後でそれぞれ相似解析解を適用した結果であり、ジェットのダイナミクスを連続的に追ったものではなかった。2015年度の研究では、相対論的ジェットの流体力学的時間発展を数値的に解くことで、ブレイクアウト前後で連続的に放射スペクトルの時間発展を計算し、観測されている γ 線バーストのBandスペクトルのベキや E_{peak} 、放射強度の時間変化などとの比較を行った。

2) 超新星残骸の進化と熱的・非熱的放射の時間発展

水素の外層を残しているような比較的質量の大きい星は、進化の最終段階で鉄コアが重力崩壊して爆発し、II型超新星となると考えられている。また、近傍に恒星風物質が残されている可能性があり、そのような環境で起きた超新星の残骸は、低密度の様な星間空間で爆発・膨張する場合と異なる進化をすることになる。Cas Aはよく観測されてきた新星残骸の一つで、活動的ではないが中心部に中性子星らしき天体も見つかっており、約350年前のコアの重力崩壊による超新星と考えられている。以前は水素の外層を失った星の爆発(Ib型超新星)と考えられていたが、近年、薄い外層があったと考えられるようになりIIb型超新星として分類された。Ib型超新星とII型超新星の中間と考えられるCas Aの爆発前の星や環境を探ることを目的として、観測されている熱的X線放射の輝線強度と連続放射強度、シンクロトロン電波放射の強度の経年変化と、残骸の膨張速度との関係について、解析を進めている。

3) 恒星風を捕捉して質量降着するブラックホール

ブラックホールの連星系において、伴星が太陽質量程度のいわゆる低質量X線連星系では、 L_1 点から流入した低速のガスが、幾何学的に薄い黒体放射降着ディスクや幾何学的に厚い高温降着流を形成すると考えられる。一方で、Cyg X-1のように、伴星が質量の大きなOB型星の場合には、その紫外線放射によって高速の恒星風が駆動されることが考えられるので、ブラックホールへの降着も、前述のような降着の描像とは異なったものになり、降着ディスクが形成されたとしても小さい可能性が高い。このような恒星風の捕捉による質量降着では、ブラックホール近傍からの紫外線・X線放射による光電離や加熱が恒星風の速度や音速に影響して質量降着率が変動する(cf. Bondi降着)。質量降着率が変われば、結果として紫外線・X線放射が変動することになるので、そのフィードバックを考慮した統合的なモデリングが必要になる。Cyg X-1のhigh-low状態の光度変化の物理過程と降着ディスク外縁の物理状態を解明することを目的として、LMC X-1とも比較しながら恒星風降着の研究を進めている。

4) 銀河団ガスにおける粒子加速と加熱

銀河団は 10-1000 個の銀河の集団で、銀河の総質量の数倍の質量の高温ガスと、さらにその数倍の質量のダークマターから構成される Mpc スケールの自己重力系と見なせる最大の天体である。銀河団形成における衝突-合体過程で、衝撃波や乱流は粒子を加速しガスを加熱する。実際、 $\sim$ Mpc に広がる GeV 電子のシンクロトロン電波ハローは、熱的 X 線光度の大きい衝突-合体していると見られる銀河団に多く、また、電波強度とガス温度には相関が見られる。銀河団衝突の過程で形成される粒子のスペクトルを調べ、放射の特徴を明らかにして、電波ハローと整合的にコアの熱的進化を探る研究を進めている。この目的のため、熱的粒子から非熱的粒子まで整合的に分布関数を計算する Fokker-Planck コードの開発を進めており、2015 年度は移流項・拡散項それぞれで小角度散乱の効果を入れた定式化の試行と、数値計算上の人工的な加熱を排除する数値解法のテストを行った。並行して、電波ハローに関する他の研究の互いに矛盾する結果を特定の仮定の下で再現することを試みた。また、冷却コアの加熱に関し、サバティカルを利用してフランス・サックレー研究所 SAp とパリ XI 大学 IAS でも研究を行った。

5) ハローの球対称重力崩壊モデルの検証

銀河や銀河団などのハローの成長を解析的に記述するモデルとして、球対称重力崩壊モデルがある。ゆらぎの非線形成長を記述することができ、アインシュタイン・ド・シッター宇宙の場合には解析解があること、統計的には N 体シミュレーションの結果を説明できるなどの点から、宇宙論の分野では宇宙論パラメータを推定する際などによく使われている。しかし、一つ一つのハローの成長という観点からは詳細な検討は行われてこなかった。そこで、ハロー毎にモデルと N 体シミュレーションの結果を比較した。その結果、最大膨張まではモデルと N 体シミュレーションの結果はよく一致するが、その後の収縮する期間では、主にモデルでは無視されている速度分散の効果により、緩和が進んだ後のハローの半径をモデルは小さく見積もることを見つけた。

2. 研究業績

1) 論文

D. Suto, T. Kitayama, K. Osato, S. Sasaki, Y. Suto: Confrontation of Top-Hat Spherical Collapse against Dark Halos from Cosmological N-Body Simulations *Publ. Astron. Soc. Japan*, **68** (2016) 1417

2) 学会講演

● 日本天文学会 2016 年春季年会 2016 年 3 月 14 日-17 日 (首都大学東京 南大沢キャンパス)

清水崇文, 木村聖人, 立石琢磨, 政井邦昭: 銀河団ガスにおける乱流による粒子加速と加熱

谷治健太郎, 政井邦昭, 山田真也: 恒星風へのフィードバックを考慮した High Mass X-Ray Binary の質量降着モデル

国内研究会

● HEAP2015 高エネルギー宇宙物理学研究会 2015 年 11 月 25 日-27 日 (静岡県沼津市)

政井邦昭, 清水崇文: 2 次 Fermi 加速/加熱と Fokker-Planck 方程式

● X 線望遠鏡研究会 2015 2015 年 11 月 16 日 (名古屋大学)

政井邦昭: X 線望遠鏡に期待する宇宙物理過程の解明

非線形物理研究室

1. 研究活動の概要

1) 波束の時間発展による非可積分固有関数のトンネルテール再現

Baker-Hausdorff-Campell 展開より得られた可積分基底を初期条件とする時間発展により、非可積分系の固有関数のトンネルテールが再現されることを発見した。この結果は、従来より我々が行ってきた、時間領域の半古典解析が、固有関数のトンネル効果の解析に適用可能であることを示唆するものである。これにより、エネルギー領域におけるトンネル効果の理解が大きく進む可能性が拓けたと言える。

2) BCH ハミルトニアン of 行列要素の特異性とその半古典解析

Baker-Hausdorff-Campell (BCH) ハミルトニアン of 作用を用いた行列要素に半古典論を適用しようとすると、(最低次) 半古典近似が破綻している可能性が昨年指摘された。今年度は、その可能性をさらに詳細に検討するために、回折カタストロフを基にした行列要素のさまざまな局所モデルの解析を行った。ここ数年の解析のなかで、その重要性が明らかになった、非可積分系に見られる、BCH 作用行列要素の異常な振る舞いの起源については依然として完全な理解には至っていないが、半古典近似破綻の可能性は、量子カオスの基本問題と考えられることから、引き続き解析を継続する予定である。

3) RAT 理論の検証

“共鳴によって促進されるトンネル効果 (Resonance-assisted tunneling 以下 RAT と略称)” の妥当性に関する詳細な検討を行った。一昨年度ならびに昨年度より、我々は、従来から非可積分系におけるトンネル確率増大の有力な機構として提案された RAT の妥当性について検討を重ねてきた。平成 27 年度は、RAT の手法を具体的に実行してみることで、RAT が想定する機構が非可積分系のトンネル機構として本質的か否かを調べた。その結果、繰り込み摂動基底に現れる、非自明なトンネル結合を再現することができないこと、および、セパラトリックスを越えた結合を RAT が記述できないことの 2 点において、RAT の方法は非可積分系のトンネル過程の実態とは大きくずれているものであることが明らかになった。

4) 1 次元標準ハミルトン力学系の解のリーマン面について

完全可積分系、とくに、多項式標準ハミルトン系のトンネル効果を、複素半古典論にもとに調べた。ここでは、多項式標準ハミルトン系の解のリーマン面を調べ、基本群の考え方にに基づき、複素半古典論に寄与する可能性のある複素軌道の数が高々有限であることを示した。複素半古典論の計算に寄与する複素軌道は、最終的には、経路積分を鞍点近似する際に現れるストークス現象を考慮することによって決定されるため、多項式標準ハミルトン系の完全 WKB 解析を実行することが、今後取り組むべき重要な課題として浮上してきた。

5) 区分線型面積保存写像における軌道の異常拡散について

強いカオスが支配する非可積分ハミルトン系の軌道は、通常拡散 (normal diffusion) に従うことがよく知られている。ここでは、近年、量子系の動的局在の古典モデルとして解析された区分線型面積保存写像において、その軌道の拡散特性を調べた結果、比較的一般的な状況下で、いわゆる劣拡散 (subdiffusion)、すなわち、軌道の平均二乗変位が指数 1 未満のべき関数に従うことを発見した。さらに、軌道の分布関数が、連続時間ランダムウォークモデルから導かれる分布関数によく一致することを見出した。ハミルトン系において、代数的劣拡散が観察された例は我々が知る限りこれが初めてである。

6) 断熱量子力学の位相幾何学的な側面

量子系の断熱的な時間発展は、量子論の創世記から調べられている長い歴史を持つ問題であると同時に、幾何学的位相や断熱量子計算といったモダンな話題を提供している。従来の研究では、系の始状態および断熱経路の起点と終点を与えれば、その終状態は一意に決まると暗黙裡に仮定されていた。しかし、新奇な量子ホロノミーの研究に関して近年になって得られてきた進展、特にその位相幾何学的な定式化を利用することで、断熱終状態の経路依存性を取り巻く構造を解明した。これを特徴付ける鍵は断熱パラメーター空間および、これに付随する順序付けられた固有射影の為す空間上の軌跡のホモトピー同値性であった。例えば、二準位系では、これらはブロッホベクトルとその配向子の軌跡の分類に相当する(全卓樹教授(高知工科大)との共同研究)。

2. 研究業績

1) 論文

Yasutaka Hanada, Akira Shudo and Kensuke S. Ikeda: Origin of the enhancement of tunneling probability in the nearly integrable system, *Phys. Rev. E* **91** (2015) 042913 (16 pages).

Akira Shudo and Kensuke S. Ikeda: Toward pruning theory for the Stokes geometry of the quantum Hénon map, *Nonlinearity* **29** (2016) 375–425.

Atushi Tanaka and Taksu Cheon: Bloch vector, disclination and exotic quantum holonomy, *Physics Letters A* **379** (2015) 1693–1698.

2) 国際会議報告

Akira Shudo: Stokes geometry of the quantum Hénon map in the horseshoe regime, *RIMS Kokyuroku Bessatsu* **B52** (2015) 263–282.

Akira Shudo and Ruriko Ohashi: Numerical verification of the exact WKB formula for the generalized Landau-Zener-Stueckelberg problem, *Advances in Science, Technology and Environmentology*, Special issue : ASTE (Waseda University) **B11** (2015) 75–80.

Yasutaka Hanada, Akira Shudo and Kensuke S. Ikeda: Resonance-assisted tunneling in integrable and nonintegrable systems, *Advances in Science, Technology and Environmentology*, Special issue : ASTE (Waseda University) **B11** (2015) 127–130.

Hiromitsu Harada and Akira Shudo: Non-linear resonances and singularity structures of complex classical dynamics, *Advances in Science, Technology and Environmentology*, Special issue : ASTE (Waseda University) **B11** (2015) 131–134.

Atushi Tanaka and Taksu Cheon: A topological formulation for exotic quantum holonomy, *Nanosystems: physics, chemistry, mathematics* **6** (2015) 786–792.

3) 学会講演

● 日本物理学会 2015 年秋季大会 2015 年 9 月 16 日–9 月 19 日 (関西大学)

花田康高, 首藤啓, 池田研介: 非可積分系におけるトンネル分裂の階段構造について

吉田 賢典, 首藤 啓: 強いカオス系における古典軌道間の相関と波動関数の干渉

原田浩充, 首藤啓: 標準型ハミルトン系の古典力学とトンネル分裂

池田研介, 花田康高, 首藤啓: インスタントン-非インスタントン転移の実半古典論

田中篤司, 全卓樹: 新奇な量子ホロノミーの非断熱拡張の例

● 日本物理学会 第 71 回年次大会 2016 年 3 月 19 日-22 日 (東北学院大学 泉キャンパス)

花田康高, 首藤啓, 池田研介: 非可積分系におけるトンネル分裂の階段構造について II

吉田 賢典, 渡邊 真悟, 首藤 啓: 古典系における動的局在と区分線型面積保存写像における軌道の異常拡散について

原田浩充, 首藤啓: 標準型ハミルトン系のトンネル分裂と複素古典軌道のトポロジー

国内研究会

● 数理解析研究所研究会 『計算機を援用した完全 WKB 解析の研究 —仮想的変わり点の周辺を中心として—』 2015 年 6 月 22 日-23 日 (京都大学)

首藤 啓: Quantum tunneling in nonintegrable systems: beyond the leading order semiclassical description (招待講演)

● 数学協働プログラム, 平成 27 年度ワークショップ 『大自由度分子系における化学反応機序の理解と制御』 2015 年 11 月 30 日-12 月 1 日 (北海道大学)

首藤 啓: 非可積分系のトンネル効果 (招待講演)

● 量子論の諸問題と今後の発展 (QMKEK6) 2016 年 2 月 17, 18 日 (高エネルギー加速器研究機構)

田中篤司: 断熱的な時間発展の結果は経路のトポロジーで決まる

国際会議

● Second Dynamics Days Central Asia, May 25-27, 2015 (Khiva, Uzbekistan)

A. Shudo: Nonadiabatic transition in multilevels and the exact WKB method (invited)

Atushi Tanaka: A topological formulation for exotic quantum holonomy (invited)

● International Workshop on Ray & Wave Mechanics in 2D Microcavity and Related Systems, July 4-5, 2015 (Seoul, Korea)

A. Shudo: The existence of infinitely many stability islands and sticky dynamics in a piecewise linear map (invited)

● The 14th Christmas symposium of Physicists, December 10-12, 2015 (Maribor, Slovenia)

A. Shudo: The existence of infinitely many stability islands and sticky dynamics in a piecewise linear map (invited)

● The 4th International Workshop on Microcavities and Their Applications, December 1–4 (Hokkaido Univ)

Normann Mertig, Felix Fritzsche, A. Bäcker, Roland Ketzmerick: Complex Paths for Resonance-Assisted Tunneling

● The Global Human Resource Program Bridging across Physics and Chemistry, January 29, 2016 (Tokyo Metropolitan University)

Hiromitsu Harada, Akira Shudo: Exact solution of one-dimensional normal form Hamiltonian system

Kensuke Yoshida, Akira Shudo: Semiclassical analysis of dynamical Anderson localization in chaotic systems

Hajime Yoshino, Yasutaka Hanada, Akira Shudo: Quantum mechanics in open systems

4) 著書等

北原和夫, 田中篤司 (訳): 「ファインマン 経路積分の発見」 ローリー・ブラウン編 (岩波書店)

量子凝縮系理論研究室

1. 研究活動の概要

1) 1次元ボーズ・フェルミ混合系に対する原子間相互作用の効果

リング形状に原子集団を閉じ込めることが実験的に可能になった上、電氣的に中性な原子があたかも磁場を感じているかのような状況を作り出す「人工ゲージ場」の作成も現在では可能になっている。これにより、電子系で観測されてきた永久電流が、原子系でも実現できることになった。しかし固体に対比できる系が存在しないボーズ・フェルミ混合系の永久電流については、未解明な点が多いことから、この系の諸性質について理論的に解析を行った。とくにボーズ・フェルミ原子間の相互作用が特定の大きさの引力の時、ボーズ原子の超流動性が上昇する現象について量子モンテカルロシミュレーションを多用して調べ、さらには繰り込み群計算を用いて発生する現象の解析を行い、定性的理解を得た。[森]

2) スピン軌道相互作用を持つボーズ原子系へのフェルミ原子導入の影響

電荷を持たない中性原子にはスピン軌道相互作用しない。しかし見かけ上同じ相互作用をする原子系をレーザにより人工的に作成することが可能になった。電子系においてはスピン軌道相互作用の効果はさまざまな側面から研究が進められているが、人工スピン軌道相互作用の原子系への効果は、ボーズ系、さらにはボーズ・フェルミ混合系については知見がほとんどなかった。中でももっとも解析が遅れているボーズ・フェルミ混合系において、スピン軌道相互作用の効果を変分法等を駆使して解析し、基底状態の相図をさまざまなパラメタ空間において明らかにした。その結果、フェルミ原子をわずかな量だけ導入しただけで、ボーズ原子系の振る舞いに大きな変化が生じることがわかった。[森]

3) ボーズ・フェルミ混合系超流動の音波

近年、ボーズ・フェルミ混合系超流動が実現し、盛んに研究されている。超流動では第一音波、第二音波と呼ばれる特徴的な音波が観測されるが、第二音波は超流動成分と常流動成分が両方存在しないと励起されない音波であり、超流動の熱力学的性質を強く反映する。そこで、ボーズ・フェルミ混合系超流動の音波について調べた。特に、Landauの二流体モデルを用いて現象論に解析し、3つの音波が存在することを明らかにし、それぞれの音波の性質を明らかにした。

[荒畑]

4) ボーズ原子気体超流動における渦糸の発生機構

超伝導の渦糸との類似性から、ボーズ原子気体超流動での渦糸は多く研究されているが、現在構築されている理論の多くが、絶対零度で原子気体が全て超流動であると近似したものである。このような理論では熱的な散逸の効果は人工的にパラメタとして与えられており、散逸のメカニズムまでは考えられていない。そこで、有限温度におけるボーズ原子気体超流動渦糸について数値シミュレーションを行い、これまで無視されていた散逸の効果によって渦糸が発生することを明らかにした。[荒畑]

5) 一様磁場中のスピナイスに対するモンテカルロ法を用いた研究

希土類化合物 $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ や $\text{Ho}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ などのスピナイスの静的動的性質に関する研究が精力的に行われている。特にアイスルールの破れを表すディフェクトのもつ性質に起因した興味深い現象が幾つか報告され注目されている。本研究では一様磁場中でのスピナイスの物性を調べる為、新たなモンテカルロ法を考案した。従来のシングルスピンフリップを用いる方法では低温において所謂スピNFLリージングと呼ばれる困難があった為、高精度の計算が出来なかったが、クラスター表現に基づくループストリングアルゴリズム [Phys. Rev. B **90** (2014) 220406(R)] により同困難は完全に解消された。我々は同ア

ルゴリズムを参考に、更に磁場によるエネルギー準位の分裂を考慮し7種類のグラフを導入しグラフ分割の問題を解いた。新しいクラスターアルゴリズムを用いて磁場中で実現されるカゴメアイスの残留エントロピーを求め、厳密値とよく一致することを確認した。一方、磁場を強くしていくと系の状態更新が非効率となる事が判明したが、この事は解決すべき課題として残っている。[大塚]

6) 二次元格子模型の無秩序相での相関関数が示す普遍性に関する研究

二次元格子上に定義された古典スピン模型が無秩序相にて示す相関関数の普遍性について調べている。これまで同相の相関関数に対してはオルンシュタイン・ゼルニケ型の等方的な相関長を持つ関数形を用いた解析がなされてきたが、実際は相関長は格子の持つ対称性や離散性に起因する異方性を持ち、それにより結晶は異方的な平衡形を持つことが知られている。これに対して最近 Fujimoto は sn 関数を用いた普遍的な相関関数の近似式を提案している。それによると任意の二次元格子模型の相関関数は、振幅、相関長、異方性パラメタ (b) の3つの量を用いて普遍的に特徴づけられる。我々はこの予想を確かめる為、本年度は蜂の巣格子上に定義された状態数 $q = 2$ の強磁性ポッツ模型について、その相関関数を Evertz-Von del Linden の無限系アルゴリズムによるモンテカルロ法を用いて精密に求め、上記パラメータを決定した。解析結果によると相関関数の普遍式を用いることで相関長を極めて高精度で計算できることが分かった。現在、我々は状態数 $q = 1, 3, 4$ のポッツ模型について調べている。[大塚, 藤本雅文 (奈良医大)]

2. 研究業績

1) 論文

Hiromi Otsuka: Loop-String Algorithm for Monte Carlo Simulations of Dipolar Spin Ice, *Phys. Rev. B* **92** (2015) 134401.

2) 和書

森弘之 (訳) : 「スタンフォード物理学再入門 量子力学」レオナルド・サスキンド, アート・フリードマン (日経 BP)

森弘之 (分担執筆) : 「人物でよむ物理法則の事典」米沢富美子総編集 (朝倉書店)

3) 学会講演

● 日本物理学会 2015 年秋季大会 2015 年 9 月 16-19 日 関西大学 千里山キャンパス

小野 洋輔, 坂本 良平, 菅 聡明, 荒畑 恵美子, 森 弘之: 有限温度のボーズ・フェルミ混合超流動原子気体の熱力学的性質

坂本 良平, 小野 洋輔, 菅 聡明, 荒畑 恵美子, 森 弘之: スピン軌道相互作用を持つ Bose-Fermi 混合系の性質

藤本雅文, 大塚博巳: 三角格子ポッツ模型における二点相関関数と普遍的代数曲線

● 日本物理学会 第 71 回年次大会 2016 年 3 月 19-22 日 東北学院大学 泉キャンパス

菅 聡明, 森 弘之: 1 次元 Bose-Fermi 混合系における相互作用の効果

坂本 良平, 小野 洋輔, 荒畑 恵美子, 森 弘之: スピン軌道相互作用を持つ Bose-Fermi 混合原子系の基底状態

国内研究会

●The Global Human Resource Program Bridging across Physics and Chemistry, Tokyo Metropolitan University, January 2016.

R. Sakamoto, Y. Ono, S. Suga, E. Arahata and H. Mori: Ground state phase diagram of Bose-Fermi mixture with a synthetic spin-orbit coupling

Y. Ono, R. Sakamoto, S. Suga, E. Arahata and H. Mori: Sound modes of a superfluid of Bose- Fermi mixture at finite temperatures

S. Suga, Y. Ono, R. Sakamoto, E. Arahata and H. Mori: Interaction effects on transport phenomena in Bose-Fermi mixture system

強相関電子論研究室

1. 研究活動の概要

強相関電子論研究室では、量子臨界点近傍の新奇な量子多体状態や、遷移金属化合物、希土類化合物、アクチノイド化合物などのいわゆる強相関電子系物質の磁性や超伝導に関する理論的研究を行っている。これらの系では電子間のクーロン斥力の影響が非常に強く、従来のバンド理論を超えた理論的枠組みが必要となるが、本研究室では、場の量子論的手法や計算物理的手法を駆使して研究を行っている。2015年4月に服部一匡准教授が着任し、本研究室のスタッフは2名となった。2015年度の研究室構成は、2名のスタッフ以外に、大学院生7名、卒研3名であった。以下は、2015年度に行った主な研究の概要である。

1) f^7 電子系の近藤効果

最近、Eu化合物において、Ce化合物に似た近藤効果の振る舞いが観測され、注目を集めている。化合物におけるEuの価数は2通りあり、 Eu^{3+} は4f電子が6個で全角運動量 $J=0$ であるが、 Eu^{2+} は4f電子が7個で $J=7/2$ である。このうち、 Eu^{2+} の場合にCe化合物との接点がある。スピン軌道相互作用が大きい極限で成り立つ $j-j$ 結合描像に基づいて f^7 電子状態を考察すると、1電子の全角運動量 $j=5/2$ の状態に6個の電子が入って閉殻構造となり、 $j=7/2$ に入る1個の電子が全角運動量 $J=7/2$ を担うことがわかる。すなわち、 $j=7/2$ の1個のf電子が伝導電子と混成することにより、 Ce^{3+} のような近藤効果が起きることが想像できる。しかし、一般に、希土類化合物においては、スピン軌道相互作用よりもクーロン相互作用 U の方が大きく、 LS 結合描像で考えるのが普通である。上記のように都合良く、 $j-j$ 結合描像に基づいて、Eu化合物における近藤効果を理解することは難しいように思われる。実際の化合物においては、 λ と U の両方が有限であるので、 f^7 電子状態の波動関数は、 LS 描像と $j-j$ 結合描像の中間的なもので与えられる。すなわち、 λ と U の両方が有限な場合に、Eu化合物の近藤効果が理解できるかどうか、特に、 λ/U の比が現実的な値のときにCe系のような近藤効果が現れるのかどうか、興味がある。

そこで本研究では、数値繰り込み群 (NRG) 法を用いて、7軌道アンダーソンモデルを f 電子が7個の場合に詳細に解析した。伝導電子については1バンドを考慮したので、基本的にはアンダースクリーニング近藤効果が起こると考えられるが、 f 電子と伝導電子の混成 V が大きくない場合は、かなり低温まで $\log 8$ のエントロピーが残る。この8重縮退はフント則によるものである。そのような状況で λ を考慮すると、まず、 V の効果で8重縮退が解けて2重縮退が残り、それが伝導電子との混成によって近藤効果を生じ、エントロピーがゼロになる様子が見出された。この近藤効果が起こるには、 λ は U に比べて格段に大きい必要はなく、むしろ意外と小さく、 λ/U は0.1のオーダーでよいことがわかった。これは、実際の物質で見られる現実的な値である。また、結晶場ポテンシャルを考慮した場合でも、基底状態が Γ_7 であれば、同様の振る舞いを見出した。なお、本研究では価数揺動のことは考えなかったが、今後、Eu化合物の重い電子状態を理解するためには、価数揺動の影響も考慮する必要があると考えられる。

2) パイエルス・アンダーソンモデルの近藤効果

最近、カゴ状構造物質において、ラットリングと呼ばれるカゴに内包されたゲストイオンの非調和振動に起因する磁性や超伝導のさまざまな現象に注目が集まっている。特に、磁場に鈍感な重い電子状態に関連して、ラットリングによる近藤効果が盛んに研究されている。これまで、ラットリングと局所電子密度が結合するホルスタイン・アンダーソンモデルに基づく研究が多く行われてきたが、伝導電子はカ

ゴに由来していることから、ラットリングによって、局所電子と伝導電子の混成が振動すると考えられる。これは、パイエルスフォノンを考慮することになる。そこで、アンダーソンモデルの混成項にパイエルスフォノンを加え、さらに、局在電子と伝導電子の間のクーロン相互作用も考慮したパイエルス・アンダーソンモデルにおける近藤効果を考察した。

まず、このモデルの保存量として、電荷、スピンの加えて、パリティ P があることに注意する。パイエルス・アンダーソンモデルの混成項は $\sum_{\mathbf{k},\sigma}(a+a^\dagger)(c_{\mathbf{k}\sigma}^\dagger d_\sigma + \text{h.c.})$ である。ここで、 $c_{\mathbf{k}\sigma}$ は波数ベクトル $\mathbf{k}$ 、スピン σ の伝導電子の消滅演算子、 d_σ はスピン σ の局在電子の消滅演算子、 a はパイエルスフォノンの消滅演算子である。この混成項から、局在電子数 N_d とパイエルスフォノンの数 N_{ph} の和 $N_d + N_{\text{ph}}$ の変化は、0 か ± 2 に限られることになり、 $N_d + N_{\text{ph}}$ の偶奇が保存量になることがわかる。そこで、パリティを $P = (N_d + N_{\text{ph}}) \bmod 2$ で定義し、 $P = 0$ を偶パリティ、 $P = 1$ を奇パリティと呼ぶ。

本研究では、パイエルス・アンダーソンモデルの比熱、エントロピー、電荷感受率、スピン感受率、パリティ感受率を数値繰り込み群法によって計算し、この系で生じる近藤効果の様子を調べた。電子・フォノン結合が弱い領域では、パリティ自由度は高温で凍結し、低温でスピン近藤効果が現れることがわかった。一方、電子・フォノン結合が強い領域では、高温でまずスピン自由度が凍結し、低温までパリティの擬縮退が残ることを明らかにした。パリティ擬縮退が解ける温度において、比熱にショットキー型のピークが現れることを示した。今後は、平均 2 乗変位などフォノンに関する量の温度依存性を調べて、強結合領域における電子・フォノン状態の様相を明らかにする。

3) 多軌道系における超伝導秩序変数の分類

近年の種々の新しい超伝導体の発見により、超伝導発現機構に電子の軌道自由度が重要な役割を果たしているということが徐々に明らかになってきた。超伝導を特徴付ける秩序変数は電子のエネルギーギャップ関数の対称性であるが、その分類理論はここ 20 年ほどの間確立されたものとして実験結果の解釈に用いられてきた。本研究では、多軌道系では従来の分類学に収まらない新奇な超伝導状態が実現可能であることを群論的考察と具体的なモデルをもとに BCS 近似を用いた計算により明らかにした。

具体的には系の点群が D_6 対称性の場合かつ、電子の既約表現が Γ_9 の場合のクーパー対の時には今までにない奇パリティ超伝導状態が実現する。またその他の対称性の系においても、異なる軌道のクーパー対を形成する場合に従来の分類学では現れない新しい超伝導状態が発現することを明らかにした。さらに、多軌道系においては局所的な相互作用のみを用いて超伝導ギャップ関数にノードが現れる一般的な機構を明らかにすることに成功した。本研究では時間反転、空間反転対称性がある Symmorphic な系の場合の分類を扱ったが、その条件を緩めた場合の分類についても今後の研究の発展が期待出来る。

2. 研究業績

1) 論文

Takashi Hotta: Effect of Spin-Orbit Coupling on Kondo Phenomena in f^7 -Electron Systems, *J. Phys. Soc. Jpn.* **84** (2015) 114707-1-12

Ryosuke Yamamura and Takashi Hotta: Quantum Interference of Surface-Induced Friedel Oscillations Enhanced by Fermi-Surface Nesting in Layered Manganites, *Phys. Procedia* **75** (2015) 902-910

Yasuhiro Kondo and Takashi Hotta: Key Role of Rutile Structure for Layered Magnetism in Chromium Compounds, *Phys. Procedia* **75** (2015) 671-678

Tomoaki Agatsuma and Takashi Hotta: Fermi-Surface Topology and Pairing Symmetry in BiS₂-Based Layered Superconductors, *J. Magn. Magn. Mater.* **400** (2016) 73-80

Ryosuke Yamamura and Takashi Hotta: Valence Imbalance of Manganese Ions between Surface and Bulk Enhanced by Fermi-Surface Structure in Layered Manganites, *J. Phys.: Conf. Ser.* **683** (2016) 012042

2) 学会講演

● 日本物理学会 2015 年秋季大会 2015 年 9 月 16 日 (水) – 19 日 (土) (関西大学)

山村諒祐, 堀田貴嗣: 層状マンガン酸化物におけるフェルミ面構造によって増強される表面誘起のフリーデル振動

松井大, 堀田貴嗣: 数値繰り込み群法によるパイエルス・アンダーソンモデルにおける近藤効果の研究

堀田貴嗣: f^7 電子系の近藤効果

近藤泰弘, 堀田貴嗣: モンテカルロ・シミュレーションを用いたクロム化合物の層状磁気構造の研究

● 日本物理学会 2016 年第 71 回年次大会 2016 年 3 月 19 日 (土) – 22 日 (火) (東北学院大学)

服部一匡: 四面体配置スピンによる近藤効果 (シンポジウム講演)

野本拓也, 服部一匡, 池田浩章: 多軌道超伝導体における多極子超伝導の理論研究

松井大, 服部一匡, 堀田貴嗣: 数値繰り込み群法によるパイエルス・アンダーソンモデルの強結合領域における近藤効果の研究

国内研究会

● 科学研究費補助金 新学術領域研究 (研究領域提案型) 領域番号: 2704 J-Physics: 多極子伝導系の物理キックオフミーティング 2015 年 9 月 14 日 (月) – 15 日 (火) (神戸大学)

服部一匡: 反強四極子秩序のモンテカルロ解析

国際会議

● International Conference on Magnetism 2015 (ICM2015), Barcelona, Spain, July 6 – 10, 2015

Takashi Hotta and Tomoaki Agatsuma: Fermi-Surface Topology and Pairing Symmetry in BiS₂-Based Layered Superconductors (oral)

Ryosuke Yamamura and Takashi Hotta: Quantum Interference of Surface-Induced Friedel Oscillations Enhanced by Fermi-Surface Nesting in Layered Manganites

Yasuhiro Kondo and Takashi Hotta: Key Role of Rutile Structure for Layered Magnetism in Chromium Compounds

● TMU International Symposium on “New Quantum Phases Emerging from Novel Crystal Structure”, Minami-Osawa Campus, Tokyo Metropolitan University, September 24 – 25, 2015

Ryosuke Yamamura and Takashi Hotta: Valence Imbalance of Manganese Ions between Surface and Bulk Enhanced by Fermi-Surface Structure in Layered Manganites

● TMU International Symposium on “The Global Human Resource Program Bridging across Physics and Chemistry”, Minami-Osawa Campus, Tokyo Metropolitan University, January 29, 2016

Masahiro Matsuo and Takashi Hotta: Research of ground-state phase diagram of the boson-fermion mixed system by mean-field approximation

Ryosuke Yamamura and Takashi Hotta: Surface-induced charge inhomogeneity in layered manganites

高エネルギー物理実験研究室

1. 研究活動の概要

高エネルギー物理実験研究室では、日本が世界をリードしている B ファクトリーにおける、粒子・反粒子対称性の破れの研究を始めとする高エネルギー衝突型加速器実験の他、加速器や原子炉からのニュートリノを検出する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) Belle 実験, Belle II 実験

KEKB 加速器の 50 倍のルミノシティを目指す SuperKEKB 加速器の試験運転が平成 28 年 2 月 1 日より開始され、2 月 10 日に陽電子リング、続いて 2 月 26 日に電子リングにおいて、ビームの蓄積に成功した。現在は蓄積電流を徐々に増加させながらバックグラウンドの測定及びビームパイプの焼きだしを実施している。Belle 検出器の upgrade 版である Belle-II 検出器の建設が始まり、TOP カウンターの設置が進行中である。

当研究室では Belle 検出器エンドキャップ部の粒子識別装置の性能を改善するために、エアロゲルを輻射体としたリングイメージチェレンコフ検出器 (A-RICH) の開発を進めている。A-RICH で使用する新型の高性能光センサーとして、HAPD (ハイブリッド・アヴァランシェフォト・デテクター) 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、検出器に使用される 420 台が既に納品され、受け入れ検査にも合格している。これらの HAPD からの信号読み出しに使用される ASIC の開発は本研究室が担当しており、実機に搭載される最終版の SA03 を 2500 個製作し、その性能の評価を行い必要な 1680 個を選別した。また、A-RICH 設置後に HAPD の性能をモニターするために、青色 LED を光源として光ファイバーを用いて一様な光量を HAPD に照射するモニターシステムを構築した。H28 年夏の A-RICH の設置に向けての作業がいよいよ大詰めを迎えている。

一方、当研究室は Belle II のデータ収集システムの開発にも力を入れている。データ取得中に事象再構成などの物理解析を行いデータ保存の可否を決定するソフトウェアトリガーシステムの開発も行なっている。本年度は Belle II 実験本測定に使用するコンピューターファームにシステムをインストールし、性能評価を行った。この結果ビームバックグラウンドが多いと予想される実験開始直後の環境やそれ以上に厳しい測定環境でも十分な性能を達成できることが確認された。またモンテカルロシミュレーションにより作成したサンプルデータを使用し様々な崩壊モードに対して 90% 以上の高い検出効率を達成できることが確認された。またデータ収集系全体を管理するスローコントロールシステムやデータ記録システムなどデータフローの制御に直接かかわるシステムの開発も行っており、両システムはすでに Belle II 検出器の一部を使用した宇宙線試験で運用されている。また 2016 年 4 月にドイツ DESY 研究所にて崩壊点検出器の電子ビーム試験が予定されており、学振特別研究員の今野が 2 週間現地に滞在し、システムの準備と性能試験を行った。ビーム試験の結果も含めスローコントロールシステムについては 6 月にイタリアで行われる Real time conference 2016 で報告する予定である。

2) Double Chooz 実験

本研究室では国際共同実験 Double Chooz に参加し、ニュートリノの基本的な性質を担う混合角 θ_{13} の精密測定を行っている。近年、DoubleChooz 実験・T2K 実験をはじめとする原子炉・加速器ニュートリノ振動実験により、 θ_{13} が有限値を持つことが示された。有限値を持つことが明らかになった今、将来の CP 非保存パラメータ測定実験に向けて、その精密測定化の意義は高まっている。首都大学グループで

は、混合角 θ_{13} の振動解析・ステライルニュートリノ探索・検出器性能の評価・オフラインツールの開発運用・高電圧電源システムの維持管理などを担当しており、実験グループに大きく貢献している。

本年度は、2015 年 1 月より 2 基同時測定を開始した Double Chooz 検出器で取得されたデータの処理を共同研究者らとともにに行った。データ処理上の問題であった、刷新されたエレクトロニクスと新たに設置された検出器のためのツールアップグレード、及びデータ処理自動化などの課題解決を行った。これにより、3 月に行われた Moriond 国際会議に用いられた 9 ヶ月分のデータ処理を遂行した。また、共同研究者らと協力して検出器性能やバックグラウンドの研究を推進した。特に、検出器性能を理解する過程で、前置・後置検出器の液体シンチレータの減衰長パラメータの違いに由来するエネルギー応答の位置一様性について研究を行い、応答の違いを理解して MC シミュレーションを調整した。さらに、混合角 θ_{13} の振動解析ツールの開発を行い、 θ_{13} 測定結果を得ることに貢献した。得られた結果は、Moriond 国際会議にて報告された。次年度は、統計量を増やして、より高精度かつ堅牢な θ_{13} 測定を行う。また、振動解析手法を拡張してステライルニュートリノ探索も行う予定である。

3) DCBA 実験

ニュートリノは、電荷をもたない「電子の仲間」(=レプトン)であり、弱い相互作用せず物質のとの相互作用が極めて弱いことから、その多くの性質は今だに分かっていない。その 1 つに粒子と反粒子の区別がある。電子は電荷を持っているため、粒子と反粒子の区別はその電荷の符号によって明白である。しかしながらニュートリノは電荷を持たないため、そもそも粒子と反粒子の区別があるのかどうか分かっていない。粒子と反粒子の区別がない粒子をマヨラナ粒子と呼び、素粒子の標準模型を超える多くの理論では、ニュートリノがマヨラナ粒子であることを支持している。もしニュートリノがマヨラナ粒子である場合、ニュートリノレス二重ベータ崩壊という極めて稀な原子核壊変が起こることが予想されている。

DCBA 実験では、将来的なニュートリノレス二重ベータ崩壊の観測を目指して、新しい測定原理(ベータ線の運動量観測)に基く実験装置の開発を進めている。二重ベータ崩壊を起す原子核である ^{100}Mo を 9.6% 含むモリブデンの板を 2 枚のドリフトチェンバーで囲み、超伝導ソレノイドコイルを用いて一様磁場を印加した実験(DCBA-T2.5)を 2011 年から行なっている。本年度は、Geant4 を用いたモンテカルロシミュレーションを整備し、DCBA-T2.5 の検出効率やエネルギー分解能の評価を行った。

また、検出器の大型化に向けて、解析の自動化を進めた。次世代の実験として、大型化かつチャンネル間隔を微細化した実験装置(DCBA-T3)の開発を進めており、本年度は読み出しエレクトロニクスの評価と製作を行った。

4) T2K 実験

茨城県東海村に建設した陽子加速器(J-PARC 加速器)を用いて大強度のミューニュートリノビームを生成し、295km 離れた岐阜県飛騨市にある大型水チェレンコフ検出器スーパーカミオカンデで打ち出されたニュートリノを観測する、ニュートリノ振動実験を行なっている。T2K 実験は 2013 年 7 月にミューニュートリノから電子ニュートリノへ変化する新しいニュートリノ振動を発見した。ハドロンホールで発生した放射能漏洩事故に伴う約 1 年間の実験停止期間を経て実験再開し、現在は将来的なニュートリノにおける CP 対称性の破れの発見を目指して、反ミューニュートリノビームを用いたニュートリノ振動実験を行なっている。本年度は、反ミューニュートリノビームを用いたニュートリノ振動の測定を行い、反ミューニュートリノによるニュートリノ振動のパラメータは、ミューニュートリノによる振動パラメータと矛盾がないとの結果を得た。

5) 宇宙線ミュオンを用いた原子炉の透視

高エネルギー加速器研究機構および筑波大学の研究者と共同で、2011年3月に発生した東日本大震災に伴う福島第一原発事故で損傷したとされる原子炉炉心部を、宇宙線ミュオンを用いて調査する研究を行っている。プラスチックシンチレータを荷電粒子が通過した際の発光を波長変換ファイバーを通して半導体光検出器(MPPC)で読み出す実験技術を応用した、宇宙線ミュオンの飛来方向を測定する測定器を作成し、2011年より2013年まで東海第二原発を用いた実証試験を行った。その後、福島第一原発の廃炉に向けた取り組みの一つとして、溶融したと考えられる一号機から三号機の原子炉の炉心の核燃料の状態の調査に協力している。

本年度は一号機の建屋の周りに2台のミュオン検出器を設置し、炉心および燃料プールを通過してくるミュオンの数(の減衰率)を用いて炉心および燃料プール内の燃料の調査を行い、その結果を国際廃炉研究機構(IRID)に報告した。また、新たに小型のミュオン測定装置を開発した。この測定装置を2号機の原子炉建屋の西側に設置して、2号機の炉心の透視を進めている。

6) 岩塩鉱や南極氷床を用いた超高エネルギーニュートリノ検出器の研究開発

超高エネルギーニュートリノ($> 10^{16} \text{eV}$)は宇宙空間において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と推測される。飛来数が極度に低いため10事象/年の検出には50Gtの巨大検出媒質が必要となる。岩塩鉱や南極氷床中での巨大検出媒質中の超高エネルギーニュートリノ反応シャワーによる局所的な温度上昇により誘電率の局所的な上昇が惹起される。2次元有限要素法によるシミュレーションでは1Jのシャワーエネルギーに対して約 10^{-8} の電場反射率が得られた結果を利用してフェーズドアレイレーダーによる検出器の概念設計を行った。

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

CERNの24GeV陽子シンクロトロンで陽子ビームをターゲットへ衝突させ、その時発生する $\pi^+\pi^-$ や $K^+\pi^-$ 原子の寿命測定からそれぞれの散乱長を求めるとともに長寿命 $\pi^+\pi^-$ 原子を発見した。さらに高エネルギーSPS陽子シンクロトロンを利用するラムシフト測定の検討を行った。

8) 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高次QED過程であるポジトロニウムの5光子稀崩壊現象の実験を行っている。前年度までに行ったGRACEによるQED計算とGEANT4を使用した検出器シミュレーションの結果、5光子崩壊事象の検出には、検出効率とS/N比を大幅に高める必要があることが分かった。陽電子線源を検出器中央に置き、ガンマ線検出器の鉛シールドを延長し、さらにデータ収集電子回路や解析手法も改善することにより、5光子崩壊事象を1.2年程度で検出できる見通しがついた。今年度は、バックグラウンド源となるコンプトン散乱を起こしにくい、低物質量の陽電子線源を購入し、検出器の改造を行った。

2. 研究業績

1) 論文

S. Iwata *et al.*: Particle identification performance of the prototype aerogel RICH counter for the Belle II experiment, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, **No.3** (2016) 033H01

V. Chobanova *et al.* (Belle Collaboration): First observation of the decay $B^0 \rightarrow \psi(2S)\pi^0$, *Phys.Rev. D* **93** (2016) 031101(R)

N.K. Nisar *et al.* (Belle Collaboration): Search for the rare decay $D^0 \rightarrow \gamma\gamma$ at Belle, *Phys.Rev. D* **93** (2016) 051102

- Rajeev Kumar *et al.* (Belle Collaboration) : Inclusive decays of B-meson to J/ψ and χ_{c1} using $386 \times 10^6 B\bar{B}$ events, *Pramana* **86** (2016) 471-477
- Y.Abe *et al.* (Double Chooz Collaboration) : Measurement of θ_{13} in Double Chooz using neutron captures on hydrogen with novel background rejection techniques, *JHEP* **1601** (2016) 163
- R. Glattauer *et al.* (Belle Collaboration) : Measurement of the decay $B \rightarrow D\ell\nu_\ell$ in fully reconstructed events and determination of the Cabibbo-Kobayashi-Maskawa matrix element $|V_{cb}|$, *Phys.Rev. D* **93** (2016) 032006
- P. Vanhoefer *et al.* (Belle Collaboration) : Study of $B^0 \rightarrow \rho^+\rho^-$ decays and implications for the CKM angle ϕ_2 , *Phys. Rev. D* **93** (2016) 032010
- P. Hamer *et al.* (Belle Collaboration) : Search for $B^0 \rightarrow \pi^-\tau^+\nu_\tau$ with hadronic tagging at Belle, *Phys.Rev. D* **93** (2016) 032007
- Y.Y. Chang *et al.* (Belle Collaboration) : Observation of $B^0 \rightarrow p\bar{\Lambda}D^{(*)-}$, *Phys. Rev. Lett.* **115** no.22 (2015) 221803
- R. Seidl *et al.* (Belle Collaboration) : Inclusive cross sections for pairs of identified light charged hadrons and for single protons in e^+e^- at $\sqrt{s} = 10.58\text{GeV}$, *Phys. Rev. D* **92** (2015) 092007
- M. Masuda *et al.* (Belle Collaboration) : Study of π^0 pair production in single-tag two-photon collisions, *Phys. Rev. D* **93** (2016) 032003
- M. Huschle *et al.* (Belle Collaboration) : Measurement of the branching ratio of $\bar{B} \rightarrow D^{(*)}\tau^-\bar{\nu}_\tau$ relative to $\bar{B} \rightarrow D^{(*)}\ell^-\bar{\nu}_\ell$ decays with hadronic tagging at Belle, *Phys. Rev. D* **92** no.7 (2015) 072014
- S. Nishida *et al.* : Development of a 144-channel Hybrid Avalanche Photo-Detector for Belle II ring-imaging Cherenkov counter with an aerogel radiator, *Nucl. Instrum. Meth.* **A787** (2015) 59-63
- A. Abdesselam *et al.* (BaBar and Belle Collaboration) : First Observation of CP Violation in $\bar{B}^0 \rightarrow D_{CP}^{(*)}h^0$ Decays by a Combined Time-Dependent Analysis of BABAR and Belle Data, *Phys. Rev. Lett.* **115** (2015) 121604
- C. Oswald *et al.* (Belle Collaboration) : Semi-inclusive studies of semileptonic B_s decays at Belle, *Phys. Rev. D* **92** (2015) 072013
- B. Pal *et al.* (Belle Collaboration) : Evidence for the decay $B^0 \rightarrow \eta\pi^0$, *Phys. Rev. D* **92** (2015) 011101
- K.Abe *et al.* (T2K Collaboration) : Upper bound on neutrino mass based on T2K neutrino timing measurements, *Phys. Rev. D* **93** (2016) 012006
- B. Adeva *et al.* (DIRAC Collaboration) : First observation of long-lived $\pi^+\pi^-$ atoms, *Phys. Lett. B* **751** (2015) 12-18

2) 国際会議報告

T. Konno *et al.* : The Slow Control and Data Quality Monitoring System for the Belle II Experiment, *IEEE TNS* **62** (2015) 897-902

S. Yamada, T. Konno *et al.* : Data acquisition system for the Belle II experiment, *IEEE TNS* **62** (2015) 1175-1180

S. Yamada, T. Konno *et al.* : Global data processing system with onboard CPU cards for the Belle II experiment, *Real Time Conference (RT), 2014, 19th IEEE-NPSS*, **1-2** 2015

T. Konno : Status and prospects of the Belle II experiment, *Journal of Phys Conf. Ser.* **627** (2015)

3) 学会講演

● 日本物理学会 2015 年秋季大会 2015 年 9 月 25～28 日（大阪市立大学杉本キャンパス）

今野智之, 伊藤領介, 中尾幹彦, 鈴木聡, 山田悟, 上原貞治 : Belle II 検出器・データ収集制御ソフトウェアシステムの現状

柿崎正貴, 伊藤隆晃, 住吉孝行, 角野秀一, 浜津良輔ほか : 二重 β 崩壊実験 DCBA の現状とシミュレーションによる検出器性能評価

梶原春花, 角野秀一 : Belle II 実験におけるレベル 3 ソフトウェアトリガーの開発

● 日本物理学会 第 71 回年次大会 2016 年 3 月 19～22 日（東北学院大学泉キャンパス）

町田篤志, 住吉孝行, 松原綱之, 他 Double Chooz 日本グループ : Double Chooz 検出器におけるエネルギー応答の研究

米永匡伸, 住吉孝行, 角野秀一, 汲田哲郎, 今野智之, 岩田修一, 幡谷航暉ほか : Belle II 実験 A-RICH 用高圧電源制御システムの開発

幡谷航暉, 住吉孝行, 角野秀一, 汲田哲郎, 岩田修一, 米永匡伸ほか : Belle II 実験 A-RICH 用光検出器のためのモニターシステムの開発

柿崎正貴, 伊藤隆晃, 住吉孝行, 角野秀一, 浜津良輔ほか : DCBA 実験における飛跡再構成の性能評価

神田泰地, 汲田哲郎, 浜津良輔, 千葉雅美 : 4 光子検出によるポジトロニウムの 5 光子崩壊事象の研究

原子物理実験研究室

1. 研究活動の概要

分子物質化学専攻・反応物理化学研究室 (城丸春夫教授, 松本淳助教) および連携大学院教授である理化学研究所の東俊行主任研究員との強固な共同研究体制を維持しつつ, 独自性を保った研究とのバランスを取りながら, イオン衝突を中心とした原子・分子物理学の実験的研究を精力的に推進している。

1) 静電型イオン蓄積リングを用いた原子分子の衝突・冷却過程の研究

静電型イオン蓄積リングは, 周回イオンの軌道制御を静電場のみを用いて行うことで, 周回イオン種の質量に関する制限を解決したイオン蓄積リングである。本学設置の静電型イオン蓄積リング TMU E-ring では, 分子物質化学専攻・城丸グループおよび理研の東俊行主任研究員との共同研究として, 昨年度に引き続き星間分子イオンの候補である炭素鎖負イオンを中心に孤立イオンの冷却過程の研究を行った。

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

星間空間での分子負イオンの内部エネルギー冷却過程を解明すべく, これまで直鎖状炭化水素負イオンを蓄積して電子脱離寿命を測定してきた。孤立した環境にある分子は, 電子的に励起されると内部転換を通じて自身の内部エネルギーを分子振動として蓄え, やがて輻射遷移により周囲に赤外光を放出して徐々に冷却される (輻射冷却, 典型的に数 ms – 数百 ms の時定数)。また, 分子の内部エネルギー総和が電子脱離や解離の閾値を超える場合, 脱離・解離を起こしてその内部エネルギーを減ずる。近年, この二つの過程に加えて, 分子の内部エネルギーが分子内電子に集中して電子励起状態となり (逆内部転換), 電子遷移によって蛍光を放出する『再帰蛍光』に起因した速い冷却過程 (時定数 100 μ s 以下) が見つかった。当研究室では, これまでに静電型イオン蓄積リングを用いた炭素鎖分子負イオン C_6^- の研究から, C_6^- 分子の再帰蛍光による速い冷却を発見し, 放出される再帰蛍光 ($C^2\Pi_g^+ \rightarrow X^2\Pi_u$ 遷移, 608 nm) の観測にも成功した。また, 続けて C_4^- を対象に, 測定方法の工夫でこれまで測定できなかった電子脱離しきい値以下の内部エネルギー領域における冷却速度測定を行い, 電子励起準位近傍の内部エネルギーから冷却速度が急激に上昇するという, 再帰蛍光を仮定した冷却速度の理論予想と一致した結果が得られている。

本年度は, 上記のように C_4^- で行った測定手法を C_6^- に適用し, 同様に電子脱離しきい値以下の内部エネルギー領域における冷却速度測定を行った。測定の結果, C_6^- でも電子励起準位近傍の内部エネルギーから冷却速度が急激に上昇する, 再帰蛍光に特徴的な冷却速度の内部エネルギー依存性を観測し, 理論予想とのよい一致を見た。さらに, 昨年度行った C_4^- に対する上記の測定実験を, 蓄積時間を 80 ms まで延ばして実施したところ, 蓄積中にイオンが輻射冷却によって冷却されていく様子が, 2 光子吸収による電子脱離過程の観測から確認された。

また, 上記 C_6^- の冷却過程についてシミュレーション計算を行い, 昨年度に行った再帰蛍光測定の結果と比較した。計算においては, 孤立分子の冷却過程を熱統計過程と考え, C_6^- の振動モード, 電子励起状態 ($A^2\Pi_g^+$, $C^2\Pi_g^+$ の 2 準位) を考慮して内部エネルギーごとの状態密度から輻射遷移, 電子脱離, 再帰蛍光それぞれの速度定数を導出した。得られた速度定数を用いて, C_6^- 生成から時間ごとの蛍光収量, 電子脱離中性粒子収量を求めたところ, こちらも実験結果とよい一致が見られ, 一連の速い冷却過程が逆内部転換に伴う再起蛍光放出に起因することを強く裏付ける結果となった。

(2) 装置・技術開発：

静電型イオン蓄積リングに蓄積されたイオンビームの品質を向上させることで, より長時間の蓄積, 蓄積ビームの低速化など新たな実験の提案が可能となる。そこで, イオンビーム制御技術を応用し, リング内に蓄積されたイオンの運動制御を行うべく研究開発を進めている。本年度は, レーザー冷却技術を利用

した蓄積イオンビームの高品質化・低速化をめざして、 Ca^+ イオンビームに適したレーザー光源の開発を進めている。本体はほぼ完成し、現在出力をあげるべく調整・最適化を行っている。

さらに、現在の蓄積リング実験ではイオン生成を主にレーザーアブレーションイオン源を用いて行っているが、分子イオンはその生成過程で原理上大きな内部エネルギーを持ち、そのエネルギー分布はかなり広い。このような分子イオンを用いた実験では、観測している分子イオンの持つ内部エネルギーを精度よく調べることができず、冷却速度の内部エネルギー依存性について詳細な研究が難しい。そこで、あらかじめ十分に冷却された炭素クラスターイオンを生成しリングに入射するための極低温冷却イオン源の開発を開始した。具体的には、レーザーアブレーションイオン源で生成した高温分子イオンを冷却用のイオントラップ内に一旦蓄積し、冷却用 He バッファガスを導入して二体衝突により内部エネルギーを減ずる。本年度はイオン源の設計にあたってイオン軌道シミュレーションを行い、電極の構造や電位配置を変化させながらトラップ効率を見積もり、最適化を進めている。

2) 超伝導トンネル接合 (STJ) 検出器による中性粒子検出

静電型イオン蓄積リング実験における中性粒子検出への応用を目的として、アレイ型 STJ (Superconducting Tunneling Junction) カロリメータの開発を、理研・産総研の共同研究体制で引き続き進めた。様々な解離生成物を含む 10 keV 程度の生成中性粒子の種類を同定することを目的として、このエネルギー領域で十分なエネルギー分解能が得られる Nb を用いた超伝導トンネル接合 (STJ) 検出器の開発を実施している。STJ 検出器は超伝導体転移温度 T_c の 1/10 程度の温度 (約 0.3 K) で通常動作させるが、我々は素子を改良し、液体 ^4He のポンピングのみにより達成可能な温度でも十分なエネルギー分解能を備えた検出器の開発を目指した。テストビームにより素子特性を計測した結果、我々の用途においては 1.6 K での運転でも一定の性能を有していると結論された。引き続き、電極材料を Nb から NbN にすることで更に温度の高い環境下で動作する素子の開発に着手し、ALD 成膜装置による NbN 層の作成を実施した。

3) 多価イオンの電荷移行反応

太陽風には ppm オーダーと僅かではあるが、炭素より重い元素の高電離原子イオンが含まれている。これらの太陽風多価イオンが宇宙空間の非常に希薄な中性物質と衝突し、電子捕獲によって高励起状態が生成することで軟 X 線を放出する過程が宇宙物理学では注目されている。2015 年 4 月に Harvard 大学で開催され、田沼が招待されたシンポジウムの主題も SWCX (solar wind charge exchange) と呼ばれるこの現象であった。高温プラズマからの発光の場合、電子衝撃が励起の主な機構であるため、電気双極子許容な共鳴線が圧倒的に強くなる。これに対して、電子捕獲では基底状態への遷移がスピン禁制となる状態も生成するため、H 様イオンから He 様イオンが生成する場合、統計重率に従って禁制線の方が共鳴線より 3 倍程度強くなることが理論的に予想されている。しかし、宇宙空間と同じ条件で衝突を起こして実験的に禁制線を観測した例はこれまでになかった。そこで、本研究室では太陽風と同じ速度で H 様イオンと中性気体を衝突させ、生成した He 様イオンをイオントラップに導いて蓄積し、 $1s2s\ ^3S_1$ からの寿命の長い禁制線を観測する装置を開発してきた。様々な工夫を凝らした結果、 O^{7+} から生成した O^{6+} の $1s2s\ ^3S_1 \rightarrow 1s^2\ ^1S_0$ の禁制線の観測に初めて成功した。この発光は約 1 ms の寿命を有するため、太陽風と同じ 300–800 km/s の衝突速度では、十分な発光を起こすまでに 1 km 程度の飛行距離を要し、イオントラップによる長時間の蓄積が必要であった。一方、国際熱核融合実験炉 (ITER) のダイバータに材料として W が用いられるため、不純物としてプラズマに混入する W 多価イオンの分光学的データが求められている。核融合科学研究所との共同研究として W に関する実験を行ってきたが、W は同位体が多いために質量電荷比でイオンビームを選別する実験には適さなかった。そこで、原子番号が 1 つしか変わらない Ta が殆ど安定同位体を持たないことに着目して、多価 Ta イオンに関する分光実験を行っ

た、14 価から 19 価の Ta イオンと O₂ および N₂ 標的の衝突実験を行い、電荷移行に伴う極端紫外領域の発光スペクトルを測定したところ、標的から生成した O 原子および N 原子の多価イオンからの発光が観測された。多価イオン衝突実験において標的からの発光を観測した例は少なく、分子標的実験での解離した原子の多価イオンからの発光については全く報告例がない。新しい現象として、これから系統的に研究を進めていく予定である。また、細胞を観察する X 線顕微鏡に必要な“水の窓”に関連して、多価 Bi イオンについて University College Dublin との共同研究を開始した。Ta および Bi の多価イオンは電子サイクロトロン共鳴型多価イオン源のプラズマ・チェンバーに Ta の薄い板、および Ta 板の上に置いた Bi の塊を導入することで生成した。Bi は融点が 271.4 °C と非常に低いのでプラズマ・チェンバーの中で簡単に熔融するが、蒸気圧は比較的低い安定に多価イオンを生成することができる。一方、高融点金属の代表である Ta の融点は 3020 °C と非常に高く、プラズマによる金属表面からのスパッタリングがイオン生成には必須である。

4) 低温ヘリウム気体中のイオン移動度

1997 年に開発した低温移動管質量分析装置を用いて、液体窒素および液体ヘリウムによって冷却したヘリウム気体中におけるイオンの移動度測定を今年度も継続している。今年度は、NH₃ から電子衝撃によって生成した NH_n⁺ ($n = 1 - 4$) に関する気体温度 77 K および 4.3 K での測定を完了することができた。NH⁺ は弱電場では 77 K でも到着時間スペクトルにおいて基底状態と準安定状態が分裂し、基底状態は OH⁺ と同様に実効温度 50 K 付近で移動度が極小となった。一方、NH⁺ の準安定状態は基底状態よりも大きな移動度、すなわち小さな衝突断面積を示した。電子励起状態の方が電子雲が広がって断面積が大きくなるのが常識であるが、NH⁺ の場合は準安定励起状態が $(2p_x)^1(2p_y)^1(2p_z)^1$ という配置を取ることで波動関数が球対称に近くなるために断面積が小さくなると考えると、実験結果を理解することができる。NH₂⁺ は分子構造が類似した H₂O⁺ と非常に良く似た挙動の移動度を示し、一方で NH₃⁺ は実効温度 60 K 以下で基底状態と準安定状態の分裂が観測された。NH₃⁺ の電子状態を特定するためにイオン源に様々な気体を導入し、反応による強度比の変化を期待して実験したが、未だに直接的に電子状態を帰属することには成功していない。また、NH₄⁺ は正四面体構造のために球形に近く、球対称な原子イオンと類似した移動度の挙動が期待されたが、実験値はその予想を裏付けるものとなった。NH⁺ から NH₄⁺ までの 4 種の分子イオンの移動度を並べてみると、H の数が増すほどに移動度が極大を取る実効温度の値が低下している。これは、分子イオンと He との粒子間ポテンシャルの極小の深さが、N 原子に結合する H 原子の数が増すほど浅くなっていることを意味しており、量子化学的計算の結果を予測するものとなっている。

5) イオン移動度分析

旧科学技術振興調整費のプロジェクトとして開始した「化学剤の網羅的迅速検知システムの開発」は昨年度で終了したが、大気中のイオン移動度を理論的に理解するための研究はこれとは無関係に継続して行った。新しい試みとして、大気は窒素と酸素の混合気体と見なすことができるから、純粋な窒素気体中でのイオン移動度と純粋な酸素気体中でのイオン移動度をそれぞれ求め、混合気体中における近似的なイオン移動度を与える Blanc の法則を適用して、大気中のイオン移動度を古典的軌道計算から弾性散乱の断面積を求める MOBCAL を用いて 50 種類を越える様々な分子イオンについて計算を行ってみた。MOBCAL での計算に必要な粒子間ポテンシャルパラメーターは、同種気体分子間の Lennard-Jones ポテンシャルパラメーターと原子の van der Waals 半径から、系統的な考え方に基づいて求めた値を使用した。その結果は、大気を平均的な質量と分極率を持つ仮想的な単原子分子気体と近似することで求めた結果と高い精度で一致し、大気中のイオン移動度は分子イオンの正確な構造さえ与えられれば、高い信頼度で理論計算が可能であることが示された。

2. 研究業績

1) 論文

Naoko Kono, Takeshi Furukawa, Hajime Tanuma, Jun Matsumoto, Haruo Shiromaru, Toshiyuki Azuma, Kaveh Najafian, Maria Susanne Pettersson, Bertil Dynefors, and Klavs Hansen: Inverse internal conversion in C_4^- below the electron detachment threshold, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **17** (2015) 24732

2) 国際会議報告

H. Tanuma, H. Shimaya, T. Ishida, N. Nakamura, N. Numadate, and K. Okada : How do we observe the forbidden lines from He-like ions in charge exchange collisions of H-like ions with neutral gases? *NIFS-PROC-99* p.66 (2016)

3) 学会講演

● 第4回イオン移動度研究会 2015年4月25日 (東北大学・青葉山北キャンパス, 仙台市)

田沼肇: 化学剤の網羅的迅速検知システムの開発 (招待講演)

● 日本物理学会 2015年秋季大会 2015年9月16日-19日 (関西大学・千里山キャンパス)

河野直子, 古川武, 江原悠太, 松本淳, 田沼肇, 東俊行, K. Hansen, 城丸春夫: TMU E-ring を用いた炭素クラスター負イオン C_4^- のレーザー合流実験 II

高谷一成, 羽賀友音, 小泉哲夫, 的場史朗, 小島隆夫, 田沼肇: ヘリウム中におけるクラスターイオンの移動度測定と MOBCAL による理論計算再帰蛍光放出により冷却された C_4^- の内部エネルギー分布

佐藤智哉, 市川雄一, 小島修一郎, 舟山智歌子, 坂本雄, 大友祐一, 平尾千佳, 近森正敏, 彦田絵里, 古川武, 吉見彰洋, C.P. Bidinosti, 猪野隆, 上野秀樹, 松尾由賀利, 福山武志, 旭耕一郎: $^{129}\text{Xe}/^3\text{He}$ 二核種スピナーを用いた周波数精密測定における周波数不定性

● 原子衝突学会第40回年会 2015年9月28日-30日 (首都大学東京・南大沢キャンパス)

河野直子, 古川武, 江原悠太, 松本淳, 田沼肇, 東俊行, Klavs Hansen, 城丸春夫: 孤立系炭素鎖分子負イオン C_4^- の冷却過程 (ホットトピック講演)

内倉義届, 島田健人, 沼館直樹, 田沼肇, 石崎欣尚, 山田真也, 江副祐一郎, 大橋隆哉: SWCX に関する地上実験の研究計画

沼館直樹, 島田健人, 内倉義届, 島谷紘史, 石田卓也, 山田真也, 江副祐一郎, 石崎欣尚, 大橋隆哉, 岡田邦宏, 中村信行, 篠崎慶亮, 満田和久, Ling Liu, Jiang-gou Wang, 田沼肇: 太陽風電荷交換反応に伴う禁制 X 線遷移の実験室観測

山崎達朗, 森健汰, 槇仁美, 二宮彰啓, 田沼肇: 移動度測定による NH_n^+ ($n=1-4$) の電子状態分離

江原悠太, 古川武, 松本淳, 田沼肇, 東俊行, Klavs Hansen, 城丸春夫: 孤立炭素クラスター負イオンの再帰蛍光放出

木崎達也, 榎本嘉範, 久間晋, 志岐成友, 浮辺雅宏, 東俊行: 1.6 K 動作超伝導トンネル接合 (STJ) 検出器による粒子エネルギー・スペクトル測定

● 「プラズマ科学における分光計測の高度化と原子分子過程研究の新展開」 「原子分子データ応用フォーラムセミナー」 合同研究会 2016 年 1 月 27 日-29 日 (核融合科学研究所, 土岐市)

沼舘直樹: Kingdon トラップを用いた多価イオンの電荷交換反応に伴う禁制 X 線の観測

● 電気学会北陸支部 学術講演会 2016 年 3 月 7 日 (富山大学工学部, 富山市)

田沼肇: 気相中におけるイオン移動度 (招待講演)

● 日本物理学会 2016 年年次大会 2016 年 3 月 19-22 日 (東北学院大学・泉キャンパス)

沼舘直樹, 島田健人, 内倉義屈, 島谷紘史, 石田卓也, 山田真也, 江副祐一郎, 石崎欣尚, 大橋隆哉, 岡田邦宏, 中村信行, 篠崎慶亮, 満田和久, Ling Liu, Jiang-gou Wang, 田沼肇: 太陽風起源禁制 X 線遷移の地上での再現実験

河野直子, 安藤怜隼, 古川武, 松本淳, 東俊行, 田沼肇, Klavs Hansen, 城丸春夫: C_6^- 内部エネルギー分布の輻射冷却による時間変化

古川武, 江原悠太, 河野直子, 松本淳, 田沼肇, 東俊行, Klavs Hansen, 城丸春夫: 炭素鎖負イオン C_6^- の再帰蛍光寿命シミュレーション

森健汰, 山崎達朗, 楨仁美, 二宮彰啓, 田沼肇: 低温 He 気体中における NH_n^+ ($n=1-4$) の移動度

田沼肇, 高谷一成: 大気中におけるイオン移動度の理論計算 II

市川雄一, 高峰愛子, 西畑洗希, 今村慧, 藤田朋美, 佐藤智哉, 初山悟至, 清水陽平, D.S.Ahn, 旭耕一郎, 馬場秀忠, D.L.Balabanski, F.Boulay, J.M.Daugas, 江上魁, 福田直樹, 舟山智歌子, 古川武, G.Georgiev, A.Gladkov, 稲辺尚人, 石橋陽子, 小林義男, 小島修一郎, A.Kusoglu, 川口高史, 河村嵩之, I.Mukul, 新倉潤, 西坂太志, 小田原厚子, 大友祐一, D.Ralet, 下田正, G.S.Simpson, 炭竈聡之, 鈴木宏, 竹田浩之, L.C.Tao, 梶野泰宏, 富永大樹, 上野秀樹, 山崎展樹, X.F.Yang: 中性子過剰核 ^{75}Cu のアイソマー状態の核磁気モーメント

早坂美希, 今村慧, 富田英生, 高松峻英, 山口康広, 藤田朋美, 小林徹, 植松晴子, 古川武, 上野秀樹, 松尾由賀利: パルス Ti:S レーザーによる超流動ヘリウム中原子のスピン偏極生成

藤田朋美, 今村慧, 富永大樹, 川口高史, 江上魁, 西坂太志, 小林徹, 高峰愛子, 古川武, 上野秀樹, 下田正, 松尾由賀利: 超流動ヘリウム環境下における 11 族原子の超微細構造間遷移

江上魁, 今村慧, 西坂太志, 高峰愛子, 藤田朋美, 富永大樹, 川口高史, 涌井崇志, 古川武, 上野秀樹, 松尾由賀利: 低収量原子核の核構造研究へ向けたレーザー・MW 二重共鳴信号の強度評価

西坂太志, 今村慧, 江上魁, 涌井崇志, 松本未来, 藤田朋美, 富永大樹, 川口高史, 高峰愛子, 古川武, 上野秀樹, 松尾由賀利: 低収量不安定核の核構造研究へ向けた超流動ヘリウム中原子のレーザー誘起蛍光検出系の性能評価

舟山智歌子, 佐藤智哉, 市川雄一, 小島修一郎, 田中俊也, 坂本雄, 大友祐一, 平尾千佳, 古川武, 吉見彰洋, C. P. Bidinosti, 猪野隆, 上野秀樹, 松尾由賀利, 福山武志, 旭耕一郎: 異核種共存セルにおけるスピン偏極生成・緩和機構

小島修一郎, 佐藤智哉, 市川雄一, 田中俊也, 舟山智歌子, 坂本雄, 大友祐一, 平尾千佳, 古川武, 吉見彰洋, C.P. Bidinosti, 猪野隆, 上野秀樹, 松尾由賀利, 福山武志, 旭耕一郎: $^{129}\text{Xe}/^{131}\text{Xe}$ 共存核スピンメーザーの周波数特性

佐藤智哉, 市川雄一, 小島修一郎, 舟山智歌子, 田中俊也, 坂本雄, 大友祐一, 平尾千佳, 近森正敏, 彦田絵里, 古川武, 吉見彰洋, C.P. Bidinosti, 猪野隆, 上野秀樹, 松尾由賀利, 福山武志, 旭耕一郎: 異核種共存核スピンメーザーを用いた EDM 測定実験

国際会議

● Charge Exchange X-rays in Current and Future Astrophysical Research, Cambridge, USA, 13–15 April, 2015

Hajime Tanuma: Charge exchange cross sections and emission cross sections of solar wind charge exchange in laboratory (invited)

● 6th International Workshop on Electrostatic Storage Devices (ESD 2015), Tokyo, 8–11 June, 2015

Klavs Hansen, Naoko Kono, Takeshi Furukawa, Hajime Tanuma, Jun Matsumoto, Haruo Shiromaru, Toshiyuki Azuma, Kaveh Najafian, Susanne Pettersson, and Bertil Dörfner: Rapid radiative cooling of C_4^- (invited)

Takeshi Furukawa: Detection of recurrent fluorescence photons (invited)

Tatsuya Kizaki, Yoshinori Enomoto, Shigetomo Shiki, Masahiro Ukibe, and Toshiyuki Azuma: Measurement of the particle energy spectrum by superconducting tunnel junction (STJ) detector operating at 1.6 K

Naoko Kono, Takeshi Furukawa, Jun Matsumoto, Hajime Tanuma, Toshiyuki Azuma, Kaveh Najafian, Klavs Hansen, and Haruo Shiromaru: Internal energy distribution of vibrationally hot C_4^- stored in an electrostatic ion storage ring

Céline Ortega, Naoko Kono, Mingchao Ji, Richard Brédy, Jerome Bernard, Christine Joblin, Amine Cassimi, Li Chen and Serge Martin: Fluorescence and Infrared radiative cooling rates of Naphthalene studied in electrostatic storage Miniring

● XIX International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarms, Lisboa, Portugal, 17–20 July, 2015

Hajime Tanuma, Kenta Mori, Tatsuro Yamazaki, Hitomi Maki, Akihiro Ninomiya, and Ryosuke Isawa: Ion mobility of the ground and metastable states of molecular ions

● XXIX International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (ICPEAC 2015), Toledo, Spain, 22–28 July, 2015

Kazunari Takaya, Meishi Nakahara, Yuya Hasegawa, Tetsuo Koizumi, Karin Takahashi, Shiro Matoba, and Hajime Tanuma: Mobilities of Li^+ -(2-butanol) $_n$ ($n=1-2$) ions in He gas

Yuta Ebara, Takeshi Furukawa, Jun Matsumoto, Hajime Tanuma, Toshiyuki Azuma, and Haruo Shiromaru: Observation of recurrent fluorescence photons from small carbon cluster anions

Naoko Kono, Takeshi Furukawa, Jun Matsumoto, Hajime Tanuma, Toshiyuki Azuma, Kaveh Najafian, Klavs Hansen, and Haruo Shiromaru: Electronic radiative cooling of vibrationally hot C_4^- stored in an electrostatic ion storage ring

Kenta Mori, Hitomi Maki, Akihiro Ninomiya, Ryosuke Isawa, Hajime Tanuma: State-selective ion mobility measurement for NH_n^+ ($n=1-3$) ions in helium gas at low temperature

Naoki Numadate, Kunihiro Okada, Nobuyuki Nakamura, Hajime Tanuma: Challenge for laboratory observation of forbidden x-ray transitions in solar wind charge exchange

Céline Ortega, Naoko Kono, Mingchao Ji, Richard Brédy, Jerome Bernard, Christine Joblin, Amine Casimi, Yvette Ngono-Ravache, Li Chen, and Serge Martin: Dissociation rate, fluorescence and Infrared radiative cooling rates of Naphthalene studied in electrostatic storage Miniring

● 68th Annual Gaseous Electronics Conference, Honolulu, Hawaii, 12–16 October, 2015

Hajime Tanuma: Charge exchange spectroscopy of multiply charge ions for the development of the EUV light source for the next generation photo lithography (invited)

● International Chemical Congress of Pacific Basin Societies, Honolulu, Hawaii, 15–20 December, 2015

Yasuo Seto, Hisayuki Nagashima, Tomoki Nagoya, Tomohide Kondo, Takafumi Satoh, Takeshi Ohmori, Koichiro Tsuge, Nobuo Nakano, Hiroaki Sugiyama, Tatsuhiko Nishide, Atsushi Ishizaki, Kenji Daikuhara, Yasuo Kawahara, Masanori Kidera, Tatsuya Urabe, and Hajime Tanuma: Development of on-site hybrid instrument based on ion mobility spectrometry and arrayed electrochemical sensors against chemical warfare agents in vapor

Hajime Tanuma: State-selective ion mobility in helium at very low temperature, isomer dependent mobility of small molecular ions in helium at room temperature, and theoretical model calculation of molecular ion mobility in air (invited)

Kenta Mori, Tatsuro Yamazaki, Hitomi Maki, Akihiro Ninomiya, and Hajime Tanuma: Electronic state selection for NH_n^+ ($n=1-3$) by measurement of ion mobility in helium gas at low temperature

宇宙物理実験研究室

1. 研究活動の概要

2015 年夏に観測を終了した「すざく」衛星を用いた X 線天体の研究を進めた。一方、「ひとみ」衛星 (ASTRO-H) の最終試験を進め、2016 年 2 月の打ち上げを経て、マイクロカロリメータ装置の立ち上げや初期観測を行ったが、衛星は不測の事態のため 3 月末に機能を失った。銀河間物質探査を目指す DIOS や、惑星探査を目指す将来の X 線ミッションのために、TES マイクロカロリメータや MEMS 技術による X 線望遠鏡の開発を進めた。

1) X 線天体の観測研究

X 線エネルギースペクトルから輝線や吸収線の構造を検定する新しい方法を開発した。エネルギーの定まっていない構造を見つけ出すのに効果的な方法である。この手法では、S/N 比を最適化するフィルターをエネルギー軸に適用し、連続スペクトル上の輝線や吸収線に対してモンテカルロ法により有意度を評価する。開発した手法が有効に機能することを確認するため、過去に報告されている活動銀河核の鉄の吸収線の評価を行い、報告結果と矛盾なく吸収線を検出できることを確認した。さらに、 10^{14-15} ガウスの強磁場を持つと考えられている中性子星、マグネターに適用し、サイクロトロン共鳴吸収線の探査を行い、 4σ の上限値を与えた。

赤方偏移 $z = 0.225$ にある銀河団 1RXS J0603.3+4214 (Toothbrush) の電波リリック領域を「すざく」で観測した (山形大学等との共同研究)。ここは電波の観測からマッハ数 4 の衝撃波があると予想されていたが、X 線観測の結果、リリックの前後での温度ジャンプはマッハ数 1.5 ほどに相当する小さなものであることがわかった。非熱的な X 線強度の上限から、リリック領域の磁場の強さは $1.6 \mu\text{G}$ より強いはずで、磁場のエネルギー密度は熱エネルギーの数%程度はあることになる。この他にも電波リリックのある銀河団 RXC J1053.7+5453 を観測しマッハ数を約 1.6 と決めるなどの結果を得た。

2) 系外惑星の探査

ケプラー衛星の観測データをもとに、惑星候補を持つ恒星 7557 個の光度曲線を視覚的に探査し、14 個の恒星に対して 16 回のトランジット現象 (惑星の通過による恒星の明るさのわずかな現象) を新たに見つけた。トランジットが 1 回しかない場合でも、光度曲線の減光形状をフィットすることで、ある場合には長周期惑星の公転周期や惑星半径を定めることができることを理論的に示した。この方法を適用することにより、長周期 (数年~20 年) の海王星~木星サイズの 7 個のガス惑星候補を発見した。この結果は、多重惑星系の長周期ガス惑星の存在頻度が 20% 以上であることを示唆する。

3) 「すざく」による太陽系天体の研究

「すざく」衛星の観測データをもとに、木星磁気圏に一致する広がった X 線放射の検証と太陽活動に対する依存性の検証を進めた。2006 年と 2014 年の 2 回の観測を定量的に比較した結果、木星本体は 2014 年の方が約 3-5 倍も $0.2-5 \text{ keV}$ で増光していたのに対し、広がった放射は有意な変動がなかった。木星本体の増光は、2014 年は太陽活動の極大付近に一致し、太陽 X 線が 1 桁以上増光していたため、木星大気での散乱成分が増えたことが主原因の一つと考えられる。一方、広がった X 線放射は放射機構に関係していると考えられる。従来の有力仮説は、木星磁気圏の数十 MeV 電子による太陽光の逆コンプトン散乱であり、我々の結果は相対論的電子の粒子分布および密度に大きな違いがないことを新たに示唆する。これは、木星の近傍から放射される MeV 電子によるシンクロトロン電波の太陽活動による変動が 20-30% と小さいことと一致し、木星磁気圏における粒子加速に新たな知見をもたらすものとなった。

4) TES カロリメータの開発

JAXA 宇宙研や産総研との共同で 数 100 素子からなるアレイ型 TES (Transition Edge Sensor) カロリメータの開発を進めている。積層配線という方法で、1 cm 四角の中に 400 素子を配置できるよう Si 基板の厚さ方向へ 2 層の配線を作り込む方法を開発した。従来の積層配線では TES を成膜した際に超伝導転移が見られない問題があった。その原因として、表面粗さによる数十 nm の凹凸が TES の Ti/Au 二層薄膜に悪影響を及ぼしていると考えられた。配線に用いていた Al 膜そのものが ~ 6 nm rms の粗さを持っていたため、Nb 膜へと変更し ~ 2 nm rms の粗さへと改善した。さらに配線加工の条件を調整するなどして、 ~ 1 nm rms まで粗さを下げた。転移は確認できなかったものの粗さを 5 倍程度改善することができた。また、Chemical Mechanical Polishing を用いた新たな配線を製作し、表面粗さ ~ 0.4 nm rms を達成し新手法への道筋を開いた。

5) 「ひとみ」(ASTRO-H)の打ち上げ

2016 年 2 月 17 日に打ち上げられた、「ひとみ」の総合試験、フライトオペレーション、軌道上の立ち上げ運用などを進めた。衛星の写真を図 1 に示す。主検出器マイクロカロリメータ (SXS)、X 線反射望遠鏡 (HXT および SXT) のさまざまな試験に研究室メンバーが参加した。SXT は角分解能約 1.2 分角 (HPD) というよい性能が実現している。特に金の L 吸収端付近の反射率を正確に測定し、反射率の低下が従来の予想の 60% と小さいことを明らかにし、原子散乱因子を精度よく求めた。

SXS のフライトモデルについては 2015 年 4 月からの衛星総合試験に臨んだ。大きな試験としては、6-7 月の熱真空試験、9-10 月の振動試験、12 月に種子島宇宙センターに運び込まれてからの最終試験、1 月にロケットと結合した後の打ち上げオペレーションなどである。この間を通じて、SXS は良好な性能を維持し続け、機械式冷凍機もほぼ順調に働き、液体ヘリウムの軌道上寿命は 3 年以上が確保できる見通しとなった。首都大が担当する、デジタル波形処理装置 PSP も問題ない性能を発揮した。打ち上げは 2016 年 2 月 17 日、日本時間 17 時 45 分に H-IIA ロケット 30 号機として打ち上げられ、予定の軌道に投入された。機械式冷凍機が順調に稼働し、打ち上げ後 2 週間ほどで液体ヘリウムの温度は約 1.1 K で安定した。まだデュワーのゲートバルブが閉じた状態であったが、Be 窓越しにペルセウス銀河団の初期観測を行い、素晴らしいエネルギースペクトルを得ることができた。軌道上のエネルギー分解能は 5.9 keV に対し約 4.6 eV であった。また、サイエンスチームのまとめ役として初期観測ターゲットの決定、ターゲットチームの編成などを行った他、観測の進め方や論文作成に至る方針を定め、チーム全体で合意した。第 14 回のサイエンス会議を 7 月に首都大で、第 6 回サマースクールを 8 月に奈良女子大で開催した。

「ひとみ」は 3 月 26 日に不測の事態が発生し、通信不能となった。解析の結果、姿勢系の異常動作が主原因であることがわかり、高速の自転のために太陽電池パドルが失われていることが推定され、JAXA として運用を終了することが結論された。

6) マイクロマシン技術を用いた超軽量 X 線望遠鏡の開発

日本が得意とするマイクロマシン (MEMS) 技術を用いた、世界最軽量の超軽量 X 線望遠鏡の開発を推進した。JAXA 宇宙研、産総研、東北大、京都大ほかとの共同研究である。ドライエッチングを用いて、約 20 μm の微細穴を約 300 μm 厚の薄い Si 基板に空け、側壁を反射鏡として用いる。基板が薄く、原理的に従来の望遠鏡に比べ、同じ有効面積に対して 1 桁以上軽い世界最軽量の望遠鏡となる。

今年度は、得られている Wolter I 型望遠鏡での X 線結像データ (図 2) を光線追跡シミュレーションと比較して定量的検討を行い、従来問題であった、角度分解能、有効面積、焦点距離の設計値からのずれが、鏡の形状や配置に起因する小角度散乱であることを明らかにした。平行して、鏡の形状と配置精度を 1 回反射試作光学系で X 線のペンシルビームを用いて切り分けて、配置精度は Half Power Diameter

で約 3-5 分角相当と小さいが、形状精度は個別照射で最良でも約 15 分角と、目標の 1 回反射で 7 分角以下に対して悪いことを明らかにした。配置精度については、Si 基板に穴を開ける際のドライエッチングを工夫したことにより、改善できたが、形状精度はさらに改良が必要であり、今後の課題である。

平行して、本望遠鏡を用いた木星探査に向けた設計や、Focused Ion Beam を用いて製作した新しい軽量 X 線光学系の実証結果等について、論文としてまとめ、またドライエッチングに基づく新たな X 線光学系の製造方法の特許出願を準備した。

7) 超軽量 X 線望遠鏡を用いた X 線天文・惑星探査計画の検討

上記の超軽量 X 線観測装置を用いた、将来の X 線観測衛星や惑星探査衛星の検討し、推進している。第一が首都大 航空宇宙、東工大ほかと共同で開発している、50 kg 級超小型衛星 ORBIS である。超軽量 X 線望遠鏡を集光系として用いて、巨大ブラックホールを継続的に 1 年以上長期観測することで、世界初の巨大ブラックホール-ブラックホール連星の証拠を掴むことを狙う。今年度は文科省 宇宙科学技術推進調整委託費を受託し、衛星本体および観測装置の検討を行った。我々の研究室は望遠鏡を含む観測装置の検討を進めており、次年度から製作に入る。

第二が名古屋大、JAXA 宇宙研ほかと共同で検討している超小型衛星 GEO-X である。地球の超高層大気である外圏の主に水素原子が、磁気圏にトラップされた太陽風のイオンと電荷交換反応を起こした際に出す X 線輝線を用いて、地球磁気圏境界面を初めて X 線で可視化することを狙う。今年度は超小型衛星として迅速に実証することを目指し、メーカーとの共同による衛星バス検討および、MHD シミュレーションを用いたサイエンス検討を進めた。来年度以降に、衛星提案を行う準備を着々と進めている。

8) DIOS の検討

宇宙のバリオン全体の約半分が未検出でダークバリオンと呼ばれる。それを酸素の輝線 (O_{VII} , O_{VIII}) で検出するために、小型計画 DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) を 2022 年ごろの打ち上げを目指して検討している。本年度は、X 線望遠鏡の焦点距離を従来の 70 cm から 1.2 m へと拡張する案、観測系の熱設計を検討し、イプシロンの枠内に納められるという見通しを得た。米国との国際協力についても相談し、共同で進める体制を作ってきた。また、ガンマ線バーストの X 線残光などを見るための高速姿勢制御についても、通信方法などを検討した。年度末に日本学術会議のマスタープランへ提案した。



図 1: (左図) JAXA で公開された ASTRO-H 衛星。観測時の全長は約 14 m、重量は約 2700 kg。

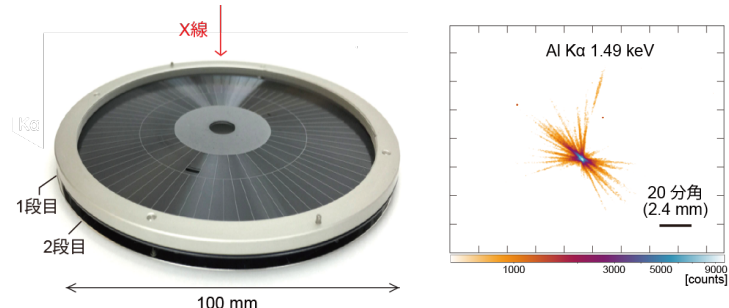


図 2: MEMS X 線光学系による Wolter-I 型 X 線望遠鏡の試作モデルと、Al-K X 線に対する撮像イメージ。

2. 研究業績

1) 論文

N. Okabe, K. Umetsu, T. Tamura, Y. Fujita, M. Takizawa, K. Matsushita, Y. Fukazawa, T. Futamase, M. Kawaharada, S. Miyazaki, Y. Mochizuki, K. Nakazawa, T. Ohashi, N. Ota, T. Sasaki, K. Sato, S. I. Tam: Central mass profiles of the nearby cool-core galaxy clusters Hydra A and A478, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **456**, Issue 4, p.4475-4487, DOI: 10.1093/mnras/stv2916 (2016)

D. Umemoto H. Tsuchiya, T. Enoto, S. Yamada, T. Yuasa, M. Kawaharada, T. Kitaguchi, K. Nakazawa, M. Kokubun, H. Kato, M. Okano, T. Tamagawa, K. Makishima: On-ground detection of an electron-positron annihilation line from thunderclouds, *Physical Review E*, **93**, Issue 2, id.021201, DOI: 10.1103/PhysRevE.93.021201 (2016)

M. Itahana, M. Takizawa, H. Akamatsu, T. Ohashi, Y. Ishisaki, H. Kawahara, R. J. van Weeren: Suzaku observations of the galaxy cluster 1RXS J0603.3+4214: Implications of particle acceleration processes in the "Toothbrush" radio relic, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **67**, Issue 6, id.11314 pp., DOI: 10.1093/pasj/psv084 (2015)

S. Koyama, S. Yamada, A. Kubota, M. S. Tashiro, Y. Terada, K. Makishima: Suzaku observation of X-ray variability in soft state LMC X-1, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **67**, Issue 3, id.469 pp., DOI: 10.1093/pasj/psv017 (2015)

E. Ursino, M. Galeazzi, A. Gupta, R. L. Kelley, I. Mitsuishi, T. Ohashi, K. Sato: Exploring the Bridge between A3556 and A3558 in the Shapley Supercluster, *The Astrophysical Journal*, **806**, Issue 2, article id. 211, 5 pp., DOI: 10.1088/0004-637X/806/2/211 (2015)

P. Gandhi, S. Yamada, C. Ricci, D. Asmus, R. F. Mushotzky, Y. Ueda, Y. Terashima, V. La Parola: A Compton-thick AGN in the barred spiral galaxy NGC 4785, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **449**, Issue 2, p.1845-1855, DOI: 10.1093/mnras/stv344 (2015)

T. Ogawa, Y. Ezoe, T. Kakiuchi, M. Numazawa, M. Sato, K. Nakamura, M. Terada, T. Ohashi, I. Mitsuishi, K. Ishikawa, K. Mitsuda, K. Morishita, and K. Nakajima: First X-ray imaging with a micromachined Wolter type-I telescope, *Microsystem Technologies*, First Online, DOI: 10.1007/s00542-016-2906-3, <http://link.springer.com/article/10.1007/s00542-016-2906-3> (2016)

2) 国際会議報告

Ezoe, Yuichiro; Ishikawa, Kumi; Mitsuishi, Ikuyuki; Ohashi, Takaya; Mitsuda, Kazuhisa; Fujimoto, Ryuichi; Murakami, Masahide; Kanao, Kenichi; Yoshida, Seiji; Tsunematsu, Shoji; DiPirro, Michael; Shirron, Peter: Flight model measurements of the porous plug and film flow suppression system for the ASTRO-H Soft X-ray Spectrometer dewar, *Cryogenics*, **74**, p. 17-23., DOI: 10.1016/j.cryogenics.2015.12.004 (2016)

Kuromaru, G.; Kuwabara, K.; Miyazaki, N.; Suzuki, S.; Hosoya, S.; Koizumi, Y.; Ohashi, T.; Ishisaki, Y.; Ezoe, Y.; Yamada, S.; Mitsuda, K.; Hidaka, M.; Satoh, T.: Investigation of Surface Roughness

Effect on Transition Edge Sensor Microcalorimeters Using Multilayer Readout Wiring, *Journal of Low Temperature Physics*, Online First, DOI: 10.1007/s10909-016-1499-7 (2016)

Porter, F. S.; Chiao, M. P.; Eckart, M. E.; Fujimoto, R.; Ishisaki, Y.; Kelley, R. L.; Kilbourne, C. A.; Leutenegger, M. A.; McCammon, D.; Mitsuda, K.; Sawada, M.; Szymkowiak, A. E.; Takei, Y.; Tashiro, M.; Tsujimoto, M.; Watanabe, T.; Yamada, S.: Temporal Gain Correction for X-ray Calorimeter Spectrometers, *Journal of Low Temperature Physics*, Online First, DOI: 10.1007/s10909-016-1503-2 (2016)

Tatsuno, H.; Doriese, W. B.; Bennett, D. A.; Curceanu, C.; Fowler, J. W.; Gard, J.; Gustafsson, F. P.; Hashimoto, T.; Hayano, R. S.; Hays-Wehle, J. P.; Hilton, G. C.; Iliescu, M.; Ishimoto, S.; Itahashi, K.; Iwasaki, M.; Kuwabara, K.; Ma, Y.; Marton, J.; Noda, H.; O'Neil, G. C.; Okada, S.; Outa, H.; Reintsema, C. D.; Sato, M.; Schmidt, D. R.; Shi, H.; Suzuki, K.; Suzuki, T.; Uhlig, J.; Ullom, J. N.; Widmann, E.; Yamada, S.; Zmeskal, J.; Swetz, D. S.: Absolute Energy Calibration of X-ray TESs with 0.04 eV Uncertainty at 6.4 keV in a Hadron-Beam Environment, *Journal of Low Temperature Physics*, Online First, DOI: 10.1007/s10909-016-1491-2 (2016)

Yamada, S.; Ohashi, T.; Ishisaki, Y.; Ezoe, Y.; Miyazaki, N.; Kuwabara, K.; Kuromaru, G.; Suzuki, S.; Mitsuda, K.; Yamasaki, N. Y.; Takei, Y.; Sakai, K.; Nagayoshi, K.; Yamamoto, R.; Hayashi, T.; Muramatsu, H.; Tawara, Y.; Mitsuishi, I.; Babazaki, Y.; Nakamichi, R.; Bandai, A.; Yuasa, T.; Ota, N.: Future Japanese X-ray TES Calorimeter Satellite: DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor), *Journal of Low Temperature Physics*, Online First, DOI: 10.1007/s10909-015-1362-2 (2015)

Mitsuishi, I.; Ezoe, Y.; Ogawa, T.; Sato, M.; Nakamura, K.; Numazawa, M.; Takeuchi, K.; Ohashi, T.; Ishikawa, K.; Mitsuda, K.: Ray-tracing simulations for the ultra-lightweight X-ray optics toward a future jupiter exploration mission, *Advances in Space Research*, **57**, Issue 1, p. 320-328., DOI: 10.1016/j.asr.2015.08.022 (2016)

Ezoe, Yuichiro; Branduardi-Raymont, Graziella; Guedel, Manuel; Sciortino, Salvatore: Solar System and Exoplanets, *Exploring the Hot and Energetic Universe: The first scientific conference dedicated to the Athena X-ray observatory*. Proceedings of a conference held 8-10 September, 2015 in Madrid, Spain. Online at <http://www.sciops.esa.int/index.php?project=CONF2015&page=ATHENA2015>, p.35 (2015)

Ohashi, Takaya: The Hot Universe: from Cosmological Filaments to Clusters, *Exploring the Hot and Energetic Universe: The first scientific conference dedicated to the Athena X-ray observatory*. Proceedings of a conference held 8-10 September, 2015 in Madrid, Spain. Online at <http://www.sciops.esa.int/index.php?project=CONF2015&page=ATHENA2015>, p.11 (2015)

Tawara, Yuzuru; Ohashi, Takaya; Yamasaki, Noriko; Mitsuda, Kazuhisa: DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor): the Dark Baryon Exploring Mission, *IAU General Assembly*, Meeting #29, id.2254745 (2015)

Kraft, Ralph; Kimura, Tomoki; Elsner, Ronald; Branduardi-Raymont, Graziella; Gladstone, Randall; Badman, Sarah; Ezoe, Yuichiro; Murakami, Go; Murray, Stephen; Rodiger, Elke; Tsuchiya, Fuminori; Yamazaki, Atsushi; Yoshikawa, Ichiro; Yoshioka, Kazuo: A coordinated X-ray and EUV study of the

Jovian aurora, *EGU General Assembly 2015*, held 12-17 April, 2015 in Vienna, Austria. id.14569 (2015)

3) 学会講演

● 日本物理学会 2016 年春季大会 2016 年 3 月 19～22 日 (東北学院大学泉キャンパス)

沼舘直樹, 島田健人, 内倉義届, 島谷紘史, 石田卓也, 山田真也, 江副祐一郎, 石崎欣尚, 大橋隆哉, 岡田邦宏, 中村信行, 篠崎慶亮, 満田和久, L.Liu, J-G.Wang, 田沼肇: 21pBE-6 太陽風起源禁制 X 線遷移の地上での再現実験

田代信, 満田和久, 山崎典子, 竹井洋, 辻本匡弘, 小川美奈, 小山志勇, 酒井和広, 杉田寛之, 佐藤洋一, 篠崎慶亮, 岡本篤, 藤本龍一, 大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 山田真也, 瀬田裕美, 寺田幸功, 北本俊二, 星野晶夫, 玉川徹, 石川久美, 野田博文, 佐藤浩介, 太田直美, 澤田真理, 三石郁之, 村上正秀, 村上弘志, 伊豫本直子, R. L. Kelley, C. A. Kilbourne, F. S. Porter, K. R. Boyce, M. E. Eckart, M. P. Chiao, M. A. Leutenegger, G. V. Brown, D. McCammon, A. Szymkowiak, J.-W. den Herder, D. Haas, C. de Vries, E. Costantini, H. Akamatsu, S.Paltani, 他 ASTRO-H SXS チーム: 21pCD-11 ASTRO-H 搭載 精密軟 X 線分光装置 SXS の現状

● 日本物理学会 2015 年秋季大会 2015 年 9 月 25～28 日 (大阪市立大学杉本キャンパス)

林克洋, 田島宏康, 深沢泰司, 渡辺伸, 内山秀樹, 内山泰伸, 榎戸輝揚, 太田方之, 大野雅功, 小高裕和, 片岡淳, 国分紀秀, 佐藤悟朗, 佐藤理江, 高橋忠幸, 高橋弘充, 武田伸一郎, 田代信, 田中孝明, 寺田幸功, 中澤知洋, 中森健之, 原山淳, Roger Blandford, 牧島一夫, Grzegorz Madejski, 水野恒史, 森國城, 谷津陽一, 山岡和貴, 山田真也, 湯浅孝行, 米徳大輔, Philippe Laurent, Olivier Limousin, François Lebrun, ほか SGD チーム: 25pSJ-3 ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器の衛星総合試験における試験結果

湯浅孝行, 榎戸輝揚, 土屋晴文, 米徳大輔, 澤野達哉, 中澤知洋, 牧島一夫, 榎本大悟, 古田禄大, 山田真也: 25pSK-9 GROWTH 実験: 雷雲起源ガンマ線放射の石川県での 2014 年度冬季観測結果と検出器小型化に向けた開発状況

橋本直, M. Bazzi, D.A. Bennett, C. Berucci, D. Bosnar, C. Curceanu, W.B. Doriese, J.W. Fowler, 藤岡宏之, C. Guaraldo, F.P. Gustafsson, 早野龍五, J.P. Hays-Wehle, G.C. Hilton, 平岩聡彦, 飯尾雅実, M. Iliescu, 石元茂, 板橋健太, 岩崎雅彦, 馬越, 野海博之, G.C. O'Neil, 大西宏明, 岡田信二, 應田治彦, K. Piscicchia, C.D. Reintsema, 佐田優太, 佐久間史典, 佐藤将春, D.R. Schmidt, A. Scordo, 関本美智子, H. Shi, D. Sirghi, F. Sirghi, 鈴木謙, D.S. Swetz, 谷田聖, 竜野秀行, 徳田真, J. Uhlig, J.N. Ullom, 山田真也, 山崎敏光, J. Zmeskal: 27aSF-1 超伝導遷移端マイクロカロリメータを用いた K 中間子原子 X 線精密分光実験 (2)

竜野秀行, D.A. Bennett, C. Curceanu, W.B. Doriese, J.W. Fowler, J. Gard, F.P. Gustafsson, 橋本直, 早野龍五, J.P. Hays-Wehle, G.C. Hilton, M. Iliescu, 石元茂, 板橋健太, 岩崎雅彦, 桑原啓介, Y. Ma, J. Marton, 野田博文, G.C. O'Neil, 岡田信二, 應田治彦, C.D. Reintsema, 佐藤将春, D.R. Schmidt, 施赫シ, 鈴木謙, 鈴木隆敏, D.S. Swetz, J. Uhlig, J.N. Ullom, E. Widmann, 山田真也, J. Zmeskal: 25aSN-9 荷電粒子ビーム環境における超伝導遷移端マイクロカロリメータ X 線検出器の性能評価 II

● 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会 2015 年 9 月 13～16 日 (名古屋国際会議場)

中村果澄 1、江副祐一郎 1、石川久美 2、小川智弘 1、佐藤真柚 1、沼澤正樹 1、武内数馬 1、寺田優 1、大橋隆哉 1、満田和久 4、倉島優一 3、高木秀樹 3 (1. 首都大、2. 理研、3. 産総研、4. 宇宙研): 15a-4E-3 シリコンドライエッチングを用いた 4 インチ X 線光学系開発の現状

沼澤正樹 1、江副祐一郎 1、石川久美 2、小川智弘 1、佐藤真柚 1、中村果澄 1、大橋隆哉 1、満田和久 3、前田龍太郎 4、廣島洋 4、倉島優一 4、野田大二 5 (1. 首都大、2. 理研、3. JAXA / ISAS、4. 産総研、5. マイクロマシンセンター): 15a-4E-2 マイクロマシン技術を用いた 12 inch Si 基板光学系の X 線反射実証

鈴木翔太 1、桑原啓介 1、黒丸巖静 1、小泉祥人 1、細矢祥平 1、大橋隆哉 1、石崎欣尚 1、江副祐一郎 1、山田真也 1、満田和久 2、日高睦夫 3、佐藤哲朗 3 (1. 首都大理、2. 宇宙研、3. 産総研): 15p-2W-22 積層配線 TES 型 X 線マイクロカロリメータの表面粗さの研究

● 日本天文学会 2016 年春季年会 2016 年 3 月 14-17 日 (首都大学東京 南大沢キャンパス)

江副祐一郎, 沼澤正樹 (首都大), 石川久美 (理研), 大橋隆哉 (首都大), 三好由純 (名古屋大), 木村 智樹 (理研), 内山泰伸 (立教大): L01a X 線天文衛星「すざく」による太陽極大付近での木星観測

板花まどか, 滝沢元和 (山形大), 赤松弘規 (SRON), R. van Weeren(CfA), 河原創 (東京大), 深沢泰 司 (広島大), J. Kaastra(SRON), 河原田円 (ISAS/JAXA), 中澤知洋 (東京大), 大橋隆哉 (首都大), 太田直美 (奈良女子大), H. Rottgering(Leiden Univ.), J. Vink, F. Zandanel(Amsterdam Univ.): T03a すざく衛星による RXC J1053.7+5453 の電波レリック周辺領域の解析

三石郁之, 前島将人, 馬場崎康敬, 小林洋明, 松本浩典, 田原譲 (名古屋大学), 佐藤真柚, 佐々木伸, 大橋隆哉 (首都大学東京), 林隆之 (国立天文台), 林克洋, 土居明広 (ISAS/JAXA), Anna Scaife (The University of Manchester): T04a 近傍衝突銀河群システム NGC 7618 & UGC 12491 の観測的研究

菅原悠宇紀, 滝沢元和, 板花まどか (山形大学), 赤松弘規 (SRON), 藤田裕 (大阪大学), 大橋隆哉, 石崎欣尚 (首都大学): T06a Abell 3391 と Abell 3395 を含む大規模構造フィラメントの X 線観測

中村果澄、江副祐一郎、小川智弘、佐藤真柚、沼澤正樹、武内数馬、寺田優、大橋隆哉 (首都大学東京)、石川久美 (理研)、満田和久 (宇宙研): V315b 将来衛星搭載に向けた超軽量 X 線望遠鏡開発の現状

寺田優, 江副祐一郎, 小川智弘, 佐藤真柚, 中村果澄, 沼澤正樹, 武内数馬, 堤大樹, 田村亜衣, 佐原 宏典, 大橋隆哉 (首都大学東京), 石川久美 (理研), 満田和久 (ISAS/JAXA): V317b マイクロマシン技術を用いた超軽量 X 線望遠鏡の振動試験

石川久美 (理研), 江副祐一郎, 沼澤正樹, 小川智弘, 佐藤真柚, 中村果澄, 大橋隆哉 (首都大), 満田和久 (ISAS/JAXA), 前田龍太郎, 廣島洋, 倉島優一 (産総研), 野田大二 (マイクロマシンセンター): V318b 微細加工技術を用いた 12 inch シリコン光学系の X 線反射実証

鈴木翔太, 桑原啓介, 黒丸巖静, 小泉祥人, 細矢祥平, 大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 山田真也 (首都大), 満田和久 (宇宙研), 日高睦夫, 佐藤哲朗 (産総研): V321b 積層配線 TES 型 X 線カロリメータの表面粗さと超伝導転移の研究

沼澤正樹, 江副祐一郎 (首都大学東京), 石川久美 (理研), 小川智弘, 佐藤真柚, 中村果澄, 武内数馬, 寺田優, 大橋隆哉 (首都大学東京), 満田和久 (ISAS/JAXA), Ron Kelly (FEI Company), 村田薫 (FEI Japan Nano Port): V335a 集束イオンビームを用いた Si ミラーにおける X 線反射実証

大橋隆哉、石崎欣尚、江副祐一郎、山田真也 (首都大)、山崎典子、満田和久、竹井 洋 (ISAS/JAXA)、田原 譲、三石郁之 (名古屋大)、太田直美 (奈良女子大)、DIOS ワーキンググループ: V337a ダークバリオン探査ミッション DIOS 開発の進展状況

辻本匡弘、満田和久、山崎典子、竹井洋、小川美奈、杉田寛之、佐藤洋一、篠崎慶亮、岡本篤 (JAXA)、藤本龍一 (金沢大)、大橋隆哉、石崎欣尚、江副祐一郎、山田真也、瀬田裕美 (首都大)、田代信、寺田 幸功 (埼玉大)、北本俊二、星野晶夫 (立教大)、玉川徹、石川久美、野田博文 (理研)、佐藤浩介 (東京 理科大)、太田直美 (奈良女大)、澤田真理 (青山学院大)、三石郁之 (名古屋大)、村上正秀 (筑波大)、村上弘志 (東北学院大)、伊豫本直子 (九州大)、谷津陽一 (東工大) R. L. Kelley, C. A. Kilbourne, F. S. Porter, K. R. Boyce, M. E. Eckart, M. P. Chiao, M. A. Leutenegger, (NASA/GSFC), G.V. Brown (LLNL), D. McCammon (Wisconsin 大), A. Szymkowiak (Yale 大), J.-W. den Herder, D. Haas, C. de Vries, E. Costantini, H. Akamatsu (SRON), S. Paltani (Geneva 大), 他 ASTRO-H SXS チーム: V340a ASTRO-H 搭載 精密軟 X 線分光装置 SXS の開発の現状 XV

宮崎直人、山田真也 (首都大)、榎戸輝揚 (京都大)、大橋隆哉 (首都大): W115b 「すざく」が観測したマグネターのサイクロトロン共鳴線の探査

上原翔 (首都大)、河原創、増田賢人 (東大)、山田真也 (首都大)、逢澤正嵩 (東大): P201a 目視によるケプラーデータ中の超長周期トランジット惑星の発見

奥田和史、小林翔悟、中澤知洋 (東大理)、山田真也 (首都大)、牧島一夫 (理研): W121a 「すざく」によるブラックホール連星 Cygnus X-1 のソフト状態における ハードテイル成分の解析 (2)

谷治健太郎、政井邦昭、山田真也 (首都大): W123a 恒星風へのフィードバックを考慮した High Mass X-Ray Binary の質量降着モデル

● 日本天文学会 2015 年 秋季年会 2015 年 9 月 9-11 日 (甲南大学岡本キャンパス)

菅原悠宇紀、滝沢元和、板花まどか (山形大学)、赤松弘規 (SRON)、藤田裕 (大阪大学)、大橋隆哉、石崎欣尚 (首都大学): T08a Abell 3391 と Abell 3395 の連結領域の高温ガスの性質

山崎典子、満田和久、竹井 洋 (ISAS/JAXA)、大橋隆哉、石崎欣尚、江副祐一郎、山田真也 (首都大)、田原 譲、三石郁之 (名古屋大)、太田直美 (奈良女子大) DIOS ワーキンググループ: V310a ダークバリオン探査ミッション DIOS 開発の進展状況

辻本匡弘、満田和久、山崎典子、竹井洋、小川美奈、杉田寛之、佐藤洋一、篠崎慶亮、岡本篤 (JAXA)、藤本龍一 (金沢大)、大橋隆哉、石崎欣尚、江副祐一郎、山田真也、小波さおり、瀬田裕美 (首都大)、田代信、寺田幸功 (埼玉大)、北本俊二、星野晶夫 (立教大)、玉川徹、石川久美、野田博文 (理研)、佐藤浩介 (東京理科大)、太田直美 (奈良女大)、澤田真理 (青山学院大)、三石郁之 (名古屋大)、村上正秀 (筑波大)、村上弘志 (東北学院大)、伊豫本直子 (九州大)、R. L. Kelley, C. A. Kilbourne, F. S. Porter, K. R. Boyce, M. E. Eckart, M. P. Chiao, M. A. Leutenegger, (NASA/GSFC), G.V. Brown (LLNL), D. McCammon (Wisconsin 大), A. Szymkowiak (Yale 大), J.-W. den Herder, D. Haas, C. de Vries, E. Costantini, H. Akamatsu (SRON), S. Paltani (Geneva 大), 他 ASTRO-H SXS チーム: V326a 日本天文学会 2015 年 秋季年会 ASTRO-H 搭載 精密軟 X 線分光装置 SXS の開発の現状 XIV

石川久美 (理研)、江副祐一郎、大橋隆哉 (首都大)、三石郁之 (名古屋大)、藤本龍一 (金沢大)、満田 和久 (ISAS/JAXA)、村上正秀 (筑波大)、金尾憲一、吉田誠至、恒松正二 (住友重機械)、Michael DiPiro, Peter

Shirron (NASA/GSFC), 他 SXS チーム: V327a 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現状

奥田和史, 中澤知洋 (東大理), 牧島一夫 (理研), 山田真也 (首都大): J101a 「すぎく」によるブラックホール連星 Cygnus X-1 のソフト状態における ハードテイル成分の解析

山田真也 (首都大理工), D.A. Bennett, W.B. Doriese, J.W. Fowler, D.R. Schmidt, D.S. Swetz, J.N. Ullom (NIST), 岡田信二, 橋本直, 野田博文 (理研), 竜野秀行 (KEK/NIST), 石元茂 (KEK), HEATES チーム: V309a 超伝導 TES カロリメータを用いた K 中間子原子 X 線の精密分光プロジェクト (2)

● 第 13 回 X 線結像光学シンポジウム 2015 年 11 月 17 日 (名古屋大学)

山田真也、口頭発表 (招待講演): Soft X-ray Spectrometer onboard ASTRO-H and future prospects

● 第 4 回 新学術領域「重力波天体」シンポジウム 2016 年 2 月 18-20 日 (東京大学 IPMU 柏キャンパス)

Shinya Yamada, and the DIOS team: Developing fast-repointing framework for future satellites: based on the X-ray dark-baryon survey mission

● 原子衝突学会 2015 年 9 月 29 日 (首都大学東京)

江副祐一郎: 次世代 X 線望遠鏡の開発と太陽風電荷交換反応への展開 (招待講演)

● X 線望遠鏡研究会 2015 年 11 月 16 日 (名古屋大学)

大橋隆哉: DIOS: Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor (招待講演)

江副祐一郎: 微細加工技術を用いた軽量 X 線望遠鏡

● 第十六回宇宙科学シンポジウム 2016 年 1 月 6 日 (JAXA 宇宙科学研究所)

江副祐一郎: 小型衛星による天文宇宙物理の将来 (招待講演)

大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 山田真也 (首都大), 田原譲, 三石郁之 (名大), 満田和久, 山崎典子, 竹井洋 (ISAS): S5-012 ダークバリオン探査衛星 DIOS の開発の現状

前久景星, 林佑, 村松はるか, 山本亮, 中島裕貴, 満田和久, 山崎典子 (ISAS/JAXA), 大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 山田真也, 桑原啓介, 宮崎直人, 黒丸厳静, 鈴木 翔太, 細矢 祥平, 小泉 祥人 (首都大), 日高睦夫, 佐藤哲郎 (産総研), 野田博文 (理研), 本間敬之, 齋藤美紀子 (早稲田): P-178 次世代 X 線天文衛星 DIOS 搭載を目指した TES 型 X 線マイクロカロリメータの開発現状

満田和久, 石田学, 山崎典子, 前田良知, 辻本匡弘, 小川美奈, 竹井洋, 飯塚亮, 小山志勇, 酒井和広 (ISAS/JAXA), 大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 山田真也 (首都大), 他, SXS チーム: P-090 ASTRO-H 衛星搭載 軟 X 線分光システム SXS

大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 山田真也 (首都大) 他, ASTRO-H サイエンスチーム: P-086 ASTRO-H の目指すサイエンス

中村果澄, 江副祐一郎 (首都大) 他: P-182 将来衛星に向けた超軽量・高角度分解能 4 インチ X 線光学系開発の現状

● 原子分子データ応用フォーラムセミナー 2016 年 1 月 27 日、核融合研究所

江副祐一郎: X 線天文衛星 ASTRO-H による精密分光 (招待講演)

● 第三回宇宙ナノエレクトロニクスワークショップ、2016 年 3 月 30 日、JAXA 宇宙科学研究所

鈴木翔太, 桑原啓介, 黒丸厳静, 小泉祥人, 細矢祥平, 大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 山田真也, 満田和久, 佐藤哲朗, 日高睦夫: 積層配線 TES 型 X 線マクロカロリメータの表面粗さの改善と超伝導転移の研究

石川久美, 江副祐一郎, 大橋隆哉, 三石郁之, 藤本龍一, 満田和久, 村上正秀, 金尾憲一, 吉田誠至, 恒松正二, Michael DiPirro, Peter Shirron, 他 SXS チーム: Hitomi 衛星搭載 精密軟 X 線分光装置 SXS 用ヘリウム排気系の開発

沼澤正樹, 江副祐一郎, 石川久美, 小川智弘, 佐藤真祐, 中村果澄, 武内数馬, 寺田優, 大橋隆哉, 満田和久, 前田龍太郎, 廣島洋, 倉島優一, 野田大二, 金森義明, 森下浩平, Ron Kelley, 村田薫: マイクロマシン技術を用いた次世代超軽量 X 線望遠鏡の開発

国際会議

● Space Cryogenics Workshop, Phoenix, USA, June 24-26, 2015

Y.Ezoe, K.Ishikawa, I.Mitsuishi, T.Ohashi, K.Mitsuda, R.Fujimoto, M.Murakami, K.Kanao, S.Yoshida, S.Tsunematsu, M.DiPirro, P.Shirron and the SXS team: Flight model measurements of the porous plug and film flow suppression system for the ASTRO-H Soft X-ray Spectrometer dewar

● 16th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD-16), Grenoble, France, July 20-24, 2015

Kuromaru, G.; Kuwabara, K.; Miyazaki, N.; Suzuki, S.; Hosoya, S.; Koizumi, Y.; Ohashi, T.; Ishisaki, Y.; Ezoe, Y.; Yamada, S.; Mitsuda, K.; Hidaka, M.; Satoh, T.: Investigation of Surface Roughness Effect on Transition Edge Sensor Microcalorimeters Using Multilayer Readout Wiring

Porter, F. S.; Chiao, M. P.; Eckart, M. E.; Fujimoto, R.; Ishisaki, Y.; Kelley, R. L.; Kilbourne, C. A.; Leutenegger, M. A.; McCammon, D.; Mitsuda, K.; Sawada, M.; Szymkowiak, A. E.; Takei, Y.; Tashiro, M.; Tsujimoto, M.; Watanabe, T.; Yamada, S.: Temporal Gain Correction for X-ray Calorimeter Spectrometers

Tatsuno, H.; Doriese, W. B.; Bennett, D. A.; Curceanu, C.; Fowler, J. W.; Gard, J.; Gustafsson, F. P.; Hashimoto, T.; Hayano, R. S.; Hays-Wehle, J. P.; Hilton, G. C.; Iliescu, M.; Ishimoto, S.; Itahashi, K.; Iwasaki, M.; Kuwabara, K.; Ma, Y.; Marton, J.; Noda, H.; O'Neil, G. C.; Okada, S.; Outa, H.; Reintsema, C. D.; Sato, M.; Schmidt, D. R.; Shi, H.; Suzuki, K.; Suzuki, T.; Uhlig, J.; Ullom, J. N.; Widmann, E.; Yamada, S.; Zmeskal, J.; Swetz, D. S.: Absolute Energy Calibration of X-ray TESs with 0.04 eV Uncertainty at 6.4 keV in a Hadron-Beam Environment

Yamada, S.; Ohashi, T.; Ishisaki, Y.; Ezoe, Y.; Miyazaki, N.; Kuwabara, K.; Kuromaru, G.; Suzuki, S.; Mitsuda, K.; Yamasaki, N. Y.; Takei, Y.; Sakai, K.; Nagayoshi, K.; Yamamoto, R.; Hayashi, T.; Muramatsu, H.; Tawara, Y.; Mitsuishi, I.; Babazaki, Y.; Nakamichi, R.; Bandai, A.; Yuasa, T.; Ota, N.: Future Japanese X-ray TES Calorimeter Satellite: DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor)

Y. Ishisaki, S. Yamada, H. Seta, M.S. Tashiro, S. Takeda, M. Tsujimoto, K. Mitsuda, K.R. Boyce, M.P. Chiao, T. Watanabe, M. Eckart, M. Leutenegger, F.S. Porter, C. Kilbourne, R.L. Kelley, and SXS team: Performance and limitations of the pulse shape processor of ASTRO-H SXS for bright X-ray targets

● Exploring the Hot and Energetic Universe: The first scientific conference dedicated to the Athena X-ray observatory, Madrid, Spain, September 08-10, 2015

T. Ohashi: The Hot Universe: from Cosmological Filaments to Clusters (Invited)

Y. Ezoe: Solar system objects and exoplanets (Invited)

● ISAS Workshop: Magnetospheric Plasmas 2015, Tokyo, Japan, December 01-03, 2015

Y. Ezoe: X-ray imaging spectroscopy of the Jupiter system (Invited)

● Dark Side of the Universe 2015, Kyoto, Japan, December 14-18, 2015

T. Ohashi: X-ray study of the dark side of the Universe (Invited)

● X-ray Surveys of the Hot and Energetic Cosmos in IAU General Assembly, Honolulu, August 3-14, 2015

T. Ohashi: Future X-ray surveys -in relation to Japanese program (Invited)

電子物性研究室

1. 研究活動の概要

希土類イオンを含む化合物では、 f 電子に起因する強相関効果（量子力学的多体効果）が電子集団の性質をがらりと変えることにより、非従来型の超伝導や量子臨界的挙動などの興味ある多彩な現象が発現する。 f 電子が持つ「電荷、軌道とスピン（あるいは多極子）」の内部自由度は、結晶構造または希土類イオンが置かれた結晶内の環境に依存して活性化し、多彩な電子物性を生み出す元となる。我々は、特異な結晶構造を持つ化合物に着目し、純良単結晶を用いた物性研究を行うことにより、これまでにない新規な電子物性の探索と創出、発見した新規現象の機構解明を目指した実験的研究を行っている。今年度は、スタッフ 3 名、大学院生 10 名（博士後期 3 名 [うち学振特別研究員 2 名] と博士前期 7 名）、学部生 4 名の体制で研究を進めた。以下に主要な成果を示す。

1) $\text{SmTa}_2\text{Al}_{20}$ における磁気抵抗の Kohler 則からのずれと修正 Kohler 則の成立

我々はこれまでに、多数の「磁場の影響をうけない」特徴をもつ特異な重い電子状態や秩序状態を Sm 化合物中に見出してきた。カゴ状構造をもつ立方晶 $\text{SmTa}_2\text{Al}_{20}$ は、その一つである。この化合物の電気抵抗は、近藤効果の存在を示唆する明瞭な $\log T$ 依存性を示す。しかし、Ce 化合物で観測されるものとは異なり、磁場印加により抑制されないことから、非従来型の近藤効果が発現しているものと考えられる。この現象のメカニズムを理解するためには、Sm イオンの持つ f 電子が結晶中でどのような状態にあるのか調べていく必要がある。単結晶を用いて、 $\text{SmTa}_2\text{Al}_{20}$ の磁気抵抗を広い温度領域で調べた。 $\Delta\rho/\rho(0)$ は、温度によらずひとつの関数 $F(\mu_0 H/\rho(0))$ に従う Kohler 則よばれるスケーリング則から外れ、温度の低下とともに一桁も増大することを見出した (図 1(左))。この Kohler 則から外れる現象は、Sm イオンの持つ f 電子が関与する非従来型の近藤効果の発達に伴い準粒子が形成され、フェルミ面上の緩和時間に異方性（波数 $\mathbf{k}$ 依存性）が現れていく状況を反映しているものと解釈できる。さらに、図

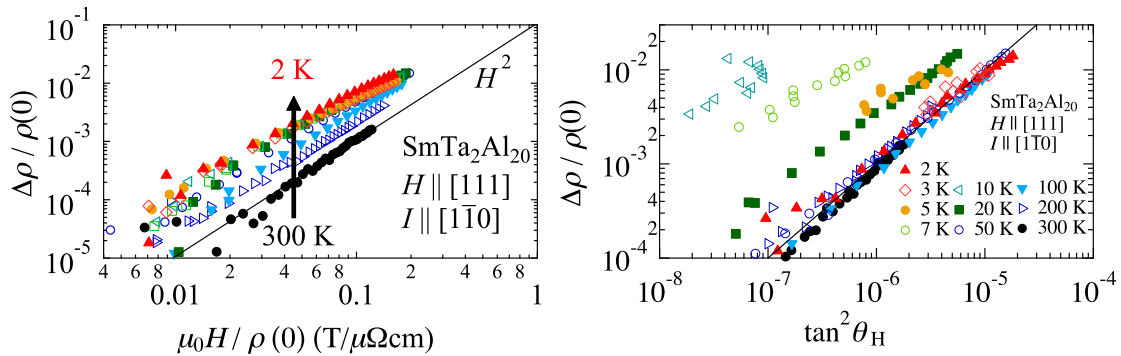


図 1: (左) $\text{SmTa}_2\text{Al}_{20}$ の磁気抵抗のコラー・プロット。(右) 修正コラー・プロット。

1(右) に示すように Hall 係数 R_H の符号反転温度 10 K 近傍を除く広範な温度領域において、磁気抵抗が修正 Kohler 則とよばれるスケーリング則、 $\Delta\rho/\rho(0) = \zeta \tan^2 \theta_H$ に従うことを確認した（ここで、 ζ は比例定数、 $\theta_H = \tan^{-1}(\rho_H/\rho)$ は Hall 角）。このような Kohler 則から外れる現象と修正 Kohler 則の成立は、銅酸化物超伝導体や CeTlIn_5 重い電子系化合物群においてのみ観測されている。量子臨界点近傍に位置するこれらの強相関電子系では、フェルミ面上に磁気揺らぎが強く発達したホットスポットが存在し、電気伝導を支配するコールドスポット近傍のキャリアがその影響を受けて（バックフロー効果）、このような特異な電子輸送現象がもたらされるものと理論的に解釈されている。本研究の $\text{SmTa}_2\text{Al}_{20}$ における磁気抵抗の Kohler 則からのずれと修正 Kohler 則の成立は、3 次元立方晶化合物では初めての発

見である。このことは、上述の修正 Kohler 則が、銅酸化物超伝導体や CeTIn_5 重い電子系化合物群のような 2 次元電子系あるいは準 2 次元電子系に限られたものではなく、普遍的に発現する電子輸送現象であることを示唆している。

2) $(\text{Sm}_x\text{La}_{1-x})\text{Ta}_2\text{Al}_{20}$ の電気抵抗率における磁場に鈍感な $-\log T$ 温度依存性

$\text{SmTa}_2\text{Al}_{20}$ における近藤効果の磁場に対して鈍感な性質が、Sm イオンの周期性がもたらすコヒーレント状態に起因するのか、あるいは Sm 単サイトに起因するのかを明らかにするため、Sm サイトを非磁性イオン La で置換した $(\text{Sm}_x\text{La}_{1-x})\text{Ta}_2\text{Al}_{20}$ の単結晶育成と物性測定を行った。図 2(左) に Sm 濃度を最も希薄にした $(\text{Sm}_x\text{La}_{1-x})\text{Ta}_2\text{Al}_{20}$ ($x = 0.01$) の電気抵抗率の温度依存性を示す。図 2(左) に示すとおり、Sm 希薄系においても電気抵抗率に $-\log T$ 温度依存性が現れ、9 T の磁場中でもこの傾きが不変であることを見出した。このことは $\text{SmTa}_2\text{Al}_{20}$ における非従来型の近藤効果の磁場に鈍感な性質が Sm 単サイトに起因することを示している。さらに、 $(\text{Sm}_x\text{La}_{1-x})\text{Ta}_2\text{Al}_{20}$ の磁気抵抗 $\Delta\rho/\rho(0)$ の Kohler 則からのずれが Sm イオン濃度の減少とともに小さくなることを確認した。この事実、Sm イオンの持つ f 電子が関与する非従来型の近藤効果の発達に伴って Kohler 則からのずれが引き起こされるという前述の解釈を支持する。また、 $x = 1$ の母相については、東京大学物性研究所国際強磁場施設の共同利用を利用して、14 T まで電気抵抗率の測定を行い、電気抵抗率の $-\log T$ 依存性の磁場に鈍感な性質を確認した。

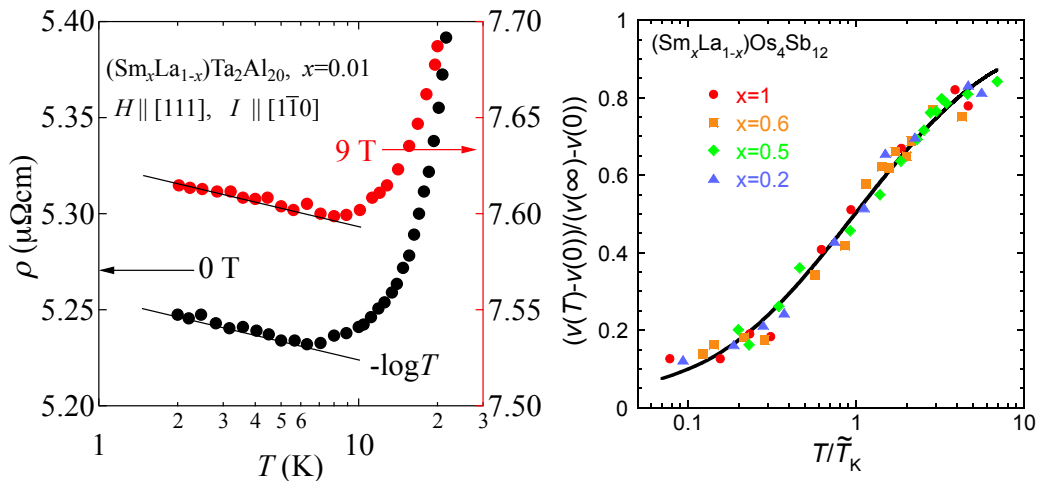


図 2: (左) $(\text{Sm}_x\text{La}_{1-x})\text{Ta}_2\text{Al}_{20}$ ($x = 0.01$) の電気抵抗率の温度依存性. (右) 規格化した Sm イオン価数の温度依存性.

3) X 線吸収分光実験による Sm 中間価数状態

SPring-8 BL01B1 の共同利用で放射光を用いて $(\text{Sm}_x\text{La}_{1-x})\text{Tr}_2\text{Al}_{20}$ ($\text{Tr} = \text{Ti}, \text{Ta}$) の Sm L_{III} 吸収端 X 線吸収分光 (X-ray absorption spectroscopy: XAS) の測定を行い、Sm イオンが平均価数 2.85 の中間価数状態にあり、温度 T および Sm 濃度 x に対して変化しないことを確認した。また、 $\text{SmTi}_2\text{Al}_{20}$ について、初めて磁気転移温度 $T_x = 6.5$ K 以下での X 線吸収分光実験に成功し、磁気転移に伴う Sm イオン価数の変化が見られないことを明らかにした。

4) $(\text{Sm}_x\text{La}_{1-x})\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$ の $\log T$ 温度依存する Sm イオン価数：電荷が関与した非従来型の近藤効果の可能性

充填スクッテルダイト化合物 $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ は、「磁場の影響を受けない重い電子状態」が初めて観測された典型物質である (2005 年に我々が発見。電子比熱係数 $\gamma = 800$ mJ/K²mol は、数 10 テスラの磁場中

でも減少しない)。我々は、Sm イオンを部分的に La で置換した $\text{Sm}_x\text{La}_{1-x}\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$ の単結晶試料を育成し、放射光施設 SPring-8 で X 線吸収分光法を用いて、Sm イオンの価数の濃度依存性および温度依存性を測定した。測定を行った全ての濃度の試料で、Sm イオン価数が $\log T$ のような温度依存を示すことを見出した。このことから、この特徴的振る舞いは、個々の Sm イオンが持つ性質（単サイト効果）であることがわかる。さらに、全ての Sm イオン濃度について、Sm イオン価数の温度依存が、一つのユニバーサル曲線で整理できることがわかった。この実験データは、図 2(右) に示すように、広義の近藤効果（巨大非調和振動する Sm イオンの電荷揺らぎを伝導電子がシールドする、電荷版の近藤効果）の理論曲線と良く一致する。特徴的な温度（広義の近藤温度）は約 60 K であることがわかる。以上の成果は、 $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ の低温で観測される磁場の影響を受けない非従来型の重い電子状態の形成が、Sm イオンの電荷揺らぎが関与する広義の近藤効果に起因している可能性を示唆している。

5) BiS_2 系超伝導体の単結晶試料を用いた放射光実験

BiS_2 系超伝導体の単結晶を育成し、研究室内でその基礎物性測定を行いつつ、国内外との共同研究も幅広く進めている。放射光実験により、本系の電子構造に関わる重要な成果を 2 つ得ることができた。(1) BiS_2 層にドーピングされた伝導キャリアは、Bi の面内 6p 軌道に入るが、これまでこの軌道は最近接 S イオンの方向へ向いているものと考えられていた。 $\text{CeO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ 単結晶試料を用いた角度分解光電子分光の偏光依存測定により、この軌道が x, y 結晶軸方向を向いており、一次元的特性を持っていることが明らかとなった。(2) 高精度単結晶構造解析により、超伝導体の母相となる LaOBiS_2 の結晶対称性が、tetragonal $P4/nmm$ から、monoclinic $P2_1m$ へと低下していることがわかった。本系の電子構造が持つ不安定性に起因した構造相転移である可能性があり、電子構造を今後明らかにしていく上で重要な成果である。前者は杉本氏・溝川研究室（早稲田大）、Seini 研究室（ローマ・ラ・サピエンツァ大）と、後者は佐賀山氏・村上研究室（KEK）との共同研究の成果である。

6) SmPt_2Si_2 における「揺らぐ磁気モーメント（部分無秩序状態）」を含む特異な磁気秩序状態の可能性

前年度、 SmPt_2Si_2 の単結晶育成に成功し、Sm イオンが完全イジング磁気異方性を持つことや（結晶場基底状態の確定）、磁化率がキュリーワイス則に従う特異な反強磁性状態（「揺らぐ磁気モーメント（部分無秩序状態）」を含んでいる可能性がある）が低温領域に存在することを発見した（本成果は、日本物理学会欧文誌の注目論文に選出された）。本年度は、東京大学物性研のパルス強磁場中磁化測定を組み合わせ、磁場温度相図を決定した。電子輸送測定を行い、相境界に現れる電気抵抗率や Hall 係数の異常を明らかにした。また、関連物質 SmIr_2Si_2 の純良単結晶（ $RRR = 270$ ）の育成に成功し、38 K に新たな磁気相転移があることを見出した。

7) RPd_3Ga_8

充填型スクッテルダイト化合物や 1-2-20 系の立方晶 Sm 化合物で発見された特異な物性研究を発展させ、上記のように新たに正方晶系の SmPt_2Si_2 等、対称性を低下させた系においても新奇な物性異常を発見してきた。さらに今年度、Sm-*Tr*-Ga (*Tr*:遷移金属) の 3 元系において物質探索を進めた結果、菱面体晶の SmPd_3Ga_8 を発見した。この系は、強相関電子系としてよく知られた立方晶系 RCd_{11} の結晶構造において、Cd サイトを 2 サイトに分割し、希土類サイトの局所対称性を低下させた構造を持つ。そのため希土類 *R* サイトの対称性と物性の変化を系統的に研究する上で一つの良い研究対象となる可能性がある。また、この SmPd_3Ga_8 は、Sm サイトを希土類元素によって系統的に置き換えることができ、それらの一部は新物質であることが確認された。今後、個々の物性のみならず、希土類サイトの局所対称性と物性異常との関係について系統的理解をめざす上で重要な物質系であると考えられる。

2. 研究業績

1) 論文

Akira Yamada, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, Hideyuki Sato, Atsushi Miyake, Masashi Tokunaga, and Yuji Aoki: Unconventional $-\log T$ dependent resistivity in $\text{Sm}_x\text{La}_{1-x}\text{Ta}_2\text{Al}_{20}$, *Physics Procedia*, **75**, 522 (2015)

Tetsuro Kubo, Hisashi Kotegawa, Hideki Tou, Ryuji Higashinaka, Akihiro Nakama, Yuji Aoki, and Hideyuki Sato Absence of Magnetic Dipolar Phase Transition and Evolution of Low-Energy Excitations in $\text{PrNb}_2\text{Al}_{20}$ with Crystal Electric Field Γ_3 Ground State: Evidence from ^{93}Nb -NQR Studies , *J. Phys. Soc. Jpn.*, **84**, 074701 (2015).

T. Sugimoto, D. Ootsuki, C. Morice, E. Artacho, S. S. Saxena, E. F. Schwier, M. Zheng, Y. Kojima, H. Iwasawa, K. Shimada, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, M. Takahashi, N. L. Saini, T. Asano, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, Y. Aoki, and T. Mizokawa Fermi surfaces and orbital polarization in superconducting $\text{CeO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ revealed by angle-resolved photoemission spectroscopy, *Phys. Rev. B*, **92**, 041113(R) (2015).

Kengo Fushiya, Tatsuma D. Matsuda, Ryuji Higashinaka, and Yuji Aoki Electrical resistivity of single-crystal SmIr_2Si_2 , *Physica Procedia*, **75**, 77 (2015).

Kengo Fushiya, Ryoich Miyazaki, Ryuji Higashinaka, Akira Yamada, Masaichiro Mizumaki, Satoshi Tsutsui, Kiyofumi Nitta, Tomoya Uruga, Bunya Suemitsu, Hideyuki Sato and Yuji Aoki Logarithmic temperature dependence of Sm ion valence in heavy fermion $\text{Sm}_x\text{La}_{1-x}\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$, *Phys. Rev. B*, **92**, 075118 (2015).

Akira Yamada, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki, and Hideyuki Sato Deviation from Kohler ' s Rule Closely Correlated with the Field-Insensitive $-\log T$ Dependence of Resistivity in $\text{SmTa}_2\text{Al}_{20}$, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **84**, 103701 (2015).

Ryuji Higashinaka, Akira Yamada, Tatsuma D. Matsuda and Yuji Aoki La substitution effect on the magnetic phase transition of $\text{SmTa}_2\text{Al}_{20}$, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **683**, 012018 (2016).

Kengo Fushiya, Tatsuma D. Matsuda, Ryuji Higashinaka, and Yuji Aoki Transport properties of single-crystalline Ising magnet SmIr_2Si_2 , *J. Phys.: Conf. Ser.*, **683**, 012033 (2016).

Akira Yamada, Ryuji Higashinaka, Kengo Fushiya, Takuya Asano, Tatsuma D. Matsuda, Masaichiro Mizumaki, Satoshi Tsutsui, Kiyofumi Nitta, Toshiaki Ina, Tomoya Uruga and Yuji Aoki Mixed valence state ($\text{Sm}_x\text{La}_{1-x}$) $\text{Tr}_2\text{Al}_{20}$, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **683**, 012020 (2016).

Ryoko Sagayama, Hajime Sagayama, Reiji Kumai, Youichi Murakami, Takuya Asano, Joe Kajitani, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Satsuma, Yuji Aoki Symmetry Lowering in LaOBiS_2 , A Mother Material for BiS_2 -Based Layered Superconductors , *J. Phys. Soc. Jpn.*, **84**, 123703 (2015)

2) 学会講演

● 日本物理学会 2015 年第 71 回年次大会 2015 年 9 月 16 日 – 19 日 (関西大学)

伏屋健吾, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: 充填スクッテルダイト $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$ の磁場誘起電荷秩序相の磁気異方性 (II)

山田瑛, 東中隆二, 伏屋健吾, 浅野卓也, 松田達磨, 青木勇二, 佐藤英行, 三宅厚志, 徳永将史, 水牧仁一郎, 筒井智嗣, 伊奈稔哲, 新田清文, 宇留賀朋哉: 磁場に鈍感な近藤効果的異常を示す $\text{Sm}_x\text{La}_{1-x}\text{Ta}_2\text{Al}_{20}$ における $\text{Sm}4f$ 電子状態

原 和輝, 山田瑛, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: 新規 Sm 化合物 SmPd_3Ga_8 の結晶構造と基礎物性

東中隆二, 山田瑛, 水牧仁一郎, 筒井智嗣, 伊那稔哲, 新田清文, 宇留賀智哉, 松田達磨, 青木勇二, 佐藤英行: 磁場に鈍感な重い電子状態を示す $\text{SmTi}_2\text{Al}_{20}$ における La 希釈効果

松田達磨, 今井勇輝, 山田瑛, 原和輝, 東中隆二, 青木勇二: 強相関電子系 SmGa_6 の低温物性

梶谷丈, 三田昌明, 浅野卓也, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨: $\text{EuO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ の単結晶育成と物性測定

三田昌明, 浅野卓也, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: 層状超伝導体 $\text{NdO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ の極低温物性

佐賀山遼子, 佐賀山基, 熊井玲児, 村上洋一, 浅野卓也, 梶谷丈, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: 放射光 X 線を用いた LaOBiS_2 の単結晶構造解析

杉本拓也, 大槻太毅, Corentin Morice, Emilio Artacho, S. S. Saxena, 高橋雅也, E. F. Schwier, 岩沢英明, 島田賢也, 有田将司, 生田目博文, 谷口雅樹, Naurang L Saini, 浅野卓也, 中島卓也, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, 溝川貴司: Fermi surfaces and orbital polarization of $\text{CeO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ revealed by angle-resolved photoemission spectroscopy

秋田星二, 北川俊作, 小手川恒, 藤秀樹, 井澤宏輝, 水口佳一, 三浦大介, 浅野卓也, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, 田中将嗣, 高野義彦, 長尾雅則: 超伝導体 $\text{La}(\text{OF})\text{BiS}_2$ の高圧下におけるホール効果と熱膨張測定

神戸振作, 徳永陽, 酒井宏典, 服部泰佑, 松田達磨, 芳賀芳範, R.E. Walstedt: URu_2Si_2 の隠れた秩序状態の Si-NMR : 線幅の解析

福本健太, 小手川恒, 藤秀樹, 明比亮介, 松田達磨, 山本悦嗣, 芳賀芳範, Zachary Fiska, 大貫惇睦, 青木大, Jacques Flouquet: UCoAl の強磁性量子臨界終点近傍の圧力下 NMR による研究

三宅遼磨, 久保徹郎, 小手川恒, 藤秀樹, 東中隆二, 中間章浩, 青木勇二, 佐藤英行: カゴ状物質 $\text{PrTa}_2\text{Al}_{20}$ の $^{27}\text{Al-NMR}$ による研究

久保徹郎, 小手川恒, 藤秀樹, 東中隆二, 中間章浩, 青木勇二, 佐藤英行, 井原慶彦, 後藤貴行, 佐々木孝彦: Γ_3 二重項結晶場基底状態を持つ $\text{PrNb}_2\text{Al}_{20}$ の強磁場 $^{93}\text{Nb-NMR}$ による研究

高橋祥平, 大山雄輔, 長谷川潤也, 中西良樹, 中村光輝, 吉澤正人, 山田瑛, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, 佐藤英行: $\text{SmTa}_2\text{Al}_{20}$ の低温弾性特性と相転移異常

伊藤孝, 髭本亘, 伏屋健吾, 松田達磨, 青木勇二: イジング反強磁性体 SmPt_2Si_2 の μSR 測定

● 日本物理学会 2016 年第 71 回年次大会 2016 年 3 月 19 日 – 22 日 (東北学院大学)

久保徹郎, 三宅遼磨, 松野治貴, 小手川恒, 藤秀樹, 播磨尚朝, 東中隆二, 中間章浩, 青木勇二, 佐藤英行, 井原慶彦, 後藤貴行, 佐々木孝彦: 単結晶 $\text{PrT}_2\text{Al}_{20}$ の NMR 測定

武野瑞紀, 伏屋健吾, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: 強磁性近藤格子系 CePd_2P_2 の単結晶育成と物性測定

三田昌明, 浅野卓也, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: 層状超伝導体 $\text{Nd}(\text{O}_{1-x}\text{F}_x)\text{BiS}_2$ が示す磁気比熱の異常な $-\log T$ 依存性

松田達磨, 八木薫郎, 山田瑛, 東中隆二, 青木勇二: CeTGa_6 (T : 遷移金属) の低温磁気秩序相

浅野卓也, 梶谷丈, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: $\text{Ce}(\text{O}_{1-x}\text{F}_x)\text{BiS}_2$ 単結晶の超伝導特性と異常磁性

梶谷丈, 遠藤秀晃, 浅野卓也, 三田昌明, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: EuFBiS_2 および $\text{Eu}_3\text{Bi}_2\text{S}_4\text{F}_4$ の単結晶育成と基礎物性測定

髭本亘, 伊藤孝, 浅野卓也, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: $\text{Ce}(\text{O}_{1-x}\text{F}_x)\text{BiS}_2$ の μSR

佐賀山遼子, 佐賀山基, 熊井玲児, 村上洋一, 浅野卓也, 梶谷丈, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: 放射光 X 線を用いた $\text{La}(\text{OF})\text{BiS}_2$ の格子歪の研究

山本直季, 三田昌明, 浅野卓也, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: $\text{Pr}(\text{O}_{1-x}\text{F}_x)\text{BiS}_2$ 単結晶の極低温における $4f$ 電子の磁性

山田瑛, 伏屋健吾, 石見聖, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: SmT_2X_2 の純良単結晶育成と低温磁性

高橋祥平, 大山雄輔, 長谷川潤弥, 中西良樹, 中村光輝, 吉澤正人, 山田瑛, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, 佐藤英行: 籠状物質 $\text{SmTa}_2\text{Al}_{20}$ の低温弾性特性と相転移異常 (II)

大池翔太, 山田瑛, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: $\text{SmPt}_2\text{Cd}_{20}$ の単結晶育成と物性測定

原和輝, 山田瑛, 小林拓郎, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: 新規 Sm 化合物 SmPd_3Ga_8 の基礎物性

服部泰佑, 酒井宏典, 徳永陽, 神戸振作, 松田達磨, 芳賀芳範: 単結晶 URu_2Si_2 における ^{29}Si NMR ナイトシフトの測定

中根僚宏, 藤田渉, 山田瑛, 松田達磨: 二次元正方格子構造を有するコバルト化合物 $\text{Co}(\text{HOCH}_2\text{COO})_2$ における磁気相転移

小手川恒, 福本健太, 明比亮介, 藤秀樹, 松田達磨, 山本悦嗣, 芳賀芳範, Zachary Fisk, 大貫惇睦, 青木大, Jacques Flouquet: UCoAl の圧力下のメタ磁性転移に対する NMR による研究

神戸振作, 酒井宏典, 徳永陽, 服部泰佑, Gerard Lapertot, 松田達磨, Georg Knebel, Jacques Flouquet, Russell, Walstedt: YbRh_2Si_2 の NMR スピンエコー減衰

国内研究会

● 日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター 第 599 回基礎科学セミナー 2015 年 7 月 27 日 (日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター)

松田達磨: BiS_2 系超伝導体の単結晶を用いた結晶構造と磁気特性

● 第 9 回物性科学領域横断研究会—凝縮系科学の最前線— 2015 年 11 月 13 – 15 日 (東京大学本郷キャンパス)

伏屋健吾, 松田達磨, 東中隆二, 青木勇二 : イジング磁性体 SmPt_2Si_2 における Sm イオン部分無秩序状態形成の可能性

東中隆二, 浅野卓也, 伏屋健吾, 松田達磨, 青木勇二 : BiS_2 系層状超伝導体 $\text{CeO}_{1-x}\text{BiS}_2$ の低温物性

山田 瑛, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, 佐藤英行 : $\text{SmTa}_2\text{Al}_{20}$ における磁場に鈍感な近藤効果

国際会議

● 20th International Conference on Magnetism (ICM 2015), Palau de Congressos de Catalunya, Barcelona, Spain, July 5 – 10, 2015

A. Yamada, R. Higashinaka, T.D. Matsuda, Y. Aoki, and H. Sato : Transport properties of Field-Insensitive Heavy-Fermion Compound $\text{SmTa}_2\text{Al}_{20}$

K. Fushiya, R. Higashinaka, T.D. Matsuda, and Y. Aoki : Possible existence of partially disordered Sm ions in magnetically ordered state of Ising magnet SmPt_2Si_2

R. Higashinaka, T. Asano, T. Nakashima, K. Fushiya, Y. Mizuguchi, O. Miura, T. D. Matsuda, and Y. Aoki : Unconventional quantum critical behavior in nonmetallic CeOBiS_2 : A mother phase of BiS_2 -based superconductor

G. Knebel, A. Pourret, D. Aoki, T. Combier, A. Palacio Morales, G. Lapertot, T. D. Matsuda, and J. Flouquet : Metamagnetism in heavy fermion systems (invited)

T. Asano, T. Nakashima, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, and Y. Aoki : Anomalous ferromagnetic anomaly coexisting with superconductivity in layered superconductor $\text{CeO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$

● TMU International Symposium 2015, "New Quantum Phases Emerging from Novel Crystal Structure" Minami-Osawa campus, Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan, Sep. 24 – 25, 2015

M. Mita, T. Asano, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, Y. Aoki : Magnetic properties of Nd ions in superconducting single crystal $\text{NdO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$

T. Asano, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, Y. Aoki : Anomalous ferromagnetic anomaly coexisting with superconductivity in layered superconductor $\text{CeO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$

J. Kajitani, O. Miura, Y. Mizuguchi, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, Y. Aoki : Chemical pressure effect on superconductivity of BiS_2 -based $\text{Ce}_{1-x}\text{Nd}_x\text{O}_{1-y}\text{F}_y\text{BiS}_2$ and $\text{Nd}_{1-z}\text{Sm}_z\text{O}_{1-y}\text{F}_y\text{BiS}_2$

A. Yamada, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, Y. Aoki, H. Sato : Transport properties of Field-Insensitive Heavy-Fermion Compound $\text{SmTa}_2\text{Al}_{20}$

K. Fushiya, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, Y. Aoki : Strongly correlated electron behaviors of Sm-based 122 compounds

T. D. Matsuda, Y. Imai, A. Yamada, K. Hara, R. Higashinaka, Y. Aoki : Investigation of magnetic ground state of $R\text{Ga}_6$

- K. Nagasaka, T. Hiroi, J. Kajitani, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, Y. Aoki, O. Miura, Y. Mizuguchi : Crystal structure and superconducting properties of $RE(O,F)BiS_2$ (RE : La, Ce, Pr, Nd, Sm)
- T. Kubo, H. Kotegawa, H. Tou, R. Higashinaka, A. Nakama, Y. Aoki, H. Sato : High field ^{93}Nb -NMR study of the Γ_3 CEF doublet ground state system $\text{PrNb}_2\text{Al}_{20}$
- T. Takeuchi, S. Tsutsui, K. Fushiya, Y. Aoki : Thermal Expansion of the Unique Heavy Fermion Compound $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ and $\text{LaOs}_4\text{Sb}_{12}$
- R. Higashinaka, A. Yamada, R. Miyazaki, T. D. Matsuda, Y. Aoki, H. Sato : Unusual field-insensitive phase transition and Kondo behavior in $\text{SmTr}_2\text{Al}_{20}$ (invited)
- S. Kambe, H. Sakai, Y. Tokunaga, G. Lapertot, T. D. Matsuda, G. Knebel, J. Flouquet, R. E. Walstedt : Mottled electronic state near quantum critical phase transition in YbRh_2Si_2 (invited)
- T. Sugimoto, B. Joseph, E. Paris, D. Ootsuki, M. Takahashi, C. Morice, E. Artacho, S. S. Saxena, A. Iadecola, E. F. Schwier, M. Zheng, Y. Kojima, H. Iwasawa, K. Shimada, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, N. L. Saini, S. Demura, Y. Mizuguchi, Y. Takano, T. Asano, T. Nakajima, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, Y. Aoki, T. Mizokawa : Electronic structure of $\text{Ce}(O,F)BiS_2$ revealed by x-ray absorption, resonance photoemission, and angle-resolved photoemission spectroscopies (oral)
- H. Sagayama, R. Sagayama, R. Kumai, Y. Murakami, T. Asano, J. Kajitani, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, Y. Aoki : Symmetry breaking of the mother material of BiS_2 -based layered superconductor, LaOBiS_2 (invited)

ナノ物性研究室

1. 研究活動の概要

原子層物質, カーボンナノチューブ (CNT), ゼオライト, フラーレンなどのナノメートルサイズの構造を有する物質系では, バルク物質では見られない興味深い性質が現れる. 本グループでは, このようなナノ構造物質系において, 新規物性の探索とその発現機構について, 計算機実験を含む物性実験の種々の手法を用いて研究している. 2015 年度の主な研究・教育活動の概要は以下のとおりである.

1) 第二, 第三世代単層カーボンナノチューブの固体物性

単層カーボンナノチューブ (SWCNT) の構造は, カイラル指数と呼ばれる二つの整数の組 (n,m) により指定できる. (n,m) を与えることによりチューブ直径などの構造のほか, その電子状態も一義的に決定される. たとえば, $n-m$ が 3 の倍数の SWCNT は金属型, 他のは半導体型となる. したがって SWCNT の固体物性研究においては, 単一指数の SWCNT を得ることが極めて重要となるが, このような試みは未だ充分ではない. 本グループでは, 金属型と半導体型のどちらかが濃縮された SWCNT を第二世代 SWCNT, さらに単一構造 (指数) の SWCNT が濃縮されたものを第三世代 SWCNT と呼び, これらの試料を作製し, その固体物性の研究を行っている. 今年度は, SWCNT の熱電物性の研究を系統的に行った (上田, 藤田, 林修士論文). また, 磁性不純物を除去した高純度 SWCNT 試料を用いた SWCNT の 1 次元電子物性の研究を行った (芹田修士論文). 特に, 第一世代 SWCNT 試料を用いた SWCNT の熱電物性の直径依存性について論文発表を行ったので, 以下に紹介する. 本研究室では, 高純度半導体型 SWCNT フィルムが実用熱電材料に匹敵する大きなゼーベック係数 S (発生熱起電力と試料両端の温度差の比) を有することを見出している. しかしながら, S の絶対値は理論予測の数分の一程度しかなく, フィルムの熱起電力発生機構の詳細が明らかになっていなかった. また理論的に半導体型 SWCNT の S は直径に反比例して大きくなることが予測されているがその検証は行われていなかった. そこで, 本研究室では, SWCNT フィルムの熱電物性について, SWCNT 直径依存性と半導体型と金属型の混合効果を実験的および理論的に調べた. (理科大学との共同研究) その結果, 混合 SWCNT フィルムでは直径依存性がほとんどないことがわかった. また, 僅か数パーセントの金属型の混入によりフィルムの熱電物性が顕著に影響を受けることが明らかになった. この敏感な混合効果は, フィルム内に存在する金属型と半導体型の並列接続構造が本質的に重要であることを明らかにした. さらに, 実験と理論的考察を総合して, SWCNT フィルムの潜在的なパワーファクター P (発電電力量の目安) は $1000 \mu W/(mK^2)$ 以上であることを示した. これは従来の SWCNT フィルムの P の十倍以上の大きさである. 水が SWCNT フィルムへホールドープを誘起することも発見した.

2) 制限空間内の水

水はあらゆるところに存在する. 地殻や土壌, 生体内部や大気中, 宇宙空間にさえ存在する. 水はごくありふれた物質である. しかしその本質は未だ十分に明らかにされていない. バルクの液体の水には 2 種類あると考えられている. 高密度水と低密度水である. この 2 種類の水に関わる第 2 臨界点仮説が提案され, $4^\circ C$ で密度が最大になるなどの水の異常の起源について議論されている. このような水は, 微細な空間内あるいは幾何学的に強く束縛された条件下においても存在し, 自然界における様々な現象において支配的な役割を担っている. また微細空間内の水の理解は, プロトン伝導体や新規分離膜などの開発においても重要である. 本年度は, SWCNT フィルムのゼーベック係数と電気抵抗率を水雰囲気下において測定し, 水がホールドープを誘起することを見出した (藤田, 上田修士論文).

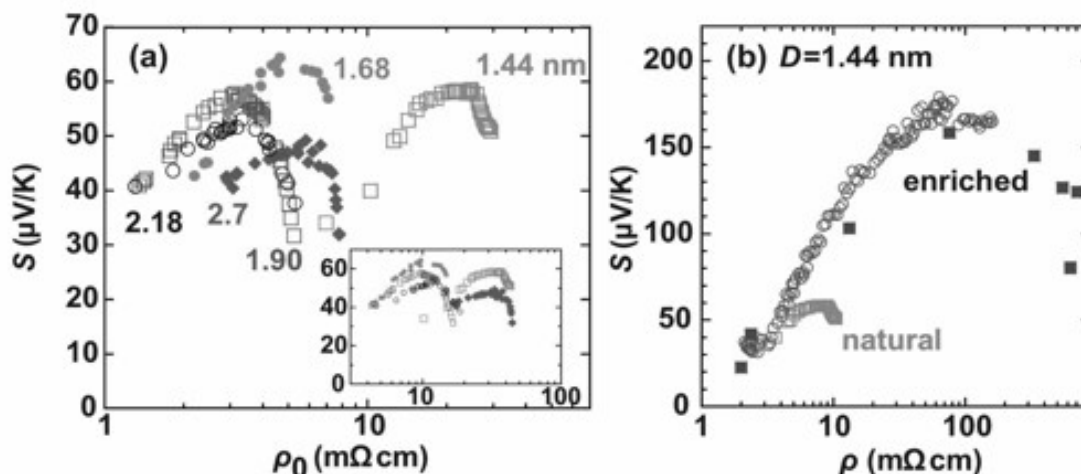


図 1: 電気抵抗率 ρ と S の関係. グラフ内の数字は SWCNT の平均直径 D , ρ_0 はフィルム密度を 0.5gcm^{-3} に換算したときの電気抵抗率. 右図は, 高純度半導体型フィルムと第一世代 SWCNT フィルムの比較. S と ρ_0 の間の相関は弱く, 電気抵抗率の改善により, パワーファクターが一桁以上大きくなると予想した (APEX2016 提案) .

3) ナノ構造物質の電子状態およびダイナミクスの核磁気共鳴 (NMR) による研究

SWCNT, 有限長 SWCNT ピーポッド, セメント超伝導体 C12A7, ボロンクラスター固体, SWCNT などの電子状態や内包フラーレンのダイナミクスを明らかにする目的で微視的プローブである NMR による研究を行っている. 精製処理により磁性不純物を除去した太い SWCNT 試料の ^{13}C -NMR 測定を行った. スピン格子緩和時間の測定を行い, 1 次元金属特有の朝永-ラッティンジャー的電子状態の SWCNT 直径依存性に注目して検討した (芹田修士論文) .

4) ナノ構造炭素の構造と磁性の研究

グラファイト様ナノ炭素は多数の構造が存在し, 微妙な構造の相違が顕著にその物性に影響する. そこで, 多種類のナノ炭素について, 新規熱電物性 (沢辺卒業研究) と磁性の探索を行った. また, 微小試料の磁性を調べる方法として磁気共鳴法による表面磁場測定法を検討した (柳川卒業研究) .

5) 半導体原子層ヘテロ構造の結晶成長と物性解明

原子層物質のヘテロ構造は, 従来にはない人口二次元構造として, 特異な物性の発現や光・電子デバイス応用が期待されている. われわれは, 主に気相成長を利用し, グラフェンや窒化ホウ素, および二種類の半導体遷移金属ダイカルコゲナイド (TMDC) を用いたヘテロ構造の作製法と界面構造・物性について研究を進めている. 今年度は, 主に二硫化モリブデンと二硫化タングステン系 TMDC の面内接合型および積層型のヘテロ構造を作製し, その光学的性質や電子構造の研究を行った. 特に, 単層の面内接合型では, 走査トンネル顕微鏡/分光 (STM/STS) より価電子帯と伝導帯が界面近傍でどのように変化するか可視化することに成功した (小林修士論文, 筑波大学との共同研究, 図 2) . また, 積層型においては, 層間励起子に起因すると考えられる発光スペクトルの観測と解析を行った (齋藤卒業研究, 京都大学, NIMS との共同研究) .

6) グラフェンのエッジ構造制御とヘテロ構造作製

炭素の単原子膜であるグラフェンは, その優れた機械的・電気的特性に加え, 端構造に依存したユニークな物性を示す. グラフェンの端構造には, ジグザグ端とアームチェア端の二種類が存在し, これら端の選択的な作製が困難であることが実験的な研究における課題となっている. 本研究では, 水蒸気中での異方

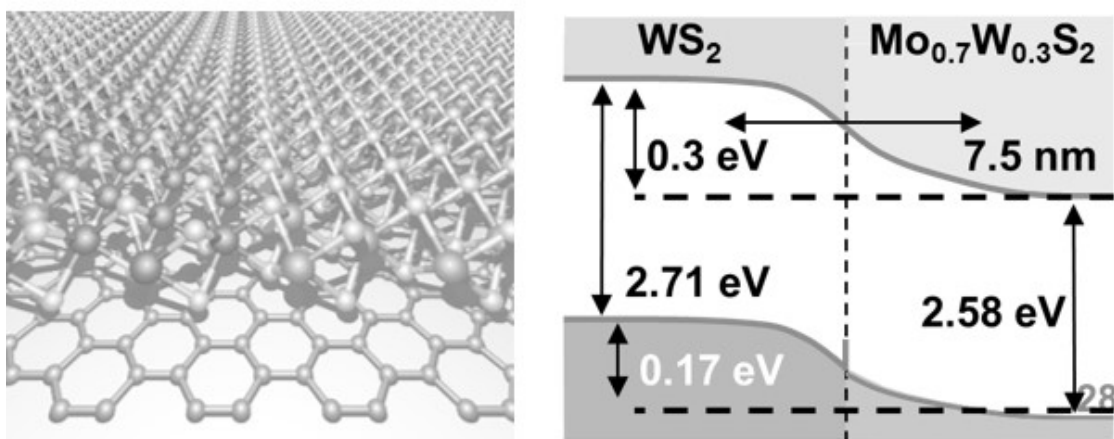


図 2: グラファイト上に成長させたヘテロ構造のモデルと実験的に決定したバンドダイアグラム。

性エッチングを用いたグラフェンのエッジ制御に関する検証実験を進めてきた。特に、化学気相成長で合成したグラフェンの場合、層数に依存して異方性エッチングの起こりやすさが変わることを明らかにした（小川卒業論文）。また、大面積のグラフェン・窒化ホウ素ヘテロ構造を作製するため、金属融解を利用した気相成長グラフェンの転写法の開発を進めてきた（井上修士論文）。

7) 圧力下 ESR による β' -(BEDT-TTF) $_2$ ICl $_2$ の電子状態

Mott 絶縁体である有機電荷移動錯体 β' -(BEDT-TTF) $_2$ ICl $_2$ は常圧、22 K で反強磁性転移を起こし、8.2 GPa 以上の圧力下で有機導体としては高い転移温度 14.2 K で超伝導転移を示す。本研究では、常圧の電子状態がどのような電子状態を経由して圧力下での金属的状态に変化するかを、圧力下 ESR を用いて磁性の面から調べるために、高圧下（3～10 GPa）測定用のキュービクアンビルセルを利用した ESR 装置開発を進めている。粘り気があり耐圧性が大きく、また、磁性を持たないジルコニア（ZrO $_2$ ）のアンビルが最も適していることがわかり、90 ton（約 9 GPa）まで加圧する事ができ、信号を得てきた。リード線の引き回しの改善や静磁場用コイルからの電流の漏れ防止等により、従来の大きなベースラインの歪みは軽減できたが、完全になくすことはできていない。この歪みの原因はわかっていないが、磁場の方向や圧力に依存する特徴があり、高周波用のコイルが関係している可能性が考えられる。まず、高周波用コイルをアニールする、コイルの材質を変える、等を試す予定である。また、試料を収めるガスケットの材質、密度、形状が、圧力のかかり具合に影響を与えることがわかった。一定の密度のガスケットを作るのは困難であるが、これらの性質を最適化する必要がある。（埼玉大、産総研、千葉大との共同研究）

8) 学外共同利用施設による研究、その他

京都大学エネルギー理工研究所において顕微分光実験を行った。課題名（課題番号）：顕微分光による原子層物質の光学特性解明（ZE27A-5）

KEK 放射光施設において共同利用研究を行った。課題名（課題番号）：単層カーボンナノチューブとグラフェンの精密構造評価（2014G561）

2. 研究業績

1) 論文

J. Nozaki, S. Mori, Y. Miyata, Y. Maniwa, K. Yanagi: Local optical absorption spectra of MoS $_2$ monolayers obtained using scanning near-field optical microscopy measurements, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **55** (2016) 038003-1-3. DOI:10.7567/JJAP.55.038003, Feb. 2016

D. Hayashi, T. Ueda, Y. Nakai, H. Kyakuno, Y. Miyata, T. Yamamoto, T. Saito, K. Hata, Y. Maniwa: Thermoelectric properties of single-wall carbon nanotube films: Effects of diameter and wet environment, *Appl. Phys. Express*, **9** (2016) 0251029-1-4. DOI: 10.7567/APEX.9.025102, Jun. 2015

R. Kitaura, Y. Miyata, R. Xiang, J. Hone, J. Kong, R. Ruoff, S. Maruyama : Chemical Vapor Deposition Growth of Graphene and Related Materials, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **84** (2015) 121013-1-13. DOI: 10.7566/JPSJ.84.121013, Nov. 2015

S. Yoshida, Y. Kobayashi, R. Sakurada, S. Mori, Y. Miyata, H. Mogi, T. Koyama, O. Takeuchi, H. Shigekawa: Microscopic basis for the band engineering of $\text{Mo}_{1-x}\text{W}_x\text{S}_2$ -based heterojunction, *Sci. Rep.*, **5** (2015) 14808-1-6. DOI: 10.1038/srep14808, Oct. 2015

K. Mizoguchi, H. Sakamoto: Role of Water Molecules to the Electronic States of M-DNA, *Crystals*, **5** (2015) 475-490. DOI: 10.3390/cryst5040475, Oct. 2015

M. Fujihara, R. Inoue, R. Kurita, T. Taniuchi, Y. Motoyui, S. Shin, F. Komori, Y. Maniwa, H. Shinohara, Y. Miyata: Selective Formation of Zigzag Edges in Graphene Cracks, *ACS Nano*, **9** (2015) 9027-9033. DOI: 10.1021/acsnano.5b03079, Aug. 2015

Y. Kobayashi, S. Mori, Y. Maniwa, Y. Miyata: Bandgap-tunable lateral and vertical heterostructures based on monolayer $\text{Mo}_{1-x}\text{W}_x\text{S}_2$ alloys, *Nano Res.*, **8** (2015) 3261-3271. DOI: 10.1007/s12274-015-0826-7, Aug. 2015

H.E. Lim, Y. Miyata, M. Fujihara, S. Okada, Z. Liu, Arifin, K. Sato, H. Omachi, R. Kitaura, S. Irle, K. Suenaga, H. Shinohara: Fabrication and Optical Probing of Highly Extended, Ultrathin Graphene Nanoribbons in Carbon Nanotubes, *ACS Nano*, **9** (2015) 5034-5040. Apr. 2015

2) 解説記事

H. Kyakuno, Y. Maniwa: Chirality Fingerprint and Structure of Single-walled Carbon Nanotubes, PF Activity Report (High Energy Accelerator Research Organization) PART A, 20-21

3) 学会講演

● 日本物理学会 第 71 回年次大会, 東北学院大学 2016 年 3 月 19 日-22 日

客野遥, 深澤衛, 松田和之, 中井祐介, 宮田耕充, 斎藤毅, 真庭豊: 単層カーボンナノチューブに内包された水の研究 VI

● 日本物理学会 秋季大会, 関西大学, 2015 年 9 月 16 日-19 日

布山直樹, 客野遥, 中井祐介, 宮田耕充, 真庭豊: X 線回折を用いた多層グラフェンの精密構造解析

客野遥, 深澤衛, 松田和之, 中井祐介, 宮田耕充, 斎藤毅, 真庭豊: 単層カーボンナノチューブに内包された水の研究 V

中井祐介, 塚田諒, 宮田耕充, 斎藤毅, 畠賢治, 真庭豊: SQUID 測定による高純度単層カーボンナノチューブの磁性研究

● 2015 年 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 2015/9/13-16

藤原美帆, 小川峻, 井上凌介, 真庭豊, 渡邊賢司, 谷口尚, 篠原久典, 宮田耕充: 窒化ホウ素基板への CVD グラフェンのポリマーフリー転写

小林佑, 佐々木将吾, 森勝平, 日比野浩樹, 谷口尚, 渡邊賢司, 末永和知, 真庭豊, 宮田耕充: グラファイト基板を用いた高品質単層 WS_2 の成長と光学特性

井上凌介, 真庭豊, 宮田耕充: 金属融解転写による CVD グラフェン/BN ヘテロ構造の作製,

佐々木将吾, 小林佑, 真庭豊, 宮田耕充: 単層 Nb ドープ WS_2 の CVD 成長と評価

森勝平, 真庭豊, 宮田耕充: $\text{Mo}_{1-x}\text{Re}_x\text{S}_2/\text{MoS}_2$ ヘテロ構造の合成と評価

小林佑, 佐々木将吾, 森勝平, 日比野浩樹, 谷口尚, 渡邊賢司, 末永和知, 真庭豊, 宮田耕充: Growth and optical properties of high-quality monolayer WS_2 on graphite

● 第 49 回 フラレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 北九州国際会議場, 2015/9/7-9

藤原美帆, 小川峻, 井上凌介, 真庭豊, 渡邊賢司, 谷口尚, 篠原久典, 宮田耕充: Polymer-free transfer of CVD graphene to boron nitride substrates

小林佑, 真庭豊, 宮田耕充: Conducting one dimensional interface in an atomic-layer semiconductor heterojunction

井上凌介, 渡邊賢司, 谷口尚, 真庭豊, 宮田耕充: Fabrication of clean graphene/BN heterostructures by metal melting transfer

佐々木将吾, 小林佑, 真庭豊, 宮田耕充: CVD growth and characterization of monolayer $\text{Nb}_{1-x}\text{W}_x\text{S}_2$ alloys

森勝平, 真庭豊, 宮田耕充: Synthesis and characterization of $\text{Mo}_{1-x}\text{Re}_x\text{S}_2/\text{MoS}_2$ heterostructures

藤原美帆, 井上凌介, 栗田玲, 谷内敏之, 元結啓仁, 辛埴, 小森文夫, 真庭豊, 篠原久典, 宮田耕充: Formation mechanism of anisotropic cracks in graphene grown on copper foil,

● 第 50 回 フラレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 東京大学, 2016/2/20-22

小林佑, 吉田昭二, 櫻田龍司, 齊藤哲輝, 渡邊賢司, 谷口尚, 真庭豊, 重川秀実, 宮田耕充: Bandgap modulation in one-dimensional interface of MoS_2/WS_2 -based semiconductor heterojunction

小林佑, 渡邊賢司, 谷口尚, 真庭豊, 宮田耕充: Fabrication and manipulation of slidable atomic layers

井上凌介, 渡邊賢司, 谷口尚, 真庭豊, 宮田耕充: Efficient fabrication of large-area, clean graphene/BN heterostructures by metal melting transfer

佐々木将吾, 小林佑, 劉崢, 末永和知, 真庭豊, 宮田耕充: Halide-assisted CVD and characterization of monolayer Nb-doped WS_2

森勝平, 佐々木将吾, 小林佑, 劉崢, 吉田昭二, 竹内高広, 重川秀実, 末永和知, 真庭豊, 宮田耕充: 1H-1T' phase transition and heterojunction formation in CVD-grown monolayer $\text{Mo}_{1-x}\text{Re}_x\text{S}_2$

齊藤哲輝, 小林佑, 渡邊賢司, 谷口尚, 真庭豊, 宮田耕充: Interlayer excitons in high-quality MoS_2/WS_2 vertical heterostructures

小川峻, 井上凌介, 渡邊賢司, 谷口尚, 真庭豊, 宮田耕充: Fabrication and characterization of graphene nanoribbons by water-assisted anisotropic etching

● 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 2016/3/19-22

小林佑, 吉田昭二, 櫻田龍司, 齊藤哲輝, 渡邊賢司, 谷口尚, 真庭豊, 重川秀実, 宮田耕充: MoS₂/WS₂ 半導体ヘテロ接合界面におけるバンドギャップ変調

小林佑, 渡邊賢司, 谷口尚, 真庭豊, 宮田耕充: スライド可能な原子層の作製と操作

佐々木将吾, 小林佑, 劉崢, 末永和知, 真庭豊, 宮田耕充: 単層 Nb ドープ WS₂ のハライドアシスト CVD と評価

森勝平, 佐々木将吾, 小林佑, 劉崢, 吉田昭二, 竹内高広, 重川秀実, 末永和知, 真庭豊, 宮田耕充: 単層 Mo_{1-x}Re_xS₂ における 1H-1T' 相転移とヘテロ接合形成

齊藤哲輝, 小林佑, 渡邊賢司, 谷口尚, 真庭豊, 宮田耕充: 高品質 MoS₂/WS₂ 積層型ヘテロ構造における層間励起子

小川峻, 井上凌介, 渡邊賢司, 谷口尚, 真庭豊, 宮田耕充: 水を用いた異方性エッチングによるグラフェンナノリボンの作製と評価,

国内研究会

● 第 49 回日本セラミックス協会基礎科学部会セミナー, 名古屋, 2015/7/17

宮田耕充: 遷移金属ダイカルコゲナイド原子層の成長と機能開拓

● 2015 年度第 2 回 CPC 研究会, 東京, 2015/6/12

中井祐介: 熱電変換材料としてのカーボンナノチューブの可能性

国際会議

● The 16th International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT15), 2015/6/29-7/3

小林佑, 森勝平, 真庭豊, 宮田耕充: Bandgap-tunable lateral and vertical heterostructures based on monolayer Mo_{1-x}W_xS₂ alloys,

藤原美帆, 井上凌介, 真庭豊, 篠原久典, 宮田耕充: Selective formation of zigzag-edges in graphene cracks

森勝平, 真庭豊, 宮田耕充: Two-step growth and characterization of WS₂/MoS₂ heterostructures

佐々木将吾, 真庭豊, 宮田耕充: Growth and characterization of W-doped NbS₂ atomic layers

中井祐介, 塚田諒, 宮田耕充, 斎藤毅, 畠賢二, 真庭豊: Magnetic susceptibility measurements on highly purified single-walled carbon nanotubes

● Sixth Graphene and 2D Materials Satellite Symposium (GSS), 2015/6/28

森勝平, 真庭豊, 宮田耕充 : Two-step growth of characterization of WS₂/MoS₂ heterostructures

佐々木將吾, 真庭豊, 宮田耕充 : Growth of characterization of W-doped NbS₂ atomic layers

小林佑, 佐々木將吾, 森勝平, 日比野浩樹, 谷口尚, 渡辺賢司, 末永知, 真庭豊, 宮田耕充 : Optical properties of High-Quality WS₂ Monolayers on Graphite

● Pacifichem 2015, Honolulu, Hawaii, USA, Dec. 17, 2015

小林佑, 森勝平, 真庭豊, 宮田耕充 : Bandgap-tunable lateral and vertical heterostructures based on monolayer Mo_{1-x}W_xS₂ alloys

小林佑, 佐々木將吾, 森勝平, 日比野浩樹, 谷口尚, 渡辺賢司, 末永知, 真庭豊, 宮田耕充 : Growth and optical properties of high-quality monolayer WS₂ on graphite

● MRS fall meeting, Boston, Massachusetts, USA, Dec. 1, 2015

小林佑, 森勝平, 佐々木將吾, 真庭豊, 宮田耕充 : Bandgap tunable lateral and vertical heterostructures based on MoS₂/WS₂ monolayers

小林佑, 佐々木將吾, 森勝平, 日比野浩樹, 谷口尚, 渡辺賢司, 末永知, 真庭豊, 宮田耕充 : Growth and optical properties of high-quality monolayer WS₂ on graphite

佐々木將吾, 真庭豊, 宮田耕充 : Growth of characterization of W-doped NbS₂ atomic layers

● JSAP-KPS joint symposium in JSAP spring meeting 2016, Tokyo, Mar. 19, 2016

Y. Miyata :CVD growth of atomically-thin transition metal dichalcogenides and their heterostructures,

● 2015 interanational conference on solid state devices and materials (SSDM2015), Sapporo, Japan, September 27, 2015

Y. Miyata :CVD growth of atomically-thin transition metal dichalcogenides and their heterostructures

● 15th Conference of the International Association of Colloid and Interface Scientists, Mainz, Germany

H. Kyakuno, M. Fukasawa, R. Ichimura, K. Matsuda, Y. Nakai, Y. Miyata, T. Saito, Y. Maniwa: Unusual drying transition of confined water in carbon nanotubes

表界面光研究室

1. 研究活動の概要

本研究室では、(1) ナノ物質の界面を制御することによりその表面物性を制御すること、(2) 光励起によって生じる非平衡キャリアの緩和過程を詳しく調べ制御していくこと、の二つを主たる課題として研究活動を行っている。主として、単層カーボンナノチューブ (SWCNT) に代表されるナノ物質を研究材料として用いて、単体、分子複合体、およびそれらの集合体における新奇物性探索・物質創製・技術開発・デバイス開発を行っている。最近では、イオン液体を電解質として用い、物質界面に電気二重層を形成させ、キャリア注入を行い、フェルミレベルを自在にシフトさせ、様々な多様な物性を制御する研究を進めている。また、近接場分光技術を開発し局所構造とその光物性との相関の解明を進めている。

1) 光物性研究

近接場分光測定技術の開発と原子層材料の局所光物性 遷移金属カルコゲナイド (TMDC) は層状化合物の一つであり、その多層試料の光物性は 1980 年代には数多く研究されている。しかし、単層試料や異なる種類の TMDC が積層あるいは平面接合したヘテロ試料が創成され、新たな物性が見い出され、基礎科学・応用の両面から、近年、極めて活発に研究がなされている。最近では、 MoS_2 や WSe_2 において 2H 構造 (半導体相) と 1T 構造 (金属相) 間の転移がドーピング・アニーリングにより制御可能であることが報告されている。TMDC における新たな光物性は、構造欠陥・グレインバウンダリ (GB)・接合界面といった特異な局所構造において顕著に見られる。例えば、構造欠陥は、発光増強や単一光子発生が見られ量子情報への応用が報告され、GB は非線形光学特性の顕著な増強が知られている。原子層におけるこの特異なサイトは、ダイヤモンドの NV センターのような量子情報・センサ応用の可能性があり、その基礎物性の解明は緊急性の高い。しかし、これら局所サイトにおける光物性の理解は不十分である。例えば、欠陥由来の束縛励起子からの発光はゲート電圧に大きく依存するが、局所構造と励起子の電場応答特性との対応関係は正確には分かっていない。

そこで我々は、これら特異なサイトで現れる光物性を正確に理解し制御する為には、局所サイトであられる光学特性をダイレクトに電界変調できる技術開発が重要であると着眼し、研究を進めている。そのアプローチとして、近接場分光測定技術 (SNOM) と電界印加の技術を組み合わせることを検討している。近接場分光測定技術とは、カンチレバの先端にあるナノサイズの孔 (60 ~ 90nm) において近接場光が発生する。この近接場光と試料との相互作用により発生した伝播光を対物レンズで検出することで、回折限界を超えた分解能で試料の光学特性を解明可能である。試料が厚いバルクな試料の場合は測定が困難であるが、原子層という単層試料においてはサイトにダイレクトにアクセス可能である為、その局所物性を正確に観測できる特徴を有する。これまで原子層材料に用いられてきた SNOM 技術は、その局所発光測定に限られ、最も基本的な光学特性である光吸収スペクトルと局所構造との対応を解明した研究は皆無であった。そこで、今年度は、所有の近接場分光測定装置に広帯域レーザー光源 (スーパーコンティニューム光源, SR 光源) を組み合わせ、回折限界を超えた分解能で局所的な光吸収・発光スペクトルを取ることを行った。SR 光源からの光をファイバーで近接場測定装置へと導入し、アライメントや測定プロセスを最適化した。その結果、 MoS_2 を試料の局所光吸収スペクトルを明らかにすることに成功した。光吸収構造は欠陥や分子吸着によるドーピングにより大きく影響を受ける。光吸収構造がその局所構造に依存してサイトに強く依存することを明らかにした。

非平衡励起キャリアを用いた光熱電変換の研究 SWCNT やグラフェンは、電子格子相互作用が小さく、且つ、熱容量も小さい為、極めて効率よく光励起により電子温度の上昇が可能と期待される。我々はこれ

まで、電気二重層キャリア注入法を用いて SWCNT のゼーベック係数の制御に成功してきた。このゼーベック係数の制御技術を活用することにより、光励起に伴う温度上昇を、効率良く電力として取り出す（光熱電変換と呼ぶ）ことが可能であると考えられ、光熱電変換の検証実験の為に装置開発を行った。プローバ内にレーザー光を導入可能な光学系を構築し、ゼーベック係数が制御された SWCNT 薄膜に対して光照射を行い、発生する起電力を測定し、SWCNT 薄膜における光熱電変換の基礎特性を明らかにした。

2) 低次元ナノ物質系における電子物性とその制御

SWCNTの熱電物性の制御 電気二重層キャリア注入の技術により、SWCNT のフェルミレベルを大きくシフトさせることが可能である。低次元材料、特に一次元材料は、熱電変換性能が高いことが知られている。しかしながら、その性能は大きくフェルミレベルに依存する。我々は、電気二重層キャリア注入技術を発展させ、半導体型 SWCNT のゼーベック係数のフェルミレベル依存性を解明し、P 型・N 型の両方のゼーベック係数制御を行ってきた。今年度は、カイラリティ依存性を解明することを行った。高純度 (6,5)SWCNT や金属型 SWCNT の熱電特性のフェルミレベル依存性を明らかにし、熱電特性およびそのフェルミレベル依存性が大きく SWCNT の電子構造に依存することを明らかにした。

一次元遷移金属カルコゲナイドナノチューブの物性制御 SWCNT で行ってきたフェルミレベル操作による物性制御の技術が他の一次元物質系においても可能かどうか検証する為、今年度は二次元物質である遷移金属カルコゲナイドが筒状になった遷移金属カルコゲナイドチューブに対して、電気二重層キャリア注入の研究を行った。市販されている WS_2 ナノチューブを購入し、有機溶媒に分散させ、薄膜作成を行った。作成した薄膜に対して、イオン液体を電解質として用いた電気二重層キャリア注入を行い、ラマン測定を行ったところ、電子ドープ・ホールドープの両方において、ラマンシグナルの変化が見られた。そこで、真空プローバ内でサイドゲート形式でトランスポート測定を行ったところ、明確な両極性の動作が見られた。 WS_2 ナノチューブにおいて、世界ではじめての両極性動作を実現することに成功した。

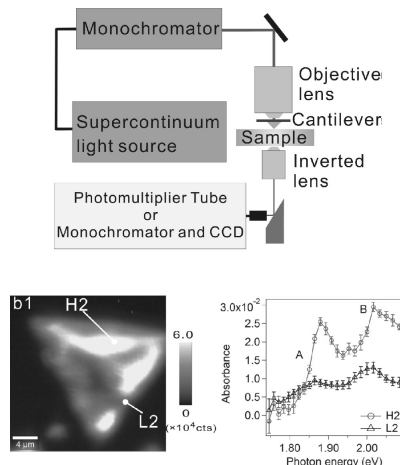


図 1: 近接場分光測定系の開発と MoS_2 試料の局所光物性研究

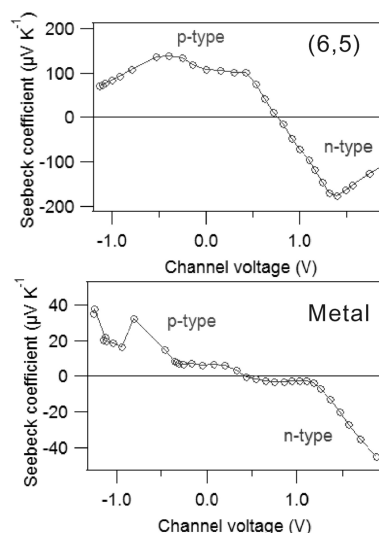


図 2: SWCNT の熱電物性のカイラリティ依存性

2. 研究業績

1) 論文

T. Igarashi, H. Kawai, N. Cuong, S. Okada, T. Pichler, K. Yanagi: "Tuning Localized Transverse Surface Plasmon Resonance in Electricity Selected Single Wall Carbon Nanotubes by Electrochemical Doping", *Phys. Rev. Lett.*, **114** (2015) 176807

Y. Oshima, Y. Kitamura, Y. Maniwa, K. Yanagi: "Fabrication of thermoelectric devices using precisely Fermi level tuned semiconducting single wall carbon nanotubes", *Appl. Phys. Lett.*, **107** (2015) 043106

D. Matsumoto, K. Yanagi, T. Takenobu, S. Okada, K. Marumoto: "Electrically induced ambipolar spin vanishments in carbon nanotubes", *Sci. Rep.*, **5** (2015) 11859

M.V.Kharlamova, C. Kramberger, M. Sauer, K. Yanagi, T. Pichler: "Comprehensive spectroscopic characterization of high purity metallicity sorted single walled carbon nanotubes", *Phys. Stat. Sol. B*, **252** (2015) 2512-2518

M. Saure, A. Briones-Leon, T. Saito, K. Yanagi, K. Schulte, T. Pichler, H. Shiozawa: "Tailoring the electronic properties of single-walled carbon nanotubes via filling with nickel acetylacetonate", *Phys. Stat. Sol. B*, **252** (2015) 2546-2550

G. Ruiz-Soria, T. Sushi, M. Sauer, K. Yanagi, T. Pichler, P. Ayala: "On the bonding environment of phosphorus in purified doped single-walled carbon nanotubes", *Carbon*, **81** (2015) 91-95

柳和宏: "ナノチューブのゼーベック効果を自由自在に制御する", 応用物理, **84** (2015) 343-344

2) 著書

K. Yanagi: "Tuning Physical Properties and Structures of p-Electron system formed by single wall carbon nanotubes", p155-p176, Ed. T. Akasaka, A. Osuga, S. Fukuzumi, H. Kandori, Y. Aso, "Chemical Science of π -electron systems" Springer (2015)

3) 特許

特許願 2016-024732 光起電力装置 平成 28 年 2 月 12 日, 公立大学法人 首都大学東京, 柳和宏, 大島侑己, 北村典雅, 中村昌稔, 菅原三成

4) 学会講演

● 日本物理学会 第 71 回年次大会 2016 年 3 月 22 日 (東北学院大学)

柳 和宏, 大島侑己, 北村典雅, 河合英輝, 真庭豊: 単層カーボンナノチューブ熱電特性のカイラリティ依存性

志村明彦, 河合英輝, 柳和宏, 吉澤雅幸: 半導体単層カーボンナノチューブのフェムト秒誘導ラマン分光: 電子励起状態における振動ダイナミクス

● 第 50 回フラーレンナノチューブグラフェンシンポジウム 2016 年 2 月 20~21 日 (東京大学)

中村昌稔, 北村典雅, 大島侑己, 河合英輝, 真庭豊, 柳和宏: ゼーベック係数が精密制御された単層カーボンナノチューブ薄膜における光熱電変換

福村武蔵, 本間光太郎, 野崎純司, 真庭豊, 柳和宏: 引張歪下での MoS_2 薄膜の光吸収スペクトル

菅原光成, 北村典雅, 大島侑己, 河合英輝, 柳和宏: 電気化学ドーピング法による WS_2 ナノチューブへのキャリア注入

● 日本物理学会 2015 年秋季大会 2015 年 9 月 17~18 日 (関西大学)

本間 光太郎, 河合 英輝, 柳 和宏: 単層カーボンナノチューブにおける軸に垂直方向の表面プラズモン散乱の制御

野崎純司, 森勝平, 宮田耕充, 真庭豊, 柳和宏: 近接場分光法を用いた遷移金属カルコゲナイド単層薄膜の光吸収構造

志村明彦, 阿部健太, 森田航平, 河合英樹, 柳和宏, 吉澤雅幸: カーボンナノチューブのコヒーレントフォノン分光: 実験と非定常波束理論の比較

前川慶介, 佐藤健次, 南康夫, 武田淳, 柳和宏, 北島正弘, 片山郁文: 近接場分光法を用いた遷移金属カルコゲナイド単層薄膜の光吸収構造

● 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会 2015 年 9 月 14~16 日 (名古屋国際会議場)

北村典雅, 大島侑己, 神田翔平, 河合英輝, 中井祐介, 真庭豊, 柳和宏: 近接場分光法を用いた遷移金属カルコゲナイド単層薄膜の局所光吸収構造の解明

中井 祐介, 本田 和也, 柳 和宏, 片浦 弘道, 加藤 哲平, 山本 貴博, 真庭 豊: Giant Seebeck Coefficient in Semiconducting Single Wall Carbon Nanotube film

● 第 49 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム 2015 年 9 月 7~9 日 (北九州国際会議場)

J. Nozaki, S. Mori, Y. Miyata, Y. Maniwa, K. Yanagi: Local Optical Absorption Spectra of Transition Metal Dichalcogenide Monolayer by Scanning NearField Optical Microscopy Measurements

Kazuhiro Yanagi: Control of Physical Properties of Single Wall Carbon Nanotubes by Electric Double Layer Carrier Injections (招待講演)

Y. Kitamura, Y. Oshima, H. Kawai, Y. Maniwa, K. Yanagi: Dependence of Thermoelectric Properties on Chiralities of Single wall Carbon Nanotubes

● カロテノイドフォーラム 2015 年 5 月 21 日 (東京国際展示場)

柳和宏: 物性研究としてのカロテノイドの面白み (招待講演)

国際会議

● APS March Meeting 2016 年 3 月 17 日 (Baltimore(Maryland))

K. Yanagi, Y. Oshima, Y. Kitamura, Y. Maniwa: Tuning Thermoelectric Properties of Chiralities Selected Single Wall Carbon Nanotubes

● International Winter school of Electronic properties of Novel Materials (IWEPM 2016) 2016 年 2 月 14–18 日 (Kirchberg, Austria)

J. Nozaki, M. Fukumura, K. Honnma, Y. Kobayashi, S. Mori, Y. Miyata, Y. Maniwa, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Yanagi: Local Optical Absorption Spectra of Monolayer MoS₂ Crystals revealed by Scanning Nearfield Optical Microscopy Measurements

H. Kawai, K. Hasegawa, K. Yanagi: Hall Measurements in metallic single walled carbon nanotube networks with ionic liquid gating

K. Yanagi: Tuning Thermoelectric properties of chirality selected single wall carbon nanotubes by electric double layer carrier injections (Invited Talk)

● International Conference of Organic Thermoelectrics 2016 (ICOT2016) 2016 年 1 月 19 日 (Kyoto Serusa, Kyoto Japan)

K. Yanagi: Tuning of Thermoelectric Properties of Chiralities Selected Single Wall Carbon Nanotubes by Electrochemical Doping Techniques

● 28th International Microprocessess and Nanotechnology Conference (MNC 2015) 2015 年 11 月 11–12 日 (Toyama International Conference Center, Toyama Japan)

J. Nozaki, S. Mori, Y. Miyata, Y. Maniwa, K. Yanagi: Local Optical absorption spectra of MoS₂ monolayer revealed by scanning nearfield optical microscopy measurements

Y. Oshima, Y. Kitamura, H. Kawai, Y. Maniwa, K. Yanagi: Dependence of Thermoelectric Properties on Chiralities of Single Wall Carbon Nanotubes

● The Sixteenth International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT15) 2015 年 6 月 30–7 月 2 日 (Nagoya Univ., Nagoya Japan)

Kazuhiro Yanagi: Fabrication of Thermoelectric devices using precisely Fermilevel Tuned Single Wall Carbon Nanotube thin films

K. Honnma, H. Kawai, K. Yanagi: Influence of Electric Double Layer Carrier Injections on Optical Absorption Spectra of CVD synthesized Multi-layered MoS₂ and WS₂ thin films

Hideki Kawai, Kai Hasegawa, Kazuhiro Yanagi: Transport Property of Highly Aligned and Chirality Selected SWCNTs

● Satellite conference of The Sixteenth International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT15), Carbon Nanotube Thin Film Application (CNTFA15) 2015 年 6 月 27 日 (Nagoya Univ., Nagoya Japan)

K. Yanagi: Fabrication of thermoelectric devices using precisely fermi level tuned single wall carbon nanotube films (Invited Talk)

粒子ビーム物性研究室

1. 研究活動の概要

Geometrically frustrated magnets have been actively studied in recent years [1]. In particular, pyrochlore magnets [2] showing spin ice behavior [3] have interesting features such as finite zero-point entropy and emergent magnetic monopole excitations [4]. A quantum spin-liquid state (QSL) is theoretically predicted for certain spin-ice like systems [5-8], where transverse spin interactions transform the classical spin ice into a QSL. This quantum spin ice (QSI), or U(1) quantum spin liquid, is characterized by an emergent U(1) gauge field and by excitations in form of gapped bosonic spinons and gapless photons [5-8]. By modifying the interactions in some way, the system undergoes a quantum phase transition to a long range ordered (LRO) state of transverse spin or pseudospin, in analogy to a Higgs transition [6,7].

Among magnetic pyrochlore oxides [2], $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ (TTO) has attracted much attention, because magnetic moments remain dynamic with short range correlations down to 50 mK [10]. Since TTO has been thought to be located close to the classical spin ice, although clear experimental evidence is still missing, the dynamical low- T behavior of TTO could be ascribed to QSI [11]. Inspired by this intriguing idea, a lot of experimental studies of TTO have been performed to date [12-14]. However the interpretation of experimental data remains very difficult [8,15], yet interesting, partly owing to strong sample dependence [12]. Among these studies, our investigation of polycrystalline $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$ showed that a very small change of x induces a quantum phase transition between the dynamical ground state ($x < x_c = -0.0025$) and a LRO state with a hidden order parameter ($x > x_c$) [13] [Fig.1(b)]. We think it is important to clarify the origin of this order parameter, which fluctuates in the spin liquid state ($x < x_c$). Based on theoretical considerations of the crystal-field (CF) states of non-Kramers magnetic ions (including Tb^{3+}) in the pyrochlore structure together with their superexchange interaction [7,9], a possible answer to the problem of $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$ is an electric multipole (or quadrupole) ordering and a U(1) QSL state [16,17,18].

The experimental difficulty of TTO comes from controlling the quality of large crystalline samples for neutron scattering [19]. By using a small crystal with $x \simeq 0.005$, which exhibits a well-defined T_c of 0.53 K, we performed specific heat, magnetization, and neutron scattering experiments [16,17]. We analyzed these data together with the magnetic excitation spectra of a polycrystalline sample with $x = 0.005$, and showed that the phase transition at T_c is ascribable to an electric quadrupole LRO [16,17,18]. Very recently, we showed that a single-crystalline rod of $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$ grown by the standard FZ technique has a composition (x) gradient, which gives rise to the above discussed inhomogeneity problem [19]. By selecting low x -gradient parts of single-crystalline rods, we made a multi-crystal sample with $x \simeq -0.007$, which is in the QSL range [Fig.1(b)], and performed inelastic neutron scattering experiments on IN5 [20]. The data show clear short-range spin-fluctuations around $\mathbf{q} = (1/2, 1/2, 1/2)$, which are characteristic of the QSL state of TTO [20]. The temperature dependence of these spin fluctuations shows that the QSL state is developed gradually below 0.4 K. Detailed analyses to reveal the mechanism of the QSL state are now underway.

[1] C. Lacroix et al., Introduction to Frustrated Magnetism (Springer, Berlin, Heidelberg, 2011). [2] J. S. Gardner et al., Rev. Mod. Phys. 82, 53 (2010). [3] S. T. Bramwell and M. J. P. Gingras, Science 294, 1495 (2001). [4] C. Castelnovo

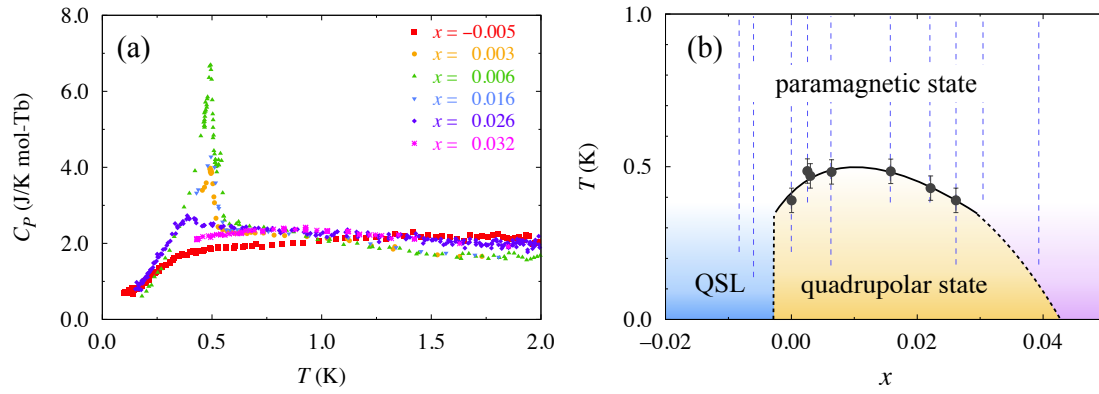


図 1: (a) Temperature dependence of specific heat of several single crystals of $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$. The x values are estimated by precisely measuring the lattice parameters (Fig. 3 in [19]). (b) x - T phase diagram of $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$ determined from the specific heat measurements. Temperature ranges of the specific heat measurements are shown by vertical blue dashed lines. (Figures. (a) and (b) are from Ref. [19]).

et al., Nature 451, 42 (2008); H. Kadowaki et al. J. Phys. Soc. Jpn. 78, 103706 (2009). [5] M. Hermele et al., Phys. Rev. B 69, 064404 (2004). [6] L. Savary, L. Balents, Phys. Rev. Lett. 108, 037202 (2012). [7] S. Lee et al., Phys. Rev. B 86, 104412 (2012). [8] M. J. P. Gingras and P. A. McClarty, Rep. Prog. Phys. 77, 056501 (2014). [9] S. Onoda and Y. Tanaka, Phys. Rev. B 83, 094411 (2011). [10] J.S. Gardner et al., Phys. Rev. Lett. 82, 1012 (1999); Phys. Rev. B 68, 180401 (2003). [11] H. R. Molavian et al., Phys. Rev. Lett. 98, 157204 (2007) [12] H. Takatsu et al., J. Phys.: Condens. Matter 24, 052201 (2012). [13] T. Taniguchi, H. Kadowaki, H. Takatsu, B. Fåk, J. Ollivier et al., Phys. Rev. B 87, 060408 (2013). [14] S. Petit et al., Phys. Rev. B 86, 174403 (2012); T. Fennell et al. Phys. Rev. Lett. 112, 017203 (2014); K. Fritsch et al., Phys. Rev. B 87, 094410 (2013) and Phys. Rev. B 90, 014429 (2014); etc. [15] S. Petit et al., EPJ Web of Conferences 83, 03012 (2015) [16] H. Takatsu, S. Kittaka, A. Kasahara, Y. Kono, T. Sakakibara, Y. Kato, S. Onoda, B. Fåk, J. Ollivier, J.W. Lynn, T. Taniguchi, M. Wakita, H. Kadowaki, arXiv:1506.04545 (Phys. Rev. Lett. 2016 May). [17] H. Takatsu, T. Taniguchi S. Kittaka, T. Sakakibara, H. Kadowaki, J. Phys. Conf. Ser. 683, 012022 (2016). [18] H. Kadowaki, H. Takatsu, T. Taniguchi, B. Fåk, J. Ollivier, SPIN 5, 1540003 (2015) (arXiv:1505.00503). [19] M. Wakita, T. Taniguchi, H. Edamoto, H. Takatsu, H. Kadowaki, J. Phys. Conf. Ser. 683, 012023 (2016). [20] H. Kadowaki et al. unpublished.

2. 研究業績

1) 論文

H. Kadowaki, H. Takatsu, T. Taniguchi, B. Fåk, J. Ollivier: Composite spin and quadrupole wave in the ordered phase of $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$, *SPIN* **05**, 1540003-(1-8) (2015).

H. Takatsu, T. Taniguchi S. Kittaka, T. Sakakibara, H. Kadowaki: Quadrupole order in the frustrated pyrochlore magnet $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$, *J. Phys. Conf. Ser.* **683**, 012022-(1-6) (2016).

M. Wakita, T. Taniguchi, H. Edamoto, H. Takatsu and H. Kadowaki: Quantum spin liquid and electric quadrupolar states of single crystal $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$, *J. Phys. Conf. Ser.* **683**, 012023-(1-5) (2016).

2) 学会講演

● 日本物理学会 2015 年秋季大会 2015 年 9 月 16 日 (水) – 19 日 (土) (関西大学)

門脇広明, 高津浩, 谷口智洋, 脇田美香, B. Fåk, J. Ollivier : $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$ におけるスピン多極子複合励起の研究

脇田美香, 高津浩, 門脇広明: 量子スピニアイス $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$ の研究

門脇広明, 高津浩, 脇田美香, B. Fåk, J. Ollivier: パイロクロア $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$ における 4 極子状態の研究

高津浩, 今井楽, 門脇広明: 断熱消磁冷却を用いた低温比熱測定装置の開発

● 日本物理学会 第 71 回年次大会 2016 年 3 月 19 日 (土) – 22 日 (火) (東北学院大学)

脇田美香, 高津浩, 門脇広明, B. Fåk, J. Ollivier: 量子スピン液体 $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$ の単結晶中性子非弾性散乱

国際会議

● The 2015 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem 2015), Honolulu, Hawaii, USA, Dec. 15 – 20, 2015

Hiroaki Kadowaki: Quadrupole order and spin liquid state of $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$ (invited).

● TMU International Symposium on "New Quantum Phases Emerging from Novel Crystal Structure" Hachioji, Tokyo, Japan, Sept. 24 – 25 2015

H. Takatsu, T. Taniguchi S. Kittaka, T. Sakakibara, H. Kadowaki: Quadrupole order in the frustrated pyrochlore magnet $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ (invited).

M. Wakita, T. Taniguchi, H. Edamoto, H. Takatsu and H. Kadowaki: Quantum spin liquid and electric quadrupolar states of single crystal $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$.

H. Edamoto, M. Wakita, H. Takatsu and H. Kadowaki: Single crystal growth of precisely stoichiometric $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$.

ソフトマター物性研究室

1. 研究活動の概要

ソフトマターとは、高分子や液晶、ゴムといった“柔らかい”物質群の総称であり、3Sという特徴を持つ。3Sとは、Soft・Slow・Seeableの頭文字で、柔らかく・遅く・見やすい、のことである。一般にソフトマターは階層的な構造、すなわち、分子が結合した構造を作り、さらにその構造がより大きな構造を作る。この階層性のため、熱エネルギー程度のエネルギーで様々な転移を起こす。我々の研究室では、主にソフトマターの相転移ダイナミクスや非平衡系に興味を持って、研究を行っている。

1) 温度勾配下における熱エネルギー輸送

界面活性剤・水混合系では、界面活性剤が二分子膜を形成し、その二分子膜がトポロジ的に異なるラメラ相やスポンジ相を形成する。今回は壁に平行に配列したラメラ相を形成し、その状態に温度勾配を印可した。ラメラ相のエネルギーは膜間距離 d と温度 T に関係している。温度勾配を与えることにより、ラメラ相のエネルギーは空間分布をもつことになり、エネルギー輸送が起こる。しかし、ラメラ相の膜間距離 d は幾何学的に決定される量であり、どのようにエネルギーを輸送するのかわからない状態であった。我々は、ラメラ相に存在する膜の折りたたみ欠陥（線欠陥）が重要な働きをしている事を発見した。線欠陥は膜の枚数を可変にする構造であるためだと考えられる。通常は、エネルギー的不利な構造であるにも関わらず、非平衡下では重要な働きをするという現象は大変興味深い。

2) ゲルの熱対流

水などの液体を下から熱すると対流が起こる事はよく知られている。熱拡散が粘性に打ち勝つ事でマクロな流れを生じているというメカニズムであり、粘性が大事な要素であることは疑う余地もない。粘性が温度依存する研究は、これまで水などの弱い依存性を持つものに限られていた。今回は、粘性が強く温度に依存する物理ゲル（ゼラチン）の熱対流を実験的に調べた。ポリスチレンラテックスを用いて、流れを可視化し、対流のダイナミクスを調べた。以下、わかったことについて列記する。(a) 水の対流とは初期過程が全く異なり、ゼラチンの場合はローカルに流れている場所と流れていない場所が分離する。(b) 流れていない空間は時間が経つと、重力で沈降する。(c) その沈降の流れによって、マクロな流れが急激に変化する。これらの実験事実は水の場合と大きく異なり、非平衡統計力学においても重要な結果になると考えている。

3) 高分子ブレンドの結晶化ダイナミクス

一般に高分子は結晶化するもの、しないものに分類する事が出来る。環境にやさしいと言われている生分解性ポリマーであるPCLは融点以下になると容易に結晶化する。高分子の結晶化において、通常の液体とは異なり、溶融状態においても高分子同士が絡み合っている。結晶化の際、絡み合いをほどく、高分子を界面に移動する、他の高分子も引きづられるなど、多くの効果が入ってくるため、そのダイナミクスは多くは未解明なままである。我々は溶融状態における高分子の絡み合い、引きづり込みに関して、明確にするべく実験を行っている。また、PCLは結晶化しないPVBと混合すると、核形成頻度が激減する、結晶面がねじれるなど結晶化ダイナミクスに大きな影響が現れる。これらの効果も結晶過程と関係していると考えており、溶融状態との関連性に関して調べている。

4) 細胞性粘菌の凝集ダイナミクス

生物の中には集団になると協同的な動きを発現し、面白い挙動を示すものがある。例えば、生物がレイリー・テイラー不安定性により対流する生物対流やバクテリアのコロニー形成などが挙げられる。また

細胞性粘菌の集団が凝集する際には、単純な円の形状に集まるのではなく、ヒゲのように伸びたネットワークパターンを形成する。このネットワーク形成のメカニズムはまだわかっていない。我々の研究室では、生物に見られるこれらの特徴的な協同現象に対して物理的な要因を抜き出したシンプルなモデルを提案し、数値計算を行うことによってメカニズムを理解することを目指している。

5) 泡沫の状態間転移

液体中に気泡が多く入っている状態を泡沫と呼ぶ。これまで気泡の体積分率によって、状態が経験的に分類されてきた。95%以上であれば、dry foam と呼ばれ、85%以下であれば、wet foam と分類されてきた。これまで気泡の形状で経験的に分類してきたが、我々は dry-wet 転移が曖昧なものではなく、シャープな転移であり、気泡の再配置と関係があることを見出した。すなわち、力学的な特性によって状態が転移していることを意味している。さらに dry 状態の上に superdry 状態があることも見出した。この superdry 状態も dry 状態と力学的な特性が異なることがわかった。長年、未解明であった泡沫の物理学的な状態を明確にし、今後、物理学の発展だけでなく、応用にも大きく繋がる研究となった。

2. 研究業績

1) 論文

D. Tahara, N. Oikawa and R. Kurita : Mobility enhancement of red blood cells with biopolymers, *Journal of Physical Society of Japan*, **85** (2016) 033801

K. U. Kobayashi, N. Oikawa and R. Kurita : Dynamical transition of heat transport in a physical gel near the sol-gel transition, *Scientific Reports*, **5** (2015) 18667

R. Kurita : Experimental study of relationship between local size distributions and local orderings in random close packing, *Physical Review E* **92** (2015) 062305

M. Fujihara, R. Inoue, R. Kurita, T. Taniuchi, Y. Motoyui, S. Shin, F. Komori, Y. Maniwa, H. Shinohara, and Y. Miyata : Selective Formation of Zigzag Edges in Graphene Cracks, *ACS Nano* **9** (2015) 9027-9033

N. Oikawa, E. Bodenschatz and V. S. Zykov : Unusual spiral wave dynamics in the Kessler-Levine model of an excitable medium, *Chaos* **25** (2015) 053115

Y. Hidaka, M. Hashiguchi, N. Oikawa and S. Kai : Lagrangian chaos and particle diffusion in electro-convection of planar nematic liquid crystals, *Physical Review E*, **92** (2015) 032909

2) 学会講演

● 日本物理学会 2015 年秋季大会 2015 年 9 月 16–19 日 (関西大学 北千里キャンパス)

森永 恒希, 及川 典子, 栗田 玲 : ミョウバンの再結晶における不純物の効果

及川 典子, 栗田 玲 : イオン液体の溶解過程における水表面のダイナミクス

栗田 玲, Eric R Weeks : Random close packing の構造

小林 和也, 及川 典子, 栗田 玲 : ゼル-ゲル転移点近傍におけるゼラチン水溶液の熱対流

深川 啓太, 及川 典子, 栗田 玲 : 水/エタノール混合溶液におけるイオン液体の溶解過程

● 日本物理学会 第 71 回年次大会 (2016 年) 2016 年 3 月 19–22 日 (東北学院大学 泉キャンパス)

栗田 玲, 及川 典子: 高密度分散系における放射状パターン形成

及川 典子, 栗田 玲: 親水性・疎水性イオン液体の水への溶解過程と界面ダイナミクス

国内研究会

● 第 14 回 関東ソフトマター研究会 2015 年 8 月 8 日 (慶應大学 矢上キャンパス)

関口 俊一, 及川 典子, 栗田 玲: 高分子ブレンド結晶における核形成時の影響

深川 啓太, 及川 典子, 栗田 玲: イオン液体の溶解の溶媒依存性

森永 恒希, 及川 典子, 栗田 玲: 不純物によるミョウバンの結晶パターンの変化

小林 和也, 及川 典子, 栗田 玲: ゾル・ゲル転移点近傍における物理ゲルの熱輸送の動的変化

● 第 25 回 非線形反応と協同現象研究会 2015 年 10 月 3 日 (旭川医科大学)

及川 典子: 細胞性粘菌におけるパターン形成と同期現象 (招待講演)

● 第 5 回 ソフトマター研究会 2015 年 12 月 17–19 日 (東北大学 青葉山キャンパス)

小林 和也, 及川 典子, 栗田 玲: くさび型における物理ゲルの対流ダイナミクス

花田 康高, 栗田 玲: 二成分混合系の溶解過程に関する研究

小林 和也, 及川 典子, 栗田 玲: ゼラチン水溶液の熱対流

関口 俊一, 及川 典子, 栗田 玲: 高分子ブレンド結晶の不均一核からの成長ダイナミクス

栗田 玲, 三井 駿, 田中 肇: 温度勾配による二分子膜ラメラ相の線欠陥のダイナミクス

森永 恒希, 及川 典子, 栗田 玲: ミョウバンの再結晶に対するイオン過剰の効果

深川 啓太, 及川 典子, 栗田 玲: イオン液体の水への溶解におけるエタノール注入の効果

古田 祐二郎, 及川 典子, 栗田 玲: 泡沫における崩壊過程

石崎 健太, 及川 典子, 栗田 玲: イソ酪酸-水系の臨界点近傍における溶解ダイナミクス

● One day workshop “菌類に係るコロニーパターンの形成メカニズムの解明に向けて” 2016 年 2 月 19 日 (千葉大学西千葉キャンパス)

及川 典子: 細胞性粘菌における cAMP の拡散とらせんパターンの変化 (招待講演)

国際会議

● Symposium “Complexity and Synergetics” July 8–11, 2015 (Hannover, Germany)

N. Oikawa: One way diffusion of ionic liquids in a dissolution process in water (invited talk)

編集後記

今年度になり、初めてこの編集後記を執筆する機会を与えて頂きました。年次報告に編集後記が存在することを知り、何を書くものかと過去の年次報告を眺めてみました。個人的に日頃は読む機会の少ない年次報告ですが、読み返してみると、まだ着任してから3年しか経っていないにもかかわらず卒業アルバムを手にとったような懐かしさを感じます。もちろん同時に、物理学教室における教育、研究、組織運営、そしてアウトリーチ活動などの貴重な記録になっていることを改めて認識できました。今後も、物理学教室における教育・研究がさらに発展していくよう、教室に関わる学生やスタッフと共に日々楽しく、そしてそのためにも大学の教員として様々なことに挑戦していけたらと思います。

(宮田耕充 記)

平成 27 年度 年次報告編集委員
堀田 貴嗣 (2015 年度物理学教室主任)
宮田 耕充
東中 隆二