

研究室活動状況 平成 29 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) 太陽ニュートリノ-カムランド間の齟齬から示唆される非標準相互作用に対する T2HK と DUNE の感度 (安田, ゴッシュ)

現在までのニュートリノ振動に関する実験データは、標準的な三世代間の混合によりおおむね説明されているが、必ずしも定量的に整合性があるとは言えないデータがある。特に、太陽ニュートリノ実験とカムランド実験による質量二乗差の測定値が約 2σ 異なっている点は研究者の関心を集めている。この質量二乗差の違いは、ニュートリノ伝播に影響を与えるフレーバー依存性のある非標準相互作用により説明ができることが知られている。この研究では、太陽ニュートリノ実験・カムランド実験の齟齬から示唆される非標準相互作用の許容領域に対して、近未来の長基線実験である T2HK と DUNE が、どれだけ感度を持つのかを調べた。結果は、非標準相互作用の最適解に対しては 3σ 以上の有意度で検証が出来ること、ハイパーカミオカンデにおける大気ニュートリノ観測 (HK) と二者を比較すると、非標準相互作用に対する感度は、 $HK > DUNE > T2HK$ の順に良いことがわかった。

2) 非標準相互作用に対する T2HK の感度の詳細な研究 (安田, ゴッシュ)

これまでの首都大グループによる長基線実験の非標準相互作用に対する感度の研究では、非標準相互作用を特徴付けるパラメーター $\epsilon_{\alpha\beta}$ ($\alpha, \beta = e, \mu, \tau$) に対して、(i) μ 成分が小さいという条件式 ($|\epsilon_{\alpha\mu}| \ll 1$) と、(ii) 大気ニュートリノの高エネルギー事象から示唆される関係式 $(1 + \epsilon_{ee})\epsilon_{\tau\tau} = |\epsilon_{e\tau}|^2$ の両方を仮定して解析が行われていた。この研究では (ii) の条件を仮定せずに解析を行い、(ii) を仮定した場合と比較してどの程度許容条件が広がるかを議論した。

3) T2HK と μ -DAR の組み合わせによる振動パラメーターに対する感度 (ゴッシュ)

ニュートリノ振動の標準的三世代の枠組みでは3つの混合角、2つの質量自乗差と質量パターン (=絶対値の大きな方の質量自乗差の符号)、1つの CP 非保存の位相 δ が振動パラメーターとなっている。現在までに、3つの混合角と2つの質量自乗差の絶対値の値はすでにほぼ測定されており、質量パターン、 δ 、大気ニュートリノの混合角 $\theta_{23} - \pi/4$ の符号の決定が現在のニュートリノ振動実験の課題となっている。一般に質量パターンは、いわゆる物質効果を通して決定するのが標準的であり、物質効果の測定には、基線の長さが 1000km 以上の長基線実験が必要であると考えられている。この研究では、基線長が 300km しかない T2HK 実験と、その近くに小型加速器 (サイクロトロン) を設置してそこからの μ 粒子の崩壊により発生する反ニュートリノを源として実験した場合の測定精度を議論した。このような設定では、サイクロトロンなしの場合よりも質量パターンと $\theta_{23} - \pi/4$ の符号に関する感度が増大することがわかった。この研究はインドバネーシュワル物理学研究所の S.K. Agarwalla 氏と韓国・基礎科学研究院の S.K. Raut 氏との共同研究である。

4) (3+1)-スキームの低エネルギーマヨラナ型質量行列のゼロ行列要素の研究 (ゴッシュ)

ニュートリノの質量は、標準模型を超える物理で初めて現れる量であるが、そのためには右巻きニュートリノの存在が必要である。左巻き・右巻きニュートリノの両方がある場合には、自由度の数が低エネルギーで測定できる物理量の数よりも多く、一般に物理現象を予言することがむずかしくなる。そこで、予言能力をもたせるには質量行列の一部の行列要素がゼロであるという仮定を置いて、現象論を展開することがしばしば行われている。一方、これまでに標準的な三世代のニュートリノ混合では説明できない現象がいくつか報告されており (LSND 実験, MiniBooNE 実験, 原子炉ニュートリノ異常, ガリウムニュー

トリノ異常と呼ばれる一連の現象), 第四番目のニュートリノ (過去の LEP 実験から弱い相互作用をするニュートリノは3種類しかないことが知られているため, 第四番目のニュートリノは弱い相互作用をしないステライルニュートリノと呼ばれている) を導入する (3+1)-スキームと呼ばれる枠組みが議論されている. この研究では, これまで議論されて来なかった (3+1)-スキームのニュートリノの質量行列のゼロ行列要素の個数に対する制限を議論した. その結果, ゼロ行列要素は高々5つしか存在できず, ゼロ行列要素が5つある場合には一つの可能性しか, 実験を説明できないことがわかった. この研究はインド工科大学グワーハーティー校の D. Borah 氏, アデレード大学の S. Gupta 氏, 韓国・基礎科学研究院の S.K. Raut 氏との共同研究である.

5) ステライルニュートリノが存在する場合の NO ν A 実験におけるパラメーター縮退と質量パターンへの感度 (ゴッシュ)

パラメーター縮退とは, あるエネルギーのニュートリノをある基線長で $\nu_\nu \rightarrow \nu_e$ と $\bar{\nu}_\nu \rightarrow \bar{\nu}_e$ の両方の確率を測定したとしても, 3世代の全ての振動パラメーター (特に未定の CP 位相 δ) を一意的に決定することは一般的にはできない, という現象である. 一方, 最近の長基線実験の結果は, 正常階層性の質量パターンと $\delta \simeq -\pi/2$ を示唆しているが, このように一意的に結論が得られている理由は, 許容領域がパラメーター縮退の起こらない領域であるためであると考えられている. この研究ではステライルニュートリノが存在した場合にこのパラメーター縮退がどうなるかを議論した. その結果, ステライルニュートリノが存在する場合には, 新たな CP 位相 δ_{14} が現れるため, 質量パターンと δ_{14} に関する新たな縮退, $\theta_{23} - \pi/4$ の符号と δ_{14} に関する新たな縮退が存在することがわかった. 前者 (後者) はニュートリノと反ニュートリノとで異なる (同様の) 振る舞いをするために, ニュートリノと反ニュートリノのチャンネルを組み合わせることにより縮退が解決出来る (縮退は解決出来ない) ことがわかった. この研究はアデレード大学の S. Gupta 氏, Z.M. Matthews 氏, P. Sharma 氏, A.G. Williams 氏との共同研究である.

6) 弦模型における超対称性の自発的破れの機構 (北澤)

超弦理論における超対称性の破れの機構のひとつとして “brane supersymmetry breaking” と呼ばれるものがあり, 杉本模型はその機構を実現する最も簡単な模型のひとつである. 杉本模型では実は超対称性は全く存在しないわけではなく, 非線形に表現されていることが知られており, 通常の意味でのヒッグス機構によってゲージ粒子である重力微子が質量を獲得することが期待される. しかしながら, この模型の運動方程式は非自明な背景時空の存在を要求するために質量の定義が自明でない. ドジッター時空における質量が共形不変性によって定義され, 質量がない場合にはそれを宇宙論的な観点から判断できることを見出し, それを杉本模型に応用することによってこの模型の重力微子が質量を獲得しないことを証明した.

7) 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) における抑制 (標準的な Λ CDM 模型の予言と比較して) について, PLANCK 実験の公式観測データを用い, 昨年度に引き続き研究を行った. 長波長領域の角度依存性の偶成分は銀河マスクの大きさに関係なく長波長になるほど Λ CDM 模型からずれて減衰するのに対し, 奇成分は銀河マスクが大きい場合には偶成分と同様な振る舞いをするを, 宇宙背景輻射の長波長の偏極のデータと重力レンズのデータを新たに考慮して確認した.

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, P.Natoli 氏, 及び M.Lattanzi 氏との共同研究である.

8) 境界のないコンパクトな空間における電磁放射 (北澤)

3次元空間ではあるが、そのうちの2方向について境界条件が課されてコンパクトになっている空間内での、円運動する荷電粒子による電磁放射を調べた。3次元空間のうちの2方向が壁によって制限されているような場合(導波管のような場合)とは境界条件が異なる。2方向が極めて小さくコンパクト化されている場合、特に電磁放射の典型的な波長より小さい場合には、その2方向に電磁放射はなく、残るコンパクトでない1次元方向に電磁放射が絞られることを見出した。

この研究は高エネルギー加速研究機構の磯氏と横尾氏との共同研究で、超弦理論におけるコンパクト空間内でのD-braneの運動にともなう重力放射の研究の予備研究である。

9) 公転するD-brane上におけるローレンツ対称性の破れ (北澤)

超弦理論における公転するD-braneの系を、そのD-braneが静止して見えるような回転座標系から見ると、D-brane上の場の分散関係にローレンツ対称性の破れが現れることを明らかにした。それはD-braneの位置を表す自由度に現れ、光速よりも早く伝播するよう見える。因果律の破れが懸念されるが、元の系は単純なD-braneが公転する系なので、因果律は破れていないはずである。実際、この効果は回転によって場の振幅が周期的に変動する効果の現れであって、因果律は破れないことを明らかにした。

この研究は高エネルギー加速研究機構の磯氏との共同研究で、公転するD-braneを素粒子の電弱対称性の自発的破れに応用するための予備研究である。

10) B中間子の2体ハドロン崩壊を用いた $|V_{cb}|$ の決定 (北澤, 増川, 酒井)

B中間子の2体ハドロン崩壊を用いてカビボ小林増川行列の要素のひとつである $|V_{cb}|$ を決定する新しい方法を提案した。正確に決定されているB中間子のsemi-leptonic崩壊の形状因子とisospin対称性によって関係がついている3つの2体ハドロン崩壊モードの分岐比を用いることによって、 $|V_{cb}|$ とハドロンのfinal state interactionの位相を同時に決定できることを示した。特定のハドロン模型によらないことがこの方法の特徴である。

2. 研究業績

1) 論文

Satoshi Iso, Noriaki Kitazawa and Sumito Yokoo, Electromagnetic Radiation in a Semi-Compact Space, *Physics Letters* **A382** (2018) 541-547.

Noriaki Kitazawa and Yuki Sakai, An approach to the instanton effect in B system, *International Journal of Modern Physics* **A33** (2018) 1850017.

Monojit Ghosh, Shivani Gupta, Zachary M. Matthews, Pankaj Sharma, Anthony G. Williams, Study of parameter degeneracy and hierarchy sensitivity of NOvA in presence of sterile neutrino, *Physical Review D* **96** (2017) 075018.

Noriaki Kitazawa, On D-brane dynamics and moduli stabilization, *Modern Physics Letters* **A32** (2017) 1750150.

Debasish Borah, Monojit Ghosh, Shivani Gupta, Sushant K. Raut, Texture zeros of low-energy Majorana neutrino mass matrix in 3+1 scheme, *Physical Review D* **96** (2017) 055017.

Monojit Ghosh, Osamu Yasuda, Effect of systematics in T2HK, T2HKK and DUNE, *Physical Review D* **96** (2017) 013001.

2) 国際会議報告

Osamu Yasuda, The sensitivity of the T2HKK experiment to the flavor-dependent non-standard interactions, *PoS NuFact2017* (2018) 131.

Osamu Yasuda, NSI at Hyper-Kamiokande *PoS NOW2016* (2017) 029.

Newton Nath, Monojit Ghosh, Srubabati Goswami, What antineutrinos can tell about octant and δ_{CP} in DUNE? *PoS ICHEP2016* (2017) 979.

3) 学会講演

● 日本物理学会 2017 年秋季大会 2017 年 9 月 12 日 – 15 日 (宇都宮大学)

酒井裕企, 北澤敬章: B メソン系におけるインスタントン効果へのアプローチ

● 日本物理学会 第 73 回年次大会 2018 年 3 月 22 日 – 25 日 (東京理科大)

増川京佑, 北澤敬章: B 中間子の 2 体ハドロニック崩壊による $|V_{cb}|$ の決定

安田修, Monojit Ghosh: 太陽ニュートリノから示唆される非標準相互作用の T2HKK と DUNE による検証可能性

国内研究会

● 新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会 (2017) 2017 年 12 月 11 日–13 日, 滋賀県琵琶湖グランドホテル (おごと温泉)

M. Ghosh: Physics potentials of the future neutrino oscillation experiments

国際会議

● The close out meeting of the Unification and Development of the Neutrino Science Frontier, 5-6 March 2018, Kyoto University, Japan

O. Yasuda: New developments in neutrino oscillation phenomenology and search for new physics

● A topical conference on elementary particle physics and cosmology (Miami2017), 13–19 December 2017, Fort Lauderdale, Florida, USA

O. Yasuda: Testing NSI suggested by the solar neutrino tension in T2HKK and DUNE

M. Ghosh: A hybrid setup for fundamental unknowns using T2HK and μ -DAR

● 19th International Workshop on Neutrinos from Accelerators (NUFACT2017), 25–30 September 2017, Uppsala, Sweden

O. Yasuda: The sensitivity of the T2HKK experiment to the flavor-depednent non-standard interactions

M. Ghosh: Parameter degeneracy and hierarchy sensitivity of NOvA in presence of sterile neutrino

● INTERNATIONAL SCHOOL OF NUCLEAR PHYSICS, 39th Course, 16–24 September 2017, Erice, Sicily, Italy

O. Yasuda: Sensitivity of the T2HKK experiment to the non-standard interaction

M. Ghosh: Complementarity Between Hyperkamiokande and DUNE

● 18th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, 24–30 August 2017, Moscow, Russia

M. Ghosh: Sensitivity of the T2HKK experiment to the non-standard interactions

4) 学会誌等

安田修：ニュートリノと素粒子物理

数理科学(サイエンス社) 2018年1月号 No.655, p25.

高エネルギー理論研究室

1. 研究活動の概要

The research activity of our Laboratory in the academic year H29 (2017/2018) was in three different directions that correspond to three different research projects.

The conducted research (for these three projects) was a continuation of our earlier research during the previous two years.

Our main (first) research project was devoted to a unified theoretical description of cosmological inflation, dark energy and dark matter in early Universe, in the context of supergravity theory. This research is aimed towards providing a bridge between modern cosmology, based on gravitational theory, and theoretical high energy physics beyond the Standard Model of elementary particles, based on quantum field theory.

The central themes of this research are (i) spontaneous supersymmetry breaking after inflation, (ii) the dark energy represented by a positive cosmological constant, and (iii) super-heavy gravitino dark matter. We proposed a specific supergravity model, having a spontaneous supersymmetry breaking after inflation and inflaton belonging to massive vector multiplet, in the presence of a single chiral (Polonyi) superfield. The inflaton scalar potential has the Starobinsky form, and it is dynamically stabilized during and after inflation, by using the so-called Fayet-Iliopolulos term with its gauge-invariant and supersymmetric completion. We demonstrated a possibility of having a spontaneous supersymmetry breaking with a tiny cosmological constant (i.e a de Sitter vacuum), while keeping stability of the inflationary trajectory. Our supergravity inflationary model was successfully applied for a construction of a viable phenomenological scenario with super-heavy gravitino as the cold dark matter (ケトフ, Aldabergenov).

Our second research project was devoted to superstring cosmology. Motivated by the flux compactifications of type IIA strings on rigid Calabi-Yau manifolds, preserving $N=2$ local supersymmetry in four spacetime dimensions, we derived a non-perturbative scalar potential of all scalars from the exact D-instanton corrected metric. This scalar potential was used for axion stabilization, leading to a discrete set of vacua for axions. The remaining fields are then given by dilaton and Kaehler moduli. We achieved stability of massive axions and tried to use the remaining scalar fields for a viable description of cosmological inflation in the very early Universe.

It has to be consistent with current (Planck satellite mission) observations of the Cosmic Microwave Background radiation. We find that, though it is possible to get a positive vacuum energy driving inflation, it turned out to be impossible to get small enough values for the so-called slow roll inflationary parameters.

As a result, cosmological inflation is impossible in the given class of type IIA strings compactified on (rigid) Calabi-Yau threefolds. However, it is worth mentioning that superstring cosmology is a very new and an extremely complicated subject that deserves further research, so that our results are not conclusive yet (ケトフ, 脇本).

Our third research project was devoted to a possible origin of cosmological inflation from higher spatial dimensions in modified (super)gravity theories. We derived the scalar potential in the eight-dimensional modified gravity theory we proposed. It can be used for a viable description of the

Starobinsky-like inflation in four space-time dimensions, in the presence of a dynamical 4-form field in eight dimensions, by using a flux compactification down to four dimensions on a four-sphere. Most importantly, we were able to simultaneously stabilize the volume modulus (the dynamical scalar different from inflaton/scalaron) of the sphere. We also proposed a possible origin of our (modified) gravity model in eight dimensions from a modified supergravity theory in eleven space-time dimensions, when the latter is compactified on another 3-sphere (ケトフ, 中田).

2. 研究業績

1) 論文

H. Nakada, S.V. Ketov, Inflation from higher dimensions, Phys. Rev. D **96** (2017) 123530 (13 pages).

Y. Aldabergenov and S.V. Ketov, Higgs mechanism and cosmological constant in N=1 supergravity with inflaton in a vector multiplet, Eur. Phys. J. C **77** (2017) 233–239.

A. Addazi, S.V. Ketov, Energy conditions in Starobinsky supergravity, JCAP 1703 (2017) 061 (9 pages).

H. Nakada, S.V. Ketov, Inflation from $(R + \gamma R^n - 2\Lambda)$ gravity in higher dimensions, Phys. Rev. D **95** (2017) 103507 (5 pages)

Y. Wakimoto, S.V. Ketov, No inflation in type IIA strings on rigid CY spaces, PTEP2017 (2017), 083E02 (13 pages).

Y. Aldabergenov and S.V. Ketov, Removing instability of inflation in Polonyi-Starobinsky supergravity by adding FI term, Mod. Phys. Lett. A **91** (2018) 1850032 (6 pages).

2) 学会講演

● 日本物理学会 2017 秋季大会 2017 年 9 月 12 日-15 日 (宇都宮大学)

脇本佑紀：リジッドカラビヤウ多様体上の IIA 型超弦理論における dS 真空およびスローロールインフレーションの探索について

国際会議

● PASCOS 2017 (Particle physics, String theory and COSmology) (マドリード, スペイン, 2017 年 6 月)

Y. Wakimoto, Inflation and dS vacua in type IIA strings on rigid Calabi-Yau manifolds

● The 7th KIAS Workshop on Particle Physics and Cosmology, and the 2nd KEK-NCTS-KIAS Workshop on Particle Physics Phenomenology (ソウル, 韓国, 2017 年 11 月)

Y. Aldabergenov, SUSY breaking after inflation in supergravity with inflaton in a massive vector supermultiplet

原子核ハドロン物理研究室

1. 研究活動の概要

1) 核媒質中の π 中間子波動関数くりこみにおける高次部分波の影響 (青木, 慈道)

カイラル対称性が自発的に破れている事を実験的に証明するために、クォーク凝縮 $\langle \bar{q}q \rangle$ で特徴付けられる QCD 真空構造の有限核子密度における振る舞いが研究されている。これまでに、深く束縛された π 中間子の分光実験や低エネルギー π 中間子-原子核弾性散乱に理論的考察を加える事により、カイラル対称性が 30%程度回復する可能性がある事が明らかになりつつある。このような研究から、 π 中間子-原子核相互作用は、光学ポテンシャルの S 波項に π 中間子の S 波波動関数くりこみを考慮する事で記述できることが分かってきた。本研究では、奈良女子大の比連崎悟氏と鳥取大学の池野なつ美氏と共同研究のもと、核媒質中における πN 相互作用の P 波成分に対する有限核子密度の効果がカイラル対称性の部分的回復にどのような影響をもたらすか明らかにする。今回は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に着目し、 π 中間子-原子核弾性散乱を記述する光学ポテンシャルをカイラル対称性の部分的回復と密接な関係のある波動関数くりこみを含めて計算した。光学ポテンシャルはカイラル摂動論の NLO までの πN 弾性散乱振幅を用いて、線形密度近似で構成した。光学ポテンシャルに波動関数くりこみの効果を取り入れ、部分波展開をする事により核媒質中の πN 相互作用の P 波成分に対する波動関数くりこみの振る舞いを調べた。

2) K^+N 散乱過程における幅の広い共鳴状態の可能性について (青木, 慈道)

エキゾチックハドロンの 1 つとしてストレンジネス $S = +1$ の量子数を持つバリオンを考える事ができる。 $S = +1$ の量子数を持つバリオンは反クォーク \bar{s} を必ず含むため通常のカォーク模型で記述されるバリオンのように 3 つのクォークからバリオンの量子数を構成することはできず、電荷が +1 の場合は $uudds$ と 5 つのクォークが必要になる。量子色力学において 4 つ以上のクォークを持つハドロンの存在は禁止されないにも関わらず、十分に得られていない。本研究はカイラルユニタリー模型を用いて $S = +1$ バリオンの存在可能性について議論した。まず、 K^+N 散乱振幅をカイラル摂動論の NLO まで計算し、ユニタリー化を行い、散乱断面積を再現するように低エネルギー一定数と subtraction constant を決定した。その結果、 $p_{\text{lab}}=800$ MeV/c までの断面積を非常に良く再現する $I = 0, 1$ 散乱振幅を得る事ができた。 KN 散乱の S 波における $I = 0$ チャンネルを調べると幅の広い共鳴状態の存在を示唆するような散乱振幅が得られた。しかしながら、上記のように共鳴状態が現れるか否かはカイラル摂動論のパラメータである低エネルギー一定数とカイラルユニタリー模型のパラメータである subtraction constant に依存して異なる。本研究では、このように動的に生成される $S = +1$ 共鳴状態の可能性について、フィットの方法によらず共鳴が現れるか否かを調べる事により議論した。

3) 相対論的平均場理論による η' 中間子原子核の構造 (梶谷, 慈道)

η' が質量を獲得するためには、 $U_A(1)$ 量子異常だけでなく $SU(3)$ カイラル対称性が破れていなければならないことが分かってきた。したがって、カイラル対称性が部分的に回復する核媒質中では η' の質量が減少することが予想される。それに伴って η' を原子核中に生成し、その束縛状態を観測する実験がドイツの GSI で行われている。しかし、この実験では期待される束縛状態のシグナルははっきりとは見えていない。 η' と核媒質の相互作用が十分に強いと η' を入れることで原子核の構造が大きく変わると考えられ、 η' 中間子原子核のスペクトルは従来予想されているものとは異なる可能性がある。また、理論的には、 η' と核子の強い相互作用による原子核構造の変化にも興味を持たれている。本研究では、奈良女子大の比連崎悟氏と共同研究のもと、相対論的平均場理論を用いて原子核を構成し、その原子核の中に不純物

として η' を導入することによって、 η' が原子核中でどのような束縛状態を作るか、また η' を導入することによって原子核構造にどのような変化が生じるのかを調べた。密度を位置の関数として与え局所密度近似を用いて原子核のモデルを得て、 η' を導入し Klein-Gordon 方程式を解くことで η' の束縛状態の波動関数と束縛エネルギーを求める。これにより、飽和密度で同等な結果を与えるモデルパラメーターであっても高密度の振る舞いが異なることが分かった。また、 η' を導入することで原子核の構造に変化が生じるということも分かった。構造の変化は η' の密度が中心に集まるために η' が s 状態の束縛状態で顕著である一方、高い角運動量状態は変化が小さい。

4) Bag model を用いた重いハドロンの 質量スペクトル (田中, 慈道)

最近になって相次いで発見されているエキゾチックハドロンは、重いクォーク (c, b) と軽いクォーク (u, d, s) どちらも含むもので多く発見されている。重いクォークと軽いクォークを含むハドロンの質量スペクトルより、ハドロン内の軽いクォークのダイナミクスを見ることが出来る。このような目的からバッグモデルを用いて重いハドロンについて研究を行った。本研究ではまずはじめに最も単純な MIT バッグモデルにおいて、クォークの運動エネルギー、クォーク間のスピン相互作用、カシミアエネルギー、バッグエネルギーをもとに重いハドロンの質量スペクトルを計算した。バッグの中の真空を摂動的真空に扱っているので、バッグの中のクォークの質量はカレントクォークの質量であるはずである。しかし、重いクォークを一つ含むハドロン ($\Lambda_c, \Sigma_c, \Xi_c, \Omega_c$ など) の質量差を、摂動計算によるクォーク間のスピン相互作用で説明しようとしたところ、ストレンジクォークのカレントクォーク質量 (93MeV) では実験を再現できなかった。このことを解決するために、MIT バッグモデルの拡張である cloudy bag model を用いて計算を行った。cloudy bag model は MIT バッグモデルで破れていたバッグ表面での軽いクォークのカイラル対称性を満たすモデルである。このモデルでは、軽いクォークのダイナミクスにおけるメソンの役割を明らかにすることができ、クォークとメソンによる相互作用を摂動として計算したところ MIT バッグモデルから導かれたストレンジクォークの質量を下げるような結果になった。

5) ダイクォーク模型による重いバリオンの励起エネルギーとダイクォーク質量 (隈川, 慈道)

近年、ハドロン物理では c クォークや b クォークといった重いクォークを含むハドロンが実験的に発見されている。現在のクォーク模型では説明が困難なハドロンが発見されているため、ハドロン構造に対する単純なクォーク構造を見直す必要がある。いくつかの可能性としてマルチクォーク構造やハドロン分子構造等が挙げられるが、特に、重いクォークを1つ含むバリオンでは、2つの軽いクォークがダイクォークとして振る舞い、クォーク・ダイクォークの束縛状態として記述されることが期待されている。本研究では、ダイクォークサイズを考慮しないモデルと、ダイクォークに大きさを持たせるためにダイクォークを構成するクォーク間距離をガウス分布と仮定したモデルの2つで、 Λ_c の励起エネルギーを計算した。ダイクォークがサイズを持つモデルにおいて、 Λ_c の p 軌道励起状態を再現するには、ダイクォークの直径は 1.2 fm 程度であるという結果が得られた。この両模型の違いをクォーク間の閉じ込めポテンシャルから説明した上で、両模型を用いて c クォークを1つ含むバリオン ($\Lambda_c, \Xi_c, \Sigma_c, \Xi'_c, \Omega_c$) についてダイクォーク質量と励起エネルギーの計算を系統的に行った。2s 軌道の励起エネルギーにおいて特徴的な違いが見られ、特にダイクォークサイズを考慮しないモデルでは、2s 軌道で $\Lambda_c(2765)$ [$J^P = ?$] を再現できた。同様に、 b クォークを1つ含むバリオン ($\Lambda_b, \Xi_b, \Sigma_b, \Xi'_b, \Omega_b$) についても計算を行った。最近発見された c クォークを2つ持つバリオン Ξ_{cc} についても計算を行い励起エネルギーの予測をした。

6) Nambu-Jona-Lasinio 模型におけるダイクォークの質量生成機構 (河野, 慈道)

原子核の構成要素である核子の質量は 940MeV である一方、核子の構成要素となる u クォークや d クォークは約 10MeV 程度であり、実際の質量のわずか数パーセントにしかならない。その質量獲得の要

因となるのが、カイラル対称性の自発的破れである。カイラル対称性を有する有効模型に、クォークの場を用いた Nambu-Jona-Lasinio モデル（通称 NJL モデル）がある。このモデルはクォークの閉じ込め機構を持たないが、カイラル対称性の自発的破れをクォークの4点相互作用で考慮されている。NJL モデルでは、gap 方程式と Bethe-Salpeter 方程式を解くことで、カイラル対称性が自発的に破れることによりクォークが質量を獲得すること、それに伴い π 中間子が南部・ゴールドストーンボゾンとして振る舞うことが示され、 π 中間子のパリティパートナーである σ 中間子の質量を計算できる。本研究では、ダイクォークの質量に対するカイラル対称性の役割を調べた。カラーが2の QCD では、クォークと反クォークの対称性（Pauli-Gürsey 対称性）のため、スカラーダイクォークが π 中間子と同じ振る舞いをする。カラーが3では、この対称性は成り立たないが、SU(3)にはSU(2)を部分群として含むので、ダイクォークの質量質量機構もカイラル対称性の破れが重要な役割を示すと考えられる。

7) K 中間子原子のスペクトルと K 中間子原子核相互作用（飯澤, 慈道）

K^- -中間子原子核系では電磁相互作用と強い相互作用の2つの相互作用を考慮する必要がある。そのため電磁相互作用を主として原子核のまわりに K^- が電子のように束縛し、原子のように振る舞う K 中間子原子状態のエネルギースペクトルはクーロン力のみによる束縛エネルギーに比べ強い相互作用の影響でシフトする。また、強い相互作用による吸収の効果により崩壊幅も得られる。このエネルギーシフトと崩壊幅を精密に測定することにより、 K 中間子と核子強い相互作用の性質を知ることができる。 K 中間子原子では、実験値を記述する強い相互作用ポテンシャルには実部の深さが大きく異なる2つのモデルが知られている。そのうち深いものは Friedman, Gal らが求めた現象論的アプローチがサポートしており、浅いものはカイラルユニタリ模型による理論的アプローチがサポートしている。本研究では、奈良女子大学の比連崎悟氏と鳥取大学の池野なつ美氏と共同研究のもと、Friedman, Gal らが行ったような様々な原子核の K 中間子原子実験の結果から統計的手法を用いてポテンシャルを決定するのではなく、1つの原子核での実験値に着目して Klein-Gordon 方程式を数値的に解き、その核での実験値を説明できる深さの異なる2つのパラメータを決定した。また、それらのパラメータが他の原子核での実験結果を説明できるかどうかを計算し、深さの異なる2つのパラメータのうちどちらがより多くの実験結果を説明できるかについて調べた。今回は、簡単のため、実部ポテンシャルのみを考え計算を行った結果、浅いポテンシャルに相当するポテンシャルが幅広い原子核についてエネルギーシフトの実験結果を再現することが分かった。今後、虚部も考慮し計算を行う。

8) ハドロンスペクトルにおけるダイナミカル超対称性（天野, 慈道）

ハドロンを記述することにおいて対称性が重要な役割を担っている。本研究では、標準理論で取り扱われている Lie 群から少し発展させて新たな代数を構築し、ハドロンスペクトルの背後に超対称性を見いだすことを目的とする。 s クォークスピン上下とスピン0 ud ダイクォークの反粒子はともにカラー3を持ち、質量が約 500 MeV であるので、これらを3成分でトリプレットを組むとする。 s クォークはスピン $\frac{1}{2}$ でフェルミオン、 ud ダイクォークはスピン0でボソンであるため、この代数はボソンとフェルミオンをませる代数である。しかし、これはいわゆる素粒子論で議論されているような粒子とそれに対応する超対称性パートナーを考えるようなものではなく、あくまで構成子クォークにおける s クォークと ud ダイクォークとの間のダイナミカルな対称性である。トリプレット間の対称性と質量差による対称性の破れを考慮し、ハドロンの質量スペクトルを計算し、Gell-Mann 大久保の質量公式のようにハドロン間の質量関係式を導く。これらと実験値と比較し、この結果からハドロン内の超対称性、ダイクォークの存在、性質について議論をした。

2. 研究業績

1) 論文

Kento Kumakawa, Daisuke Jido, *Excitation energy spectra of the Λ_c and Λ_b baryons in a finite-size diquark model*, Prog. Theor. Exp. Phys. 2017, 123D01 (2017), DOI: 10.1093/ptep/ptx155.

Kenji Aoki, Daisuke Jido, *K+-nucleus elastic scattering revisited from perspective of partial restoration of chiral symmetry* Prog. Theor. Exp. Phys. 2017, 103D01 (2017), DOI: 10.1093/ptep/ptx133.

Natsumi Ikeno, Hideko Nagahiro, Daisuke Jido, Satoru Hirenzaki, *η -nucleus interaction from the $d+d$ reaction around the η production threshold*, Eur. Phys. J. A53, 53, 194 (2017), DOI: 10.1140/epja/i2017-12381-7.

Y.K. Tanaka, K. Itahashi, 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, M. Iwasaki, D. Jido, N. Kalantar-Nayestanaki, R. Kanungo, R. Knoebel, R. Knobel, 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, I. Tanihata, S. Terashima, Y.N. Watanabe, H. Weick, E. Widmann, J.S. Winfield, X. Xu, H. Yamakami, J. Zhao, *Missing-mass spectroscopy of the $^{12}C(p, d)$ reaction near the η' -meson production threshold*, Phys. Rev. C97, 015202 (2018), DOI: 10.1103/PhysRevC.97.015202.

Sang-Ho Kim, Seung-il Nam, Daisuke Jido, Hyun-Chul Kim, *Photoproduction of $\Lambda(1405)$ with the N^* and t -channel Regge contributions*, Phys. Rev. D96, 014003 (2017), DOI: 10.1103/PhysRevD.96.014003.

Sungtae Cho, Tetsuo Hyodo, Daisuke Jido, Che Ming Ko, Su Houng Lee, Saori Maeda, Kenta Miyahara, Kenji Morita, Marina Nielsen, Akira Ohnishi, Takayasu Sekihara, Taesoo Song, Shigehiro Yasui, Koichi Yazaki (the ExHIC collaboration), *Exotic Hadrons from Heavy Ion Collisions*, Prog. Part. Nucl. Phys 95, 279-322 (2017), DOI: 10.1016/j.pnpnp.2017.02.002.

2) 国際会議報告

Daisuke Jido, *Mesons in Nuclei and Partial Restoration of Chiral Symmetry*, JPS Conf. Proc. 17, 081002 (2017), Proceedings for 12th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP 2015), 7-12 September 2015. Sendai, Japan, DOI:10.7566/JPSCP.17.081002.

K. Itahashi, Y. Ayyad, J. Benlliure, K.-T. Brinkmann, S. Friedrich, H. Fujioka, 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, 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, *Search for η' Mesic Nuclei in GSI/FAIR*, JPS Conf. Proc. 17, 082008 (2017), Proceedings for 12th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP 2015), 7-12 September 2015. Sendai, Japan, DOI:10.7566/JPSCP.17.082008

Y.K. Tanaka, Y. Ayyad, J. Benlliure, K.-T. Brinkmann, S. Friedrich, H. Fujioka, H. Geissel, J. Gel-lanki, C. Guo, E. Gutz, E. Haettner, M.N. Harakeh, R.S. Hayano, Y. Higashi, S. Hirenzaki, C. Hor-nung, 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. Si-mon, B. Sitar, P. Strmen, B. Sun, K. Suzuki, I. Szarka, M. Takechi, I. Tanihata, S. Terashima, Y.N. Watanabe, H. Weick, E. Widmann, J.S. Winfield, X. Xu, H. Yamakami, J. Zhao, *First Results on the Experimental Search for η' -Mesic Nuclei with the $^{12}\text{C}(p, d)$ Reaction*, Acta Phys. Polon. B48, 1813 (2017), Proceedings for 2nd Jagiellonian Symposium of Fundamental and Applied Subatomic Physics (J-SYMPIUM 2017), 4-9 June 2017, Krakow, Poland, DOI: 10.5506/APhysPolB.48.1813.

Takayasu Sekihara, Tetuso Hyodo, Daisuke Jido, Junko Yamagata-Sekihara, Shigehiro Yasui, *Two-body Wave Functions, Compositeness, And The Internal Structure Of Dynamically Generated Resonances*, PoS INPC2016, 289 (2017), Proceedings for the International Nuclear Physics Conference 2016 (INPC2016), 11-16 September 2016, Adelaide, Australia.

3) 日本語解説

藤澤高志, 大西直毅, Stern-Gerlach 実験の歴史的背景と応用, 日本物理学会誌 Vol. 92, 345 (2017).

4) 学会講演

● 日本物理学会年会 第73回年次大会 2018年3月22日~3月25日 (東京理科大学 野田キャンパス)

青木健児, 慈道大介: K^+N 散乱過程における幅の広い共鳴状態の可能性について (26pK302-6)

隈川健斗, 慈道大介: ダイクォーク模型による重いバリオンの励起エネルギーとダイクォーク質量 (25aK301-1)

池野なつ美, 青木健児, 慈道大介, 比連崎悟: 深く束縛された π 中間子原子の構造と生成に対する π 中間子波動関数くりこみの効果 (22pK309-4)

大西直毅, 丸山智幸: マグネターのカイラル非対称模型 VII (23pK102-10)

● 日本物理学会年会 秋期大会 2017年9月12日~9月15日 (宇都宮大学 峰キャンパス)

榊谷花世, 慈道大介, 比連崎悟: 相対論的平均場原子核理論による η' 中間子原子核 (15aS23-3)

青木健児, 慈道大介, 池野なつ美, 比連崎悟: 核媒質中の π 中間子波動関数くりこみにおける高次部分波の影響 (15aS23-4)

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の質量スペクトル (15aS23-11)

隈川健斗, 慈道大介: 大きさを考慮したダイクォーク模型による重いバリオン (15aS23-12)

田中賢基, 慈道大介: Bag model を用いた heavy hadron の質量スペクトル (15aS25-13)

大西直毅, 丸山智幸: マグネターのカイラル非対称模型 VI (13aT12-7)

国内研究会

- 小規模研究会「核媒質中におけるハドロンの性質についての検討会」 2017.12.26 - 12.28, 奈良女子大学

天野大樹: ハドロン質量スペクトルにおけるダイナミカル超対称性

飯澤優太郎: K 中間子原子のスペクトルと K 中間子原子核相互作用

隈川健斗: ダイクォーク模型による重いバリオンの励起エネルギーとダイクォーク質量

河野晋之介: Nambu-Jona-Lasinio 模型によるダイクォークの質量生成機構

田中賢基: Cloudy Bag Model を用いた重いハドロンの質量スペクトル

榭谷花世: 相対論的平均場原子核理論による η' 中間子原子核

青木健児: 核媒質中における π 中間子波動関数くりこみの高次部分波の影響

- 新学術領域「中性子星核物質」主催 第6回「中性子星の核物質」 2017.12.1 - 3, 理化学研究所

大西直毅: Chiral Asymmetry Model for Magnetars

- 討論型研究会「中間子原子と中間子原子核」 2017.11.13 - 15, 京都大学

青木健児: 核媒質中における π 中間子の波動関数くりこみ

榭谷花世: 相対論的平均場原子核理論による η' 中間子原子核

宇宙理論研究室

1. 研究活動の概要

宇宙理論研究室では、相対論が関わるような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。2017年度の研究室構成はスタッフ2名、大学院生3名、研究生1名である。

1) 高エネルギー天体现象

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では伴星からブラックホールへ質量輸送が起きるが、伴星がO型星の場合には恒星風をブラックホールが捕捉して降着する。恒星風降着ブラックホールの代表的な例はCyg X-1で、光度が大きいkeV黒体放射状態と光度が小さい100keVベキ型スペクトルの放射状態の、安定した2つの状態間を遷移することが知られている。しかし、同じ恒星風降着でもLMC X-1では状態遷移が見られないなど、状態遷移のメカニズムや遷移条件は分かっていない。一般にO型星には紫外線放射によって加速される ~ 1000 km/sの恒星風が見られるが、ブラックホール連星系にあるO型星ではブラックホールからの放射が加速に関わるイオンを光電離するため恒星風速度が頭打ちになると考えられる。この効果は光度や放射スペクトルに依存し、逆に捕捉-降着率の変化によって光度に影響を及ぼす関係にある。

恒星風の流体計算を行い、ブラックホールからの放射による光電離を考慮して、光度と整合的な捕捉率を計算し実効的な降着率を評価した。降着流の密度から降着円盤が形成され磁気流体回転不安定性がトリガーされる条件を調べた。降着流において物質が内側に輸送されるには、このような不安定性によって物質の角運動量が外側に輸送される必要がある。こうして状態遷移を引き起こすメカニズムについて準解析的モデルを構築し、これによる理論計算をCyg X-1とLMC X-1の観測結果と比較した。

2) 高エネルギー天体现象～銀河・銀河団の形成と進化

銀河中心の超巨大ブラックホールの活動と銀河の進化 多くの銀河においてその中心部に太陽質量の百万倍を超える超巨大ブラックホールがあることが知られている。ブラックホールの質量と銀河のバルジの星の速度分散の間に正の相関が見られるなど、ブラックホールと母銀河は互いに影響を及ぼしながら進化したことが示唆される。一方、ブラックホールから光速の1/10程度のアウトフローが観測されており、ブラックホールの活動と銀河の星形成活動との関係が議論されている：アウトフローは星間物質を系外に掃き出して銀河の星形成を抑制すると考えられ、そのために予想されるブラックホールの活動期間は1千万年から1億年となるが、狭輝線領域の観測から見積もられる活動期間はせいぜい10万年程度で、ブラックホールの活動が銀河の進化に及ぼす影響は未だ分からないことが多い。

ブラックホールの活動を解析的および数値流体計算によって調べ、アウトフローによって星間物質がどこまで掃き出されるか、星形成活動への影響について研究を行った。まず、降着円盤の力学的安定性に着目して解析的にブラックホールへの質量降着を調べ、狭輝線領域の観測とよく一致する活動期間を得た。それを元に、流体力学コードを用いてアウトフローを数値計算し、バルジの外まで星間物質を掃き出せるか調べた。アウトフローの衝撃波で圧縮された物質が冷えて不安定になり、分子雲となってブラックホールに降着し、繰り返しアウトフローを引き起こす可能性についても調べた。

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。銀河団の形成・進化の過程で銀河団衝突で生じた衝撃波や乱流はガスの粒子を

加速する。実際、銀河団衝突していると見られる系で GeV 電子放射の電波ハローや電波レリックが観測されている。前者は Mpc スケールに広がるので、衝撃波よりも乱流による in-situ 粒子加速を考えるのが自然である。乱流が減衰すると加速された粒子の一部は熱的粒子と相互作用して加熱に寄与すると期待され、実際、電波強度とガスの温度や熱的 X 線光度の間には正の相関が見られる。これらの観測事実を踏まえて、電波ハローと整合的に銀河団コアの熱的進化を探る研究を進めている。

乱流で加速された粒子の分布関数が、乱流の減衰とともにどのように変化するか、乱流のカスケードおよび熱的粒子との相互作用に着目して、Fokker-Planck コードで計算を行った。銀河団コアのガスの放射冷却時間は単純に計算すると宇宙年齢より短くなりうるが、乱流の減衰後、加速された粒子が熱化すればガスの温度が上がりコアは安定化する。移流項が抑制され拡散項が支配的になればよい。また、熱的粒子と準熱的粒子の相互作用によって非平衡放射状態にあるとすれば、衝突励起が抑制されるので放射強度に比して粒子のエネルギー損失が抑えられ、実効的な放射冷却時間が延びてやはりコアは安定化される。熱的分布への遷移状態にある分布関数に基づいて非平衡状態の熱的放射過程を調べた。

3) 銀河・銀河団の形成と進化

銀河団ダークマター・ガス・星分布の非球対称性 銀河団の主な構成要素であるダークマター、ガス、星の分布を、非球対称性に注目して、宇宙流体シミュレーションを用いて調べた。分布の非球対称性は銀河団の進化を調べるのに重要な情報を担っている。観測量である X 線輝度分布や SZ 効果によるコンプトン y パラメータ、重力レンズ効果で測れる総質量について天球面上に射影した分布を楕円で近似し、それぞれについて楕円率、軸の向きについて相関を調べた。特に中心銀河と総質量の間の相関を見出した。

低輝度銀河団の **Suzaku** による観測 低輝度銀河団としては 2 例目となる A1631 を X 線衛星 Suzaku を用いて観測した。X 線輝度分布、ガスの温度とエントロピー分布を調べ、中心付近でのガス密度が同程度の温度の銀河団の典型的な値よりも小さいことを見つけた。また、エントロピー分布も緩やかである。このような特徴はこの銀河団が衝突を経験したためでないかと考え、可視光の観測結果なども含めて議論を行った。

2. 研究業績

1) 論文

K. Yaji, S. Yamada, K. Masai: "Semi-analytical Model for Wind-fed Black Hole High-mass X-ray Binaries - State Transition Triggered by Magnetic Fields from the Companion Star", *Astrophys. J.*, **847** (2017) 129

2) 学会講演

● 日本天文学会 2017 年秋季年会 2017 年 9 月 11 日-13 日 (北海道大学)

福田晋久, 谷治健太郎, 政井邦昭: AGN 円盤風の変動に基づく銀河規模アウトフローの力学的発展

● HEAP2017 高エネルギー宇宙物理学研究会 2017 年 9 月 5 日-9 月 7 日 (京都大学)

谷治健太郎, 山田真也, 政井邦昭: 恒星風降着 X 線連星系における準解析的状态遷移モデル

● X 線望遠鏡研究会 2017 2017 年 11 月 18 日 (名古屋大学)

政井邦昭: 集光型望遠鏡の黎明期 -Tenma 搭載日本初の 1 次元集光鏡と Einstein 衛星-

非線形物理研究室

1. 研究活動の概要

1) 非可積分散乱写像と複素スケーリングによる量子共鳴状態の計算

散乱領域が有限な領域にあり、かつ無限遠で自由運動に漸近する非可積分な散乱写像を提案した。この系は摂動の強さを制御することによって、カオス運動と規則運動の混在する混合位相空間を実現し、動的トンネル効果を調べるモデルとして最適である。また、摂動強度を強くすると規則運動が消失し、理想カオスも実現する。とくにある条件下では位相馬蹄条件を満たすことを厳密に証明することができ、一様双曲性をもつ可能性すらある。ここでは、古典系に関する以上の性質を踏まえた上で、複素スケーリングの方法を用いて対応する量子系の共鳴状態を計算し、従来から行われている吸収ポテンシャルを用いた共鳴状態の計算の妥当性を検討した。その結果、吸収ポテンシャルが不連続性をもつ、あるいはポテンシャルの変動幅が激しい場合、複素スケーリングを用いた結果を再現しないことが明らかになった。近年、共鳴状態の状態数と対応する古典系の不変集合のフラクタル次元には一定の関係（いわゆるフラクタルワイル則）が成り立つことが予想され、吸収ポテンシャルの方法を用いてその数値的検証が行われてうるが、本研究はそれらの計算結果の妥当性に再検討を促すものである。

2) プランク定数に対して非指数関数的依存性をもつトンネル効果

通常、トンネル効果の大きさはプランク定数に対して指数関数的な依存性を示す。たとえば、対称二重井戸ポテンシャルをもつ1次元系の基底状態と第一励起状態はトンネル効果によりエネルギー分裂を起こしその大きさはプランク定数に対して指数関数的に減衰する。それに対し、カオス内在する量子写像系のエネルギー分裂を大規模数値計算によって調べたところ、トンネル効果によって現れるエネルギー分裂が引き伸ばされた指数関数 (stretched exponential) に従うことを見出した。トンネル効果が量子効果として認識されて以来、指数関数減衰から外れた形のトンネル効果の存在が認識されたのは我々の知り得る限り始めてである。この事実は、非可積分系のトンネル効果が半古典理論では捉えることができない、可積分系のトンネル効果とは本質的に異なる現象であることを示唆する。その起源を突き止めることは今後の急務と言える。

3) 馬蹄型条件を満たす理想カオス状態における半古典近似の有効性について

古典力学を参照して量子カオス系を解析する最も有効な手段は半古典近似である。半古典近似が成り立つためには、近似に寄与する古典軌道が位相空間上で十分離れている必要があるが、カオス系では引き伸ばし折れ畳み機構のため極めて短時間でその状況を破る古典軌道が多数発生する。これに対し、Tomsovicらは、強いカオス系であっても、当初の予想に反し、十分長い時間、半古典近似が有効であることがあり得ることを示し、簡単な議論からその理由を考察した。しかし、その理路には未検証の仮説が含まれ、一般論構築には未だ多くの問題点が残っていた。我々は、カオス発生の機構が単純でよく調べられているエノン写像を用いてカオス系の半古典論の有効性の吟味を行っている。特に、系がいわゆる馬蹄型条件と呼ばれる理想カオス状態を検討したところ、プランク定数の大きさによっては、非遊走集合を含む位相空間内の一定領域内に折れ曲がりが見れず、近似がいつまで有効であり続けることがあり得ることがわかった。馬蹄型条件が破れた場合での解析が次なる課題である。

4) 非カオス的な面積保存写像における劣拡散を記述する確率モデルについて

一般化三角写像と呼ばれる面積保存写像は、不安定性をもたないにも関わらず軌道が拡散的に振る舞う。とくに、比較的一般的な状況下で、いわゆる劣拡散、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。さらに、軌道の運動量分布が非整数階時間微分拡散方程式に従う。ここでは、非整数階時間微分拡散方程式が等間隔サイト上の連続時間ランダムウォークにおける劣拡散を記述することに注目し、まず、等間隔サイト上の連続時間ランダムウォークが一般化三角写像の確率モデルとなり得るか否かを検討した。結果、一般化三角写像から得られる平均二乗変位のべき指数との関係が、等間隔サイト上の連続時間ランダムウォークが満たすべき一定の関係を満足していないことがわかり、一般化三角写像の確率モデルとして妥当なものではないことが明らかになった。また、「怠け者の象のランダムウォーク」と呼ばれる非マルコフ過程が非整数階時間微分拡散方程式の解と同じ分布関数を示すことから一般化三角写像の確率モデルの候補として浮上した。しかしながら、両者が異なるエイジングの性質をもつことから、この場合にも確率モデルとしての適性を満たさないことがわかった。以上から、一般化三角写像は劣拡散を記述する一般的な確率過程の範疇には落ちない複雑な拡散過程であることがわかってきた。

5) 転回点を繋ぐストークス線が現れる場合の三準位非断熱遷移問題の研究

3準位の非断熱遷移の問題を完全 WKB 解析の方法を用いて調べた。特に、転回点のいくつかが複素時間面内に入り透熱準位が交差しない場合についての完全 WKB 解析の有効性を調べた。転回点が複素時間面内に入ると、一般に、ストークス線が縮退が発生し、転回点を繋ぐストークス線が現れる。縮退するストークス線上においては完全 WKB 解析によって得られる WKB 解の接続のルールを与える処方箋がないためその適用範囲外となる。ここでは、縮退したストークス線に小さな摂動を加えることによりその問題を回避することを試みた。具体的には、まず、摂動項虚部を正負両側からゼロに近づけた極限において、完全 WKB 解が数値解を良く再現することを示し、続いて、透熱準位が高々 2 次の多項式で与えられる場合について、その散乱行列が摂動項虚部の正負に依らない事を示した。これらの結果は、原理的には適用できない状況においても完全 WKB 解析を介して得られた WKB 解が三準位非断熱遷移問題の解析に有効であることが強く示唆する。

6) 量子多体系での新奇的な量子ホロノミーから古典対応物へ

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、近年でも幾何学的位相を通じた量子状態制御や断熱量子計算といった新たな話題を提供している。我々は、断熱的な量子力学の新しい側面である「新奇的な量子ホロノミー」と呼ばれる現象の研究を推進してきた。新奇的な量子ホロノミーは自己共役な点状ポテンシャルに関する数理論理学の研究から見いだされたものであるが、周期撃力下のフロケ系や Lieb-Liniger 模型と呼ばれる厳密可解な多体系等の物理系で具体例が見いだされてきた。近年の顕著な理論的成果は、新奇的な量子ホロノミーの数理的背景に被覆空間の位相幾何学的な構造を同定したことである。本年度は、弱く相互作用するボーズ粒子を捕捉したポテンシャルに鋭いポテンシャル障壁を印加することで作られる断熱サイクルを解析した。この系は、一体問題の場合は、いくつかの断熱サイクルが新奇的な量子ホロノミーを引き起こす。しかし、多体系では、ある特別な断熱サイクルでのみ新奇的な量子ホロノミーが生き残ることが予想されていた。これについて、平均場近似の枠内での解析から、相互作用がある程度弱い限りにおいて一体系で見られていた新奇的な量子ホロノミーが実現することを確認した。摂動論的な議論からは新奇的な量子ホロノミーが不安定だと思われた断熱サイクルでも、数値実験の範囲内で観測可能であったことは特筆すべきことである。光増幅やレーザー発振への応用は興味深いと考えられる(中村孝明さんおよび全卓樹教授(高知工科大)との共同研究)。一方、平均場近似下の基礎方程式である非線形シュレディンガー方程式が古典的なハミルトン系と解釈できることから、新奇的な量子ホロノミーの古典対応物を探索した。この結果、近可積分キックドトップにおいて、古典対応物の最初の一例を見いだした(全卓樹教授(高知工科大)との共同研究)。

2. 研究業績

1) 論文

Akira Akaishi, Kazuki Aoki and Akira Shudo: Hierarchical structure in sharply-divided phase space for the piecewise linear map, Phys. Rev. E. **95** (2017) 052207 (8 pages).

Hiromitsu Harada, Amaury Mouchet and Akira Shudo: Riemann surfaces of complex classical trajectories and tunnelling splitting in one-dimensional systems, J. Phys. A: Math. Theor. **30** (2017) 435207 (27pp).

2) 学会講演

● 日本物理学会 秋季大会 2017年9月21日-24日 (岩手大学 上田キャンパス)

吉野元, 首藤啓: 馬蹄条件を満たすカオス系における半古典近似破綻領域の漸近挙動

吉田賢典, 渡邊真悟, 首藤啓: 劣拡散を示す面積保存写像における周期軌道近傍の淀み運動と連続時間ランダムウォーク

花田康高, 首藤啓, 池田研介: 量子写像の Baker-Campbell-Hausdorff 展開について

池田研介, 花田康高, 首藤啓: 対応原理によるインスタントン 非インスタントン転移の研究 IV

田中篤司, 全卓樹: 新奇な量子ホロノミーの古典対応物

● 日本物理学会 第73回年次大会 2017年3月22日-25日 (東京理科大学 野田キャンパス)

島田尚明, 首藤啓: 完全 WKB 解析とストークス幾何に基づく三準位非断熱遷移問題の研究

吉野元, 首藤啓: 馬蹄条件下での半古典近似の長時間有効性について

吉田賢典, 渡邊真悟, 首藤啓: 非カオス的な面積保存写像における劣拡散を記述する確率モデルについて

国内研究会

● 弱値・弱測定, エンタングルメント, 量子コヒーレンスの新地平 2018年2月21-22日 (高エネルギー加速器研究機構つくばキャンパス)

田中篤司: ボーズ粒子系を基底状態から準位反転させる断熱サイクル: 新奇な量子ホロノミーの一例として

国際会議

● “Chaos, and what it can reveal” A conference on the occasion of Petr Seba’s 60th birthday, May 8-11, 2017 (Hradec Kralove, Czech)

A. Shudo Amphibious Complex Orbits and Dynamical Tunneling (invited)

● Current Trends in Dynamical Systems and the Mathematical Legacy of Rufus Bowen, July 30-August 4, 2017 (University of British Columbia)

K. Yoshida, S. Watanabe, A. Shudo: Sub-diffusion in a non-chaotic area-preserving map, continuous-time random walks and ergodic problems

● Quantum Thermodynamics : Thermalization and Fluctuations, Sep. 27–30, (Kyoto Univ.)

Atushi Tanaka: Complete population inversion of Bose particles by an adiabatic cycle: an example of exotic quantum holonomy

3) 学会誌等

田中篤司, 全卓樹: 新奇な量子ホロノミー — 断熱サイクルで変わらないこと, 変わること —, 日本物理学会誌 **72** (2017) 240–245.

4) 著書等

Atushi Tanaka and Taksu Cheon: Path topology dependence of adiabatic time evolution, in *Functional Analysis and Operator Theory for Quantum Physics*, eds. J. Dittrich, H. Kovarik and A. Laptev (EMS Publ. House, 2017) 531–542.

量子凝縮系理論研究室

1. 研究活動の概要

1) ODC により閉じ込められたボーズ・フェルミ原子系の相図

冷却原子の閉じ込めは、実験的にはポテンシャルを用いて行なわれるが、近年、光格子の強度を空間的に変化させて、ホッピングエネルギーを小さくする領域を作ることでその領域内に原子を閉じ込める方法 (ODC) が理論的に提案された。この閉じ込め方法の利点は、広い領域でモット転移を観測できるというところにある。(ポテンシャルによる閉じ込めでは、空間的に限られた領域にしかモット状態が実現できない。) これに対し本研究では、ODC によりボーズ・フェルミ混合原子系が閉じ込められているという系を想定し、量子モンテカルロ法を用いてモット状態の研究を行なった。原子間相互作用をパラメータとして相図を描き、新しい種類のモット状態についても議論した。[森]

2) スピン軌道相互作用を持つボーズ原子系に導入したフェルミ原子のスピン流の制御方法に関する理論研究

冷却原子系に対して人工的にスピン軌道相互作用を作成することが可能になった。スピン軌道相互作用の種類を適切に選ぶと、スピン自由度のあるボーズ原子にはスパイラル磁気構造が現れることがすでに指摘されていた。この系にやはりスピン自由度を持つフェルミ原子を共存させることで、フェルミ原子のスピン流が生じると考え、さらにその流れを外部パラメータ (レーザーの強度や波数) を使って制御できる点を理論的に追求した。[森]

3) 光格子中ボーズ・フェルミ混合系の相図と素励起

光格子中ボーズ・フェルミ混合系盛んに研究されている。統計性が異なる2種の原子が混在することで新奇現象が期待されるが、その解析は十分に進んでいるとは言いがたい。本研究では多様なパラメータでの解析のためにグッツウィラー近似を用いて量子相をしらべ、ボーズ原子が超流動状態にあり、フェルミ原子が金属状態にある相といった新しい相を発見した。また、それぞれ相からの励起スペクトルを解析した。[荒畑]

4) ボーズ原子気体超流動における量子渦格子の発生機構

量子渦は超流動特有の位相欠陥であり、超流動の性質をよく反映することから、理論、実験の両面から盛んに研究されている。非常縮体の重要性については、2001年にJILAの実験グループより非凝縮体を回転させてから凝縮する温度まで冷却することにより、効率的に量子渦を生成できることが報告されている。本研究では、Bose 原子気体における量子渦形成について凝縮体と非常縮体を同時に扱うことの出来る理論を用いて数値シミュレーションを行った。蒸発冷却の過程で回転している非凝縮体が渦格子生成に与える影響について明らかにした。[荒畑]

5) スピンアイスに対する希釈効果の解析的数値的研究

希土類化合物 $R_2Ti_2O_7$ ($R=Dy, Ho$) などの所謂スピニア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欠陥のもつ性質に起因した興味深い現象が報告され注目されている。本研究ではスピニアイスの磁性イオンを Y などの非磁性イオンで希釈したランダム磁性体の性質を解析的数値的に調べ、特に $(R_{1-x}Y_x)_2Ti_2O_7$ に関する実験により見出された残留エントロピーの非自明な希釈濃度 (x) 依存性を議論した。理論模型である希釈された最近接相互作用模型に対して Bethe 近似を用いた解析を行ない、欠陥濃度、比熱、帯磁率などの温度依存性や希釈濃度依存性を明らかにした。また同ランダムスピン系に対し効率的な Monte-Carlo(MC) 法を考案し、それを用いて各種熱力学

量を数値的に求め、解析結果と比較することで Bethe 近似の評価を行った。その結果、Bethe 近似は温度および希釈濃度の広範囲にわたり MC 法による数値データと極めて近い結果を与えること、評価した残留エントロピーの濃度依存性が実験データをよく再現することなどが明らかとなった。さらに希釈効果がスピンの基底状態に対しても、所謂協力的常磁性状態から通常の常磁性状態へのクロスオーバーをもたらすことなどを見出した。尚、関連論文が最近出版された [Phys. Rev. E 97, 042132 (2018)]. [大塚, 岡部豊, K. Nefedev (極東連邦大)]

6) 二次元古典格子模型の相関関数の普遍性に関する研究

二次元古典格子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等方的な相関長を持つ Ornstein-Zernike 型の関数形を用いた解析がなされてきたが、実際の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。これに関連して Fujimoto は可解模型に関する転送行列による解析を基礎に 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。それによると非常に広範な二次元古典格子模型の相関関数は、振幅、相関長、異方性パラメタの3つの量を用いて普遍的に特徴づけられる。これまでの一連の研究にて正方格子、三角格子および六角格子上のポッツ模型を中心に XY 模型やパーコレーション模型など可解でないだけでなく転送行列を用いた定式化ができない模型も含め網羅的に相関関数の漸近的振る舞いを数値計算により精密に調べてきたが、おおむね普遍的な振る舞いを確認することができた。現在、これらの成果を論文としてまとめている。 [大塚, 藤本雅文 (奈良医大)]

2. 研究業績

1) 論文

R. Sakamoto, Y. Ono, R. Hatsuda, K. Shiina, E. Arahata, and H. Mori: Ground State of Bosons in BoseFermi Mixture with SpinOrbit Coupling, J. Phys. Soc. Jpn. 86, 075003 (2017).

S. Suga, K. Shiina, and H. Mori: Interaction Effects on Phase Stiffness in BoseFermi Mixture Systems, J. Phys. Soc. Jpn. 86, 054002 (2017).

2) 学会講演

● 日本物理学会 2017 年秋季大会 2017 年 9 月 21 - 24 日岩手大学 上田キャンパス

初田黎, 小野洋輔, 坂本良平, 荒畑恵美子, 森弘之: 「三次元光格子中ボーズ・フェルミ混合原子系の基底状態及び励起状態の解明」

坂本良平, 小野洋輔, 初田黎, 椎名拳太, 荒畑恵美子, 森弘之: 「スピン軌道相互作用を持つ Bose-Fermi 混合原子系に誘起された Fermi 原子のスピン流 II」

椎名拳太, 初田黎, 小野洋輔, 坂本良平, 荒畑恵美子, 森弘之: 「ODC トラップ下でのボーズ・フェルミ混合系モット状態の解析」

藤本雅文, 大塚博巳: 「古典 XY 模型における二点相関関数: 代数曲線を用いた解析」

● 日本物理学会 第 73 回年次大会 2018 年 3 月 22-25 日 東京理科大学 野田キャンパス

坂本良平, 土川航太, 荒畑恵美子, 森弘之: 「スピン軌道相互作用を持つ Fermi 原子系のスピン流」

椎名拳太, 荒畑恵美子, 森弘之: 「ODC トラップ下での Bose-Fermi 混合系の解析」

荒畑恵美子, 二国徹郎: 「回転する Bose 原子気体の蒸発冷却シミュレーション」

藤本雅文, 大塚博巳: 「代数曲線を用いた格子模型の臨界現象の解析 II」

国際会議

●28th International Conference on Low Temperature Physics, 9-16 August/2017

E. Arahata, T. Nikuni: Formation of vortex lattices in superfluid bose gases at finite temperatures

R. Sakamoto, Y. Ono, R. Hatsuda, E. Arahata, Mori H. : Spin current of fermions induced in spin-orbit coupled Bose-Fermi mixture

Y. Ono, R. Sakamoto, R. Hatsuda, E. Arahata, H. Mori: Sound propagation and density response in a Bose-Fermi mixture superfluid at finite temperatures

R. Hatsuda, R. Sakamoto, Y. Ono, H. Mori, E. Arahata: Quantum Phases and Excitation in Bose-Fermi Mixtures in a Three-Dimensional Optical Lattice

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。2017年度の研究室構成は、常勤教員2名、連携客員准教授1名、客員教授1名、大学院生8名、卒研3名であった。以下は、2017年度に行った主な研究の概要である。

1) Nd系における2チャンネル近藤効果

1980年、NozièresとBlandinは、1つの不純物スピンを複数のチャンネルの伝導電子が過剰に遮蔽するとき、非フェルミ液体状態が生じ、物理量の温度依存性に低温でさまざまな異常が現れる可能性を指摘した。1987年、Coxは、四極子自由度を巧みに利用して、 Γ_3 基底状態をもつ立方晶U系化合物において2チャンネル近藤効果が実際に起こることを示した。その後、U系からPr系へと対象物質は広がり、 f^2 系を舞台に2チャンネル四極子近藤効果の研究が盛んに行われてきた。

四極子自由度を利用するCoxのアイデアは秀逸であるが、NozièresとBlandinが考えた磁気的な2チャンネル近藤効果は、実際の系では見つからないのだろうか、という素朴な疑問が残る。また、 f^2 系で Γ_3 基底状態をもつ物質だけでなく、他にも対象物質を広げることができれば、2チャンネル近藤効果の研究がさらに進むことが期待される。

そこで、本研究では、 Γ_8 伝導電子と混成する7軌道アンダーソンモデルを数値繰り込み群法によって先入観なく解析することにした。今の場合、局所 f 電子数 n を1から13まで自由に変えることができるが、対応する希土類イオンにおけるクーロン相互作用やスピン・軌道相互作用の値を用い、結晶場ポテンシャルをパラメータとして考えた。モデルの妥当性を確認するために、まず、 Pr^{3+} イオンを念頭に、 $n=2$ の場合を調べた。その結果、Coxの指摘どおり、 Γ_3 基底状態の場合に残留エントロピー $\log \sqrt{2}$ が現れ、2チャンネル近藤効果が生じることを確認した。 $j-j$ 結合描像に基づいて考えると、 Γ_3 状態は Γ_7 と Γ_8 軌道をまたぐ2種類の一重項から成り、その縮退は Γ_8 状態の軌道自由度に由来していることがわかり、軌道(四極子)近藤効果が起こることになる。 $n=2$ の結果からモデルは妥当であると考え、電子数をさまざまに変えて計算を続行した。その結果、 Nd^{3+} イオンに対応する $n=3$ で、 Γ_6 基底状態の場合に、2チャンネル近藤効果が現れることを発見した。再び $j-j$ 結合描像に基づいて考えると、 Γ_6 状態は、 f^2 の Γ_3 状態に Γ_8 電子を1つ付け加えた形をしており、 Γ_8 伝導電子との混成を考えると、 Γ_7 電子の磁気モーメントを Γ_8 の2種類のチャンネルの伝導電子が遮蔽する形になる。これはまさに、NozièresとBlandinが最初に考えた磁気的な2チャンネル近藤効果になっている。今後、Ndを含む1-2-20系でこのような磁気的な2チャンネル近藤効果が観測される可能性が期待される。

2) BiS_2 系層状超伝導体における非磁性不純物効果

BiS_2 系層状超伝導体は、2012年に水口らによって発見された新規超伝導物質である。母物質である LaOBiS_2 は、伝導層の BiS_2 層とブロック層の LaO 層が交互に積み重なってできた絶縁体であるが、OをFに置換することで BiS_2 層に電子がドーピングされ、超伝導が発現する。このような層状構造は、高い超伝導転移温度が発見されている超伝導体の特徴であり、 BiS_2 系層状超伝導体の超伝導発現機構に興味を持たれている。 BiS_2 系層状超伝導体の超伝導ギャップ対称性を巡っては、フェルミ面上で超伝導ギャップにノードが存在しないs波であるという磁場侵入長や熱伝導度の実験結果がある一方、角度分解光電

子分光によるギャップの測定では、フェルミ面上にノードがある可能性が示唆されている。そこで、これら一見矛盾する実験結果について、引力相互作用を仮定したBCSモデルの範囲で、非磁性不純物効果の観点から理論的な考察を試みた。

超伝導状態における非磁性不純物の影響を自己無撞着T行列近似で扱い、BiS₂系層状超伝導体のモデルフェルミ面に対して、ノードがある拡張s波とノードがないd波のそれぞれに場合に、状態密度、核磁気緩和率、超伝導電子密度を計算した。不純物がないときは、エネルギーをEとすると、拡張s波の状態密度はE=0付近でEに比例し、d波の状態密度は単純なs波と同じく、ギャップの開いたものになる。非磁性不純物を入れると、拡張s波の場合もd波の場合も、E=0付近に残留状態密度が生じ、不純物濃度の増加とともにその値が増えることを見出した。超伝導電子密度や核磁気緩和率を計算した結果、ギャップにノードがある場合でも、非磁性不純物散乱によって物理量の温度依存性がs波のように見えるので、それによって矛盾が解消される可能性を指摘した。ノードがない場合、今のフェルミ面構造だとs波だけでなくd波の可能性もあるが、それらは、非磁性不純物効果によって区別できる可能性を指摘した。

3) 強四極子秩序における磁場誘起相互作用

最近PrTi₂Al₂₀において発見された強四極子秩序状態について、東京大学物性研究所の実験グループと連携し解析を行った。通常、四極子の強軌道秩序は磁場Hによって特定の成分が誘起される。これまで、PrTi₂Al₂₀においては強四極子秩序変数は $2z^2 - x^2 - y^2$ 型のものと思われており、この秩序変数をH=0の時の秩序と仮定するとz方向の磁場でその成分が誘起され、強四極子転移は消失しクロスオーバーに変わる。しかし、最近の実験からはH=2Tにおいて明確な一次転移が観測され、低磁場における詳細な帯磁率の温度依存性の解析から低磁場での秩序変数は $x^2 - y^2$ 型に近いことが明らかになった。しかしながら従来の強四極子転移の理論からは $x^2 - y^2$ 型の強四極子状態が安定になることは説明できなかった。そこで、対称性の考察から磁場下で許される四極子間の有効相互作用を全て書き下し整理すると、磁場Hについて $2z^2 - x^2 - y^2$ 型の強四極子を誘起する項と同じ次数の異方的な相互作用が現れることを見出した。この磁場誘起四極子間相互作用を考慮し、ランダウ理論と結晶場状態を考慮した平均場近似で解析を行ったところ、実験で得られている帯磁率の温度依存性や磁場方向依存性、及び磁場温度相図について定性的に満足できる結果を得た。

4) 拡張近藤格子模型の多重相図

f電子系の強相関電子物質では、局在したf電子と交換相互作用する伝導電子が織りなす低温物性に多彩な秩序相が現れ、今日まで盛んに研究がなされてきた。典型的に用いられる模型は近藤格子モデルと呼ばれており、同一格子点においてf電子スピン自由度と伝導電子が交換相互作用するものである。相互作用に近接格子点も含めた場合（拡張近藤格子モデル）の解析はこれまで行われてこなかったが、先行研究において、拡張近藤格子モデルの平均場近似による解析がなされた。そこでは有限の軌道角運動量を持つ近藤一重項状態が提案され、有効質量の異方性や異常ホール効果などの興味深い現象が提案された。

本研究では、先行研究の解析をもう一步進め、秩序状態の内部の相構造を明らかにした。先行研究で議論された相は秩序状態のうちの高温相に当たるものであり、自己無撞着な平均場方程式の解としては低温で不安定であることが見出された。新たに実現する秩序相は複数あり、その現れ方は伝導電子の数密度や結合定数の大きさに依存する。その中でも特に興味深い相が二つあり、一つは空間反転対称性を破る相である。この相ではs波・p波・d波の近藤一重項が共存することで系の反転対称性を破っており、電気磁気効果などが期待される。二つ目は空間反転に加え時間反転対称性も破る相である。ここでは上述のp波の近藤一重項が複素表現 $p_x + ip_y$ の形をとり時間反転対称性を破っており、異常ホール効果などの応答が期待され、今後のさらなる研究の活性化が期待できる。

2. 研究業績

1) 論文

Takashi Hotta: “Two-Channel Kondo Effect Emerging from Nd Ions”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **86** (2017) 083704-1-4.

Kazumasa Hattori, Takuya Nomoto, Takashi Hotta, and Hiroaki Ikeda: “Local Nodal Cooper Pairs in Multiorbital Systems”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **86** (2017) 113702-1-5.

Ryosuke Yamamura and Takashi Hotta: “Mean-field theory for multipole ordering in f -electron systems on the basis of a j - j coupling scheme”, *Physica B* **536C** (2018) 6-11.

Takashi Hotta: “Kondo effect in the seven-orbital Anderson model hybridized with Γ_8 conduction electrons”, *Physica B* **536C** (2018) 203-210.

Katsunori Kubo and Takashi Hotta: “Multipole interactions of Γ_3 non-Kramers doublet systems on cubic lattices”, *J. Phys.: Conf. Series* **969** (2018) 012096-1-6.

2) 学会講演

● 日本物理学会 2017 年秋季大会 2017 年 9 月 21 日 (木) – 24 日 (日) (岩手大学上田キャンパス)

山村諒祐, 堀田貴嗣: スピン・軌道相互作用のある 7 軌道ハバードモデルに基づく多極子秩序状態の解析

堀田貴嗣: Nd 系の 2 チャンネル近藤効果

● 日本物理学会 2018 年第 73 回年次大会 2018 年 3 月 22 日 (木) – 25 日 (日) (東京理科大学野田キャンパス)

堀田貴嗣: 重希土類系の 2 チャンネル近藤効果

鈴木浩平, 服部一匡: 軌道秩序に対する磁場誘起異方的 RKKY 相互作用の効果

谷口貴紀, 武田晃, 瀧川仁, 中村翔太, 榊原俊郎, 服部一匡, 辻本真規, 酒井明人, 松本洋介, 中辻知: NMR と磁化測定による $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ の四極子相図

山村諒祐, 堀田貴嗣: j - j 結合描像に基づく Pr 化合物の四極子秩序状態の解析

● 新学術領域 J-Physics トピカルミーティング「局在多極子と伝導電子の相関による新現象」2017 年 4 月 17 日 (月) – 18 日 (火) 東京大学物性研究所

服部一匡: Quadrupole physics in 3d-XY model with Z_3 anisotropy

● 新学術領域 J-Physics トピカルミーティング「強相関多極子系の超伝導: f と d の共通項を探る」2017 年 5 月 11 日 (木) – 12 日 (金) 東北大学金属材料研究所

服部一匡: シングulaiオン異方性をもつ $S = 1$ 一次元近藤格子模型の横磁場中相図

● 新学術領域 J-Physics トピカルミーティング「Exotic Phenomena in Itinerant Multipole Systems」2017 年 12 月 18 日 (月) 東京大学物性研究所

服部一匡: Effects of magnetic fields on ferro-quadrupole orders

● 新学術領域 J-Physics 「平成 29 年度領域全体会議」2018 年 3 月 15 日（木）– 3 月 17 日（土）東京大学物性研究所

服部一匡 : Anisotropic quadrupole RKKY interactions under magnetic fields: ferro quadrupole order in $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$

国際会議

● International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2017), 2017 年 7 月 17 日（月）– 21 日（金）プラハ, チェコ

Takashi Hotta: Kondo Effect in the Seven-Orbital Anderson Model Hybridized with Γ_8 Conduction Electrons

Ryosuke Yamamura and Takashi Hotta: Mean-field theory for multipole ordering in f -electron systems on the basis of a j - j coupling scheme

● The 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28), 2017 年 8 月 9 日（水）– 16 日（水）イエーテボリ, スウェーデン

Katsunori Kubo and Takashi Hotta: Multipole interactions of Γ_3 non-Kramers doublet systems on cubic lattices

● J-Physics 2017 International Workshop on Multipole Physics and Related Phenomena, 2017 年 9 月 24 日（日）– 28 日（木）八幡平ロイヤルホテル, 岩手

Kohei Suzuki and Kazumasa Hattori: Ground-state phase diagram of the $S = 1$ one-dimensional lattice model with a uniaxial anisotropy under transverse field

Ryosuke Yamamura and Takashi Hotta: Mean-field phase diagram for multipole ordering in f^2 -electron systems on the basis of a j - j coupling scheme

Kazumasa Hattori: Magnetic-field induced interactions in $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$

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

高エネルギー加速器研究機構の電子・陽電子衝突型加速器 Super-KEKB を用いたスーパー B ファクトリー実験 Belle II に参加をしている。Super-KEKB では前身の KEKB 加速器の 40 倍のルミノシティ (ビームの輝度) を目指しており、Belle II 実験では Belle 実験と比較して単位時間当たり 40 倍の大量の B 中間子の崩壊を用いて、標準模型を超える新しい物理の探索を行う。

本研究室では、Belle II 実験のための粒子識別装置 Aerogel RICH (ARICH) 検出器の開発を行ってきた。ARICH は、リングイメージング型のチェレンコフ検出器であり、シリカエアロゲル輻射体および光検出器 HAPD (Hybrid Avalanche Photo Detector) で構成される。本研究室ではとくに HAPD およびその読み出し・制御システムの開発にこれまで取り組んできた。今年度は、全ての HAPD を ARICH 検出器にインストールし、さらに本研究室で開発した LED を用いたモニターシステムのインストールを行った。HAPD に印加する高電圧電源の検査およびインストールも並行して行い、高電圧電源から全ての HAPD に高電圧印加が出来ること、およびモニターシステムを用いて HAPD が正しく動作することを確認した後、9月に ARICH 検出器の Belle II 検出器へインストールを行った。その後宇宙線ミュオンを用いた検出器の動作確認を経て、Belle II 実験は 2018 年 2 月よりビームを用いたコミッショニングが開始された。

2) DCBA 実験

ニュートリノは電荷を持たない素粒子であり、粒子と反粒子の区別があるのか分かっていない。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) に基づく実験装置の開発を進めている。本年度は、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す実験装置のプロトタイプとして位置づけられる実験装置 DCBA-T3 の開発に取り組んだ。DCBA-T3 で用いられる飛跡検出器およびその読み出しエレクトロニクスの動作を確認するために、二重ベータ崩壊実験で用いる予定の He(85%) + CO₂(15%) ガスと並行して、放射線検出器に広く用いられている Ar(90%) + CH₄(10%) ガスを用いて宇宙線信号の取得を行った。Ar(90%) + CH₄(10%) ガスを用いた測定では、飛跡検出器および読み出しエレクトロニクスが正しく動作することを確認し、ガス中での電子のドリフト速度の印加電圧依存性が、先行研究で知られている値と矛盾がないことを確かめた。He(85%) + CO₂(15%) ガスを用いた測定においても、信号が小さいながらも飛跡を確認することができた。

3) T2K 実験, E61 実験

本研究室では T2K(Tokai to Kamioka) 実験に参加している。T2K 実験は、茨城県東海村の大強度陽子加速器 (J-PARC 加速器) を用いて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ニュートリノを観測する、長基線ニュートリノ振動実験である。現在 T2K 実験では、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、従来のレプトン数 1 をもつニュートリノを用いたニュートリノ振動実験に加え、レプトン数 -1 をもつ反ニュートリノを用いたニュートリノ振動実験も行なっている。本研究室では、ニュートリノを生成するためのビームライン機器の研究開発を行うグループに現在参加している。

本年度は、一次陽子ビームをニュートリノ生成ターゲットに導くためのビーム位置モニターの位置分解能を調べ、その改良に取り組んだ。位置分解能の測定においては、最下流部のモニターを除いて 0.1mm より充分良い位置分解能を持つことを確認した。最下流部のモニターについては、デジタルフィルターを用いた位置分解能の向上に取り組み、位置分解能が向上することを確認した。

本研究室では、将来的なニュートリノの CP 対称性の破れの発見を目指し、ニュートリノ反応の不定性を削減するための新たな実験 J-PARC E61 にも参加している。E61 実験では、ニュートリノビームのエネルギーがオフ軸角に依存する性質を用いて、可動型の検出器を開発し、オフ軸角を変えながら水とニュートリノとの反応のエネルギー依存性を測定する計画である。本年度は、E61 実験の光電子増倍管で用いる高電圧システムの開発に着手した。

4) 宇宙線ミュオンを用いた原子炉と火山の透視

高エネルギー加速器研究機構および筑波大学と共同で、宇宙線ミュオンを用いて原子炉を透視し、炉心の状態を調べる研究を行なっている。国際廃炉研究機構および東京電力が行なっている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。これまでに、福島第一原発 1 号機および 2 号機の炉心の状態の調査を行なってきた。

本年度は、エレクトロニクスの改良により放射線耐性を高めた検出器を用いて、福島第一原発 3 号機の透視を行った。検出器周辺の放射線環境 (0.5mSv/h) の下で、ガンマ線の影響を受けずにミュオンを観測できることを確認した。3 号機の観測では、5 月から 9 月にかけて 121 日間データ収集を行った。その結果、2 号機と比較して多くの核燃料が圧力容器のさらに下に溶解していることが分かった。この結果は、同時期に行われた遠隔操作ロボットによる格納容器内部調査と矛盾のない結果である。本観測をもって、宇宙線ミュオンを用いた福島第一原発の一連の調査は終了した。

また、原子炉の観測と並行して、岩手県立大学などと共同で岩手山の観測を進めている。岩手山は、近年火山活動の兆候が見られた時期があり、現在岩手県立大学などが中心となり、様々な手法を取り入れた観測体制が構築されつつある。その一環として、岩手山を透過してくる宇宙線ミュオンの観測を、昨年度 10 月より行なっている。その結果、山体を貫く厚さが 1km を超えるような場合には観測が困難であることが分かってきた。今年度は、宇宙線の運動量情報を用いて山体の透視を行う新しい装置を開発し、筑波山を観測対象として実証実験を行った。その結果、これまで観測結果のない水平に近い天頂角 82 度におけるミュオンの運動量分布を測定し、高運動量のミュオンを選別することで、約 0.75km 程度の厚さの山体まで正しく密度を見積もることができることを確認した。

5) Double Chooz 実験

本研究室はフランス・Chooz 原子力発電所にて行われている国際共同実験 Double Chooz に参加している。原子炉コアから飛来する反電子ニュートリノの振動現象を前置と後置の 2 基の検出器で精度よく観測して、ニュートリノの基本的性質を担う混合角 θ_{13} の精密測定を行うことを目的とする実験である。近年、Double Chooz 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発見され、ニュートリノの CP 対称性の破れ測定への道が拓かれた。その CP 対称性の破れの早期発見には正確かつ精密な θ_{13} 測定が重要なインプットとなるため、本実験はこれまで

以上の高精度測定化に取り組んでいる。本年度は、2011年4月から稼働開始した検出器により十分な統計量を蓄積することに成功したため、物理データ測定を終えるという節目の年となった。昨年までに取得された検出器2基のデータを用いた振動解析結果の論文へのとりまとめや新しく測定されたデータ解析などが進められた。また、ターゲット陽子数の不定性に由来する検出効率の系統誤差を抑制するため、実験装置解体の際に検出器の体積を詳細に測定する方法とその手順の検討が行われた。今後、究極的に抑制された系統誤差と全データを用いた Double Chooz 実験の最終結果の公表が見込まれる。

6) ATLAS 実験

今年度より、ヨーロッパ原子核研究機構 (CERN) の世界最大エネルギーを生成する陽子衝突型加速器 LHC で行われている ATLAS 実験に参加している。ATLAS 実験では、2012年にヒッグス粒子を発見し、現在は重心系エネルギー 13TeV で、ヒッグス粒子の精密実験と、超対称性理論などの標準模型を超えた新物理の探索を行っている。

今後は、2021年に計画されている、重心系エネルギー 14TeV での実験と、2026年に計画されている高ルミノシティでの実験 (HL-LHC) に向けて、検出装置のアップグレードを行っていく。

7) ポジトロニウムの5光子崩壊過程の研究

^{22}Na 線源から放出される陽電子を利用して、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。昨年度行った検出器の改良の後、2017年1月からデータ収集を開始し、現在までに、2イベントの5光子崩壊事象候補を検出した。

今後は、データ収集を継続すると共に、モンテカルロシミュレーションによるバックグラウンドの見積もりを行っていく。

8) レーザーと電子ビーム衝突による非線形コンプトン散乱の研究

米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) において、炭酸ガスレーザー (波長 $10.6\mu\text{m}$) と 60MeV の電子ビームのコンプトン散乱による X 線生成実験を行ってきた。ピーク・パワー TW 領域のレーザーを使用すると、高次 QED 過程 (多光子吸収 1 光子放出) である非線形コンプトン散乱の確率が大きくなる。人工多層膜結晶を利用した X 線スペクトロメータを開発し、生成 X 線のエネルギー分布を測定した。非線形コンプトン散乱の特徴である、コンプトンエッジが鈍くなり、エネルギーがシフトする現象を確認した。

2. 研究業績

1) 論文

Behaviour of Belle II ARICH Hybrid Avalanche Photo-Detector in magnetic field

H. Kindo *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A876 (2017) 269-271

The aerogel Ring Imaging Cherenkov system at the Belle II spectrometer

R. Pestotnik *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A876 (2017) 265-268

Development of the ARICH monitor system for the Belle II experiment

K. Hataya *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A876 (2017) 176-180

Development of slow control system for the Belle II ARICH counter

M. Yonenaga *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A876 (2017) 241-245

- Recent developments in software for the Belle II aerogel RICH
L. Santelj *et al.*, Nucl.Instrum.Meth. A876 (2017) 104-107
- Test of the HAPD light sensor for the Belle II Aerogel RICH
Y. Yusa *et al.*, Nucl.Instrum.Meth. A876 (2017) 129-132
- Construction of silica aerogel radiator system for Belle II RICH Counter
I. Adachi *et al.*, Nucl.Instrum.Meth. A876 (2017) 129-132
- Study of K_S^0 pair production in single-tag two-photon collisions
M. Yasda *et al.*, (Belle Collaboration), Phys.Rev. D97 (2018) no.5, 052003
- Measurement of branching fractions of hadronic decays of the Ω_C^0 baryon
J. Yelton *et al.*, (Belle Collaboration), Phys.Rev. D97 (2018) no.3, 032001
- Search for CP violation in the $D^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$ decay at Belle
V. Babu *et al.*, (Belle Collaboration), Phys.Rev. D97 (2018) no.1, 011101
- Observation of Excited Ω_C Charmed Baryons in e^+e^- Collisions
J. Yelton *et al.*, (Belle Collaboration), Phys.Rev. D97 (2018) no.5, 051102
- Search for light tetraquark states in $\Upsilon(1S)$ and $\Upsilon(2S)$ decays
S. Jia *et al.*, (Belle Collaboration), Phys.Rev. D96 (2017) no.11, 112002
- Measurements of the absolute branching fractions of $B^+ \rightarrow X_{cc}K^+$ and $B^+ \rightarrow \bar{D}^{(0)}\pi^+$ at Belle
Y. Kato *et al.*, (Belle Collaboration), Phys.Rev. D97 (2018) no.1, 012005
- Measurement of the τ lepton polarization and $R(D^*)$ in the decay $\bar{B} \rightarrow D^*\tau^-\bar{\nu}_\tau$ with one-prong hadronic τ decays at Belle
S. Hirose *et al.*, (Belle Collaboration), Phys.Rev. D97 (2018) no.1, 012004
- Angular analysis of the $e^+e^- \rightarrow D^{(*)\pm}D^\mp$ process near the open charm threshold using initial-state radiation
V. Zhukova *et al.*, (Belle Collaboration), Phys.Rev. D97 (2018) no.1, 012002
- Study of η and dipion transitions in $\Upsilon(4S)$ decays to lower bottomonia
E. Guido *et al.*, (Belle Collaboration), Phys.Rev. D96 (2017) no.5, 052005
- Evidence for Isospin Violation and Measurement of CP Asymmetries in $B \rightarrow K^*(892)\gamma$
T. Horiguchi *et al.*, (Belle Collaboration), Phys.Rev.Lett. 119 (2017) no.19, 191802
- Search for $\Lambda_c^+ \rightarrow \phi p\pi^0$ and branching fraction measurement of $\Lambda_c^+ \rightarrow K^-\pi^+p\pi^0$
B. Pal *et al.*, (Belle Collaboration), Phys.Rev. D96 (2017) no.5, 051102
- Invariant-mass and fractional-energy dependence of inclusive production of di-hadrons in e^+e^- annihilation at $\sqrt{s} = 10.58$ GeV
R. Seidl *et al.*, (Belle Collaboration), Phys.Rev. D96 (2017) no.3, 032005
- Search for CP Violation and Measurement of the Branching Fraction in the Decay $D^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0$
N. Dash *et al.*, (Belle Collaboration), Phys.Rev.Lett. 119 (2017) no.17, 171801

Measurement of the branching fraction and CP asymmetry in $B^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$ decays, and an improved constraint on ϕ_2

T. Julius *et al.*, (Belle Collaboration), Phys.Rev. D96 (2017) no.3, 032007

Observation of an alternative $\chi_{c0}(2P)$ candidate in $e^+e^- \rightarrow J/\psi D\bar{D}$

K. Chilikin *et al.*, (Belle Collaboration), Phys.Rev. D95 (2017) 112003

Novel event classification based on spectral analysis of scintillation waveforms in Double Chooz

T. Abrahao *et al.*, (Double Chooz Collaboration), JINST 13 (2018) no.01, P01031

Performance of the drift chamber beta-ray momentum analyzer for double beta decay experiments

N. Ishihara *et al.*, (DCBA Collaboration), PTEP 2017 (2017) no.7, 073H01

Measurement of the πK atom lifetime and the πK scattering length

B. Adeva *et al.*, (DIRAC Collaboration), Phys.Rev. D96 (2017) no.5, 052002

Single shot, double differential spectral measurements of inverse Compton scattering in the nonlinear regime

Y. Sakai *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 20 (2017) 060701

Integrated cosmic muon flux in the zenith angle range $0 < \cos\theta < 0.37$ for momentum threshold up to 11.6 GeV/c

H. Fujii *et al.*, PTEP 2017 (2017) no.12, 123C01

Detection of on-surface objects with an underground radiography detector system using cosmic-ray muons

H. Fujii *et al.*, PTEP 2017 (2017) no.5, 053C01

First measurement of the ν_μ charged-current cross section on a water target without pions in the final state

K. Abe *et al.* (T2K Collaboration), Phys.Rev. D97 (2018) no.1, 012001

Measurement of neutrino and antineutrino oscillations by the T2K experiment including a new additional sample of ν_e interactions at the far detector

K. Abe *et al.* (T2K Collaboration), Phys.Rev. D96 (2017) no.9, 092006

Measurement of $\bar{\nu}_\mu$ and ν_μ charged current inclusive cross sections and their ratio with the T2K off-axis near detector K. Abe *et al.* (T2K Collaboration), Phys.Rev. D96 (2017) no.5, 052001

Measurement of the single π^0 production rate in neutral current neutrino interactions on water

K. Abe *et al.* (T2K Collaboration), Phys.Rev. D97 (2018) no.3, 032002

Updated T2K measurements of muon neutrino and antineutrino disappearance using 1.5×10^{21} protons on target

K. Abe *et al.* (T2K Collaboration), Phys.Rev. D96 (2017) no.1, 011102

Search for Lorentz and CPT violation using sidereal time dependence of neutrino flavor transitions over a short baseline

K. Abe *et al.* (T2K Collaboration), Phys.Rev. D95 (2017) no.11, 111101

Neutron measurement during crushing of $LiNbO_3$ crystals in D_2 and H_2 atmospheres
M. Fujii *et al.*, Jpn. J. of Appl. Phys. 56 (2017) 117301-6

2) 学会講演

● 日本物理学会 2017 年秋季大会 2017 年 9 月 12～15 日 (宇都宮大学)

二重ベータ崩壊実験 DCBA-T3 の現状

吉岡輝昭, 住吉孝行, 角野秀一, 浜津良輔ほか

Belle II 実験 ARICH 検出器の組み立てと統合試験の現状

米永匡伸, 住吉孝行, 角野秀一, 汲田哲郎ほか

Belle II 実験 ARICH 検出器のモニターシステムの実装

野口光太, 住吉孝行, 角野秀一, 汲田哲郎ほか

T2K 実験における静電誘導型ビームモニターの位置分解能の検証と改良

佐々木慎之介, 角野秀一ほか

● 日本物理学会 第 73 回年次大会 2018 年 3 月 22～25 日 (東京理科大学野田キャンパス)

衝突実験に向けた Belle II ARICH 検出器のコミッショニング

米永匡伸, 住吉孝行, 角野秀一, 汲田哲郎ほか

Belle II 実験 ARICH 検出器のアライメント手法の開発

為近彩智, 住吉孝行, 角野秀一, 汲田哲郎ほか

改良型検出器を用いたポジトロニウム 5 光子崩壊事象の解析

吉川広陽, 汲田哲郎, 千葉雅美, 浜津良輔

国際会議

● 18th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Moscow State University, Moscow, Russia, August 24-30, 2017

T. Matsubara: Recent results from Double Chooz reactor neutrino experiment,

● International conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics 2017, Beijing, China, May 22-26, 2017

M. Yonenaga: Development of the Slow Control System for the Belle II ARICH counter

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, 静電場のみを用いて周回イオンの軌道制御を行うことで, 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分子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) 炭素分子負イオンの冷却速度・分光測定:

本年度も, 昨年度に続き星間空間における分子負イオンの内部エネルギー冷却過程を解明すべく, 直鎖状炭素分子負イオンを蓄積・レーザー励起して電子脱離や蛍光の測定を行ってきた. 特に電子励起後に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た分子のその後の冷却過程, 1) 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, 2) 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た場合に起こる電子脱離や解離, 3) 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), その後すぐに電子遷移によって蛍光を放出する『再帰蛍光』, それぞれについて, 重点的な研究を行っている.

再帰蛍光の直接測定実験では C_4^- および C_6^- を対象として, 特に近赤外線領域(波長 650-800 nm)の蛍光測定実験を中心に行った. 実験では静電型イオン蓄積リングに様々なサイズの炭素鎖分子負イオン $C_n^- (n: 3-6)$ を入射し, 蓄積イオンから放出される再帰蛍光を, 干渉フィルターにて波長選別した後に光電子増倍管で単一光子計数法により検出した. 測定の結果, C_4^- , C_6^- ともに近赤外領域において放出光子の増加が確認された. 低電子励起状態からの再帰蛍光放出の可能性も含め, 現在議論を進めている.

また, 炭素鎖分子負イオン C_4^- の二光子吸収過程を利用することで, 同分子の光吸収スペクトルを測定した. 得られたスペクトルはこれまでに報告されている電子励起状態と矛盾ない結果であった. さらに, 得られたスペクトルを用いて光吸収効率を規格化することで, 振動輻射冷却によって蓄積された C_4^- の内部エネルギー分布が変動していく様子を詳細に観測することに成功した. これから他のイオン種に対しても順次本手法を用いて内部エネルギー分布変化の観測を行う予定である.

上記に加え, 直鎖状と環状の二種類の構造異性体が存在すると考えられる炭素分子負イオン C_{10}^- や, 最もサイズの小さなアミノ酸であるグリシンの正イオンについての研究も昨年度に続き行った. C_{10}^- に対しては可視領域で任意波長の光パラメトリック発振レーザー光を照射し, 光吸収誘起の遅延電子脱離を観測した. その結果, 波長 550 nm 付近で電子脱離収量の増加が確認された. これまでに報告されている電子励起状態では説明できない遷移の可能性があり, 現在その正体を議論している. グリシン正イオンに対してはレーザー光吸収誘起の電子脱離過程を観測すべく, 紫外(266 nm)レーザー光をリング内に照射するための光学系を新たに導入した. 今後, 蓄積イオンに対する紫外レーザー合流実験を進める予定である.

(2) 装置・技術開発:

静電型イオン蓄積リングを用いた実験の高度化を目指し, 極低温冷却イオン源による極低内部エネルギーイオンビーム生成の技術開発を進めている. 本年度はイオン源全体の制作を行い, レーザーパツタ

法による炭素鎖分子負イオンの生成, 輸送の確認も行った. 今後, イオン源全体の動作試験, 性能評価を進める予定である.

2) 多価イオンの電荷移行反応

中性原子から複数の電子を剥ぎ取ることによって生成される多価イオンは, 高い内部エネルギーを有するために中性の物質とは非常に激しい反応を起こす. そのダイナミクスは原子衝突物理学の重要な研究対象であるが, 一方で, 重原子については多価イオンの原子分光学的データは非常に乏しく, 応用的な分野からの基礎データの要求に対して十分に答えられない状況が続いている. 本研究室では電子サイクロトロン共鳴 (ECR) 型多価イオン源を用いて C のような軽元素から Bi のような重元素まで, 様々な原子の多価イオンビームを生成して, 衝突ダイナミクスと原子分光という二つの立場での研究を推進している.

(1) 準安定ヘリウム様イオンの電荷移行反応:

ECR イオン源で生成されるヘリウム様イオンには準安定で ms 程度の長い寿命を持つ $1s2s\ ^3S_1$ 状態が数%程度含まれていることが知られている. この励起状態のイオンが中性気体標的と衝突して一電子移行反応によって生成する $1s2snl$ 状態は, Auger 電子を放出するのが主たる脱励起過程であることが自明である. しかしながら, 一光子を放出することで基底状態である $1s^22s\ ^2S_{1/2}$ に遷移する確率もゼロではない. 極端紫外領域の発光を観測する目的で O^{6+} と He の衝突実験を行った際に, 軟 X 線用の半導体検出器が 560 eV および 630 eV の発光を観測した. O^{6+} の一電子捕獲で生成する O^{+5} のイオン化エネルギーは 138 eV なので, この軟 X 線発光の正体は直ちには理解できなかった. しかし, 文献を調べたところ, $1s2s2p$ および $1s2s3p$ から $1s^22s$ への遷移に一致しており, 別のヘリウム様イオンである N^{5+} および C^{4+} を用いた実験でも同様な軟 X 線発光が観測されたことから, 準安定イオンの一電子捕獲に起因する発光であることが確認された. 同様な現象は 1990 年前後に Grenoble のグループが発見しているが, 定量的・系統的な研究は未だに成されていない. そこで, 様々な標的気体を用いた系統的な測定に着手した. この軟 X 線発光は, 太陽風に含まれている水素様多価イオンが中性粒子密度の高い領域に侵入した場合にヘリウム様, リチウム様と価数を下げる途中で発光すると考えられ, 惑星大気の新しい分析手法として利用される可能性がある.

(2) レート方程式に基づく電荷移行反応シミュレーション:

希薄な標的気体で満たされた衝突セル内部において, 一つのイオンは標的気体と 1 回以上は衝突しないとしても, イオンビーム内部の電子状態分布はセルの位置によって異なる. その影響で発光スペクトルが観測位置に依存すると考えられるが, 実際に観測可能なほどの大きな影響であるのかを確かめたことはなかった. そこで, 信頼できる電荷移行断面積の理論計算値が判っている衝突系について, 電子状態分布の時間変化を連立微分方程式によって記述して数値的に解くことで, 理論的に発光スペクトルを求めるプログラムを開発した. 理論的に求めた発光強度の絶対値と実測スペクトルを比較すると, 実効的な分光計測システムの検出感度を見積もることができる. 本研究室で用いている極端紫外用斜入射分光器では, 集光ミラーの立体角および反射率・回折格子の反射特性・CCD カメラの検出効率・スリットによる集光効率など, 単独では正確に見積もることが困難な実験的パラメーターが多い. しかし, 理論的なスペクトルとの比較では実効的な検出効率を一度に求めることが可能である. 理論計算を行った衝突系について予備的な実験を行い, 波長に依存する検出感度を求める見通しを付けることができた.

(3) 中性子星合体による重元素合成過程:

中性子星合体によって Fe よりも重い元素が合成されることを明らかにするため, 不足している多価重イオンの原子分光学的データを取得する共同研究を国立天文台・上智大・東邦大・電通大・核融合研と進めている. 当初から中性子星合体による重力波の検出に続いて光学的望遠鏡によって合体した天体を同定し, その発光スペクトルを観測する計画であったが, 2017 年 8 月 17 日に中性子星合体による重力

波が初めて観測され、 γ 線から電波までのあらゆる波長領域の電磁波が検出された。可視・赤外領域でも理論シミュレーションの予想に近い発光が観測され、重元素合成が確認されたと認識されている。しかし、重元素多価イオンの分光データが不足している状況は続いており、新しい理論計算値の精度を保証するためにも新しい実験が求められている。首都大で従来用いてきた分光計測システムの効率は低く実験が困難であったので、イオンビームと標的気体の衝突体積・観測立体角・光ファイバーの集光効率などを改善して、100-500倍の効率が期待できる装置を開発した。昨年度に予備実験を行った Er から開始して、様々な重元素実験を推進していく準備が整ったと言える。

(4) 分子標的におけるフラグメント原子イオンの発光：

—昨年の実験で、多価 Ta イオンと N_2 や O_2 を衝突させた際に、N 原子や O 原子の多価イオンからの発光が極端紫外線領域に初めて観測された。この現象の詳細を理解する目的で、多価 Xe イオンを用いた実験を行った。この研究は帰国留学生短期研究支援制度によって約2ヶ月もの間、招聘することができた Giorgi Vishapidze 博士 (Ilya State University, Georgia) にも参加してもらった。彼の簡単な理論シミュレーションによると、分子が解離して原子イオンが十分に離れてから発光すると考えるのが妥当であることが判った。直感から核間距離の短い準分子状態からの発光を期待していたが、現象は予想より単純であるらしい。しかし、励起状態の生成機構は未解明である。また、多価 Xe イオンを用いた場合でも、Ta イオンと同様なフラグメント原子イオンからの発光が観測され、今後も系統的な測定を共同研究として継続していく予定である。

3) 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継続している。昨年度までは NH_3 および ND_3 から電子衝撃によって生成した分子イオンについて系統的な測定を行ってきた。電子基底状態だけでなく準安定状態と思われる分子イオンのピークが観測される場合があったが、HとDではその様子が大きく異なった。この同位体効果を理解するためには精密な理論計算が必要であると考え、量子化学計算を専門とする分子物質化学専攻の中谷直輝准教授との共同研究をスタートさせた。また、新たな実験としては、常温で液体の CS_2 から電子衝撃によって CS_2^+ , CS^+ , および S^+ を生成して移動度測定を行う予定であったが、イオン源の度重なるトラブルによって今年度はデータ取得には至らなかった。年度末に復旧作業を行い、トラブルはほぼ解消したと思われるので、今後は新たな測定も進めていく。

2. 研究業績

1) 論文

M. Tanaka, D. Kato, G. Gaigalas, P. Rynkun, L. Radziute, S. Wanajo, Y. Sekiguchi, N. Nakamura, H. Tanuma, I. Murakami, and H. A. Sakaue: Properties of kilonovae from dynamical and post-merger ejecta of neutron star mergers, *Astrophys. J.* **852**, 109 (2018).

K. Takahashi, K. M. Moriya, S. Matoba, T. Koizumi, and H. Tanuma: Mobilities of Li^+ -attached butanol isomers in helium gas at 85.5 K, *Chem. Phys. Lett.* **691**, 258 (2017).

H. Tanuma, N. Numadate, Y. Uchikura, K. Shimada, T. Akutsu, E. Long, and G. O'Sullivan: EUV emission spectra in collisions of highly charged tantalum ions with nitrogen and oxygen molecules, *Nucl. Instr. Meth. B* **408**, 213 (2017).

N. Numadate, H. Shimaya, T. Ishida, K. Okada, N. Nakamura, and H. Tanuma: Solar wind charge

exchange in laboratory - Observation of forbidden X-ray transitions, *Nucl. Instr. Meth. B* **408**, 114 (2017).

2) 国際会議報告

M. Yoshida, T. Furukawa, J. Matsumoto, H. Tanuma, T. Azuma, H. Shiromaru, and K. Hansen: Detection of recurrent fluorescence photons emitted from C_4^- , *J. Phys. Conf. Series* **875**, 012017 (2017).

3) 学会講演

● 第 65 回質量分析総合討論会 2017 年 5 月 17 日～19 日 (つくば国際会議場エポカルつくば, つくば市)

田沼肇: 低温 He 気体中および大気中におけるイオン移動度 (基調講演)

● 原子衝突学会第 42 回年会 2017 年 9 月 8 日～9 日 (上智大学・四谷キャンパス)

栗山みさき, 古川武, 松本淳, 田沼肇, 東俊行, 城丸春夫: グリシン正イオンおよびフラグメントイオンの蓄積実験

沼館直樹, 内倉義届, 島田健人, 阿久津卓土, 田沼肇: 電荷移行にて生成した内殻励起 Li 様イオンの輻射による緩和過程

● 日本物理学会 2017 年秋季大会 2017 年 9 月 12 日～15 日 (宇都宮大学・峰キャンパス)

佐藤智哉, 市川雄一, 井上壮志, 内山愛子, A. Gladkov, 高峰愛子, 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, 吉永尚孝, 酒見泰寛, 旭耕一郎: 間欠帰還型能動核スピンメーザーの動作特性と環境応答

● 日本物理学会 2017 年秋季大会 2017 年 9 月 21 日～24 日 (岩手大学・上田キャンパス)

阿久津卓土, 沼館直樹, 島田健人, 山田陽平, 田沼肇, 中村信行, 関口雄一郎, 和南城伸也, 坂上裕之, 加藤大治, 村上泉, 田中雅臣: 中性子星合体による重元素合成の基礎研究としての多価イオン電荷交換分光

沼館直樹, 内倉義届, 島田健人, 阿久津卓土, 田沼肇: 準安定 He 様イオンの電子捕獲によって生成した内殻励起 Li 様イオンの軟 X 線放出

吉田菜生, 古川武, 松本淳, 田沼肇, 東俊行, 城丸春夫, Klavs Hansen: 炭素クラスター負イオン C_4^- および C_6^- のポアンカレ蛍光測定

栗山みさき, 古川武, 松本淳, 田沼肇, 東俊行, 城丸春夫: TMU E-ring におけるグリシン正イオンの蓄積実験

● 「原子分子過程研究と受動・能動分光計測の高度化のシナジー効果によるプラズマ科学の展開」「原子分子データ応用フォーラムセミナー」合同研究会 2017 年 12 月 20 日～22 日 (核融合科学研究所, 土岐市)

沼館直樹, 田沼肇: 準安定励起イオンの衝突過程

● 日本物理学会 2018 年年次大会 2018 年 3 月 22 日～25 日 (東京理科大学・野田キャンパス)

沼舘直樹, 島田健人, 山田陽平, 大那拓海, 内倉義届, 阿久津卓土, 田沼肇: 準安定 He 様イオンの電子捕獲によって生成した内殻励起 Li 様イオンの軟 X 線放出 II

島田健人, 沼舘直樹, 田沼肇: 多価イオン電荷交換分光におけるレート方程式を用いた発光スペクトル解析

矢田智昭, 今村慧, 富田英生, Volker Sonnenschein, 三條真, 藤田朋美, 小林航, 戸塚克, 土井一步, 小林徹, 高峰愛子, 涌井崇志, 古川武, 上野秀樹, 松尾由賀利: 超流動ヘリウム中 In 原子の偏極生成に向けたパルス Ti:Sa レーザーの開発

土井一步, 戸塚克, 小林航, 今村慧, 藤田朋美, 三條真, 矢田智昭, 高峰愛子, 涌井崇志, 古川武, 上野秀樹, 松尾由賀利: 超流動ヘリウム中の低収量核原子の核構造研究に向けた光学クライオスタットの改良

国際会議

● The 7th International Workshop on Electrostatic Storage Devices (ESD 2017), Lyon, France, 19–22 June, 2017

Naoko Kono: Inverse internal conversion of C_4^- (invited)

Sebastian Menk: ESI-Pretrap for RICE (invited)

● XX International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarms (EMS 2017), Magnetic Island, Australia, 22–24 July, 2017

Tatsuro Yamazaki, Kenta Mori, and Hajime Tanuma: Mobility of the ground and metastable ions in cooled helium gas (invited)

● The 30th International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC XXX), Cairns, Australia, 26 July–1 August, 2017

Mai Yoshida, Takeshi Furukawa, Jun Matsumoto, Hajime Tanuma, Toshiyuki Azuma, Haruo Shiromaru, and Klavs Hansen: Detection of recurrent fluorescence photons emitted from C_4^- (oral)

Naoki Numadate, Yoshiyuki Uchikura, Kento Shimada, Takuto Akutsu, and Hajime Tanuma: Competition between radiative and Auger decay processes of doubly excited Li-like C, N and O ions (poster)

Kento Shimada, Naoki Numadate, Yoshiyuki Uchikura, Takuto Akutsu, Ling Liu, Jian-guo Wang, and Hajime Tanuma: Time evolution of the population distribution in charge exchange collisions (poster)

Hiromasa Yanagase, Takeshi Furukawa, Hajime Tanuma, Haruo Shiromaru, Jun Matsumoto, and Toshiyuki Azuma: Development of a cryogenic linear RF ion trap for the TMU E-Ring (poster)

Ryuta Suzuki, Naoko Kono, Reito Andou, Takeshi Furukawa, Jun Matsumoto, Hajime Tanuma, Toshiyuki Azuma, Klavs Hansen, and Haruo Shiromaru: Vibrational radiative cooling of isolated C_4^- and C_6^- (poster)

● Ireland–Japan Collaboration Workshop, Dublin, Ireland, 3–4 November, 2017

Hajime Tanuma and Naoki Numadate: Radiative emissions from doubly excited lithium-like ions produced in charge-exchange collisions of meta-stable helium-like ions with neutral target gases (invited)

● The 7th Topical Conference of the Indian Society of Atomic and Molecular Physics (ISAMP TC7), Tirupati, India, 6–8 January, 2018

Hajime Tanuma, Naoki Numadate, Kento Shimada, Hirofumi Shimaya, Takuya Ishida, Takuma Kanda, Nobuyuki Nakamura, Kunihiro Okada, Ling Liu and Jianguo Wang: Laboratory experiments of solar wind charge exchange and related atomic processes (invited)

4) 学会誌等

城丸春夫, 古川武, 東俊行: 静電型イオン蓄積リングを用いた原子分子物理 (II) 輻射冷却の分子科学, 原子衝突学会誌「しょうとつ」, **15** (2), 26–39 (2018).

宇宙物理実験サブグループ

1. 研究活動の概要

「ひとみ」衛星による約1ヶ月の観測から得られたデータやハードウェア開発に関する論文投稿を進めた。X線天文代替機の設計や試験が始まり、本研究室もマイクロカロリメータ実験 Resolve の中心的なグループとして参加している。一方、銀河間物質探査を目指す Super 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線望遠鏡の開発や地上実験を進めた。

1) 銀河団や超新星残骸のX線観測研究

「ひとみ」のマイクロカロリメータ (SXS) は軌道上でエネルギー分解能 4.9 eV (FWHM at 5.9 keV) を達成した。立ち上げ時期にペルセウス座銀河団を 300 ksec 以上観測しており、銀河団の高温プラズマについて新たな制限を与えた。今年度はその科学成果を PASJ 特集号に、またハードウェア関連を JATIS の特集号へ、全体で 39 編の論文としてまとめた。「ひとみ」の結果のうち2つを下記に説明する。

第一がペルセウス座銀河団の Cr, Mn, Ni の存在量の正確な決定である。Cr, Mn は存在量が鉄の 1/100 ほどのため輝線が CCD 検出器ではほとんど見えない、また Ni 輝線は Fe 輝線との分離が不可能であった。「ひとみ」の観測の結果これらの元素の量はほぼ太陽組成に一致することが新たに分かった。それまでの太陽より3倍多いとする XMM-Newton 衛星の報告を修正する重要な結果である。これらの元素は主に Ia 型超新星で作られるため、この結果は銀河団中心領域という楕円銀河が多い領域が、我々の銀河系 (渦巻銀河) の太陽近傍と同じような化学進化を経てきたことを示している。Ia 型超新星の発生機構と宇宙の化学進化に再検討を迫る結果であるが、X線代替機 (XARM) により他の銀河団の元素組成の観測が重要である。なお本結果は 2017 年 11 月に Nature に出版され、JAXA から記者発表を行なった。

第二がペルセウス座銀河団のガスの運動の制限である。2016 年の Nature 論文では中心付近での乱流の視線速度が約 164 km/s であることを報告したが、それをデータ全体に拡張する結果を出した。3 分角 (65 kpc) 離れた領域のデータも解析に加えるとともに、X線望遠鏡のために領域間にデータが漏れこむ効果も解析に取り込むために、全領域の同時フィットを行なって、鉄輝線の幅 (乱流) と中心エネルギーの変化 (ガスの集団運動) に制限を与えた。その結果、全体として 100 km/s ほどのガスの集団運動があることと (図 1)、キャビティと呼ばれる領域で乱流が 200 km/s 近くに増加していることがわかった。首都大の一戸らが中心となってデータ解析と論文作成を進め PASJ 特集号へ出版された。

「ひとみ」のもたらしたサイエンスは、以下のようなものがあり、PASJ の「ひとみ」特集として出版されている。1) 共鳴散乱線による発生領域の構造の制限、2) 輝線だけを用いた温度構造や高温成分への制限、3) 原子物理と放射過程の様々な点からの見直し、4) 活動銀河 (NGC 1275) の巨大ブラックホール近くのガストラスからの中性鉄輝線の確認、5) 銀河団以外の天体について、放射過程や放射領域について高い輝線感度を利用した新たな制限。

「ひとみ」以外では、チャンドラ衛星を主に用いて若い超新星残骸の研究を行なった。Tycho, Kepler, Cas A について、輝線の幅やドップラーシフトの測定をもとに、膨張速度とその球対称性からのずれを評価し、爆発中心位置の推定を行った。また、Ia 型超新星の残骸であっても、膨張速度の分布が一様で球対称爆発とする描像によく合うもの (Tycho) と、ガスの分布や速度が非一様な膨張を示しているもの (Kepler) とに区別されることがわかった。Ia 型超新星爆発について提案されている2つのモデルと比較を行い、球対称な膨張の場合が double degenerate (2つの白色矮星が合体して爆発) というモデルに、非一様な膨張が single degenerate (1つの白色矮星が爆発) に対応する可能性を指摘した。このほか、Cas

A についても連続 X 線の長期間にわたる減光の原因を調べ、衝撃波の減速よりは断熱冷却と考える方が観測結果をよく説明できることを示した。これらの結果は佐藤寿紀の博士論文としてまとめられた。

2) X 線代替機 XARM の開発

「ひとみ」のサイエンスを早期に復活させるための衛星 (XARM: X-ray Astronomy Recovery Mission) の設計や試験を進めた。搭載検出器はマイクロカロリメータ Resolve と CCD 検出器 Xtend の 2 つである。首都大グループは石崎が Resolve の日本側 PI となり、「ひとみ」SXS をベースとしつつ NASA グループとも相談しながらいくつかの設計変更について検討を進めている。また液体ヘリウム排気系についても、「ひとみ」に続き首都大の担当で部品製作や試験を行うことにしている。2018 年度の早い時期に JAXA から正式のプロジェクトとして認められ、打ち上げは 2021 年度を予定している。並行してサイエンスチームを組織しつつあり、初期観測に参加する Participating scientist を JAXA, NASA, ESA で募集している。

3) 太陽系 X 線の観測的研究

太陽系は我々に最も近い天体であり、磁場や電場を介した粒子加速や恒星からのプラズマ流との相互作用による惑星からの大気の剥ぎ取りなど、広く応用可能な基礎物理を「その場」観測できる領域である。

我々は「すぎく」の全公開データ (2007-2015 年, 約 3100 セット) の系統解析を進めている。地球から流出した大気を作る外圏と太陽風プラズマとの電荷交換反応に伴う突発的な X 線発光が生じることが知られているが、いつどこでどのように発光するかは未だ明らかではない。我々は新たに太陽風の主成分である陽子より遅れて発光し、アルファ粒子とより相関の良いイベントを発見した。高速太陽風が惑星間で作る衝撃波で陽子が圧縮され、その後、重イオンを多く含む太陽風本体が到来するためと考えられ、従来は見過ごされていた。天体解析の雑音のみならず、太陽風構造を知る手段として期待できる。現在、論文としてまとめている最中である。

その他にも「すぎく」を用いた木製放射線帯からの広がった X 線について、太陽活動への依存性を調べ、X 線光度が太陽活動に強く依存しないことから、放射機構が逆コンプトン散乱ではないかという制限を付けた。また、X 線を使った将来の惑星探査計画として、地球周辺の電荷交換 X 線の空間分布を世界で初めて明らかにし、同時にこれを磁気圏のイメージングに使う GEO-X 計画を推進している。

4) TES カロリメータの開発と地上実験

JAXA 宇宙研や産総研との共同で多素子の TES (Transition Edge Sensor) カロリメータの素子製作と読み出し技術の基礎開発を進めている。素子製作では、積層配線という集積度を高めるための配線方式を完成させるために、スパッターの方法の最適化やメンブレン加工プロセスの見直し、化学機械研磨を用いた基板製作など、さまざまな検討と試作を行なった。一方、10 数年後の Super DIOS を考えると、3 万素子の TES カロリメータを読みだせるような新たな方式が必要となる。世界的にマイクロ波読み出しがもっとも有望であり、この開発を進めている産総研グループと協力しながら、今後の日米協力も視野に入れつつ開発へ向けた準備を進めた。TES カロリメータの地上応用として、理研グループなどと協力して、K 中間子原子の特性 X 線のエネルギーを正確に求める J-PARC 実験の準備を進めた。米 NIST 製の冷凍機と TES カロリメータを導入し、理研および J-PARC で予備実験を行い、2018 年度の本格実験に向けて準備体制を整えた。

5) 次世代の超軽量 X 線望遠鏡の開発

マイクロマシン技術を用いた独自の超軽量 X 線望遠鏡の開発を進めている。薄い Si 基板に数十 μm の貫通穴を開け、側壁を反射鏡として利用できるような高温アニールや原子層堆積法による重金属膜付け

を行う。既に世界初の X 線の集光結像の実証に成功しており、衛星搭載へ向け性能向上を進めている。

Si は加工しやすい材料だが、X 線反射鏡として用いるには原子番号が小さい。そこで高アスペクト微細穴の側壁に一樣な膜付けが可能な原子層堆積法を試した。我々はこれまでに Ir 膜付けを行ってきたが高価であるため、Pt 膜付けを試した。金属を含む材料を気相で導入し、純金属を膜付けできる。我々は 4 インチ試作光学系において、反射率の大幅な向上を確認した。これは我々の手法で世界初のものであり、米 Applied Optics 誌に論文が掲載され、Editor's Pick という注目論文にも選ばれた。

同時に、Si 高温塑性変形プロセスの改善も行った。高温下で Si 基板をプレスし結晶面のずれを利用して自由な形状に加工する日本発祥の技術である。微細穴を形成した平板基板を球面に曲げることで宇宙からの平行 X 線を集光する。我々は今年度、基板の厚みを変えた条件出しを行い、基板が厚いほど変形精度が上がり、要求精度を満たしうることを見出した。微細穴なしの基板では変形精度は一定であり、これは新たな知見である。この超軽量 X 線望遠鏡は 2020 年頃打ち上げを目指す首都大の超小型衛星 ORBIS に向けて開発を進めている。

さらに Si 基板を用いた新手法にも着手した。高温塑性変形で円錐形に曲げた基板の表面を反射鏡として使う手法である。300 μm 厚の Si 基板を長方形にカットし、それを円錐治具で変形した。その結果、図 2 に示すように部分的にはあるが < 1 分角が達成できることを確認した。治具の表面形状を測定した所、噛み合わせの良い場所に対応していると考えられ、治具や基板の平坦性を改良することで、秒角の達成が期待できる。これは 2030 年頃打ち上げを目指す Super DIOS 計画などを目指している。

6) Super DIOS の検討

宇宙のバリオンの多くを占めると考えられる、温度が数 100 万度の銀河間物質 (ダークバリオン) を酸素の輝線 (O_{VII} , O_{VIII}) で検出するために、Super DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) の検討を 2030 年ごろの打ち上げを目指して検討を始めた。Super DIOS は視野が 30 分角、望遠鏡の角分解能が約 10 秒角、面積 1000 cm^2 以上、約 3 万素子の TES カロリメータを備える衛星で、広がった放射に対して Athena をもしのぐ性能を持つ。本年度は検討チームの代表を佐藤浩介氏 (埼玉大) にお願ひすることとし、望遠鏡と TES カロリメータそれぞれの実現可能性のたまかな検討を行なった。望遠鏡は軽量化が課題であるものの、米欧ともに一定の技術はあること、また TES カロリメータも、日米協力により 2030 年ごろまでに 3 万素子を実現することは十分に実現性のある目標との認識になっている。

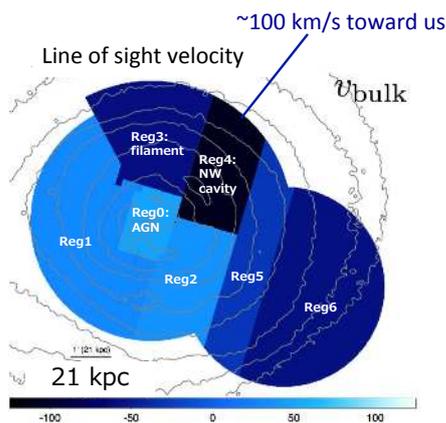


図 1: 「ひとみ」が観測したペルセウス座銀河団のガスの運動状態。Reg0 が銀河団中心で、特に北西キャビティの領域が他より速く約 100 km/s の速度で我々へ向かっていることがわかった。(PASJ, Vol. 70, issue 2, id. 9, 2018)

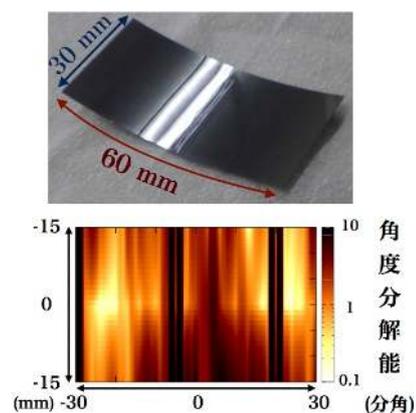


図 2: 厚さ 0.3 mm の Si 基板を円錐面に沿うよう塑性変形させたサンプル (上) と、面全体を X 線ビームで照射した時の角度分解能の分布 (下)。良い部分では 0.1 分角ほどの角分解能が得られている。(中庭 望修士論文)

2. 研究業績

1) 論文

Kawano, Takafumi; Done, Chris; Yamada, Shin'ya; Takahashi, Hiromitsu; Axelsson, Magnus; Fukazawa, Yasushi: Black hole spin of Cygnus X-1 determined from the softest state ever observed, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **69**, Issue 2, id.36, DOI: 10.1093/pasj/psx009 (2017)

Akamatsu, H.; Mizuno, M.; Ota, N.; Zhang, Y.-Y.; van Weeren, R. J.; Kawahara, H.; Fukazawa, Y.; Kaastra, J. S.; Kawaharada, M.; Nakazawa, K.; Ohashi, T.; R ö ttgering, H. J. A.; Takizawa, M.; Vink, J.; Zandanel, F.: Suzaku observations of the merging galaxy cluster Abell 2255: The northeast radio relic, *Astronomy & Astrophysics*, **600**, id.A100, 12 pp., DOI: 10.1051/0004-6361/201628400 (2017)

Akamatsu, H.; Fujita, Y.; Akahori, T.; Ishisaki, Y.; Hayashida, K.; Hoshino, A.; Mernier, F.; Yoshikawa, K.; Sato, K.; Kaastra, J. S.: Properties of the cosmological filament between two clusters: A possible detection of a large-scale accretion shock by Suzaku, *Astronomy & Astrophysics*, **606**, id.A1, 8 pp., DOI: 10.1051/0004-6361/201730497 (2017)

Zhuravleva, I.; Churazov, E.; Sunyaev, R.; Sazonov, S.; Allen, S. W.; Werner, N.; Simionescu, A.; Konami, S.; Ohashi, T.: Erratum: Resonant scattering in the Perseus Cluster: spectral model for constraining gas motions with Astro-H, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **470**, Issue 2, p.1848-1848, DOI: 10.1093/mnras/stx1065 (2017)

Itahana, Madoka; Takizawa, Motokazu; Akamatsu, Hiroki; van Weeren, Reinout J.; Kawahara, Hajime; Fukazawa, Yasushi; Kaastra, Jelle S.; Nakazawa, Kazuhiro; Ohashi, Takaya; Ota, Naomi; R ö ttgering, Huub J. A.; Vink, Jacco; Zandanel, Fabio: Suzaku and Chandra observations of the galaxy cluster RXC J1053.7+5453 with a radio relic, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **69**, Issue 6, id.88, DOI: 10.1093/pasj/psx095 (2017)

Sugawara, Yuuki; Takizawa, Motokazu; Itahana, Madoka; Akamatsu, Hiroki; Fujita, Yutaka; Ohashi, Takaya; Ishisaki, Yoshitaka: Suzaku observations of the outskirts of the galaxy cluster Abell 3395, including a filament toward Abell 3391, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **69**, Issue 6, id.93 DOI: 10.1093/pasj/psx104 (2017)

Yaji, Kentaro; Yamada, Shinya; Masai, Kuniaki: A Semi-analytical Model for Wind-fed Black Hole High-mass X-Ray Binaries: State Transition Triggered by Magnetic Fields from the Companion Star, *The Astrophysical Journal*, **847**, Issue 2, article id. 129, 10 pp., DOI: 10.3847/1538-4357/aa88d3 (2017)

Hitomi Collaboration; Aharonian, Felix; Akamatsu, Hiroki; Akimoto, Fumie; Allen, Steven W.; Angelini, Lorella; Audard, Marc; Awaki, Hisamitsu; Axelsson, Magnus; Bamba, Aya; Bautz, Marshall W.; Blandford, Roger; Brenneman, Laura W.; Brown, Gregory V.; Bulbul, Esra; Cackett, Edward M.; Chernyakova, Maria; Chiao, Meng P.; Coppi, Paolo S.; Costantini, Elisa; de Plaa, Jelle; den Herder, Jan-Willem; Done, Chris; Dotani, Tadayasu; Ebisawa, Ken; Eckart, Megan E.; Enoto, Teruaki; Ezoe, Yuichiro; Fabian, Andrew C.; Ferrigno, Carlo; Foster, Adam R.; Fujimoto, Ryuichi; Fukazawa, Yasushi; Furuzawa, Akihiro; Galeazzi, Massimiliano; Gallo, Luigi C.; Gandhi, Poshak;

Giustini, Margherita; Goldwurm, Andrea; Gu, Liyi; Guainazzi, Matteo; Haba, Yoshito; Hagino, Kouichi; Hamaguchi, Kenji; Harrus, Ilana M.; Hatsukade, Isamu; Hayashi, Katsuhiko; Hayashi, Takayuki; Hayashida, Kiyoshi; Hiraga, Junko S.; Hornschemeier, Ann; Hoshino, Akio; Hughes, John P.; Ichinohe, Yuto; Iizuka, Ryo; Inoue, Hajime; Inoue, Yoshiyuki; Ishida, Manabu; Ishikawa, Kumi; Ishisaki, Yoshitaka; Iwai, Masachika; Kaastra, Jelle; Kallman, Tim; Kamae, Tsuneyoshi; Kataoka, Jun; Katsuda, Satoru; Kawai, Nobuyuki; Kelley, Richard L.; Kilbourne, Caroline A.; Kitaguchi, Takao; Kitamoto, Shunji; Kitayama, Tetsu; Kohmura, Takayoshi; Kokubun, Motohide; Koyama, Katsuji; Koyama, Shu; Kretschmar, Peter; Krimm, Hans A.; Kubota, Aya; Kunieda, Hideyo; Laurent, Philippe; Lee, Shiu-Hang; Leutenegger, Maurice A.; Limousine, Olivier; Loewenstein, Michael; Long, Knox S.; Lumb, David; Madejski, Greg; Maeda, Yoshitomo; Maier, Daniel; Makishima, Kazuo; Markevitch, Maxim; Matsumoto, Hironori; Matsushita, Kyoko; McCammon, Dan; McNamara, Brian R.; Mehdipour, Missagh; Miller, Eric D.; Miller, Jon M.; Mineshige, Shin; Mitsuda, Kazuhisa; Mitsui, Ikuyuki; Miyazawa, Takuya; Mizuno, Tsunefumi; Mori, Hideyuki; Mori, Koji; Mukai, Koji; Murakami, Hiroshi; Mushotzky, Richard F.; Nakagawa, Takao; Nakajima, Hiroshi; Nakamori, Takeshi; Nakashima, Shinya; Nakazawa, Kazuhiro; Nobukawa, Kumiko K.; Nobukawa, Masayoshi; Noda, Hirofumi; Odaka, Hirokazu; Ohashi, Takaya; Ohno, Masanori; Okajima, Takashi; Ota, Naomi; Ozaki, Masanobu; Paerels, Frits; Paltani, Stéphane; Petre, Robert; Pinto, Ciro; Porter, Frederick S.; Pottschmidt, Katja; Reynolds, Christopher S.; Safi-Harb, Samar; Saito, Shinya; Sakai, Kazuhiro; Sasaki, Toru; Sato, Goro; Sato, Kosuke; Sato, Rie; Sawada, Makoto; Schartel, Norbert; Serlemitsos, Peter J.; Seta, Hiromi; Shidatsu, Megumi; Simionescu, Aurora; Smith, Randall K.; Soong, Yang; Stawarz, Lukasz; Sugawara, Yasuharu; Sugita, Satoshi; Szymkowiak, Andrew; Tajima, Hiroyasu; Takahashi, Hiromitsu; Takahashi, Tadayuki; Takeda, Shin'ichiro; Takei, Yoh; Tamagawa, Toru; Tamura, Takayuki; Tanaka, Takaaki; Tanaka, Yasuo; Tanaka, Yasuyuki T.; Tashiro, Makoto S.; Tawara, Yuzuru; Terada, Yukikatsu; Terashima, Yuichi; Tombesi, Francesco; Tomida, Hiroshi; Tsuboi, Yohko; Tsujimoto, Masahiro; Tsunemi, Hiroshi; Go Tsuru, Takeshi; Uchida, Hiroyuki; Uchiyama, Hideki; Uchiyama, Yasunobu; Ueda, Shutaro; Ueda, Yoshihiro; Uno, Shin'ichiro; Urry, C. Megan; Ursino, Eugenio; de Vries, Cor P.; Watanabe, Shin; Werner, Norbert; Wik, Daniel R.; Wilkins, Dan R.; Williams, Brian J.; Yamada, Shinya; Yamaguchi, Hiroya; Yamaoka, Kazutaka; Yamasaki, Noriko Y.; Yamauchi, Makoto; Yamauchi, Shigeo; Yaqoob, Tahir; Yatsu, Yoichi; Yonetoku, Daisuke; Zhuravleva, Irina; Zoghbi, Abderahmen: Solar abundance ratios of the iron-peak elements in the Perseus cluster, *Nature*, **551**, Issue 7681, pp. 478-480, DOI: 10.1038/nature24301 (2017)

Terada, Yukikatsu; Yamaguchi, Sunao; Sugimoto, Shigenobu; Inoue, Taku; Nakaya, Souhei; Murakami, Maika; Yabe, Seiya; Oshimizu, Kenya; Ogawa, Mina; Dotani, Tadayasu; Ishisaki, Yoshitaka; Mizushima, Kazuyo; Kominato, Takashi; Mine, Hiroaki; Hihara, Hiroki; Iwase, Kaori; Kouzu, Tomomi; Tashiro, Makoto S.; Natsukari, Chikara; Ozaki, Masanobu; Kokubun, Motohide; Takahashi, Tadayuki; Kawakami, Satoko; Kasahara, Masaru; Kumagai, Susumu; Angelini, Lorella; Witthoef, Michael: Time assignment system and its performance aboard the Hitomi satellite, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, **4**, id. 011206, DOI: 10.1117/1.JATIS.4.1.011206 (2018)

Ishisaki, Yoshitaka; Yamada, Shinya; Seta, Hiromi; Tashiro, Makoto S.; Takeda, Sawako; Terada, Yukikatsu; Kato, Yuka; Tsujimoto, Masahiro; Koyama, Shu; Mitsuda, Kazuhisa; Sawada, Makoto;

Boyce, Kevin R.; Chiao, Meng P.; Watanabe, Tomomi; Leutenegger, Maurice A.; Eckart, Megan E.; Porter, Frederick Scott; Kilbourne, Caroline Anne: In-flight performance of pulse-processing system of the ASTRO-H/Hitomi soft x-ray spectrometer, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, Volume 4, id. 011217, DOI: 10.1117/1.JATIS.4.1.011217 (2018)

Porter, Frederick S.; Boyce, Kevin R.; Chiao, Meng P.; Eckart, Megan E.; Fujimoto, Ryuichi; Ishisaki, Yoshitaka; Kilbourne, Caroline Anne; Leutenegger, Maurice A.; McCammon, Daniel; Mitsuda, Kazuhisa; Sato, Kosuke; Seta, Hiromi; Sawada, Makoto; Sneiderman, Gary A.; Szymkowiak, Andrew E.; Takei, Yoh; Tashiro, Makoto S.; Tsujimoto, Masahiro; Watanabe, Tomomi; Yamada, Shinya: In-flight performance of the soft x-ray spectrometer detector system on Astro-H, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, Volume 4, id. 011218, DOI: 10.1117/1.JATIS.4.1.011218 (2018)

Kilbourne, Caroline A.; Sawada, Makoto; Tsujimoto, Masahiro; Angellini, Lorella; Boyce, Kevin R.; Eckart, Megan E.; Fujimoto, Ryuichi; Ishisaki, Yoshitaka; Kelley, Richard L.; Koyama, Shu; Leutenegger, Maurice A.; Loewenstein, Michael; McCammon, Dan; Mitsuda, Kazuhisa; Nakashima, Shinya; Porter, Frederick S.; Seta, Hiromi; Takei, Yoh; Tashiro, Makoto S.; Terada, Yukikatsu; Yamada, Shinya; Yamasaki, Noriko Y.: In-flight calibration of Hitomi Soft X-ray Spectrometer. (1) Background, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **70**, Issue 2, id.18, DOI: 10.1093/pasj/psx139 (2018)

Tsujimoto, Masahiro; Mitsuda, Kazuhisa; Kelley, Richard L.; den Herder, Jan-Willem; Bialas, Thomas G.; Boyce, Kevin R.; Chiao, Meng P.; de Vries, Cor P.; DiPirro, Michael J.; Eckart, Megan E.; Ezoe, Yuichiro; Fujimoto, Ryuichi; Hoshino, Akio; Ishikawa, Kumi; Ishisaki, Yoshitaka; Kilbourne, Caroline A.; Koyama, Shu; Leutenegger, Maurice A.; Masters, Candace M.; Mitsuishi, Ikuyuki; Noda, Hirofumi; Okajima, Takashi; Okamoto, Atsushi; Porter, Frederic S.; Sato, Kosuke; Sato, Yohichi; Savinell, Joseph C.; Sawada, Makoto; Seta, Hiromi; Shirron, Peter J.; Sneiderman, Gary A.; Takei, Yoh; Tamagawa, Toru; Tashiro, Makoto S.; Watanabe, Tomomi; Yamada, Shinya; Yamasaki, Noriko Y.; Yatsu, Yoichi: In-orbit operation of the soft x-ray spectrometer onboard the Hitomi satellite, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, **4**, id. 011205, DOI: 10.1117/1.JATIS.4.1.011205 (2018)

Noda, Hirofumi; Mitsuda, Kazuhisa; Okamoto, Atsushi; Ezoe, Yuichiro; Ishikawa, Kumi; Fujimoto, Ryuichi; Yamasaki, Noriko; Takei, Yoh; Ohashi, Takaya; Ishisaki, Yoshitaka; Mitsuishi, Ikuyuki; Yoshida, Seiji; DiPirro, Michel; Shirron, Peter: Thermal analyses for initial operations of the soft x-ray spectrometer onboard the Hitomi satellite, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, **4**, id. 011202, DOI: 10.1117/1.JATIS.4.1.011202 (2018)

Ezoe, Yuichiro; DiPirro, Michael; Fujimoto, Ryuichi; Ishikawa, Kumi; Ishisaki, Yoshitaka; Kanao, Kenichi; Kimball, Mark; Mitsuda, Kazuhisa; Mitsuishi, Ikuyuki; Murakami, Masahide; Noda, Hirofumi; Ohashi, Takaya; Okamoto, Atsushi; Satoh, Yohichi; Sato, Kosuke; Shirron, Peter; Tsunematsu, Shoji; Yamaguchi, Hiroya; Yoshida, Seiji: Porous plug phase separator and superfluid film flow suppression system for the soft x-ray spectrometer onboard Hitomi, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, **4**, id. 011203, DOI: 10.1117/1.JATIS.4.1.011203 (2018)

Fujimoto, Ryuichi; Takei, Yoh; Mitsuda, Kazuhisa; Yamasaki, Noriko Y.; Tsujimoto, Masahiro; Koyama, Shu; Ishikawa, Kumi; Sugita, Hiroyuki; Sato, Yoichi; Shinozaki, Keisuke; Okamoto, Atsushi;

Kitamoto, Shunji; Hoshino, Akio; Sato, Kosuke; Ezoe, Yuichiro; Ishisaki, Yoshitaka; Yamada, Shinya; Seta, Hiromi; Ohashi, Takaya; Tamagawa, Toru; Noda, Hirofumi; Sawada, Makoto; Tashiro, Makoto; Yatsu, Yoichi; Mitsuishi, Ikuyuki; Kanao, Kenichi; Yoshida, Seiji; Miyaoka, Mikio; Tsunematsu, Shoji; Otsuka, Kiyomi; Narasaki, Katsuhiko; DiPirro, Michael J.; Shirron, Peter J.; Sneiderman, Gary A.; Kilbourne, Caroline A.; Porter, Frederick Scott; Chiao, Meng P.; Eckart, Megan E.: Performance of the helium dewar and the cryocoolers of the Hitomi soft x-ray spectrometer, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, **4**, id. 011208, DOI: 10.1117/1.JATIS.4.1.011208 (2018)

Hitomi Collaboration; Aharonian, Felix; Akamatsu, Hiroki; Akimoto, Fumie; Allen, Steven W.; Angelini, Lorella; Audard, Marc; Awaki, Hisamitsu; Axelsson, Magnus; Bamba, Aya; Bautz, Marshall W.; Blandford, Roger; Brenneman, Laura W.; Brown, Gregory V.; Bulbul, Esra; Cackett, Edward M.; Canning, Rebecca E. A.; Chernyakova, Maria; Chiao, Meng P.; Coppi, Paolo S.; Costantini, Elisa; de Plaa, Jelle; de Vries, Cor P.; den Herder, Jan-Willem; Done, Chris; Dotani, Tadayasu; Ebisawa, Ken; Eckart, Megan E.; Enoto, Teruaki; Ezoe, Yuichiro; Fabian, Andrew C.; Ferrigno, Carlo; Foster, Adam R.; Fujimoto, Ryuichi; Fukazawa, Yasushi; Furuzawa, Akihiro; Galeazzi, Massimiliano; Gallo, Luigi C.; Gandhi, Poshak; Giustini, Margherita; Goldwurm, Andrea; Gu, Liyi; Guainazzi, Matteo; Haba, Yoshito; Hagino, Kouichi; Hamaguchi, Kenji; Harrus, Ilana M.; Hatsukade, Isamu; Hayashi, Katsuhiko; Hayashi, Takayuki; Hayashi, Tasuku; Hayashida, Kiyoshi; Hiraga, Junko S.; Hornschemeier, Ann; Hoshino, Akio; Hughes, John P.; Ichinohe, Yuto; Iizuka, Ryo; Inoue, Hajime; Inoue, Shota; Inoue, Yoshiyuki; Ishida, Manabu; Ishikawa, Kumi; Ishisaki, Yoshitaka; Iwai, Masachika; Kaastra, Jelle; Kallman, Tim; Kamae, Tsuneyoshi; Kataoka, Jun; Katsuda, Satoru; Kawai, Nobuyuki; Kelley, Richard L.; Kilbourne, Caroline A.; Kitaguchi, Takao; Kitamoto, Shunji; Kitayama, Tetsu; Kohmura, Takayoshi; Kokubun, Motohide; Koyama, Katsuji; Koyama, Shu; Kretschmar, Peter; Krimm, Hans A.; Kubota, Aya; Kunieda, Hideyo; Laurent, Philippe; Lee, Shiu-Hang; Leutenegger, Maurice A.; Limousin, Olivier; Loewenstein, Michael; Long, Knox S.; Lumb, David; Madejski, Greg; Maeda, Yoshitomo; Maier, Daniel; Makishima, Kazuo; Markevitch, Maxim; Matsumoto, Hironori; Matsushita, Kyoko; McCammon, Dan; McNamara, Brian R.; Mehdipour, Missagh; Miller, Eric D.; Miller, Jon M.; Mineshige, Shin; Mitsuda, Kazuhisa; Mitsuishi, Ikuyuki; Miyazawa, Takuya; Mizuno, Tsunefumi; Mori, Hideyuki; Mori, Koji; Mukai, Koji; Murakami, Hiroshi; Mushotzky, Richard F.; Nakagawa, Takao; Nakajima, Hiroshi; Nakamori, Takeshi; Nakashima, Shinya; Nakazawa, Kazuhiro; Nobukawa, Kumiko K.; Nobukawa, Masayoshi; Noda, Hirofumi; Odaka, Hirokazu; Ohashi, Takaya; Ohno, Masanori; Okajima, Takashi; Ota, Naomi; Ozaki, Masanobu; Paerels, Frits; Paltani, St é phane; Petre, Robert; Pinto, Ciro; Porter, Frederick S.; Pottschmidt, Katja; Reynolds, Christopher S.; Safi-Harb, Samar; Saito, Shinya; Sakai, Kazuhiro; Sasaki, Toru; Sato, Goro; Sato, Kosuke; Sato, Rie; Sawada, Makoto; Schartel, Norbert; Serlemitsos, Peter J.; Seta, Hiromi; Shidatsu, Megumi; Simionescu, Aurora; Smith, Randall K.; Soong, Yang; Stawarz, Ł ukasz; Sugawara, Yasuharu; Sugita, Satoshi; Szymkowiak, Andrew; Tajima, Hiroyasu; Takahashi, Hiromitsu; Takahashi, Tadayuki; Takeda, Shin'ichiro; Takei, Yoh; Tamagawa, Toru; Tamura, Takayuki; Tanaka, Keigo; Tanaka, Takaaki; Tanaka, Yasuo; Tanaka, Yasuyuki T.; Tashiro, Makoto S.; Tawara, Yuzuru; Terada, Yukikatsu; Terashima, Yuichi; Tombesi, Francesco; Tomida, Hiroshi; Tsuboi, Yohko; Tsujimoto, Masahiro; Tsunemi, Hiroshi; Tsuru, Takeshi Go; Uchida, Hiroyuki; Uchiyama, Hideki; Uchiyama, Yasunobu; Ueda, Shutaro; Ueda, Yoshihiro; Uno, Shin'ichiro; Urry, C. Megan; Ursino, Eugenio; Wang, Qian H. S.; Watanabe, Shin; Werner, Norbert;

Wilkins, Dan R.; Williams, Brian J.; Yamada, Shinya; Yamaguchi, Hiroya; Yamaoka, Kazutaka; Yamasaki, Noriko Y.; Yamauchi, Makoto; Yamauchi, Shigeo; Yaqoob, Tahir; Yatsu, Yoichi; Yonetoku, Daisuke; Zhuravleva, Irina; Zoghbi, Abderahmen: Atmospheric gas dynamics in the Perseus cluster observed with Hitomi, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **70**, Issue 2, id.9, DOI: 10.1093/pasj/psx138 (2018)

Hitomi Collaboration; Aharonian, Felix; Akamatsu, Hiroki; Akimoto, Fumie; Allen, Steven W.; Angelini, Lorella; Audard, Marc; Awaki, Hisamitsu; Axelsson, Magnus; Bamba, Aya; Bautz, Marshall W.; Blandford, Roger; Brenneman, Laura W.; Brown, Gregory V.; Bulbul, Esra; Cackett, Edward M.; Chernyakova, Maria; Chiao, Meng P.; Coppi, Paolo S.; Costantini, Elisa; de Plaa, Jelle; de Vries, Cor P.; den Herder, Jan-Willem; Done, Chris; Dotani, Tadayasu; Ebisawa, Ken; Eckart, Megan E.; Enoto, Teruaki; Ezoë, Yuichiro; Fabian, Andrew C.; Ferrigno, Carlo; Foster, Adam R.; Fujimoto, Ryuichi; Fukazawa, Yasushi; Furukawa, Maki; Furuzawa, Akihiro; Galeazzi, Massimiliano; Gallo, Luigi C.; Gandhi, Poshak; Giustini, Margherita; Goldwurm, Andrea; Gu, Liyi; Guainazzi, Matteo; Haba, Yoshito; Hagino, Kouichi; Hamaguchi, Kenji; Harrus, Ilana M.; Hatsukade, Isamu; Hayashi, Katsuhiro; Hayashi, Takayuki; Hayashida, Kiyoshi; Hiraga, Junko S.; Hornschemeier, Ann; Hoshino, Akiyo; Hughes, John P.; Ichinohe, Yuto; Iizuka, Ryo; Inoue, Hajime; Inoue, Yoshiyuki; Ishida, Manabu; Ishikawa, Kumi; Ishisaki, Yoshitaka; Iwai, Masachika; Kaastra, Jelle; Kallman, Tim; Kamae, Tsuneyoshi; Kataoka, Jun; Katsuda, Satoru; Kawai, Nobuyuki; Kelley, Richard L.; Kilbourne, Caroline A.; Kitaguchi, Takao; Kitamoto, Shunji; Kitayama, Tetsu; Kohmura, Takayoshi; Kokubun, Motohide; Koyama, Katsuji; Koyama, Shu; Kretschmar, Peter; Krimm, Hans A.; Kubota, Aya; Kunieda, Hideyo; Laurent, Philippe; Lee, Shiu-Hang; Leutenegger, Maurice A.; Limousin, Olivier O.; Loewenstein, Michael; Long, Knox S.; Lumb, David; Madejski, Greg; Maeda, Yoshitomo; Maier, Daniel; Makishima, Kazuo; Markevitch, Maxim; Matsumoto, Hironori; Matsushita, Kyoko; McCammon, Dan; McNamara, Brian R.; Mehdipour, Missagh; Miller, Eric D.; Miller, Jon M.; Mineshige, Shin; Mitsuda, Kazuhisa; Mitsuishi, Ikuyuki; Miyazawa, Takuya; Mizuno, Tsunefumi; Mori, Hideyuki; Mori, Koji; Mukai, Koji; Murakami, Hiroshi; Mushotzky, Richard F.; Nakagawa, Takao; Nakajima, Hiroshi; Nakamori, Takeshi; Nakashima, Shinya; Nakazawa, Kazuhiro; Nobukawa, Kumiko K.; Nobukawa, Masayoshi; Noda, Hirofumi; Odaka, Hirokazu; Ogorzalek, Anna; Ohashi, Takaya; Ohno, Masanori; Okajima, Takashi; Ota, Naomi; Ozaki, Masanobu; Paerels, Frits; Paltani, Stéphane; Petre, Robert; Pinto, Ciro; Porter, Frederick S.; Pottschmidt, Katja; Reynolds, Christopher S.; Safi-Harb, Samar; Saito, Shinya; Sakai, Kazuhiro; Sasaki, Toru; Sato, Goro; Sato, Kosuke; Sato, Rie; Sawada, Makoto; Schartel, Norbert; Serlemitsos, Peter J.; Seta, Hiromi; Shidatsu, Megumi; Simionescu, Aurora; Smith, Randall K.; Soong, Yang; Stawarz, Łukasz; Sugawara, Yasuharu; Sugita, Satoshi; Szymkowiak, Andrew; Tajima, Hiroyasu; Takahashi, Hiromitsu; Takahashi, Tadayuki; Takeda, Shin-ichi; Takei, Yoh; Tamagawa, Toru; Tamura, Takayuki; Tanaka, Takaaki; Tanaka, Yasuo; Tanaka, Yasuyuki T.; Tashiro, Makoto S.; Tawara, Yuzuru; Terada, Yukikatsu; Terashima, Yuichi; Tombesi, Francesco; Tomida, Hiroshi; Tsuboi, Yohko; Tsujimoto, Masahiro; Tsunemi, Hiroshi; Tsuru, Takeshi Go; Uchida, Hiroyuki; Uchiyama, Hideki; Uchiyama, Yasunobu; Ueda, Shutaro; Ueda, Yoshihiro; Uno, Shin-ichi; Urry, C. Megan; Ursino, Eugenio; Watanabe, Shin; Werner, Norbert; Wilkins, Dan R.; Williams, Brian J.; Yamada, Shinya; Yamaguchi, Hiroya; Yamaoka, Kazutaka; Yamasaki, Noriko Y.; Yamauchi, Makoto; Yamauchi, Shigeo; Yaqoob, Tahir; Yatsu, Yoichi; Yonetoku, Daisuke; Zhuravleva, Irina;

Zoghbi, Abderahmen: Measurements of resonant scattering in the Perseus Cluster core with Hitomi SXS, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **70**, Issue 2, id.10, DOI: 10.1093/pasj/psx127 (2018)

Hitomi Collaboration; Aharonian, Felix; Akamatsu, Hiroki; Akimoto, Fumie; Allen, Steven W.; Angelini, Lorella; Audard, Marc; Awaki, Hisamitsu; Axelsson, Magnus; Bamba, Aya; Bautz, Marshall W.; Blandford, Roger; Brenneman, Laura W.; Brown, Gregory V.; Bulbul, Esra; Cackett, Edward M.; Chernyakova, Maria; Chiao, Meng P.; Coppi, Paolo S.; Costantini, Elisa; de Plaa, Jelle; de Vries, Cor P.; den Herder, Jan-Willem; Done, Chris; Dotani, Tadayasu; Ebisawa, Ken; Eckart, Megan E.; Enoto, Teruaki; Ezoe, Yuichiro; Fabian, Andrew C.; Ferrigno, Carlo; Foster, Adam R.; Fujimoto, Ryuichi; Fukazawa, Yasushi; Furukawa, Maki; Furuzawa, Akihiro; Galeazzi, Massimiliano; Gallo, Luigi C.; Gandhi, Poshak; Giustini, Margherita; Goldwurm, Andrea; Gu, Liyi; Guainazzi, Matteo; Haba, Yoshito; Hagino, Kouichi; Hamaguchi, Kenji; Harrus, Ilana M.; Hatsukade, Isamu; Hayashi, Katsuhiro; Hayashi, Takayuki; Hayashida, Kiyoshi; Hiraga, Junko S.; Hornschemeier, Ann; Hoshino, Akio; Hughes, John P.; Ichinohe, Yuto; Iizuka, Ryo; Inoue, Hajime; Inoue, Yoshiyuki; Ishida, Manabu; Ishikawa, Kumi; Ishisaki, Yoshitaka; Iwai, Masachika; Kaastra, Jelle; Kallman, Tim; Kamae, Tsuneyoshi; Kataoka, Jun; Kato, Yuichi; Katsuda, Satoru; Kawai, Nobuyuki; Kelley, Richard L.; Kilbourne, Caroline A.; Kitaguchi, Takao; Kitamoto, Shunji; Kitayama, Tetsu; Kohmura, Takayoshi; Kokubun, Motohide; Koyama, Katsuji; Koyama, Shu; Kretschmar, Peter; Krimm, Hans A.; Kubota, Aya; Kunieda, Hideyo; Laurent, Philippe; Lee, Shiu-Hang; Leutenegger, Maurice A.; Limousin, Olivier; Loewenstein, Michael; Long, Knox S.; Lumb, David; Madejski, Greg; Maeda, Yoshitomo; Maier, Daniel; Makishima, Kazuo; Markevitch, Maxim; Matsumoto, Hironori; Matsushita, Kyoko; McCammon, Dan; McNamara, Brian R.; Mehdipour, Missagh; Miller, Eric D.; Miller, Jon M.; Mineshige, Shin; Mitsuda, Kazuhisa; Mitsuishi, Ikuyuki; Miyazawa, Takuya; Mizuno, Tsunefumi; Mori, Hideyuki; Mori, Koji; Mukai, Koji; Murakami, Hiroshi; Mushotzky, Richard F.; Nakagawa, Takao; Nakajima, Hiroshi; Nakamori, Takeshi; Nakashima, Shinya; Nakazawa, Kazuhiro; Nobukawa, Kumiko K.; Nobukawa, Masayoshi; Noda, Hirofumi; Odaka, Hirokazu; Ohashi, Takaya; Ohno, Masanori; Okajima, Takashi; Ota, Naomi; Ozaki, Masanobu; Paerels, Frits; Paltani, Stéphane; Petre, Robert; Pinto, Ciro; Porter, Frederick S.; Pottschmidt, Katja; Reynolds, Christopher S.; Safi-Harb, Samar; Saito, Shinya; Sakai, Kazuhiro; Sasaki, Toru; Sato, Goro; Sato, Kosuke; Sato, Rie; Sawada, Makoto; Schartel, Norbert; Serlemitsos, Peter J.; Seta, Hiromi; Shidatsu, Megumi; Simionescu, Aurora; Smith, Randall K.; Soong, Yang; Stawarz, Łukasz; Sugawara, Yasuharu; Sugita, Satoshi; Szymkowiak, Andrew; Tajima, Hiroyasu; Takahashi, Hiromitsu; Takahashi, Tadayuki; Takeda, Shin-ichi; Takei, Yoh; Tamagawa, Toru; Tamura, Takayuki; Tanaka, Takaaki; Tanaka, Yasuo; Tanaka, Yasuyuki T.; Tashiro, Makoto S.; Tawara, Yuzuru; Terada, Yukikatsu; Terashima, Yuichi; Tombesi, Francesco; Tomida, Hiroshi; Tsuboi, Yohko; Tsujimoto, Masahiro; Tsunemi, Hiroshi; Tsuru, Takeshi Go; Uchida, Hiroyuki; Uchiyama, Hideki; Uchiyama, Yasunobu; Ueda, Shutaro; Ueda, Yoshihiro; Uno, Shin-ichi; Urry, C. Megan; Ursino, Eugenio; Watanabe, Shin; Werner, Norbert; Wilkins, Dan R.; Williams, Brian J.; Yamada, Shinya; Yamaguchi, Hiroya; Yamaoka, Kazutaka; Yamasaki, Noriko Y.; Yamauchi, Makoto; Yamauchi, Shigeo; Yaqoob, Tahir; Yatsu, Yoichi; Yonetoku, Daisuke; Zhuravleva, Irina; Zoghbi, Abderahmen: Temperature structure in the Perseus cluster core observed with Hitomi, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **70**, Issue 2, id.11, DOI: 10.1093/pasj/psy004 (2018)

Hitomi Collaboration; Aharonian, Felix; Akamatsu, Hiroki; Akimoto, Fumie; Allen, Steven W.; Angelini, Lorella; Audard, Marc; Awaki, Hisamitsu; Axelsson, Magnus; Bamba, Aya; Bautz, Marshall W.; Blandford, Roger; Brenneman, Laura W.; Brown, Gregory V.; Bulbul, Esra; Cackett, Edward M.; Chernyakova, Maria; Chiao, Meng P.; Coppi, Paolo S.; Costantini, Elisa; de Plaa, Jelle; de Vries, Cor P.; den Herder, Jan-Willem; Done, Chris; Dotani, Tadayasu; Ebisawa, Ken; Eckart, Megan E.; Enoto, Teruaki; Ezoe, Yuichiro; Fabian, Andrew C.; Ferrigno, Carlo; Foster, Adam R.; Fujimoto, Ryuichi; Fukazawa, Yasushi; Furuzawa, Akihiro; Galeazzi, Massimiliano; Gallo, Luigi C.; Gandhi, Poshak; Giustini, Margherita; Goldwurm, Andrea; Gu, Liyi; Guainazzi, Matteo; Haba, Yoshito; Hagino, Kouichi; Hamaguchi, Kenji; Harrus, Ilana M.; Hatsukade, Isamu; Hayashi, Katsuhiko; Hayashi, Takayuki; Hayashida, Kiyoshi; Hell, Natalie; Hiraga, Junko S.; Hornschemeier, Ann; Hoshino, Akio; Hughes, John P.; Ichinohe, Yuto; Iizuka, Ryo; Inoue, Hajime; Inoue, Yoshiyuki; Ishida, Manabu; Ishikawa, Kumi; Ishisaki, Yoshitaka; Iwai, Masachika; Kaastra, Jelle; Kallman, Tim; Kamae, Tsuneyoshi; Kataoka, Jun; Katsuda, Satoru; Kawai, Nobuyuki; Kelley, Richard L.; Kilbourne, Caroline A.; Kitaguchi, Takao; Kitamoto, Shunji; Kitayama, Tetsu; Kohmura, Takayoshi; Kokubun, Motohide; Koyama, Katsuji; Koyama, Shu; Kretschmar, Peter; Krimm, Hans A.; Kubota, Aya; Kunieda, Hideyo; Laurent, Philippe; Lee, Shiu-Hang; Leutenegger, Maurice A.; Limousin, Olivier; Loewenstein, Michael; Long, Knox S.; Lumb, David; Madejski, Greg; Maeda, Yoshitomo; Maier, Daniel; Makishima, Kazuo; Markevitch, Maxim; Matsumoto, Hironori; Matsushita, Kyoko; McCammon, Dan; McNamara, Brian R.; Mehdipour, Missagh; Miller, Eric D.; Miller, Jon M.; Mineshige, Shin; Mitsuda, Kazuhisa; Mitsuishi, Ikuyuki; Miyazawa, Takuya; Mizuno, Tsunefumi; Mori, Hideyuki; Mori, Koji; Mukai, Koji; Murakami, Hiroshi; Mushotzky, Richard F.; Nakagawa, Takao; Nakajima, Hiroshi; Nakamori, Takeshi; Nakashima, Shinya; Nakazawa, Kazuhiro; Nobukawa, Kumiko K.; Nobukawa, Masayoshi; Noda, Hirofumi; Odaka, Hirokazu; Ohashi, Takaya; Ohno, Masanori; Okajima, Takashi; Ota, Naomi; Ozaki, Masanobu; Paerels, Frits; Paltani, St é phane; Petre, Robert; Pinto, Ciro; Porter, Frederick S.; Pottschmidt, Katja; Reynolds, Christopher S.; Safi-Harb, Samar; Saito, Shinya; Sakai, Kazuhiro; Sasaki, Toru; Sato, Goro; Sato, Kosuke; Sato, Rie; Sawada, Makoto; Schartel, Norbert; Serlemitsos, Peter J.; Seta, Hiromi; Shidatsu, Megumi; Simionescu, Aurora; Smith, Randall K.; Soong, Yang; Stawarz, Ł ukasz; Sugawara, Yasuharu; Sugita, Satoshi; Szymkowiak, Andrew; Tajima, Hiroyasu; Takahashi, Hiromitsu; Takahashi, Tadayuki; Takeda, Shin'ichiro; Takei, Yoh; Tamagawa, Toru; Tamura, Takayuki; Tanaka, Takaaki; Tanaka, Yasuo; Tanaka, Yasuyuki T.; Tashiro, Makoto S.; Tawara, Yuzuru; Terada, Yukikatsu; Terashima, Yuichi; Tombesi, Francesco; Tomida, Hiroshi; Tsuboi, Yohko; Tsujimoto, Masahiro; Tsunemi, Hiroshi; Tsuru, Takeshi Go; Uchida, Hiroyuki; Uchiyama, Hideki; Uchiyama, Yasunobu; Ueda, Shutaro; Ueda, Yoshihiro; Uno, Shin'ichiro; Urry, C. Megan; Ursino, Eugenio; Watanabe, Shin; Werner, Norbert; Wilkins, Dan R.; Williams, Brian J.; Yamada, Shinya; Yamaguchi, Hiroya; Yamaoka, Kazutaka; Yamasaki, Noriko Y.; Yamauchi, Makoto; Yamauchi, Shigeo; Yaqoob, Tahir; Yatsu, Yoichi; Yonetoku, Daisuke; Zhuravleva, Irina; Zoghbi, Abderahmen; Raassen, A. J. J.: Atomic data and spectral modeling constraints from high-resolution X-ray observations of the Perseus cluster with Hitomi, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **70**, Issue 2, id.12, DOI: 10.1093/pasj/psx156 (2018)

Hitomi Collaboration; Aharonian, Felix; Akamatsu, Hiroki; Akimoto, Fumie; Allen, Steven W.; Angelini, Lorella; Audard, Marc; Awaki, Hisamitsu; Axelsson, Magnus; Bamba, Aya; Bautz, Marshall

W.; Blandford, Roger; Brenneman, Laura W.; Brown, Gregory V.; Bulbul, Esra; Cackett, Edward M.; Chernyakova, Maria; Chiao, Meng P.; Coppi, Paolo S.; Costantini, Elisa; de Plaa, Jelle; de Vries, Cor P.; den Herder, Jan-Willem; Done, Chris; Dotani, Tadayasu; Ebisawa, Ken; Eckart, Megan E.; Enoto, Teruaki; Ezoe, Yuichiro; Fabian, Andrew C.; Ferrigno, Carlo; Foster, Adam R.; Fujimoto, Ryuichi; Fukazawa, Yasushi; Furuzawa, Akihiro; Galeazzi, Massimiliano; Gallo, Luigi C.; Gandhi, Poshak; Giustini, Margherita; Goldwurm, Andrea; Gu, Liyi; Guainazzi, Matteo; Haba, Yoshito; Hagino, Kouichi; Hamaguchi, Kenji; Harrus, Ilana M.; Hatsukade, Isamu; Hayashi, Katsuhiko; Hayashi, Takayuki; Hayashida, Kiyoshi; Hiraga, Junko S.; Hornschemeier, Ann; Hoshino, Akio; Hughes, John P.; Ichinohe, Yuto; Iizuka, Ryo; Inoue, Hajime; Inoue, Yoshiyuki; Ishida, Manabu; Ishikawa, Kumi; Ishisaki, Yoshitaka; Iwai, Masachika; Kaastra, Jelle; Kallman, Tim; Kamae, Tsuneyoshi; Kataoka, Jun; Katsuda, Satoru; Kawai, Nobuyuki; Kelley, Richard L.; Kilbourne, Caroline A.; Kitaguchi, Takao; Kitamoto, Shunji; Kitayama, Tetsu; Kohmura, Takayoshi; Kokubun, Motohide; Koyama, Katsuji; Koyama, Shu; Kretschmar, Peter; Krimm, Hans A.; Kubota, Aya; Kunieda, Hideyo; Laurent, Philippe; Lee, Shiu-Hang; Leutenegger, Maurice A.; Limousin, Olivier O.; Loewenstein, Michael; Long, Knox S.; Lumb, David; Madejski, Greg; Maeda, Yoshitomo; Maier, Daniel; Makishima, Kazuo; Markevitch, Maxim; Matsumoto, Hironori; Matsushita, Kyoko; McCammon, Dan; McNamara, Brian R.; Mehdipour, Missagh; Miller, Eric D.; Miller, Jon M.; Mineshige, Shin; Mitsuda, Kazuhisa; Mitsuishi, Ikuyuki; Miyazawa, Takuya; Mizuno, Tsunefumi; Mori, Hideyuki; Mori, Koji; Mukai, Koji; Murakami, Hiroshi; Mushotzky, Richard F.; Nakagawa, Takao; Nakajima, Hiroshi; Nakamori, Takeshi; Nakashima, Shinya; Nakazawa, Kazuhiro; Nobukawa, Kumiko K.; Nobukawa, Masayoshi; Noda, Hirofumi; Odaka, Hirokazu; Ohashi, Takaya; Ohno, Masanori; Okajima, Takashi; Ota, Naomi; Ozaki, Masanobu; Paerels, Frits; Paltani, St é phane; Petre, Robert; Pinto, Ciro; Porter, Frederick S.; Pottschmidt, Katja; Reynolds, Christopher S.; Safi-Harb, Samar; Saito, Shinya; Sakai, Kazuhiro; Sasaki, Toru; Sato, Goro; Sato, Kosuke; Sato, Rie; Sawada, Makoto; Schartel, Norbert; Serlemitsos, Peter J.; Seta, Hiromi; Shidatsu, Megumi; Simionescu, Aurora; Smith, Randall K.; Soong, Yang; Stawarz, Ł ukasz; Sugawara, Yasuharu; Sugita, Satoshi; Szymkowiak, Andrew; Tajima, Hiroyasu; Takahashi, Hiromitsu; Takahashi, Tadayuki; Takeda, Shin'ichiro; Takei, Yoh; Tamagawa, Toru; Tamura, Takayuki; Tanaka, Takaaki; Tanaka, Yasuo; Tanaka, Yasuyuki T.; Tashiro, Makoto S.; Tawara, Yuzuru; Terada, Yukikatsu; Terashima, Yuichi; Tombesi, Francesco; Tomida, Hiroshi; Tsuboi, Yohko; Tsujimoto, Masahiro; Tsunemi, Hiroshi; Tsuru, Takeshi Go; Uchida, Hiroyuki; Uchiyama, Hideki; Uchiyama, Yasunobu; Ueda, Shutaro; Ueda, Yoshihiro; Uno, Shin'ichiro; Urry, C. Megan; Ursino, Eugenio; Watanabe, Shin; Werner, Norbert; Wilkins, Dan R.; Williams, Brian J.; Yamada, Shinya; Yamaguchi, Hiroya; Yamaoka, Kazutaka; Yamasaki, Noriko Y.; Yamauchi, Makoto; Yamauchi, Shigeo; Yaqoob, Tahir; Yatsu, Yoichi; Yonetoku, Daisuke; Zhuravleva, Irina; Zoghbi, Abderahmen; Kawamuro, Taiki: Hitomi observation of radio galaxy NGC 1275: The first X-ray microcalorimeter spectroscopy of Fe-K α line emission from an active galactic nucleus, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **70**, Issue 2, id.13, DOI: 10.1093/pasj/psx147

Hitomi Collaboration; Aharonian, Felix; Akamatsu, Hiroki; Akimoto, Fumie; Allen, Steven W.; Angelini, Lorella; Audard, Marc; Awaki, Hisamitsu; Axelsson, Magnus; Bamba, Aya; Bautz, Marshall W.; Blandford, Roger; Brenneman, Laura W.; Brown, Gregory V.; Bulbul, Esra; Cackett, Edward M.; Chernyakova, Maria; Chiao, Meng P.; Coppi, Paolo S.; Costantini, Elisa; de Plaa, Jelle; de Vries,

Cor P.; den Herder, Jan-Willem; Done, Chris; Dotani, Tadayasu; Ebisawa, Ken; Eckart, Megan E.; Enoto, Teruaki; Ezoe, Yuichiro; Fabian, Andrew C.; Ferrigno, Carlo; Foster, Adam R.; Fujimoto, Ryuichi; Fukazawa, Yasushi; Furuzawa, Akihiro; Galeazzi, Massimiliano; Gallo, Luigi C.; Gandhi, Poshak; Giustini, Margherita; Goldwurm, Andrea; Gu, Liyi; Guainazzi, Matteo; Haba, Yoshito; Hagino, Kouichi; Hamaguchi, Kenji; Harrus, Ilana M.; Hatsukade, Isamu; Hayashi, Katsuhiko; Hayashi, Takayuki; Hayashida, Kiyoshi; Hiraga, Junko S.; Hornschemeier, Ann; Hoshino, Akio; Hughes, John P.; Ichinohe, Yuto; Iizuka, Ryo; Inoue, Hajime; Inoue, Yoshiyuki; Ishida, Manabu; Ishikawa, Kumi; Ishisaki, Yoshitaka; Kaastra, Jelle; Kallman, Tim; Kamae, Tsuneyoshi; Kataoka, Jun; Katsuda, Satoru; Kawai, Nobuyuki; Kelley, Richard L.; Kilbourne, Caroline A.; Kitaguchi, Takao; Kitamoto, Shunji; Kitayama, Tetsu; Kohmura, Takayoshi; Kokubun, Motohide; Koyama, Katsuji; Koyama, Shu; Kretschmar, Peter; Krimm, Hans A.; Kubota, Aya; Kunieda, Hideyo; Laurent, Philippe; Lee, Shiu-Hang; Leutenegger, Maurice A.; Limousin, Olivier; Loewenstein, Michael; Long, Knox S.; Lumb, David; Madejski, Greg; Maeda, Yoshitomo; Maier, Daniel; Makishima, Kazuo; Markevitch, Maxim; Matsumoto, Hironori; Matsushita, Kyoko; McCammon, Dan; McNamara, Brian R.; Mehdipour, Missagh; Miller, Eric D.; Miller, Jon M.; Mineshige, Shin; Mitsuda, Kazuhisa; Mitsushishi, Ikuyuki; Miyazawa, Takuya; Mizuno, Tsunefumi; Mori, Hideyuki; Mori, Koji; Mukai, Koji; Murakami, Hiroshi; Mushotzky, Richard F.; Nakagawa, Takao; Nakajima, Hiroshi; Nakamori, Takeshi; Nakashima, Shinya; Nakazawa, Kazuhiro; Nobukawa, Kumiko K.; Nobukawa, Masayoshi; Noda, Hirofumi; Odaka, Hirokazu; Ohashi, Takaya; Ohno, Masanori; Okajima, Takashi; Ota, Naomi; Ozaki, Masanobu; Paerels, Frits; Paltani, St é phane; Petre, Robert; Pinto, Ciro; Porter, Frederick S.; Pottschmidt, Katja; Reynolds, Christopher S.; Safi-Harb, Samar; Saito, Shinya; Sakai, Kazuhiro; Sasaki, Toru; Sato, Goro; Sato, Kosuke; Sato, Rie; Sato, Toshiki; Sawada, Makoto; Schartel, Norbert; Serlemitsos, Peter J.; Seta, Hiromi; Shidatsu, Megumi; Simionescu, Aurora; Smith, Randall K.; Soong, Yang; Stawarz, Ł ukasz; Sugawara, Yasuharu; Sugita, Satoshi; Szymkowiak, Andrew; Tajima, Hiroyasu; Takahashi, Hiromitsu; Takahashi, Tadayuki; Takeda, Shin'ichiro; Takei, Yoh; Tamagawa, Toru; Tamura, Takayuki; Tanaka, Takaaki; Tanaka, Yasuo; Tanaka, Yasuyuki T.; Tashiro, Makoto S.; Tawara, Yuzuru; Terada, Yukikatsu; Terashima, Yuichi; Tombesi, Francesco; Tomida, Hiroshi; Tsuboi, Yohko; Tsujimoto, Masahiro; Tsunemi, Hiroshi; Tsuru, Takeshi Go; Uchida, Hiroyuki; Uchiyama, Hideki; Uchiyama, Yasunobu; Ueda, Shutaro; Ueda, Yoshihiro; Uno, Shin'ichiro; Urry, C. Megan; Ursino, Eugenio; Watanabe, Shin; Werner, Norbert; Wilkins, Dan R.; Williams, Brian J.; Yamada, Shinya; Yamaguchi, Hiroya; Yamaoka, Kazutaka; Yamasaki, Noriko Y.; Yamauchi, Makoto; Yamauchi, Shigeo; Yaqoob, Tahir; Yatsu, Yoichi; Yonetoku, Daisuke; Zhuravleva, Irina; Zoghbi, Abderahmen; Tominaga, Nozomu; Moriya, Takashi J.: Search for thermal X-ray features from the Crab nebula with the Hitomi soft X-ray spectrometer, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **70**, Issue 2, id.14, DOI: 10.1093/pasj/psx072 (2018)

Hitomi Collaboration; Aharonian, Felix; Akamatsu, Hiroki; Akimoto, Fumie; Allen, Steven W.; Angelini, Lorella; Audard, Marc; Awaki, Hisamitsu; Axelsson, Magnus; Bamba, Aya; Bautz, Marshall W.; Blandford, Roger; Brenneman, Laura W.; Brown, Gregory V.; Bulbul, Esra; Cackett, Edward M.; Chernyakova, Maria; Chiao, Meng P.; Coppi, Paolo S.; Costantini, Elisa; de Plaa, Jelle; de Vries, Cor P.; den Herder, Jan-Willem; Done, Chris; Dotani, Tadayasu; Ebisawa, Ken; Eckart, Megan E.; Enoto, Teruaki; Ezoe, Yuichiro; Fabian, Andrew C.; Ferrigno, Carlo; Foster, Adam R.; Fujimoto, Ryuichi;

Fukazawa, Yasushi; Furuzawa, Akihiro; Galeazzi, Massimiliano; Gallo, Luigi C.; Gandhi, Poshak; Giustini, Margherita; Goldwurm, Andrea; Gu, Liyi; Guainazzi, Matteo; Haba, Yoshito; Hagino, Kouichi; Hamaguchi, Kenji; Harrus, Ilana M.; Hatsukade, Isamu; Hayashi, Katsuhiko; Hayashi, Takayuki; Hayashida, Kiyoshi; Hiraga, Junko S.; Hornschemeier, Ann; Hoshino, Akio; Hughes, John P.; Ichinohe, Yuto; Iizuka, Ryo; Inoue, Hajime; Inoue, Yoshiyuki; Ishida, Manabu; Ishikawa, Kumi; Ishisaki, Yoshitaka; Iwai, Masachika; Kaastra, Jelle; Kallman, Tim; Kamae, Tsuneyoshi; Kataoka, Jun; Katsuda, Satoru; Kawai, Nobuyuki; Kelley, Richard L.; Kilbourne, Caroline A.; Kitaguchi, Takao; Kitamoto, Shunji; Kitayama, Tetsu; Kohmura, Takayoshi; Kokubun, Motohide; Koyama, Katsuji; Koyama, Shu; Kretschmar, Peter; Krimm, Hans A.; Kubota, Aya; Kunieda, Hideyo; Laurent, Philippe; Lee, Shiu-Hang; Leutenegger, Maurice A.; Limousin, Olivier O.; Loewenstein, Michael; Long, Knox S.; Lumb, David; Madejski, Greg; Maeda, Yoshitomo; Maier, Daniel; Makishima, Kazuo; Markevitch, Maxim; Matsumoto, Hironori; Matsushita, Kyoko; McCammon, Dan; McNamara, Brian R.; Mehdipour, Missagh; Miller, Eric D.; Miller, Jon M.; Mineshige, Shin; Mitsuda, Kazuhisa; Mitsui, Ikuyuki; Miyazawa, Takuya; Mizuno, Tsunefumi; Mori, Hideyuki; Mori, Koji; Mukai, Koji; Murakami, Hiroshi; Mushotzky, Richard F.; Nakagawa, Takao; Nakajima, Hiroshi; Nakamori, Takeshi; Nakashima, Shinya; Nakazawa, Kazuhiko; Nobukawa, Kumiko K.; Nobukawa, Masayoshi; Noda, Hirofumi; Odaka, Hirokazu; Ohashi, Takaya; Ohno, Masanori; Okajima, Takashi; Oshimiz, Kenya; Ota, Naomi; Ozaki, Masanobu; Paerels, Frits; Paltani, St é phane; Petre, Robert; Pinto, Ciro; Porter, Frederick S.; Pottschmidt, Katja; Reynolds, Christopher S.; Safi-Harb, Samar; Saito, Shinya; Sakai, Kazuhiko; Sasaki, Toru; Sato, Goro; Sato, Kosuke; Sato, Rie; Sawada, Makoto; Scharrel, Norbert; Serlemitsos, Peter J.; Seta, Hiromi; Shidatsu, Megumi; Simionescu, Aurora; Smith, Randall K.; Soong, Yang; Stawarz, Ł ukasz; Sugawara, Yasuharu; Sugita, Satoshi; Szymkowiak, Andrew; Tajima, Hiroyasu; Takahashi, Hiromitsu; Takahashi, Tadayuki; Takeda, Shin í chiro; Takei, Yoh; Tamagawa, Toru; Tamura, Takayuki; Tanaka, Takaaki; Tanaka, Yasuo; Tanaka, Yasuyuki T.; Tashiro, Makoto S.; Tawara, Yuzuru; Terada, Yukikatsu; Terashima, Yuichi; Tombesi, Francesco; Tomida, Hiroshi; Tsuboi, Yohko; Tsujimoto, Masahiro; Tsunemi, Hiroshi; Tsuru, Takeshi Go; Uchida, Hiroyuki; Uchiyama, Hideki; Uchiyama, Yasunobu; Ueda, Shutaro; Ueda, Yoshihiro; Uno, Shin í chiro; Urry, C. Megan; Ursino, Eugenio; Watanabe, Shin; Werner, Norbert; Wilkins, Dan R.; Williams, Brian J.; Yamada, Shinya; Yamaguchi, Hiroya; Yamaoka, Kazutaka; Yamasaki, Noriko Y.; Yamauchi, Makoto; Yamauchi, Shigeo; Yaqoob, Tahir; Yatsu, Yoichi; Yonetoku, Daisuke; Zhuravleva, Irina; Zoghbi, Abderahmen; Terasawa, Toshio; Sekido, Mamoru; Takefuji, Kazuhiko; Kawai, Eiji; Misawa, Hiroaki; Tsuchiya, Fuminori; Yamazaki, Ryo; Kobayashi, Eiji; Kisaka, Shota; Aoki, Takahiro: Hitomi X-ray studies of giant radio pulses from the Crab pulsar *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **70**, Issue 2, id.15, DOI: 10.1093/pasj/psx083 (2018)

Hitomi Collaboration; Aharonian, Felix; Akamatsu, Hiroki; Akimoto, Fumie; Allen, Steven W.; Angelini, Lorella; Audard, Marc; Awaki, Hisamitsu; Axelsson, Magnus; Bamba, Aya; Bautz, Marshall W.; Blandford, Roger; Brenneman, Laura W.; Brown, Gregory V.; Bulbul, Esra; Cackett, Edward M.; Chernyakova, Maria; Chiao, Meng P.; Coppi, Paolo S.; Costantini, Elisa; de Plaa, Jelle; de Vries, Cor P.; den Herder, Jan-Willem; Done, Chris; Dotani, Tadayasu; Ebisawa, Ken; Eckart, Megan E.; Enoto, Teruaki; Ezoe, Yuichiro; Fabian, Andrew C.; Ferrigno, Carlo; Foster, Adam R.; Fujimoto, Ryuichi; Fukazawa, Yasushi; Furuzawa, Akihiro; Galeazzi, Massimiliano; Gallo, Luigi C.;

Gandhi, Poshak; Giustini, Margherita; Goldwurm, Andrea; Gu, Liyi; Guainazzi, Matteo; Haba, Yoshito; Hagino, Kouichi; Hamaguchi, Kenji; Harrus, Ilana M.; Hatsukade, Isamu; Hayashi, Katsuhiko; Hayashi, Takayuki; Hayashida, Kiyoshi; Hiraga, Junko S.; Hornschemeier, Ann; Hoshino, Akio; Hughes, John P.; Ichinohe, Yuto; Iizuka, Ryo; Inoue, Hajime; Inoue, Yoshiyuki; Ishida, Manabu; Ishikawa, Kumi; Ishisaki, Yoshitaka; Iwai, Masachika; Kaastra, Jelle; Kallman, Tim; Kamae, Tsuneyoshi; Kataoka, Jun; Katsuda, Satoru; Kawai, Nobuyuki; Kelley, Richard L.; Kilbourne, Caroline A.; Kitaguchi, Takao; Kitamoto, Shunji; Kitayama, Tetsu; Kohmura, Takayoshi; Kokubun, Motohide; Koyama, Katsuji; Koyama, Shu; Kretschmar, Peter; Krimm, Hans A.; Kubota, Aya; Kunieda, Hideyo; Laurent, Philippe; Lee, Shiu-Hang; Leutenegger, Maurice A.; Limousin, Olivier; Loewenstein, Michael; Long, Knox S.; Lumb, David; Madejski, Greg; Maeda, Yoshitomo; Maier, Daniel; Makishima, Kazuo; Markevitch, Maxim; Matsumoto, Hironori; Matsushita, Kyoko; McCammon, Dan; McNamara, Brian R.; Mehdipour, Missagh; Miller, Eric D.; Miller, Jon M.; Mineshige, Shin; Mitsuda, Kazuhisa; Mitsuishi, Ikuyuki; Miyazawa, Takuya; Mizuno, Tsunefumi; Mori, Hideyuki; Mori, Koji; Mukai, Koji; Murakami, Hiroshi; Mushotzky, Richard F.; Nakagawa, Takao; Nakajima, Hiroshi; Nakamori, Takeshi; Nakashima, Shinya; Nakazawa, Kazuhiko; Nobukawa, Kumiko K.; Nobukawa, Masayoshi; Noda, Hirofumi; Odaka, Hirokazu; Ohashi, Takaya; Ohno, Masanori; Okajima, Takashi; Ota, Naomi; Ozaki, Masanobu; Paerels, Frits; Paltani, St é phane; Petre, Robert; Pinto, Ciro; Porter, Frederick S.; Pottschmidt, Katja; Reynolds, Christopher S.; Safi-Harb, Samar; Saito, Shinya; Sakai, Kazuhiro; Sasaki, Toru; Sato, Goro; Sato, Kosuke; Sato, Rie; Sato, Toshiki; Sawada, Makoto; Schartel, Norbert; Serlemitsos, Peter J.; Seta, Hiromi; Shidatsu, Megumi; Simionescu, Aurora; Smith, Randall K.; Soong, Yang; Stawarz, Ł ukasz; Sugawara, Yasuharu; Sugita, Satoshi; Szymkowiak, Andrew; Tajima, Hiroyasu; Takahashi, Hiromitsu; Takahashi, Tadayuki; Takeda, Shin'ichiro; Takei, Yoh; Tamagawa, Toru; Tamura, Takayuki; Tanaka, Takaaki; Tanaka, Yasuo; Tanaka, Yasuyuki T.; Tashiro, Makoto S.; Tawara, Yuzuru; Terada, Yukikatsu; Terashima, Yuichi; Tombesi, Francesco; Tomida, Hiroshi; Tsuboi, Yohko; Tsujimoto, Masahiro; Tsunemi, Hiroshi; Tsuru, Takeshi Go; Uchida, Hiroyuki; Uchiyama, Hideki; Uchiyama, Yasunobu; Ueda, Shutaro; Ueda, Yoshihiro; Uno, Shin'ichiro; Urry, C. Megan; Ursino, Eugenio; Watanabe, Shin; Werner, Norbert; Wilkins, Dan R.; Williams, Brian J.; Yamada, Shinya; Yamaguchi, Hiroya; Yamaoka, Kazutaka; Yamasaki, Noriko Y.; Yamauchi, Makoto; Yamauchi, Shigeo; Yaqoob, Tahir; Yatsu, Yoichi; Yonetoku, Daisuke; Zhuravleva, Irina; Zoghbi, Abderahmen: Hitomi observations of the LMC SNR N 132 D: Highly redshifted X-ray emission from iron ejecta, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **70**, Issue 2, id.16, DOI: 10.1093/pasj/psx151 (2018)

Hitomi Collaboration; Aharonian, Felix; Akamatsu, Hiroki; Akimoto, Fumie; Allen, Steven W.; Angelini, Lorella; Audard, Marc; Awaki, Hisamitsu; Axelsson, Magnus; Bamba, Aya; Bautz, Marshall W.; Blandford, Roger; Brenneman, Laura W.; Brown, Gregory V.; Bulbul, Esra; Cackett, Edward M.; Chernyakova, Maria; Chiao, Meng P.; Coppi, Paolo S.; Costantini, Elisa; de Plaa, Jelle; de Vries, Cor P.; den Herder, Jan-Willem; Done, Chris; Dotani, Tadayasu; Ebisawa, Ken; Eckart, Megan E.; Enoto, Teruaki; Ezoe, Yuichiro; Fabian, Andrew C.; Ferrigno, Carlo; Foster, Adam R.; Fujimoto, Ryuichi; Fukazawa, Yasushi; Furuzawa, Akihiro; Galeazzi, Massimiliano; Gallo, Luigi C.; Gandhi, Poshak; Giustini, Margherita; Goldwurm, Andrea; Gu, Liyi; Guainazzi, Matteo; Haba, Yoshito; Hagino, Kouichi; Hamaguchi, Kenji; Harrus, Ilana M.; Hatsukade, Isamu; Hayashi, Kat-

suhiro; Hayashi, Takayuki; Hayashida, Kiyoshi; Hiraga, Junko S.; Hornschemeier, Ann; Hoshino, Akio; Hughes, John P.; Ichinohe, Yuto; Iizuka, Ryo; Inoue, Hajime; Inoue, Yoshiyuki; Ishida, Manabu; Ishikawa, Kumi; Ishisaki, Yoshitaka; Iwai, Masachika; Kaastra, Jelle; Kallman, Tim; Kamae, Tsuneyoshi; Kataoka, Jun; Katsuda, Satoru; Kawai, Nobuyuki; Kelley, Richard L.; Kilbourne, Caroline A.; Kitaguchi, Takao; Kitamoto, Shunji; Kitayama, Tetsu; Kohmura, Takayoshi; Kokubun, Motohide; Koyama, Katsuji; Koyama, Shu; Kretschmar, Peter; Krimm, Hans A.; Kubota, Aya; Kunieda, Hideyo; Laurent, Philippe; Lee, Shiu-Hang; Leutenegger, Maurice A.; Limousin, Olivier O.; Loewenstein, Michael; Long, Knox S.; Lumb, David; Madejski, Greg; Maeda, Yoshitomo; Maier, Daniel; Makishima, Kazuo; Markevitch, Maxim; Matsumoto, Hironori; Matsushita, Kyoko; McCammon, Dan; McNamara, Brian R.; Mehdipour, Missagh; Miller, Eric D.; Miller, Jon M.; Mineshige, Shin; Mitsuda, Kazuhisa; Mitsuishi, Ikuyuki; Miyazawa, Takuya; Mizuno, Tsunefumi; Mori, Hideyuki; Mori, Koji; Mukai, Koji; Murakami, Hiroshi; Mushotzky, Richard F.; Nakagawa, Takao; Nakajima, Hiroshi; Nakamori, Takeshi; Nakashima, Shinya; Nakazawa, Kazuhiro; Nobukawa, Kumiko K.; Nobukawa, Masayoshi; Noda, Hirofumi; Odaka, Hirokazu; Ohashi, Takaya; Ohno, Masanori; Okajima, Takashi; Ota, Naomi; Ozaki, Masanobu; Paerels, Frits; Paltani, St é phane; Petre, Robert; Pinto, Ciro; Porter, Frederick S.; Pottschmidt, Katja; Reynolds, Christopher S.; Safi-Harb, Samar; Saito, Shinya; Sakai, Kazuhiro; Sasaki, Toru; Sato, Goro; Sato, Kosuke; Sato, Rie; Sawada, Makoto; Schartel, Norbert; Serlemitsos, Peter J.; Seta, Hiromi; Shidatsu, Megumi; Simionescu, Aurora; Smith, Randall K.; Soong, Yang; Stawarz, Ł ukasz; Sugawara, Yasuharu; Sugita, Satoshi; Szymkowiak, Andrew; Tajima, Hiroyasu; Takahashi, Hiromitsu; Takahashi, Tadayuki; Takeda, Shin í chiro; Takei, Yoh; Tamagawa, Toru; Tamura, Takayuki; Tanaka, Takaaki; Tanaka, Yasuo; Tanaka, Yasuyuki T.; Tashiro, Makoto S.; Tawara, Yuzuru; Terada, Yukikatsu; Terashima, Yuichi; Tombesi, Francesco; Tomida, Hiroshi; Tsuboi, Yohko; Tsujimoto, Masahiro; Tsunemi, Hiroshi; Tsuru, Takeshi Go; Uchida, Hiroyuki; Uchiyama, Hideki; Uchiyama, Yasunobu; Ueda, Shutaro; Ueda, Yoshihiro; Uno, Shin í chiro; Urry, C. Megan; Ursino, Eugenio; Watanabe, Shin; Werner, Norbert; Wilkins, Dan R.; Williams, Brian J.; Yamada, Shinya; Yamaguchi, Hiroya; Yamaoka, Kazutaka; Yamasaki, Noriko Y.; Yamauchi, Makoto; Yamauchi, Shigeo; Yaqoob, Tahir; Yatsu, Yoichi; Yonetoku, Daisuke; Zhuravleva, Irina; Zoghbi, Abderahmen; Nakaniwa, Nozomi: Glimpse of the highly obscured HMXB IGR J16318-4848 with Hitomi, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **70**, Issue 2, id.17, DOI: 10.1093/pasj/psx154 (2018)

Hori, T.; Shidatsu, M.; Ueda, Y.; Kawamuro, T.; Morii, M.; Nakahira, S.; Isobe, N.; Kawai, N.; Mihara, T.; Matsuoka, M.; Morita, T.; Nakajima, M.; Negoro, H.; Oda, S.; Sakamoto, T.; Serino, M.; Sugizaki, M.; Tanimoto, A.; Tomida, H.; Tsuboi, Y.; Tsunemi, H.; Ueno, S.; Yamaoka, K.; Yamada, S.; Yoshida, A.; Iwakiri, W.; Kawakubo, Y.; Sugawara, Y.; Sugita, S.; Tachibana, Y.; Yoshii, T.: The 7-year MAXI/GSC Source Catalog of the Low-Galactic-latitude Sky (3MAXI), *The Astrophysical Journal Supplement Series*, **235**, Issue 1, article id. 7, 40 pp., DOI: 10.3847/1538-4365/aaa89c (2018)

2) 国際会議報告

Akamatsu, H.; Fujita, Y.; Akahori, T.; Ishisaki, Y.; Hayashida, K.; Hoshino, A.; Mernier, F.; Yoshikawa, K.; Sato, K.; Kaastra, J.: Properties of the cosmological filament between two clusters: detection of a large-scale accretion shock by Suzaku, *The X-ray Universe 2017*, Proceedings of the conference held 6-9 June, 2017 in Rome, Italy. Edited by J.-U. Ness and S. Migliari. Online at <https://www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton/2017-symposium>, p.30 (2017)

Ohashi, T.; Hitomi Collaboration: Overview of science results from Hitomi, *The X-ray Universe 2017*, Proceedings of the conference held 6-9 June, 2017 in Rome, Italy. Edited by J.-U. Ness and S. Migliari. Online at <https://www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton/2017-symposium>, p.163

Ishi, D.; Ishikawa, K.; Ezoe, Y.; Ohashi, T.; Miyoshi, Y.; Terada, N. A Systematic Search for Solar Wind Charge Exchange Emission from the Earth's Exosphere with Suzaku, *The X-ray Universe 2017*, Proceedings of the conference held 6-9 June, 2017 in Rome, Italy. Edited by J.-U. Ness and S. Migliari. Online at <https://www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton/2017-symposium>, p.103 (2017)

Numazawa, M.; Ezoe, Y.; Ishikawa, K.; Ohashi, T.; Miyoshi, Y.; Kimura, T.; Uchiyama, Y.: Suzaku observation of Jovian X-rays around solar maximum, *The X-ray Universe 2017*, Proceedings of the conference held 6-9 June, 2017 in Rome, Italy. Edited by J.-U. Ness and S. Migliari. Online at <https://www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton/2017-symposium>, p.161 (2017)

Urdampilleta, I.; Akamatsu, H.; Mernier, F.; Kaastra, J.; de Plaa, J.; Ohashi, T.; Ishisaki, Y.; Kawahara, H.: X-ray study of the merging double-radio-relic cluster Abell 3376 with Suzaku, *The X-ray Universe 2017*, Proceedings of the conference held 6-9 June, 2017 in Rome, Italy. Edited by J.-U. Ness and S. Migliari. Online at <https://www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton/2017-symposium>, p.229 (2017)

Tsujimoto, M.; Tashiro, M. S.; Ishisaki, Y.; Yamada, S.; Seta, H.; Mitsuda, K.; Boyce, K. R.; Eckart, M. E.; Kilbourne, C. A.; Leutenegger, M. A.; Porter, F. S.; Kelley, R. L.: In-Orbit Performance of the Digital Electronics for the X-Ray Microcalorimeter Onboard the Hitomi Satellite, *Journal of Low Temperature Physics*, Online First, DOI: 10.1007/s10909-018-1861-z (2018)

3) 学会講演

国内学会

● 磁気流体プラズマで探る高エネルギー天体現象研究会、2017年8月28-30日 (JAMSTEC)

山田真也: 「ブラックホール連星の状態遷移と時間変動」 (招待講演)

● 応用物理学会 2017年秋季年会 2017年9月5-8日 (福岡国際センター)

寺田 優、沼澤 正樹、江副 祐一郎、武内 数馬、伊師 大貴、藤谷 麻衣子、大橋 隆哉、石川 久美、満田 和久、森下 浩平: MEMS X線光学系の表面形状測定による鏡配置精度の評価

伊師 大貴、江副 祐一郎、石川 久美、沼澤 正樹、武内 数馬、寺田 優、藤谷 麻衣子、糸山 隆仁、大坪 亮太、福島 碧斗、大橋 隆哉、金森 義明、満田 和久: 超軽量 X線光学系の表面粗さ改善に向けた長時間アニール

武内 数馬、江副 祐一郎、石川 久美、沼澤 正樹、寺田 優、伊師 大貴、藤谷 麻衣子、糸山 隆仁、大坪 亮太、福島 碧都、Sowa Mark J.、大橋 隆哉、満田 和久: 原子層堆積法によるシリコン X線微細孔工学系の Pt 膜付け加工

● 日本天文学会 2017年秋季年会 2017年9月11-13日 (北海道大学)

早川亮大, 山田真也, 大橋隆哉 (首都大), 根来 均 (日大) : ブラックホール連星 MAXIJ1659-152 の準周期的振動とスペクトルの相関

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 (ISAS/JAXA), 田原 譲, 三石郁之 (名古屋大), 太田直美 (奈良女子大), 佐藤浩介 (東京理科大), 旧 DIOS ワーキンググループ : ダークバリオン探査ミッション Super DIOS の開発へ向けた検討

江副祐一郎, 福島碧都, 大橋隆哉 (首都大), 石川久美 (JAXA 宇宙研) : X 線天文衛星「すざく」と XMM-Newton による HD162020 の観測

石崎欣尚, 江副祐一郎, 山田真也, 一戸悠人 (首都大), 藤本龍一 (金沢大), 竹井洋, 安田進, 石田学, 山崎典子, 前田良知, 辻本匡弘, 飯塚亮, 小山志勇 (JAXA), 野田博文 (東北大), 玉川徹 (理研), 澤田真理 (青山学院大), 佐藤浩介 (東京理科大), 北本俊二, 星野晶夫 (立教大), G.V.Brown (LLNL), M.Eckart, T.Hayashi, R.L.Kelley, C.A.Kilbourne, M.A.Leutenegger, H.Mori, T.Okajima, F.S.Porter, Y.Soong (NASA), D.McCammon (U-Wisconsin), A.E.Szymkowiak (Yale-U), ほか XARM Resolve チーム : X 線天文衛星代替機 (XARM) 搭載の軟 X 線分光器 Resolve の検討状況

福島碧都, 江副祐一郎, 大橋隆哉 (首都大学東京), 濱口健二 (NASA/GSFC & UMBC) : 「すざく」衛星によるカリーナ星雲南西部に広がった軟 X 線放射の解析

● 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 142 回総会及び講演会 (2017 年秋学会) 2017 年 10 月 15-19 日 (おうばくプラザきはだホール, 京都大学宇治キャンパス)

伊師 大貴, 石川 久美, 江副 祐一郎, 大橋 隆哉 : 「すざく」衛星によるコロナ質量放出に伴う地球外圏からの広がった X 線放射の観測

● 第二回 X 線望遠鏡研究会, 2017 年 11 月 18 日 (名古屋大学)

江副祐一郎: 「Si ウェハを用いた軽量 X 線望遠鏡の開発と将来展望」 (招待講演)

● 高エネルギー天文学・宇宙物理学の観測と理論研究会 X @広島, 2018 年 3 月 1-2 日 (広島大学)

山田真也: 「精密 X 線分光技術の将来展望とそのサイエンス」 (招待講演)

● 「巨大ブラックホール降着流における X 線放射領域の形成と時間変動機構の解明」ミニワークショップ 2018 年 3 月 5-6 日 (千葉大学)

山田真也: ブラックホール連星の X 線準周期的”強度変動”の速い”周波数変動”

● 第 17 回高宇連研究会「ひとみ衛星の成果と将来への展望」2018 年 3 月 7-9 日 (首都大学東京)

江副 祐一郎 : 超小型衛星を用いた地球磁気圏 X 線撮像計画

● 日本天文学会 2018 年春季年会 2018 年 3 月 14-17 日 (千葉大学)

大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 山田真也, 一戸悠人 (首都大), 山崎典子, 満田和久 (ISAS/JAXA), 田原 譲, 三石郁之 (名古屋大), 大里 健 (東京大), 太田直美 (奈良女子大), 佐藤浩介 (埼玉大), 旧 DIOS ワーキンググループ : ダークバリオン探査ミッション Super DIOS の開発へ向けた検討 II

山田真也 (首都大), 岡田信二, 東俊行, 久間晋, 中野俊男 (理研), 中野祐司 (立教), D.A. Bennett, W.B. Doriese, J.W. Fowler, J. Hays-Wehle, G. Hilton, G.C. O'Neil, C.D. Reintsema, D.R. Schmidt, D.S. Swetz, J.N. Ullom (NIST), 橋本直 (原研), 早川亮大, 一戸悠人, 石崎欣尚, 竜野秀行 (首都大), 野田博文 (東北大), 上田周太郎 (ISAS/JAXA) 超伝導カロリメータを用いた低温下の星間分子計測実験 (1)

中庭 望, 江副祐一郎, 沼澤正樹, 佐藤拓郎 (首都大学東京), 石田 學, 石川久美, 満田和久 (ISAS/JAXA), 森下浩平, 中嶋一雄 (東北大学): 次世代 X 線天文衛星を目指すシリコン高温塑性変形を用いた全反射鏡の開発

浅井龍太, 中庭望, 倉嶋翔, 佐藤寿紀, 武尾舞, 石田学 (首都大/宇宙研), 飯塚亮, 前田良知 (宇宙研): JAXA 宇宙科学研究所標準平行 X 線光源室用可視光平行光源の立ち上げと性能評価

Y. Ishisaki, R.L. Kelley^A, H. Akamatsu^B, H. Awaki^C, T.G. Bialas^A, G.V. Brown^D, M.P. Chiao^A, E. Costantini^B, J.-W. den Herder^B, M.J. Dipirro^A, M.E. Eckart^A, Y. Ezoe, C. Ferrigno^E, R. Fujimoto^F, A. Furuzawa^G, S.M. Graham^A, M. Grim^B, T. Hayashi^A, A. Hoshino^A, Y. Ichinohe, R. Iizuka^H, K. Ishibashi^I, M. Ishida^H, K. Ishikawa^H, C.A. Kilbourne^A, S. Kitamoto^J, S. Koyama^H, M.A. Leutenegger^A, Y. Maeda^H, D. McCammon^K, I. Mitsuishi^I, H. Mori^A, S. Nakashima^L, H. Noda^M, T. Ohashi, T. Okajima^A, S. Paltani^E, F.S. Porter^A, K. Sato^N, M. Sawada^A, H. Seta, P.J. Shirron^A, G.A. Sneiderman^A, Y. Soong^A, A.E. Szymkowiak^O, Y. Takei^H, T. Tamagawa^L, M. Tsujimoto^H, S. Ueda^H, C.P. deVries^B, S. Yamada, N.Y. Yamasaki^H (首都大, NASA^A, SRON^B, 愛媛大^C, LLNL^D, U-Geneva^E, 金沢大^F, 藤田保健衛生大^G, JAXA^H, 名古屋大^I, 立教大^J, U-Wisconsin^K, RIKEN^L, 東北大^M, 埼玉大^N, Yale-U^O): X 線天文衛星代替機 XARM 搭載 Resolve の開発の現状

武尾 舞, 佐藤寿紀, 中庭 望, 浅井龍太, 大橋隆哉 (首都大), 石田 學, 前田良知, 飯塚 亮 (宇宙研): Pt/C 多層膜ブラッグ反射による低エネルギー X 線用分光器の開発

早川亮大, 山田真也, 石崎 欣尚, 一戸悠人 (首都大理), D.A. Bennett, W.B. Doriese, J.W. Fowler, D.R. Schmidt, D.S. Swetz, J.N. Ullom (NIST), 岡田信二 (理研), 橋本直 (原研), 野田博文 (東北大), 竜野秀行 (ルンド大), HEATES チーム: 超伝導 TES カロリメータを用いた K 中間子原子の X 線精密分光プロジェクト (4)

伊師大貴 (首都大), 石川久美 (ISAS), 江副祐一郎 (首都大), 三好由純 (名古屋大), 寺田直樹 (東北大), 満田和久 (ISAS), 大橋隆哉 (首都大): コロナ質量放出から時間遅延した地球周辺の電荷交換 X 線イベントの検出

須永夏帆, 一戸悠人, 山田真也, 宮崎直人 (首都大), 斎藤真也, 内山泰伸 (立教): 機械学習を用いた熱的プラズマのパラメータ推定の自動化

● 日本物理学会 2018 年春季大会 2018 年 3 月 22-25 日 (東京理科大学野田キャンパス)

田代信, 前島弘則, 戸田謙一, Richard Kelley, Lillian Reichenthal, James Lobell, Robert Petre, Matteo Guainazzi, Lorella Angelini, Elisa Costantini, Mark Edison, 藤本龍一, Martin Grim, 林田清, Jan-Willem den Herder, 石崎欣尚, Stephane Paltani, 松下恭子, 森浩二, Gary Sneiderman, 竹井洋, 寺田幸功, 富田洋, and XARM team: X 線天文衛星代替機の現状

Y. Ishisaki, R.L. Kelley^A, H. Akamatsu^B, H. Awaki^C, T.G. Bialas^A, G.V. Brown^D, M.P. Chiao^A, E. Costantini^B, J.-W. den Herder^B, M.J. Dipirro^A, M.E. Eckart^A, Y. Ezoe, C. Ferrigno^E, R. Fujimoto^F,

A. Furuzawa^G, S.M. Graham^A, M. Grim^B, T. Hayashi^A, A. Hoshino^A, Y. Ichinohe, R. Iizuka^H, K. Ishibashi^I, M. Ishida^H, K. Ishikawa^H, C.A. Kilbourne^A, S. Kitamoto^J, S. Koyama^H, M.A. Leutenegger^A, Y. Maeda^H, D. McCammon^K, I. Mitsuishi^I, H. Mori^A, S. Nakashima^L, H. Noda^M, T. Ohashi, T. Okajima^A, S. Paltani^E, F.S. Porter^A, K. Sato^N, M. Sawada^A, H. Seta, P.J. Shirron^A, G.A. Sneiderman^A, Y. Soong^A, A.E. Szymkowiak^O, Y. Takei^H, T. Tamagawa^L, M. Tsujimoto^H, S. Ueda^H, C.P. deVries^B, S. Yamada, N.Y. Yamasaki^H (首都大, NASA^A, SRON^B, 愛媛大^C, LLNL^D, U-Geneva^E, 金沢大^F, 藤田保健衛生大^G, JAXA^H, 名古屋大^I, 立教大^J, U-Wisconsin^K, RIKEN^L, 東北大^M, 埼玉大^N, Yale-U^O): X線天文衛星代替機 XARM 搭載 Resolve の開発の現状

国際会議

● The X-Ray Universe 2017, Rome, Italy, June 6 – 9, 2017

T. Ohashi: Overview of science results from Hitomi

M. Numazawa, Y. Ezoe, T. Ohashi, et al.: Suzaku observation of Jovian X-rays around solar maximum

D. Ishi, Y. Ezoe, T. Ohashi, et al.: A Systematic Search for Solar Wind Charge Exchange Emission from the Earth's Exosphere with Suzaku

Y. Ichinohe, et al.: Gas motions in the Perseus galaxy cluster observed with Hitomi

● Whereabouts and Physics of the Roaming Baryons in the Universe, Madrid, Spain, July 10 – 14, 2017

T. Ohashi: The HITOMI View of the Perseus Cluster

T. Ohashi: Study of Roaming Baryons with XARM and future DIOS (Invited)

● Power of X-ray Spectroscopy, Warsaw, Poland, September 6 – 8, 2017

Y. Ichinohe: Hitomi SXS view of the gas motions in the core of the Perseus cluster

● 3rd Symposium of the Committee on Space Research (COSPAR): Small Satellites for Space Research, Jeju, South Korea, September 18 – 22, 2017

Y. Ezoe et al.: Small Satellites for X-ray Exploration of the Solar System

● 17th International Workshop on Low Temperature Detectors, Kurume, Japan, July 17 – 21, 2017

K. Kosaka, Y. Ezoe, T. Ohashi, Y. Ishisaki, S. Yamada, et al.: Multilayer Readout Wiring for Transition Edge Sensor Calorimeter Arrays Using Chemical Mechanical Polishing

A. Hoshino, S. Yamada, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, T. Ohashi, et al.; Development of a cylindrical magnetic refrigerant with polycrystalline GdLiF₄ for Adiabatic Demagnetization Refrigerator

Y. Ishisaki, Y. Ezoe, S. Yamada, et al.: Resolve instrument on X-ray Astronomy Recovery Mission (XARM)

T. Hashimoto, S. Yamada et al.: TES application to kaonic atom X-ray spectroscopy in a charged-particle beamline

M. Tsujimoto, Y. Ishisaki, S. Yamada et al.: In-orbit performance of the pulse shape processor of ASTRO-H SXS

S. Yamada, et al: Super DIOS: future X-ray spectroscopic mission to search for dark baryons

S. Okada, S. Yamada et al.: Transition-edge-sensor microcalorimeters for mass spectrometric identification of neutral molecules

● The 30th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2017), Ramada Plaza JeJu Hotel, JeJu, Korea, November 6 – 9, 2017

D. Ishi, Y. Ezoe, T. Ohashi et al.: Evaluation of arrangement error of micropore X-ray mirrors due to hot plastic deformation process

Y. Ezoe, T. Ohashi, et al.: Pt-coated X-ray micropore optics fabricated with silicon dry etching and atomic layer deposition

● Fifth International Meeting on Frontiers of Physics (IMFP2017), Kuala Lumpur, Malaysia, December 3 – 7, 2017

T. Ohashi: X-ray study of cosmic plasmas: present and future (Invited)

● SnowCluster - The Physics of Galaxy Clusters, Uta, USA, March 18 – 23, 2018

Y. Ichinohe et al.: Atmospheric Gas Dynamics in the Perseus Cluster Observed with Hitomi

4) 学会誌等

大橋隆哉, 高橋忠幸, 満田和久: X線天文衛星「ひとみ」が見た意外と静かなペルセウス座銀河団中心の高温ガス, 日本物理学会誌, **72**, 503–508 (2017)

電子物性研究室

1. 研究活動の概要

今年度は、スタッフ3名、日本学術振興会外国人特別研究員 Rajveer Jha 氏、大学院生7名（博士後期2名 [学振特別研究員 DC1 と DC2] と博士前期5名）、学部生3名の体制で研究を進めた。以下に主要な成果を示す。

1) $\text{SmPt}_2\text{Cd}_{20}$ における強い量子揺らぎを伴う強磁性相の発見

強相関電子系の多くの強磁性体では、強磁性転移温度 T_{FM} を制御し 0 K に近づけようとする、三重臨界点を経て一次転移へと変化するため、0 K 近傍の量子揺らぎを調べることはできない。我々は、 $T_{\text{FM}} = 0.64$ K を持つ立方晶 $\text{SmPt}_2\text{Cd}_{20}$ 単結晶の基礎物性を調べ、強磁性量子臨界点近傍の磁気揺らぎに起因するものと考えられる異常を見出した。強磁性秩序相内においても降温とともに増大する 4f 電子由来の電子比熱係数 [図 1(左)] と、電気抵抗率の $T^{0.74}$ 温度依存性が、特徴的振る舞いである。本系は、磁気異方性のない理想的な強磁性量子臨界現象を調べることができる非常に稀な系であることがわかった。

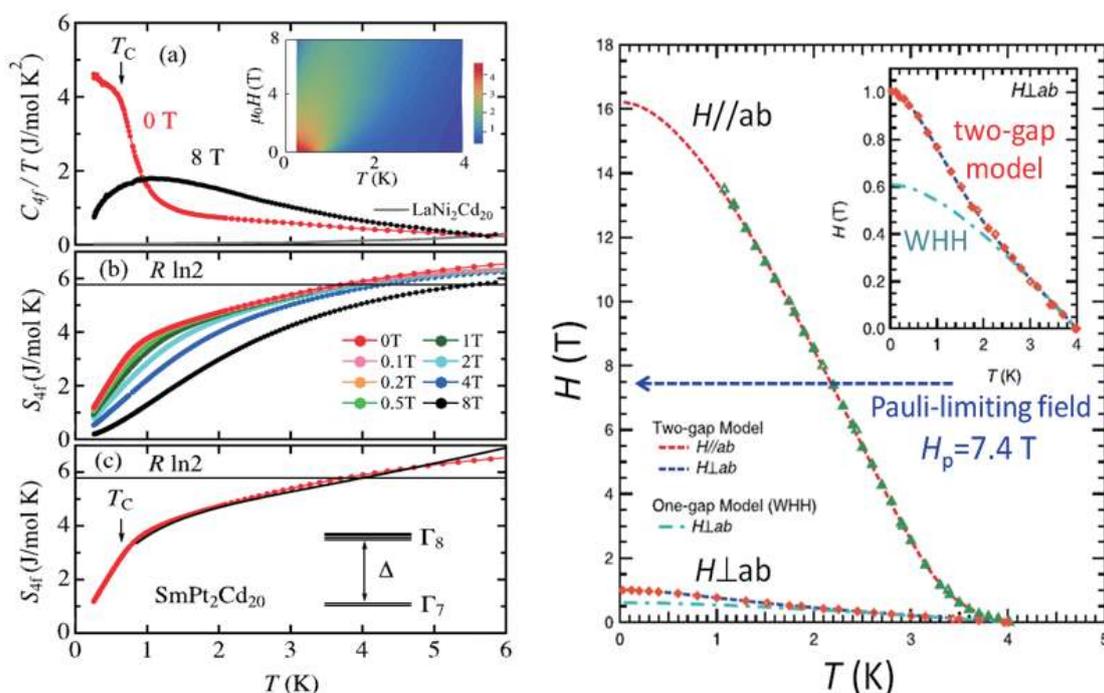


図 1: (左) $\text{SmPt}_2\text{Cd}_{20}$ 単結晶の比熱と磁気エントロピー。(右) $\text{La}(\text{O}_{0.5}\text{F}_{0.5})\text{BiS}_2$ 超伝導体の磁場温度相図。

2) 四極子近藤格子系 $\text{PrTa}_2\text{Al}_{20}$ における秩序状態と特異な強相関電子物性の探索

近年、 $\text{PrTr}_2\text{Al}_{20}$ ($Tr = \text{Ti}, \text{V}$) において Pr の Γ_3 二重項が持つ四極子自由度に起因した強相関電子物性を示すことが報告され、それを契機に、四極子近藤効果に共通する物性の振る舞いが明らかになりつつある。我々は $Tr = \text{Ta}$ の単結晶の純良化を進め、その基底状態の探索を行った。それにより、本物質についても Pr の結晶場基底状態は非磁性 Γ_3 二重項基底状態であり、第一励起状態の磁性を持つ Γ_5 三重項までのギャップが 53 K であることを見出した。50 K 付近に Γ_5 三重項に起因する通常の磁気的な近藤効果 ($\rho \propto -\log T$) を示し、20 K 以下で四極子近藤効果を示唆する上凸の抵抗の温度依存性を示す。さらに、 $H = 0$ T, 0.65 K において反強四極子転移が存在し、秩序相内において重い準粒子の生成を示唆する大きな電子比熱係数の増大 ($\gamma \sim 1.5$ J/mol K²) を示し、その値が磁場であまり変化しないことを

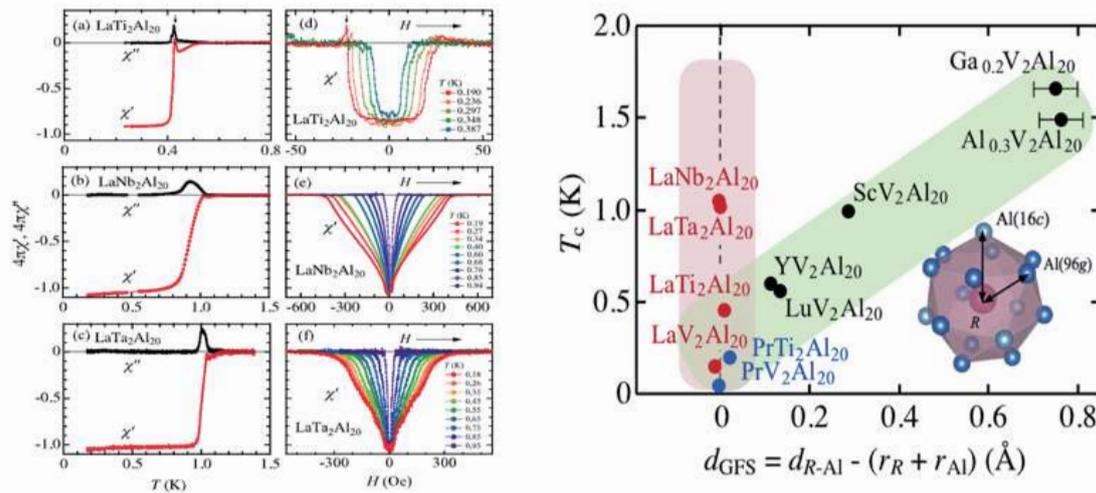


図 2: (左) $\text{LaTr}_2\text{Al}_{20}$ の交流磁化率の温度, 磁場依存性. (右) 非磁性 $R\text{Tr}_2\text{Al}_{20}$ の T_c とカゴ内の隙間 (guest free space: d_{GFS}) の関係.

見出した. これらの結果から, 本物質が四極子自由度に起因する強相関電子物性現象を研究する最適な対象物質であることを指摘した.

3) 4つの新規超伝導の発見: カゴ状構造を持つ $\text{LaTr}_2\text{Al}_{20}$ ($Tr = \text{Ti, V, Nb, Ta}$)

$R\text{Tr}_2\text{Al}_{20}$ 化合物群は, 希土類 R イオンが持つ $4f$ 電子が関与した多彩な強相関電子物性が発現する系として注目されている. これらの電子物性を理解するために, $4f$ 電子を含まない $\text{LaTr}_2\text{Al}_{20}$ 化合物群の電子状態を調べることは重要である. 我々は, $\text{LaTr}_2\text{Al}_{20}$ ($Tr = \text{Ti, V, Nb, Ta}$) の単結晶を育成し, 電気抵抗率・比熱・交流磁化率などの基礎物性測定を行った. その結果, これらが新たな超伝導体であることがわかった (超伝導転移温度 $T_c = 0.15 - 1.05$ K). $\text{LaTi}_2\text{Al}_{20}$ の交流磁化率 [図 2(左)] には, differential paramagnetic effect と呼ばれるピーク構造が超伝導と常伝導の相境界において観測される. よって, $\text{LaTi}_2\text{Al}_{20}$ は, 金属間化合物では非常に稀な第一種超伝導体であると考えられる.

$\text{LaTr}_2\text{Al}_{20}$ では, La イオンが 16 個の Al で形成されたカゴ構造の中央に位置している. La と Al の原子間距離から, La と Al のそれぞれのイオン半径を引くことにより, 両者の間の隙間 (guest free space: d_{GFS}) が求まる. これまでに報告されている $\text{LaTr}_2\text{Al}_{20}$ 超伝導体について, T_c と d_{GFS} の関係を図 2(右) に示す. これらは右上がりの帯となるグループを形成しており, 隙間が大きくなるにつれ T_c が増大することがわかる. カゴ構造の中でイオンが非調和巨大振幅振動する振る舞いは, ラトリングと呼ばれる. クーパー対を形成する電子間引力にラトリングが効いていることが示唆される. 一方, X線単結晶構造解析により調べたところ, 4つの新規超伝導体では $d_{\text{GFS}} \simeq 0$ となっており, 隙間がない状態で, La イオンがカゴ内に内包されていることがわかった. 図 2 が示すように, 4つの超伝導体は縦に並ぶグループを形成しており, カゴ内の隙間とは別の要因が T_c を決定していることがわかる. $3d$ 電子を持つ $Tr = \text{Ti, V}$ よりも, $4d, 5d$ 電子を持つ $Tr = \text{Nb, Ta}$ の方が高い T_c を示している. d 電子のスピ軌道相互作用の強さの相違が, T_c の違いをもたらしている可能性がある.

4) トポロジカル物質「ワイル半金属」 WTe_2 の異常な電子輸送: Hall 抵抗の符号反転

Weyl 半金属 WTe_2 の電子輸送特性を, 世界最高レベルの高純度単結晶を用いて調べた. この試料は, 残留抵抗比が 1,300 以上であり, 低温 9T の磁場中で 1,500,000 % にも達する異常な巨大磁気抵抗効果を示す. 電気抵抗と Hall 抵抗を同時測定し, 2 キャリアモデルで解析することにより, 電子と正孔のキャリア密度 (n_e と n_h) と移動度 (μ_e と μ_h) について, 温度依存性を明らかにした. $n_h, n_e \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ で

あること、移動度が高く ($\mu_e, \mu_h \sim 10^4 - 10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) 大きな温度依存性を持つこと、温度低下に伴い n_h/n_e が 1 に近づくこと (キャリアの補償が高まる) などを明らかにした。もっとも特徴的な異常として、Hall 抵抗が低温低磁場領域で符号反転していることを発見した (3 K 以下の低磁場領域で正となる)。本系の電子状態を多面的に調べるため、 WTe_2 および関連物質の MoTe_2 について、純良単結晶試料を用いた共同研究を国内外の研究グループとともに進めた。

5) $\text{La}(\text{O}_{0.5}\text{F}_{0.5})\text{BiS}_2$ の異方的超伝導特性と Pauli 限界の喪失

$\text{La}(\text{O}_{0.5}\text{F}_{0.5})\text{BiS}_2$ の超伝導特性を、香港中文大学の Goh グループと共同で調べた。磁場を ab 面に垂直に印加すると ($H \perp ab$)、上部臨界磁場は $H_{c2}^{\perp}(0) = 1 \text{ T}$ であるが、 $H \parallel ab$ では、 $H_{c2}^{\parallel}(0) = 16 \text{ T}$ に達することがわかった [図 1(右)]。GL コヒーレンス長は、 $\xi_{\parallel} \sim 21.7 \text{ nm}$, $\xi_{\perp} \sim 1.13 \text{ nm}$ であり、顕著な異方性を持つ。 $H_{c2}^{\parallel}(0)$ の値は Pauli 限界磁場 $1.84T_c = 7.4 \text{ T}$ を超えている。この顕著な $H_{c2}^{\parallel}(0)$ の増大は、 $\text{Bi}6p$ 電子に働く強いスピン軌道結合 (SOC) に起因するものと考えられる。スピン軌道散乱が H_{c2} を増大させる効果と、 BiS_2 層の局所的な反転対称性の破れが Rashba-Dresselhaus SOC を通じてスピンを ab 面内にロックし、Zeeman 効果による対破壊から保護される効果の 2 つが原因と考えられる。また、 $H_{c2}^{\parallel}(T)$ は $T < T_c$ の広い温度領域で下に凸の振る舞いを示しており、超伝導ギャップが波数空間内で異方的であることを強く示唆している。

6) 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、研究室でその基礎物性測定を行いつつ、国内外の研究グループと共同研究を幅広く進めた。ノンドープ CeOBiS_2 単結晶をサブミクロンサイズ空間分解 ARPES により調べたところ、欠陥近傍に金属的な領域が形成されていることを見出した。金属的領域は、X 点近傍にフェルミポケットを持つことを確認した。欠陥による BiS_2 層の局所的対称性の破れと Ce イオンが混合原子価状態にあることにより、自己キャリアドープが起こっている可能性が考えられる。また、部分的に F 置換された $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ の結晶構造の F 濃度依存性および温度依存性を、昨年度に引き続き高精度単結晶構造解析により調べた。不整合超格子反射の特性がだんだんと明らかになってきた。以上は、溝川研究室 (早稲田大)、Seini 研究室 (ローマ・ラ・サピエンツァ大)、佐賀山氏・村上研究室 (KEK) との共同研究の成果である。

7) EuFBiS_2 における異常な磁気抵抗効果

BiS_2 系超伝導体の一つ EuFBiS_2 は、過去の多結晶体における物性報告からは、Eu 価数の不安定性から、金属的振る舞いを示し、低温で超伝導転移するとされてきたが、我々の研究グループにて単結晶を育成し物性を調べた結果、低温まで半導体的振る舞いを示すことが明らかとなった。このことは、この系が試料の結晶性に非常に敏感であることを示している。一方で、磁気的な測定から、Eu の価数は完全に二価から期待される振る舞いからはずれている。このことは、輸送において半導体的振る舞いを示すことと、Eu の価数の不安定性がキャリアに寄与していないように見えることに対して、現状ではうまく説明ができない状況にあり、興味深い電子状態が実現している可能性が示唆される。加えて、低温において、数テスラ程度の磁場で、磁気抵抗が 2 桁以上も変化する異常な輸送特性を示すことも明らかになった。これらの輸送特性のメカニズムを明らかにするため、以降も重点的に研究をすすめてゆく予定である。

8) $\text{LaFe}_4\text{As}_{12}$ の de Haas-van Alphen 効果測定によるフェルミ面の特性研究

化学式 $\text{LnTr}_4\text{X}_{12}$ で表される充填型スクッテルダイト化合物 (Ln : 希土類, Tr : 遷移金属, X : プニクトゲン) は、典型的な強相関電子系化合物群の一つとして知られている。これまでの、精力的な研究から、 Ln 元素のもつ f 電子自由度と伝導電子との相互作用によって、極めて特異な物性が現れることが分かっ

てきている。これらの物質の特性を解明する上で重要な点の一つは、フェルミ面の特性を明らかにすることである。f電子を持たないLa化合物では、 $X=P$ において超伝導が発現する一方、 $X=As$ においては、強磁性を発現する。このことは、強磁性を発現しやすい電子構造を有しているということである。一方で、フェルミ面のトポロジーとしては、ネスティングを起こしやすい形状をしていることが知られており、これらのことが、この系の物性を複雑にしていると考えられ、フェルミ面の特性研究が重要であることを示している。我々は、強磁性体 $LaFe_4As_{12}$ の高純度単結晶育成に成功し、世界で初めてこの系の de Haas-van Alphen 効果測定に成功し、フェルミ面の特性を明らかにすることに成功した。これらの結果から、超伝導を発現する P 系とはフェルミ面のトポロジーが異なる点を有していることと、電子のサイクロトロン有効質量が増強されていることが明らかになった。

9) 新規強相関 Sm 化合物の探索

我々の研究グループでは Sm 化合物における、Sm イオンの価数の自由度や磁氣的自由度等複数の自由度が絡んだ、強相関電子系について研究を行っている。加えて、新奇物質の探索にも精力的に取り組んでいる。これまで多くの Sm 系強相関電子系化合物は、立方晶系で Sm イオンサイトの対称性が高いものに限られていた。H29 年度は、 $SmIr_2Si_2$ や、 $SmPtSi_3$, $SmPtSi_2$ 他計 7 化合物以上の物質合成と物性測定を行った。これらの結晶構造は、いずれも立方晶系より対称性の低い正方晶系や斜方晶系の物質であるが、このような Sm イオンサイトの対称性が低い物質においても、一部強相関電子状態や、奇妙な磁気状態を発現させていると考えられものが発見され、今後、それらの発現メカニズムを明らかにする必要がある興味深い研究対象であることが明らかになった。

2. 研究業績

1) 論文

A. Yamada, S. Oike, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, and Y. Aoki : Low Curie-temperature ferromagnetic phase in $SmPt_2Cd_{20}$ possibly accompanied by strong quantum fluctuations, *Phys. Rev. B*, **96**, 085102 (2017) [5 pages]. DOI: 10.1103/PhysRevB.96.085102

K. Nagasaka, A. Nishida, R. Jha, J. Kajitani, O. Miura, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, Y. Aoki, A. Miura, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, H. Usui, K. Kuroki and Y. Mizuguchi : Intrinsic Phase Diagram of Superconductivity in the $BiCh_2$ -Based System Without In-Plane Disorder, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **86**, 074701 (2017) [6 pages]. DOI: 10.7566/JPSJ.86.074701

R. Higashinaka, A. Nakama, R. Miyazaki, J. Yamaura, H. Sato, and Y. Aoki : Antiferroquadrupolar Ordering in Quadrupolar Kondo Lattice of Non-Kramers System $PrTa_2Al_{20}$, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **86**, 103703 (2017) [5 Pages]. DOI: 10.7566/JPSJ.86.103703

S. Tsutsui, Y. Kobayashi, J. Nakamura, M. K. Kubo, S. Amagasa, Y. Yamada, Y. Yoda, Y. Shimizu, H. Hidaka, T. Yanagisawa, H. Amitsuka, A. Yamada, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, Y. Aoki: Sm valence states and magnetic properties in $SmBe_{13}$ and $SmTi_2Al_{20}$ investigated by Sm synchrotron-radiation-based Moessbauer spectroscopy, *Hyperfine Interactions*, 238:100 (2017) [8 Pages]. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10751-017-1473-z>

S. Kambe, H. Sakai, Y. Tokunaga, T. Hattori, G. Lapertot, T. D. Matsuda, G. Knebel, J. Flouquet, and R. E. Walstedt : T dependence of nuclear spin-echo decay at low temperatures in $YbRh_2Si_2$, *Phys. Rev. B*, **95**, 195121 (2017) [? Pages]. DOI: 10.1103/PhysRevB.95.195121

N. Tateiwa, J. Pospíšil, Y. Haga, H. Sakai, T. D. Matsuda, and E. Yamamoto : Itinerant ferromagnetism in actinide $5f$ -electron systems: Phenomenological analysis with spin fluctuation theory, *Phys. Rev. B*, **96**, 035125 (2017) [? Pages]. DOI: 10.1103/PhysRevB.96.035125

Y. Goto, A. Yamada, T. D. Matsuda, Y. Aoki, and Y. Mizuguchi : SnAs-Based Layered Superconductor NaSn_2As_2 , *J. Phys. Soc. Jpn.*, **86**, 123701 (2017) [4 pages]. DOI: 10.7566/JPSJ.86.123701 (Papers of Editors' Choice)

T. Sugimoto, E. Paris, T. Wakita, K. Terashima, T. Yokoya, A. Barinov, J. Kajitani, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, Y. Aoki, T. Mizokawa, and N. L. Saini : Metallic phase in stoichiometric CeOBiS_2 revealed by space-resolved ARPES, *Sci. Rep.*, **8**, 2011 (2018) [5 pages]. DOI: 10.1038/s41598-018-20351-y

A. Yamada, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, and Y. Aoki : Superconductivity in Cage Compounds $\text{LaTr}_2\text{Al}_{20}$ with $Tr = \text{Ti, V, Nb, and Ta}$, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **87**, 033707 (2018) [5 pages]. DOI: 10.7566/JPSJ.87.033707

Y. C. Chan, K. Y. Yip, Y. W. Cheung, Y. T. Chan, Q. Niu, J. Kajitani, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, Y. Yanase, Y. Aoki, K. T. Lai, and Swee K. Goh : Anisotropic two-gap superconductivity and the absence of a Pauli paramagnetic limit in single-crystalline $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$, *Phys. Rev. B*, **97**, 104509 (2018) [6 pages]. DOI: 10.1103/PhysRevB.97.104509

T. Hattori, H. Sakai, Y. Tokunaga, S. Kambe, T. D. Matsuda, and Y. Haga : Evidence for Spin Singlet Pairing with Strong Uniaxial Anisotropy in URu_2Si_2 Using Nuclear Magnetic Resonance, *Phys. Rev. Lett.*, **120**, 027001 (2018) [? pages]. DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.027001

R. Higashinaka, H. Endo, J. Kajitani, T. D. Matsuda, and Y. Aoki : Single crystal growth and physical properties of BiS_2 -layered compound $\text{Eu}_3\text{Bi}_2\text{S}_4\text{F}_4$, *Physica B: Condensed Matter*, **536**, 824 (2018) [3 pages]. DOI: 10.1016/j.physb.2017.09.092

R. Jha, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, R. A. Ribeiro, and Yuji Aoki : Anomalous magnetotransport properties of high-quality single crystals of Weyl semimetal WTe_2 : Sign change of Hall resistivity, *Physica B: Condensed Matter*, **536**, 68 (2018) [4 pages]. DOI: 10.1016/j.physb.2017.09.077

2) 学会講演

● 日本物理学会第 2017 年秋季大会 2017 年 9 月 21 日 (木) – 24 日 (日) (岩手大学)

竹中崇了, 繆逸杰, 弘中恭平, 水上雄太, 橋本顕一郎, Anna Bohmer, 芳賀芳範, 山本悦嗣, 松田達磨, 大貫惇睦, 松田祐司, 芝内孝禎 : 重い電子系超伝導体 URu_2Si_2 における極低温磁場侵入長測定

松田達磨, 原和輝, 石見聖, 山田瑛, 東中隆二, 青木勇二 : RPd_3Ga_8 (R:希土類) における低温物性異常

久保徹郎, 藤秀樹, 松野治貴, 小手川恒, 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 : ^{93}Nb -NMR 測定による $\text{PrNb}_2\text{Al}_{20}$ の強磁場磁化の見積もり

岩佐和晃, 鬼丸孝博, 高島敏郎, 東中隆二, 青木勇二, 河村聖子, 中島健次, Jean-Michel Mignot, Arsen Gukasov : $\text{Pr}1-2-20$ 系の f 電子状態に関する中性子散乱研究

中村優希, 中島美帆, 天児寧, 池田修悟, 松田達磨, 仲村愛, 清水悠晴, 本間佳哉, 本多史憲, 青木大 : 新構造を持つ CePd_2Al_8 の単結晶育成と物性

佐賀山遼子, 佐賀山基, 熊井玲児, 村上洋一, 浅野卓也, 三田昌明, 梶谷丈, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二 : $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ における長周期格子変調の x 依存性

守田智洋, 岡本陽平, 松澤悠, 溝川貴司, Eike Schwier, 島田賢也, Naurang Saini, 梶谷丈, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二 : 角度分解光電子分光による $R(\text{O,F})\text{BiS}_2$ のバンド構造

黒川輝風, 松澤悠, 岡本陽平, 守田智洋, 溝川貴司, E. F. Schwier, 島田賢也, Naurang Saini, 梶谷丈, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二 : 光電子分光による $R(\text{O,F})\text{BiS}_2$ の電子状態

仲間隆男, 垣花将司, 岸本美晴, 山田瑛, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, 播磨尚朝, 竹内徹也, 辺土正人, 大貫惇睦 : CuS_2 と CuSe_2 のドハース・ファンアルフェン効果による電子状態の研究

東中隆二, I. Knapp, B. Hinterleitner, P. Heinrich, H. Michor, E. Bauer, 松田達磨, 青木勇二 : $D0_3$ 擬ホイスラー構造を持つ $\text{V}_{3+x}\text{Al}_{1-x}$ の熱電特性

岡部碧, 中井祐介, 東中隆二, 宮田耕充, 真庭豊 : 3次元ディラック電子系候補物質 PtSn_4 の NMR 測定

中瀬迅, 三宅遼磨, 久保徹郎, 河瀬良亮, 小手川恒, 藤秀樹, 東中隆二, 山田瑛, 松田達磨, 青木勇二 : $\text{SmTa}_2\text{Al}_{20}$ 単結晶試料の NQR/NMR による低温のダイナミクス

筒井智嗣, 中村仁, 小林義男, 久保謙哉, 依田芳卓, 水牧仁一朗, 山田瑛, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二 : $\text{SmT}_2\text{Al}_{20}$ (T : 遷移金属) の ^{149}Sm 放射光メスバウアー分光

山田瑛, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二 : 超伝導が発現する $\text{LaT}_2\text{Al}_{20}$ の電子状態 : Sm 系強相関電子物性との比較

田山孝, 梶澤光伸, 小柳大士, 伏屋健吾, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二 : イジング反強磁性体 SmPt_2Si_2 における特異な磁気相図

松本凌弥, 岡本陽平, 杉本拓也, 溝川貴司, 堀場弘司, 小野寛太, 組頭広志, Naurang Saini, Rajveer Jha, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二 : 角度分解光電子分光による WTe_2 のバンド構造

Rajveer Jha, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, Raquel A. Ribeiro, Yuji Aoki : Anisotropic magnetotransport properties of Weyl semimetal WTe_2

● 日本物理学会 第 73 回年次大会 2018 年 3 月 22 日 - 25 日 (東京理科大学)

久保徹郎, 藤秀樹, 三宅遼磨, 松野治貴, 小手川恒, 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 : $RT_2\text{Al}_{20}$ ($R=\text{La, Pr}$; $T=\text{Nb, Ta}$) の NMR/NQR スペクトル解析

山田瑛, 松田達磨, 東中隆二, 青木勇二, 佐藤英行, 三宅厚志, 徳永将史, 水牧仁一朗, 筒井智嗣, 伊奈稔哲, 新田清文, 宇留賀朋哉 : $\text{SmT}_2\text{Al}_{20}$ 系における重い電子状態と Wilson 比に関する系統的研究

山本直季, 三田昌明, 浅野卓也, 梶谷丈, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二 : 層状超伝導体 $\text{PrO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ 単結晶の $4f$ 電子磁性と輸送特性

髭本亘, 伊藤孝, 大嶋浩平, 岡澤赳, 友野大, 三原基嗣, 三田昌明, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二 : $\text{Ln}(\text{O}_{1-x}\text{F}_x)\text{BiS}_2$ ($\text{Ln}=\text{Ce, Nd}$) の磁場中 μSR

守田智洋, 岡本陽平, 松澤悠, 溝川貴司, Eike Schwier, 島田賢也, Naurang Saini, 梶谷丈, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: $R(O,F)BiS_2$ のフェルミ面と電荷軌道不安定性

松澤悠, 黒川輝風, 岡本陽平, 守田智洋, 溝川貴司, E.F.Shwier, 島田賢也, Naurang Saini, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: $Pr(O,F)BiS_2$ の電子構造と原子価状態

後藤陽介, 山田瑛, 松田達磨, 青木勇二, 水口佳一: $SnAs$ 伝導層を含む新しい層状超伝導体 $NaSn_2As_2$

小柳大士, 中村成弥, 杉本成駿, 田山孝, 伏屋健吾, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: イジング反強磁性体 $SmPt_2Si_2$ の極低温精密磁化測定

飯沼拓也, 酒井恭兵, 山田瑛, 大村瑠美, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨: $SmIr_2Si_xGe_{2-x}$ の結晶構造と物性

大村瑠美, 岸本美晴, 山田瑛, 松田達磨, 東中隆二, 青木勇二: 大きな単位胞を取る三元化合物 $R-Ir-Sn$ (R : 希土類) の単結晶育成と構造解析

宮脇瑠美佳, 東中隆二, 山田瑛, 松田達磨, 青木勇二: 四極子近藤格子系 $PrTr_2Al_{20}$ ($Tr = Mo, W$) の単結晶育成と低温物性測定

東中隆二, 宮脇瑠美佳, 山田瑛, 松田達磨, 青木勇二: 四極子近藤格子系 $PrTr_2Al_{20}$ ($Tr = Nb, Mo, Ta, W$) における電気輸送特性

中村優希, 長谷川侑紀, 中島美帆, 天児寧, 池田修悟, 松田達磨, 仲村愛, 清水悠晴, 本間佳哉, 本多史憲, 青木大, 郷地順, 上床美也: 単結晶 $CePd_2Al_8$ の圧力下電気抵抗と磁化測定

神戸振作, 服部泰佑, 酒井宏典, 徳永陽, 松田達磨, 芳賀芳範, R.E. Walstedt: URu_2Si_2 の NMR スピンエコー減衰

脇舎和平, 杉山雄紀, 岸本美晴, 松田達磨, 郷地順, 上床美也, 上原政智, 梅原出: 新規四元希土類化合物 $RRu_2Zn_{18}Sn_2$ ($R = La, Pr, Nd$) の結晶構造と物性

国内研究会

● 第 11 回物性科学領域横断研究会「凝縮系科学の最前線」 2017 年 11 月 17 日 - 18 日 (東京大学物性研究所)

山本直季: 層状超伝導体 $LnO_{1-x}F_xBiS_2$ 単結晶の 4f 電子磁性と電子輸送特性

東中隆二: 強相関電子系 Sm 化合物における新奇量子相

● J-Physics 多極子伝導系の物理 平成 29 年度領域全体会議 2018 年 3 月 15 日 - 17 日 (東京大学物性研究所)

N. Nakamura, T. Namiki, T. D. Matsuda, R. Higashinaka, Y. Aoki, R. Settai, Y. Onuki, H. Sato and H. Harima: de Hass-van Alphen effect of the itinerant weak ferromagnetic filled skutterudite $LaFe_4As_{12}$

R. Miyawaki, R. Higashinaka, A. Yamada, T. D. Matsuda, and Y. Aoki: Single crystal growth and low-temperature physical property measurements of quadrupolar Kondo lattice $PrTr_2Al_{20}$ ($Tr = Mo, W$)

Tetsuro Kubo, Hideki Tou, Ryoma Miyake, Haruki Matsuno, Hisashi Kotegawa, Hisatomo Harima, Ryuji Higashinaka, Akihiro Nakama, Yuji Aoki, Hideyuki Sato, Yoshihiko Ihara, Takayuki Goto, Takahiko Sasaki : NMR Spectrum Analysis and High-Field Magnetization in $\text{Pr}T_2\text{Al}_{20}$ ($T=\text{Nb, Ta}$)

T. D. Matsuda, A. Yamada, R. Higashinaka, A. Miyake, M. Tokunaga, M. Mizumaki, S. Tsutui, T. Ina, K. Nitta, T. Uruga, H. Sato, and Y. Aoki : Characteristic Heavy Electron State in $\text{Sm}T_2\text{Al}_{20}$ (T : transition metal)

Yosuke Goto, Akira Yamada, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki, and Yoshikazu Mizuguchi : Effect of elemental substitution for SnAs-based novel layered superconductor NaSn_2As_2

R. Omura, M. Kishimoto, A. Yamada, R. Higashinaka, Y. Aoki and T. D. Matsuda : Single Crystal Growth and Structural Analysis of Ternary Compound $R\text{-Ir-Sn}$ (R : rare earth) with a Large Unit Cell

S. Kambe, T. Hattori, Y. Tokunaga, H. Sakai, T. D. Matsuda, Y. Haga : NMR study of URu_2Si_2

国際会議

● The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2017), Prague, Czech Republic, July 17 – 21, 2017

Yuji Aoki, Masaaki Mita, Naoki Yamamoto, Shota Onishi, Joe Kajitani, Ryuji Higashinaka, and Tatsuma D Matsuda: Non-Fermi-liquid 4f-electron behaviors in $\text{Ln}(\text{O}_{1-x}\text{F}_x)\text{BiS}_2$ layered superconductors

Rajveer Jha, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, Raquel A. Ribeiro and Yuji Aoki: Anomalous magnetotransport properties of high-quality single crystals of Weyl semimetal WTe_2

Tatsuma D Matsuda, Miharu Kishimoto, Sumire Ichinose, Akira Yamada, Ryuji Higashinaka, Hideyuki Sato, and Yuji Aoki: Single Crystal Growth of Heavy Electron System $\text{YbOs}_4\text{Sb}_{12}$

Ryuji Higashinaka, Hideaki Endo, Jo Kajitani, Tatsuma D Matsuda, and Yuji Aoki: Single crystal growth and physical properties of BiS_2 -layered compounds: $\text{Eu}_3\text{Bi}_2\text{S}_4\text{F}_4$

Taisuke Hattori, Hironori Sakai, Yo Tokunaga, Shinsaku Kambe, Tatsuma D Matsuda and Yoshinori Haga: Spin state of superconducting URu_2Si_2 probed by ^{29}Si Knight shift

● European Materials Research Society (E-MRS) 2017 Fall Meeting, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland, September 18 – 21, 2017

Yuji Aoki, Masaaki Mita, Naoki Yamamoto, Shota Onishi, Joe Kajitani, Rajveer Jha, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D Matsuda: Unconventional magnetic and transport properties of van der Waals layered materials: BiS_2 -based superconductors and Weyl semimetals (invited)

● J-Physics International Workshop on Multipole Physics and Related Phenomena, Hachimantai Royal Hotel, Japan, Sep. 24 – 28, 2017

S. Kambe, T. Hattori, Y. Tokunaga, H. Sakai, T. D. Matsuda, and H. Haga : NMR study of URu_2Si_2

T. Hattori, H. Sakai, Y. Tokunaga, S. Kambe, T. D. Matsuda, and H. Haga : Strong uniaxial spin anisotropy in Hidden order state of URu₂Si₂

N. Nakamura, T. Namiki, T. D. Matsuda, R. Higashinaka, Y. Aoki, R. Settai, Y. Onuki, H. Sato, and H. Harima : de Haas-van Alphen effect of the itinerant weak ferromagnetic filled skutterudite LaFe₄As₁₂

K. Wakiya, Y. Sugiyama, J. Gouchi, Y. Uwatoko, M. Kishimoto, T. D. Matsuda, M. Uehara, and I. Umehara : Effect of Sn substitution on the structural and magnetic properties of PrRu₂Zn₂₀

A. Yamada, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, and Y. Aoki Field-insensitive Kondo behavior in SmT₂Al₂₀ and Superconducting properties in cage-structure compound LaT₂X₂₀

J. Kajitani, R. Sagayama, H. Sagayama, R. Kumai, Y. Murakami, K. Matsuura, M. Mita, T. Asano, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, Y. Aoki : Observation of superlattice reflections in BiS₂ layered superconductor LaO_{0.5}F_{0.5}BiS₂

T. D. Matsuda, K. Hara, A. Yamada, R. Higashinaka, and Y. Aoki : Magnetic properties of a new compounds with kagome lattice RPd₃Ga₈

R. Higashinaka, J. Kajitani, M. Mita, N. Yamamoto, H. Endo, T. D. Matsuda, and Y. Aoki : Magnetic and structural properties of BiS₂-based layered superconductors LnO_{1-x}F_xBiS₂

● 30th International Symposium on Superconductivity ISS2017, Iino Hall and Conference Center, Tokyo, Japan, December 13–15, 2017

Tatsuma D. Matsuda: Structural Phase Diagram and Anomalous Magnetic Properties in Superconductor of LnO_{1-x}F_xBiS₂ (invited)

● The 21st International Conference on Solid Compounds of Transition Elements (SCTE2018), Technische Universitaet Wien, Vienna, Austria, March 26 – 29, 2018

Yuji Aoki, Ryuji Higashinaka, and Tatsuma D Matsuda: Unconventional 4f-electron magnetism in Ln(O,F)BiS₂ layered superconductors (invited)

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]. These include classical and quantum spin systems on two-dimensional triangle [2] and kagomé [3] lattices, and three-dimensional pyrochlore-lattice systems [4]. For classical systems, prototypes of which are the triangular-lattice antiferromagnet and the spin ice [5], many investigations have been performed for several decades using a number of theoretical and experimental techniques [1]. Possibilities of quantum spin liquid (QSL) states in frustrated magnets, which date back to the theoretical proposal of the RVB state [6], are recently under hot debate. Highly-entangled many-body wave functions without magnetic long-range order (LRO), anticipated in QSL states, provide theoretically challenging problems [7]. Experimentally, investigations of QSL states using present-day available techniques, which are not well optimized for studying QSL states, have been challenging explorations, e.g. [8].

A non-Kramers pyrochlore system $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ (TTO) has attracted much attention since interesting reports of absence of magnetic LRO down to 0.1 K [9], which could be interpreted as a QSL candidate or quantum spin ice. In addition to this QSL state, we recently showed that depending on off-stoichiometry parameter x of $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$ the ground state of TTO becomes an electric quadrupole ordered (QO) state ($x > x_c \sim -0.0025$) [10]. In recent years, we use single-crystal samples of $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$ in the QSL ($x < x_c$) and QO ranges [11, 12] and investigate QSL and QO states of TTO in detail by using neutron scattering techniques. At present, we are analyzing huge amount of data coming out from modern chopper spectrometers. Fig. 1 shows typical neutron scattering data of a recently submitted paper [12], which will be followed by a few more papers.

参考文献

- [1] C. Lacroix, P. Mendels, F. Mila (eds.), Introduction to Frustrated Magnetism (Springer, Berlin, Heidelberg, 2011).
- [2] G. H. Wannier, Phys. Rev. 79, 357 (1950).
- [3] I. Syôzi, Prog. Theor. Phys. 6, 306 (1951).
- [4] J. S. Gardner et al. Rev. Mod. Phys. 82, 53 (2010).
- [5] S. T. Bramwell and M. J. P. Gingras, Science 294, 1495 (2001).
- [6] P. W. Anderson, Mater. Res. Bull. 8, 153 (1973).
- [7] L. Savary and L. Balents, Rep. Prog. Phys. 80, 016502 (2017).
- [8] B. Fåk et al. Phys. Rev. B 95, 060402 (2017); T.-H. Han et al. Nature (London) 492, 406 (2012); K. Hirakawa, H. Kadowaki, K. Ubukoshi, J. Phys. Soc. Jpn. 54, 3526 (1985).
- [9] J. S. Gardner et al. Phys. Rev. Lett. 82, 1012 (1999).
- [10] H. Takatsu et al. Phys. Rev. Lett. 116, 217201 (2016).
- [11] M. Wakita et al. J. Phys.: Conf. Series 683, 012023 (2016).

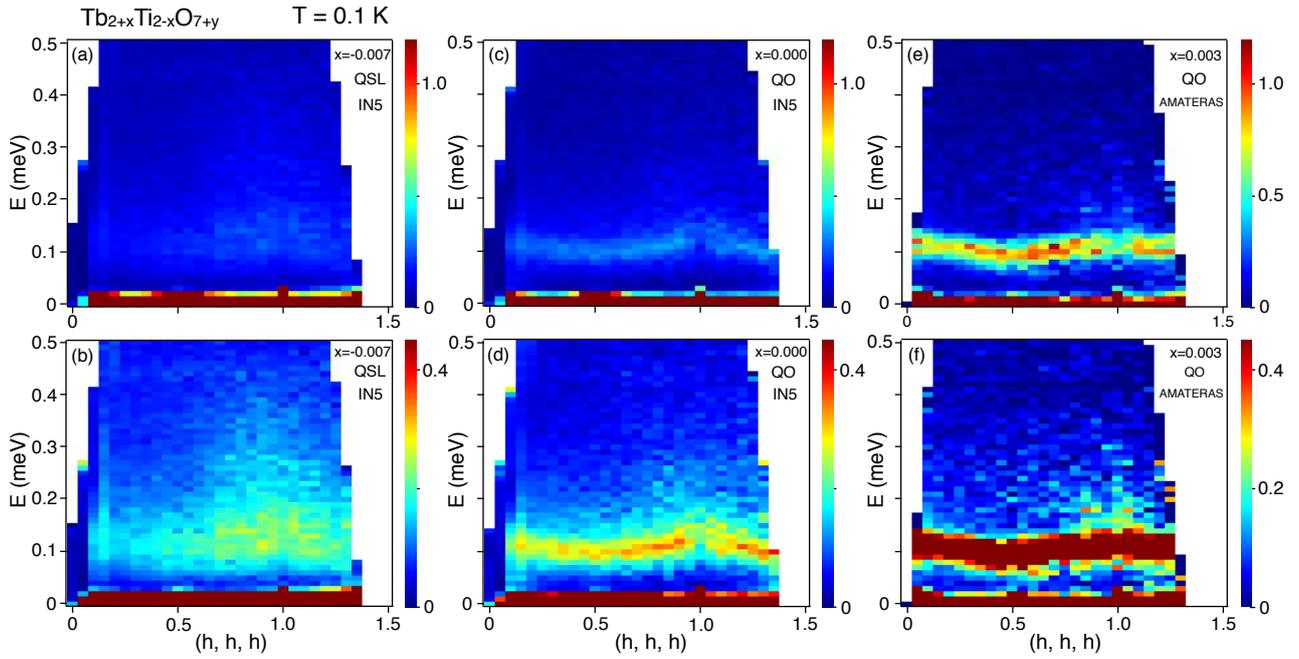


図 1: (Color online) Q - E slices along a $[1,1,1]$ direction measured at $T = 0.1$ K [12]. (a,b) show $S(Q, E)$ of the QSL sample with $x = -0.007$. (c,d) and (e,f) show $S(Q, E)$ of the QO samples with $x = 0.000$ and 0.003 , respectively. Two colormaps of (a,c,e) and (b,d,f) are used for high and low intensity ranges, respectively.

[12] H. Kadowaki et al. arXiv:1803.00688 [J. Phys. Soc. Jpn. (2018)].

2. 研究業績

1) 論文

H. Takatsu, T. Taniguchi, S. Kittaka, T. Sakakibara, H. Kadowaki: Thermodynamic properties of quadrupolar states in the frustrated pyrochlore magnet $Tb_2Ti_2O_7$, *Journal of Physics: Conf. Series* **828**, 012007 (2017).

2) 学会講演

● 日本物理学会 第 73 回年次大会 2018 年年 3 月 22 日 (木) – 25 日 (日) (東京理科大学)

橘高俊一郎, 門脇広明, 高津浩, 中村翔太, 榊原俊郎: スピンアイス物質 $Dy_2Ti_2O_7$ の磁場角度分解エントロピー測定

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．2017 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) 単層カーボンナノチューブ・原子層物質の熱電物性

単層カーボンナノチューブ (SWCNT) フィルムは実用熱電材料に匹敵する大きなゼーベック係数 (発生熱起電力と試料両端の温度差の比) とパワーファクターを有する．しかしながら，無次元性能指数 ZT 値については，熱伝導率の正確な評価が難しいことなどから信頼できる値が得られていないが，実用レベルの 1 よりだいぶ小さいと考えられている．本年度は，SWCNT フィルムの熱電性能の向上を目指して，3 種類の異なる方法で作製された SWCNT フィルムの熱電を測定し，フィルム内の SWCNT の配向などとマクロな熱電物性との関係を調べた (沢辺修士論文)．また熱伝導率評価法としてフィルムの熱拡散率の測定を行った (柳川修士論文)．フィルムは多種類の SWCNT が作るバンドルが絡み合った構造をしているが，本研究よりこのようなモルファロジーの制御により ZT 値の改善の可能性が示唆された．また，単原子層物質の熱電物性測定法の検討を開始した (日高卒業研究)．

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．しかしその物性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℃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，直径が 1.45 – 4 nm 程度の太い SWCNT 内の水のダイナミクスおよび構造転移の研究結果を発表した．親水的な MCM 空洞内の水の研究との比較および分子動力学計算により，ナノ空洞内の水の性質が空洞壁の疎水性の程度により顕著に変化することがわかった．MCM 空洞内の水では，室温からの降温により，その性質がクロスオーバー的に連続的に変化していたが，疎水的な SWCNT 内の水では一次的な構造相転移挙動を示すことが明らかになった．液-液臨界点は，直径が 4 nm 程度以上の太い SWCNT 内において観測されることが示唆された．これらの研究は，円筒 SWCNT 空洞内の水について行ったものである．ナノ空洞内の水の性質は，空洞形状にも依存すると考えられるので，圧力をかけてつぶした SWCNT 内の水の研究をスタートさせた (小倉卒業研究)．

3) 新規原子層および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，化学気相成長を利用し，二硫化モリブデンや二硫化タングステンなどの遷移金属ダイカルコゲナイド (TMDC) の原子層を合成し，その光・電子物性について研究を進めている．2017 年度は，積層型の二次元半導体ヘテロ構造の合成と，ヘテロ構造に由来する光学遷移の起源や層間励起子の光学的性質に関する研究 (齊藤修士論文)，プラスチック基板を利用して圧縮および

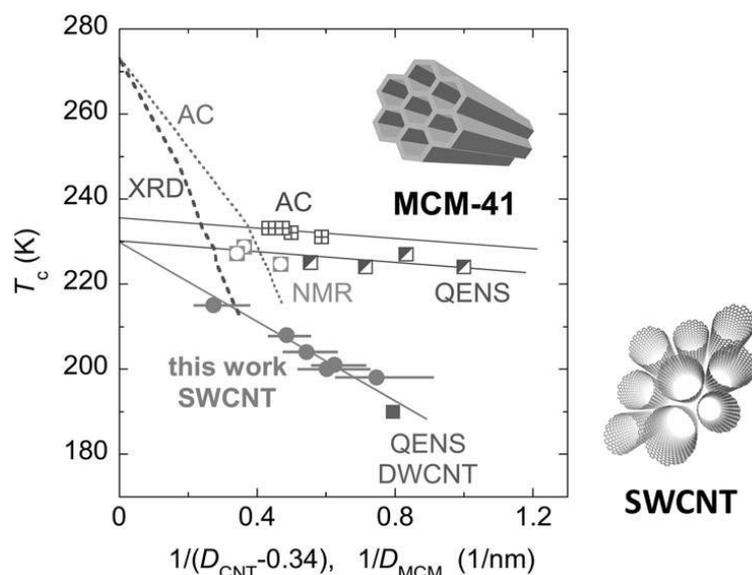


図 1: 図 1 SWCNT および親水性 MCM 空洞内の水の相図. 横軸は空洞直径の逆数. 太い MCM では, 制限空間効果によりバルク水の融点効果が起こる (破線). 細い MCM 内では, バルク水は生成されず, 高温相と低温相の間をクロスオーバー的に変化する (実線). SWCNT 内の水は非連続の相転移挙動を示す.

引っ張り歪みを導入した遷移金属ダイカルコゲナイドの光・電子物性 (内田修士論文), マスクレスフォトリソグラフィによる微細電極作成と電界効果を利用した遷移金属ダイカルコゲナイドの光物性制御 (小川修士論文), 化学気相成長で合成した大面積二硫化モリブデンを利用した電界効果型トランジスタの作製と評価 (清水 卒業研究), 水を利用したクリーンな転写法の開発と架橋した遷移金属ダイカルコゲナイドの励起子の拡散と寿命に関する研究 (小島 卒業研究) などについて中心的に進めてきた. 今後, 多様な性質を持つ TMDC を複合化したヘテロ構造を作製し, ナノ構造の特徴を利用した新規物性の発現やデバイス応用へと展開していく.

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

有機電荷移動錯体 β' -(BEDT-TTF) $_2$ ICl $_2$ は加圧によって, 常圧での絶縁体状態から金属状態へ変化していき, 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, 常圧の電子状態から圧力下での金属状態に変化する様子を, 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) 測定用のキュービックアンビルセルを利用した ESR 装置開発を進めている. 加圧時, 冷却時の ESR シグナルのベースラインの歪みが大きな問題であったが, 高周波コイル, 加圧部, 圧力伝達部等, 装置全体のグラウンド側の接続を完全にすることで歪みを抑えることができ, ESR 標準試料 DPPH を加えた β' -(BEDT-TTF) $_2$ ICl $_2$ について, 常圧?80 ton (約 8GPa), 常温?液体窒素温度の範囲で, 両者の信号を分離し, それぞれの線幅や面積の解析ができる信号を得ることができるようになった. これで本来の β' -(BEDT-TTF) $_2$ ICl $_2$ の電子状態の研究に集中することができるが, 標準試料である DPPH の線幅の温度依存性が 50 ton と 60 ton の間で変化する興味深い結果も得られ, これについても調べていく予定である. (埼玉大, 産総研, 千葉大との共同研究)

5) 学外共同利用施設による研究, その他

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): 配向カーボンナノチューブおよびグラフェンの構造研究 (2016G634)

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): 光機能性原子層ヘテロ構造の開発 (ZE29A-13)

2. 研究業績

1) 論文

H. Kyakuno, K. Matsuda, Y. Nakai, R. Ichimura, T. Saito, Y. Miyata, K. Hata, Y. Maniwa: "Rotational dynamics and dynamical transition of water inside hydrophobic pores of carbonnanotubes", *Sci. Rep.*, **7** (2017) 14834

M. Fujihara, S. Ogawa, S. Yoshimura, R. Inoue, Y. Maniwa, T. Taniguchi, K. Watanabe, H. Shinohara, Y. Miyata: "Clean and polymer-free transfer of CVD-grown graphene films on hexagonal boron nitride substrates", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **56** (2017) 055102-1-4

E. Maeda, Y. Miyata, H. Hibino, Y. Kobayashi, R. Kitaura, H. Shinohara "Orientation-controlled growth of hexagonal boron nitride monolayers templated from graphene edges" *Appl. Phys. Express*, **10** (2017) 055102-1-4

B. Thendie, H. Omachi, J. Hirotsu, Y. Ohno, Y. Miyata, H. Shinohara "Purification of 1.9-nm-diameter semiconducting single-wall carbon nanotubes by temperature-controlled gel-column chromatography and its application to thin-film transistor devices" *Jpn. J. Appl. Phys.*, **56** (2017) 065102-1-8

S. Yasuda, R. Takahashi, R. Osaka, R. Kumagai, Y. Miyata, S. Okada, Y. Hayamizu, K. Murakoshi "Out-of-Plane Strain Induced in a Moire Superstructure of Monolayer MoS₂ and MoSe₂ on Au(111)" *small*, **13** (2017) 1700748-1-8

H. Mogi, Y. Kobayashi, A. Taninaka, R. Sakurada, T. Takeuchi, S. Yoshida¹, O. Takeuchi, Y. Miyata, H. Shigekawa "Scanning tunneling microscopy/spectroscopy on MoS₂ embedded nanowire formed in CVD-grown Mo_{1-x}W_xS₂ alloy" *Jpn. J. Appl. Phys.*, **56** (2017) 08LB06-1-4

2) 著書

坂本浩一, 千葉雅美: 首都大学東京 都市教養学部理工学系物理学コースの基礎物理実験, 大学の物理教育 2017 vol.23 No.3

3) 特許

4) 学会講演

● 日本表面科学会「摩擦の科学」研究部会シンポジウム「様々な界面の摩擦・凝着制御の最前線」 2017年8月19日（横浜市立大学）

宮田耕充：ファンデルワールスヘテロ構造における スライド可能な原子層

● 東京理科大学ナノカーボン研究部門ワークショップ 2017年8月31日（東京理科大学）

宮田耕充: 原子層ヘテロ構造の合成と機能開拓

● 第78回応用物理学会秋季学術講演会 2017年9月5-8日（福岡国際会議場）

小林佑, 吉田昭二, 村瀬康太, 岡田直也, 入沢寿史, 真庭豊, 重川秀実, 宮田耕充: ハライドアシスト MOCVD による TMDC 成長と評価

齊藤哲輝, 小林佑, 渡邊賢司, 谷口尚, 真庭豊, 宮田耕充: Interlayer excitons in CVD-grown WS₂/MoS₂ vertical heterostructures

入沢寿史, 岡田直也, 水林亘, 遠藤和彦, 森貴洋, 安藤淳, 佐々木将悟, 遠藤尚彦, 宮田耕充: Si 加工基板の利用による原子層カルコゲナイドの位置制御成長

齊藤哲輝, 小林佑, 渡邊賢司, 谷口尚, 真庭豊, 宮田耕充: WS₂/MoS₂ ヘテロ構造における発光ピークの起源

吉村真太郎, 小林佑, 岡田直也, 入沢寿史, 真庭豊, 宮田耕充: Re ドープ 単層 MoS₂ の合成と評価

小川峻, 清水宏, 小林佑, 真庭豊, 宮田耕充: 発光イメージングによる CVD 成長単層 MoS₂ の結晶性評価

内田智美, 小林佑, 遠藤尚彦, 真庭豊, 宮田耕充: CVD 成長した単層 MoS₂ 単結晶の電気伝導特性

高口裕平, 蒲江, 小林祐, 竹延大志, 真庭豊, 宮田耕充: WSe₂/MoSe₂ 面内ヘテロ構造を利用した電気二重層発光ダイオード

茂木裕幸, 汪子函, 口裕平, 番場隆文, 吉田昭二, 宮田耕充, 武内修, 重川秀実: 多探針時間分解 STM を用いた WSe₂ 単層のキャリアダイナミクス計測

村瀬康太, 小林佑, 吉田昭二, 武内修, 宮田耕充, 重川秀実: MOCVD 成長した単層 TMDC の STM 観察

林大介, 中井祐介, 客野遥, 宮田耕充, 真庭豊: 単層カーボンナノチューブの熱電物性の接合界面による制御

● 第 53 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 2017 年 9 月 13-15 日 (京都大学)

小林祐, 吉田昭二, 村瀬康太, 岡田直也, 入沢寿史, 真庭豊, 重川秀実, 宮田耕充: ハライドアシスト MOCVD による TMDC 成長と評価

蒲江, 張文金, 松岡拓史, 小林佑, 高口裕平, 宮田耕充: Li Lain-Jong, 松田一成, 宮内雄平, 竹延 大志: 遷移金属ダイカルコゲナイドの電流励起発光イメージング

Wenjin Zhang, Alexander Hwang, 齊藤哲輝, 小林佑, 谷口尚, 渡邊賢司, 宮田耕充, 松田一成, 宮内雄平: Substrate and sample dependent exciton transport properties in monolayer transition metal dichalcogenides

高口裕平, 蒲江, 小林佑, 竹延大志, 真庭豊, 宮田耕充: WSe₂/MoSe₂ 面内ヘテロ構造を利用した電気二重層発光ダイオード

小川峻, 清水宏, 小林佑, 遠藤尚彦, 真庭豊, 宮田耕充: 発光イメージングによる CVD 成長単層 MoS₂ の結晶性評価

吉村真太郎, 小林佑, 岡田直也, 入沢寿史, 真庭豊, 宮田耕充: Re ドープ 単層 MoS₂ の合成と評価

齊藤哲輝, 小林佑, 渡邊賢司, 谷口尚, 真庭豊, 宮田耕充: WS₂/MoS₂ ヘテロ構造における発光ピークの起源

内田智美, 小林佑, 蒲江, 竹延大志, 遠藤尚彦, 真庭豊, 宮田耕充: CVD 成長した単層 MoS₂ 単結晶の電気伝導特性

● 日本物理学会 2017 年秋季大会 2017 年 9 月 21-24 日 (岩手大学)

宮田耕充: 機能性 2 次元カルコゲナイドの成長と評価

蒲江, Wenjin Zhang, 松岡拓史, 小林佑, 高口祐平, 宮田耕充, Lain-Jong Li, 松田一成, 宮内雄平, 竹延大志: 電解質を用いた単層遷移金属ダイカルコゲナイド発光素子

佐成晏之, 内田健人, 小林祐, 田中耕一郎, 宮田耕充, 廣理英基: 単層 WS₂ の高密度励起における発光ダイナミクス

岡部碧, 中井祐介, 東中隆二, 宮田耕充, 真庭豊: 3 次元ディラック電子系候補物質 PtSn₄ の NMR 測定

● 電通大ナノトライボロジー研究センター第一回シンポジウム「表面・界面の物理と摩擦」 2017 年 9 月 30 日 (電気通信大学)

宮田耕充: ファンデルワールスヘテロ構造におけるスライド可能な原子層

● 第 54 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 2018 年 3 月 10-12 日 (東京大学)

清水宏, 小川峻, 小林佑, 遠藤尚彦, 真庭豊, 宮田耕充: CVD 成長した単層 MoS₂ を用いた FET の作製と評価

小島佳奈, Zhang Wenjin, 宮内雄平, 齊藤哲輝, 小林佑, 遠藤尚彦, 松田一成, 真庭豊, 宮田耕充: 架橋した単層 MoS₂ の作製と光学的性質

吉村真太郎, 小林佑, 遠藤尚彦, 真庭豊, 宮田耕充: クラウンエーテル錯塩による単層 MoS₂ の化学ドーピング

Rong Xiang, 熊本明仁, 小林佑, 宮田耕充, 幾原雄一, 丸山茂夫: Direct TEM/STEM imaging of 2D atomic layer crystals on SiO₂

小林佑, 吉田昭二, 丸山実那, 村瀬康太, 岡田晋, 真庭豊, 重川秀実, 宮田耕充: 層状カルコゲナイドを用いた二次元多段ヘテロ構造の連続ヘテロエピタキシー

● 第 65 回応用物理学会春季学術講演会 2018 年 3 月 17-20 日 (早稲田大学)

吉田昭二, 吉村真太郎, 竹内高広, 本田周太, 植田暁子, 武内修, 宮田耕充, 重川秀実: MoS₂ 単原子層中 Re ドーパントの局所電子状態の STM/STS 計測

沢辺健太郎, 柳川勇治, 林大介, 中井祐介, 客野遥, 宮田耕充, 斎藤毅, 真庭豊: 単層カーボンナノチューブフィルムの熱電物性: パワー ファクター

柳川勇治, 沢辺健太郎, 林大介, 中井祐介, 客野遥, 宮田耕充, 斎藤毅, 真庭豊: 単層カーボンナノチューブフィルムの熱電物性: 熱拡散率

国際会議

● Compound Semiconductor Week 2017, Berlin, Germany, May 14-18, 2017

Y.Miyata: Semiconductor heterojunctions based on 2D materials

● Collaborative Conference on Materials Research 2017, Jeju island, South Korea, June 23-26, 2017

H. Sakamoto, K. Mizoguchi: Analysis of STM Images of Organic Crystals and DNA

● 12th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics, Kirishima, August 29, 2017

Y. Miyata: Semiconductor heterojunctions based on 2D materials

● The 8th A3 Symposium on Emerging Materials, Suzhou, China, October 25-28, 2017

Y. Miyata: Semiconductor Heterojunctions Based on 2D Materials

齊藤哲輝, 小林佑, 渡邊賢司, 谷口尚, 真庭豊, 宮田耕充: Photoluminescence peaks in WS₂/MoS₂ heterostructures

小林祐, 吉田昭二, 村瀬康太, 岡田直也, 入沢寿史, 真庭豊, 重川秀実, 宮田耕充: Growth and characterization of transition metal dichalcogenides using halide-assisted MOCVD

● 2017 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS), Hawaii, USA, November 26-December 2, 2017

Y. Miyata: Semiconductor heterojunctions based on 2D materials

高口裕平, Jiang Pu, 小林佑, 竹延大志, 真庭豊, 宮田耕充: Electric Double Layer Light Emitting Diode of WSe₂/MoSe₂ In-Plane Heterostructures

吉村真太郎, 小林佑, 岡田直也, 入沢寿史, 真庭豊, 宮田耕充: Growth and Characterization of Re-Doped MoS₂ Monolayers

● International Workshop on Frontier and Cutting-edge Technologies over 2D Materials (FaCeTo2D:2018), Miyagi, March 29-30, 2018

Y. Miyata: Growth and characterization of atomic-layer heterostructures

表界面光物性研究室

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。特に、フレキシブルな界面を有する系における熱物性のフェルミレベル依存性に着目した研究を精力的に進めている。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関連の解明を進めている。

1) 低次元ナノ物質系における構造と物性の制御

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、特に、不純物の影響に着目し、純度99パーセント以上の単一カイラリティ(6,5)SWCNTを得る技術を確立し、その熱電物性のフェルミレベル依存性を解き明かす研究を進めている。

SWCNTの配列制御膜作製技術の開発 SWCNT薄膜の物性は、接合界面の状況に大きく影響を受ける。よって、SWCNT薄膜物性を議論する為には、SWCNT間の接合状態が制御された状況での物性を議論する必要がある。そのため、今年度は、柳は、サバティカルを活用して、ライス大河野グループにおいてSWCNTが配列した大面積薄膜の作製法を習得した。得られた薄膜を用いた基礎熱電特性の解明や、光物性の研究を行った。また首都大においても同様な配列膜を作製する為の実験系の整備を行った。

二硫化タングステンナノチューブの精製技術の開発 無機ナノチューブの一つとして、二硫化タングステンナノチューブがある。合成によって得られる試料には、様々な直径・層数のナノチューブが含まれており、均一な構造を備えた試料を得る為、今年度は遠心法を用いてある特定の層数を備えるナノチューブを精製する技術開発を行った。

2) 光物性研究

SWCNT配列膜における特殊な光物性 SWCNTが一方向に配列した薄膜を用いることにより、SWCNTの軸に平行・垂直方向の光物性をはじめて議論することができる。過去において当研究室において存在を予想していた軸に垂直方向に吸収を備えるプラズモンの存在を確認する為、SWCNT配列薄膜に対して、イオン液体を用いたゲーティング法を用いてキャリアを注入し、その軸に平行・垂直方向の光吸収のキャリア注入依存性を明らかにした。その結果、高密度キャリア注入時において、軸に垂直方向に明確に新たな吸収が立ち上がることを確認し、ナノチューブの軸の垂直方向に応答するインターサブバンドプラズモンという新たなプラズモン吸収の存在を解き明かした。

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、局所サイトであらわ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た測定を開発した。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。我々の研究室では、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・発光スペクトルの観測を実現している。更には、 MoS_2 試料の局所光吸収・発光スペクトルを明らかにすると共に、カンチレバーからの電界印加により、局所発光の変調が可能であることを明らかにした。

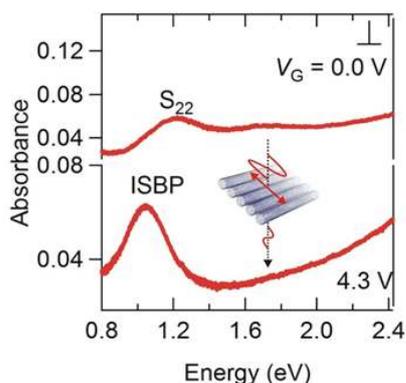


図 1: ナノチューブ軸に平行および垂直方向の光吸収

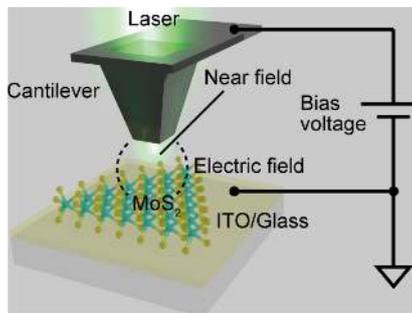


図 2: 電界効果近接場分光の模式図

2. 研究業績

1) 論文

M. V. Kharlamova, C. Kramberger, K. Yanagi, M. Sauer, T. Saito, and T. Pichler: "Separation of Nickelocene - Filled Single - Walled Carbon Nanotubes by Conductivity Type and Diameter",

Physica Status Solidi B, **254** (2017) 1700178

Y. Ichinose, J. Eda, Y. Yomogida, Z. Liu, and K. Yanagi: "Extraction of High-Purity Single-Chirality Single-Wall Carbon Nanotubes Through Precise pH Control Using Carbon Dioxide Bubbling", *The Journal of Physical Chemistry C*, **121** (2017) 13391-13395

J. Nozaki, M. Fukumura, T. Aoki, Y. Maniwa, Y. Yomogida, and K. Yanagi: "Manipulation of local optical properties and structures in molybdenum-disulfide monolayers using electric field-assisted near-field techniques", *Sci. Rep.*, **7** (2017) 46004

X. Wei, T. Tanaka, T. Hirakawa, Y. Yomogida, and H. Kataura: "Determination of Enantiomeric Purity of Single-Wall Carbon Nanotubes Using Flavin Mononucleotide", *J. Am. Chem. Soc.*, **139** (2017) 16068-16071

X. He, N. F. Hartmann, X. Ma, Y. Kim, R. Ihly, J. L. Blackburn, W. Gao, J. Kono, Y. Yomogida, A. Hirano, T. Tanaka, H. Kataura, H. Htoon, and S. K. Doorn "Tunable room-temperature single-photon emission at telecom wavelengths from sp³ defects in carbon nanotubes", *Nat. Photon.*, **11** (2017) 577-582

M. Yudasaka, Y. Yomogida, M. Zhang, T. Tanaka, M. Nakahara, N. Kobayashi, Y. Okamoto, K. Machida, K. Ishihara, K. Saeki, and H. Kataura: "Near-Infrared Photoluminescent Carbon Nanotubes for Imaging of Brown Fat", *Sci. Rep.*, **7** (2017) 44760

2) 特許

特願 2017-160677 半導体素子の製造方法, 及び半導体素子 平成 29 年 8 月 23 日, 公立大学法人 首都大学東京, 柳和宏, 野崎純司, 蓬田陽平

3) 学会講演

● 日本物理学会 第 73 回年次大会 2018 年 3 月 22 日~25 日 (東京理科大学)

西留比呂幸, 永井恒平, 福原健吾, 一ノ瀬遥太, 野崎純司, 蓬田陽平, 柳和宏, 田中耕一郎: 単層カーボンナノチューブにおけるテラヘルツ非線形応答

一ノ瀬遥太, 福原健吾, 枝淳子, 蓬田陽平, 柳和宏: 高純度単一 (6,5) カイラリティ単層カーボンナノチューブの電気二重層キャリア注入によるゼーベック制御

● 第 65 回応用物理学会春季学術講演会 2018 年 3 月 17~20 日 (早稲田大学)

蓬田 陽平, 劉 崢, 柳 和宏: 二硫化タングステンナノチューブの構造分離

西留 比呂幸, 永井 恒平, 一ノ瀬 遥太, 福原 健吾, 野崎 純司, 枝 淳子, 蓬田 陽平, 柳 和宏, 田中 耕一郎: 単層カーボンナノチューブにおける THz 高調波発生

● 第 54 回フラーレンナノチューブグラフェンシンポジウム 2018 年 3 月 10~12 日 (東京大学)

W. Gao, N. Komatsu, F. Katsutani, X. Li, K. Yanagi, J. Kono: Science and Applications of Wafer-Scale Aligned Carbon Nanotube Films

Y. Ichinose, K. Fukuhara, J. Eda, Y. Yomogida, K. Yanagi: Tuning of the Thermoelectric Properties of High-Purity Single-Chirality (6,5) Single-Walled Carbon Nanotubes by Electrolyte Gating

K. Fukuhara, Y. Ichinose, Y. Yomogida, W. Gao, J. Kono, K. Yanagi: Thermoelectric Properties of Aligned Single-Wall Carbon Nanotube Films

H. Nishidome, K. Nagai, Y. Ichinose, K. Fukuhara, J. Nozaki, J. Eda, Y. Yomogida, K. Yanagi, K. Tanaka: THz high harmonic generation from single wall carbon nanotubes

K. Yanagi: Thermoelectric Properties of Fermi Level Tuned and Aligned Single Wall Carbon Nanotube Thin Films (招待講演)

F. Katsutani, W. Gao, X. Li, Y. Ichinose, Y. Yomogida, K. Yanagi, J. Kono: Direct Observation of Cross-Polarized Excitons in Aligned and Chirality-Enriched Single-Wall Carbon Nanotubes

● 日本物理学会 2017 年秋季大会 2017 年 9 月 21~24 日 (岩手大学)

野崎純司, 西留比呂幸, 上野啓司, 真庭豊, 蓬田陽平, 柳和宏: 電界効果近接場による遷移金属カルコゲナイド薄膜の局所光物性制御と構造制御

柳和宏, Fumiya Katsutani, Weilu Gao, Junichiro Kono: 高密度キャリア注入時に形成されるナノチューブ軸に垂直方向の光吸収

● 第 7 8 回応用物理学会秋季学術講演会 2017 年 9 月 5~8 日 (福岡国際会議場・国際センター)

野崎 純司, 西留 比呂幸, 上野 啓司, 蓬田 陽平, 柳 和宏: 電界効果近接場法による MoTe₂ 薄膜の構造制御

蒲 江, 山田 知之, Li Lain-Jong, 松田 達磨, 蓬田 陽平, 柳 和宏, 伊東 裕, 竹延 大志: 大面積 MoS₂ 単層膜における電界誘起金属-絶縁体転移

魏 小均, 都築 真由美, 蓬田 陽平, 王 国偉, 平野 篤, 田中 丈士, 片浦 弘道: 単層カーボンナノチューブの蛍光及び共鳴ラマン測定における光子再吸収効

● 第 5 3 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 2017 年 9 月 13~15 日 (京都大学)

J. Nozaki, H. Nishidome, K. Ueno, Y. Yomogida, K. Yanagi: Local Optical Absorption Spectra of Transition Metal Dichalcogenide Monolayer by Scanning NearField Optical Microscopy Measurements

Y. Yomogida, K. Yanagi: Diameter control of surfactant-wrapped WS₂ nanotubes through centrifugation

K. Yanagi, Y. Ichinose, R. Okada, Y. Yomogida, F. Katsutani, W. Gao, J. Kono: Intersubband plasmons in gated and aligned single-wall carbon nanotubes

X. Wei, M. Tsuzuki, Y. Yomogida, G. Wang, A. Hirano, T. Tanaka, H. Kataura: Concentration Dependence of Resonance Raman Spectrum of Single-Chirality Single-Wall Carbon Nanotubes

M. Yudasaka, Y. Yomogida, M. Zhang, T. Tanaka, M. Nakahara, N. Kobayashi, Y. Okamatsu, K. Machida, K. Ishihara, K. Saeki, H. Kataura: Near-Infrared Photoluminescent Carbon Nanotubes for Imaging Brown Fat

● ナノ物質研究会 2017 年 11 月 3 日 (伊東市観光会館)

福原健吾: ラマン散乱を用いたカーボンナノチューブの配列評価

西留比呂幸: 近接場分光顕微鏡を用いた原子層材料の局所構造制御法開発

一ノ瀬遥太: 電気二重層キャリア注入による高純度精製単層カーボンナノチューブのゼーベック制御

岡田遼太郎: アルカリ金属イオンインターカレーションによる TMDC 物性研究

野崎純司: 電界効果近接場法による MoTe₂ 薄膜の局所構造制御に関する研究

菅原光成: 二硫化タングステンナノチューブにおける熱電変換効率の測定

● 分子性デバイス物性若手研究会 2017 年 10 月 27 日 (理化学研究所)

蓬田陽平: ナノチューブ物質の構造制御と物性研究

● 蔵王 17 研究会 2017 年 8 月 9 日~10 日 (タカミヤ瑠璃倶楽リゾート)

Y. Yomogida: Thermoelectric properties of WS₂ nanotube networks

国際会議

● APS March Meeting 2018 年 3 月 6 日 (Las angeles (California, USA))

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

ソフトマター研究室

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。また、時間スケールが長いために非平衡になりやすい。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非平衡現象

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、エネルギー的な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) 粘性差を伴った2成分熱対流

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る。2成分系になると、あまり知られていないが1成分より複雑な挙動を見せる。温度勾配によって、ルドビック・ソレー効果が起こり、濃度輸送が行われる。濃度と密度がカップルしている場合、濃度輸送と密度差の競合が起こることが知られている。我々はこの他に粘性差が重要であることを発見した。ソレー効果が起きない条件にしても、2成分間に粘性差がある場合、過渡的停滞領域の形成が起こることを系統的な実験から見出した。これらは新しい2成分対流であり、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) 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。これまで液体の体積分率によって、状態が経験的に分類されてきた。5%以下であれば、dry foam と呼ばれ、15%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。我々はさらに、高速度カメラを用いて、崩壊現象を観察した。液体分率が低い場合には、一つの泡の崩壊が連鎖して周囲も壊していく雪崩的に崩壊する。この雪崩的崩壊には、伝搬モードと貫通モードの2種類あることを見つけ、さらにその濃度依存性について膜の揺らぎが重要であることを見出した。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。

4) 生物をヒントにパターン形成ダイナミクスを探る

生物の中には集団になると協動的な動きを発現し、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、ネットワークパターンの再現に成功した。この他にも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。

2. 研究業績

1) 論文

Kazuya U. Kobayashi and Rei Kurita: Ubiquitous transient stagnant domain formation during thermal convection in a well-mixed two component fluid with large viscosity difference, *Scientific Reports* **7**, 12983 (2017)

Rei Kurita, Shun Mitsui and Hajime Tanaka: Response of soft continuous structures and topological defects to a temperature gradient, *Physical Review Letters* **119**, 108003 (2017)

Rei Kurita: Control of pattern formation during phase separation initiated by a propagated trigger, *Scientific Reports* **7**, 6912 (2017)

Rei Kurita, Yujiro Furuta, Naoya Yanagisawa and Noriko Oikawa: Dynamical transition in a jammed state of a quasi-two-dimensional foam, *Physical Review E* **95**, 062613 (2017)

2) 学会講演

● International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017 (Sendai, Japan)

Rei Kurita : Pattern Formation during Phase Separation with a Propagated Trigger (Poster)

Kazuya U. Kobayashi and Rei Kurita : Thermal Convection in a Well-Mixed Two Component Fluid with Large Viscosity Difference (Poster)

Yujiro Furuta, Naoya Yanagiwasa, Noriko Oikawa and Rei Kurita : Close Connection between a Dry-Wet Transition and a Bubble Rearrangement in Quasi-Two-Dimensional Foam (Poster)

Naoya Yanagisawa, Noriko Oikawa and Rei Kurita : A Relationship between a Bubble-Avalanch Dynamics and a Superdry-Sry Transition in a Quasi-Two-Dimensional Foam (Poster)

● 日本物理学会 2017 年秋季大会 (岩手大学 上田キャンパス)

柳沢直也, 及川典子, 栗田玲 : 泡沫における superdry-dry 転移

沖山綾馬, 及川典子, 栗田玲 : 水中における粉体のダイナミクス

森永恒希, 及川典子, 栗田玲 : コーヒーリング効果を用いた薄膜における結晶化研究

小林和也, 栗田玲 : ゼラチン溶液における熱対流の初期過程観察

小林和也, 栗田玲: 大きな粘性差を伴った混和性二成分流体の熱対流

小林拓郎, 栗田玲: リンの高圧化における結晶化

石崎健太, 栗田玲: 粒子サイズの等しい2成分系における結晶成長

及川典子, 本多崇人, 栗田玲: 引力相互作用の時間遅れモデルにおける楕円形粒子の凝集パターン

● 第16回 関東ソフトマター研究会 (東京農工大)

小林和也, 栗田玲: 大きな粘性差を伴う混和性2成分流体の対流ダイナミクス

森永恒希, 及川典子, 栗田玲: 薄膜系における結晶化の研究

石崎健太, 及川典子, 栗田玲: 粒子サイズの等しい2成分系におけるガラス形成能の研究,

小林拓郎, 栗田玲: リンの高圧化における結晶化

沖山綾馬, 栗田玲: 水中における force chain の構造とダイナミクス

柳沢直也, 栗田玲: 擬2次元泡沫におけるダイナミクス

● 第7回ソフトマター研究会日本物理学会 (京都大学)

小林和也, 栗田玲: 大きな粘性差を伴った2成分混合系における熱対流

沖山綾馬, 栗田玲: 粉体における内部構造と force chain の関係

柳沢直也, 栗田玲: 擬2次元泡沫における雪崩的崩壊ダイナミクス

塚田剛, 栗田玲: トリガーが誘起する相分離ダイナミクス

● 日本物理学会第73回年次大会 (東京理科大学, 野田キャンパス)

柳沢直也, 及川典子, 栗田玲: 液体分率の観点から探る泡沫の雪崩現象

森永恒希, 及川典子, 栗田玲: 結晶のパターンに対する蒸発速度と液膜の厚みの影響

沖山綾馬, 及川典子, 栗田玲: 粉体における force chain と内部構造の関係

小林和也, 栗田玲: 粘弾性体におけるレイリーテイラー不安定性

塚田剛, 及川典子, 栗田玲: 3次元系におけるトリガーが誘起する相分離ダイナミクス

石崎健太, 及川典子, 栗田玲: 粒子の運動性の差異が結晶化におよぼす効果

超伝導物質研究室

1. 研究活動の概要

本研究室では、新奇超伝導体や高性能熱電変換材料などの新物質開発を行っており、それら新物質の機能性発現機構を探るための物性研究を進めている。特に、層状構造やローンペアを持つ新物質を設計することで、多彩な結晶構造および局所構造の実現を目指している。具体的には、BiCh₂系（Chはカルコゲン）層状超伝導体やSnAs系層状超伝導体、SnTe系超伝導体の研究を進めている。また、BiやSbのカルコゲナイドにおける熱電材料開発を進めている。

1) BiCh₂系超伝導研究

新しいBiCh₂系超伝導体の探索 これまでの研究で、BiCh₂系超伝導体における超伝導発現に重要なパラメータが見出されてきた。一つはBiCh₂層への電子ドーピングであり、もう一つは面内化学圧力効果である。（面内化学圧力効果の詳細は後に記載する。）このコンセプトに基づき、新規超伝導体Eu_{0.5}Ce_{0.5}FBiS_{2-x}Se_x（JPSJ 2017）およびLa_{1-x}Ce_xBiSSeを合成することに成功した（論文投稿中）。La_{1-x}Ce_xBiSSeは、BiCh₂層のChを50%Seで置換した超伝導層であり、最も化学圧力が印加された状態であり、そこにCeの混合価数状態（+3と+4）による電子ドーピングが生じることで、バルクな超伝導が発現することがわかった。本系はCeの混合化数状態を利用したバルク超伝導実現として、BiCh₂系における希少な例であり、混合価数状態と超伝導の相関を議論できる舞台だととらえている。

BiCh₂系超伝導体の機構解明に向けた研究 2012年に発見されたBiCh₂系超伝導体は、その超伝導機構が未解明であり、従来型の電子格子相互作用を媒介にした機構であると主張する研究結果がある一方で、最近の理論計算（Morice et al., PRB 2017）や角度分解光電子分光（Ota et al., PRL 2017）の結果から非従来型の機構が提案されている。本研究では、LaO_{0.6}F_{0.4}BiSSe超伝導体において、Se同位体効果を検証することで、超伝導機構におけるフォノンの寄与を検討した。同位体は⁷⁶Seおよび⁸⁰Seを用いた。LaO_{0.6}F_{0.4}BiSSeにおいて、Seはほぼ100%面内サイトを占有するため、超伝導面内に同位体元素が存在することになる。電気抵抗率および磁化率の結果から、本系においては同位体効果がほとんど観測されることがわかった（PRB 2018）。この結果は、LaO_{0.6}F_{0.4}BiSSeの超伝導発現にフォノンがほとんど寄与していないことを示す（図1）。

BiCh₂系においては、超伝導の発現条件がキャリア濃度のみでは理解できず、局所構造（特に局所的な乱れ）が超伝導発現に重要であることがわかってきた。本研究では、放射光X線回折を用いて、REO_{1-x}F_xBiCh₂系の精密結晶構造解析を行った。特に、超伝導層のBiとChサイトの熱振動因子を異方的に解析することで、Chサイトの面内方向の乱れが超伝導発現を抑制していることを解明した（JPSJ 2018）。

2) 新機能性材料の探索

カルコゲナイド系熱電材料の研究 BiCh₂系層状化合物の母物質は、化学圧力効果により結晶構造を最適化すると無次元性能指数ZTが0.3を超える熱電材料となることを見出した。特に、非常に低い熱伝導率が特徴的であり、本研究ではLaOBiS_{2-x}Se_x多結晶試料を用いて、非弾性中性子散乱を行い、フォノンエネルギーに関する解析を行った。その結果、LaOBiS_{2-x}Se_xにおいてSe量の増加によりBiの非調和振動エネルギーが低下する相関を見出した。この相関はかご状構造を持つ熱電材料において見出された傾向と類似しており、Biの非調和振動による熱伝導率の低減機構が解明された（APL 2018）。

さらに、アンチモンカルコゲナイド層を有する新規物質の開発も行った。REOSbCh₂ は BiCh₂ 系層状化合物と同様の層状構造を有する。現時点では電気伝導性を得られていないが、今後、キャリア量や局所構造の最適化により熱電性能向上を目指す。また、AgBiSe₂ 熱電材料に対して Se サイトの Te 置換効果を検証した。本系においては、Te 置換により構造相転移温度が低温側へシフトし、それに伴い低温領域の熱電性能が上昇することを見出した (Dalton Trans. 2018)。

新しい層状超伝導体の探索 我々は BiCh₂ 系超伝導体と同様に、ローンペアを持ちファンデルワールスギャップを有する層状超伝導体の探索を行った。その結果、SnAs 伝導層を有する NaSn₂As₂ が T_c = 1.3 K の超伝導体であることを発見した (図 2)。電気抵抗率測定に加え、比熱測定も行い、バルクな超伝導が発現していることを報告した。今後、SnAs 層と類似の SnP 層や SnSb 層を持つ層状超伝導体の探索を行う。

新たな BiS₂ 系層状化合物の設計指針を開発した。岩塩型の PbS や AgBiS₂ 層を LaOBiS₂ のファンデルワールスギャップ中に挿入することに成功した (EPL 2017, JPSJ 2017)。LaOBiPbS₃ および La₂O₂Bi₃AgS₆ は本系の新たなシリーズ (多層型伝導層を持つ層状ビスマスカルコゲナイド) であり、今後の元素置換研究などにより超伝導発現が期待される。

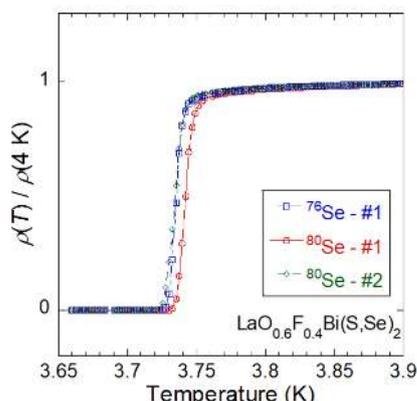


図 1: LaO_{0.6}F_{0.4}BiS₂ の超伝導転移 (電気抵抗率の温度依存性)。同位体 ⁷⁶Se および ⁸⁰Se を用いた試料間で転移温度の差がほとんどない。

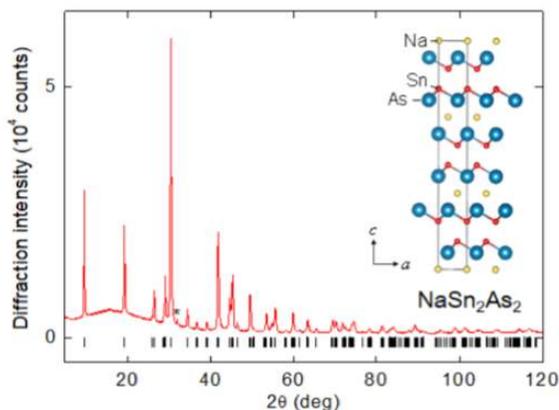


図 2: NaSn₂As₂ 新超伝導体の X 線回折パターンと結晶構造図。

2. 研究業績

1) 論文

K. Nagasaka, A. Nishida, R. Jha, J. Kajitani, O. Miura, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, Y. Aoki, A. Miura, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, H. Usui, K. Kuroki, Y. Mizuguchi: “Intrinsic Phase Diagram of Superconductivity in the BiCh₂-Based System Without In-Plane Disorder”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **86** (2017) 074701

Y. Hijikata, A. Nishida, K. Nagasaka, O. Miura, A. Miura, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, Y. Mizuguchi: “Bi Substitution Effects on Superconductivity of Valence-Skip Superconductor AgSnSe₂”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **86** (2017) 054711

Y. Mizuguchi, Y. Hijikata, T. Abe, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, Y. Goto, A. Miura, S. Lee, S. Torii, T. Kamiyama, C.H. Lee, M. Ochi, K. Kuroki: “Crystal structure, site selectivity, and electronic structure of layered chalcogenide LaOBiPbS₃”, *EPL*, **119** (2017) 26002

- Y. Goto, R. Sogabe, Y. Mizuguchi: “Bulk Superconductivity Induced by Se Substitution in BiCh₂-Based Layered Compounds Eu_{0.5}Ce_{0.5}FBiS_{2-x}Se_x”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **86** (2017) 104712
- Y. Goto, A. Yamada, T. D. Matsuda, Y. Aoki, Y. Mizuguchi: “SnAs-based layered superconductor NaSn₂As₂”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **86** (2017) 123701
- Y. Hijikata, T. Abe, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, Y. Goto, A. Miura, K. Tadanaga, Y. Wang, O. Miura, Y. Mizuguchi: “Synthesis, Crystal Structure, and Physical Properties of New Layered Oxychalcogenide La₂O₂Bi₃AgS₆”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **86** (2017) 124802
- A. Athauda, Y. Mizuguchi, M. Nagao, J. Neufeind, D. Louca: “Charge Fluctuations in the NdO_{1-x}F_xBiS₂ Superconductors”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **86** (2017) 124718
- A. Miura, T. Oshima, K. Maeda, Y. Mizuguchi, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, Y. Meng, X. D. Wen, M. Nagao, M. Higuchi, K. Tadanaga: “Synthesis, structure and photocatalytic activity of layered LaOInS₂”, *J. Mater. Chem. A*, **5** (2017) 14270
- K. Hoshi, Y. Goto, Y. Mizuguchi: “Selenium isotope effect in layered bismuth chalcogenide superconductor LaO_{0.6}F_{0.4}Bi(S,Se)₂”, *Phys. Rev. B*, **97** (2018) 094509
- Y. Goto, A. Nishida, H. Nishiate, M. Murata, C. H. Lee, A. Miura, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, Y. Mizuguchi: “Effect of Te substitution on crystal structure and transport properties of AgBiSe₂ thermoelectric material”, *Dalton Trans.*, **47** (2018) 2575
- C. H. Lee, A. Nishida, T. Hasegawa, H. Nishiate, H. Kunioka, S. Ohira-Kawamura, M. Nakamura, K. Nakajima, and Y. Mizuguchi: “Effect of rattling motion without cage structure on lattice thermal conductivity in LaOBiS_{2-x}Se_x”, *Appl. Phys. Lett.*, **112** (2018) 023903

2) 著書

該当なし

3) 特許

特願 2018-031880 超電導体 (SnPn 系超伝導体の物質特許) 平成 30 年 2 月 26 日, 公立大学法人 首都大学東京, 水口佳一, 後藤陽介

4) 学会講演

● 新学術領域 J-Physics トピカルミーティング 2017 年 5 月 11 日 (東北大学金研)

水口佳一: BiS₂ 系超伝導の発現条件と同位体効果検証に向けた進捗

● 日本物理学会 2017 年秋季大会 2017 年 9 月 21~24 日 (岩手大学)

水口佳一: BiS₂ 層を持つ新超伝導体 LaO_{1-x}F_xBiS₂ の物性 (企画講演)

曾我部遼太, 後藤陽介, 水口佳一: BiS₂ 系超伝導体の新しいキャリアドーピングの手法の開発

星和久, 後藤陽介, 水口佳一: BiCh₂ 系超伝導体 LaO_{0.6}F_{0.4}Bi(S,Se)₂ の同位体効果

● 日本熱電学会 第 22 回研究会 2017 年 10 月 1 日 (東工大蔵前会館)

後藤陽介：層状ビスマスカルコゲナイド熱電材料開発の進捗（招待講演）

● J-Physics 領域会議 2018 年 3 月 15～17 日（東大物性研）

水口佳一：重金属を含む超伝導体の探索

曾我部遼太，後藤陽介，水口佳一：Ce を含む BiS₂ 系超伝導体の新規合成

星和久，後藤陽介，水口佳一：BiCh₂ 系超伝導体 LaO_{0.6}F_{0.4}Bi(S,Se)₂ の Se 同位体効果

後藤陽介：SnAs 層を含む新しい層状超伝導体 NaSn₂As₂ と元素置換効果

● 日本物理学会 第 73 回年次大会 2018 年 3 月 22～25 日（東京理科大学野田キャンパス）

水口佳一，土方雄大：多層型 BiS₂ 系層状化合物の合成と物性

曾我部遼太，後藤陽介，水口佳一：BiS₂ 系層状化合物への新しいキャリアドーピング手法の探索

星和久，後藤陽介，水口佳一：BiCh₂ 系超伝導体における Se 同位体効果

後藤陽介，山田瑛，松田達磨，青木勇二，水口佳一：SnAs 伝導層を含む新しい層状超伝導体 NaSn₂As₂

● 第 62 回化合物新磁性材料専門研究会 2018 年 3 月 26 日（東京大学弥生キャンパス）

水口佳一：高圧効果・化学圧力効果を用いた新超伝導体の開拓

● つくば-柏-本郷 超伝導かけはしプロジェクト ワークショップ 2018 年 3 月 26-27 日（NIMS 千現キャンパス）

後藤陽介：SnAs 層を持つ新超伝導体と元素置換効果

国際会議

● Superstripes2017 2017 年 6 月 4-10 日（Ischia, Italy）

Y. Mizuguchi: Material design strategies for BiCh₂-based layered superconductors(invited)

Y. Goto: Enhanced thermoelectric performance in BiS₂-based layered compound LaOBiS_{2-x}Se_x

● Physics and Chemistry of Superconductor and Thermoelectric Materials (PCST)-2017 2017 年 9 月 13-16 日（Rome, Italy）

Y. Mizuguchi: Thermoelectric properties of BiS₂ systems

● E-MRS 2017 Fall meeting 2017 年 9 月 17-21 日（Warsaw, Poland）

Y. Mizuguchi: Importance of local crystal structure for superconductivity of BiCh₂-based layered compounds

Y. Goto: Effect of elemental substitution on thermoelectric properties of BiS₂-based layered compounds

● J-Physics2017 2017 年 9 月 24-28 日（Hachimantai, Iwate Japan）

Y. Mizuguchi: Superconductivity of layered BiS₂-based systems(invited)

● CEMS symposium on trends in condensed matter physics 2017 年 11 月 6–8 日 (RIKEN, Saitama Japan)

K. Hoshi, Y. Goto, Y. Mizuguchi: Isotope effect of LaO_{0.6}F_{0.4}Bi(S,Se)₂

Y. Mizuguchi: Unconventional superconductivity in BiCh₂-based superconductor revealed by isotope effect

編集後記

4月である。南大沢の桜並木も花はすっかり落ち、もう枝には微かな初夏の装いを感じさせるほど過ごしやすくなった。少し前までの私の大嫌いな寒さはいったいどこへ行ってしまったのか、全くもって理解不能である。慈道さんから、年次報告の中で教務補佐担当の一番大変なものはこの編集後記なるものであると聞いていたが、「うむむ」と納得しながら筆をとっている。

毎年のことであるが、4月は色々と大変である。この編集後記も字数は変わらずとも研究会アブストに比べたら困難極まる作業であり、恐れずに言わせてもらえればベスト5ぐらいに入る。ちなみに第1位は杉が終わってもまだ檜のあれである。その他に上位にランクされるのがとにかく報告書報告書報告書である。私のような平教員ではえらい先生方の忙しさに比べれば米粒ほどしかないと思われるが、これがジャブのように効いて精神が参ってしまうのである。科研費などの種々の書類に加え、学内の書類も山積みである。先日、これらの書類作成を科学者にあるまじき精神論の元、気合とともに1日で終わらせようと試みた。結局1日半かかってしまったが、これはなかなか良いかもしれない。大学院の特論も無理を言って集中講義形式にしてもらったので、4月半ばまでに終わる予定である。

そうやって少し時間ができたので、今年こそあれもやろうこれもやろうと妄想ばかり膨らんでくるもので、脳内お花畑状態である。これもいつか来た道、計画通りにいったことなど一度たりともないのだが。妄想だけではだめだと、秘蔵テーマについて久々に手を動かしてみるのだが、完全に阿呆になっているのもう踏んだり蹴ったりである。何しろ数ヶ月から下手をすると年単位でブランクがあるわけで、完全にリハビリが必要である。このていたらくでは、間違っても「早く論文を書きなさい」だとか「勉強してる？」などということをして学生に向かって言えないのである。いや、おまえが論文書けと。「大学に出てこようね」くらいなら良いのかもしれない。

ところで、この文章を読んでおられる方は、年次報告の表紙が新しくなったことにお気づきのことと思われる。2018年度から「理」学部になったわけで、新入生が「理学部のある大学を探してここにきた」だとか、卒研から「理学部になったなんてずるい(=いいなあ)」ということを知ったりすると少しばかり嬉しくなるものである。今後の受験者数の推移は要注意ではあるが、おおいに勇気付けられるスタートである。

(服部一匡 記)

平成 29 年度 年次報告編集委員
首藤啓 (2017 年度物理学教室主任)
服部一匡
田中篤司