

研究室活動状況 平成 30 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

2018 年度は、2017 年度末に転出された原子核ハドロン物理研究室の慈道氏の学生諸君が素粒子理論研究室に加わることで、大世帯の研究室となった。以下は元々の素粒子理論研究室の構成員と原子核ハドロン物理研究室から加わった構成員の研究活動の概要である。

1) MINOS 実験と MINOS 実験の混合角の測定値の違いを説明する可能性 (安田, 鈴木)

MINOS 実験におけるニュートリノ混合角は T2K 実験のものと有意に異なっていることが知られている。MINOS 実験グループが用いているニュートリノ核子散乱の断面積は必ずしも実験データを再現しておらず、又、彼らの最適解もフィットが悪いことが知られている。そこで、標準的枠組みの範囲内でニュートリノのエネルギーの推定値に大きな系統誤差があることを仮定し、フィットの良さが統計的に良くなるように (具体的には $\text{reduced}\chi^2$ が 1 となるように) 系統誤差を決めて解析を試み、MINOS 実験と T2K 実験との整合性を吟味した。結果は混合角の許容領域に関しては T2K と MINOS の齟齬が消失することはなかったが、質量二乗差に関しては両者の違いが少なくなることがわかった。

2) 太陽ニュートリノと KamLAND の違いを説明する新たな可能性の検討 (安田, 石田)

太陽ニュートリノ観測と KamLAND 実験の質量二乗差に有意な差があることが知られている。その差は主として、KamLAND 実験の質量二乗差を仮定した場合の太陽ニュートリノ生存確率のエネルギー依存性が太陽ニュートリノ観測のデータと矛盾していることに端を発している。その違いを説明するための可能性として、非標準的な大きさの太陽磁場とニュートリノ磁気モーメントを仮定して両者の差を説明する可能性を探った。残念ながらこのシナリオでは太陽ニュートリノ生存確率の現実的なエネルギー依存性の補正を説明することは出来ず、両者を整合させることは出来ないことがわかった。

3) 低エネルギー領域でのニュートリノ振動確率の表式 (安田)

太陽ニュートリノ観測と KamLAND 実験の齟齬を説明する一つの仮説としてフレーバーを保存しない非標準的相互作用が提唱されているが、そのような非標準的相互作用が存在する場合の低エネルギー領域での長基線実験でのニュートリノ振動確率の表式を一般の非標準的相互作用の場合に求めた。この振動確率は高エネルギー領域での Cervera の公式とは相補的なものとなっている。

4) 弦模型における電弱対称性の自発的破れ (北澤)

弦理論に基づく模型の中で、特に D ブレーンを用いる模型における電弱対称性の自発的破れの実現について研究した。電弱対称性の自発的破れに代表されるゲージ対称性の自発的破れは、同種の D ブレーンが平行にごくわずかに離れているという配位が安定に保たれた時に実現される。このような配位を安定に保つことは非常に困難で、活発な研究の対象にはなってこなかった。これまでの試みは配位を静的に安定化させることに集中していて、動的に安定化させる試みはなされていなかった。そこで、同種の D ブレーンが平行に、かつ連星のように互いに等距離を保ちながら安定に公転する可能性を追求した。最初の試みとして、互いに等速運動ですれ違う D ブレーンの間に働く力の精密な理解に努めた。相対速度がゼロの時には力は働かないが、相対速度がゼロでない場合には相対速度に依存した力が働くことを確認し、さらにその力のポテンシャルを複雑な弦の共形場の理論を使わずに、低エネルギー有効理論において近似的に求める方法について考察した。

この研究は高エネルギー加速研究機構の磯氏、須山氏および太田氏との共同研究である。

5) 宇宙背景輻射の大きなスケールのゆらぎの偏極（北澤）

宇宙背景輻射のゆらぎの偏極，特に大きなスケール（小さな波数）のゆらぎの B-mode と呼ばれる偏極（大スケール B-mode 偏極）について研究した．大スケールの温度ゆらぎには異常があり，それがインフレーションの始まりを見ているためであると解釈できることが知られている．また，大スケール B-mode 偏極は宇宙のインフレーションによって生成された原始テンソルゆらぎのみを起源とすることが知られている．大スケール B-mode 偏極を簡潔に計算する方法を提案し，それを用いて，将来の LiteBIRD などの観測装置による大スケール B-mode 偏極の精密測定によって，我々がインフレーションの始まりを見ているという解釈のさらなる傍証を得ることができる可能性があることを示した．

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.Grappuso 氏と P.Natoli 氏の協力を得て行った．

6) 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）

カビボ・小林・益川行列の要素のひとつである $|V_{cb}|$ を B 中間子の 2 体ハドロン崩壊を用いて決定する方法（昨年度提案した方法）における，終状態ハドロンの終状態相互作用 (final state interaction) の効果の大きさについて考察した．特に，非弾性終状態相互作用 (inelastic final state interaction) の大きさを見積もり，決定される $|V_{cb}|$ の値に 20 % 程度の理論誤差が生ずることを見出した．現時点での B 中間子の 2 体ハドロン崩壊の分岐比の測定精度が同程度であるので，決定される $|V_{cb}|$ の値には同程度の大きさの実験誤差がある．将来の実験で分岐比がより精密に測定された場合には，非弾性終状態相互作用の効果をより正確に理論的に評価する必要があることを認識した．

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）

K 中間子原子において強い相互作用によるエネルギーシフトは斥力的であると観測されている．一方 K^- -原子核間にはたらく強い相互作用は引力であると考えられている．両者を矛盾なく説明するには 2 つの機構が考えられる．1 つは引力の強い力が K 中間子原子核状態をつくることで生じる準位反発によるもので，もう一つは吸収を表す光学ポテンシャルの虚部が斥力として効くことによるものである．この 2 つの機構に基づいてポテンシャルを構成した．実験値を系統的に再現できるかどうかを調べた結果，光学ポテンシャルの虚部の効果が斥力的なエネルギーシフトの起源であることがわかった．この結果は K 中間子原子核相互作用においては，吸収の効果を表す虚部が束縛エネルギーにおいても大きな役割を演じることを示唆する．

この研究は，東工大の慈道大介氏，鳥取大学の池野なつ美氏，京都産業大学の山縣淳子氏，奈良女子大学の比連崎悟氏との共同研究である．

8) 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（天野）

本研究では s クォークと ud ダイクォークの質量が約 500 MeV で非常に近いと考えられていること，また ud ダイクォークに対して，カラー $\bar{3}$ を取ることにより，この 2 粒子間に対称性を考えた． $SU(3)_F$ から発展させて代数を構築し，縮退する粒子として s クォークスピン上下，スピン 0 ud ダイクォークの反粒子 3 成分でトリプレットを組む．ここから s クォークと ud ダイクォークを同一視し，トリプレットの質量の破れを求め，ハドロンの質量スペクトルを計算した．これらのハドロンに対して質量の破れから Gell-Mann 大久保の質量公式のような質量関係式を導いた．それらを実験値と比較しこの代数の妥当性，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行った．

本研究は東工大の慈道大介教授との共同研究である．

9) ダイクォーク模型における重いバリオンの励起エネルギー及びダイクォークの性質 (隈川)

近年、チャームクォークやボトム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続々と発見されている。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ふるまい、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、ダイクォークの存在や性質に注目が集まっている。ダイクォークはバリオン内の2つのクォークでできる複合粒子であり、カラー $\mathbf{\bar{3}}$ を持つ。本研究では、重いクォークを含むバリオンの質量より、ダイクォークの質量を決定した。さらに、ダイクォークに量子的な広がりを持たせ、 Λ_c 粒子の $1p$ 軌道の励起エネルギーを再現するようにすると、ダイクォークの平均二乗直径は $1.2[\text{fm}]$ 程度という計算結果が得られた。また、最近発見されたチャームクォークを2つ持つバリオン Ξ_{cc} についても計算を行い、励起スペクトルの予言を行った。

この研究は、東工大の慈道大介氏との共同研究である。

10) カイラル有効模型における真空構造での $U_A(1)$ 量子異常の役割 (河野)

本研究では、Nambu-Jona-Lasinio 模型 (以下 NJL 模型) と線形シグマ模型を用いて、真空構造における $U_A(1)$ 量子異常の役割を調べた。通常 NJL 模型においては、4点相互作用の結合定数がある臨界値を超えた時にカイラル対称性が自発的に破れ、線形シグマ模型では、シグマ場の2乗の係数が負になる状況でカイラル対称性が自発的に破れる。しかし、これら2つのモデルにおいて $U_A(1)$ 量子異常を考慮すると、先程の状況を満たしていない場合でもカイラル対称性が自発的に破れることが分かった。さらに、本研究では、どのような状況の時に $U_A(1)$ 量子異常が主体的な役割を担ってカイラル対称性を自発的に破るのかを調べ、そのような状況下で σ や η' の質量の満たすべき関係式を求めた。

本研究は、東工大の慈道大介氏、名古屋大の黒田佳樹氏と原田正康氏との共同研究である。

11) カイラルユニタリー模型を用いた核媒質中における K^+ 中間子に対する波動関数くりこみ (青木)

有限核子密度におけるカイラル対称性の部分的 (不完全) 回復を実験的に検証するために原子核中の Nambu-Goldstone (NG) ボソンの性質が研究されている。近年、カイラル対称性の部分的回復に付随する NG ボソンの性質の変化を与える補正として波動関数くりこみが重要だと考えられている。そこで、NG ボソンの一つである K^+ の核媒質中の性質を研究し、 K^+ に対する波動関数くりこみの影響がどのように現れるかを調べた。波動関数くりこみは核媒質中における自己エネルギーのエネルギー微分で得られる。自己エネルギーを構成するために、本研究では、tree レベルの KN 散乱振幅を next-to-leading order までのカイラル摂動論で計算し、ユニタリー化することでエネルギー適用領域を拡大した。 KN 散乱の実験データを再現するようにパラメータを決定した。波動関数くりこみは低エネルギーで6%程度の相互作用の増大を与えることが明らかになった。また、 KN 散乱振幅の $I=0$ チャンネルに $S=+1$ を持つエキゾチックな共鳴状態が存在し、共鳴のエネルギーの近辺で波動関数くりこみは強いエネルギー依存性を持つことが明らかになった。

この研究は、東工大の慈道大介氏との共同研究である。

2. 研究業績

1) 論文

Noriaki Kitazawa, Kyo-suke Masukawa and Yuki Sakai, Model independent extraction of $|V_{cb}|$ from two-body hadronic B-decays, *PTEP* **2019** (2019) 013B02.

Noriaki Kitazawa, Brane SUSY Breaking and the Gravitino Mass, *JHEP* **1804** (2018) 081.

A.Grappuso, N.Kitazawa, M.Lattanzi, N.Mandolesi, P.Natoli and A.Sagnotti, The Evens and Odds of CMB Anomalies, *Physics of the Dark Universe* **20** (2018) 49-64.

K. Abe, O. Yasuda et al., Physics potentials with the second Hyper-Kamiokande detector in Korea, *PTEP* **2018** (2018) 063C01.

Kenji Aoki, Daisuke Jido, KN scattering amplitude revisited in chiral unitary approach and a possible broad resonance in $S=+1$ channel, *PTEP* **2019** (2019) 013D01.

2) 国際会議報告

Osamu Yasuda, Recent status of neutrino phenomenology, *PoS HQL2018* (2018) 043.

3) 学会講演

国内研究会

● 日本物理学会第 74 回年次大会 2019 年 3 月 14 日 – 17 日 (九州大学 伊都キャンパス)

天野大樹, 慈道大介: 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

河野晋之介, 慈道大介, 黒田佳樹, 原田正康: カイラル有効模型における真空構造での $UA(1)$ 量子異常の役割

飯澤優太郎, 慈道大介, 池野なつ美, 山縣淳子, 比連崎悟: K 中間子原子エネルギースペクトルにおける斥力シフトの起源

青木健児, 慈道大介: カイラルユニタリー模型を用いた核媒質中における K +中間子に対する波動関数くりこみ

● 研究会「ニュートリノ原子核反応とニュートリノ相互作用」2019 年 2 月 22 日, KEK 東海キャンパス

安田修: ”ニュートリノ振動実験とニュートリノの非標準相互作用” (招待講演)

● 討論型研究会 2018 「中間子原子核研究の展開」2018 年 10 月 9 日-11 日, 東京工業大学

河野晋之介: カイラル有効模型における真空構造での $UA(1)$ 量子異常の役割

隈川健斗: 2 つのダイクォーク模型による重いクォークを含むバリオン

天野大樹: Dynamical supersymmetry for strange quark and ud diquark in hadron mass spectrum

飯澤優太郎: Spectrum of kaonic atom and kaon-nucleus interaction revisited

● ELPH 研究会「原子核中におけるハドロンの性質とカイラル対称性の役割」2018 年 9 月 11 日-12 日, 東北大学電子光理学研究センター, 仙台市

隈川健斗: 2 つの ダイクォーク模型による重いクォークを含むバリオン

飯澤優太郎: Spectrum of kaonic atom and kaon-nucleus interaction revisited

青木健児: カイラル摂動論を用いた π 中間子-原子核相互作用の P 波成分に対する波動関数くりこみの影響

河野晋之介：カイラル有効模型における真空構造での $UA(1)$ 量子異常の役割

国際会議

● KEK Theory workshop 2018, 17–20 December 2018, Tsukuba, Japan

N. Kitazawa: Gauge symmetry breaking in models with D-branes

● A topical conference on elementary particle physics and cosmology (Miami2018), 13–19 December 2018, Fort Lauderdale, Florida, USA

O. Yasuda: Effect of systematics in the T2HK, T2HKK, and DUNE experiments

● Satellite Workshop of QNP2018 on Hadron structure and interaction in dense matter, 11–12 November 2018, KEK Tokai Campus, Tokai, Ibaraki, Japan.

Y. Iizawa: Spectrum of kaonic atom and kaon-nucleus interaction revisited

● Tokyo Tech - Uppsala University 5th Joint Symposium, 24–25 September 2018, Ångström Laboratory, Uppsala University, Uppsala, Sweden.

Y. Iizawa: Spectrum of kaonic atom and kaon-nucleus interaction revisited

T. Amano: Dynamical supersymmetry for strange quark and ud diquark in hadron mass spectrum

● Neutrino Oscillation Workshop (NOW 2018) 9–16 September 2018, Rosa Marina, Ostuni, Italy

O. Yasuda: Systematics in T2HK/T2HKK/DUNE (Invited talk)

● International School for Strangeness Nuclear Physics (SNP School 2018), 1–3 August 2018, Research Center for Nuclear Physics, Osaka University, Ibaragi, Japan .

Y. Iizawa: Spectrum of kaonic atom and kaon-nucleus interaction (Poster)

T. Amano: Dynamical Super Symmetry for Strange Quark and ud Di-quark in Hadron Mass Spectrum (Poster)

● 14th International Conference on Heavy Quarks and Leptons (HQL2018) 27 May – 1 June 2018, Yamagata Terrsa, Yamagata, Japan

O. Yasuda: Recent status of neutrino phenomenology (Invited talk)

4) 一般向けのアウトリーチ活動

安田修：講演会「みんなにわかるニュートリノのお話」(2018年8月19日, 東京台場, 日本科学未来館・未来館ホール) の世話人・動画撮影担当・YouTube 投稿担当

・はじめに (<https://www.youtube.com/watch?v=MABweKzGkL0>)

・素粒子(実験)の世界 (<https://www.youtube.com/watch?v=VWIaiAuvIww>)

・スーパーカミオカンデ実験でわかったこと (https://www.youtube.com/watch?v=Oc_b5NFDYBU)

・宇宙ニュートリノの発見 (<https://www.youtube.com/watch?v=d7vVl3yDeBA>)

・ニュートリノと鍛え合った写真技術は世界を透視し, 知は続き, つながってゆく
(<https://www.youtube.com/watch?v=tTjAPPPMVTI>)

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 H30 (2018/2019) was conducted in three different directions corresponding to our three ongoing research projects. The conducted research (in two projects) was a continuation of our earlier research during the previous three years, whereas another (third) research project was new.

1)

Our main (first) research project is devoted to the unified theoretical description of cosmological inflation, dark energy and dark matter in the early Universe, in the framework of supergravity theory. This research project is aimed towards providing a theoretical bridge between modern theoretical cosmology, based on the gravitational theory, and theoretical high energy physics beyond the Standard Model of elementary particles, based on quantum field theory without gravity.

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) dark matter. The dark matter in our approach has the gravitational origin due to massive gravitino as the lightest supersymmetric particle and/or primordial black holes. In 2017 we have proposed the new specific supergravity model with a spontaneous supersymmetry breaking after inflation and the inflaton belonging to a massive vector multiplet, in the presence of a single chiral (Polonyi) superfield. The inflaton scalar potential has the form similar to that of the Starobinsky inflationary model. The Polonyi superfield with a linear superpotential was used towards getting spontaneous supersymmetry breaking with a tiny cosmological constant (in a de Sitter vacuum). However, the Polonyi superfield also caused some problems related to instability of the inflationary trajectory and the need of the high supersymmetry breaking scale needed for the mass separation between the bosonic and fermionic elementary particles. To avoid these problems, we modified the action of the vector multiplet to the Dirac-Born-Infeld form that is the particular non-linear extension of Maxwell electrodynamics, and reconsidered the description of cosmological inflation, dark energy and dark matter in the new theory. We demonstrated the consistency of our new model with current observations (ケトフ, Ishikawa).

2)

Our second research project is new and devoted to the recently discovered Fayet-Iliopoulos terms in supergravity, without gauging the R-symmetry. This is an important new theoretical development because it allows one to introduce new couplings in supergravity, which were unknown before. We applied these new couplings to theoretical cosmology for a description of the dark side of the Universe (inflation, dark energy and dark matter) in our approach. During the year we studied the restrictions on the new couplings, imposed by local supersymmetry and Kaehler-Weyl invariance, and found the most general form of the generalized Fayet-Iliopoulos terms and the related matter couplings in supergravity (ケトフ).

3)

Our third research project was devoted to a derivation of viable cosmological inflation from higher dimensional spacetimes in modified (super)gravity theories via their spontaneous compactification down to four spacetime dimensions with the extra dimensions compactified on a (hidden) sphere, in the presence of the abelian gauge fields (p-forms) with a non-trivial flux in the compactified space. We studied these flux compactifications with a non-trivial warp-factor and derived the scalar potential for the inflaton and the modulus of the 4-sphere. It was demonstrated that the flux leads to a stabilization of the modulus, whereas the viable Starobinsky-like single-field inflation in four spacetime dimensions can be also obtained, in good agreement with the recent observations of the Cosmic Microwave Background radiation by the Planck satellite mission (2018). We showed that it may be possible to embed our model into the modified supergravity theory in eleven spacetime dimensions after its spontaneous compactification on another 3-sphere and gauging the $SU(2)$ isometries of this 3-sphere. However, further progress was hindered by the need of generating a positive cosmological constant in eight spacetime dimensions, that may be possible via forming a non-perturbative $SU(2)$ gluon condensate in eight dimensions (ケトフ, 中田).

2. 研究業績

1) 論文

H. Abe, Y. Aldabergenov, S. Aoki, S.V. Ketov, Polonyi-Starobinsky supergravity with inflaton in a massive vector multiplet with DBI and FI terms, *Class. and Quantum Gravity* 30 (2019), 075012, 30 pages.

Y. Aldabergenov, S.V. Ketov, Modified Born-Infeld-dilaton-axion coupling in supersymmetry, *Symmetry* 11 (2018), no. 1, 14, 10 pages.

A. Addazi, S.V. Ketov, Gravitino production in supergravity, *Eur.Phys.J. C* 78 (2018) 642, 17 pages.

Y.Aldabergenov, S.V. Ketov, Removing instability of inflation in Polonyi-Starobinsky supergravity by adding FI term, *Mod.Phys.Lett. A* 91 (2018) no. 5, 1850032, 8 pages.

Y.Aldabergenov, R.Ishikawa, S.V. Ketov, S.I.Kruglov, Beyond Starobinsky inflation, *Phys.Rev. D* 98 (2018), no.8, 083511, 8 pages.

H.Abe, Y.Aldabergenov, S.Aoki, S.V. Ketov, Massive vector multiplet with Dirac-Born-Infeld and new Fayet-Iliopoulos terms in supergravity, *JHEP* 1809 (2018) 094, 20 pages.

Y.Aldabergenov, S.V. Ketov, R.Knoops, General couplings of a vector multiplet in $N=1$ supergravity FI terms, *Phys.Lett.B* 785 (2018) 284-287, 4 pages.

Y. Aldabergenov, A.Addazi, A. Marciano, S.V. Ketov, M.Yu. Khlopov, Physics of super heavy dark matter in supergravity, *Int. J. Mod. Phys. D* 27 (2018) 1841011, 31 pages.

2) 国際会議報告

S.V.Ketov, M. Yu. Khlopov, Extending Starobinsky inflationary model in gravity and supergravity, Proceedings of the 21st Workshop “What Comes beyond the Standard Models”, ブレド, スロヴェニア, 2018 年 7 月; edited by N. S. Borstnik et al., 2018, Ljubljana, ISSN 1580-4992

3) 国際会議

● 21st International Workshop “What comes beyond the Standard Models”, ブレド, スロヴェニア, 2018 年 6 月

S.V. Ketov, Extending Starobinsky inflationary model in gravity and supergravity,

● International Conference on Modified Gravity 2018 (MOGRA 2018), 名古屋, 日本, 2018 年 8 月

H. Nakada, Inflation from modified gravity in higher dimensions

● 8th International Workshop on Astronomy and Relativistic Astrophysics, オランタイタンボ, ペルー, 2018 年 9 月

S.V. Ketov, Inflation, dark energy and dark matter in supergravity

● KEK International Theory Workshop, 筑波, 日本, 2018 年 12 月

S.V. Ketov, Inflation, dark energy and dark matter in liberated supergravity.

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現象、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。2018年度の研究室構成はスタッフ2名、大学院生4名である。

1) 高エネルギー天体現象

パルサー星雲からのX線放射 比較的重い星は進化の最期に鉄コアが重力崩壊して爆発し、超新星の残骸に中性子星を残す。磁場が十分強い中性子星は自転に伴ってパルスを放出するパルサーとなる。パルサー星雲は、中性子星からのパルサー風と超新星残骸の相互作用によって形成され、高エネルギーの相対論的電子・陽電子が非熱的放射をしていると考えられる天体である。代表的な例にカニ星雲があり、可視光や電波、赤外線、X線など様々な波長で観測されているが、X線とその他の波長域ではその形状が大きく異なる。可視光や電波による像はカニの甲羅様に広がっているが、X線像はトーラスとジェットから成る構造を示し、広がりも小さい。そこで、このトーラス様のX線放射を理論的に説明することを目的として、パルサー星雲における物理過程を調べた。パルサー風が超新星残骸に衝突することで生じた衝撃波がパルサー星雲の物理状態を支配していると考えて相対論的磁気流体方程式を解き、エネルギー損失も考慮して得た電子の分布関数からシンクロトロン放射を計算した。パルサー風の幾何学的形状として、球対称分布の一部から成るジェット様形状と、2次元流体シミュレーションによる形状(形状のみで放射は計算されていない)を考えた。それぞれについて上記の計算を行ってX線輝度分布を計算した結果、後者の形状の方が、観測されているX線トーラスによく一致することが分かった。

2) 高エネルギー天体現象と天体の進化

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 M と銀河の中心部バルジの星の速度分散 σ の間に $M - \sigma$ relation と呼ばれる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。そこで、ブラックホールの活動を調べ、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の研究を進めた。降着円盤の力学的安定性や、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て繰り返しアウトフローを引き起こす可能性など、様々な物理過程を解析的および数値流体計算によって調べた。その結果、比較的小さい質量のブラックホールをもつ銀河では、よく知られた $M - \sigma$ relation のベキから外れて、より緩やかなベキの相関を示す可能性を見出した。

3) 天体の形成

渦巻銀河の星形成史 銀河の観測から、星形成を行なっている渦巻銀河の星形成率と渦巻銀河内の星の総質量には相関があることが知られている。多くの観測はこの相関が一つのベキで表されることを示してきたが、最近の一部の観測は大質量の渦巻銀河においてベキが変化していると報告している。相関が

銀河の進化を反映しているのか分布を反映しているのか観測的研究からは明確でなく、一方、理論的研究においても様々な不確定な仮定が含まれ、相関の起源は明らかになっていない。そこで、不確かな仮定を排除し、観測から得られた客観的と云える経験則と理論的な関係式だけに基づいて相関の形成過程を調べた。モデルとして、バルジが発達していないディスクのみから成る典型的な渦巻銀河を採用し、簡単のため、衝突・合体や銀河外からのガス降着のない孤立系を考えて計算を行って、相関のベキの時間発展や銀河の質量依存性を調べた。その結果、観測されているような、ベキで表される相関や星形成率が時間とともに減少する傾向を再現することができた。また、銀河のガス質量に対する星形成率の依存性が大きい場合には、大質量の銀河においてベキが変化しうことを示した。が、一方で、ダークマターハローの中でバリオンがディスクを形成する過程と経験則 baryonic Tully-Fisher 関係から、ガス質量に対する星形成率の依存性はそれほど大きくならないことも示した。

銀河団ダークマター・ガス・星分布の非球対称性 銀河団中のダークマター、ガス、星の分布の非球対称性を、宇宙流体シミュレーションを用いて調べた。観測量である天球面へ射影した2次元解析を行うとともに、3次元分布の時間発展を調べることで、銀河団の総質量と中心銀河の非球対称性の相関の起源について考察を行なった。

2. 研究業績

1) 論文

Y. Babazaki, I. Mitsuishi, N. Ota, S. Sasaki, H. Bohringer, G. Chon, G. W. Pratt, H. Matsumoto: "Suzaku observations of low surface brightness cluster Abell 1631", *PASJ*, **70** (2018) 46

T. Okabe, T. Nishimichi, M. Oguri, S. Peirani, T. Kitayama, S. Sasaki, Y. Suto: "Projected alignment of non-sphericities of stellar, gas, and dark matter distributions in galaxy clusters: analysis of the Horizon-AGN simulation", *MNRAS*, **478** (2018) 1141

I. Mitsuishi, Y. Babazaki, N. Ota, S. Sasaki, H. Böhringer, G. Chon, G. W. Pratt: "High entropy and evidence for a merger in the low surface brightness cluster Abell 2399", *PASJ*, **70** (2018) 112

2) 学会講演

● 日本天文学会 2018 年秋季年会 2018 年 9 月 19–21 日（兵庫県立大学）

福田晋久，谷治健太郎，政井邦昭：超巨大質量ブラックホールの活動と銀河の進化に対するその影響

● 宇宙プラズマにおける粒子加速ワークショップ 2018 年 11 月 29 日–30 日（名古屋大学）

政井邦昭：PhoENiX への期待：宇宙プラズマ物理の視点から

● ～中性子星の観測と理論～研究活性化ワークショップ 2019 年 2 月 18–20 日（京都大学）

橋詰享亮：パルサー星雲の X 線放射

● 日本天文学会 2019 年春季年会 2019 年 3 月 14–17 日（法政大学）

福田晋久，谷治健太郎，政井邦昭，上田佳宏：超巨大ブラックホールの活動と $M - \sigma$ relation への影響

迫聖，信川正順，政井邦昭：強磁場激変星うみへび座 EX における再結合優勢プラズマの発見

非線形物理研究室

1. 研究活動の概要

1) 異常トンネル効果の起源と半古典論の破綻

古典力学的な遷移の禁止された領域への量子力学的な遷移は通常指数関数的に小さなものになることが期待される。それに対して、非可積分量子写像のトールスを初期状態とする1ステップの遷移確率を、Baker-Campbell-Hausdorff展開によって決まる可積分系の基底で表すと、その遷移確率がプランク定数減少に対し増大する様子が観察される。この現象は、トンネル効果によって現れるエネルギー分裂が引き延ばされた指数関数 (stretched exponential) に従うという、すでに我々によって見出された異常トンネル効果の起源につながるものであり、その原因究明は急務である。また、トンネル確率や1ステップの遷移確率が、通常期待されるプランク定数に対する指数的依存性を破ることは、非可積分系のトンネル過程が半古典理論による記述を超えた現象であることを示唆するものであり、その観点からも極めて重要な問題として位置づけられる。ここでは、非可積分量子写像のトールスを初期状態とする1ステッププロパゲータの半古典近似を解析した結果、プランク定数に対する遷移確率の増大現象が、Baker-Campbell-Hausdorff展開の量子補正に帰するものであることを突き止めた。この結果は、エネルギー領域の非可積分系のトンネル効果が、複素軌道を用いた半古典論でも捉えることのできない純量子効果になっている可能性を示唆するものであり、可積分系のトンネル効果との最大の相違点になっている可能性がある。

2) ある散乱写像の一樣双曲性について

理想的なカオス系は、記号の両側無限列とそのシフト写像で構成される、いわゆる記号力学系との対応を見出すことができるとその複雑な挙動を理解することができる。記号力学系との対応づけが可能になるための十分条件は、系が位相的馬蹄条件を満たし、かつ一樣双曲性をもつことである。我々が提案した、無限遠方が自由運動に漸近する散乱写像は、数値計算によってそれら十分条件を満たすことが示唆されていたが、ここでは、エノン写像に対する Devaney-Nitecki の証明と同様の手法を用いることにより、位相的馬蹄かつ一樣双曲的となるパラメータ領域が存在することを厳密に証明することに成功した。我々の知り得る限り、超越関数をもつ2次元面積保存写像で一樣双曲性をもつのはじめての例である。また、対象になった散乱写像は、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性質をもっていることから、原子・分子のイオン化過程を記述する良い toy model にもなるほか、動的トンネル効果やフラクタルワイル則といった未解決な量子系の諸問題を調べるための理想的なモデルとなり得る。

3) Perron-Frobenius 演算子の第二固有値に族する固有関数の局在現象

一樣双曲性を示す強いカオス系では軌道の相関が指数的に減衰する。この指数減衰は密度関数の時間発展を記述する Perron-Frobenius 演算子によって特徴付けられる。しかしながら、Perron-Frobenius 演算子の固有値・固有関数を厳密に求めることは一般には極めて困難であり、また、あまり広く認識された事実ではないが、実は数値的にすらその計算は容易ではない。われわれは、Ulam 法と呼ばれる Perron-Frobenius 演算子の離散近似についてその安定性を調べ、離散化の方法にその結果が著しく依存することを示し、Perron-Frobenius 演算子の固有値・固有関数を計算することの困難さを明らかにした。また、Perron-Frobenius 演算子をガウス核で粗視化した Fokker-Planck 演算子に対する固有値・固有関数を計算し、粗視化の大きさを小さくすることにより得られる固有関数（特に、第二固有値に属する固有関数）には、系の不安定多様体方向に沿った局在が現れることを見出した。さらに、その局在は

不安定多様体が疎な領域に起こることを明らかにした．不安定多様体が疎な領域は系の escape rate の小さ領域に対応することから，第二固有値に対する固有関数が系の緩和のスピードの空間的な非一様性を体現するものであることが示唆された．

4) 周期的ローレンツガスにおける二段階緩和

ガラス形成系に見られるスローダイナミクスの起源を力学系の問題として捉えることを目的に，周期的ローレンツガスを調べた．ガラス形成系では，相関関数の二段階緩和や引き延ばされた指数関数が見られることは広く知られているが，これまでガラスのモデルとして取り上げられてきたモデルが多体系であったり，結晶化を防ぐために内部自由度を入れた系であったりすることから，それらの力学系な起源を探ることが困難だった．ここでは，スローダイナミクスの由来とされるケージ効果が一体問題でも再現されるのではないかと，という素朴な予想を出発点として周期的ローレンツガスを詳しく調べた．周期的ローレンツガスは，時間無限大の極限で通常拡散を示すことが厳密に証明されたモデルでもあり，力学系理論の中では深く解析の進んだモデルのひとつであるが，有限時間での振る舞いに注目した研究は少なく，一方，ガラス形成の本質とされてきた多体性や粒子の配置に対するランダムネスをもたないモデルであるため，ガラスのモデルとしてあまり取り上げられたことはない．具体的には，三角格子状または面心立方格子状に障害物となる固定円盤・固定球を配置し，その中を質点が剛体衝突しながら運動するという最も簡単なローレンツガスを考え，平均二乗変位や相関関数の一種である自己中間散乱関数を調べた結果，中間時間領域にプラトーを持つガラス形成系に特有な二段階緩和を示すことがわかった．これまで得られた結果を見る限り，これまでガラス形成系の本質とされてきた「多体性」や「粒子の配置に対するランダムネス」はガラス形成系に見られる多くの特徴の必要条件にはなっていないことが結論される．

5) 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．われわれはこれまで一般化三角写像の劣拡散に従う確率過程を模索してきた．例えば，等間隔サイト上の連続時間ランダムウォーク，フラクタルサイト上の連続時間ランダムウォーク，怠け象のランダムウォークといった，劣拡散を記述することが知られる代表的な確率過程を一般化三角写像と比較してきたが，いずれもその劣拡散過程を記述するものではなかった．これまで調べた確率過程以外の，より複雑な時間発展法則を持つ確率過程によって GTM の拡散過程が記述される可能性は依然として残るが，そのような確率過程を探す作業と並行して一般化三角写像の不変構造の特異性を反映した，力学系自身の性質を抑えておく必要がある．一般化三角写像では全ての周期軌道が 1-パラメータ族を形成し，かつ，それらが相空間内に稠密に分布する．この性質により拡散的に運動する軌道の適当な近傍には常に周期軌道族が存在することになる．GTM の軌道はこの周期軌道族の近傍に長時間滞在し，拡散過程はそのような 1-パラメータ族を成す周期軌道に律速される．現在，一般化三角写像の周期軌道族が持つ性質を調べ，劣拡散との関連を検討している．

6) 新奇な量子ホロノミーによる高励起状態への準位反転

量子系の断熱的な時間発展は，分子系でのボルンオッペンハイマー近似のように階層性を持つ量子系を解析するための重要な枠組である．これ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，断熱的な量子動力学の新しい側面である，新奇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。これは量子動力学に内在する位相幾何学的な構造の一つであり、その典型例は、断熱サイクルに対する定常状態の非周期的な応答である。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擬断熱的なサイクルを平均場近似を通じて解析した。基底状態から様々な準位反転状態を生成できることを示した。特に、巨視的な数の粒子がより高い(一体の)励起状態を占有するエネルギーの高い準位反転状態を得た。これらの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(中村孝明氏および全卓樹教授(高知工科大)との共同研究)。

7) 古典的な連成振動におけるモードのアンホロノミー

新奇な量子ホロノミー(固有空間のアンホロノミー)を誘発する断熱サイクルは、量子系の定常状態を別の定常状態に変化させる。その古典類似物、すなわち、古典力学における断熱不変量が断熱的に変化する事例を探索した。これを見いだすためには古典力学の断熱定理の“抜け穴”を探らねばならない。ここでは、量子グラフでの例(S. Kasumie, M. Miyamoto and AT 2016)の離散アナログとしての古典的な連成振動を調べた。連成振動のある定常モードから出発し、系を断熱サイクルに沿って時間発展させた結果、終状態が別の定常モードになる例を数値実験を通じて見いだした(今田寛明さんの卒業研究)。

2. 研究業績

1) 論文

Normann Mertig and Akira Shudo: Open quantum maps from complex scaling of kicked scattering systems, Phys. Rev. E. **97** (2018) 042216-1 (23 pages)

2) 学会講演

● 日本物理学会 秋季大会 2018年9月9日-12日(同志社大学 京田辺キャンパス)

吉田賢典, 渡邊真悟, 首藤 啓: 劣拡散を示す非カオス的な面積保存写像における周期軌道族近傍の淀み運動と周期軌道族の性質

吉野元, 首藤啓: ある散乱写像の馬蹄型条件と一様双曲性について

池田研介, 花田康高, 首藤啓: 可積分系への繰り込みの不動遷移要素および非可積分的トンネル

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 V

田中篤司, 中村孝明, 全卓樹: 平均場近似によるボーズ粒子系の断熱的な準位反転の解析

● 日本物理学会 年次大会 2019年3月14日-17日(九州大学 伊都キャンパス)

吉田賢典, 吉野 元, 首藤 啓, Domenico Lippolis: 一様双曲的な面積保存写像における Perron-Frobenius 作用素の固有関数について

吉野元, 吉田賢典, 首藤啓, Domenico Lippolis: 双曲的な写像についてのフォッカープランク演算子の固有関数について

花田康高, 首藤啓, 池田研介: 波動関数に基づくトンネル分裂増大現象の解析について

● 散逸構造, カオス, 複雑系シンポジウム — イリヤ. プリゴジン先生の業績を偲んで — 2018 年 5 月 26 日-27 日 (早稲田大学)

首藤啓: 理想極限における半古典論の有効性と破綻について (招待講演)

国際会議

● Mini Workshop on WKB Analysis and Singularity Theory December 10, 2018 (Hokkaido Univ.)

A. Shudo : Role of virtual turning points and new Stokes curves in multi-state nonadiabatic models (invited)

● French-Japanese workshop on Real and Complex Dynamics of Hénon's Maps March 25-29, 2019 (Keio Univ.)

A. Shudo : Stokes geometry for the quantum Hénon map (invited)

量子凝縮系理論研究室

1. 研究活動の概要

1) 人工スピン軌道相互作用を持つ混合冷却原子系におけるスピン流の理論解析

人工スピン軌道相互作用を持つ極低温ボーズ・フェルミ混合系におけるスピン流の理論解析を行なった。混合原子のうち、ボーズ原子にスピン軌道相互作用を持たせた場合、ボーズ原子のスピンがスパイラル構造を形成し、それを背景にフェルミ原子のスピン流が生じることを明らかにした。また、系を支配するさまざまなパラメタが実験的に可変であることが冷却原子系の特徴であるが、その特徴を生かしたスピン流の制御について議論した。[森]

2) 機械学習の物理学への応用に関する研究

機械学習、とくに深層学習の物理学への応用の可能性について、予備的な研究をはじめた。最初に知識の蓄積を目指し、関連する文献を収集して現状を把握し、簡単なケース（拡散方程式、調和振動子への摂動、平均場近似の機械学習的表現）について機械学習の適用を試み、その利点や欠点について詳しく調べた。[森]

3) ボーズ原子気体超流動における蒸発冷却のシミュレーション

実験ではボーズ原子気体をボーズアインシュタイン凝縮させるために、蒸発冷却を行う。しかしながら、その理論的にその冷却過程は明らかにされてこなかった。蒸発冷却をシミュレーションするためには凝縮している成分（凝縮体成分）と凝縮していない成分（非凝縮体成分）の二つの成分間の散乱が重要だがそのようなシミュレーションは難しい。そこで凝縮体成分と非凝縮体成分を同時に扱う ZNG 理論を用いて蒸発冷却のシミュレーションを行った。エネルギーの高い非凝縮体成分をうまく取り除くことで、凝縮体成分と非凝縮体成分の散乱によって凝縮体成分が成長することが確認できた。

[荒畑]

4) 鉄系超伝導体 FeSe の対称性からの分類とその実現性の検証

鉄系超伝導とは 2008 年に発見された $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ とその類型物質のことであり、短期間で超伝導転移温度が上昇したことから、盛んに研究されている。超伝導状態は古くから対称性によって分類されてきた。三次元超伝導体においては反転対称性と時間反転対称性をもつことが運動量 0 のクーパー対をつくり得るための条件になる。一方、二次元超伝導体では反転対称性と時間反転対称性は鏡映操作に置き換えることもでき、反転対称性と時間反転対称性があることが超伝導の発現条件ではなくなる。この鏡映対称性は新奇超伝導の起源となっており、反転対称性と時間反転対称性のない二次元超伝導体の実現も報告されている。しかしながら、反転対称性と時間反転対称性のない二次元超伝導体の体系的な対称性による分類は少なく、分類された超伝導の実現性についての研究もほとんど行われていない。そこで、通常の超伝導理論の対称性分類を二次元超伝導体に応用することで、対称性に基づいた分類を行い、その実現性について検証した。[荒畑]

5) スピンアイスに対する希釈効果の研究

希土類化合物 $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ や $\text{Ho}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ などのスピン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。本研究ではクラスター表現に基づくループ-ストリング-アルゴリズムによるモンテカルロ法を用いて希釈スピンアイスを数値的に調べると同時に所謂ベータ近似の一種である伏見カクタス近似を用いて解析的にスピンアイスの磁性に対する希釈効果を調べた。幾つかの熱力学量について数値計算結

果と解析計算を比較し、それらの間に極めて良い一致を見出した。特に残留エントロピーの希釈濃度依存性は実験結果とも良い一致が得られており、パイロクロア磁性体に対するベータ近似の有効性を確認できた。また最近スピナイスを含む古典フラストレートスピンの基底状態における磁化過程を数値計算を用いて調べている。多くの模型で磁化プラトーがジャンプする際、残留エントロピーがシャープなピークを示す現象が知られているが、我々は所謂 Wang-Landau 法を用いそれらを精密に測定している。[大塚, 岡部豊, K. Nefedev(ウラジオストク極東連邦大)]

6) 二次元格子模型の無秩序相での相関関数が示す普遍性に関する研究

二次元格子上に定義された古典スピン模型が無秩序相にて示す相関関数の普遍性について調べている。これまで同相の相関関数に対しては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、より正確には相関長は格子の持つ対称性や離散性に起因する異方性を持ち、それにより結晶は異方的な平衡形を持つことが知られている。Fujimoto は可解模型の転送行列の解析を基礎に sn 関数を用いた普遍的な相関関数の近似式を提案しており、それによると任意の二次元格子模型の相関関数は、振幅、相関長、異方性パラメタの3つの量を用いて普遍的に特徴づけられる。我々は可解でない系も含め、上記の相関関数の普遍的漸近形に関する仮説をモンテカルロ法を用いて検証し、その有効性を確かめることに成功している。関連する論文を現在投稿中である。[大塚, 藤本雅文(奈良医大)]

2. 研究業績

1) 論文

Ryohei Sakamoto, Emiko Arahata, and Hiroyuki Mori: "Spin Current of Fermions Induced in Spin-Orbit Coupled Bose-Fermi Mixture," J. Phys. Soc. Jpn. 87, 074004 (2018).

K. Shiina, E. Arahata and H. Mori: "Bose-Fermi Mixtures in Off-diagonal Confinement," J. Phys.Soc. Jpn. 87, 125002 (2018).

Yosuke Ono, Rei Hatsuda, Kenta Shiina, Hiroyuki Mori, and Emiko Arahata: "Three Sound Modes in a Bose-Fermi Superfluid Mixture at Finite Temperatures" J. Phys. Soc. Jpn. 88, 034003 (2019)

Hiromi Otsuka, Yutaka Okabe, and Konstantin Nefedev: "Husimi-cactus approximation study on the diluted spin ice," Phys. Rev. E **97**, 042132 (2018).

Petr Andriushchenko, Konstantin Soldatov, Alexey Peretyatko, Yuriy Shevchenko, Konstantin Nefedev, Hiromi Otsuka, and Yutaka Okabe: "Large peaks in the entropy of the diluted nearest-neighbor spin-ice model on the pyrochlore lattice in a [111] magnetic field," Phys. Rev. E **99**, 022138 (2019).

2) 学会講演

● 日本物理学会 2018 年秋季大会 2018 年 9 月 9-12 日同志社大学 上京田辺キャンパス

坂本良平, 荒畑恵美子, 森弘之: 「スピン・軌道角運動量結合した BEC の回転スピン流」

● 日本物理学会 第 74 回年次大会 2019 年 3 月 14-17 日 九州大学 伊都キャンパス

坂本良平, 荒畑恵美子, 森弘之: 「スピン軌道相互作用を持つ冷却原子系に対する異種原子の混合効果」

初田黎, 坂本良平, 小野洋輔, 椎名拳太, 森弘之, 荒畑恵美子: 「三次元光格子中ボーズ-フェルミ混合系の基底状態及び励起状態の解析 II」

国際会議

●The 26th International Conference on Atomic Physics (ICAP2018) 2018 年 7 月 22–27 日 (Barcelona, Spain)

Ryohei Sakamoto, Emiko Arahata, Hiroyuki Mori: Spin current in spin-orbit coupling Bose-Fermi mixture

Yosuke Ono, Ryohei Sakamoto, Rei Hatsuda, Emiko Arahata, Hiroyuki Mori: Sound Propagation excited by Density Perturbation in a Bose-Fermi Mixture Superfluid at Finite Temperatures

Rei Hatsuda and Emiko Arahata: Quantum Phases and Excitations in Bose-Fermi Mixtures in a Three-Dimensional Optical Lattice

●International Conference on Magnetism (ICM2018) 2018 年 7 月 15–21 日 (San Francisco, America)

H. Otsuka, F. Nefedev, and Y. Okabe: Husimi-Cactus Approximation Study on the Diluted Spin Ice.

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。2018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6名、卒研生3名であった。以下は、2018年度に行った主な研究の概要である。

1) Γ_3 四極子秩序における多極子ネスティング機構

PrPb₃における奇妙な格子非整合 Γ_3 四極子秩序は2004年に発見されたが、その微視的な機構は解明されていなかった。この問題に対し、フェルミ面のネスティングと Γ_3 四極子秩序の關係に注目して研究を行った。具体的には、 Γ_7 軌道と Γ_8 軌道で構成される3軌道ハバード模型を解析し、 Γ_3 四極子秩序が現れるには、局所基底状態が Γ_3 二重項になっていることが必要条件であることを見出した。そして、 Γ_3 二重項が局所基底状態になるような有効電子間相互作用を導入すると、格子非整合な Γ_3 四極子秩序が四極子密度波状態として自然に現れることを見出した。四極子密度波状態の秩序変数と秩序ベクトルは跳び移り積分によって異なるが、乱雑位相近似の感受率が発散する秩序ベクトルは、基本的に相互作用がない自由電子系の場合の感受率のピーク構造で決まっていることを見出し、感受率のピーク構造とフェルミ面の關係に着目した。そして、格子非整合な Γ_3 四極子秩序が現れる領域では、フェルミ面上で Γ_7 軌道密度と Γ_8 軌道密度が多い領域が秩序ベクトルによって結びついて、感受率に大きな寄与をもたらすことを見出した。多極子密度とフェルミ面のネスティングの両方が関係していることから、これを多極子ネスティングと定義し、 f^2 電子系の Γ_3 四極子密度波状態を理解する上で重要な見方となる可能性を指摘した。

2) 反強四極子秩序下における交差応答

新奇機能を持つ新材料の開発には、物質それぞれの性質を同定し外場に対してどのような応答を示すかを知ることが重要である。近年、反転対称性の破れた結晶構造を持つ物質群が注目を集めており、その交差応答—電場（磁場）により磁気（電気）モーメントを誘起—が盛んに研究されている。一方、強相関 f 電子系においてはPr化合物における軌道秩序（四極子秩序）が精力的に研究されている。本研究では、このPr化合物がダイヤモンド構造の元で反強四極子秩序を形成することで電気磁気効果が発現することを提案し、その異方性を用いることで、四極子秩序変数を同定できることを理論的に示した。このことによって、反強四極子秩序の同定に向けての新たな方向性が生まれ、今後の実験研究が活性化することが期待できる。また、この秩序状態が異なる電荷を帯びた逆巻のソレノイドの秩序とみなすことができることを見出し、電気磁気効果の直感的な理解についても知見が得られた。

3) 2軌道不純物アンダーソンモデルの量子臨界点

近藤効果は、不純物スピンと伝導電子が近藤・芳田一重項を形成してスピン自由度が消失する過程であると理解されているが、不純物がスピンだけでなく軌道の自由度も持つ場合、たとえば、2つの不純物スピンの2種類の伝導電子と混成する場合、局所一重項状態と近藤・芳田一重項状態の間に競合が生じ、量子臨界点が現れることが知られている。量子臨界点近傍では、量子臨界揺らぎによってさまざまな新奇な物性が生じる可能性があり、現在に至るまで盛んに研究されている。そこで、2軌道不純物アンダー

ソノンモデルを数値繰り込み群法によって解析し、量子臨界点の出現の様子を調べた。立方対称下で局所電子数が2の場合、2軌道不純物サイトの基底状態は Γ_1 一重項、 Γ_3 二重項、 Γ_5 三重項の3種類に分かれる。このうち、 Γ_1 一重項が上に述べた局所一重項状態にあたる。繰り込みを行う出発点となる状態を Γ_1 から Γ_5 に変化させると、途中で量子臨界点が現れることは既知である。 Γ_3 状態を出発点にして繰り込みを進めると、軌道に関する近藤・芳田一重項が出現することを確認し、さらに、繰り込みの出発点を Γ_1 から Γ_3 に変化させた場合でも、途中で量子臨界点が現れることを見出した。そして、相互作用パラメータを変化させた場合に、 Γ_1 と Γ_5 の間の量子臨界点は、 Γ_1 と Γ_3 の間のそれと連続的につながっていて、相図上で量子臨界曲線を形成することを見出した。

4) プルトニウム化合物の磁気異方性

f 軌道のフント則エネルギーを U とし、スピン軌道相互作用を λ とすると、複数 f 電子状態に対する見方としては、 $U \gg \lambda$ では LS 結合描像が、 $U \ll \lambda$ では $j-j$ 結合描像が妥当だと考えられている。 Ce^{3+} では、全角運動量 $j = 5/2$ の状態に1個の電子が収容されるが、 Pu^{3+} を $j-j$ 結合描像に基づいて考えると、 $j = 5/2$ に5個の電子、つまり、1個のホールがあることになる。この電子・ホール対称性から、同じ結晶構造を持つCe化合物とPu化合物を比べると、磁化率の異方性が逆転することが予想される。そこで、 U と λ に加えて、結晶場ポテンシャルも取り入れた局所ハミルトニアン H_{loc} を用い、 $HoCoGa_5$ 型結晶構造を持つCe115とPu115を念頭において、局所的な磁化率の温度依存性を調べた。ところで、 $j-j$ 結合描像は $\lambda = \infty$ の極限で正しく、 $\lambda/U \sim 0.1$ 程度である現実の物質への適用はできないと思われるかもしれない。そこでまず、 f 電子が5個の場合の低エネルギー結晶場状態の λ/U 依存性を調べた。その結果、 $\lambda/U \sim 0.04$ で基底状態と第1励起状態が入れ替わること、つまり、 LS 結合から $j-j$ 結合に切り替わることが分かった。 Pu^{3+} に対して、 $\lambda/U \sim 0.3$ 程度であるから、 $j-j$ 結合描像の議論が成り立つと考えられる。 H_{loc} に基づいて、 Ce^{3+} と Pu^{3+} の x 方向および z 方向の磁化率 χ_x と χ_z を計算した結果、確かに、磁化率の異方性が逆転していることがわかった。正方晶の場合、 $j = 5/2$ は Γ_6 と2つの Γ_7 に分裂するが、その結晶場準位に f 電子を1個入れる場合と f ホールを1個入れる場合で関与する軌道が異なり、これによって、Ce115とPu115の磁化率の異方性が逆転することがわかる。

2. 研究業績

1) 論文

A. Ichikawa and T. Hotta, “Impurity Effects in Nodal Extended s - and Nodeless d -Wave Superconductors: Gap Symmetry of BiS_2 -Based Layered Superconductors”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **87**, 114706–1–10 (2018).

K. Suzuki and K. Hattori, “Ground-state phase diagram of the $S=1$ one-dimensional Kondo lattice model with a uniaxial anisotropy under transverse fields”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 024707–1–10 (2019).

R. Yamamura and T. Hotta, “Microscopic Theory of Γ_3 Quadrupole Ordering in Pr Compounds on the Basis of a $j-j$ Coupling Scheme”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 034715–1–10 (2019).

K. Suzuki, H. Usui, K. Kuroki, T. Nomoto, K. Hattori, and H. Ikeda, “Electronic Structure and Superconducting Gap Structure in BiS_2 -based Layered Superconductors”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 041008–1–13 (2019).

野本拓也, 服部一匡, 池田浩章, 最近の研究から “多軌道・多自由度系超伝導体の対称性とノード構造”, 日本物理学会誌 **74**, 146–151 (2019).

2) 学会講演

● 新学術領域研究 J-Physics トピカルミーティング ものづくりシリーズ第3回「物質探索最前線」2018年8月6日(月) – 7日(火) (首都大学東京南大沢キャンパス)

石飛尊之, 服部一匡: ダイヤモンド構造上の反強四極子秩序と光学ジャイロトロピー効果

鈴木浩平, 服部一匡: 横磁場下 $S = 1$ 近藤格子模型: 密度行列くりこみ群による解析

中村憲吾, 堀田貴嗣: 2 軌道アンダーソンモデルの近藤効果とスピン・軌道感受率の研究

● 日本物理学会 2018 年秋季大会 2018 年 9 月 9 日 (日) – 12 日 (水) (同志社大学京田辺キャンパス)

石飛尊之, 服部一匡: ダイヤモンド構造上の反強四極子秩序と光学ジャイロトロピー効果

中村憲吾, 堀田貴嗣: 数値くりこみ群法による 2 軌道アンダーソンモデルの近藤効果の研究

● 日本物理学会 2019 年第 74 回年次大会 2019 年 3 月 14 日 (木) – 17 日 (日) (九州大学伊都キャンパス)

山村諒祐, 堀田貴嗣: Pr 化合物における Γ_3 四極子秩序: フェルミ面構造と軌道密度

石飛尊之, 服部一匡: ダイヤモンド構造上の四極子近藤格子モデルの平均場近似による解析と交差応答

溝尾義輝, 堀田貴嗣: j - j 結合描像に基づくプルトニウム化合物の磁気異方性の理解

国際会議

● APS March Meeting, Boston, U.S.A., March 4–8, 2019.

Ryosuke Yamamura and Takashi Hotta: Microscopic Theory of Γ_3 Quadrupole Ordering in Pr Compounds on the Basis of a j - j Coupling Scheme

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) を目標としており、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。Belle II 実験は、コミッショニングの第二段階 (Phase II) が 2018 年 2 月より行われた。4 月 26 日に初めて電子・陽電子衝突を観測し、7 月の Phase II 終了までの間に約 0.5 fb^{-1} のデータを収集した。この電子・陽電子衝突データを用いて、ARICH 検出器の性能確認および物理データ解析を行った。 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ 散乱データを用いて ARICH 検出器のアライメントの確認、ARICH 検出器の周囲に取り付けた光反射ミラーのアライメントの確認を行ない、ハドロン生成データ中の $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ および $\phi \rightarrow K^+K^-$ 事象を用いて ARICH 検出器の粒子識別性能の確認を行った。さらに、 B 中間子の放射崩壊 $B \rightarrow K^*\gamma$ 事象の探索を行い、5 つの信号事象候補を得て、これまでに Belle 実験などで測定されてきた崩壊分岐比と矛盾がないことを確認した。Phase II の結果を受けて ARICH 検出器の改善を行ない、Belle II 実験はコミッショニングの第三段階 (Phase III) を 2019 年 2 月より行っている。また、将来的な ARICH 検出器のアップグレードのために、新しい光検出器の開発も始めた。

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 で用いる予定の $\text{He}(85\%) + \text{CO}_2(15\%)$ ガスの信号増幅率はこれまでよく理解されていなかったが、実験およびシミュレーションを用いてガス増幅率の理解をすすめた。試験用の新しい宇宙線トリガーも整備を行ない、二重ベータ崩壊実験の開始に向けて試験を進めている。

3) T2K 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、ニュートリノターゲットから 280m 離れた位置でニュートリノを測定する前置検出器 (ND280) のアップグレード、およびニュートリノターゲットから 1km 程度離れた位置に新しい水チェレンコフ検出器 (IWCD) を設置する計画に参加している。

前置検出器 ND280 のアップグレードでは、1cm 角のキューブ状のシンチレータを約 200 万個積み重ねて 3 方向から読み出すことでニュートリノ反応を 3 次元的に捕える新しい検出器 (Super FGD) の開発を進めている。その中で本年度は、ビームテストによる基本性能の確認およびシンチレーション光を捕える光検出器のキャリブレーションシステムの開発を行った。新しい水チェレンコフ検出器 IWCD を設置する計画においては、チェレンコフ光を捕える光電子増倍管に低消費電力で高電圧印加するためのコッククロフトウォルトン型の高電圧生成器の試作器を製作し、試験を行った。

4) 宇宙線ミュオンを用いた火山の透視

地上に飛来する宇宙線ミュオンを用いて大規模な物体を透視する研究を進めている。これまで高エネルギー加速器研究機構および筑波大学と共同で、原子炉の透視を行う研究を進めてきた。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、これまでに、福島第一原発 1 号機および 3 号機の炉心の状態の調査を行ない、一連の調査を昨年までに終了した。今年度はその研究成果についてのまとめを行った。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、一昨年度 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、ミュオンの透過長が 1km 程度に及ぶ大規模な山体を透視する際に問題になる背景事象の理解を、シミュレーション等を通して進めた。さらに、筑波山を観測対象として実証実験を進めてきた運動量測定を用いた新しい検出器を岩手山に設置し、岩手山の観測を始めた。

5) Double Chooz 実験

2011 年 4 月からフランスの Chooz 原子炉を用いて開始されたニュートリノ振動実験 Double Chooz は、2017 年 12 月をもってデータ収集を終了した。2018 年度は収集されたデータ全てを使っての解析作業がおこなわれ、現在その結果を発表すべく論文の準備が進んでいる。

6) ATLAS 実験

2017 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。

2021 年から開始予定の重心系エネルギー 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、ミュオントリガーシステムと内部飛跡検出に用いられるピクセル検出器のアップグレード計画についての検討を行った。

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 光子稀崩壊事象の観測実験を行っている。2017 年 1 月からデータ収集を開始し、2018 年 12 月までに、2 イベントの 5 光子崩壊事象候補が検出された。

$O(\alpha^5)$ の高次 QED 計算を基に、モンテカルロシミュレーションによって、この実験結果を検証した。5 光子崩壊事象の検出数期待値は 0.97 イベント、バックグラウンドは上限値で 0.7 イベントと見積もられ、実験結果と高次 QED 過程の予想が矛盾しないことが確認された。

8) 生命科学専攻・動物系統分類学研究室との共同研究

生命科学専攻・動物系統分類学研究室の昆虫（オケラ）の行動に関する研究について、実験装置・解析手法の支援を行った。

2. 研究業績

1) 論文

Measurements of branching fraction and direct CP asymmetry in $B^\pm \rightarrow K_S^0 K_S^0 K^\pm$ and a search for $B^\pm \rightarrow K_S^0 K_S^0 \pi^\pm$

A.B.Kaliyar, *et al.* (Belle Collaboration), Phys.Rev.D 99, 031102 (R) (2019 February 20)

First measurements of absolute branching fractions of Ξ_c^0 at Belle

YB.Li, *et al.* (Belle Collaboration), Phys.Rev.Lett. 122, 082001 (2019 February 25)

Search for the rare decay $B^+ \rightarrow \ell \nu_\ell \gamma$ with improved hadronic tagging

M.Gelb, *et al.* (Belle Collaboration), Phys.Rev.D 98, 112016 (2018 December 28)

Observation of $e^+e^- \rightarrow \gamma \chi_{c1}$ and search for $e^+e^- \rightarrow \gamma \chi_{c0}$, $\gamma \chi_{c2}$, and $\gamma \eta_c$ at $\sqrt{s}$ near 10.6 GeV at Belle
S.Jia, X.L.Wang, C.P.Shen, C.Z.Yuan, *et al.* (Belle Collaboration), Phys.Rev.D98, 092015 (2018 November 30)

Search for CP violation with Kinematic Asymmetries in the $D^0 \rightarrow K^+ K^- \pi^+ \pi^-$ Decay

J.B.Kim, E.Won, *et al.* (Belle Collaboration), Phys.Rev.D99, 011104(R) (2019 January 29)

Observation of $\Xi(1620)^0$ and evidence for $\Xi(1690)^0$ in $\Xi_c^+ \rightarrow \Xi^- \pi^+ \pi^+$ decays

M.Sumihama, *et al.* (Belle Collaboration), Phys.Rev.Lett.122, 072501 (2019 February 21)

Measurement of time-dependent CP violation in $B^0 \rightarrow K_S^0 \pi^0 \pi^0$ decays

Y.Yusa, *et al.* (Belle Collaboration), Phys.Rev.D99,011102(R) (2019 January 18)

Measurement of the branching fraction and time-dependent CP asymmetry for $B^0 \rightarrow J/\psi \pi^0$ decays

B.Pal, A.Schwartz, *et al.* (Belle Collaboration), Phys.Rev.D98,112008 (2018 December 19)

Measurements of isospin asymmetry and difference of direct CP asymmetries in inclusive $B \rightarrow X_s \gamma$ decays

S.Watanuki, A.Ishikawa, *et al.* (Belle Collaboration), Phys.Rev.D99,032012 (2019 February 20)

Search for a light CP -odd Higgs boson and low-mass dark matter at the Belle experiment

I.S.Seong, *et al.* (Belle Collaboration), Phys.Rev.Lett.122, 011801 (2019 January 4)

- Observation of Transverse $\Lambda/\bar{\Lambda}$ Hyperon Polarization in e^+e^- Annihilation at Belle
Y.Guan, A.Vossen, *et al.* (Belle Collaboration), Phys.Rev.Lett.122, 042001 (2019 January 29)
- Observation of $B^+ \rightarrow p\bar{\Lambda}K^+K^-$ and $B^+ \rightarrow \bar{p}\Lambda K^+K^+$
P.-C.Lu, M.-Z.Wang, R.Chistov, P.Chang, *et al.* (Belle Collaboration), Phys.Rev.D99, 032003 (2019 February 7)
- Search for the Lepton-Flavor-Violating Decay $B^0 \rightarrow K^{*0}\mu^\pm e^\mp$
S.Sandilya, *et al.* (Belle Collaboration), Phys.Rev.D98, 071101(R) (2018 October 9)
- Evidence of charged $\Xi_c(2930)$ and updated measurement of $B^0 \rightarrow K^0\Lambda_c^+\bar{\Lambda}_c^-$ at Belle
Y.B.Li, C.P.Shen, *et al.* (Belle Collaboration), Euro Phys.J. C78, 928 (2018 November 13)
- Observation of $\Upsilon(2S) \rightarrow \gamma\eta_b(1S)$ decay
B.Fulsom, *et al.* (Belle Collaboration), Phys.Rev.Lett.121, 232001 (2018 December 3)
- Observation of $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\chi_{b1,2}(1P)$ and search for at $\sqrt{s} = 10.96 - 11.05$ GeV
J.Yin, *et al.* (Belle Collaboration), Phys.Rev.D98, 091102 (2018 November 15)
- Observation of an excited Ω^- baryons
J.Yelton, *et al.* (Belle Collaboration), Phys.Rev.Lett.121, 052003 (2018 August 2)
- Search for $\Upsilon(1S, 2S) \rightarrow Z_c^+Z_c^{(\prime)-}$ and $e^+e^- \rightarrow Z_c^+Z_c^{(\prime)-}$ at $\sqrt{s} = 10.52, 10.58$, and 10.867 GeV
S.Jia, C.P.Shen, C.Z.Yuan, *et al.* (Belle Collaboration), Phys.Rev.D97, 112004 (2018 June 14)
- Measurement of $\eta_c(1S)$, $\eta_c(2S)$ and non-resonant $\eta'\pi^+\pi^-$ production via two-photon collisions
Q.N.Xu, *et al.* (Belle Collaboration), Phys.Rev.D98, 072001 (2018 October 3)
- Measurement of $\cos 2\beta$ in $B^0 \rightarrow D^{(*)}h^0$ with $D \rightarrow K_S^0\pi^+\pi^-$ decays by a combined time-dependent Dalitz plot analysis of BaBar and Belle data
I.Adachi, *et al.* (Belle Collaboration), Phys.Rev.D98, 072001 (2018 December 26)
- First evidence for $\cos 2\beta > 0$ and resolution of the CKM Unitarity Triangle ambiguity by a time-dependent Dalitz plot analysis of $B^0 \rightarrow D^{(*)}h^0$ with $D \rightarrow K_S^0\pi^+\pi^-$ decays
I.Adachi, *et al.* (Belle Collaboration), Phys.Rev.Lett. 121, 261801 (2018 December 26)
- Observation of $\Upsilon(4S) \rightarrow \eta'\Upsilon(1S)$
E.Guido, *et al.* (Belle Collaboration), Phys.Rev.Lett.121, 062001 (2018 August 6)
- Measurement of Time-dependent CP Asymmetries in $B^0 \rightarrow K_S^0\eta\gamma$ Decays
H.Nakano, *et al.* (Belle Collaboration), Phys.Rev.D97,092003 (2018 May 18)
- Measurement of the branching fraction of $B \rightarrow D^{(*)}\pi\ell\nu$
A.Vossen, *et al.* (Belle Collaboration), Phys.Rev.D98, 012005 (2018 July 30)
- Inclusive study of bottomonium production in association with an η meson in e^+e^- annihilations near $\Upsilon(5S)$
U.Tamponi, E.Guido, R.Mussa, *et al.* (Belle Collaboration), Euro Phys.J. C78, 633 (2018 August 9)

Measurement of the Decays $\Lambda_c \rightarrow \Sigma\pi\pi$ at Belle

M.Berger, *et al.* (Belle Collaboration), Phys.Rev.D98,112006 (2018 December 17)

Search for $B^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$ Decays at the Belle Experiment

A.Sibidanov, *et al.* (Belle Collaboration), Phys.Rev.Lett.121, 031801 (2018 July 18)

Search for light sterile neutrinos with the T2K far detector Super-Kamiokande at a baseline of 295 km

K. Abe *et al.* (T2K Collaboration), Phys.Rev. D99 (2019) no.7, 071103

Search for CP Violation in Neutrino and Antineutrino Oscillations by the T2K Experiment with 2.2×10^{21} Protons on Target

K. Abe *et al.* (T2K Collaboration), Phys.Rev.Lett. 121 (2018) no.17, 171802

Characterization of nuclear effects in muon-neutrino scattering on hydrocarbon with a measurement of final-state kinematics and correlations in charged-current pionless interactions at T2K

K. Abe *et al.* (T2K Collaboration), Phys.Rev. D98 (2018) no.3, 032003

Measurement of inclusive double-differential ν_μ charged-current cross section with improved acceptance in the T2K off-axis near detector

K. Abe *et al.* (T2K Collaboration), Phys.Rev. D98 (2018), 012004

Yields and production rates of cosmogenic ^9Li and ^8He measured with the Double Chooz near and far detectors

H. de Kerret *et al.* (Double Chooz Collaboration), J.HEP 1811 (2018) 053

Review of Particle Physics

M. Tanabashi *et al.* (Particle Data Group), Phys.Rev. D98 (2018) no.3, 030001

Four types of vibration behaviors in a mole cricket

Y.Hayashi, J.Yoshimura, D.A.Roff, T.Kumita, A.Shimizu, PLoS One. 2018 Oct 10; 13(10): e0204628

2) 学会講演

● 日本物理学会 2018 年秋季大会 2018 年 9 月 14~17 日 (信州大学)

Belle II 実験における $B \rightarrow K^* \gamma$ 崩壊の研究

為近彩智, 角野秀一, 米永匡伸, 石川明正, 太田恭平, 他 BelleII Collaboration

Belle II 実験 ARICH 検出器の衝突データを用いた K/π 識別能力の研究

米永匡伸, 住吉孝行, 角野秀一, 汲田哲郎, 野口光太, 柿本詩織, 為近彩智, 西田昌平, 足立一郎, Luka Santelj, 庄子正剛, Yun-tsung Lai, 金道玄樹, 河合秀幸, 田端誠, 川崎健夫, 今野智之, 町田聖寛, 遊佐洋右, 小川和也, 吉澤司人, 小川了

● 日本物理学会 第 74 回年次大会 2019 年 3 月 14~17 日 (九州大学)

Belle II 実験 ARICH 検出器のコントロールサンプルを用いた粒子識別性能の評価

米永匡伸, 住吉孝行, 角野秀一, 汲田哲郎, 野口光太, 柿本詩織, 為近彩智, 西田昌平, 足立一郎, 庄子正剛, Yun-Tsung Lai, 西村美紀, 金道玄樹, 河合秀幸, 田端誠, 川崎健夫, 今野智之, 町田聖寛, 遊佐洋右, 小川和也, 吉澤司人, 小川了

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 2

吉川広陽, 汲田哲郎, 千葉雅美, 浜津良輔

国際会議

● 10th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH2018), Moscow, Russia, July 29-Aug. 4, 2018

M. Yonenaga: Performance and commissioning of HAPDs in the Aerogel RICH counter

S. Tamechika: Development of alignment algorithm for Belle II Aerogel RICH counter

● 5th International Workshop on New Photon-Detectors (PD18), Tokyo, Japan, Nov. 27-29, 2018

M. Yonenaga: Performance evaluation of the HAPDs in the Belle II Aerogel RICH counter

原子物理実験研究室

1. 研究活動の概要

昨年度末に助教であった古川武が東邦大学理学部講師として転出し、その後任として10月1日付けで立教大学理学部ポストドクトラルフェローの飯田進平を採用した。メンバーの交代はあったが、昨年度と同様に、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、研究室の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ため、周回イオン種の質量に関する制限がないという特徴を持つ。本学に設置された TMU E-ring は世界で三番目に開発された静電型イオン蓄積リングであり、主に分子負イオンおよびクラスター負イオンについて、内部エネルギーの緩和過程、すなわち冷却過程の研究を行ってきた。

(1) 炭素クラスター負イオン：

本研究室では、レーザーアブレーション法によって生成した高温の直鎖状炭素クラスター負イオンの冷却過程について、系統的な研究を行ってきた。電子親和力より高い内部エネルギーを持った負イオンは電子脱離を起こし、また、振動状態の遷移に伴う赤外線放出によって冷却される振動輻射冷却は広い内部エネルギー領域において主要な冷却機構である。近年、これに加えて、電子基底状態の高振動励起状態から逆内部転換によって電子励起状態に遷移し、そこから蛍光を放出することで冷却が高速に進む再帰蛍光という過程が見いだされた。以前から静電型イオン蓄積リングを周回中の負イオンに対してレーザーを照射することで電子脱離閾値をわずかに超える状態へと励起し、照射時間とレーザー波長を変えながら生成する中性粒子を観測することで、内部エネルギー状態分布を測定する手法を編み出していた。しかし、 C_4^- および C_6^- に関する実験データとシミュレーション結果は全く一致せず、定性的な議論すら不十分だった。そこで振動冷却速度と再帰蛍光放出速度を補正する係数を導入したところ、十分な精度で実感結果を再現することに成功し、冷却過程のモデリングがほぼ確立したと言える。また、昨年度から C_4^- および C_6^- から放出される再帰蛍光を9種類のバンドパスフィルターを用いて観測し、波長分解能は不十分ではあるが発光スペクトルを得た。今年度は特に詳細なデータ解析を行うことで、信頼性の高い発光波長分布になったと考えている。

(2) 多環芳香族炭化水素負イオン：

星間空間からの赤外放射スペクトルには多くの未同定ラインが存在する。その特徴が多環芳香族炭化水素 (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon, PAH) の振動スペクトルと一致しているため、有力な候補と考えられている。孤立した PAH の性質に関する情報の一つとして、PAH 負イオンの冷却過程の観測を行った。具体的にはテトラセン ($C_{18}H_{12}$) およびペンタセン ($C_{22}H_{14}$) の微結晶粉末にアブレーション用レーザーを照射することで負イオンを生成させて周回蓄積し、自動電子脱離によって生成した中性粒子強度の時間変化およびレーザー照射による中性粒子収量を測定した。テトラセン負イオンでは、閾値以上の光子エネルギーのレーザーを照射した場合に照射直後のみ中性粒子の増加が観測された。一方、ペンタセン負イオンでは閾値以下の光子エネルギーでも中性粒子収量の増加が見られ、しかも照射後に数 100 μs 程度の遅延電子脱離が観測された。それぞれの負イオンについて、レーザーの照射時間と波長を変化させて中性粒子強度を測定することで、負イオンの光吸収スペクトルを得た。また、ペンタセン負イオンについては冷却速度として 3.3 ± 0.4 eV/s という値を求めることに成功した。

(3) ケイ素クラスター負イオン：

炭素とケイ素は周期表状では類似性が示唆されるが、小さな炭素クラスターが直鎖状に限られるのに対して、二量体以外のケイ素クラスターで直鎖状のものは知られていない。分子構造の大きな違いは電子状態、延いては緩和過程・冷却過程にも現れると予想される。そこで、粉末状のケイ素に対してレーザー照射することでケイ素クラスター負イオンを生成し、蓄積実験とレーザー照射実験を開始した。四量体 Si_4^- では自動電子脱離およびレーザー照射直後の即応的な電子脱離だけが観測されたのに対して、五量体 Si_5^- および二量体 Si_2^- ではリング内を半周程度飛行してから電子脱離を起こす遅延過程が観測された。しかも、二量体 Si_2^- の遅延過程による中性粒子強度のレーザー波長依存性は、線幅が狭い複雑なスペクトルであった。これは予想外の非常に興味深い結果であり、さらに詳細な実験を継続して進めていく予定である。

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 (Electron Cyclotron Resonance, 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。二年ほど前に C^{4+} , N^{5+} , O^{6+} と He との衝突について、分解能の低い半導体検出器によってこの現象を観測し、その後、分解能の高い斜入射分光器によるスペクトルの測定を行ってきた。今年度は分解能を更に向上することで、多くの未同定の輝線スペクトルの観測に成功した。また、標的気体を He, Ne, Ar, Kr, Xe, N_2 , CO_2 , O_2 と系統的に変えることで、非常に大きな標的依存性を見いだした。電荷移行反応によって生成するのは $1s$ 軌道に空孔を持つリチウム様の内殻励起原子イオンであるが、このような励起状態に関する原子分光学的データは非常に乏しいのが現状である。そこで非相対論的原子コードである Cowan コードを用いて、リチウム様原子について詳細な理論計算を行った。その結果、全ての輝線スペクトルの同定を行うことに成功した。その中では2つの電子が同時に遷移することで一つの光子が放出される TEOP (Two-Electron One-Photon) 過程が含まれていることが判明した。また、重元素である Kr や Xe の場合に強度が大きく変化する現象が見いだされ、一つの可能性として重原子とで顕著となるスピン軌道相互作用の効果であることが示唆された。ここで観測された軟 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放出されると考えられ、惑星大気の新しい分析手法として活用される可能性が期待される。

(2) 連星中性子星合体による重元素合成過程：

連星中性子星合体における r プロセスによって Fe よりも重た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東北大学・東邦大・電通大・核融合研と進めている。2017 年 8 月 17 日に連星中性子星合体による重力波が初めて観測され、合

体して生成したキロノヴァ (kilonova) からは 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。重元素の分光データは極めて乏しいが、多くの仮定を重ねて行われた輻射流体シミュレーションは可視・赤外領域における観測結果を定性的に再現することに成功した。しかしながら定量的にはまだまだ不十分であるため、原子分光データを整備していくことの重要性は変わっていない。理論シミュレーションの予想によれば、合体直後の原子イオンの価数は 3-4 価程度であり、可視・赤外発光にはランタノイドの寄与が大きいとされている。そこで、先行して理論計算が行われている Er について実験を開始した。昨年度に開発した新たな衝突実験装置を用いて、4 価および 5 価の Er イオンと Ar および N_2 気体標的との衝突領域からの可視領域における発光を観測した。Ar と N_2 を標的として選んだのは、両者のイオン化エネルギーが近いとため、Er イオンとの衝突で起こる電荷移行反応は類似することが予想され、標的に依存した発光の場合は Er イオンからではなく標的からの発光であることが明確になるためである。実験の結果、285–695 nm の波長範囲において 3 価の Er からの発光として 5 本の輝線、4 価の Er からは 3 本の輝線が観測された。これまでに報告が全くないため遷移の同定はできていないが、共同研究者が理論的な発光スペクトルを計算しており、両者の比較から同定作業を進めている。

(3) 分子標的におけるフラグメント原子イオンの発光：

3 年前の実験で、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。この研究は昨年度に続いて今年度も帰国留学生短期研究支援制度によって約 2 ヶ月間、招聘することができた Giorgi Vishapidze 博士 (Ilya State University, Georgia) との共同研究として実施した。今年度の実験では標的気体として N_2 および O_2 だけでなく、NO も使用した。NO では多価 N イオンおよび多価 O イオンからの発光が同時に観測されることを予想していたが、実際には多価 N イオンだけからの発光が観測され、解離イオンの励起が非対称であることが判った。詳細なメカニズムの解明まで、今後も系統的な実験を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。昨年度から常温で液体の二硫化炭素 CS_2 の蒸気を電子衝撃によってイオン化することで CS_2^+ を生成し、低温ヘリウム気体中における移動度の測定を開始した。昨年度は度重なる装置トラブルによって新たなデータ取得には至らなかったが、今年度は装置内部の配線を修繕して液体窒素温度において実際に測定を行った。 CS_2^+ は CO_2^+ と同様に直線分子であるが、S 原子の方が O 原子よりもサイズが大きいため分子イオンの衝突断面積が大きくなり、既に実験データが測定されている CO_2^+ よりも小さな移動度を示すことが予想できた。実際、あらゆる電場領域で CO_2^+ より小さな値を示し、最大で 20% 程度の差が見られた。また、近似的な粒子間ポテンシャルを用いて古典軌道法によって弾性散乱の衝突断面積を計算して移動度を求める MOBCAL というプログラムによる計算を試みた。 N_2^+ や CO_2^+ では実験値と計算結果はかなり大きく異なり、定性的にも再現できたとは言いがたかったが、 CS_2^+ についてはかなり良い一致を示した。詳細な理論的検討が必要であるが、分子イオンの幾何学的サイズが大きいかほど MOBCAL の計算精度が上がるという傾向は知られているので、 CO_2^+ と CS_2^+ の幾何学的サイズの差はさほど大きくはないが、定性的には一般的な傾向として理解できる可能性はあると考えている。

2. 研究業績

1) 論文

N. Kono, R. Suzuki, T. Furukawa, J. Matsumoto, H. Tanuma, H. Shiromaru, T. Azuma, and K. Hansen: Electronic and vibrational radiative cooling of the small carbon clusters C_4^- and C_6^- , *Phys. Rev. A* **98**, 063434 (2018)

F.-Q. Chen, N. Kono, R. Suzuki, T. Furukawa, H. Tanuma, P. Ferrari, T. Azuma, J. Matsumoto, H. Shiromaru, V. Zhaunerchyk, and K. Hansen: Radiative cooling of cationic carbon clusters, C_N^+ , $N = 8, 10, 13-16$, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **21**, 1587 (2019)

2) 学会講演

● イオン移動度研究会 2018 年 4 月 14 日 (立教大学・池袋キャンパス)

山崎達朗, 森健汰, 田沼肇: 準安定分子イオンの移動度と同位体依存性

飯田進平, 中野祐司: 合流ビーム実験による低速イオン・中性衝突実験

飯田進平, 高谷一成, 植田寛和, 平山孝人, 中野祐司: 移動管とレーザープラズマ光源を使った光異性化の研究計画

● 日本物理学会 2018 年秋季大会 2018 年 9 月 9 日～12 日 (同志社大学・京田辺キャンパス)

沼館直樹, 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 III

● 原子衝突学会第 43 回年会 2018 年 10 月 12 日～14 日 (京都大学・宇治キャンパス)

栗山みさき, 古川武, 松本淳, 田沼肇, 東俊行, 城丸春夫: 多環芳香族炭化水素負イオンの蓄積実験

● 京都大学原子炉実験所専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」 2018 年 12 月 6 日～7 日 (京都大学複合原子力化学研究所, 大阪府泉南郡熊取町)

海和俊亮, 岩森大直, 飯田進平, 望月出海, 和田健, 兵頭俊夫, 長嶋泰之: N 型 Ge(111) からのポジトロニウムの放出

萩原聡, 前川雅樹, 河裾厚男, 飯田進平, 長嶋泰之: 金属表面におけるポジトロニウム形成の理論的研究

● 「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 2018 年 12 月 19 日～21 日 (核融合科学研究所, 土岐市)

沼館直樹, 田沼肇: 電荷交換を利用した内殻励起リチウム様イオンの軟 X 線スペクトル測定

● 日本物理学会 第 74 回年次大会 2019 年 3 月 14 日～17 日 (九州大学・伊都キャンパス)

沼館直樹, 島田健人, 山田陽平, 大那拓海, 内倉義屈, 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

萩原聡, 前川雅樹, 河裾厚男, 飯田進平, 長嶋泰之: 二成分密度汎関数法による金属表面におけるポジトロニウムエネルギースペクトルの理論研究

飯澤正登実, 飯田進平, 小泉航, 東俊行, 中野祐司: 合流ビーム実験に向けた中性ビーム源の開発 II

栗山みさき, 古川武, 松本淳, 飯田進平, 田沼肇, 東俊行, 城丸春夫: TMU E-ring における多環芳香族炭化水素負イオンの冷却過程

国際会議

● The 7th China-Japan-Korea Joint Seminar on Atomic and Molecular Processes in Plasma, Hefei, China, 23–26 July, 2018

Hajime Tanuma and Naoki Numadate: Soft X-ray emissions from inner-shell excited Li-like ions in charge transfer collisions of meta-stable He-like ions with neutral gases (oral)

● 19th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions, Lisboa, Portugal, 3–7 September, 2018

Naoki Numadate and Hajime Tanuma: Charge exchange spectroscopy in collisions between metastable He-like ions ($1s2s\ ^3S$) and neutrals (oral)

Takumi Ohna, Naoki Numadate, Yohei Yamada, Masaomi Tanaka, Shinya Wanaajo, Yuichiro Sekiguchi, Daiji Kato, Izumi Murakami, Hiroyuki A. Sakaue, Nobuyuki Nakamura, and Hajime Tanuma: Charge exchange spectroscopy for multiply charged ions of heavy elements in the extreme ultra-violet region (poster)

Ryo Igosawa, Shimpei Iida, Shinji Okada, Mathew Lindly, Menk Sebastian, Hashimoto Tadashi, Nagaoka Ryosuke, Yamada Shinya, Takayuki Yamaguchi, Susumu Kuma, and Toshiyuki Azuma: Status of the cryogenic ion storage ring RICE (poster)

● Workshop on Interstellar Matter 2018 (ILTS Symposium), Sapporo, Japan, 14–16 November, 2018

Ryosuke Nagaoka, Wataru Koizumi, Shinpei Iida, Masatomi Iizawa, Susumu Kuma, Toshiyuki Azuma, and Yuji Nakano: An experimental study of the gas-phase ion-neutral reaction by merged-beam collisions (oral)

Naoki Numadate, Yohei Yamada, Takumi Ohna, and Hajime Tanuma: Solar wind charge exchange and related atomic processes in laboratory (poster)

● TMU Symposium on Physics of Highly Charged Ions 2018, Tokyo, Japan, 15–16 December, 2018

Takumi Ohna: Status report on HCI facility in TMU (oral)

Hajime Tanuma: Charge exchange spectroscopy and EUV emission from fragment ions in ion-molecule collisions (oral)

3) 学会誌等

城丸春夫, 河野直子, 古川武, 東俊行: 再帰けい光放出による分子イオンの冷却, *Molecular Science*, **12** (1), A0100 (2018)

長嶋泰之, 山下貴志, 飯田進平, 寺部宏基, 立花隆行: アルカリ金属蒸着表面からのポジトロニウム放出機構, *陽電子科学*, **12**, 15–21 (2019)

宇宙物理実験研究室

1. 研究活動の概要

「ひとみ」衛星のX線分光サイエンスを引き継ぐためのXRISM計画が進められ、本研究室はマイクロカロリメータ実験 Resolve の中心的な役割を果たすグループとして参加している。一方、銀河間物質探索を目指す Super DIOS 計画や、地球磁気圏探索 GEO-X 計画を推進し、こうした将来のX線ミッションのために、TES マイクロカロリメータや MEMS 技術によるX線望遠鏡の開発を進め、さらに原子核グループとの共同による地上実験も進めた。

1) 「ひとみ」によるX線観測研究

以下の2本の論文が Hitomi Collaboration を著者として PASJ に出版された。

若い超新星残骸 G21.5-0.9 の観測データを解析し、硬X線検出器 (HXI) を含めた 80 keV までのエネルギースペクトルから、7.1 keV に折れ曲がりがあることを明らかにした。これは NuSTAR が報告している 9 keV より低いエネルギーである。また、マイクロカロリメータ SXS は 4.2 keV と 9.3 keV に有意度 3.65σ の幅の狭い吸収線を検出した。その原因としてサイクロトロン吸収線あるいは中性子星に関係した吸収線の可能性を検討したが、有力候補を特定することはできなかった。

軟ガンマ線検出器 (SGD) によるかに星雲の観測結果から、偏光の測定を行なった。この装置はコンプトンカメラであり、ガンマ線が散乱した電子の方向は偏光を反映する。モンテカルロシミュレーションも用いてデータを解析したところ、わずか 5 ksec の観測であったが、60–160 keV の偏光度は $22.1 \pm 10.6\%$ と求められた。この値は他のより長時間の観測結果と大きな矛盾はない。パルサーの周りをトロイダル状の磁場が囲むという簡単なモデルと比較したところ、観測された偏光度はそれより低く、磁場の配置や粒子の分布に乱れや偏りがあると考えられる。

2) 「すざく」によるX線観測研究

地球磁気圏や惑星など太陽系天体のX線観測研究も積極的に進めている。「すざく」は2013年4月の大規模な太陽フレアに付随する軟X線の増加をとらえた。フレア前の半日ほどは OVII 輝線に特徴付けられる弱い増光があり、その後5–6時間のフレアでは、高階電離した C から Si にかけての多くの輝線が見られた (図1)。X線の時間変動は陽子よりはアルファ粒子の強度とよく相関することがわかった。この結果は PASJ に出版された。一方木星からは、2006年の「すざく」観測により、1–5 keV 範囲の非熱的な放射が木星半径の10倍ほどに広がっていることを発見していた。2014年の「すざく」の観測からその放射が存在しているものの、領域の形が変化していることがわかった。この結果について論文投稿の準備を進めた。

星形成領域である Carina 星雲には南西方向に広がったX線放射が観測されており、その起源が超新星残骸なのか、大質量星の星風なのかがはっきりしていなかった。「すざく」による観測から放射が 0.2 keV と 0.5 keV という2つの温度をもつこと、元素のアバンダンスは大質量星または重力崩壊型超新星に合うことを確認した。この結果も論文として取りまとめた。

磁場の弱い白色矮星を含む連星は矮新星として、周期的にアウトバーストや持続時間の長いスーパーアウトバーストをおこすことが知られている。これは降着円盤の不安定性に関係する現象だが、X線は円盤内縁の境界層から白色矮星にガスが着地する様子を知る上で独自の情報を教える。VW Hri を「すざく」と XMM-Newton で観測し、X線の強度がアウトバースト後の時間とともに減少すること、一方スーパーアウトバーストからの時間には相関しないことを見つけた。円盤内縁の降着流の振る舞いに新たな制限を与える結果であり、投稿論文としてまとめている。

3) 次期X線天文衛星 XRISM の開発

「ひとみ」のX線分光サイエンスを早期に復活させるための衛星 (XRISM: X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission, 図2) の開発を進めた。衛星計画は2018年7月にJAXAから正式のプロジェクトとして認められ、10月に金沢で第1回サイエンス会議が開催された。打ち上げは2021年度を予定している。首都大グループは石崎がResolveの日本側PIとなり、国内各機関やNASAグループとも相談しながらフライトモデルの設計・製作を進めている。NASAでフライト検出器が製作されており「ひとみ」と同等の性能が出ている。日本担当のデジタル処理系との噛み合わせもNASAで進められている。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なっている。

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、積層配線による集積度を高めた素子作りを進め、金の吸収体をつける際ネガ型レジストを用いてバリが出ないように作る、メンブレン構造に気泡が入っていた問題をプロセスを見直すことで解決するなど、技術的にはほぼ完成することができた。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が、産総研グループと協力しながらマイクロ波読み出しの開発を進めた。また、TESカロリメータの地上応用として、原子核実験のグループなどと協力して、K中間子Heの特性X線のエネルギーを正確に求めるJ-PARC実験を6月に実施した。米NIST製の冷凍機とTESカロリメータを導入し、さまざまな方法によってS/N比を改善し目的とするデータを得ることができた。

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、衛星搭載向け性能向上を進めている。

微細穴側壁の基本的な形状はSi基板のドライエッチングで決まる。我々は今年度、住友精密と共同で最新加工装置を用いた条件出しを進め、数年かけて条件出した従来とほぼ同等の平坦性で基板端のバリが小さい条件を達成した。今後のさらなる改善が期待できる。さらに基板端におけるバリ除去のため、従来よりも厚い基板をエッチングした後に両面から化学機械研磨を行う手法を新たに試し、X線反射率の大幅な向上を確認した。平坦性の良い側壁を選択できるため、角度分解能の向上も期待できる。

同時に、アニールプロセスの改善も行った。高温下でSi基板を熱し、原子の自発的な拡散による平滑・平坦化を進める工程である。我々は拡散長を大幅に伸ばし、平坦化を進めるため、共同研究する東北大の装置を1ヶ月程度占有して、従来から10倍以上長時間化した100時間のアニールを試した。そしてX線測定から、アニール時間を延ばすことで明らかに結像プロファイルが鋭くなることを確認した。このような長時間のアニールは我々の知る限り前例がなく、新たな知見である。

さらにSi基板そのものを高温で変形する独自の手法も開発した。円錐形に曲げた基板の表面を反射鏡として使う。前年度までの結果から、治具の表面形状に改善が必要であることを見出し、治具の再加工を行って、部分的に30秒角を切る角度分解能を達成した。しかし、治具に μm レベルで噛み合わせの悪い箇所が残っていたため、治具加工時の刃や固定方法、評価方法を改善して、治具の形状改善に成功した。今後の変形でさらに良い角度分解能の達成が期待できる。

6) GEO-X の検討

上記のマイクロマシン技術を用いた超軽量X線望遠鏡は2020年代前半を目標とする小型衛星GEO-Xを目指している。地球磁気圏X線撮像を狙う新たな計画であり、東京大、北海道大、名古屋大、JAXA宇宙

研らとハードウェアとサイエンスの開発検討を行った。そして JAXA 宇宙理学委員会において GEO-X 検討ワーキンググループが今年度新たに承認された。さらに本望遠鏡技術は Si 高温塑性変形鏡技術とあわせて JAXA が策定する宇宙科学技術ロードマップにおいて、獲得すべき技術に選出されている。衛星実現に向けて、さらに開発を加速させたい。

7) 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進めた。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、埼玉大、宇宙研、名古屋大などとハードウェアの開発を行うとともに、理論グループと新たなシミュレーションも進めている。ダークバリオンの検出以外にダークマターや circum-galactic gas のサイエンスなどについても検討を行なった。

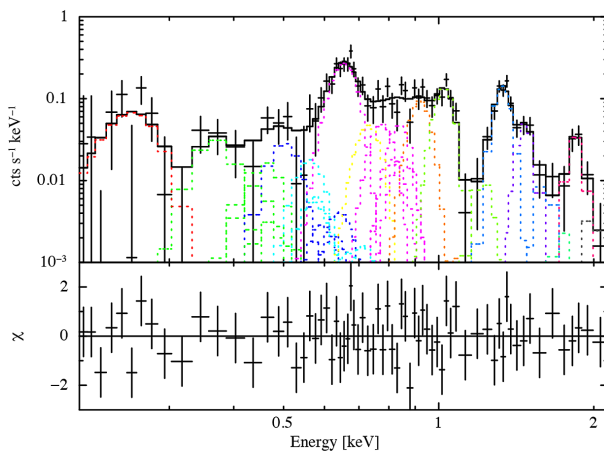


図 1: 2013 年 4 月の太陽フレア時に「すざく」で観測されたエネルギースペクトル。電荷交換反応による C から Si までの高階電離輝線が多く見られる (Ishi et al. 2019, PASJ 71, id. 23).



図 2: XRISM 衛星の外観図。衛星重量は 2.3 トン、全長は 7.9 m、マイクロカロリメータおよび X 線 CCD が搭載される。

2. 研究業績

1) 論文

Simionescu, A.; Nakashima, S.; Yamaguchi, H.; Matsushita, K.; Mernier, F.; Werner, N.; Tamura, T.; Nomoto, K.; de Plaa, J.; Leung, S.-C.; Bamba, A.; Bulbul, E.; Eckart, M. E.; Ezoe, Y.; Fabian, A. C.; Fukazawa, Y.; Gu, L.; Ichinohe, Y.; Ishigaki, M. N.; Kaastra, J. S.; Kilbourne, C.; Kitayama, T.; Leutenegger, M.; Loewenstein, M.; Maeda, Y.; Miller, E. D.; Mushotzky, R. F.; Noda, H.; Pinto, C.; Porter, F. S.; Safi-Harb, S.; Sato, K.; Takahashi, T.; Ueda, S.; Zha, S.: Constraints on the chemical enrichment history of the Perseus Cluster of galaxies from high-resolution X-ray spectroscopy, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **483**, Issue 2, p.1701-1721, DOI: 10.1093/mnras/sty3220 (02/2019)

Ishi, Daiki; Ishikawa, Kumi; Numazawa, Masaki; Miyoshi, Yoshizumi; Terada, Naoki; Mitsuda, Kazuhisa; Ohashi, Takaya; Ezoe, Yuichiro: Suzaku detection of enigmatic geocoronal solar wind

charge exchange event associated with coronal mass ejection, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **71**, Issue 1, id.23, DOI: 10.1093/pasj/psy142 (01/2019)

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, 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; Uchida, Yuusuke: Detection of polarized gamma-ray emission from the Crab nebula with the Hitomi Soft Gamma-ray Detector, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **70**, Issue 6, id.113, DOI: 10.1093/pasj/psy118 (12/2018)

Urdampilleta, I.; Akamatsu, H.; Mernier, F.; Kaastra, J. S.; de Plaa, J.; Ohashi, T.; Ishisaki, Y.; Kawahara, H.: X-ray study of the double radio relic Abell 3376 with Suzaku, *Astronomy & Astrophysics*, **618**, id.A74, DOI: 10.1051/0004-6361/201732496 (10/2018)

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, 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; Sato, Toshiki; Nakaniwa, Nozomu; Murakami, Hiroaki; Guest, Benson: Hitomi X-ray observation of the pulsar wind nebula G21.5-0.9, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **70**, Issue 3,

Numazawa, Masaki; Ishi, Daiki; Ezoe, Yuichiro; Takeuchi, Kazuma; Terada, Masaru; Fujitani, Maiko; Ishikawa, Kumi; Nakajima, Kazuo; Morishita, Kohei; Ohashi, Takaya; Mitsuda, Kazuhisa; Nakamura, Kasumi; Noda, Yusuke: Evaluation of alignment error of micropore X-ray optics caused by hot plastic deformation, *Japanese Journal of Applied Physics*, **57**, Issue 6S1, pp. 06HJ11, DOI: 10.7567/JJAP.57.06HJ11 (06/2018)

Takeuchi, Kazuma; Ezoe, Yuichiro; Ishikawa, Kumi; Numazawa, Masaki; Terada, Masaru; Ishi, Daiki; Fujitani, Maiko; Sowa, Mark J.; Ohashi, Takaya; Mitsuda, Kazuhisa: Pt thermal atomic layer deposition for silicon x-ray micropore optics, *Applied Optics*, **57**, issue 12, page 3237, DOI: 10.1364/ao.57.003237 (04/2018)

Takahashi, Tadayuki; Kokubun, Motohide; Mitsuda, Kazuhisa; Kelley, Richard L.; Ohashi, Takaya; Aharonian, Felix; Akamatsu, Hiroki; Akimoto, Fumie; Allen, Steven W.; Anabuki, Naohisa; Angelini, Lorella; Arnaud, Keith; Asai, Makoto; Audard, Marc; Awaki, Hisamitsu; Axelsson, Magnus; Azzarello, Philipp; Baluta, Chris; Bamba, Aya; Bando, Nobutaka; Bautz, Marshall W.; Bialas, Thomas; Blandford, Roger; Boyce, Kevin; Brenneman, Laura W.; Brown, Gregory V.; Bulbul, Esra; Cackett, Edward M.; Canavan, Edgar; Chernyakova, Maria; Chiao, Meng P.; Coppi, Paolo S.; Costantini, Elisa; O'Dell, Steve; DiPirro, Michael; Done, Chris; Dotani, Tadayasu; Doty, John; Ebisawa, Ken; Eckart, Megan E.; Enoto, Teruaki; Ezoe, Yuichiro; Fabian, Andrew C.; Ferrigno, Carlo; Foster, Adam R.; Fujimoto, Ryuichi; Fukazawa, Yasushi; Funk, Stefan; Furuzawa, Akihiro; Galeazzi, Massimiliano; Gallo, Luigi C.; Gandhi, Poshak; Gilmore, Kirk; Giustini, Margherita; Goldwurm, Andrea; Gu, Liyi; Guainazzi, Matteo; Haas, Daniel; Haba, Yoshito; Hagino, Kouichi; Hamaguchi, Kenji; Harrus, Ilana M.; Hatsukade, Isamu; Hayashi, Takayuki; Hayashi, Katsuhiro; Hayashida, Kiyoshi; den Herder, Jan-Willem; Hiraga, Junko S.; Hirose, Kazuyuki; Hornschemeier, Ann; Hoshino, Akio; Hughes, John P.; Ichinohe, Yuto; Iizuka, Ryo; Inoue, Hajime; Inoue, Yoshiyuki; Ishibashi, Kazunori; Ishida, Manabu; Ishikawa, Kumi; Ishimura, Kosei; Ishisaki, Yoshitaka; Itoh, Masayuki; Iwai, Masachika; Iwata, Naoko; Iyomoto, Naoko; Jewell, Chris; Kaastra, Jelle; Kallman, Tim; Kamae, Tsuneyoshi; Kara, Erin; Kataoka, Jun; Katsuda, Satoru; Katsuta, Junichiro; Kawaharada, Madoka; Kawai, Nobuyuki; Kawano, Taro; Kawasaki, Shigeo; Khangulyan, Dmitry; Kilbourne, Caroline A.; Kimball, Mark; King, Ashley; Kitaguchi, Takao; Kitamoto, Shunji; Kitayama, Tetsu; Kohmura, Takayoshi; Konami, Saori; Kosaka, Tatsuro; Koujelev, Alex; 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; Masters, Candace; Matsumoto, Hironori; Matsushita, Kyoko; McCammon, Dan; Mcguinness, Daniel; McNamara, Brian R.; Mehdipour, Missagh; Miko, Joseph; Miller, Eric D.; Miller, Jon M.; Mineshige, Shin; Minesugi, Kenji; Mitsuishi, Ikuyuki; Miyazawa, Takuya; Mizuno, Tsunefumi; Mori, Hideyuki; Mori, Koji; Moroso, Franco; Moseley, Harvey; Muench, Theodore; Mukai, Koji; Murakami, Hiroshi; Murakami, Toshio; Mushotzky, Richard F.; Nagano, Housei; Nagino, Ryo; Nakagawa, Takao; Nakajima, Hiroshi; Nakamori, Takeshi; Nakano, Toshio; Nakashima, Shinya; Nakazawa, Kazuhiro; Namba, Yoshiharu; Natsukari, Chikara; Nishioka, Yusuke; Nobukawa, Kumiko K.; Nobukawa, Masayoshi; Noda, Hirofumi; Nomachi, Masaharu; Odaka, Hi-

rokazu; Ogawa, Hiroyuki; Ogawa, Mina; Ogi, Keiji; Ohno, Masanori; Ohta, Masayuki; Okajima, Takashi; Okamoto, Atsushi; Okazaki, Tsuyoshi; Ota, Naomi; Ozaki, Masanobu; Paerels, Frits; Paltani, St é phane; Parmar, Arvind; Petre, Robert; Pinto, Ciro; de Plaa, Jelle; Pohl, Martin; Pontius, James; Porter, Frederick S.; Pottschmidt, Katja; Ramsey, Brian; Reynolds, Christopher; Russell, Helen; Safi-Harb, Samar; Saito, Shinya; Sakai, Kazuhiro; Sakai, Shin-ichiro; Sameshima, Hiroaki; Sasaki, Toru; Sato, Goro; Sato, Kosuke; Sato, Rie; Sato, Yoichi; Sawada, Makoto; Schartel, Norbert; Serlemitsos, Peter J.; Seta, Hiromi; Shibano, Yasuko; Shida, Maki; Shidatsu, Megumi; Shimada, Takanobu; Shinozaki, Keisuke; Shirron, Peter; Simionescu, Aurora; Simmons, Cynthia; Smith, Randall K.; Sneiderman, Gary; Soong, Yang; Stawarz, Ł ukasz; Sugawara, Yasuharu; Sugita, Satoshi; Sugita, Hiroyuki; Szymkowiak, Andrew; Tajima, Hiroyasu; Takahashi, Hiromitsu; Takeda, Shin'ichiro; Takei, Yoh; Tamagawa, Toru; Tamura, Takayuki; Tamura, Keisuke; 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; Ueno, Shiro; Uno, Shin'ichiro; Urry, C. Megan; Ursino, Eugenio; de Vries, Cor P.; Wada, Atsushi; Watanabe, Shin; Watanabe, Tomomi; Werner, Norbert; Wik, Daniel R.; Wilkins, Dan R.; Williams, Brian J.; Yamada, Shinya; Yamada, Takahiro; Yamaguchi, Hiroya; Yamaoka, Kazutaka; Yamasaki, Noriko Y.; Yamauchi, Makoto; Yamauchi, Shigeo; Yaqoob, Tahir; Yatsu, Yoichi; Yonetoku, Daisuke; Yoshida, Atsumasa; Yuasa, Takayuki; Zhuravleva, Irina; Zoghbi, Abderahmen: Hitomi (ASTRO-H) X-ray Astronomy Satellite, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, **4**, id. 021402, DOI: 10.1117/1.JATIS.4.2.021402 (04/2018)

Sneiderman, Gary A.; Shirron, Peter J.; Fujimoto, Ryuichi; Bialas, Thomas G.; Boyce, Kevin R.; Chiao, Meng P.; DiPirro, Michael J.; Eckart, Megan E.; Hartz, Leslie; Ishisaki, Yoshitaka; Kilbourne, Caroline A.; Masters, Candace; McCammon, Dan; Mitsuda, Kazuhisa; Noda, Hirofumi; Porter, Frederick S.; Szymkowiak, Andrew E.; Takei, Yoh; Tsujimoto, Masahiro; Yoshida, Seiji: Cryogen-free operation of the Soft X-ray Spectrometer instrument, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, **4**, id. 021408, DOI: 10.1117/1.JATIS.4.2.021408 (04/2018)

Leutenegger, Maurice A.; Audard, Marc; Boyce, Kevin R.; Brown, Gregory V.; Chiao, Meng P.; Eckart, Megan E.; Fujimoto, Ryuichi; Furuzawa, Akihiro; Guainazzi, Matteo; Haas, Daniel; Hayashi, Takayuki; den Herder, Jan-Willem; Iizuka, Ryo; Ishida, Manabu; Ishisaki, Yoshitaka; Kikuchi, Naomichi; Kilbourne, Caroline A.; Koyama, Shu; Kurashima, Sho; Maeda, Yoshitomo; Markevitch, Maxim; McCammon, Dan; Mitsuda, Kazuhisa; Mori, Hideyuki; Nakaniwa, Nozomi; Okajima, Takashi; Paltani, St é phane; Petre, Robert; Porter, F. Scott; Sato, Kosuke; Sato, Toshiki; Sawada, Makoto; Serlemitsos, Peter J.; Seta, Hiromi; Sneiderman, Gary; Soong, Yang; Sugita, Satoshi; Szymkowiak, Andrew E.; Takei, Yoh; Tashiro, Makoto; Tawara, Yuzuru; Tsujimoto, Masahiro; de Vries, Cor P.; Watanabe, Tomomi; Yamada, Shinya; Yamasaki, Noriko: In-flight verification of the calibration and performance of the ASTRO-H (Hitomi) Soft X-ray Spectrometer, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, **4**, id. 021407, DOI: 10.1117/1.JATIS.4.2.021407 (04/2018)

Eckart, Megan E.; Adams, Joseph S.; Boyce, Kevin R.; Brown, Gregory V.; Chiao, Meng P.; Fujimoto, Ryuichi; Haas, Daniel; den Herder, Jan-Willem; Hoshino, Akio; Ishisaki, Yoshitaka; Kilbourne,

Caroline A.; Kitamoto, Shunji; Leutenegger, Maurice A.; McCammon, Dan; Mitsuda, Kazuhisa; Porter, F. Scott; Sato, Kosuke; Sawada, Makoto; Seta, Hiromi; Sneiderman, Gary A.; Szymkowiak, Andrew E.; Takei, Yoh; Tashiro, Makoto S.; Tsujimoto, Masahiro; de Vries, Cor P.; Watanabe, Tomomi; Yamada, Shinya; Yamasaki, Noriko Y.: Ground calibration of the Astro-H (Hitomi) soft x-ray spectrometer, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, **4**, id. 021406, DOI: 10.1117/1.JATIS.4.2.021406 (04/2018)

Ichinohe, Y.; Yamada, S.; Miyazaki, N.; Saito, S., Neural network-based preprocessing to estimate the parameters of the X-ray emission of a single-temperature thermal plasma, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **475**, Issue 4, p.4739-4744, DOI: 10.1093/mnras/sty161 (04/2018)

Ezoe, Y., et al., Ultra light-weight X-ray telescope missions : ORBIS and GEO-^X, *J. Astron. Telescope Instrum.*, **4**, 046001, (2018)

Matsushima, J., Ezoe, Y., et al., Development of Binary Black Hole Observation Satellite “ ORBIS ”, *Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci.*, 2019, <https://doi.org/10.2322/tastj.17.477> (advanced on line)

Sibeck, D., Ezoe, Y., et al., Imaging Plasma Density Structures in the Soft X-Rays Generated by Solar Wind Charge Exchange with Neutrals, *Space Sci. Rev.*, **214:79**, 1-129

2) 国際会議報告

Ishisaki, Y.; Ezoe, Y.; Yamada, S.; Ichinohe, Y.; Fujimoto, R.; Takei, Y.; Yasuda, S.; Ishida, M.; Yamasaki, N. Y.; Maeda, Y.; Tsujimoto, M.; Iizuka, R.; Koyama, S.; Noda, H.; Tamagawa, T.; Sawada, M.; Sato, K.; Kitamoto, S.; Hoshino, A.; Brown, G. V.; Eckart, M. E.; Hayashi, T.; Kelley, R. L.; Kilbourne, C. A.; Leutenegger, M. A.; Mori, H.; Okajima, T.; Porter, F. S.; Soong, Y.; McCammon, D.; Szymkowiak, A. E.: Resolve Instrument on X-ray Astronomy Recovery Mission (XARM), *Journal of Low Temperature Physics*, **193**, Issue 5-6, pp. 991-995, DOI: 10.1007/s10909-018-1913-4 (12/2018)

Yamada, S.; Ohashi, T.; Ishisaki, Y.; Ezoe, Y.; Ichinohe, Y.; Kitazawa, S.; Kosaka, K.; Hayakawa, R.; Nunomura, K.; Mitsuda, K.; Yamasaki, N. Y.; Kikuchi, T.; Hayashi, T.; Muramatsu, H.; Nakashima, Y.; Tawara, Y.; Mitsuishi, I.; Babazaki, Y.; Seki, D.; Otsuka, K.; Ishihara, M.; Osato, K.; Ota, N.; Tomariguchi, M.; Nagai, D.; Lau, E.; Sato, K.: Super DIOS: Future X-ray Spectroscopic Mission to Search for Dark Baryons, *Journal of Low Temperature Physics*, **193**, Issue 5-6, pp. 1016-1023, DOI: 10.1007/s10909-018-1918-z (12/2018)

Kengo, K.; Ezoe, Y.; Kitazawa, S.; Hayakawa, R.; Nunomura, K.; Ohashi, T.; Ishisaki, Y.; Yamada, S.; Hidaka, M.; Satoh, T.; Mitsuda, K. Study of Surface Roughness Effect on Super-Normal Transition of Ti/Au Transition Edge Sensor Calorimeters, *Journal of Low Temperature Physics*, **193**, Issue 3-4, pp. 349-355 DOI: 10.1007/s10909-018-1995-z (11/2018)

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*, **193**, Issue 3-4, pp. 505-511, DOI: 10.1007/s10909-018-1861-z (11/2018)

Ohashi, T.; Ishisaki, Y.; Ezoe, Y.; Yamada, S.; Hayakawa, R.; Nunomura, K.; Sato, K.; Tawara, Y.; Mitsuishi, I.; Ohtsuka, K.; Mitsuda, K.; Yamasaki, N. Y.; Kikuchi, T.; Hayashi, T.; Muramatsu, H.; Nakashima, Y.; Ota, N.; Osato, K.; Ichinohe, Y.; Eckart, M. E.; Bandler, S. R.; Kelley, R. L.; Kilbourne, C. A.: Super DIOS: future x-ray spectroscopic mission to search for dark baryons, *Proceedings of the SPIE*^E, Volume 10699, id. 1069928 10 pp., DOI: 10.1117/12.2313122 (07/2018)

Tashiro, Makoto; Maejima, Hironori; Toda, Kenichi; Kelley, Richard; Reichenthal, Lillian; Lobell, James; Petre, Robert; Guainazzi, Matteo; Costantini, Elisa; Edison, Mark; Fujimoto, Ryuichi; Grim, Martin; Hayashida, Kiyoshi; den Herder, Jan-Willem; Ishisaki, Yoshitaka; Paltani, St é phane; Matsushita, Kyoko; Mori, Koji; Sneiderman, Gary; Takei, Yoh; Terada, Yukikatsu; Tomida, Hiroshi; Akamatsu, Hiroki; Angelini, Lorella; Arai, Yoshitaka; Awaki, Hisamitsu; Babyk, Iurii; Bamba, Aya; Barfknecht, Peter; Barnstable, Kim; Bialas, Thomas; Blagojevic, Branimir; Bonafede, Joseph; Brambora, Clifford; Brenneman, Laura; Brown, Greg; Brown, Kimberly; Burns, Laura; Canavan, Edgar; Carnahan, Tim; Chiao, Meng; Comber, Brian; Corrales, Lia; de Vries, Cor; Dercksen, Johannes; Diaz-Trigo, Maria; Dillard, Tyrone; DiPirro, Michael; Done, Chris; Dotani, Tadayasu; Ebisawa, Ken; Eckart, Megan; Enoto, Teruaki; Ezoe, Yuichiro; Ferrigno, Carlo; Fukazawa, Yasushi; Fujita, Yutaka; Furuzawa, Akihiro; Gallo, Luigi; Graham, Steve; Gu, Liyi; Hagino, Kohichi; Hamaguchi, Kenji; Hatsukade, Isamu; Hawes, Dean; Hayashi, Takayuki; Hegarty, Cailey; Hell, Natalie; Hiraga, Junko; Hodges-Kluck, Edmund; Holland, Matt; Hornschemeier, Ann; Hoshino, Akio; Ichinohe, Yuto; Iizuka, Ryo; Ishibashi, Kazunori; Ishida, Manabu; Ishikawa, Kumi; Ishimura, Kosei; James, Bryan; Kallman, Timothy; Kara, Erin; Katsuda, Satoru; Kenyon, Steven; Kilbourne, Caroline; Kimball, Mark; Kitaguti, Takao; Kitamoto, Shunji; Kobayashi, Shogo; Kohmura, Takayoshi; Koyama, Shu; Kubota, Aya; Leutenegger, Maurice; Lockard, Tom; Loewenstein, Mike; Maeda, Yoshitomo; Marbley, Lynette; Markevitch, Maxim; Matsumoto, Hironori; Matsuzaki, Keiichi; McCammon, Dan; McNamara, Brian; Miko, Joseph; Miller, Eric; Miller, Jon; Minesugi, Kenji; Mitsuishi, Ikuyuki; Mizuno, Tsunefumi; Mori, Hideyuki; Mukai, Koji; Murakami, Hiroshi; Mushotzky, Richard; Nakajima, Hiroshi; Nakamura, Hideto; Nakashima, Shinya; Nakazawa, Kazuhiro; Natsukari, Chikara; Nigo, Kenichiro; Nishioka, Yusuke; Nobukawa, Kumiko; Nobukawa, Masayoshi; Noda, Hirofumi; Odaka, Hirokazu; Ogawa, Mina; Ohashi, Takaya; Ohno, Masahiro; Ohta, Masayuki; Okajima, Takashi; Okamoto, Atsushi; Onizuka, Michitaka; Ota, Naomi; Ozaki, Masanobu; Plucinsky, Paul; Porter, F. Scott; Pottschmidt, Katja; Sato, Kosuke; Sato, Rie; Sawada, Makoto; Seta, Hiromi; Shelton, Ken; Shibano, Yasuko; Shida, Maki; Shidatsu, Megumi; Shirron, Peter; Simionescu, Aurora; Smith, Randall; Someya, Kazunori; Soong, Yang; Suagawara, Yasuharu; Szymkowiak, Andy; Takahashi, Hiromitsu; Tamagawa, Toru; Tamura, Takayuki; Tanaka, Takaaki; Terashima, Yuichi; Tsuboi, Yohko; Tsujimoto, Masahiro; Tsunemi, Hiroshi; Tsuru, Takeshi; Uchida, Hiroyuki; Uchiyama, Hideki; Ueda, Yoshihiro; Uno, Shinichiro; Walsh, Thomas; Watanabe, Shin; Williams, Brian; Wolfs, Rob; Wright, Michael; Yamada, Shinya; Yamaguchi, Hiroya; Yamaoka, Kazutaka; Yamasaki, Noriko; Yamauchi, Shigeo; Yamauchi, Makoto; Yanagase, Keiichi; Yaqoob, Tahir; Yasuda, Susumu; Yoshioka, Nasa; Zabala, Jaime; Irina, Zhuravleva: Concept of the X-ray Astronomy Recovery Mission, *Proceedings of the SPIE*, **10699**, id. 1069922 12 pp., DOI: 10.1117/12.2309455 (07/2018)

Ezoe, Yuichiro; Miyoshi, Yoshizumi; Kasahara, Satoshi; Kimura, Tomoki; Ishikawa, Kumi; Fujimoto, Masaki; Mitsuda, Kazuhisa; Sahara, Hironori; Isobe, Naoki; Nakajima, Hiroshi; Ohashi, Takaya;

Nagata, Haruki; Funase, Ryu; Ueno, Munetaka; Branduardi-Raymont, Graziella: Small satellites with MEMS x-ray telescopes for x-ray astronomy and solar system exploration, *Proceedings of the SPIE*, **10699**, id. 106990V 15 pp., DOI: 10.1117/12.2311422 (07/2018)

Nakajima, Hiroshi; Onishi, Satomi; Iwagaki, Jun-ichi; Hiraga, Junko S.; Doty, John P.; Ikeda, Hirokazu; Ezoe, Yuichiro; Isobe, Naoki; Sahara, Hironori: Development of focal plane x-ray detector aboard a microsatellite for monitoring supermassive blackholes, *Proceedings of the SPIE*, **10699**, id. 1069963 6 pp., DOI: 10.1117/12.2311990 (07/2018)

Yoshida, Seiji; Miyaoka, Mikio; Kanao, Ken'ichi; Tsunematsu, Shoji; Otsuka, Kiyomi; Hoshika, Shunji; Narasaki, Katsuhiro; Mitsuda, Kazuhisa; Yamasaki, Noriko; Takei, Yoh; Fujimoto, Ryuichi; Ezoe, Yuichiro; Sato, Yoichi; Okamoto, Atsushi; Noda, Hirofumi; DiPirro, Michael; Shirron, Peter: In-orbit performance of a helium dewar for the soft X-ray spectrometer onboard ASTRO-^H, *Cryogenics*, **91**, p. 27-35., DOI: 10.1016/j.cryogenics.2018.02.003 (04/2018)

Ezoe, Y., et al., X-ray observations of Jupiter and beyond, *Proc. International Symposium on Planetary Science*, 59-68, (2019)

Ishikawa, K., Ezoe, Y., et al., Optical loading study of X-ray imaging spectrometer for Jupiter exploration mission, *Proc. International Symposium on Planetary Science*, 69-78, (2019)

3) 学会講演

国内学会

● 日本天文学会 2018 年秋季年会 2018 年 9 月 19～21 日 (兵庫県立大学)

布村光児, 早川亮大, 大井かなえ, 野村香菜枝, 大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 山田真也 (首都大), 満田和久 (宇宙研), 日高睦夫, 永沢秀一, 伊坂美千代 (産総研); 積層配線 TES 型 X 線マイクロカロリメータの超伝導薄膜の膜厚比とメンブレン加工の開発

早川亮大, 山田真也, 大橋隆哉, 石崎欣尚 (首都大理), 一戸悠人 (立教大), 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 (首都大理), HEATES & E62 コラボレーション; 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 (5)

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^J, R. Iizuka^H, K. Ishibashi^I, M. Ishida^H, K. Ishikawa^H, C.A. Kilbourne^A, S. Kitamoto^J, S. Koyama^J, 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, 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 II

江副祐一郎, 石崎欣尚 (首都大), 藤本龍一 (金沢大), 竹井洋, 石川久美, 安田進, 柳瀬慶一, 山崎典子 (JAXA), 佐藤浩介 (埼玉大), 北本俊二, 小山志勇 (立教大), 野田博文 (東北大), 吉田誠至, 金尾憲一, 恒松正二 (住友重機械工業), R.L. Kelley, C.A. Kilbourne, M.J. DiPirro, P. Shirron (NASA), 他 XARM Resolve チーム; X 線天文衛星代替機 XARM 搭載 Resolve 冷却系開発の現状

武尾 舞, 中庭 望, 浅井龍太, 大橋隆哉 (首都大), 石田 學, 前田良知 (宇宙研) 佐藤寿紀 (理研); Pt/C 多層膜ブラッグ反射による低エネルギー X 線用分光器の開発と X 線測定 環境での実用化

佐藤浩介, 高橋海斗 (埼玉大), 北本俊二, 小山志勇, 稲垣徳晃, 津久井豊 (立教大), 竹井洋, 柳瀬恵一 (JAXA), 石崎欣尚, 江副祐一郎 (首都大), 藤本龍一 (金沢大), 吉田誠至, 金尾憲一, 恒松正二 (住友重機械工業), 他 XARM Resolve チーム; X 線天文衛星代替機 XARM 搭載 Resolve のゲートバルブ用電磁弁及び機械式冷凍機冷却ファンの性能評価

江副祐一郎 (首都大), 三好由純 (名古屋大), 笠原慧, 船瀬龍 (東大), 永田晴紀 (北海道大), 上野宗孝 (神戸大), 中嶋大 (関東学院大), 木村智樹 (東北大), 石川久美, 三田信, 満田和久, 藤本正樹 (JAXA 宇宙研), 大橋隆哉 (首都大), GEO-X チーム; 地球磁気圏 X 線撮像計画 GEO-X の現状

佐藤浩介 (埼玉大), 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, 石田学, 前田良知 (ISAS/JAXA), 田原譲, 三石郁之 (名古屋大), 藤本龍一 (金沢大), 鶴剛 (京大), 太田直美 (奈良女子大), 大里健 (東大), 中島真也 (理研), 旧 DIOS ワーキンググループ; ダークバリオン探索ミッション Super DIOS の開発へ向けた検討 II

● 宇宙科学シンポジウム 2019 年 1 月 9~10 日 (宇宙科学研究所)

佐藤 浩介, 大橋 隆哉, 石崎 欣尚, 江副 祐一郎, 山田 真也, 山崎 典子, 満田 和久, 石田 学, 前田 良知, 田原 譲, 三石 郁之, 藤本 龍一, 鶴 剛, 太田 直美, 中島 真也, 河合 誠之; ダークバリオン探索衛星: Super DIOS の検討;

石崎 欣尚, Kelley Richard L., 赤松 弘規, 粟木 久光, Bialas Thomas G., Brown Gregory V., Chiao Meng P., Costantini Elisa, den Herder Jan-Willem, Dipirro Michael J., Eckart Megan E., 江副祐一郎, Ferrigno Carlo, 藤本 龍一, 古澤 彰浩, Graham Steven M., Grim Grim, 林 多佳由, 星野 晶夫, 一戸 悠人, 飯塚 亮, 石橋 和紀, 石田 学, 石川 久美, Kilbourne Caroline A., 北本 俊二, 小山 志勇, Leutenegger Maurice A., 前田 良知, McCammon Dan, 三石 郁之, 森 英之, 中島 真也, 大橋 隆哉, 岡島 崇, Paltani Stephane, Porter F. Scott, 佐藤 浩介, 澤田 真理, 瀬田 裕美, 柴野 靖子, Shirron Peter J., Sneiderman Gary A., Soong Yang, Szymkowiak Andrew E., 竹井 洋, 玉川 徹, 辻本 匡弘, Vries Cor P. de, 山田 真也, 山崎 典子, 安田 進, 吉岡 奈紗; X 線分光撮像衛星 (XRISM) 搭載 Resolve の開発状況

江副 祐一郎, 三好 由純, 笠原 慧, 船瀬 龍, 永田 晴紀, 中嶋 大, 石川 久美, 金森 義明, 森下 浩平, 三田 信, 平賀 純子, 三石 郁之, 小泉 宏之, 山崎 敦, 長谷川 洋, 松本 洋介, 満田 和久, 上野 宗孝, 藤本 正樹, 川勝 康弘, 岩田 隆浩, 佐原 宏典, 大橋 隆哉; 地球磁気圏 X 線撮像計画 GEO-X;

● 応用物理学会 2018 年秋季年会 2018 年 9 月 18~21 日 (名古屋国際会議場)

藤谷 麻衣子, 江副 祐一郎, 石川 久美, 福島 碧都, 沼澤 正樹, 伊師 大貴, 大坪 亮太, 鈴木 光, 永利 光, 湯浅 辰哉, 大橋 隆哉, 満田 和久, 化学機械研磨による MEMS X 線光学系の反射率の改善

● 日本学術振興会 186 委員会 (放射線科学とその応用) 研究会 2018 年 10 月 2 日 (金沢工業大学)

X 線を用いた天文・太陽系観測; 江副 祐一郎 (招待講演)

● 京都大学物性科学センター 第 17 回講演会 2019 年 2 月 18 日 (京都大学)

大橋隆哉: X線マイクロカロリメータによる宇宙X線分光 (招待講演)

● 2018 年度 CRAVITY シンポジウム 2019 年 2 月 5 日 (産業技術総合研究所)

ひとみ観測結果と超伝導検出器への期待; 江副 祐一郎 (招待講演)

● 応用物理学会 2019 年春季年会 2019 年 3 月 9~12 日 (東工大)

福島 碧都, 藤谷 麻衣子, 石川 久美, 沼澤 正樹, 伊師 大貴, 大坪 亮太, 鈴木 光, 永利 光, 湯浅 辰哉, 大橋 隆哉, 満田 和久, 江副 祐一郎; 化学機械研磨を用いた MEMS X 線光学系の鏡形状改善

伊師 大貴, 江副 祐一郎, 石川 久美, 沼澤 正樹, 藤谷 麻衣子, 大坪 亮太, 福島 碧都, 鈴木 光, 永利 光, 湯浅 辰哉, 金森 義明, 大橋 隆哉, 満田 和久; 超長時間アニール後の Si 微細穴 X 線光学系の鏡形状評価

● 日本天文学会 2019 年春季年会 2019 年 3 月 14~17 日 (法政大学)

石崎欣尚, 他 XRISM チーム, X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 Resolve の開発の現状 III.

佐藤浩介 (埼玉大), 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, 石田学, 前田良知 (ISAS/JAXA), 田原譲, 三石郁之 (名古屋大), 藤本龍一 (金沢大), 鶴剛 (京大), 太田直美 (奈良女子大), 大里健 (東大), 中島真也 (理研), 藤田裕 (大阪大), 永井大輔 (Yale 大), 吉川耕司 (筑波大), 河合誠之 (東工大), 旧 DIOS ワーキンググループ, ダークバリオン探索ミッション Super DIOS の開発へ向けた検討 III

林多佳由, 岡島崇, Yang Soong, 森英之, Larry Olsen, Richard Koenecke, Leor Bleier, Marshall Sutton, Marton Sharpe, Larry Lozipone, Sean Fitzsimmons, Tony Baltusis, Dan Dizon, Richard Kelley, GarySneiderman, MengChiao(NASA's GSFC), 石田学, 前田良知, 飯塚亮 (ISAS/JAXA), 石崎欣尚 (首都大), 藤本 龍一 (金沢大), 林田 清 (大阪大); X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 X 線望遠鏡 (XMA) 開発の現状

沼澤正樹, 江副祐一郎 (首都大), 石川久美 (JAXA), 大橋隆哉 (首都大), 三好由純 (名古屋大), 木村智樹 (東北大), 内山泰伸 (立教大); X 線天文衛星「すざく」による太陽活動極大付近における木星観測

福島碧都, 江副祐一郎 (首都大学東京), 小高裕和 (東大); すざく, Chandra 衛星を用いた星形成領域 RCW 38 の広がった X 線放射の解析

鈴木瞳, 中庭望, 浅井龍太, 武尾舞, 大橋隆哉 (首都大), 石田学, 前田良知, 中坪俊一 (宇宙研); ピンホールを用いた宇宙科学研究所 X 線ビームラインのスポットサイズの測定

● 日本物理学会 2019 年春季大会 2014 年 3 月 14~17 日 (九州大学)

石田学, 岡島崇, 前田良知, 飯塚亮, 石崎欣尚, 竹井洋, 藤本龍一, 林田清, 森英之, 林多佳由, Yang Soong, Larry Olsen, Richard Koenecke, Leor Bleier, Marshall Sutton, Marton Sharpe, Larry Lozipone, Sean Fitzsimmons, Tony Baltusis, Dan Dizon, Richard Kelley, Gary Sneiderman, Meng Chiao: X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 X 線望遠鏡 XMA の開発の現状

● 超小型衛星利用シンポジウム 2019 年 3 月 18～19 日（東京大学）

超小型衛星と超小型 X 線撮像分光装置による多様な天文・探査計画; 江副 祐一郎

● 新学術領域研究「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い. 新たな応用への架け橋.」若手ハードウェア研究会 2019 年 3 月 7～8 日（大阪大学）

早川亮大, 超伝導遷移端検出器 (TES) のリアルタイム信号処理の最先端

● 電離圏・磁気圏探査衛星検討リサーチグループ最終会合 2019 年 3 月 28 日（名古屋大学）

GEO-X の活動サマリーと今後について; 江副 祐一郎

国際会議

● SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation 2018 年 6 月 10-15 日（Texas, USA）

Y. Ezoe, T. Ohashi et al.: Small satellites with MEMS x-ray telescopes for x-ray astronomy and solar system exploration

M. Tashiro, Y. Ezoe, Y. Ishiwaki, T. Ohashi, S. Yamada et al: Concept of the X-ray Astronomy Recovery Mission

T. Ohashi, Y. Ishiwaki, Y. Ezoe, S. Yamada, et al: Super DIOS: future x-ray spectroscopic mission to search for dark baryons

H. Nakajima, Y. Ezoe, et al.: Development of focal plane x-ray detector aboard a microsatellite for monitoring supermassive blackholes

● Cool Stars 20 2018 年 7 月 29-8 月 3 日（Boston, USA）

Y. Ezoe, T. Ohashi, et al.: X-ray Observations of HD162020 : One of the X-ray Luminous Low-mass Stars with a Hot Jupiter

● IAU General assembly 2018 年 8 月 20-31 日（Wien, Austria）

T. Ohashi: Super DIOS Mission

● TMU-TSU Joint Symposium 2018 年 9 月 4-6 日（Tomsk, Russia）

T. Ohashi: Recent progress and future prospects of X-ray astronomy

● Exploring the Hot and Energetic Universe 2018 年 9 月 24-27 日（Palermo, Italy）

T. Ohashi: Science results from Hitomi

Y. Ezoe, T. Ohashi, et al.: Origin of enigmatic diffuse X-ray emission in the Carina nebula

M. Numazawa, Y. Ezoe, T. Ohashi et al.: Suzaku and Athena view of diffuse X-ray emission associated with Jupiter's radiation belts

● 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP2018) 2018 年 11 月 12-17 日 (Kanazawa, Japan)

Y. Ezoe: High Resolution X-ray Spectroscopy of Astrophysical Plasmas with X-ray Microcalorimeters (Invited)

● Astronomical X-Ray Telescope (AXRO2018) 2018 年 11 月 27-30 日 (Prague, Czech)

N. Nakaniwa, Y. Ezoe et al.: Development of X-ray mirror using the hot plastic deformation process

● The 31st International Symposium on Superconductivity 2018 年 12 月 12-14 日 (Tsukuba, Japan)

Y. Ezoe: X-ray Microcalorimeters for High Resolution X-ray Spectroscopy of Astrophysical Plasma (Invited)

● TMU-Leicester Joint Symposium 2019 年 3 月 5-10 日 (Leicester, UK)

T. Ohashi: X-ray Astronomy in Japan : Present and Future (Invited)

Y. Ezoe: X-ray Observations of Solar System Objects and Beyond (Invited)

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、大学院生（博士前期）5名、学部生5名の体制で研究を進めた。以下に主要な成果を示す。

1) 立方晶 Sm 化合物における特異な強相関電子状態の発見

カゴ状構造を持つ Sm 立方晶化合物である $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$, $\text{SmTr}_2\text{Al}_{20}$ (Tr : 遷移金属) において我々が見出した「磁場に鈍感な重い電子状態」あるいは「磁場に鈍感な秩序状態」は、他の価数揺動系には見られない Sm 系特有の新奇強相関電子物性として注目を集めている。これらの物質は、(1) 増強された Pauli 常磁性成分が見られず、強く抑制された有効磁気モーメントを持ち、(2) Sm イオンが顕著な価数揺動状態にある、という特徴を示している。これらの特徴と Sm 特有の強相関電子状態の関係を明確にするために、立方晶 Sm 化合物に絞って、電子比熱係数 γ 、有効磁気モーメント μ_{eff} 、Sm 価数 v_{Sm} に注目してその振る舞いを系統的に整理した。その結果、ほぼ全ての化合物において $\gamma = \alpha/\mu_{\text{eff}}^2$ ($\alpha = 5 \sim 2 \times 10^2 \text{ mJ}\mu_{\text{B}}^2/\text{mol K}^2$) という Sm 系特有の関係式が成立していることを見出した。 μ_{eff} が大きく抑制されているものほど大きな γ を示し、その領域の化合物の Sm の価数状態は全て中間価数となっている。また、 γ と v_{Sm} の関係から、 v_{Sm} が整数価数からかなりずれた +2.85 価付近で大きく増強された γ を示すことを見出した。Ce 系の重い電子状態では、 n_f を f 電子数として、有効質量が $(1 - n_f)^{-1}$ に比例することが理論的に期待されており、実験的にも γ と v_{Sm} の関係はこれに従っている。これと比べて、Sm 価数が整数の +3 からかなりずれた領域で Sm 系の重い電子状態が発現していることは特徴的である。このことは、Ce 系と Sm 系で質量増強の機構に顕著な相違があることを示唆しており興味深い。

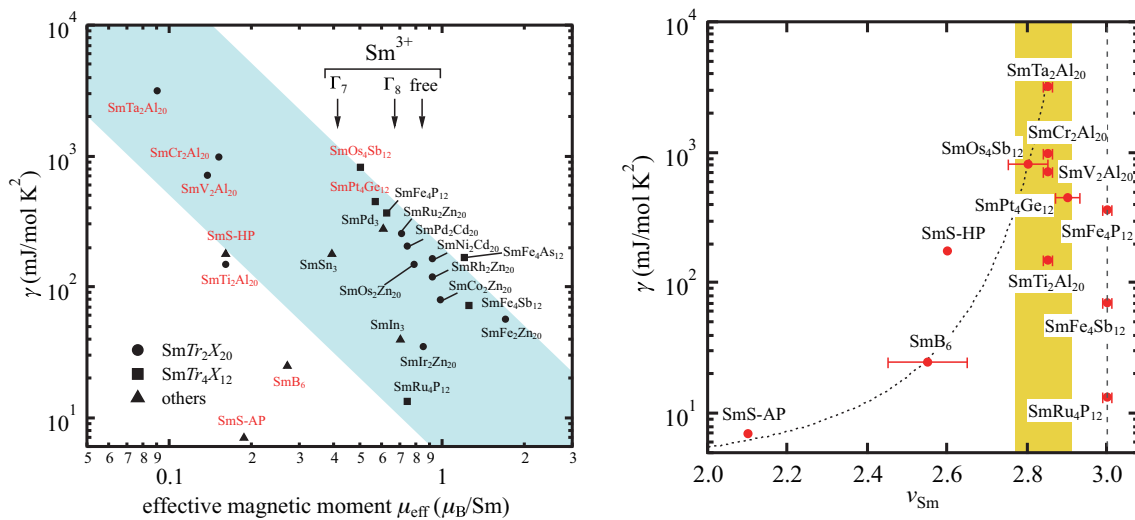


図 1: Sm 立方晶化合物の (左) 電子比熱係数 γ と有効磁気モーメント μ_{eff} , (右) 電子比熱係数 γ と Sm 価数 v_{Sm} の関係。

2) トポロジカル物質「ワイル半金属」 WTe_2 の特異な電子輸送：巨大磁気抵抗効果

Weyl 半金属 WTe_2 の世界最高レベルの高純度単結晶の育成に成功し（残留抵抗比は 1,300 以上）、これを用いた電子輸送測定を昨年度に引き続き進めた。 a 軸方向と b 軸方向の間には明瞭な電気抵抗の異方性があることや、低温で電気抵抗率が異常な温度依存性を示すこと ($\rho - \rho(0) \sim T^n$: $n = 2.7 \sim 2.9$) を明らかにした。

東京大学国際超強磁場科学研究施設において、56 T に達するパルス磁場を用いて、超強磁場下での電気抵抗測定を行った。図 2(a) に示すように、磁気抵抗 $\Delta\rho/\rho(0)$ は、1.4 K において、56 T の磁場下で 4×10^5 にも達する。この巨大な正の磁気抵抗は、本系における世界最高値であり、純良な単結晶であることを反映している。10 K 以下の温度領域で、 $\Delta\rho/\rho(0)$ 対 $B/\rho(0)$ のデータが温度依存していることを初めて明らかにした。これは、「Kohler 則の破れ」と呼ばれ、複数の伝導電子散乱機構がはたらいっていることを示している。図 2(a) の高磁場領域に見られる振動は、Shubnikov de Haas(SdH) 効果によるものである。図 2(b) に示すフーリエスペクトルには、4 つの基本振動が見られ ($F_1 \sim F_4$)、2 つのホール面と 2 つの電子面の存在を確認した。約 250 T の振動数を持つピークの強度は、磁場上昇とともに顕著に増大しており、磁気貫通効果 (magnetic breakdown) に起因している可能性がさらに高まった。

WTe₂ の角度分解光電子分光 (ARPES) 測定を早稲田大グループと行い、観測されたバンド分散が、バンド計算結果から顕著にずれていることを明らかにした。この特徴は、本系において電子相関効果が無視できないことを示唆している。

また、Fe イオンを希薄にドーピングした (W_{1-x}Fe_x)Te₂ 単結晶を育成し、電気抵抗の温度依存性に、 $-\log T$ 依存する成分を 20 K 以下の低温領域で見出した。これは近藤効果が発現していることの証拠であり、ワイル半金属における近藤効果の初めての観測である。Hamann モデルを用いて解析し、近藤温度が $T_K \simeq 2$ K であることを明らかにした。

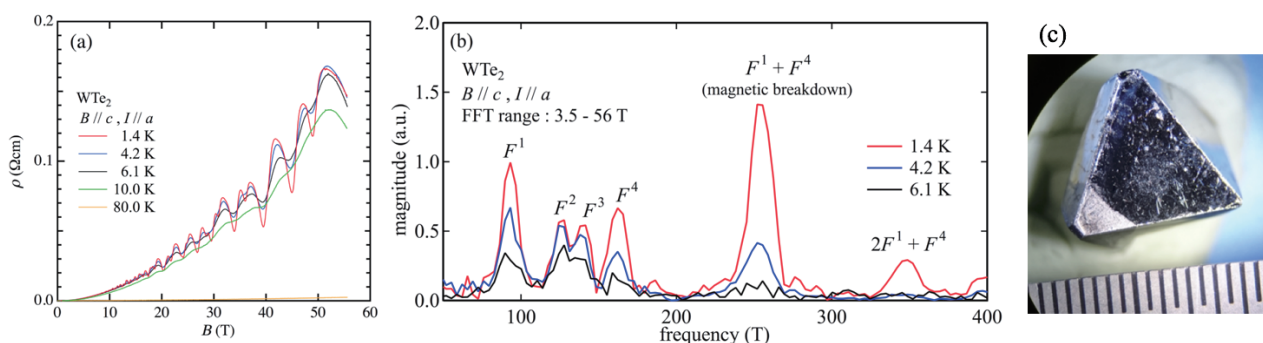


図 2: (a) ワイル半金属 WTe₂ の 56 T パルス強磁場中の磁気抵抗と (b) SdH 振動のフーリエスペクトル. (c) 育成された Yb₅Ir₆Sn₁₈ の単結晶の写真.

3) 強相関電子系 Yb 化合物の探索

Sm 化合物の強相関電子物性研究と共通し、希土類元素イオンの価数自由度が極低温で引き起こす量子物性異常が期待される物質に、Yb 化合物がある。化合物中において、Yb イオンの価数は 2 価と 3 価をとる。上記の Sm の場合と価数の点で類似性はあるが、一方でそれぞれの価数状態における f 電子の持つ磁気的な自由度や軌道自由度の違いから、低温で示す物性異常とは異なる特性を示すことがわかってきている。しかしながら、Yb 元素は他の軽希土類元素と比較して、融解時における蒸気圧が非常に高く、極低温で発現する低エネルギー励起の関わる現象を詳しく観測するために必要不可欠な、単結晶育成が難しく、研究対象となる物質探索が遅れているのが現状である。我々の研究グループでは、高压合成結晶育成技術等、この高い蒸気圧の問題を克服できる結晶育成方法を用いて、複数の化合物合成と物性測定を行った。その結果、それらの化合物の中の一つ、Yb₅Ir₆Sn₁₈ において、図 2 (c) に示すような大きな単結晶育成に成功し、さらに強相関電子物性を示すことを明らかにした。まず、得られた単結晶をもとに、詳細な構造解析を行った結果、過去に報告されきた構造とは異なる結晶構造をとり、強相関電子系として知られている別の物質系 $R_3Tr_4Sn_{13}$ (R : 希土類元素, Tr : 遷移金属元素) の構造と局所構造の共通性を見出すことに成功した。極低温で発現する物性として、降温とともに帯磁率や比熱の発散的

振る舞いや、電気抵抗の温度依存性が T^2 とは異なる物性異常が観測されることがわかった。これらは、フェルミ液体論から期待される振る舞いとは異なる、非フェルミ液体的異常とよばれている。この物質における振る舞いは、従来 Ce 化合物などで議論されてきた磁氣的揺らぎをもとにした理論モデルでは説明できない。また、現状で価数自由度を考慮した理論モデルとも整合性は良くなく、一つの可能性として、結晶構造に由来する幾何学的なフラストレーションの効果を考慮する必要があるのではないかと考えている。このような物性異常は、これまで他に例がなく、新しい強相関物性異常の発見である可能性が高い。

4) カイラル構造を持つ IrSn_4 および IrGe_4 の単結晶育成に成功

結晶中で原子がらせん状に配列しているため、互いに鏡像の関係にある2種類の結晶（それぞれが、右回りらせんと左回りらせんに対応）が存在する物質群がある。このような「カイラルな結晶構造」を持つ物質には、特異なトポロジカル電子状態が発現するものと考えられている。直流電流を流すと特定の方向を向いた磁化が発生したり、波数空間に Kramers-Weyl fermion と呼ばれるモノポールの性質を持つ電子状態が発現することが期待されている。我々は、カイラル構造を持ち、物性がまだ詳しく調べられていない IrSn_4 と IrGe_4 の単結晶育成を進めた。Sn フラックス法により、 IrSn_4 単結晶の育成に成功した。育成された個々の単結晶粒は、単結晶 X 線構造解析により、互いに鏡像の関係にある空間群 #152($P3_121$) と #154($P3_221$) のどちらかに属することを確認した。残留抵抗比 $\rho(300 \text{ K})/\rho(0.1 \text{ K})$ は 600 程度、極低温での磁気抵抗は 9T で約 100 に達しており、純良な単結晶であることがわかった。 IrGe_4 では、テトラーク炉を用いた引上げ法により単結晶の育成に成功した。今後、国内外の研究機関と協力しながら、両物質の物性を様々な角度から究明して行く予定である。

2. 研究業績

1) 論文

Akira Miura, Masanori Nagao, Yosuke Goto, Yoshikazu Mizuguchi, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki, Chikako Moriyoshi, Yoshihiro Kuroiwa, Yoshihiko Takano, Satoshi Watauchi, Isao Tanaka, Nataly Carolina Rosero-Navarro, and Kiyoharu Tadanaga : "Crystal Structure and Superconductivity of Tetragonal and Monoclinic $\text{Ce}_{1-x}\text{Pr}_x\text{OBiS}_2$ ", *Inorg. Chem.*, **57** (9), 5364-5370 (2018) [7 pages]. DOI: 10.1021/acs.inorgchem.8b00349

E. M. Levenson-Falk, E. R. Schemm, Y. Aoki, M. B. Maple, and A. Kapitulnik : "Polar Kerr effect from time-reversal symmetry breaking in the heavy-fermion superconductor $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ ", *Phys. Rev. Lett.*, **120**, 187004 (2018) [6 pages]. DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.187004

Kazuya Suyama, Kazuaki Iwasa, Yuka Otomo, Keisuke Tomiyasu, Hajime Sagayama, Ryoko Sagayama, Hironori Nakao, Reiji Kumai, Yoshinori Kitajima, Françoise Damay, Jean-Michel Mignot, Akira Yamada, Tatsuma D. Matsuda, and Yuji Aoki: "Chiral-crystal-structure transformations and magnetic states of $R_3\text{Rh}_4\text{Sn}_{13}$ ($R=\text{La}$ and Ce)", *Phys. Rev. B*, **97**, 235138 (2018) [9 pages]. DOI: 10.1103/PhysRevB.97.235138

Rajveer Jha, Yosuke Goto, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki, Yoshikazu Mizuguchi: "Superconductivity in layered Oxychalcogenide $\text{La}_2\text{O}_2\text{Bi}_3\text{AgS}_6$ ", *J. Phys. Soc. Jpn.*, **87**, 083704 (2018) [3 Pages]. DOI: 10.7566/JPSJ.87.083704

Kazuhei Wakiya, Yuki Sugiyama, Miharuru Kishimoto, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki, Masatomo Uehara, Jun Gouchi, Yoshiya Uwatoko, and Izuru Umehara : "Structural, magnetic, and transport properties of novel quaternary compounds $RRu_2Sn_2Zn_{18}$ ($R = La, Pr, \text{ and } Nd$)", *J. Phys. Soc. Jpn.*, **87**, 094706 (2018) [6 Pages]. DOI: 10.7566/JPSJ.87.094706

Yosuke Goto, Akira Miura, Chikako Moriyoshi, Yoshihiro Kuroiwa, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki and Yoshikazu Mizuguchi: " $Na_{1-x}Sn_2P_2$ as a new member of van der Waals-type layered tin pnictide superconductors", *Sci. Rep.*, **8**, 12852 (2018). [8 pages]. DOI: 10.1038/s41598-018-31295-8

Shota Onishi, Rajveer Jha, Atsushi Miyake, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, Masashi Tokunaga, and Yuji Aoki: "Deviation from the Kohler's rule and Shubnikov-de Haas oscillations in type-II Weyl semimetal WTe_2 : high magnetic field study up to 56 T", *AIP Advances*, **8**, 101330 (2018) [5 pages]. DOI: 10.1063/1.5043036

Rajveer Jha, Shota Onishi, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, Raquel A. Ribeiro, and Yuji Aoki: "Anisotropy in the electronic transport properties of Weyl semimetal WTe_2 single crystals", *AIP Advances*, **8**, 101332 (2018) [6 pages]. DOI: 10.1063/1.5043063

S. Dash, T. Morita, K. Kurokawa, Y. Matsuzawa, N. L. Saini, N. Yamamoto, Joe Kajitani, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, Y. Aoki, and T. Mizokawa: "Impact of valence fluctuations on the electronic properties of $RO_{1-x}F_xBiS_2$ ($R = Ce \text{ and } Pr$)", *Phys. Rev. B*, **98**, 144501 (2018) [6 pages]. DOI: 10.1103/PhysRevB.98.144501

R. Matsumoto, T. Sugimoto, T. Mizokawa, N. L. Saini, M. Arita, R. Jha, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, and Y. Aoki: "Orbital-dependent band renormalization in WTe_2 revealed by angle-resolved photoemission spectroscopy", *Phys. Rev. B*, **98**, 205138 (2018) [6 pages]. DOI: 10.1103/PhysRevB.98.205138

Kazuaki Iwasa, Takahiro Onimaru, Toshiro Takabatake, Ryuji Higashinaka, Yuji Aoki, Seiko Ohira-Kawamura, Kenji Nakajima: "Inelastic neutron scattering study on 4f-electron multipole system $PrTr_2X_{20}$ (Tr : transition metal, X : Al and Zn)", *Physica B: Condensed Matter*, **551**, 37 (2018) [4 pages]. DOI: 10.1016/j.physb.2017.11.002

Yoshiki Nakanishi, Kazuto Nakamura, Masahiro Nakamura, Masaya Taniguchi, Mitsuteru Nakamura, Masahito Yoshizawa, Akira Yamada, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, and Yuji Aoki : "Elastic properties of $SmPt_2Cd_{20}$ probed by ultrasound measurements", *AIP Advances*, **8**, 101337 (2018) [3 pages]. DOI: 10.1063/1.5042811

Tomohiro Nakane, Shota Yoneyama, Takeshi Kodama, Koichi Kikuchi, Akiko Nakao, Takashi Ohhara, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki and Wataru Fujita: "Magnetic, thermal, and neutron diffraction studies of a coordination polymer: bis(glycolato)cobalt(II)", *Dalton Trans.*, **48**, 333 (2019) [6 pages]. DOI: 10.1039/C8DT04358B

Ryuji Higashinaka, Akira Yamada, Tatsuma D. Matsuda, and Yuji Aoki: "Relationship between specific heat, valence and effective magnetic moment of Sm ions in strongly correlated Sm compounds", *AIP Advances*, **8**, 125017 (2018) [6 pages]. DOI: 10.1063/1.5043120

Satoshi Tsutsui, Jin Nakamura, Yoshio Kobayashi, Yoshitaka Yoda, Masaichiro Mizumaki, Akira Yamada, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, and Yuji Aoki: "Direct Observation of Sm Valence Fluctuation in a Heavy Fermion Compound $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ via ^{149}Sm Synchrotron-Radiation-Based Mössbauer Spectroscopy", *J. Phys. Soc. Jpn.*, **88**, 023701 (2019) [5 Pages]. DOI: 10.7566/JPSJ.88.023701

M. Kakihana, T. D. Matsuda, R. Higashinaka, Y. Aoki, A. Nakamura, D. Aoki, H. Harima, M. Hedo, T. Nakama, and Y. Ōnuki: "Superconducting and Fermi Surface Properties of Pyrite-type Compounds CuS_2 and CuSeS_2 ", *J. Phys. Soc. Jpn.*, **88**, 014702 (2019) [8 Pages] DOI: 10.7566/JPSJ.88.014702

2) 学会講演

● 日本物理学会 2018 年秋季大会 2018 年 9 月 9 日 (日)~12 日 (水) (同志社大学)

大西翔太, Jha Rajveer, 三宅厚志, 東中隆二, 松田達磨, 徳永将史, 青木勇二: 強磁場中におけるワイル半金属 WTe_2 の特異な輸送特性

松本凌弥, 杉本拓也, 溝川貴司, Naurang Saini, 有田将司, 生天目博文, 谷口雅樹, 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 の軌道に依存したバンドの繰り込み

木村真一, 中島裕喜, 三田善志郎, Jha Rajveer, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: ワイル半金属 MoTe_2 , WTe_2 の光学スペクトルと電子構造

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

松田達磨, 梶谷丈, 遠藤秀晃, 東中隆二, 青木勇二: Eu 系 BiS_2 化合物における Eu 価数状態と物性異常

中村一翔, 高橋祥平, 長谷川潤弥, 大山雄輔, 中西良樹, 中村光輝, 吉澤正人, 山田瑛^A, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: 超音波計測による籠状物質 $\text{SmPt}_2\text{Cd}_{20}$ の低温秩序相と弾性特性

大村瑠美, 岸本美晴, 山田瑛, 後藤陽介, 水口佳一, 松田達磨, 東中隆二, 青木勇二: カイラル構造をもつ三元化合物 $R\text{-Ir-Sn}$ (R : 希土類) の単結晶育成と超伝導特性

宮脇瑠美佳, 東中隆二, 山田瑛, 後藤陽介, 水口佳一, 松田達磨, 青木勇二: 高い特性温度 T_{QKL} を持つ四極子近藤格子系 $\text{PrTr}_2\text{Al}_{20}$ ($Tr = \text{Mo}, \text{W}$) の低温物性測定

岸本美晴, 大村瑠美, 後藤陽介, 水口佳一, 山田瑛, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨: $\text{Yb}_5\text{Ir}_6\text{Sn}_{18}$ の単結晶育成と構造解析及び低温物性測定

藤秀樹, 中瀬迅, 小手川恒, 久保徹郎, 東中隆二, 山田瑛, 松田達磨, 青木勇二: 磁場に鈍感な重い電子化合物 $\text{SmTa}_2\text{Al}_{20}$ の単結晶 NQR/NMR による基底状態の研究

玉造博夢, 筒井智嗣, 佐賀山基, 水牧仁一郎, 梶谷丈, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, 長谷川巧, 村上洋一: X 線非弾性散乱による BiS_2 系超伝導体における超格子反射の起源探査

東中隆二, 遠藤秀晃, 梶谷丈, 松田達磨, 青木勇二: BiS_2 系層状化合物 $\text{Eu}_3\text{Bi}_2\text{S}_4\text{F}_4$ における電荷秩序状態

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: X 線光電子分光による $\text{R}(\text{O},\text{F})\text{BiS}_2$ の解析

服部泰佑, 酒井宏典, 徳永陽, 神戸振作, 松田達磨, 芳賀芳範: 希釈冷凍機を用いた単結晶 URu_2Si_2 の ^{29}Si NMR 測定

竹田幸治, 斎藤祐児, 岡根哲夫, 山上浩志, 松田達磨, 山本悦嗣, 芳賀芳範, 大貫惇睦: 軟 X 線磁気円二色性による UCoAl における各元素サイトでの磁氣的性質の研究

前田瑞穂, 木村憲彰, 芳賀芳範, 松田達磨: 遍歴電子系メタ磁性体 UCoAl における圧力下磁気抵抗と強磁性量子臨界

村山陽奈子, 佐藤雄貴, 栗原遼, 笠原成, 笠原裕一, 芳賀芳範, 松田達磨, 山本悦嗣, 大貫惇睦, 松田祐司: カイラル超伝導体 URu_2Si_2 の超伝導状態における熱ホール効果

● 日本物理学会 第 74 回年次大会 2019 年 3 月 14 日 (木)~17 日 (日) 九州大学 (伊都キャンパス)

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: $\text{PrT}_2\text{Al}_{20}$ ($T = \text{Nb, Ta}$) の NMR 緩和率の磁場依存性の結晶場モデルに基づく解析

佐賀山基, 佐賀山遼子, 梶谷丈, 長谷川巧, 熊井玲児, 村上洋一, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ における格子変調パターンの決定

青木勇二, 酒谷瞭太郎, 東中隆二, 松田達磨: BiS_2 系層状化合物 $\text{Eu}_3\text{Bi}_2\text{S}_4\text{F}_4$ におけるキャリアの局在化と巨大磁気抵抗

中村直貴, 岸本美晴, 東中隆二, 仲村愛, 本多史憲, 青木大, 青木勇二, 松田達磨, 佐藤英行, 播磨尚朝: 充填スクッテルダイト化合物 $\text{YbOs}_4\text{Sb}_{12}$ の dHvA 効果の測定

道村真司, 松村武, 中尾裕則, 田端千紘, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$ の磁場誘起秩序相における軟 X 線共鳴 X 線回折

酒谷瞭太郎, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: BiS_2 系層状化合物 $\text{Eu}_3\text{Bi}_2\text{S}_4\text{F}_4$ の単結晶物性

三村功次郎, 河端拓, 明渡悠, 阿部晃大, 松本孝之, 下笠諒平, 保井晃, 水牧仁一朗, 河村直己, 池永英司, 筒井智嗣, 佐藤仁, 魚住孝幸, 松田達磨, 大貫惇睦: 共鳴硬 X 線光電子分光による YbCu_2Si_2 の電子状態の研究

東中隆二: 立方晶 Sm 化合物における複合自由度に起因した特異な強相関電子状態

岡部碧, 中井祐介, 東中隆二, 真庭豊: XSn_4 ($X = \text{Pd, Pt}$) の NMR 測定

国内研究会

● J-Physics B01 D01 トピカルミーティング ものづくりシリーズ第 3 回「物質探索最前線」2018 年 8 月 6~7 日 (首都大学東京 南大沢キャンパス)

R. Omura, M. Kishimoto, A. Yamada, Y. Mizuguchi, Y. Goto, T. D. Matsuda, R. Higashinaka, and Y. Aoki: Single crystal growth and superconducting properties of ternary compound $R - \text{Ir} - \text{Sn}$ (R : rare earth) with chiral structure

M. Kishimoto, R. Omura, Y. Goto, Y. Mizuguchi, R. Higashinaka, Y. Aoki, T. D. Matsuda: Single crystal growth and physical properties of $\text{Yb}_5\text{Ir}_6\text{Sn}_{18}$

Rajveer Jha, Yosuke Goto, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki, and Yoshikazu Mizuguchi: Superconductivity in layered oxysulfide $\text{La}_2\text{O}_2\text{Bi}_3\text{AgS}_6$

R. Miyawaki, R. Higashinaka, A. Yamada, Y. Goto, Y. Mizuguchi, T.D. Matsuda, and Y. Aoki: Low-temperature physical property of quadrupolar Kondo lattice $\text{Pr } Tr_2\text{Al}_{20}$ ($Tr = \text{Mo}, \text{W}$) with high characteristic temperature T_{QKL}

R. Higashinaka, A. Yamada, T. D. Matsuda, and Y. Aoki: Unusual Magnetic-Field-Insensitive Heavy Electron State in $\text{Sm } Tr_2\text{Al}_{20}$ ($Tr = \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}, \text{and Ta}$)

Shota Onishi, Rajveer Jha, Atsushi Miyake, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, Masashi Tokunaga, and Yuji Aoki: Transport properties of Weyl semimetal WTe_2 in high magnetic fields

Kazuhei Wakiya, Yuki Sugiyama, Miharuru Kishimoto, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki, Masatomo Uehara, Jun Gouchi, Yoshiya Uwatoko, and Izuru Umehara: Development of novel multipole materials by controlling structural instability

Kazuyuki Matsubayashi, Hiroto Arima, Fumito Motoyama, Yahua Yuan, Kentaro Kitagawa, Akito Sakai, Satoru Nakatsuji, Yoshiya Uwatoko, Yosuke Goto, Yoshikazu Mizuguchi, Joe Kajitani, Ryuji Higashinaka, Tatsuma Matsuda, Yuji Aoki: Exploration of new superconductors and tuning the electronic states by hydrostatic pressure

Tetsuya Takeuchi, Yusuke Hirose, Fuminori Honda, Satoshi Tsutsui, Yuji Aoki, Masato Hedo, Takao Nakama, and Yoshichika Ōnuki: Characteristic Thermal Expansion in Heavy-Fermion Compounds – Kondo Effect and Valence Fluctuation

● J-Physics トピカルミーティング「拡張多極子研究の進展と展望」 2019 年 1 月 21～22 日 (明治大学駿河台キャンパス)

東中 隆二他: $\text{Sm } Tr_2\text{Al}_{20}$ における特異な強相関電子状態

国際会議

● J-Physics 2018: サマースクール&新物質と結晶育成に関する国際ワークショップ, 淡路夢舞台国際会議場, Japan, June 24 – 27, 2018

Tatsuma D. Matsuda, Akira Yamada, Ryuji Higashinaka, Atsushi Miyake, Masashi Tokunaga, Masachiro Mizumaki, Satoshi Tsutsui, Toshiaki Ina, Kiyofumi Nitta, Tomoya Uruga, Hideyuki Sato, and Yuji Aoki: Unusual Heavy Electron State in Sm- and Yb-based compounds

Hideki Tou, Jin Nakase, Hisashi Kotegawa, Tetsuro Kubo, Ryuji Higashinaka, Akira Yamada, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki: NMR evidence for anomalous magnetic ground state in field-insensitive Heavy Fermion System $\text{SmTa}_2\text{Al}_{20}$

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 studies on magnetic fluctuations at low temperatures in $\text{Pr } T_2\text{Al}_{20}$ ($T = \text{Nb, Ta}$)

Taisuke Hattori, Hironori Sakai, Yo Tokunaga, Shinsaku Kambe, Tatsuma D. Matsuda, Yoshinori Haga: Strong Ising anisotropy of URu_2Si_2 probed by ^{29}Si NMR on the Superconducting state

● International Conference on Magnetism (ICM2018), San Francisco, USA, July 15 – 20, 2018

Y. Nakanishi, M. Nakamura, M. Taniguchi, M. Nakamura, M. Yoshizawa, A. Yamada, R. Higashinaka and Y. Aoki: Elastic properties of $\text{SmPt}_2\text{Cd}_{20}$ probed by ultrasound measurements

S. Onishi, R. Jha, A. Miyake, R. Higashinaka, T. Matsuda, M. Tokunaga and Y. Aoki: Shubnikov-de Haas oscillations in Weyl semimetal WTe_2 measured up to 56 T

R. Jha, S. Onishi, R. Higashinaka, T. Matsuda, R.A. Ribeiro and Y. Aoki: Anisotropic electrical resistivity of Weyl semimetal WTe_2

R. Higashinaka, A. Yamada, T. Matsuda, Y. Aoki, M. Mizumaki, S. Tsutsui, T. Uruga, K. Nitta and T. Ina: Unusual Magnetic-Field-Insensitive Heavy Electron State in $\text{Sm } Tr_2\text{Al}_{20}$ ($Tr = \text{Ti, V, Cr, and Ta}$)

K. Wakiya, Y. Sugiyama, J. Gouchi, Y. Uwatoko, M. Kishimoto, T. Matsuda, Y. Aoki, M. Uehara and I. Umehara: Effect of Sn- and In-substitution on the structural and magnetic properties of $\text{PrRu}_2\text{Zn}_{20}$

● European Materials Research Society (E-MRS) 2018 Fall Meeting, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland, September 17 – 20, 2018

Yuji Aoki, Rajveer Jha, Shota Onishi, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda: Electronic transport properties of high-quality single crystals of Weyl semimetals and BiS_2 -based materials (invited)

粒子ビーム物性サブグループ

1. 研究活動の概要

Geometrically frustrated magnets archetypally on the two-dimensional (2D) triangle [2] and kagomé [3] lattices, and on the three-dimensional (3D) pyrochlore lattice [4] have been actively studied for decades [1]. Among classical frustrated magnets, spin ice [5] has been extensively studied from many viewpoints, e.g., macroscopically degenerate ground states, partial lifting of the degeneracy under magnetic field, and fractionalized excitations [6]. Quantum effects in frustrated magnetic systems ranging from quantum annealing to quantum spin liquid (QSL) states [8], the origin of which dates back to the proposal of the RVB state [7], have attracted much attention. Experimental challenges of finding real QSL substances and of investigating QSL states using available techniques have been addressed in recent years, e.g. [9].

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 [10], 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 ($x > x_c \sim -0.0025$) [11]. 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 ($x > x_c$) ranges [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 ([13] PRB2019) shows typical neutron scattering data and its semi-classical analysis.

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] H. Kadowaki et al. J. Phys. Soc. Jpn. 78, 103706 (2009).
- [7] P. W. Anderson, Mater. Res. Bull. 8, 153 (1973).
- [8] L. Savary and L. Balents, Rep. Prog. Phys. 80, 016502 (2017).
- [9] 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).
- [10] J. S. Gardner et al. Phys. Rev. Lett. 82, 1012 (1999).
- [11] T. Taniguchi et al. Phys. Rev. B 87, 060408 (2013); H. Takatsu et al. Phys. Rev. Lett. 116, 217201 (2016).
- [12] M. Wakita et al. J. Phys.: Conf. Series 683, 012023 (2016).
- [13] H. Kadowaki et al. J. Phys. Soc. Jpn. 87, 064704 (2018); Phys. Rev. B 98, 144410 (2018); Phys. Rev. B 99, 014406 (2019).

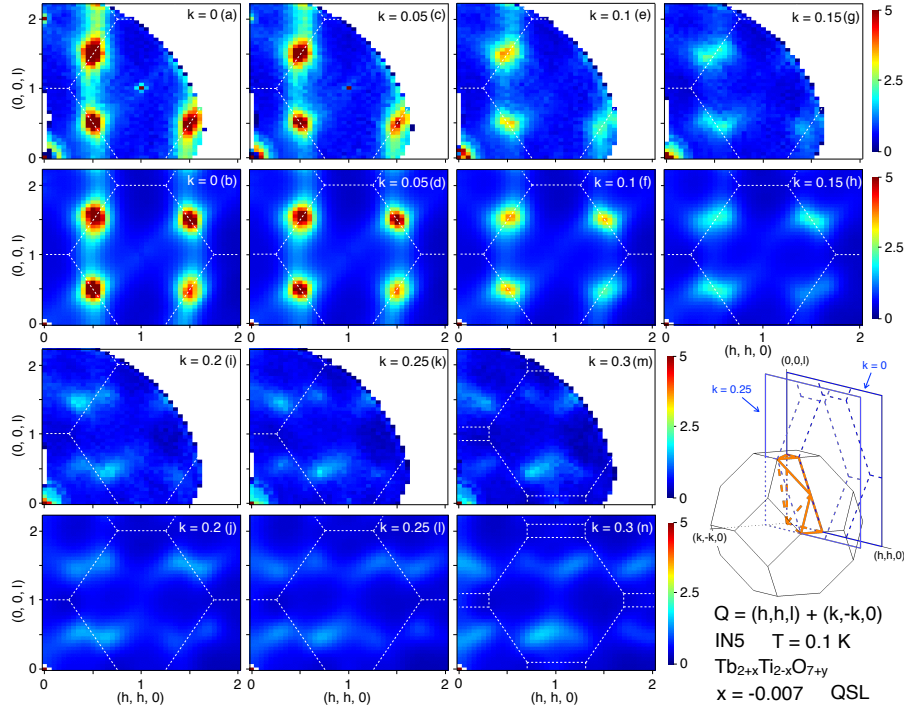


図 1: Intensity maps of 3D data $[S(\mathbf{Q})]_{\text{el}}$ taken at 0.1 K for the QSL sample with $x = -0.007$ (Fig. 1 of Ref. [13] PRB2019). The 3D data are viewed by 2D slices (a,c,e,g,i,k,m), which are parallel cross-sections of $\mathbf{Q} = (h, h, l) + (k, -k, 0)$ with fixed k . These can be compared to the typical RPA $[S(\mathbf{Q})]_{\text{el}}$ (b,d,f,h,j,l,n) obtained by least squares fit using the 13 coupling constants, $J_1, \dots, J_{13}$. Dashed lines in these 2D slices (a-n) are boundaries of Brillouin zones. The bottom right corner shows the first Brillouin zone of the FCC lattice (thin black lines), irreducible zone (thick orange lines), and two 2D slice planes labeled $k = 0$ and 0.25 (blue lines).

2. 研究業績

1) 論文

H. Kadowaki, M. Wakita, B. Fåk, J. Ollivier, S. O. Kawamura, K. Nakajima, H. Takatsu, M. Tamai: Continuum Excitation and Pseudospin Wave in Quantum Spin-Liquid and Quadrupole Ordered States of $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 064704 (2018).

S. Kittaka, S. Nakamura, H. Kadowaki, H. Takatsu, T. Sakakibara: Field-rotational Magnetocaloric Effect: A New Experimental Technique for Accurate Measurement of the Anisotropic Magnetic Entropy, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 073601 (2018).

H. Kadowaki, H. Takatsu, M. Wakita: Dimensional change of the quadrupole order in pseudospin-1/2 pyrochlore magnets under magnetic field in the [111] direction, Phys. Rev. B **98**, 144410 (2018).

H. Kadowaki, M. Wakita, B. Fåk, J. Ollivier, S. Ohira-Kawamura, K. Nakajima, J. W. Lynn: Spin correlations of quantum spin liquid and quadrupole-ordered states of $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$, Phys. Rev. B **99**, 014406 (2019).

2) 学会講演

● 日本物理学会 2018 年秋季大会 (同志社大学 京田辺キャンパス 2018/9/9-12)

元木大介, 河野洋平, 橘高俊一郎, 榊原俊郎, 高津浩, 門脇広明: スピンアイス $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ の気相液相転移再考

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。2018 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、バルクの SWCNT フィルムの階層構造に由来した熱電物性制御の可能性について研究した。直径の異なる SWCNT を混合したフィルムのゼーベック係数と抵抗率の関係が並列モデルによる理論計算の結果と定性的に一致することがわかった。（本郷修士論文）また、SWCNT バンドル、および SWCNT の軸に垂直方向から圧力をかけたときの構造変化を分子動力学計算により研究した。カイラル型の (6, 5)SWCNT においては、3 本からなるバンドルが捩れた構造をとることが示唆される。（嶋崎修士論文）

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、SWCNT の軸に垂直方向から一軸圧を印加して扁平化した SWCNT 内部の水の相転移挙動について、分子動力学計算による研究を行った。扁平化 SWCNT 内部ではアイスナノリボンが形成されることがわかった。（小倉・客野）。

3) ディラック候補物質の NMR

ディラック候補物質 PtSn_4 の磁化率および NMR の測定を行い、 PtSn_4 の大きな反磁性は、ディラック電子由来による軌道反磁性であることが強く示唆された。本研究は電子物性研究室との共同研究である。（岡部修士論文）

4) 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。2018 年度は、面内原子層ヘテロ構造における電界発光に関する研究（高口修士論文）、積層型半導体原子層ヘテロ構造における電気伝導特性の研究（吉村修士論文）、超伝導原子層の作製と電気伝導特性の評価（安藤卒業研究）、半導体原子層を用いた面内ヘテロ構造の作製と光学特性の研究（和田卒業研究）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、その一次元界面のの特徴を利用した量子効果や励起子光物性、および半導体光・電子デバイス応用への研究を進めていく。

5) 圧力下 ESR 装置開発と β' -(BEDT-TTF) $_2$ ICl $_2$ の電子状態

有機電荷移動錯体は、圧力によって電子間の相互作用の強さを変調することにより様々な物性を示す。本研究では、電子状態の圧力依存性を圧力下 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 装置開発を進めてきた。加圧時、冷却時の ESR シグナルのベースラインの歪みをなくするためには、高周波コイル、加圧部、圧力伝達部等、装置全体を導線で接続しグラウンド側を同電位にすることが重要である。この点に注意をし、常圧 780 ton (約 8 GPa)、常温? 液体窒素温度の範囲で、ベースラインの歪みのない信号が得られていたが、特に高周波コイルのグラウンド側の接続が最も重要と特定された。この接続を確実にすることにより、常圧で、液体ヘリウム温度の低温まで解析可能な信号を初めて得ることができた。試料として取り上げている β' -(BEDT-TTF) $_2$ ICl $_2$ は、常圧での絶縁体状態から加圧により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。この試料について得られた信号の線幅や面積の解析から、常圧及び 1 GPa での反強磁性転移温度 (ネール温度) を求めたところ、得られていた値と矛盾しないものであった。さらに高圧での測定を行い、超伝導へ変化していく電子状態を調べる予定である。(埼玉大、産総研、千葉大との共同研究)

6) 学外共同利用施設による研究, その他

京都大学エネルギー理工研究所において顕微分光実験を行った。

課題名 (課題番号): 光機能性原子層ヘテロ構造の開発 (ZE30B-10)

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)

2. 研究業績

1) 論文

K. Miyaara, Y. Miyata, B. Thendie, K. Yanagi, R. Kitaara, Y. Yamamoto, S. Arai, H. Kataara, H. Shinohara: "Extended-conjugation π -electron systems in carbon nanotubes", *Sci. Rep.*, **8** (2018) 8098-1-6

A. Nakamura, K. Yamanaka, K. Miyaara, H. E. Lim, K. Matsuda, B. Thendie, Y. Miyata, T. Kochi, S. Okada, H. Shinohara: "Ultrafast Charge Transfer and Relaxation Dynamics in Polymer-Encapsulating Single-Walled Carbon Nanotubes: Polythiophene and Coronene Polymer", *J. Phys. Chem. C*, **122** (2018) 16940-16949

T. Irisawa, N. Okada, W. Mizubayashi, T. Mori, W.-H. Chang, K. Koga, A. Ando, K. Endo, S. Sasaki, T. Endo, Y. Miyata: "CVD Growth Technologies of Layered MX $_2$ Materials for Real LSI Applications -Position and Growth Direction Control and Gas Source Synthesis -" *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, **6** (2018) 1159-1163

Hiroyuki Mogi, Zi-Han Wang, Takafumi Bamba, Yuhei Takaguchi, Takahiko Endo, Shoji Yoshida, Atsushi Taninaka, Haruhiro Oigawa, Yasumitsu Miyata, Osamu Takeuchi, and Hidemi Shigekawa: "Development of laser-combined scanning multiprobe spectroscopy and application to analysis of WSe $_2$ /MoSe $_2$ in-plane heterostructure" *Applied Physics Express*, **12** (2018) 045002-1-7

Haruka Kyakuno, Hiroto Ogura, Kazuyuki Matsuda, and Yutaka Maniwa: "Ice Nanoribbons Confined in Uniaxially Distorted Carbon Nanotubes" *J. Phys. Chem. C*, **122** (2018) 18493-18500

M. Nagata, S. Shukla, Y. Nakanishi, Z. Liu, Y.-C. Lin, T. Shiga, Y. Nakamura, T. Koyama, H. Kishida, T. Inoue, N. Kanda, S. Ohno, Y. Sakagawa, K. Suenaga, H. Shinohara: "Isolation of Single-Wired Transition-Metal Monochalcogenides by Carbon Nanotubes", *Nano Lett.*, **in press** (2019)

R. Canton - Vitoria, H. B. Gobeze, V. M. Blas - Ferrando, J. Ortiz, Y. Jang, F. Fernandez - Lazaro, A. Sastre - Santos, Y. Nakanishi, H. Shinohara, F. D'Souza, N. Tagmatarchis: "Excited - State Charge Transfer in Covalently Functionalized MoS₂ with a Zinc Phthalocyanine Donor/Acceptor Hybrid", *Angew. Chem. Int. Ed.*, **58** (2019) 5712-5717

A. Kagkoura, T. Sentoukas, Y. Nakanishi, H. Shinohara, S. Pispas, N. Tagmatarchis. "Bottom-up microwave-assisted preparation of poly(methacrylic acid)-MoS₂ hybrid material" *Chem. Phys. Lett.*, **716** (2019) 1-5

2) 学会講演

● 蔵王18研究会 2018年8月1-2日 (ルーセントタカミヤ)

宮田耕充: CVD growth of in-plane heterostructures based on two-dimensional semiconductors

Kana Kojima, Hong En Lim, Takahiko Endo, Yu Kobayashi, Yutaka Maniwa, Yasumitsu Miyata: Improved interlayer coupling in suspended van der Waals heterostructures

Hong En Lim, Takahiko Endo, Yutaka Maniwa, Yasumitsu Miyata: In-plane heterostructures based on twisted WSe₂ bilayers

Yuhei Takaguchi, Jiang Pu, Yu Kobayashi, Taishi Takenobu, Yutaka Maniwa, Yasumitsu Miyata: Electric double layer light emitting diode of WSe₂/MoSe₂ in-plane heterostructures

● 第267回 GMSI 公開セミナー／第90回 CIAiS セミナー／第12回 iFS セミナー 2018年8月3日 (東京大学)

宮田耕充: CVD growth of in-plane heterostructures based on two-dimensional materials

● ナノカーボンワークショップ2018 2018年8月31日 (東京理科大学)

宮田耕充: 原子層ヘテロ構造の化学気相成長

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

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

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

小島佳奈, Wenjin Zhang, 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

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

● 日本物理学会 2018 年秋季大会, 2019/9/9-12(同志社大学)

客野遥, 小倉宏斗, 松田和之, 真庭豊: つぶれたカーボンナノチューブに内包された水の構造とダイナミクス II

● 第 12 回分子科学討論会 2018 2018 年 9 月 10-13 日 (福岡国際会議場)

Y. Nakanishi, M. Aizaki, M. Nagata, S. Shukla, Z. Liu, K. Suenaga, H. Shinohara: Template synthesis of one-dimensional transition-metal chalcogenides inside carbon nanotubes

● 第 55 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 9 月 11-13 日 (東北大学)

小島佳奈, 林宏恩, 遠藤尚彦, 小林佑, 真庭豊, 宮田耕充: 架橋 MoS₂/WS₂ 積層型ヘテロ構造における層間結合の改善

清水宏, 林宏恩, 遠藤尚彦, 小林佑, 真庭豊, 宮田耕充: 単層遷移金属ダイカルコゲナイドにおけるカルコゲン置換

吉村真太郎, 小林佑, 遠藤尚彦, 林宏恩, 真庭豊, 宮田耕充: 単層 MoS₂ /WSe₂ 積層型ヘテロ構造を用いた PN ダイオードの作製と輸送特性

高口裕平, 蒲江, 松岡拓史, 小林佑, 竹延大志, 真庭豊, 宮田耕充: WS₂/MoS₂ 面内ヘテロ接合を用いた電気二重層発光ダイオード

小林佑, 吉田昭二, 入沢寿史, 岡田直也, Lim Hong En, 渡邊賢司, 谷口尚, 真庭豊, 武内修, 重川秀実, 宮田耕充: 層状カルコゲナイドの有機金属 CVD 成長におけるアルカリ金属の効果

Masafumi Shimasaki, Tetsuki Saito, Yasumitsu Miyata, Yuhei Miyauchi, Kazunari Matsuda: Optical properties of two-dimensional lateral hetero structure WS₂/MoS₂

● 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会 2018 年 9 月 18-21 日 (名古屋国際会議場)

村瀬康太, 小林佑, 吉田昭二, 武内修, 宮田耕充, 重川秀実: TMDC の面内ヘテロ接合における電子状態の STM 観察

内山揚介, 小島佳奈, 渡邊賢司, 谷口尚, 宮田耕充, 篠原久典, 北浦良: 二硫化モリブデン (MoS₂) 原子層における基板効果と光学応答

小林佑, 吉田昭二, 入沢寿史, 岡田直也, 渡邊賢司, 谷口尚, 真庭豊, 武内修, 重川秀実, 宮田耕充: 層状カルコゲナイドの有機金属 CVD 成長におけるアルカリ金属の効果

上田哲大, 堀田貴都, 内山揚介, 宮田耕充, 渡邊賢司, 谷口尚, 篠原久典, 北浦良: CVD 成長した WS₂ 原子層を用いた高移動度デバイス作製法の開発

茂木裕幸, 黒田生喜, 高口裕平, 吉田昭二, 宮田耕充, 武内修, 重川秀実: 多探針 STM 装置を用いた単層/2 層 WSe₂ の 1 探針伝導計測

● ニューダイヤモンドフォーラム平成 30 年度第 2 回研究会 2018 年 10 月 1 日 (東京大学)

宮田耕充: 原子層ヘテロ構造の成長と機能開拓

● 2018 年日本表面真空学会学術講演会 2018 年 11 月 19-21 日 (神戸国際会議場)

宮田耕充: 熱 CVD 法による 2 次元物質および面内ヘテロ構造の成長

● 第 56 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 2019 年 3 月 2-4 日 (東京大学)

Chisato Anndo, Yusuke Nakanishi, Hong En Lim, Yutaka Maniwa, Yasumitsu Miyata: Preparation of Atomically Thin NbSe₂ Layers by Selenizing Nb Films

Hong En Lim, Zheng Liu, Takahiko Endo, Kana Kojima, Yusuke Nakanishi, Yutaka Maniwa, Yasumitsu Miyata: In-Plane Heterostructures of Twisted Bilayer Transition Metal Dichalcogenides

Hong En Lim, Toshifumi Irisawa, Naoya Okada, Takahiko Endo, Yutaka Maniwa, Yasumitsu Miyata: Gold-Mediated Growth of Few-Layer Molybdenum Disulfide

高口裕平, 蒲江, 松岡拓史, 小林佑, 竹延大志, 真庭豊, 宮田耕充: 遷移金属ダイカルコゲナイドを用いた面内ヘテロ構造の接合界面における電界発光

小林佑, 劉崢, 入沢寿史, 真庭豊, 宮田耕充: 単層カルコゲナイドナノリボンとヘテロ構造の成長

Jiang Pu, Keichiro Matsuki, Leiqiang Chu, Yu Koayashi, Shogo Sasaki, Yasumitsu Miyata, Goki Eda, and Taishi Takenobu: Exciton polarizability and renormalization effects for optical modulation in monolayer semiconductors

Taichi Inoue, Takahiko Endo, Kuniharu Takei, Takayuki Arie, Yasumitsu Miyata, Seiji Akita: Softening effect on resonance frequency of MoS₂ mechanical resonator induced by persistent photoconductivity

● グラフェンコンソーシアム第 19 回研究講演会 2019 年 3 月 8 日 (秋葉原ダイビル)

宮田耕充: 遷移金属ダイカルコゲナイド原子層の成長と評価

● 第 66 回応用物理学会春季学術講演会 2019 年 3 月 9-12 日 (東京工業大学)

小川寛人, 熊谷明哉, 遠藤尚彦, 小林佑, 井田大貴, 高橋康史, 末永智一, 宮田耕充, 珠玖仁: 単層/二層 WS₂ における水素発生反応のナノスケール電気化学イメージング

高橋康史, 太田真登, 小林祐, 熊谷明哉, 宮田耕充, 福間剛: 遷移金属ダイカルコゲナイドナノシートの触媒活性イメージング

島崎雅史, 和田尚樹, 宮田耕充, 松田一成, 宮内雄平: 単層 WS₂/WSe₂ 面内ヘテロ構造の発光特性

● 日本物理学会第 74 回年次大会 2019 年 3 月 14-17 日 (九州大学)

宮田耕充: 面内原子層ヘテロ構造の成長と評価

蒲江, 松岡拓史, Juliette Tempia, 小林佑, 宮田耕充, Chang-Hsiao Chen, Lain-Jong Li, 竹延大志: 電解質を用いた原子層発光素子の発光特性

岡部碧, 中井祐介, 東中隆二, 真庭豊: XSn₄ (X = Pd, Pt) の NMR 測定

小倉宏斗, 客野遥, 松田和之, 真庭豊: 形状を変化させたカーボンナノチューブ内の水

客野遥, 小倉宏斗, 松田和之, 真庭豊: つぶれたカーボンナノチューブに内包された水の構造とダイナミクス III

林大介, 本郷直也, 客野遥, 宮田耕充, 中井祐介, 真庭豊: 単層カーボンナノチューブ薄膜の熱電物性: 直径分布

国際会議

● UP2018, Hanburg, Germany, July 15-20, 2018

Naotaka Yoshikawa, Kohei Nagai, Yuhei Takaguchi, Shogo Sasaki, Yasumitsu Miyata, Koichiro Tanaka: High-Harmonic Generation Controlled by Valley-Polarization in Transition Metal Dichalcogenide Monolayers

● 第9回エネルギー理工学研究所国際シンポジウム, 京都大学, September 3-5, 2018

Kana Kojima, Zhang Wenjin, Yuhei Miyauchi, Tetsuki Saito, Yu Kobayashi, Takahiko Endo, Kazunari Matsuda, Yutaka Maniwa, Yasumitsu Miyata: Preparation and optical properties of suspended monolayer MoS₂

● AsiaNANO 2018, Qingdao, China, October 18-21, 2018

宮田耕充: CVD growth of in-plane heterostructures based on two-dimensional materials

● ACSIN-14 and ICSPM2, Sendai International Center, October 21-25, 2018

Kota Murase, Yu Kobayashi, Shoji Yoshida, Osamu Takeuchi, Yasumitsu Miyata, Hidemi Shigekawa: Band Modulation Appearance on TMDC Lateral Heterojunctions

Ibuki Kuroda, Hiroyuki Mogi, Yuhei Takaguchi, Yasumitsu Miyata, Shoji Yoshida, Osamu Takeuchi and Hidemi Shigekawa: Two-probe Measurement of CVD grown WSe₂ on SiO₂/Si by Using Conductive AFM Cantilevers

● The 9th A3 symposium on emerging materials, Kyoto, Japan, October 29-31, 2018

Y. Nakanishi, M. Aizaki, M. Nagata, S. Shukla, Z. Liu, K. Suenaga, H. Shinohara: 1D distortion of single-wired transition-metal monochalcogenides isolated by carbon nanotubes

● MNC 2018, Sapporo Park Hotel, November 13-16, 2018

Taichi Inoue, Tetsuki Saito, Kuniharu Takei, Takayuki Arie, Yasumitsu Miyata, Seiji Akita: Effect of persistent photoconductivity on MoS₂ mechanical resonator

● 3rd EU-JP Flagship Workshop on Graphene and 2DMs, 東北大学, November 19-21, 2018

宮田耕充: Growth of in-plane heterostructures based on layered chalcogenides

● One-Day Symposium on Spintronic Properties of Graphene and Related 2D Materials, 東京大学, November 22, 2018

宮田耕充: Growth of in-plane heterostructures based on 2D materials

● International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials, Kirchberg in Tirol, Austria, March 9-16, 2019

Kana Kojima, Hong En Lim, Zheng Liu, Yusuke Nakanishi, Takahiko Endo, Yu Kobayashi, Yutaka Maniwa, Yasumitsu Miyata: Reviving Interlayer Excitons with Suspended MoS₂/WS₂ van der Waals Heterostructures

Yuhei Takaguchi, Jiang Pu, Hirofumi Matsuoka, Yu Kobayashi, Taishi Takenobu, Yutaka Maniwa, Yasumitsu Miyata: Interface electroluminescence from in-plane heterostructures based transition metal dichalcogenide monolayers

Yu Kobayashi, Shoji Yoshida, Mina Maruyama, Hiroyuki Mogi, Kota Murase, Yutaka Maniwa, Osamu Takeuchi, Susumu Okada, Hidemi Shigekawa, Yasumitsu Miyata: Continuous Heteroepitaxy of Two-Dimensional Heterostructures Based on Layered Chalcogenides

Y. Nakanishi, M. Nagata, S. Shukla, Z. Liu, T. Shiga, Y. Nakamura, T. Inoue, N. Kanda, T. Koyama, H. Kishida, K. Suenaga, H. Shinohara: Isolation of Single-wired Transition Metal Monochalcogenides by Carbon Nanotubes

● 3rd Electron Devices Technology and Manufacturing (EDTM) Conference 2019, Marina Bay Sands, Singapore, March 12-15, 2019

Yu Kobayashi, Shoji Yoshida, Mina Maruyama, Kota Murase, Yutaka Maniwa, Osamu Takeuchi, Susumu Okada, Hidemi Shigekawa, Yasumitsu Miyata: Growth and characterization of in-plane heterostructures based on two-dimensional materials

● 3rd JST/CREST/2D Workshop in Singapore, Marina Bay Sands, Singapore, March 15, 2019

Yasumitsu Miyata: Semiconductor heterojunctions based on 2D materials

表界面光研究室

1. 研究活動の概要

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

1) ナノ物質における電子物性とその制御

SWCNTの熱電物性の制御 電気二重層キャリア注入の技術により、SWCNTのフェルミレベルを大きくシフトさせることが可能である。低次元材料、特に一次元材料は、熱電変換性能が高いことが知られている。しかしながら、その性能は大きくフェルミレベルと純度に依存する。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、金属型SWCNTの役割を調べる為、系統的に、高純度(6,5)SWCNTに金属型SWCNTを混合させた薄膜を作製し、熱電特性のフェルミレベル依存性を明らかにした。金属型SWCNTが電気伝導率および熱起電力の同時増大というトレードオフの破れの要因となっていることをつきとめた。金属型SWCNTが半導体型SWCNTより優れた特性を示す可能性があることを明らかにした。

大面積配列制御 SWCNTの技術開発 特殊な構造を備えるナノ物質は、その構造異方性を反映した物性の方位依存性を示す。SWCNTは一次元構造を備えるが、それがランダムに配列した薄膜では、その物性を理解することはできない。配向を制御したSWCNT薄膜を作製することでのみ、方位依存性をマクロな薄膜で理解することが可能となる。ライス大において開発されたSWCNT配列方法は、大面積で配列したSWCNT薄膜が作製できるものの、未だその原理が明らかになっていなかった。今年度は、その作製方法を自らの研究室で再現することを行い、更には、その原理解明に向けて、フィルター上にグループを作製する方法の開発を行った。

遷移金属カルコゲナイドナノチューブの精製と合成 金属であるグラフェンシートを円筒状にした単層カーボンナノチューブは、巻き方に依存して、金属的な性質を示すものが存在する。しかし、半導体である遷移金属カルコゲナイドを円筒状にした遷移金属カルコゲナイドナノチューブは、いかなる巻き方においても、半導体的な性質を示し、将来の様々なデバイス利用の観点からは非常に大きな可能性を秘めている材料である。しかし、SWCNTと異なり、単層の試料や構造が揃った試料を得ることは非常に困難であり、市販されているものは、全て多層で且つ構造(層数・直径)が極めて非均一なものであった。そこで今年度は、市販されている試料の分離精製を行い、均一な試料を得る為の手法開発、および、合成のアプローチからの層数および直径が小さい試料を得る研究を行った。

2) 光物性研究

SWCNT におけるバンド内プラズモン吸収 量子井戸などの二次元井戸型ポテンシャルに電子が閉じ込められた系においては、閉じ込め方向の偏光方向に応答するバンド内プラズモン共鳴吸収という現象が知られている。SWCNT の高密度キャリア注入時において、新しい吸収帯が生じることはこれまで知られていたが、SWCNT の大面積配列制御膜を作製し、その光吸収の方位依存性を調べたところ、軸に垂直方向に新しい光吸収が形成されることを明らかにした。

単層カーボンナノチューブにおける高次高調波の発生 高強度のテラヘルツ (THz) 帯のパルスレーザーの登場により、固体系において、非摂動領域の現象である高次高調波発生が観測されるようになった。しかし、その発生機構については、バンド内ダイナミクスとバンド間ダイナミクスの二つの機構が提唱されているが、未だ明確な答えが出ていない。そこで本研究においては、系統的に電子構造の異なる SWCNT 薄膜を作製し、高次高調波発生と電子構造との関係解明、更には、サイドゲート構造とイオン液体を用いたキャリア注入法を活用して、高次高調波発生のキャリア注入依存性の解明を行った。

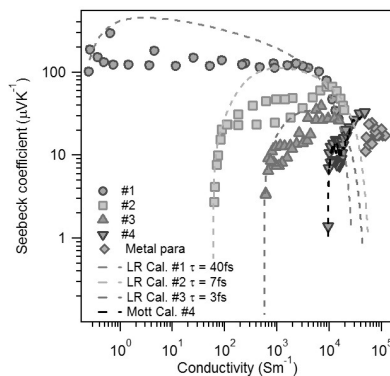


図 1: 系統的に (6,5) および金属型 SWCNT を混在させた場合におけるゼーベック係数 S と電気伝導率との関係

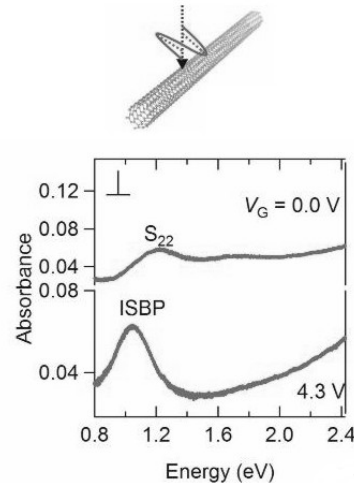


図 2: SWCNT の軸に垂直方向のバンド内プラズモン (Intraband plasmon, ISBP) 吸収

2. 研究業績

1) 論文

K. Fukuhara, Y. Ichinose, H. Nishidome, Y. Yomogida, F. Katsutani, N. Komatsu, W. Gao, J. Kono, and K. Yanagi: "Isotropic Seebeck coefficient of aligned single-wall carbon nanotube films", *Appl. Phys. Lett.*, **113** (2018) 243105

J. Nozaki, H. Nishidome, M. Maruyama, S. Okada, S. Kusaba, K. Tanaka, K. Ueno, Y. Yomogida, and K. Yanagi: "Site-dependence of relationships between photoluminescence and applied electric field in monolayer and bilayer molybdenum disulfide", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **58** (2018) 015001

M. V. Kharlamova, C. Kramberger, O. Domanov, A. Mittelberger, K. Yanagi, T. Pichler, and D. Eder: "Fermi level engineering of metallicity-sorted metallic single-walled carbon nanotubes by encapsulation of few-atom-thick crystals of silver chloride", *J. Mater. Sci.*, **53** (2018) 13018-13029

- Y. Yomogida, Z. Liu, Y. Ichinose, and K. Yanagi: "Sorting Transition-Metal Dichalcogenide Nanotubes by Centrifugation", *ACS Omega*, **3** (2018) 8932-8936
- L. Shi, K. Yanagi, K. Cao, U. Kaiser, P. Ayala, and T. Pichler: "Extraction of Linear Carbon Chains Unravels the Role of the Carbon Nanotube Host", *ACS Nano*, **12** (2018) 8477-8484
- K. Yanagi, R. Okada, Y. ichinose, Y. Yomogida, F. katsutani, W. Gao, and J. Kono: "Intersubband plasmons in the quantum limit in gated and aligned carbon nanotubes", *Nat. Commun.*, **9** (2018) 1121
- M. V. Kharlamova, C. Kramberger, M. Sauer, K. Yanagi, T. Saito, and T. Pichler: "Inner tube growth and electronic properties of metallicity-sorted nickelocene-filled semiconducting single-walled carbon nanotubes", *Appl. Phys. A*, **124** (2018) 247
- K. Maekawa, K. Yanagi, Y. Minami, M. Kitajima, I. Katayama, and J. Takeda: "Bias-induced modulation of ultrafast carrier dynamics in metallic single-walled carbon nanotubes", *Phys. Rev. B*, **97** (2018) 075435
- A. Shimura, K. Yanagi, and M. Yoshizawa: "Phase analysis of coherent radial-breathing-mode phonons in carbon nanotubes: Implications for generation and detection processes", *Phys. Rev. B*, **97** (2018) 035441
- L. Shi, J. Wei, K. Yanagi, T. Saito, K. Cao, U. Kaiser, P. Ayala, and T. Pichler: "Templated direct growth of ultra-thin double-walled carbon nanotubes", *Nanoscale*, **10** (2018) 21254-21261
- K. Miyaura, Y. Miyata, B. Thendie, K. Yanagi, R. Kitaura, Y. Yamamoto, S. Arai, H. Kataura, and H. Shinohara: "Extended-conjugation π -electron systems in carbon nanotubes", *Sci. Rep.*, **8** (2018) 8098
- M. V. Kharlamova, C. Kramberger, A. Mittelberger, K. Yanagi, T. Pichler, and D. Eder: "Silver Chloride Encapsulation-Induced Modifications of Raman Modes of Metallicity-Sorted Semiconducting Single-Walled Carbon Nanotubes", *J. Spectrosc.*, **2018** (2018) 5987428
- X. Wei, T. Tanaka, T. Hirakawa, M. Tsuzuki, G. Wang, Y. Yomogida, A. Hirano, and H. Kataura: "High-yield and high-throughput single-chirality enantiomer separation of single-wall carbon nanotubes", *Carbon*, **132** (2018) 1-7
- R. Senga, T. Pichler, Y. Yomogida, T. Tanaka, H. Kataura, and K. Suenaga: "Direct proof of a defect-modulated gap transition in semiconducting nanotubes", *Nano Lett.*, **2018** (2018) 3920-3925
- K. Matsuki, T. Sakanoue, Y. Yomogida, S. Hotta, and T. Takenobu: "Light emission from organic single crystals operated by electrolyte doping", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **57** (2018) 03EF02
- M. Yudasaka, Y. Yomogida, M. Zhang, M. Nakahara, N. Kobayashi, T. Tanaka, Y. Okamatsu-Ogura, K. Saeki, and H. Kataura: "Fasting-dependent Vascular Permeability Enhancement in Brown Adipose Tissues Evidenced by Using Carbon Nanotubes as Fluorescent Probes", *Sci. Rep.*, **8** (2018) 14446

2) 著書

一ノ瀬遥太: "電気二重層キャリア注入法を用いた高純度単層カーボンナノチューブの熱電物性制御", 日本熱電学会誌, **15** (2018) 103-105

3) 学会講演

● 日本物理学会 第74回年次大会 (九州大学)

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, 大久保瞳, 蓬田陽平, 田中耕一郎, 柳和宏: 単層カーボンナノチューブにおける THz 高次高調波発生のキャリア注入依存性

● 第66回応用物理学会春季学術講演会 (東京工業大学)

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, 田中耕一郎, 柳和宏: 単層カーボンナノチューブにおける THz 高次高調波発生のフェルミレベル依存性

松尾博之, 蓬田陽平, 八木貴志, 柳和宏: 周期加熱法を用いた単層カーボンナノチューブ薄膜の熱伝導率の温度依存性測定

蓬田陽平, 柳和宏: 小直径二硫化タングステンナノチューブの合成とトランジスタ特性

● 第56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 (東京大学)

Yohei Yomogida, Kazuhiro Yanagi: Controlling temperature and sulfur addition for synthesis of thin WS₂ nanotubes

Hiroiyuki Matsuo, Yohei Yomogida, Takashi Yagi, Kazuhiro Yanagi: Temperature dependence of thermal conductivity of in-plane and out-of-plane directions in single-wall carbon nanotube thin film by periodic heating method

Shinya Nishimoto, Takaaki Hirayama, Hiroiyuki Nishidome, Yasumitsu Miyata, Kazuhiro Yanagi, Koichi Kikuchi, Yohji Achiba, Takeshi Kodama: Near infrared emission of dimetallofullerene anions encapsulating Nd or Er

Hiroiyuki Nishidome, Kohei Nagai, Yota Ichinose, Kengo Fukuhara, Junji Nozaki, Junko Eda, Yohei Yomogida, Junichiro Kono, Koichiro Tanaka, Kazuhiro Yanagi: Fermi-level dependence of THz high-harmonic generation in single-wall carbon nanotubes

Junichiro Kono, Weilu Gao, Natsumi Komatsu, Fumiya Katsutani, Kazuhiro Yanagi New Developments in the Science and Applications of Wafer-Scale Crystalline Carbon Nanotube Films (invited)

● ナノ界面における熱・電荷輸送に関する研究会 (伊東市観光会館)

岡田遼太郎: 劈開した MoS₂ 薄膜結晶へのゲート誘起型カリウムインターカレーション

一ノ瀬遥太: 単一カイラリティ単層カーボンナノチューブ薄膜の熱電特性

松尾博之: 単層カーボンナノチューブの熱伝導率測定

福原健吾: 配列制御単層カーボンナノチューブの熱電特性

西留比呂幸: 単層カーボンナノチューブにおける高次高調波発生

吉田朱里: 半導体型単層カーボンナノチューブの配向制御薄膜の作製

堀内加奈子: 単層カーボンナノチューブの配向制御薄膜の作製

生駒栞奈: 単一カイラリティ単層カーボンナノチューブの精製

● 第122回粉体粉末冶金講演会 (朱鷺メッセ)

柳和宏: フェルミレベルを制御した単層カーボンナノチューブ薄膜の熱電特性 (招待講演)

● 熱電研究の新展開ワークショップ (物質材料研究機構)

柳和宏: フェルミレベルを制御した SWCNT の熱電特性 (招待講演)

● 第79回応用物理学会秋季学術講演会 (名古屋国際会議場)

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, 田中耕一郎, 柳和宏: 金属型単層カーボンナノチューブにおける THz 高次高調波発生の検証

松尾博之, 蓬田陽平, 八木貴志, 柳和宏: 時間領域サーモリフレクタンス法を用いた単層カーボンナノチューブ薄膜の熱物性評価

● 第15回日本熱電学会学術講演会 (東北大学)

一ノ瀬遥太, 吉田朱里, 福原健吾, 生駒栞奈, 枝淳子, 大久保瞳, 蓬田陽平, 柳和宏: 電気二重層キャリア注入法を用いた高純度単層カーボンナノチューブの熱電物性制御

柳和宏: フェルミレベルと配列を制御した単層カーボンナノチューブの熱電特性 (招待講演)

● 第55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 (東北大学)

Yota Ichinose, Akari Yoshida, Kengo Fukuhara, Kanna Ikoma, Junko Eda, Hitomi Okubo, Yohei Yomogida, Kazuhiro Yanagi: Influence of Purity on Thermoelectric Properties of Semiconducting SWCNTs Thin Films

Junji Nozaki, Hiroyuki Nishidome, Mina Maruyama, Susumu Okada, Satoshi Kusaba, Koichiro Tanaka, Keiji Ueno, Yohei Yomogida, Kazuhiro Yanagi: Site-dependence of relationships between photoluminescence and applied electric field in monolayer and bilayer molybdenum disulfide

Hiroyuki Matsuo, Yohei Yomogida, Takashi Yagi, Kazuhiro Yanagi: Evaluation of thermal conductance of single-wall carbon nanotube thin film by time domain thermo-reflectance method

Ryotaro Okada, Yohei Yomogida, Kazuhiro Yanagi: Gate-induced potassium intercalation to exfoliated MoS₂ flakes

Yohei Yomogida, Kazuhiro Yanagi: Carrier transport properties of WS₂ nanotubes obtained from solvothermally synthesized W₁₈O₄₉ nanowires

● 日本物理学会 2018年秋季大会 (同志社大学)

一ノ瀬遥太, 吉田朱里, 福原健吾, 枝淳子, 蓬田陽平, 柳和宏: 高純度単層カーボンナノチューブ系における熱電物性のカイラリティ純度依存性

福原健吾, 一ノ瀬遥太, 堀内加奈子, 蓬田陽平, Weilu Gao, 河野淳一郎, 柳和宏: 配列制御された単層カーボンナノチューブ薄膜の熱電特性

● ナノカーボンワークショップ2018 (東京理科大学)

生駒栞奈, 蓬田陽平, 柳和宏: 単一カイラリティ単層カーボンナノチューブの精製

堀内加奈子, 河野淳一郎, 蓬田陽平, 柳和宏: 単層カーボンナノチューブの配列制御薄膜の作製

吉田朱里, 蓬田陽平, 柳和宏: 金属型単層カーボンナノチューブの熱電特性

松尾博之, 蓬田陽平, 柳和宏: 単層カーボンナノチューブの熱伝導率測定

福原健吾, 河野淳一郎, 蓬田陽平, 柳和宏: 配列制御単層カーボンナノチューブの熱電特性

西留比呂幸, 永井恒平, 田中耕一郎, 蓬田陽平, 柳和宏: 単層カーボンナノチューブにおける高次高調波発生

岡田遼太郎, 蓬田陽平, 柳和宏: 固体電解質を用いたインターカレーション制御による層状化合物系の電気伝導特性制御

一ノ瀬遥太, 蓬田陽平, 柳和宏: 単一カイラリティ単層カーボンナノチューブ薄膜の熱電特性

蓬田陽平, 劉崢, 柳和宏: 遷移金属カルコゲナイドナノチューブの合成と精製

柳和宏: 単層カーボンナノチューブの熱電物性の実験研究 (招待講演)

● アモルファス・ナノ材料第147委員会 第142回研究会 (弘済会館)

柳和宏: フレキシブルマテリアルのナノ界面熱動態の解明と制御 (招待講演)

国際会議

● 19th International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-dimensional Materials (NT18) (Peking University, China))

Hiroyuki Nishidome, Kohei Nagai, Yota Ichinose, Kengo Fukuhara, Junji Nozaki, Junko Eda, Yohei Yomogida, Koichiro Tanaka, Kazuhiro Yanagi: High-harmonic generation of THz light in single-wall carbon nanotubes

Kengo Fukuhara, Yota Ichinose, Yohei Yomogida, Weilu Gao, Junichiro Kono, Kazuhiro Yanagi: Thermoelectric Properties of Aligned Single-Wall Carbon Nanotube Films

Claudia Berkman, Lei Shi, Hans Kuzmany, Kazuhiro Yanagi, Takeshi Saito, Thomas Pichler, Paola Ayala: Study of the charge transfer between molecular fillers and SWCNTs via optical methods

Yota Ichinose, Kengo Fukuhara, Junko Eda, Weilu Gao, Junichiro Kono, Yohei Yomogida, Kazuhiro Yanagi: Tuning of the Thermoelectric Properties of High-Purity Single-Chirality (6,5) Single-Walled Carbon Nanotubes by Electrolyte Gating

Kazuhiro Yanagi: Optical and Thermoelectric Properties of Fermi Level Tuned and Aligned Single Wall Carbon Nanotube Thin Films

● Workshop on Thermal and Charge Transport across Flexible Nano-Interfaces (TCTFN2018) (Tokyo Metropolitan University, Japan)

Hiroyuki Matsuo, Yohei Yomogida, Takashi Yagi, Kazuhiro Yanagi: Evaluation of thermal conductance of single-wall carbon nanotube thin film by time domain thermo-reflectance method

Yota Ichinose, Akari Yoshida, Kengo Fukuhara, Kanna Ikoma, Eda Junko, Hitomi Okubo, Yohei Yomogida and Kazuhiro Yanagi: Thermoelectric Properties of Aligned Single-Wall Carbon Nanotube Films

Kengo Fukuhara, Yota Ichinose, Kanako Horiuchi, Yohei Yomogida, Weilu Gao, Junichiro Kono, Kazuhiro Yanagi: Influence of Purity on Thermoelectric Properties of Semiconducting SWCNTs Thin Films

Kazuhiro Yanagi: Optical and thermoelectric properties of Fermi level tuned and aligned SWCNTs

● 31st International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2018) (Hokkaido, Japan)

Yota Ichinose, Akari Yoshida, Kengo Fukuhara, Eda Junko, Hitomi Okubo, Yohei Yomogida and Kazuhiro Yanagi: Tuning of the Thermoelectric Properties of High-Purity Single-Chirality Single-Walled Carbon Nanotubes by Electrolyte Gating

● PCOS2018 (Toyama, Japan)

Kazuhiro Yanagi: Thermoelectric properties of Fermi level tuned single wall carbon nanotube thin films

● 2019 Taiwan-Nippon IEM meeting (Taiwan)

Kazuhiro Yanagi: Optical and thermoelectric properties of Fermi level tuned and aligned SWCNTs

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

Naoya Yanagisawa and Rei Kurita : In-situ observation of bubble-avalanche collapsing dynamics in a quasi-two-dimensional foam, *Scientific Reports*, **9**, 5152 (2019)

Tsuyoshi Tsukada and Rei Kurita : Three dimensional pattern formation during phase separation by radial quenching at the base, *Journal of Physical Society of Japan*, **88**, 044603 (2019)

Kazuya U. Kobayashi and Rei Kurita : Unstable yet static initial state: A universal method for studying Rayleigh-Taylor instability and lock exchange, *Physical Review Fluids*, **4**, 013901 (2019)

Kouki Morinaga, Noriko Oikawa and Rei Kurita : Emergence of morphology in crystallization using coffee ring effect, *Scientific Reports*, **8**, 12503 (2018)

Noriko Oikawa, Keita Fukagawa and Rei Kurita : Active hole generation in a liquid droplet dissolving into a binary solvent, *Soft Matter*, **14**, 4952-4957 (2018)

2) 学会講演

● 日本物理学会 第74回年次大会（九州大学 伊都キャンパス）

栗田玲：ソフトマターの非平衡ダイナミクス

柳沢直也，栗田玲：泡沫の微小変形時における協同的緩和ダイナミクス

森永恒希，栗田玲：液滴端が固定された溶液の再結晶化パターン

小林和也，栗田玲：液体系・粉体系における重力不安定化現象の共通性

塚田剛，栗田玲：Directional quenching を用いた相分離パターンの制御

谷茉莉：切り紙で3D形状をデザインする

● 第8回 ソフトマター研究会（首都大）

小林和也，栗田玲：液体系・粉体系におけるレイリー・テイラー不安定性の共通性

森永恒希，栗田玲：ピン止めされた液滴の再結晶化のダイナミクス

塚田剛，栗田玲：Radial quenching を用いた3次元相分離パターンの制御

沖山綾馬, 栗田玲 : 内部構造の秩序度合いと force chain の関係

柳沢直也, 栗田玲 : 泡沫の緩和ダイナミクスの液体分率依存性

● 日本物理学会 2018 年秋季大会 (同志社大)

栗田玲, 及川典子 : 時間遅れのある楕円体の凝集パターン

小林和也, 栗田玲 : 複雑流体における初期不安定性の直接観察

森永恒希, 栗田玲 : 蒸発速度が結晶のパターンに与える影響

沖山綾馬, 栗田玲 : 内部構造の秩序度合いと force chain の関係

柳沢直也, 栗田玲 : 擬 2 次元泡沫における緩和ダイナミクス

小林和也, 栗田玲 : Lock exchange の無攪乱実験

塚田剛, 栗田玲 : 温度伝搬による 3 次元相分離パターンの制御

塚田剛, 栗田玲 : 3 次元相分離パターンの閉じ込め効果

● 第 17 回 関東ソフトマター研究会 (東大)

柳沢 直也, 栗田 玲 : 泡沫の協同的崩壊挙動

小林 和也, 栗田 玲 : 複雑流体における重力不安定性の初期過程観察

森永 恒希, 及川 典子, 栗田 玲 : 結晶のパターンに対する初期濃度と蒸発速度の影響

沖山 綾馬, 及川 典子, 栗田 玲 : シリコンコーティングされた粉体のダイナミクス

塚田 剛, 栗田 玲 : 温度伝搬を用いた 3 次元相分離パターンの制御

● ガラス転移と関連分野の最先端研究 (東大)

栗田玲 : 泡沫ダイナミクスの液体分率依存性

国際会議

● Soft Matter Physics: from the perspective of the essential heterogeneity (Fukuoka, Japan)

Rei Kurita : Transient stagnant formation in a thermal convection [Oral]

Kazuya U. Kobayashi and Rei Kurita : Close relation for the gravitational instability between a physical gel and granular material [Poster]

Koki Morinaga and Rei Kurita : Dynamics of recrystallization of droplet with pinning the edge [Poster]

Naoya Yanagisawa and Rei Kurita : Relaxation dynamics in a quasi-two-dimensional foam [Poster]

Ryoma Okiyama and Rei Kurita : Relationship between an internal structure of granular material and a force chain [Poster]

Tsuyoshi Tsukada and Rei Kurita : Pattern formation during phase separation by radial quenching [Poster]

● International Conference on Advances in Physics of Emergent order in Fluctuations (Tokyo, Japan)

Koki Morinaga and Rei Kurita : Morphology of crystal from evaporated droplet with pinning the edge [Poster]

Naoya Yanagisawa and Rei Kurita : In-situ observation of collective bubble collapse [Poster]

Tsuyoshi Tsukada and Rei Kurita : 3-dimensional pattern induced by a phase separation with radial quenching [Poster]

Kazuya U. Kobayashi and Rei Kurita : Thermal convection dynamics in a well-mixed two component fluid with concentration dependent viscosity [Poster]

● Water on Materials Surface 2018 (Tokyo, Japan)

Rei Kurita : Generation of active holes in an ionic droplet in water-ethanol solvent [Poster]

Kazuya U. Kobayashi and Rei Kurita : Experimental observation of an initial instability in complex fluids [Poster]

Naoya Yanagisawa and Rei Kurita : The mechanism of collective bubble collapse in a quasi-two dimensional foam [Poster]

● Designer Soft Matter 2018 (Beach Road, Singapore)

Kazuya U. Kobayashi and Rei Kurita : Unusual thermal convection in a well-mixed two component fluid with large viscosity difference [Poster]

Koki Morinaga, Noriko Oikawa and Rei Kurita : Morphology of crystal under evaporation of solutions [Poster]

Naoya Yanagisawa and Rei Kurita : A bubble-avalanche collapsing mechanism in a quasi-two-dimensional foam [Poster]

Tsuyoshi Tsukada and Rei Kurita : 3-dimentional pattern induced by a phase separation with directional quenching [Poster]

3) 学会誌等

小林和也, 栗田玲 : 粘性差が大きい 2 成分混合系の対流, 日本物理学会誌 **73**, 11 (2018)

超伝導物質研究室

1. 研究活動の概要

本研究室では、新奇層状超伝導体および高性能熱電変換材料などの新物質開発を行っている。まさ、それらの新物質における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、 BiCh_2 系 (Ch はカルコゲン)・ SbCh_2 系層状化合物、 SnPn 系 (Pn はニクトゲン) 層状化合物、 InTe 系超伝導体の研究を進めている。また、高エントロピー合金効果に着目した新しい層状超伝導体の設計も推進している。

1) BiCh_2 系超伝導体の研究

BiCh_2 系超伝導体における特異な超伝導異方性 BiCh_2 系超伝導体は銅酸化物系や鉄系超伝導体と類似の層状構造を持っており、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。我々のグループも同位体効果から非従来型機構の可能性を示した (Hoshi et al., PRB 2018)。そこで、近年非従来型層状超伝導体で観測されている「ネマティック超伝導状態」が発現していることを期待し、 BiCh_2 系超伝導体 $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiSSe}$ の単結晶における超伝導状態の面内異方性評価を行った。その結果、超伝導転移近傍での磁気抵抗にクリアな2回回転対称性が観測された (図1)。単結晶の結晶構造は面内に4回回転対称性を持つ正方晶系であるため、超伝導状態が結晶の持つ4回回転対称性を破った2回回転対称性を示したといえる。この現象は鉄系超伝導体などで観測されているネマティック超伝導状態と類似であるため、 BiCh_2 系超伝導体においてもネマティック超伝導が発現していることを世界で初めて提案した実験である (Hoshi et al., JPSJ 2019)。

高エントロピー合金型ブロック層を持つ BiCh_2 系超伝導体の合成と局所構造の解明 BiCh_2 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。これまでの研究から、化学圧力効果による面内 Ch サイトの構造乱れ (熱振動因子の面内での広がりから評価) の抑制により、超伝導が発現するシナリオに至っている。本研究では、化学圧力効果以外の手法で Ch サイトの構造乱れを抑制する手法を開発することを目的として、物質開発を進めた。着目したコンセプトは、構造材料や生体材料の分野で近年注目を集めている高エントロピー合金である。従来の高エントロピー合金は単一サイトからなる、いわゆる合金であったが、本研究では層状構造の中の1つのサイトを高エントロピー合金化することを試みた。 $\text{REO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ (RE は希土類) において、 RE サイトを高エントロピー合金の定義 (5 元素以上かつ各元素が 5-35 % の占有率である) を満たすように物質をデザインした。例えば、 $\text{La}_{0.2}\text{Ce}_{0.2}\text{Pr}_{0.2}\text{Nd}_{0.2}\text{Sm}_{0.2}\text{O}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ 多結晶体を合成し、超伝導転移を確認することに成功した (Sogabe et al., APEX 2018)。さらに、化学圧力効果同様に、高エントロピー化により S サイト構造乱れが抑制される傾向も観測された。そこで、放射光 X 線回折を用いて様々な $\text{REO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ 超伝導体の局所構造を評価したところ、同程度の化学圧力 (面内での Bi-S 結合長) を持つ試料において、 RE サイトの混合エントロピーが高いものほど構造乱れが抑制されることを見出した (Sogabe et al., Solid State Commun. 2019)。これにより、他の層状超伝導体や機能性材料の新たな物質設計指針を与えることができたと考えている。

2) 新超伝導体の開発

SnPn 系層状超伝導体 2017 年に SnAs 伝導層を有する NaSn_2As_2 が $T_c = 1.3 \text{ K}$ の超伝導体であることを報告した (Goto et al., JPSJ 2017). 本系はファンデルワールスギャップを構造中に有するへき開可能な層状超伝導体であり, 世界中で注目され始めている物質系である. 本研究では, NaSn_2As_2 の超伝導機構を解明するために, 磁場侵入長測定および不純物効果を検証したところ, 従来型の s 波超伝導体であることが解明され, 磁場侵入長が非常に長いという本物質の特徴も見出された (Ishihara, Goto, Mizuguchi et al., PRB 2018). さらに, Sn サイトを一部 Na で置換することで NaSn_2As_2 系の T_c が 2 K に達することを見出した (Yuwen et al., submitted). 本物質系の可能性を広げるために, あらたな伝導層を持つ超伝導体を開発することを目指し, 物質探索を行った. As を P で置換することを試みたところ, NaSn_2P_2 の合成に成功し, $T_c = 2.0 \text{ K}$ の超伝導体であることを発見した (Goto et al., Sci. Rep. 2018). 超伝導特性および結晶構造図を図 2 に示す. 今後, さらに T_c 上昇を目指すとともに, 熱電材料やトポロジカル物質としての物質開発につなげる計画である.

岩塩型カルコゲナイドの高圧合成 PbTe はバンドギャップを持つ半導体であり, Pb が 6s ローンペアを持つため, BiS_2 系化合物との関連が期待できる. そこで, キャリアをドーピングして超伝導化するために, PbTe の Pb サイトに In を置換することを試みた. InTe は常圧下で合成すると TlSe 型構造をとるが, 高圧合成により PbTe と同様の岩塩型構造をとるため, 全固溶が期待できる. 高圧合成により $\text{Pb}_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$ を合成し, 電気伝導特性および超伝導特性を評価した. In ドーピングにより超伝導が発現することを観測した. 今後, In のバレンススキップ状態を含めて超伝導状態の詳細を解明する計画である.

高エントロピー合金型銅酸化物 BiS_2 系超伝導体で開発した高エントロピー合金型層状化合物のコンセプトに基づき, 銅酸化物 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ の物質探索を行った. RE サイトを 1~5 種類の希土類で固溶させることに成功し, 90 K 以上の転移温度を示す高エントロピー合金型銅酸化物 $(\text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ の合成に成功した. RE サイトの高エントロピー化により臨界電流密度が上昇することが期待できるため, 今後, 超伝導特性評価および結晶構造解析を進める計画である.

多層型ビスマスカルコゲナイド $\text{La}_2\text{O}_2\text{M}_4\text{S}_6$ における超伝導発現 BiS_2 系超伝導体の伝導層は 2 層型 (2 枚の BiS_2 層がファンデルワールスで結合している) であるが, カルコゲナイド層を 4 層にした $\text{La}_2\text{O}_2\text{M}_4\text{S}_6$ の超伝導体探索を行った. その結果, $\text{La}_2\text{O}_2\text{Bi}_3\text{AgS}_6$ において $T_c = 0.5 \text{ K}$ の超伝導を発見した (Jha et al., JPSJ 2018). さらに, Ag サイトの Sn 置換により転移温度が 2.3 K まで上昇することを見出した. 一方, これらの試料では磁化率測定での反磁性シグナルがバルク超伝導体で期待される値より小さかったため, S サイトの Se 部分置換による化学圧力印加を試みた. その結果, $\text{La}_2\text{O}_2\text{Bi}_3\text{Ag}_{0.6}\text{Sn}_{0.4}\text{S}_{5.7}\text{Se}_{0.3}$ において $T_c = 3.0 \text{ K}$ のバルク超伝導を観測することができた (Jha et al., submitted). 今後, 同様の手法により多層型ビスマスカルコゲナイド層状超伝導体の開発を推進する.

3) 新熱電材料の開発

REOSbSe₂ 系層状化合物 BiS_2 系層状化合物と類似の層状化合物における熱電材料探索を行っている. 特に, 理論的に高性能が予想されている SbSe_2 層を伝導層として持つ物質の開拓を進めた. その結果, REOSbSe_2 (RE = La, Ce) の新規合成に成功した (Goto et al., JPSJ 2018). しかし, 電気抵抗率は非常に大きく, 熱電材料として利用するためにはキャリアドーピングや化学圧力によって電気抵抗率を大幅に減少させる必要があった. そこで, RE サイトをよりイオン半径の小さい Pr や Nd で置換した物質の合成を開発し, さらに Sb サイトの Bi 部分置換を試みた. $\text{NdO}_{0.8}\text{F}_{0.2}\text{Sb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{Se}_2$ の電気抵抗率は LaOSbSe_2

に比べて大幅に減少していることを確認した (Goto et al., JPSJ 2019). 今後, キャリア濃度と結晶構造 (化学圧力) の最適化により, 理論予想された高性能の発現を目指す.

AgBiSe₂ 系の元素置換効果 AgBiSe₂ は高性能熱電材料として最近注目されている熱電物質であり, 温度変化により多彩な結晶構造相転移を示す特徴がある. 理論研究からは, 六方晶相において p 型熱電特性が発現すれば, 非常に高い熱電性能を実現できると予想されている. 第一に, Bi サイトを Sb で部分置換した AgBi_{1-x}Sb_xSe₂ を合成し, x の増加により室温の構造が六方晶から立方晶に変化することを見出した. また, 立方晶層では p 型伝導が観測された. さらに, AgBi_{1-x}Sb_xSe₂ において Ag サイトを Nb で部分置換する効果を検証したところ, Nb 部分置換により六方晶層構造が安定化することがわかった. さらに, AgBi_{1-x}Sb_xSe₂ の (Bi/Sb) サイトを Pb で部分置換したところ, 立方晶構造が安定化することがわかった. 本研究で得られた構造安定性 (構造相転移) の情報 (Sudo et al., submitted) に基づき, p 型伝導を示す六方晶構造の AgBiSe₂ 系化合物の合成を試みる計画である.

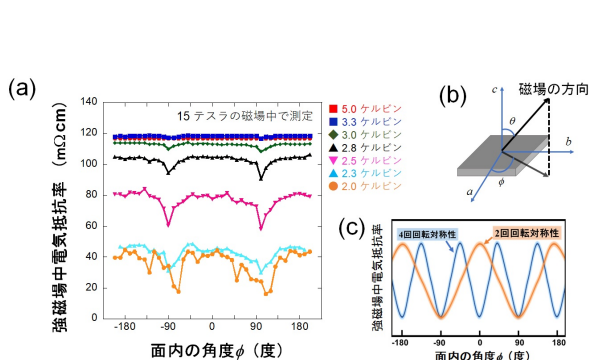


図 1: LaO_{0.5}F_{0.5}BiSSe 単結晶で観測された面内での磁気抵抗の 2 回回転対称性. 結晶に対する角度の定義と回転対称性の説明もあわせて示す.

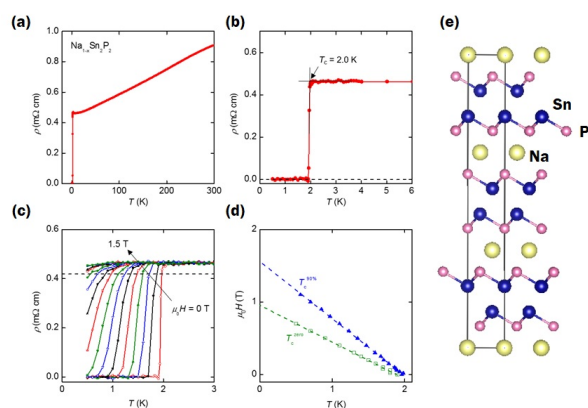


図 2: NaSn₂P₂ 新超伝導体の超伝導特性と結晶構造図.

2. 研究業績

1) 論文

R. Sogabe, Y. Goto, T. Abe, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, A. Miura, K. Tadanaga, Y. Mizuguchi: “Improvement of superconducting properties by high mixing entropy at blocking layers in BiS₂-based superconductor REO_{0.5}F_{0.5}BiS₂”, *Solid State Commun.*, in printing

K. Hoshi, M. Kimata, Y. Goto, T. D. Matsuda, Y. Mizuguchi: “Two-Fold-Symmetric Magnetoresistance in Single Crystals of Tetragonal BiCh₂-Based Superconductor LaO_{0.5}F_{0.5}BiSSe”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **88** (2019) 033704

Y. Mizuguchi: “Material Development and Physical Properties of BiS₂-Based Layered Compounds”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **88** (2019) 041001

Y. Goto, A. Miura, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, Y. Mizuguchi: “Effect of Bi Substitution on Thermoelectric Properties of SbSe₂-based Layered Compounds NdO_{0.8}F_{0.2}Sb_{1-x}Bi_xSe₂”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **88** (2019) 024705

R. Jha, Y. Goto, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, Y. Aoki, Y. Mizuguchi: “Superconductivity in layered Oxychalcogenide La₂O₂Bi₃AgS₆”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **87** (2018) 083704

Y. Goto, A. Miura, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, T. D. Matsuda, Y. Aoki, Y. Mizuguchi: “ $\text{Na}_{1-x}\text{Sn}_2\text{P}_2$ as a new member of van der Waals-type layered tin pnictide superconductors” , *Sci. Rep.*, **8** (2018) 12852

K. Ishihara, T. Takenaka, Y. Miao, O. Tanaka, Y. Mizukami, H. Usui, K. Kuroki, M. Konczykowski, Y. Goto, Y. Mizuguchi, T. Shibauchi: “Evidence for s-wave Pairing with Atomic Scale Disorder in a van der Waals Superconductor NaSn_2As_2 ” , *Phys. Rev. B*, **98** (2018) 020503

Y. Goto, A. Miura, R. Sakagami, Y. Kamihara, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, Y. Mizuguchi: “Synthesis, Crystal Structure, and Thermoelectric Properties of Layered Antimony Selenides REOSbSe_2 (RE = La, Ce)” , *J. Phys. Soc. Jpn.*, **87** (2018) 074703

R. Sogabe, Y. Goto, A. Nishida, T. Katase, Y. Mizuguchi: “Superconductivity in $\text{La}_{1-x}\text{Ce}_x\text{OBiS}_2$: Carrier doping by mixed valence of Ce ions” , *EPL*, **122** (2018) 17004

R. Sogabe, Y. Goto, Y. Mizuguchi: “Superconductivity in $\text{REO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ with high-entropyalloy-type blocking layers” , *Appl. Phys. Express*, **11** (2018) 053102

A. Miura, M. Nagao, Y. Goto, Y. Mizuguchi, T. D. Matsuda, Y. Aoki, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, Y. Takano, S. Watauchi, I. Tanaka, N. C. Rosero-Navarro, K. Tadanaga: “Crystal Structure and Superconductivity of Tetragonal and Monoclinic $\text{Ce}_{1-x}\text{Pr}_x\text{OBiS}_2$ ” , *Inorg. Chem.*, **57** (2018) 5364

2) 特許

特願 2018-074414, “超伝導体（高エントロピー合金型層状超伝導体に関する特許）” 平成 30 年 4 月 9 日, 公立大学法人 首都大学東京, 水口佳一, 曾我部遼太

3) 学会講演

国内会議

● 首都大先端ナノ物質科学研究会 2018 年 5 月 25 日（首都大）

水口佳一：層状超伝導体の探索と物性制御

● J-Physics 平成 30 年度領域全体会議, 2018 年 5 月 24–26 日（東北大）

星和久, 後藤陽介, 水口佳一: Temperature dependence of the anisotropic displacement parameters for the BiCh_2 -based superconductor $\text{REO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ (RE = La, Ce and Pr)

曾我部遼太, 後藤陽介, 水口佳一: Synthesis of BiS_2 -based layered superconductors with high-entropy-alloy-type blocking layers

● 鉄系高温超伝導体発見 10 周年記念合同シンポジウム, 2018 年 6 月 27 日（JST 東京）

R. Jha, Y. Goto, Y. Mizuguchi: Carrier doping effect on electronic properties of newly synthesized $\text{RE}_2\text{O}_2\text{M}_4\text{S}_6$ (M=Bi, Pb, Ag...) type compounds

後藤陽介, 松田達磨, 青木勇二, 水口佳一: 層状スズニクタイト：ファンデルワールスギャップを持つ新しい層状超伝導体

● J-Physics トピカルミーティングものづくりシリーズ第3回「物質探索最前線」 2018年8月6-7日 (首都大)

後藤陽介: 層状スズニクタイト: ファンデルワールスギャップを持つ新しい層状超伝導体 (招待講演)

R. Jha: Superconductivity in layered oxysulfide $\text{La}_2\text{O}_2\text{Bi}_3\text{AgS}_6$

勝野正誉: 新超伝導体 $\text{InTe}_{1-x}\text{Se}_x$ の高圧合成

● 日本物理学会 (2018年秋季大会) 2018年9月9-12日 (同志社大)

曾我部遼太, 後藤陽介, 水口佳一: 高エントロピー合金型ブロック層をもつ BiS_2 系層状化合物の合成

星和久, 後藤陽介, 水口佳一, 木俣基: BiCh_2 系超伝導体における上部臨界磁場の面内異方性

● 第15回 日本熱電学会学術講演会 2018年9月13-15日 (東北大)

後藤陽介, 水口佳一: 新規層状アンチモンカルコゲナイドの合成と熱電特性

● 第12回 物性科学領域横断研究会 2018年11月30日-12月1日 (奈良先端大)

星和久: BiCh_2 系超伝導体 $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiSSe}$ における電気抵抗面内異方性

水口佳一: 「層状硫化ビスマス超伝導体の発見」(凝縮系科学賞記念講演)

国際会議

● J-Physics 2018 2018年6月28-30日 (Awaji, Japan)

Y. Mizuguchi: Material design strategies for BiCh_2 -based layered superconductors(invited)

K. Hoshi: (Poster at the J-Physics2018 summer school) Two-fold symmetry observed in the in-plane anisotropy of upper critical field of BiCh_2 -based SC $\text{LaO}_{0.9}\text{F}_{0.1}\text{Bi}(\text{S},\text{Se})_2$ single crystal with tetragonal SC plane

● M2S 2018 2018年8月19-24日 (Beijing, China)

Y. Mizuguchi, R. Jha, Y. Hijikata: Crystal structure and physical properties of new layered oxychalcogenide $\text{La}_2\text{O}_2\text{M}_4\text{S}_6$ ($\text{M} = \text{Bi}, \text{Pb}, \text{Ag}, \text{Cd}$)

Y. Goto, Y. Mizuguchi: NaSn_2As_2 : a representative of a novel family of van der Waals-type superconductors

R. Sogabe, Y. Goto, Y. Mizuguchi: BiS_2 -based layered superconductors with high-entropy-alloy-type blocking layers

K. Hoshi, Y. Goto, Y. Mizuguchi: Se isotope effect in the layered BiCh_2 -based ($\text{Ch}=\text{S},\text{Se}$) superconductor $\text{LaO}_{0.6}\text{F}_{0.4}\text{Bi}(\text{S},\text{Se})_2$

● E-MRS Fall 2018 2018年9月17-21日 (Warsaw, Poland)

Y. Mizuguchi, R. Jha: Crystal structure and physical properties of layered oxychalcogenide $\text{La}_2\text{O}_2\text{Bi}_2\text{M}_2\text{S}_6$ (M = Pb, Ag, Cd, Bi)

● ISS 2018 2018 年 12 月 12–14 日 (Tsukuba, Japan)

Y. Mizuguchi, R. Sogabe, Y. Goto: Superconductivity in $\text{REO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ with high-entropy-alloy-type RE site(invited)

R. Jha, Y. Goto, Y. Mizuguchi: Carrier doping effect on superconductivity of newly synthesized $\text{La}_2\text{O}_2\text{M}_4\text{S}_6$ (M=Bi, Ag) type compounds

M. Katsuno, R. Jha, K. Hoshi, Y. Goto, Y. Mizuguchi: High pressure synthesis and substitution effect on InTe superconductor

● APS March Meeting 2019 2019 年 3 月 3–9 日 (Boston, USA)

K. Hoshi, Y. Goto, Y. Mizuguchi: Isotope effect in the layered bismuth chalcogenide (BiCh_2 -based) superconductor

Y. Mizuguchi, R. Sogabe: Superconductivity in BiS_2 -based layered compound $\text{REO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ with high-entropy-alloy-type (HEA-type) blocking layers

● ECMP 2019 2019 年 3 月 18–20 日 (Higashihiroshima, Japan)

Y. Goto, Y. Mizuguchi: Thermoelectric properties of layered antimony oxyselenides

Y. Mizuguchi: Material Development and Physical Properties of BiS_2 -Based Layered Compounds

編集後記

この原稿を書いている時点で、平成から令和に元号が変わっている。2018 年度に理学部・理学研究科になったと思ったら、2020 年度からは大学の名称が東京都立大学に変更されることがあわただしく決定された。私自身は、以前の東京都立大学のときからこの大学に在籍しているので、ぐるっとまわって最初に戻った気分でもある。それ以外にも、さまざまな変化があった。私が所属する宇宙物理実験研究室の大橋隆哉教授が定年退職され、今年度からは客員教授として研究室に在籍していただいている。実を言うと、この年次報告の研究室の原稿もかなりの部分を書いていただいた。私自身は、JAXA とのクロスアポイントメントが締結され、2019 年度からは 20% は JAXA に在籍することとなった。これは JAXA の XRISM 衛星のプロジェクトで検出器の科学的成果に責任をもつ立場となったためであるが、そういえば、XRISM 衛星も 2018 年度の最初は XARM と呼ばれていたものが改名された。2018 年度は、私はたまたま労働組合の執行委員となっており、大学の名称変更や、クロスアポイントメント制度についてもそこで何回か話題にあがり、普段は考えないような視点からの意見や情報を聞くことができた。そうはいうものの、私自身がやっていることは ASTRO-H / Hitomi の頃からそれほど変わらず、仕事もオーバーフロー気味で、まわりの人々に迷惑をかけたり、助けを借りたりでなんとかやっている。この編集後記の原稿も、ちょっとメ切りを超過してしまっているがご容赦いただきたい。宇宙物理の分野では、最近でもブラックホールや中性子星の合体による重力波の検出や、電波望遠鏡でのブラックホールの画像の撮影に成功など、ビッグニュースが続いており、それに連なるような成果が出せるよう、微力ながら開発・研究を継続していきたい。

(石崎欣尚 記)

平成 30 年度 年次報告編集委員
安田 修 (2018 年度物理学教室主任)
石崎欣尚
谷 茉莉