

研究室活動状況 2019 年度

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

1. 研究活動の概要

2. 研究業績

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

素粒子理論研究室

1. 研究活動の概要

1) 低エネルギー長基線実験における非標準相互作用のある場合のパラメーター縮退 (安田)

これまでのニュートリノ振動に関する実験データは、標準的な三世代間混合の枠組みでほとんど説明されているが、必ずしも定量的に説明に成功しているとは言えないデータが若干存在している。太陽ニュートリノ実験とカムランド実験による質量二乗差の測定値が約 2σ 異なっている点はそのような現象の一つである。この質量二乗差の違いは、ニュートリノ伝播に影響を与えるフレーバー依存性のある非標準相互作用により説明ができることが知られている。非標準相互作用を仮定した場合の太陽ニュートリノの解析では、実質的に低エネルギーにおける二世代の問題に帰着させて行われる。このため、加速器ニュートリノによる長基線実験に対して従来行われる解析では 3 行 3 列の行列要素のパラメーター ($\epsilon_{\alpha\beta}$, $\alpha\beta = e, \mu, \tau$) が使われており、太陽ニュートリノの解析に現れるパラメーター (ϵ_D, ϵ_N) とは異なるため、直接の比較が難しくなっているだけではなく、余分な自由度に対する最適化が必要となっている。この研究では、加速器ニュートリノ実験のうちでも比較的低エネルギーの部類 ($E \lesssim 1\text{GeV}$) に属する T2HK と T2HKK を想定し、太陽ニュートリノの解析と同様の近似で、非標準相互作用の無次元パラメーターが小さいという仮定のもとに、ニュートリノ振動の確率を求めた。その結果、(ϵ_D, ϵ_N) の他に余分なパラメーター 1 個を増やすだけで、振動確率を表すことが出来ることがわかった。さらに、基線長の異なる T2HK と T2HKK の 2 つの実験を組み合わせることにより、実験的誤差が十分小さい場合には、質量階層性 (Δm_{31}^2 の符号), θ_{23} の octant ($\pi/4 - \theta_{23}$ の符号), CP 位相 δ , 非標準相互作用のパラメーター 3 個を原理的に決定できることを、非標準相互作用のパラメーターが小さいという仮定のもとに、解析的に示した。T2HKK 実験は、低エネルギーで基線長が 1000km 以上の唯一の加速器ニュートリノ実験計画であり、非標準相互作用に関する解析の簡単化はその特長の一つとして挙げられる。

2) 吸収の効果を考慮した高エネルギーニュートリノにおけるステライルニュートリノ振動 (安田, ワン)

従来のニュートリノ振動ではニュートリノのフラックスが減少しないという仮定のもとに議論されている。一方、最近関心が持たれている高エネルギーニュートリノでは、ニュートリノ一核子の断面積が大きくなるため、吸収の効果が無視できなくなる。標準的な三世代間混合の場合には吸収の効果は三種類のフレーバーに普遍的に働くため、一様な減衰となることがわかる。しかし、ステライルニュートリノが存在する場合には、通常のニュートリノには吸収の効果が働く一方、ステライルニュートリノには働くないので、非自明な効果が期待される。特に質量二乗差が LSND 実験から示唆されている値かそれ以上の値の領域の場合には、高エネルギー領域 ($10\text{TeV} \lesssim E \lesssim 1\text{PeV}$) で質量による混合効果、ニュートリノ振動におけるいわゆる物質効果、吸収の効果がそれぞれ同程度に効いてくるため、実質質量二乗差・実質混合角が標準的なものとは異なる形を持つ。ステライルニュートリノが存在し、その振動パラメーターが一定の領域に存在する場合には、将来の IceCube のアップグレード等の超大型検出器で、これらの効果の観測が期待できる。

3) 弦模型におけるゲージの自発的破れ (北澤)

弦理論の 10 次元時空に D_p ブレーンという p 次元空間を占める物体を導入すると、その上の $p+1$ 次元時空にゲージ対称性が導入される。 D_p ブレーンが N 枚重なっているとゲージ対称性群は $U(N)$ になる。現実の世界で起きている電弱対称性の自発的破れのようなゲージ対称性の自発的破れは、この N 枚の D_p ブレーンが分離することによって起こる。例えば、それが N_1 個のまとまりと N_2 個のまとまりに分離すると ($N_1 + N_2 = N$)、ゲージ対称性は $U(N_1) \times U(N_2)$ に破れる。分離した 2 組の D_p ブレーンの

距離をどうやって一定に保つかということが問題になる。なぜなら、その距離がゲージ対称性の自発的破れのエネルギー・スケールに対応し、現実の世界では弱い相互作用の力の強さを決めることがあるからである。D_p ブレーンが相対的に静止しているときには力は働くかないが、相対運動をしている場合には超対称性が破れて力が働く。もしその力が十分に強くて遠心力とバランスするならば、2つの D_p ブレーンは連星系のように距離を一定に保ちつつ公転運動する可能性がある。これは2組の D_p ブレーンの距離を一定に保つ機構であるかもしれない。そこで、特に3次元空間を占める D₃ ブレーンの場合について具体的に力のポテンシャルを計算した。その結果、力は引力であることがわかったが、その大きさは2つの D₃ ブレーンに公転運動をさせるほどは強くないことがわかった。しかし、これはそれぞれ1枚の D₃ ブレーンが離れて存在する場合についてで、複数枚の重なった D₃ ブレーンの場合には、公転運動が可能である可能性が残されている。

この研究は高エネルギー加速研究機構の磯暁氏、須山孝夫氏および太田光氏との共同研究である。

4) 公転するブレーン上におけるローレンツ対称性の破れ（北澤）

互いに公転する連星系のような束縛状態が実現した場合、D_p ブレーン上ではローレンツ対称性が破れることになる。特に、ゲージ対称性の自発的破れと関わるヒッグス粒子に現れるローレンツ対称性の破れについて、束縛状態を作っている力の性質によらない予言を行なった。現在の実験から、公転の角速度はおよそ 0.1 GeV 以下（自然単位系）でなければならぬことがわかった。

この研究は高エネルギー加速研究機構の磯暁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。また、そのためには宇宙の再イオン化の過程の精密な理解が必要であることを、具体的に再イオン化の過程について可能性のある変更を行った試算をいくつか行うことによって指摘した。

この研究は、ピサ高等師範学校の A.Sagnotti 氏、および PLANCK collaboration に属する A.Gruppuso 氏と P.Natoli 氏の協力を得て行った。（昨年度からの継続研究）

2. 研究業績

1) 論文

Satshi Iso and Noriaki Kitazawa, A Possibility of Lorentz Violation in the Higgs Sector, *Modern Physics Letters A* **35** (2020) 2050064.

Satoshi Iso, Noriaki Kitazawa, Hikaru Ohta and Takao Suyama, Dynamics of Revolving D-Branes at Short Distances, *JHEP* **2001** (2020) 182.

Noriaki Kitazawa, On CMB B-modes and the Onset of Inflation, *JCAP* **1908** (2019) 005.

2) 国際会議報告

Osamu Yasuda, Systematics in T2HK, T2HKK and DUNE PoS *NOW2018* (2019) 034.

3) 学会講演

- 日本物理学会 2019 年秋季大会 2019 年 9 月 17 日 – 20 日 (山形大学)

磯曉, 北澤敬章, 太田光, 須山孝夫 : Effective potential for revolving D-branes in superstring theory

- 日本物理学会 第 74 回年次大会 2020 年 3 月 16 日 – 19 日 (名古屋大)

安田修 : ニュートリノ振動研究の現状と展望 (招待講演)

国際会議

- A topical conference on elementary particle physics and cosmology (Miami2019), 12–18 December 2019, Fort Lauderdale, Florida, USA

O. Yasuda: Phenomenology of the nonstandard interactions of neutrinos with the solar neutrino parametrization

- Rencontres du Vietnam 2019: 3 Neutrinos and Beyond, 4–10 Aug 2019, ICISE, Quy Nhon, Vietnam

O. Yasuda: Practical tests on the PMNS paradigm (invited talk)

4) 著書

安田修 (共著), 高原文郎・家正則・小玉英雄・高橋忠幸 編 : 宇宙物理学ハンドブック, 付録 D.3
朝倉書店, 2020 年 02 月 01 日, ISBN978-4-254-13127-7

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 2019/2020 was mainly conducted in two different directions corresponding to our two research projects. The conducted research in the first project was a continuation of our earlier research in the previous four years, whereas another (second) research project was new.

1)

Our main (first) research project is devoted to a 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, theoretical high energy physics beyond the Standard Model of elementary particles, based on quantum field theory, and supergravity theory, based on local supersymmetry between bosonic and fermionic particles. The key subjects of our main research are (i) high-scale spontaneous supersymmetry breaking after inflation, (ii) the dark energy represented by a positive cosmological constant or a de Sitter vacuum, and (iii) a viable description of dark matter. The dark matter in our approach has the gravitational origin either due to the super-massive gravitino as the lightest supersymmetric particle or due to primordial black holes. In 2019 we extended our supergravity models of Starobinsky inflation by adding their coupling to dilaton and axion, inspired by superstring theory, in the presence of a vector supermultiplet with the alternative Fayet - Iliopoulos term. By using the no-scale Kähler potential and the superpotential as a sum of a constant and a linear term, we got viable inflation. The current observations of the amplitude of primordial scalar perturbations fix the supersymmetry breaking scale in our models at 10^{13} GeV. The axion has the mass comparable to the inflaton mass (ケトフ). As the alternative, the supersymmetric Born - Infeld theory coupled to supergravity was studied in the presence of a cosmological term with spontaneous supersymmetry breaking. The consistency with local supersymmetry is achieved by compensating a negative contribution to the cosmological term from the Born - Infeld theory by a positive contribution originating from the gravitino condensate. The dynamical formation of the gravitino condensate in supergravity is shown to be possible in the one-loop approximation, while its induced effective potential can be used for driving inflation with the gravitino condensate as the inflaton. Uplifting a Minkowski vacuum (after inflation) to a de Sitter vacuum is also possible by the use of the alternative Fayet - Iliopoulos term (石川, ケトフ).

2)

Our second (new and invited) research project was devoted to a study of specific theoretical models for anisotropic strange stars in modified f(R,T) gravity theory. We derived solutions to the modified gravity equations describing a spherically symmetric anisotropic stellar object. To obtain our solution, we used the so-called “embedding class one” techniques. We studied the special case when the strange quark matter distribution is governed by the simplified bag model equation of state, and calculated the radius of the strange star candidates. The physical acceptability of our solutions is verified by performing several physical tests. Our study shows that the massive stellar objects under investigation

gradually become massive and larger in size, turning into less dense compact objects like massive pulsars, Chandrasekhar stars, and magnetars, which remain obscure in the standard framework of General Relativity (ケトフ).

2. 研究業績

1) 論文

R. Ishikawa, S.V. Ketov, Gravitino condensate in N=1 supergravity coupled to the N=1 supersymmetric Born-Infeld theory, PTEP 2020, No. 1, 013B05, 13 pages (査察済)

S.V. Ketov, M. Yu. Khlopov, Cosmological probes of supersymmetric field theory models at superhigh energy scales, Symmetry 11 (2019) No. 4, 511, 18 pages (査察済)

Y.Aldabergenov, S.V. Ketov, Inflation, dark energy and dark matter in supergravity, Astron. Nachr. 340 (2019), No.1-3, pages 126-130 (査察済)

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 Grav. 36 (2019), No. 7, 075012, 31 pages (査察済)

Y.Aldabergenov, S.V. Ketov, A. Chatrabhuti, Generalized dilaton-axion models of inflation, de Sitter vacua and spontaneous SUSY breaking in supergravity, Eur. Phys. J. C79 (2019) No. 8, 713, 18 pages (査察済)

D. Deb, S.V. Ketov, M. Yu. Khlopov, S. Ray, Study of charged strange stars in f(R,T) gravity. JCAP 1910 (2019) No. 10, 070, 24 pages (査察済)

D. Deb, S.V. Ketov, S.K. Maurya, P.H.R.S. Moraes, S. Ray, Exploring physical features of anisotropic strange stars beyond standard maximum mass limit in f(R,T) gravity. Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 485 (2019) No. 4, 5652-5665 (査察済)

S.V. Ketov, On the equivalence between Starobinsky and Higgs inflationary models in gravity and supergravity, J. Phys. A: Math. and Theor. 53 (2020) 084001, 13 pages (査察済)

2) 国際会議

● S .V. Ketov, Supergravity as the Dark Side of the Universe, 10th International Seminar on Gravitation and Cosmology, サンクトペテルブルク, ロシア, 2019 年 6 月

● S.V. Ketov, Dark Energy and Dark Matter in Supergravity, Meeting of the Division of Particles and Fields of the American Physical Society, ボストン, アメリカ, 2019 年 7 月

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。2019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と天体の進化

白色矮星–白色矮星連星系の進化 白色矮星は、太陽程度の質量の恒星の進化の最期に残される、電子の縮退圧で自己重力を支えている天体である。白色矮星にはChandrasekhar質量と呼ばれる限界質量(太陽のおよそ1.4倍)があり、これを超えると核爆発してIa型超新星となる。以前は、連星を成す恒星から白色矮星への質量降着によって限界質量を超えると考えられていたが(SDモデル)、近年、白色矮星–白色矮星から成る連星の進化の結果としてIa型超新星が起きる可能性が検討されている(DDモデル)。観測的にはどちらの場合もあるように見えるが、後者についてはまだ十分な理解が得られていない。そこで、Ia型超新星に至る可能性の観点から、白色矮星–白色矮星間の連星系内の質量輸送と角運動量輸送および系外へのそれらの輸送(系からの損失)を調べ、連星系の進化を理論的に研究した。進化に影響する物理過程として、重力波放出、潮汐力、降着円盤の形成、自転、などを考慮した。系内での輸送は、軽い方の白色矮星がRocheローブを満たすことによって起こり、Lagrange点を通って重い方の白色矮星に降着する。したがって、進化は基本的に白色矮星の質量比で記述されるので、2つの白色矮星の質量を軸に取ったダイアグラムで、輸送の安定・不安定領域を調べた。その結果、角運動量の輸送に一部の過程を考慮していない先行研究に比べ、安定な白色矮星の質量の組み合わせの領域が広がることが分かった。また、Ia型超新星に至る条件も調べ、単純に合体すればChandrasekhar質量を超える連星系でも、Eddington限界を超えた質量降着がない場合はIa型超新星に至るとは限らず、少なくとも1つは太陽の1.2倍程度の重い白色矮星が必要であることが分かった。

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 $M-\sigma$ 関係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、そのためには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、物理過程の議論に踏み込むと、共進化のシナリオはそれほど単純でないことが分かる。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始めた。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、比較的質量の小さなブラックホールをもつ銀河では、よく知られた $M-\sigma$ 関係のベキから外れて、より緩やかなベキの相関を示す可能性を見出した。また、質量の大きなブラックホールにおける $M-\sigma$ 関係のベキと質量の小さなブラックホールにおけるベキ、またその折れ曲りに当たる質量は、非一様な物質分布を考えることで説明できる可能性があることが分かった。

2) 天体の形成

銀河団・中心銀河の形状進化 銀河団とその中心に位置する銀河の形状は橢円体で近似することができる。それらの長軸方向が揃う傾向があることがわかっているが、その原因についてはわかっていない。そこで宇宙論的流体シミュレーションを用いて研究を行った。その結果、初期の密度分布を反映していることを見出した。また、重力レンズ観測などとの比較も行った。

2. 研究業績

1) 論文

T. Okabe, T. Nishimichi, M. Oguri, S. Peirani, T. Kitayama, S. Sasaki, Y. Suto, C. Pichon, Y. Dubois: "Cosmological evolution of orientations of cluster-sized dark matter haloes and their central galaxies in the Horizon-AGN simulation", *MNRAS*, **491** (2020) 2268

2) 著書

政井邦昭：「宇宙物理学ハンドブック」共著 (2.2.4 超新星爆発から超新星残骸への進化, 2.2.5 超新星残骸の物理, A.10 重要な原子物理過程を執筆), 朝倉書店, 2020年1月.

3) 学会講演

● 日本天文学会 2019年秋季年会 2019年9月11日-13日（熊本大学）

安西信一郎, 政井邦昭, 福田晋久：質量移動に伴う連星白色矮星系の進化

● 宇宙プラズマにおける粒子加速ワーク ショップ 2019年8月20日-21日（名古屋大学）

政井邦昭：放射スペクトルから探る粒子加速過程

原子核ハドロン物理研究室

1. 研究活動の概要

本研究室では、ハドロンを研究対象に、自然界の力のうちの1つ「強い相互作用」の織り成す物理現象について研究をしている。強い相互作用の基礎理論である量子色力学は、低エネルギー領域でカラーの閉じ込めが起き、基本自由度のクォーク・グルーオンは観測されず、300種以上のハドロンが多彩な動力学を示している。現代のハドロン物理では、世界中の実験施設から多くの新しいデータが供給され、従来の単純なクォーク模型による描像が破綻し、マルチクォークやハドロン分子など、新奇な構造を持ったハドロン状態が存在する可能性が盛んに議論されている。一方で、現在見つかっているハドロンのうち、強い相互作用に対して安定な粒子はごく少数の基底状態のみに限られ、エキゾチック構造を持つと期待されるほとんどの粒子は、多ハドロン状態への崩壊に対して不安定な共鳴状態である。この点は現在でもしばしば軽視されているが、現実のハドロンの構造を理解するには散乱、共鳴など動力学的な側面を考慮してハドロン構造を研究することが不可欠である。本研究室ではエキゾチックハドロンを散乱過程の共鳴状態として捉え、その構造の研究を通じて強い相互作用の非摂動的動力学を解明する。

1) 高エネルギー衝突反応でのハドロン相関

高エネルギー衝突反応におけるハドロン多重生成では、ハドロン間の相互作用と量子統計性の影響で観測されるハドロン対の分布に相関が生じる。従来のハドロン間相関の研究としては、観測された運動量相関を用いて放出ソースの情報を決定するために利用されてきたが、近年では推定されたソースの情報をもとに相関から未知のハドロン間相互作用を決定する新たな手法として注目を集めている。現在 RHIC の STAR や LHC の ALICE などで様々なハドロン対相関の測定が行われつつあり、得られたデータからハドロン間相関を決定する理論的枠組みを整備することが必要とされている。

高エネルギー衝突反応での $K^- p$ 相関とカイラル SU(3) 動力学 高エネルギー陽子・陽子衝突での $K^- p$ 相関関数は最近 ALICE によって測定され、特に $K^- p$ 弹性散乱データの欠如している閾値近傍の領域で精密なデータが得られており、相関関数の結果が散乱実験に相補的な相互作用の情報を与えると期待されている。一方で $K^- p$ チャンネルには、低いエネルギーのチャンネル ($\pi\Sigma$, $\pi\Lambda$) への結合、アイソスピン対称性の破れによる $\bar{K}^0 n$ チャンネルとの閾値エネルギーのずれ、 $K^- p$ 間のクーロン相互作用、という要素が同時に存在し、従来議論してきたハドロン間相間に比べ質的に異なる複雑さを有している。我々は、ミュンヘン工科大（ドイツ）と ITP（中国）との共同研究で、 $\bar{K}N$ - $\pi\Sigma$ - $\pi\Lambda$ チャンネル結合を陽に取り込み、クーロン相互作用、及び $K^- p$ と $\bar{K}^0 n$ の閾値エネルギー差を厳密に考慮した枠組みで $K^- p$ 対の運動量相関関数を計算した。既存の散乱データに基づいてカイラル SU(3) 動力学で構築された現実的 $\bar{K}N$ 相互作用ポテンシャルを用い、 $\pi\Sigma$ ソース関数の重みを適切に調整することで新しく測定された $K^- p$ 相関関数のデータが再現できることを示した。さらに、陽子・原子核散乱のようにより大きなソースサイズが期待される系での相関関数は $\pi\Sigma$ ソース関数の重みにあまり影響されないことを明らかにし、相関関数のソースサイズ依存性が $\bar{K}N$ 相互作用の決定について重要な役割を果たすことを示した。

相対論的重イオン衝突における相関関数を利用した $\Omega\Omega$, $p\Omega$ ダイバリオンの研究 これまでバリオン数2のハドロン（ダイバリオン）は重陽子以外に実験的に観測されていないが、近年の格子 QCD 第一原理計算の進展によりストレンジネスを多く含む $\Omega\Omega$ 及び $p\Omega$ 系での束縛状態の存在が示唆されている。これを実験的に検証するために、我々は ITP（中国）との共同研究で、相対論的重イオン衝突における多重ストレンジネスチャンネルのバリオン対運動量相関関数を導出した。1粒子分布関数のデータを用い

て膨張ソースモデルを構築し、格子 QCD 計算で得られたハドロン間ポテンシャルを用いて相関関数を計算した。異なる衝突条件（中心衝突と周辺衝突）での $p\Omega$ 相関関数の振る舞いを解析し、放出ソースの違いが相間に与える影響を定量的に明らかにした（図 1）。実際に STAR と ALICE による実験データと比較することで、ダイバリオン状態の存在が示唆する結果を得た。

2) ハドロン動力学と内部構造

カイラル対称性を考慮した $D\pi$ 散乱中の D_0^* 共鳴の性質 D メソンは重いチャームクォークと軽い u, d クォークの束縛系であり、クォーク質量が重い極限で成り立つヘビーコーク対称性と、クォーク質量が軽い極限で成立するカイラル対称性の両方の制限を受ける系である。特に、スカラー D_0^* メソンは、基底状態の D メソンのカイラルパートナーとする描像がある一方、 $D\pi$ 散乱の共鳴状態として動的に生成された $D\pi$ 分子状態という議論もあり、その構造の理解に至っていない。我々は D_0^* メソンを記述するため、カイラル対称性とヘビーコーク対称性を尊重した枠組みに基づいてカイラルパートナー構造を導入し、さらにカイラル低エネルギー定理を満たす形で $D\pi$ 散乱方程式を解いた上で、生成された D_0^* 共鳴の性質を調べた。結果として、カイラルパートナー状態を散乱問題と結合させることで、実験で得られる D_0^* メソンの性質を再現できることを明らかにした。同時に、 D_0^* メソンの固有エネルギーを与える散乱振幅の極の位置がカイラル凝縮の変化に対して非常に敏感であることから、 $D\pi$ 分子状態成分の寄与が重要であることを明らかにした。

閾値近傍状態の構造と空間サイズ ハドロンや原子核のクラスター構造は閾値近傍にあらわれると期待され、特に s 波閾値近傍の束縛状態が空間的に広がった構造を持つことが知られている。この原因として、角運動量を持たない s 波の 2 体散乱はスケール不变な低エネルギー極限が取れること（低エネルギー普遍性）が挙げられる。一方で有限の角運動量を持つ高次の部分波では低エネルギー普遍性は成立せず、クラスター構造がどのように現れるかは明らかでない。我々は高次の部分波を含めて閾値近傍状態の大きさを調べるために、井戸型ポテンシャル模型で 2 体相互作用による束縛状態の平均 2 乗半径を解析的に導出し、束縛エネルギー依存性を解析した。結果として、 s 波だけでなく p 波の束縛状態も弱束縛極限で半径が発散するが、弱束縛極限の平均 2 乗半径の束縛エネルギー依存性に定性的な違いが現れることを示した。 s 波の場合は低エネルギー普遍性からポテンシャルの詳細（井戸の幅など）に依らずに束縛エネルギーから半径が決まるのに対し、 p 波の場合は弱束縛極限でも井戸の幅に依存して半径が決まるという性質があることを明らかにした。

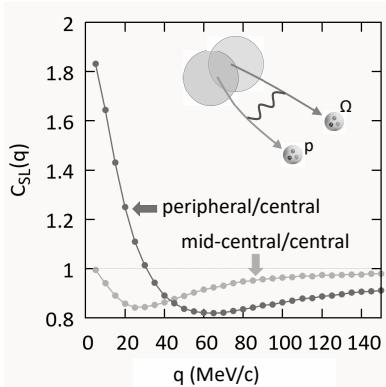


図 1: 衝突条件の異なる $p\Omega$ 相関関数の中心衝突との比

2. 研究業績

1) 論文

Y. Kamiya, T. Hyodo, K. Morita, A. Ohnishi, W. Weise: " $K^- p$ correlation function from high-energy nuclear collisions and chiral SU(3) dynamics", *Phys. Rev. Lett.*, **124** (2020) 132501

K. Morita, S. Gongyo, T. Hatsuda, T. Hyodo, Y. Kamiya, A. Ohnishi: "Probing $\Omega\Omega$ and $p\Omega$ dibaryons with femtoscopic correlations in relativistic heavy-ion collisions", *Phys. Rev. C*, **101** (2020) 015201

T. Sugiura, T. Hyodo: "Nature of the D_0^* meson in the $D\pi$ scattering with chiral symmetry", *Phys. Rev. C*, **99** (2019) 065201

2) 学会講演

● 日本物理学会 第75回年次大会 2020年3月16~19日（名古屋大学）

兵藤哲雄：閾値近傍状態の構造について

● 日本物理学会 2019年秋季大会 2015年9月17~20日（山形大学）

神谷有輝, 兵藤哲雄, 森田健司, 大西明: 高エネルギー衝突実験での $K-p$ 相関と反 K 中間子核子相互作用

● 第二回クラスター階層領域研究会 2015年5月31~6月1日（東京工業大学）

T. Hyodo: Exotic hadrons and emergent long range correlation in QCD

国際会議

● 2nd workshop "Clusters in quantum systems: from atoms to nuclei and hadrons" 2020年1月27~31日（Kyushu Univ., Fukuoka Japan）

T. Hyodo: Size and structure of near-threshold states

● Workshop "Physics of heavy-quark and exotic hadrons" 2020年1月27~29日（J-PARC, Ibaraki Japan）

T. Hyodo: $\Lambda(1405)$ as a hadronic molecule (Invited Talk)

● Universal physics in Many-Body Quantum Systems - From Atoms to Quarks 2019年10月7~11日（Trento, Italy）

T. Hyodo: $\Lambda(1405)$ as a hadronic molecule

● XVth Rencontres du Vietnam Perspectives in Hadron Physics 2019年9月22~29日（Quy Nhon, Vietnam）

T. Hyodo: Status of $\Lambda(1405)$ in chiral dynamics (Invited Talk)

● FemTUM19 2019年9月12~13日（München, Germany）

T. Hyodo: $\bar{K}N$ and ΩN interactions in effective field theory (Invited Talk)

- Chiral and heavy quark symmetries in quark-hadron physics 2019年8月25日 (Osaka Univ., Osaka Japan)

T. Hyodo: Nature of the D_0^* meson in $D\pi$ scattering with chiral symmetry

- XIII International Conference on Hadron Spectroscopy and Structure (HADRON2019) 2019年8月18日 (Guilin, China)

T. Hyodo: Dynamically generated hadron resonances (Plenary Talk)

非線形物理研究室

1. 研究活動の概要

1) トンネル分裂の異常増大とレベルダイナミクス

1次元の対称二重井戸ポテンシャル系では対称性の異なる状態のエネルギー固有値は、トンネル効果により指数関数的に小さなトンネル分裂を作る。同様の現象は2次元以上の系でも起こるが、一般に2次元以上の系は対応する古典系が非可積分になるため、そのトンネル分裂の性質は1次元のそれとは異なる。特に、プランク定数、もしくは系のパラメータの関数として、トンネル分裂の大きさが異常増大し、かつそれが持続することが多くの系で観察され、非可積分系の大きな特徴として注目されてきた。しかしながら、その現象の発見から既に20年経った現在でもその起源を明確に説明する理論は現れてない。ここでは、レベルダイナミクスと呼ばれる、系のパラメータ変化に対して固有値と固有関数が従うダイナミクスを考察することによって、トンネル分裂の異常増大持続の起源についての考察を行い、異常増大持続が発生する条件を解析的に求めた。そのことから、トンネル分裂の異常増大の持続は、可積分系のトンネル結合では起こり得ない領域間の遷移によってしか発生しないことが導かれ、さらに、非可積分系におけるトンネル分裂は、可積分系のそれとは違い、トンネル分裂に関わるエネルギー近傍の情報だけではなく、エネルギー空間上の大域的な相互作用によって起こることが明らかになった。

2) 強いカオス系の Perron-Frobenius 演算子の固有関数と有限時間アプローフ数

理想的なカオス系においては任意の観測量の相関関数は指数関数的に減衰することが期待されるものの、その緩和速度は相空間上どこでも等しくなるわけではない。例えば相空間内に微小な穴を開けたとき、その穴から軌道は指数関数的に速やかに脱出していくが、その指数は穴を開けた位置によって異なる値を取ることが知られている。ここでは、理想的にカオス的なハミルトン系のモデルである perturbed cat map における緩和の性質を Perron-Frobenius 作用素の固有関数、とくに、緩和過程にもっとも支配的と思われる、その固有値が1より小さい中で最も絶対値の大きい第二固有値に属する固有関数の性質を調べることより、理想カオス系（より正確には、一様双曲系）の緩和の空間的な非一様性を考察した。とくに、相空間内に置かれた微小領域が時間発展とともに変形していく際の拡大・縮小方向の変化率の有限時間での幾何平均として定義される有限時間 Lyapunov 指数が Perron-Frobenius 作用素の第二固有値に属する固有関数の値の空間的な分布と極めて類似したパターンを見出した。

3) 結合 Hénon 写像に対する位相馬蹄および一様双曲性の十分条件

自由度が3以上のハミルトン系、いわゆる多自由度ハミルトン系は、分野を問わず自然現象に広く現れる。高次元の力学系の多くは非可積分であり、位相空間には解の具体形を書き下すことのできない、極めて複雑な振る舞いをする軌道が現れる。カオス系を理解する上において、平衡点や周期軌道をはじめとする回帰的な性質をもった軌道の集合、すなわち非遊走集合に着目することは重要である。カオス系における非遊走集合上での軌道を特徴付ける性質として重要なことに、位相的馬蹄と一様双曲性がある。系がそれらの性質をもつと、力学系は記号力学系と呼ばれる、位相空間を粗視化した力学系と同一視することができ、対象となる力学系の性質を詳細に知ることができる。カオス系の研究では、2次元写像に対する研究が重ねられ、位相的馬蹄および一様双曲性をはじめとする諸性質の数学的検証や数値的研究には多くの蓄積がある。一方で、3体問題に代表される多自由度ハミルトン系の本質を抽出した高次元の写像系については、厳密な解析はもちろんのこと、位相空間の視覚化の困難さから、数値的な研究もまだそれほど多くはない。本論文では、エノン写像と呼ばれる、位相的馬蹄および一様双曲性に対する厳密な考察がなされている2次元写像を結合させた4次元写像系を考え、系が位相的馬蹄

を満たすための十分条件を求め、さらに、系が一様双曲性を満たすための十分条件に考えるための重要な手がかりを得た。

4) ローレンツガスにおけるガラス形成系的スローダイナミクス

過冷却状態にある液体がガラスになる際、僅かな温度変化や密度変化で粘性が急増することが知られている。この粘性の急増メカニズム(スローダイナミクス)については、古くから様々な議論があるが、多くの先行研究から、低温もしくは高密度状態において粒子が囲い込まれる、いわゆるケージ効果がその原因となっていることがわかっている。ケージ効果は、平均二乗変位や相関関数の中間時間領域にプラトーとなって現れ、低温または高密度になるに従ってプラトーが伸びる。一般的に過冷却液体におけるスローダイナミクスの起源は、ケージを作る多体系と結晶化を阻害するためのランダムネスであるとされるが、逆に、多体系やランダムネスをもたない系でどこまでガラスと類似の性質が現れるか、という観点からの系統的な研究はこれまであまり行われてこなかった。そこで、三角格子状に障害物となる円盤を固定しその隙間を1つの質点が障害物と衝突しながら運動するローレンツガスモデルを調べたところ、その平均二乗変位に多体系での結果と同様なプラトーが現れることが明らかになった。また、ケージ領域の平均滞在時間はローレンツガスの障害物の間隔の大きさに対して、モード結合理論と類似した幕的な振る舞いが現れることがわかった。これは力学系の研究で用いられる escape rate のホールの大きさ依存性から自然と導出することができる。

5) クエンチを跨ぐ“断熱サイクル”による準位反転

断熱サイクルによってミクロな量子系の定常状態は異なる定常状態へと遷移し得る。これは新奇な量子ホロノミーとして近年研究が進められてきた。この現象は熱力学での断熱準静サイクルの自明性と著しく対照的であることから、ミクロ系の量子ダイナミクスとマクロ系の量子ダイナミクスとを区別する基準となり得るものである。本年度は、より規模の大きなミクロ量子系での新奇な量子ホロノミーの可能性を調べた。具体的には一次元空間中に閉じ込められたボーズ粒子系に、鋭い不純物ポテンシャルを印加して作ることができる周期的な操作を考察した。不純物ポテンシャルの強度を ∞ から $-\infty$ にクエンチする過程では、系の定常状態が崩壊状態を除き滑らかに接続する、つまり、サイクル全体はほとんど断熱的とみなせる特徴がある。このサイクルでは準位反転と粒子間相互作用の間に競合があることを示した。さらに、この競合は燕の尾の型の分岐と符号することを示した。ここで論じたクエンチ操作は、Lieb-Liniger 模型の Tonks-Girardeau 領域から super-Tonks-Girardeau 領域にアクセスする方法として実験で調べられているものであり、本サイクルの実験的な実現が待望される（中村孝明氏および全卓樹教授（高知工科大）との共同研究）。

2. 研究業績

1) 論文

Yasutaka Hanada, Akira Shudo, Teruaki Okushima and Kensuke S. Ikeda: Renormalized Perturbation Approach to Instanton-noninstanton Transition in Nearly-integrable Tunneling Process, Phys. Rev. E, **99** (2019) 052201-1 (18 pages)

Hajime Yoshino, Ryota Kogawa, and Akira Shudo: Uniform Hyperbolicity of a Scattering Map with Lorentzian Potential, Condens. Matter, **5** (2020) 1-25.

2) 学会講演

- 日本物理学会 秋季大会 2019年9月10日-13日（岐阜大学）

古川涼太, 吉野元, 首藤啓 : Lorentzian 型ポテンシャルの散乱写像系における馬蹄条件と一様双曲条件

幸田遼之介, 首藤啓 : 非可積分系のトンネル効果の半古典論と複素安定多様体

花田康高, 管野皇太, Sudheesh Srivastava, 首藤啓, 池田研介 : level dynamics を用いたトンネル分裂の解析

池田研介, 花田康高, 首藤啓 : 非可積分量子写像のトンネル現象於けるインスタントン-非インスタントントン転移の一般的性質について

田中篤司, 中村孝明, 全卓樹 : クエンチを挟んだ断熱サイクルによるボーズ粒子系の準位反転

● 日本物理学会 年次大会 2020年3月16日-19日（名古屋大学 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 作用素の固有関数と有限時間 Lyapunov 指数

幸田遼之介, 首藤啓 : 非可積分系のトンネル効果の半古典論と複素安定多様体 II

中原祥博, 首藤啓 : ローレンツガスにおけるガラス形成形的スローダイナミクス

花田康高, 管野皇太, Sudheesh Srivastava, 首藤啓, 池田研介 : Level dynamics を用いたトンネル分裂の解析 II

池田研介, 花田康高, 首藤啓 : 非可積分トンネルの“古典特異性”：対応原理と非線形共鳴

● 第7回ハミルトン系とその周辺 2019年12月19日-20日（京都大学）

首藤啓 : 馬蹄条件および一様双曲性を満たす2次元保測散乱写像について（招待講演）

● 第18回 関東ソフトマター研究会 2019年8月19日（お茶の水女子大）

中原祥博, 首藤啓 : 周期的ローレンツガスにおける二段階緩和

● 第9回 ソフトマター研究会 2019年11月26日-27日（名古屋大学）

中原祥博, 首藤啓 : 周期的ローレンツガスにおける二段階緩和

● ワークショップ ガラス系物理の拡がり 2019年12月6日（首都大学）

中原祥博, 首藤啓 : ローレンツガスにおけるガラス形成形的スローダイナミクス

国際会議

● Microlocal Analysis and Asymptotic Analysis December 18-22, 2019 (RIMS, Kyoto University)

A. Shudo : Numerical verification of the exact WKB formula for the generalized Landau-Zener model (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LaFeAsO_{1-x}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Dy₂Ti₂O₇やHo₂Ti₂O₇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テ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テ近似の有効性を確認できた。また最近スピニアイスを含む古典フラストレートスピニ系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ニ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

Masao Iwamatsu and Hiroyuki Mori: “Effect of line tension on axisymmetric nanoscale capillary bridges at the liquid-vapor equilibrium,” Phys. Rev. E **100**, 042802 (2019).

Kenta Shiina, Hiroyuki Mori, Yutaka Okabe, and Hwee Kuan Lee: “Machine-Learning Studies on Spin Models,” Scientific Reports **10**, 2177 (2020).

Rei Hatsuda and Emiko Arahata: “Ground-state and Excitation Spectra of Bose Fermi Mixtures in a Three-Dimensional Optical Lattice,” J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 024601 (2020).

2) 和書

森弘之：「2 つの粒子で世界がわかる」講談社ブルーバックス（2019 年 5 月）

3) 学会講演

●日本物理学会 2019 年秋の分科会, 2019 年 9 月 10 日-13 日 岐阜大学柳戸キャンパス

藤本雅文, 大塚博巳: イジング模型の厳密解: Inversion 関係式とその一般化

大塚博巳, K.V. Nefedev, 岡部豊: 希釈スピニアイスの解析的数値的研究

●日本物理学会 第 75 回年次大会 2020 年 3 月 16 日-19 日 名古屋大学東山キャンパス

高橋岳志, 椎名拳太, 森弘之: ミクロカノニカル純粹状態の制限ボルツマンマシンによる生成

藤本雅文, 大塚博巳: イジング模型の厳密解: 三角・蜂の巣格子における Inversion 関係式

国際会議

●Deep Learning and Physics (DLAP2019) 2019年10月31日—11月2日 (Kyoto, Japan)

K. Shiina, H. Mori, Y. Okabe, and L. H. Kuan: Solving Schrodinger equation by deep learning with support of perturbation theory.

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。2019年度の研究室構成は、常勤教員2名、連携客員教授1名、客員教授1名、大学院生7名、卒研1名であった。以下は、2019年度に行った主な研究の概要である。

1) 磁場下における特異な強四極子秩序

強四極子秩序を示す $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ の磁場誘起相の発見は理論的に新たな機構が必要とされており、軌道秩序の物理を深く理解する上で重要な問題点である。本研究では、東京大学物性研究所の実験グループとの共同研究を行い、磁場下でのNMR、磁化、比熱測定等を詳細に理論計算と比較し、磁場中で誘起された四極子自由度のこれまで認識されていなかった相互作用の存在を提案した。通常、軌道の形が $3z^2 - r^2$ のような四極子自由度の強的秩序は磁場を印可した場合、転移はすぐに消失しクロスオーバーとなることが知られていた。しかしながら、 $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ の磁場中の実験結果はクロスオーバーにならず、転移が必ず起きていることを示している。また磁場の方向を変化させると、異なる振る舞いをすることも明らかになった。本研究では二次元の四極子自由度の秩序変数 (u, v) が $(2H_z^2 - H_x^2 - H_y^2)(u^2 - v^2) - 2\sqrt{3}(H_x^2 - H_y^2)uv$ の形の磁場 $\mathbf{H} = (H_x, H_y, H_z)$ の結合を持つことで、これらの実験結果が統一的に理解できることを示した。具体的には、NMR及び磁化測定から示唆される低磁場で安定となる強四極子秩序状態の安定性と、その転移磁場の方向依存性を同時に説明することができる。また、比熱の磁場角度依存性についても上記の結合がなければ説明できないことも明らかになった。今後はこの磁場と四極子自由度の結合についての微視的な機構の解明をする必要があり、更なる進展が期待される。

2) 一次元近藤格子模型における超伝導相関

重い電子系化合物である URhGe は強磁性と超伝導が共存する物質として注目を集めている。特にそのイジング異方性軸と垂直に磁場を印加した際に発現するリエントラント超伝導（一旦消失した超伝導が新たに発現すること）を念頭に、局在スピンと伝導電子が結合したミニマル模型である一次元の近藤格子模型を横磁場中で解析した。解析には一次元系においてほぼ厳密な密度行列くりこみ群を用いた。密度行列繰り込み群法は厳密対角化などでは計算できないほどのシステムサイズの系を解析することができ、有限サイズ外挿や切断パラメータの外挿を行うことでサイズ無限大の極限の知見を得ることのできる強力な手法である。本研究では、まず、横磁場 h_x および局在スピンと伝導電子の交換相互作用 J の $h_x - J$ 面内の相図を決定し、その後、超伝導相関関数の詳細な解析を行った。その結果、横磁場中において、近藤一重項が磁場によって破壊された領域の朝永・ラッティンジャー液体相において、奇 parity の超伝導相関が増強することを見出した。また、超伝導秩序変数として、これまで解析されたことがない複合粒子クーパー対の効果までを初めて解析し、その割合が非常に大きいことを明らかにした。磁場がない場合においても J について強結合の領域では、磁場下の超伝導とは異なる超伝導相関が強磁性状態で発達することも明らかになり、 URhGe の強磁性超伝導とそのリエントラント超伝導について、微視的な理解がかなり深まったと言える。

3) 超ウラン系における 2 チャンネル近藤効果

2 チャンネル近藤効果は、非フェルミ液体状態に起因する新奇物性の理解の観点から、長年にわたって研究されている。この 2 チャンネル近藤効果が現実に起こる可能性について、1987 年にコックスが、立方晶系 U 化合物を念頭に、 Γ_3 結晶場基底状態を持つ f^2 電子系において四極子自由度に関する 2 チャンネル近藤効果が生じることを指摘した。当初、U 化合物で実験研究がなされたが、その後、研究の舞台は Pr 化合物に移った。そして、1-2-20 系と呼ばれる $\text{PrT}_2\text{Al}_{20}$ (T は遷移金属) において、2 チャンネル近藤効果に特徴的な物理量の振る舞いが発見されるに至っている。最近、 f^2 以外の希土類あるいはアクチノイド系において、2 チャンネル近藤効果が生じる可能性を考察しているが、 $j-j$ 結合描像に基づいて考えると、 f^2 と f^4 の間に擬似的な電子・正孔関係があることから、 Γ_3 結晶場基底状態を持つ f^4 電子系においても、2 チャンネル近藤効果が生じる可能性があることに気づいた。そこで、 Γ_8 の 2 バンド伝導電子と混成する 7 軌道アンダーソン模型を数値繰り込み群法によって解析し、局所 f 電子数が 4 で Γ_3 結晶場基底状態の場合に、2 チャンネル近藤効果に特徴的な $0.5 \log 2$ の残留エントロピーが現れることを見出した。対応する物質について、 $5f^4$ となる Np^{3+} あるいは Pu^{4+} イオンを含む立方晶系超ウラン化合物、たとえば、Np 1-2-20 系の合成や実験が期待できると考えられる。

4) プルトニウム化合物の超伝導の微視的理論研究

2001 年に CeCoIn_5 が $T_c = 2.3\text{K}$ で超伝導になることが発見され、注目を集めたが、翌 2002 年に、 PuCoGa_5 において $T_c = 18.5\text{K}$ という重い電子系としては高温の超伝導が発見された。これらの結晶構造の擬 2 次元性を考慮すると、銅酸化物高温超伝導体と同様に、磁気ゆらぎによる d 波対形成の可能性が高いと考えられる。そうだとすると、 T_c は電子系のエネルギーでスケールされるので、Ce の $4f$ 電子系よりは遍歴性の強い Pu の $5f$ 電子系の方が高い T_c を示す、というのはもっともらしく思われる。しかし、2012 年に PuCoIn_5 が合成されたが、 $T_c = 2.5\text{K}$ であり、 PuCoGa_5 ではなく CeCoIn_5 とほぼ同じであった。これにより、Pu-115 の“高温”超伝導をどのように理解すればよいのか、という点が再び問題になっていた。本研究では、 Pu^{3+} の $5f^5$ 電子状態を $j-j$ 結合描像に基づいて考察し、 Γ_6 と Γ_7 の 2 軌道に関する 2 次元正方格子上のモデルを構築した。2 つの軌道状態は、全角運動量 $j = 5/2$ の z 成分で指定される状態 $|j_z\rangle$ を用いて、 $|\Gamma_6\rangle_{\pm} = |\pm 1/2\rangle$, $|\Gamma_7\rangle_{\pm} = \cos\theta|\pm 5/2\rangle + \sin\theta|\mp 3/2\rangle$ と表される。ここで、下付きの \pm は時間反転対称性から導入される擬スピンを表し、 θ は Γ_7 軌道の変形具合を表すパラメータである。この 2 軌道モデルにオンサイトクーロン相互作用を導入し、乱雑位相近似を適用して解析した。スピンおよび軌道感受率を計算してネール温度 T_N を求め、ギャップ方程式を数値的に解いて超伝導転移温度 T_c を計算した。 θ には、 Γ_7 が局在軌道となる特別な値 θ_0 があり、 θ_0 の近傍に磁気秩序ベクトル (π, π) の反強磁性状態が、さらにその周辺に d 波超伝導状態がそれぞれ現れることを見出した。そして、115 系に対する θ が θ_0 に近い値を取ることから、115 系において、 θ のわずかな違いで T_c が大きく変化する可能性があることを指摘した。

2. 研究業績

1) 論文

S. Kittaka, T. Taniguchi, K. Hattori, S. Nakamura, T. Sakakibara, M. Takigawa, M. Tsujimoto, A. Sakai, Y. Matsumoto, and S. Nakatsuji, “Field-Orientation Effect on Ferro-Quadrupole Order in $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ ”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **89**, 043701 (2020).

D. Matsui and T. Hotta, “Two-Channel Kondo Effect Emerging from Np and Pu Ions” *JPS Conf. Proc.* **30**, 011125 (2020).

K. Suzuki and K. Hattori, “Superconducting Correlations in the One-Dimensional Kondo Lattice Models under Magnetic Fields”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **89**, 034703 (2020).

T. Taniguchi, K. Hattori, M. Yoshida, H. Takeda, S. Nakamura, T. Sakakibara, M. Tsujimoto, A. Sakai, Y. Matsumoto, S. Nakatsuji, and M. Takigawa, “Field-Induced Switching of Ferro-Quadrupole Order Parameter in $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ ”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 084707 (2019).

谷口貴紀, 服部一匡, 中村翔太, 榊原俊郎, 酒井明人, 中辻知, 瀧川仁, “ $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ が示す磁場による強四極子秩序変数のスイッチング”, 新学術領域研究 *J-Physics: 多極子伝導系の物理 ニュースレター* **8**, pp. 4–9.

服部一匡, “四極子自由度のおりなす物理とその磁場効果”, 新学術領域研究 *J-Physics: 多極子伝導系の物理 ニュースレター* **8**, pp. 10–15.

T. Ishitobi and K. Hattori, “Magneto-electric Effects and Charge-imbalanced Solenoids: Antiferro Quadrupole Orders in a Diamond Structure’ *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 063708 (2019).

2) 学会講演

● 日本物理学会 第 75 回年次大会 2020 年 3 月 16 日 (月) – 19 日 (木) (名古屋大学東山キャンパス)

鈴木浩平, 服部一匡 : イジング異方性を持った横磁場中の一次元近藤格子模型における超伝導相関

溝尾義輝, 堀田貴嗣 : プルトニウム化合物の超伝導の微視的理論 : 2 軌道モデルに基づく解析

堀田貴嗣 : 2 チャンネル近藤状態とフェルミ液体状態の狭間に現れる量子臨界点

国際会議

● International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019, Okayama, September 23–28, 2019

T. Ishitobi and K. Hattori: Current-Induced Magnetization on a Diamond Structure under Antiferro Quadrupole Orders (Poster Awards Prize)

K. Suzuki and K. Hattori: Superconducting Fluctuations in $S=1$ One-Dimensional Kondo Lattice Model under Transverse Magnetic Fields

D. Matsui and T. Hotta: Two-Channel Kondo Effect Emerging from Np and Pu Ions

● International Conference on Frontiers of Correlated Electron Sciences, Tokyo, May 29–31, 2019

K. Suzuki and K. Hattori: Superconducting fluctuations in $S=1$ one-dimensional Kondo lattice model under transverse magnetic fields

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 ファクトリー実験を始めとする高エネルギー衝突型加速器実験の他、ニュートリノ振動実験や二重ベータ崩壊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で行われている国際共同実験 Belle II 実験に参加している。Belle II 実験は、世界最高輝度の電子・陽電子衝突型加速器 Super-KEKB で大量の B 中間子対およびタウ粒子対を生成し、衝突点を取り囲むように設置された粒子検出器 Belle II でそれらの崩壊を観測する、ルミノシティフロンティアの衝突型加速器実験である。Belle II 実験は、Phase 3 という本格的な物理データの収集が 2019 年春より開始され、データが蓄積されつつある。

Belle II 実験 Phase 3 のデータを用いて、フレーバーを変える中性カレント過程である B 中間子の放射崩壊 $B \rightarrow K^*\gamma$ 事象の探索を行った。Phase 3 初期の 2.62fm^{-1} の積分ルミノシティのデータを解析した結果、 35.5 ± 6.9 の信号事象を得て $B \rightarrow K^*\gamma$ を Belle II 実験において再発見した。本研究室では、Belle II 検出器の中でも前方エンドキャップ部において荷電 π 中間子と荷電 K 中間子の粒子識別を担う Aerogel RICH (ARICH) 検出器をこれまで開発してきた。ARICH 検出器は 420 個の光検出器からなる検出器であり、光検出器に供給する高圧電源や光検出器の読み出し回路等を含めると 1 万チャンネルを超える制御系が常に正しく動作している必要がある。本年度はこれらの制御系の異常検知システムを開発して組み込み、ARICH 検出器が安定にデータ収集できるようにし、また異常があった場合には迅速に対処ができるようにした。

さらに、ARICH 検出器が期待される粒子識別性能を持っているか調べるために、Phase 3 で得られた物理データのうち、荷電 D^* 中間子の崩壊 ($D^{*+} \rightarrow D^0\pi^+, D^0 \rightarrow K^-\pi^+$) を用いて、荷電 K 中間子および荷電 π 中間子に対して ARICH 検出器が実際に正しく粒子識別を行えているかどうかを調べた。その結果、ARICH 検出器が期待通りの粒子識別性能を示していることを確かめた。

現在の ARICH 検出器の運用と並行して、将来の ARICH 検出器の高度化に向けた研究開発も進めている。とくに、ARICH 検出器で用いている光検出器に代わる新しい光検出器の開発に取り組んでいる。その光検出器の候補として、シリコン光電子増倍管 (SiPM) の検討を行っている。SiPM は中性子に対する耐性が懸念されており、本年度は、J-PARC の中性子中間子実験施設における中性子照射試験を行った。現在そのデータについて解析を進めている。

2) T2K 実験

茨城県東海村の J-PARC で生成した大強度ニュートリノビームを、直線距離で 295km 離れた岐阜県飛騨市のスーパーカミオカンデ検出器で検出する長基線ニュートリノ振動実験である T2K 実験に参加している。T2K 実験は、ニュートリノを生成するニュートリノビームライン、生成したニュートリノを測定する前置検出器、および 295km の飛行後のニュートリノを観測するスーパーカミオカンデの 3 つの構成要素から成り立っており、本研究室では、とくにニュートリノビームラインおよび前置検出器に関する研究に参加している。T2K 実験では、ミュニニュートリノが 295km の飛行中に電子ニュートリノに変化する現象を 2013 年に発見し、現在は、それらの事象を用いてニュートリノの CP 対称性（粒子と反粒子の対称性）の破れの探索を行っている。 CP 対称性の破れを発見するためには、統計誤差とともに系統誤差も大きく削減していく必要があり、系統誤差の一つであるニュートリノと物質との相互

作用の不定性の削減を目指し、前置検出器のアップグレードを取り組んでいる。アップグレードされる検出器の一つとして、 1cm^3 角のシンチレータキューブを約 200 万個積み重ね、ニュートリノ反応を 3 次元的に捉える新しい検出器 SuperFGD の開発に本研究室では取り組んでいる。本年度は、東北大学の陽電子ビームを用いてシンチレータキューブへのビーム試験を行った結果から、ビームの通過したシンチレータキューブの周囲のキューブへの信号の漏れ（クロストーク）について詳細に調べた。また、SuperFGD の光信号の読み出しに用いる約 6 万本の波長変換ファイバーおよび約 6 万個の光検出器の健全性を調べるためのキャリブレーションシステムの開発も進め、実用的な仕様がほぼ固まった。

3) DCBA 実験

ニュートリノレス二重ベータ崩壊の探索に向けた実験装置の開発を行っている。ニュートリノは電荷を持たないため、電子と同じように粒子と反粒子が異なる粒子（ディラック粒子）であるか、粒子と反粒子が同じ粒子（マヨラナ粒子）であるか、分かっていない。その性質（ニュートリノのマヨラナ性）を調べる唯一の手段が、ニュートリノレス二重ベータ崩壊の探索である。世界各地で様々な実験が提案されその探索が行われているが、まだ発見には至っていない。本研究室では、二重ベータ崩壊で放出される二本のベータ線の飛跡を一様磁場中のガス飛跡検出器で捉え、ベータ線の螺旋状の飛跡から運動量を測定する実験装置 Drift Chamber Beta-ray Analyzer (DCBA) の開発を、高エネルギー加速器研究機構などと共に行っている。

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 の開発に引き続き取り組んだ。DCBA-T3 のドリフトチャンバーの性能を宇宙線ミュオンを使って調べ、ドリフトチャンバーの外部に設置した飛跡検出器と DCBA-T3 用ドリフトチャンバーで得られる飛跡が一致することを確かめた。また、本実験で使用するヘリウムと二酸化炭素の混合ガスにおける電離電子のドリフト速度についても調べ、文献値（他の実験用のシミュレーションデータ）と矛盾が無い結果を得た。

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に、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、一連の調査を行ってきた。現在は、岩手県立大学などを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、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行なっている。昨年度末に 2 台目の観測装置を設置し、本年度は 2 台体制で岩手山の観測を行った。2 台の観測装置は障害等による停止期間もなく常時観測を継続している。

5) ATLAS 実験

ATLAS 実験は、ヨーロッパ原子核研究機構 (CERN) で行われている衝突型加速器実験であり、世界最高エネルギーで陽子と陽子を衝突させ、ヒッグス粒子の性質を調べたり、超対称性理論などの標準模型を超えた新物理の探索を行っている。

今まで重心系エネルギー 13TeV で実験を行ってきたが、2021 年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、加速器の運転が停止され、検出器の研究開発が行われている。

本研究室は、HL-LHCでの実験に用いられる予定の、ATLAS検出器最内層で飛跡検出を行う ITk(Inner Tracker) の開発に参加している。ITk は、シリコン・ピクセル検出器に電子回路基板が取り付けられた構造をしているが、実験中の温度変化によって、素材の膨張率の違いにより、電気接点が剥がれることが懸念されている。2019 年度は、様々な素材の熱膨張が、どのような歪みをもたらすかを、恒温槽中で確認する実験を行った。

6) 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。

2019 年度は実験の統計精度を向上させるため、データ収集を継続した。

2. 研究業績

1) 論文

K. Chu *et al.* (Belle Collab.), “Study of $B \rightarrow p\bar{p}\pi\pi$ ”, Phys. Rev. D **101**, no.5, 052012 (2020)

Y. Li *et al.* (Belle Collab.), “Measurements of the Branching Fractions $\mathcal{B}(B^- \rightarrow \bar{\Lambda}_c^-\Xi_c'^0)$, $\mathcal{B}(B^- \rightarrow \bar{\Lambda}_c^-\Xi_c(2645)^0)$ and $\mathcal{B}(B^- \rightarrow \bar{\Lambda}_c^-\Xi_c(2790)^0)$ ”, Phys. Rev. D **100**, no.11, 112010 (2019)

M. Prim *et al.* (Belle Collab.), “Search for $B^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ and $B^+ \rightarrow \mu^+ N$ with inclusive tagging”, Phys. Rev. D **101**, no.3, 032007 (2020)

S. Jia *et al.* (Belle Collab.), “Observation of a vector charmoniumlike state in $e^+e^- \rightarrow D_s^+D_{s1}(2536)^- + c.c.$ ”, Phys. Rev. D **100**, no.11, 111103 (2019)

P. Katreko *et al.* (Belle Collab.), “Observation of the radiative decays of $\Upsilon(1S)$ to χ_{c1} ”, Phys. Rev. Lett. **124**, no.12, 122001 (2020)

G. Caria *et al.* (Belle Collab.), “Measurement of $\mathcal{R}(D)$ and $\mathcal{R}(D^*)$ with a semileptonic tagging method”, Phys. Rev. Lett. **124**, no.16, 161803 (2020)

P. Resmi *et al.* (Belle Collab.), “First measurement of the CKM angle ϕ_3 with $B^\pm \rightarrow D(K_S^0\pi^+\pi^-\pi^0)K^\pm$ decays”, JHEP **10**, 178 (2019)

Y. Jin *et al.* (Belle Collab.), “Observation of $\tau^- \rightarrow \pi^-\nu_\tau e^+e^-$ and search for $\tau^- \rightarrow \pi^-\nu_\tau \mu^+\mu^-$ ”, Phys. Rev. D **100**, no.7, 071101 (2019)

S. Jia *et al.* (Belle Collab.), “Search for $\Omega(2012) \rightarrow K\Xi(1530) \rightarrow K\pi\Xi$ at Belle”, Phys. Rev. D **100**, no.3, 032006 (2019)

P. Chou *et al.* (Belle Collab.), “Search for $B^0 \rightarrow X(3872)\gamma$ ”, Phys. Rev. D **100**, no.1, 012002 (2019)

R. Mizuk *et al.* (Belle Collab.), “Observation of a new structure near 10.75 GeV in the energy dependence of the $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(nS)\pi^+\pi^-$ ($n = 1, 2, 3$) cross sections”, JHEP **10**, 220 (2019)

Y. Li *et al.* (Belle Collab.), “First measurements of absolute branching fractions of the Ξ_c^+ baryon at Belle”, Phys. Rev. D **100**, no.3, 031101 (2019)

Y. Lai *et al.* (Belle Collab.), “Measurement of branching fraction and final-state asymmetry for the $\bar{B}^0 \rightarrow K_S^0 K^\mp \pi^\pm$ decay”, Phys. Rev. D **100**, no.1, 011101 (2019)

V. Bhardwaj *et al.* (Belle Collab.), “Search for $X(3872)$ and $X(3915)$ decay into $\chi_{c1}\pi^0$ in B decays at Belle”, Phys. Rev. D **99**, no.11, 111101 (2019)

B. Pal *et al.* (Belle Collab.), “Evidence for the decay $B^0 \rightarrow p\bar{p}\pi^0$ ”, Phys. Rev. D **99**, no.9, 091104 (2019)

I. Adachi *et al.* (Belle II Collab.), “Search for an Invisibly Decaying Z' Boson at Belle II in $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-(e^\pm\mu^\mp)$ Plus Missing Energy Final States”, Phys. Rev. Lett. **124**, no.14, 141801 (2020)

F. Abudin é n *et al.* (Belle II Collab.), “Measurement of the integrated luminosity of the Phase 2 data of the Belle II experiment”, Chin. Phys. C **44**, 021001 (2020)

L. Burmistrov *et al.*, “Belle II aerogel RICH detector”, Nucl. Instrum. Meth. A **958**, 162232 (2020)

S. Tamechika *et al.*, “Development of alignment algorithm for Belle II Aerogel RICH counter”, Nucl. Instrum. Meth. A **952**, 162337 (2020)

M. Yonenaga *et al.*, “Performance and commissioning of HAPDs in the Aerogel RICH counter”, Nucl. Instrum. Meth. A **952**, 162264 (2020)

R. Pestotnik *et al.*, “Calibration of the Belle II aerogel ring imaging detector”, Nucl. Instrum. Meth. A **952**, 161800 (2020)

H. Kindo *et al.*, “Initial performance of the Aerogel RICH detector of the Belle II experiment”, Nucl. Instrum. Meth. A **952**, 162252 (2020)

R. Pestotnik *et al.*, “Front-end electronics of the Belle II aerogel ring imaging detector”, Nucl. Instrum. Meth. A **952**, 161711 (2020) doi:10.1016/j.nima.2018.12.026

M. Mrvar *et al.*, “First experience with Belle II Aerogel RICH detector”, Nucl. Instrum. Meth. A **936**, 552-553 (2019)

K. Abe *et al.* (T2K Collab.), “Search for Electron Antineutrino Appearance in a Long-baseline Muon Antineutrino Beam”, Phys. Rev. Lett. **124**, no.16, 161802 (2020)

K. Abe *et al.* (T2K Collab.), “Measurement of neutrino and antineutrino neutral-current quasielasticlike interactions on oxygen by detecting nuclear deexcitation γ rays”, Phys. Rev. D **100**, no.11, 112009 (2019)

K. Abe *et al.* (T2K Collab.), “Measurement of the muon neutrino charged-current single π^+ production on hydrocarbon using the T2K off-axis near detector ND280”, Phys. Rev. D **101**, no.1, 012007 (2020)

K. Abe *et al.* (T2K Collab.), “Measurement of the ν_μ charged-current cross sections on water, hydrocarbon, iron, and their ratios with the T2K on-axis detectors”, PTEP, Volume 2019, Issue 9, 093C02 (2019)

B. Adeva *et al.* “First Measurement of a Long-Lived $\pi^+\pi^-$ Atom Lifetime”, Phys. Rev. Lett. **122**, 082003 (2019)

2) 学会講演

- 日本物理学会 2019 年秋季大会 2019 年 9 月 17~20 日（山形大学）

Belle II 実験 ARICH 検出器アップグレードに向けた光検出器 MPPC の研究

久世健太郎, 岩田修一, 柿本詩織, 角野秀一, 渕田哲郎, 小林将騎, 住吉孝行, 為近彩智, 米永匡伸, 他

Belle II 実験 ARICH 検出器アップグレードのための光検出器 MPPC 用 ASIC の開発

鶴藤昌人, 岩田修一, 柿本詩織, 角野秀一, 久世健太郎, 渕田哲郎, 小林将騎, 住吉孝行, 為近彩智, 米永匡伸, 他

T2K 前置検出器改良のための LED 較正装置の開発と性能評価

在原拓司, 粟田口唯人, 角野秀一, 他 T2K Collaboration

二重ベータ崩壊実験 DCBA の現状

堀悠平, 角野秀一, 浜津良輔, 住吉孝行, 他

- 日本物理学会 第 75 回年次大会 2019 年 3 月 16~19 日（名古屋大学）

T2K 前置検出器改良における多チャンネル光検出器のリアルタイム較正装置の開発と性能評価

在原拓司, 粟田口唯人, 角野秀一, 他 T2K Collaboration

Belle II 実験 ARICH の光検出器アップグレードに向けた研究 2

鶴藤昌人, 岩田修一, 柿本詩織, 角野秀一, 久世健太郎, 渕田哲郎, 小林将騎, 住吉孝行, 為近彩智, 米永匡伸, 他

Belle II 実験 ARICH 検出器における異常検知システムの開発

小林将騎, 岩田修一, 柿本詩織, 角野秀一, 久世健太郎, 渕田哲郎, 住吉孝行, 為近彩智, 鶴藤昌人, 米永匡伸, 他

国際会議

- The 40th Anniversary Symposium of the US Japan Science and Technology Cooperation Program in High Energy Physics, Hawaii, April 14-18, 2019,

T. Arihara, “Development of LED Calibration System with Light Guide Plate for ND280 Upgrade”

- 29th International Symposium on Lepton Photon Interactions at High Energies (LP2019), Toronto, Canada, Aug. 5-10, 2019

M. Yonenaga, “Early physics prospects for radiative and electroweak penguin decays at Belle II”

- 18th International conference on B-Physics at Frontier Machines (BEAUTY 2019), Ljubljana, Slovenia, Sept. 30-Oct. 4, 2019

M. Yonenaga, “Rare decays studies using early Belle II data”

原子物理実験研究室

1. 研究活動の概要

昨年度と同様に、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充分だった。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、充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。昨年度から、 C_4^- および C_6^- の研究から確立された手法を用いて、より複雑な C_8^- の冷却速度を測定する実験を開始した。

(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。昨年度から始めたペンタセン実験はすでにデータを取り終え解析したところ、その冷却過程が従来と異なっていることが明らかになった。そこで、現在は理論的なアプローチから新しいモデルを模索中である。

(3) 二原子分子負イオン :

光子を吸収した分子は電子脱励起によるけい光放出で急速に冷却されるか、内部転換によりその電子的エネルギーを振動エネルギーへと再分配する。また内部転換後に再び電子的エネルギーへと分配する過程も存在するため、多原子分子負イオンにおいて直接電子脱離よりも時間的に遅い遅延電子脱離過程がこれまで報告されている。一方で、2 原子分子はその状態数の少なさから電子励起状態と振動励起状態の振電カップリングによる内部転換が起こりづらいため、これまで遅延電子脱離過程は起きないと考え

られており報告もされていない。昨年度から、 Si_2^- の実験を TMU E-ring を用いて開始し始めた。周回蓄積された Si_2^- にレーザー光を照射し、光電子脱離により中性化した Si_2 をリングの半周ごとに置かれた 2 つの検出器を用いて検出した。イオン蓄積リングにより等核 2 原子分子である Si_2^- の速い電子脱離と遅延電子脱離を時間的に分離し、10 μs オーダーの遅延電子脱離過程の観測に成功した。さらに波長可変 OPO レーザーを用いて励起波長を掃引することで Si_2^- の振動・回転励起スペクトルを測定した。 Si_2^- は基底状態である $X^2\Sigma_g^+$ 状態のわずか 200 cm^{-1} 上に $A^2\Pi_u$ 状態が存在しており、この $A^2\Pi_u$ 状態から中性基底状態の $^3\Sigma_g^-$ へは許容遷移である。このため、励起直後に観測された即発信号は $A^2\Pi_u \rightarrow ^3\Sigma_g^-$ の遷移による速い電子脱離過程である。一方で、半周後に観測された遅延信号は $X^2\Sigma_g^+ \rightarrow B^2\Sigma_u^+$ から振電相互作用を経て中性 Si_2 へ遷移した遅延電子脱離過程である。この結果から、中間状態として $A^2\Pi_u$ が関与する Si_2^- の遅延電子脱離過程の機構を明らかにした。

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で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充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) 極端紫外分光器の検出感度校正 :

keV/u 程度の低速の多価イオンと中性標的気体との衝突においては、標的から多価イオンに電子が移行して高励起状態が生成する過程が非常に大きな断面積を有している。この過程によって生成した高励起状態からの発光を観測することで、電子移行断面積を測定するだけでなく、新しい光学的遷移、延いてはエネルギー準位を求める方法は電荷交換分光 (Charge Exchange Spectroscopy) と呼ばれている。遷移波長の決定だけであれば、発光の検出感度の情報は必要ではないが、断面積に関するデータを取得するためには、波長に依存する検出感度の絶対値が必要である。本研究室で用いている極端紫外領域用の斜入射分光検出システムは、金でコーティングされた集光用のシリンドリカル・ミラー、可動式スリット、収差補正型平面結像用凹面ラミナーレプリカ回折格子、電子冷却型 CCD カメラから構成されている。3 つの光学素子（ミラー、回折格子、CCD）の効率は顕著な波長依存性を持っているが、それについて決定することは容易ではない。また、集光ミラーとスリットが見込んでいる立体角を設計図から見積ることは可能であるが、その精度は高く信頼できるものではない。通常は強度の絶対値が判っている光源を用いて、観測された強度との比較から分光システム全体の感度を決定するが、数年前から信頼できる発光断面積の絶対値と比較する方法を開発してきた。裸および He 様の軽元素 (C, N, O) イオンと He 標的の衝突における電子状態ごとの電子移行断面積が、既に北京・応用物理計算数学研究所の王建国教授のグループによって計算されている。この断面積を用いたカスケード・モデルを数値的に解くことで、ここの遷移に対する発光断面積の絶対値を計算するプログラムを 2 年前に開発した。今年度は C^{6+} , C^{4+} , N^{5+} , および O^{6+} をビームとして衝突実験を行い、2–31 nm の波長範囲の 14 本の輝線について、発光断面積と観測強度の比として絶体検出感度を求めた。その結果を用いて、電子が多価イオン側に移行すると同時に励起が起こることで生成した $\text{He}^+(2p)$ の 1s–2p 遷移について発光断面積を求めたところ、過去の報告値と整合のある一致が見られた。

(2) 分子標的におけるフラグメント原子イオンの発光 :

2016 年の実験で、多価 Ta イオンと N_2 や O_2 を衝突させた際に、N 原子や O 原子の多価イオンからの発

光が極端紫外線領域に初めて観測された。この現象の詳細を理解する目的で、多価 Xe イオンを用いた実験を行ってきた。この研究は今年度も帰国留学生短期研究支援制度によって約 1 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。今年度は 12–15 倍の Xe イオンと N₂ 分子の系統的な測定を行った。まず、発光強度と標的気体圧力が比例することを確認した。この事実は、多価 Xe イオンとの衝突によって標的から生成した多価フラグメント原子イオンが、標的気体と衝突することで発光するという二次反応は殆ど起こっていないことを意味している。従って、多価フラグメント原子イオン (N⁴⁺(1s²3d), N³⁺(1s²2s3p) など) は Xe イオンとの衝突によって直接生成することが確認できた。さらに、今年度決定できた絶体検出感度を用いて、この励起フラグメントイオンからの発光断面積を求めたところ、1–3 Å² という値が得られた。この値は予想して値より 10 倍以上大きく、多価イオンが標的分子の電子雲の中に直接飛び込んで励起と解離を同時に起こす内殻電子励起過程が主たる機構ではないことを意味している。さらに詳細なメカニズムを解明するために、今後も系統的な実験を継続していく予定である。

(3) 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充分であるため、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 倍程度であり、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。昨年度までに 4–5 倍の Er イオンと Ar および N₂ との衝突実験を行ってきたが、発光強度が非常に弱いために 1–2 時間程度の長時間露光が必要であった。そのため、広い波長領域を同時に観測できる低分散回折格子を備えた新しい分光器を導入した。

(4) 電子ビームイオントラップへの中性水素原子ビーム入射システムの開発 :

従来の電荷交換分光では、多価イオンビームと中性気体標的の組み合わせで実験が行われているため、発光寿命が ns 以上ある場合は衝突領域からの発光強度が極端に弱く測定は不可能であった。ms 以上の長寿命の場合には、衝突領域を通過した励起多価イオンをイオントラップに導入し、閉じ込めた多価イオンからの発光を観測するに成功したが、発光断面積の測定は原理的に無理であった。そこで、閉じ込めた多価イオンに中性原子ビームを照射して電荷移行反応を起こさせ、励起イオンを閉じ込めたまま発光を観測する実験を計画した。今年度は、中性水素原子ビーム源の開発に着手した。まず、強力な H⁺ ビーム源について検討し、2.45 GHz のマイクロ波を用いたプラズマイオン源を導入することにした。水素プラズマには H⁺ 以外に H₂⁺ と H₃⁺ が同時に存在するため、製造メーカーにおいて引き出したイオンビームの質量分析を行い、プラズマチャンバーの圧力が低い場合には 100% が H⁺ であることを確認した。

3) 超流動ヘリウム液滴を用いた冷却分子イオン生成

高圧ノズルから He 気体を噴出させると 0.4 K の液滴が生成する。この液滴は超流動性を示し、衝突した分子を内部に容易に取り込む性質を持っている。理化学研究所において、ヘリウム液滴にアニリン C₆H₅NH₂ 分子を取り込み、レーザー光イオン化によって生成したイオンの質量スペクトルを測定した。殆どは一価のアニリンイオンに多数の He が結合したクラスターイオンであるが、多価のアニリンイオンが検出されたり、アニリンダイマーイオンが生成されたときには He は結合していないなど、興味深い

結果が得られており、条件を変化させた様々な測定を行いながら、生成機構に関する考察を進めている。

2. 研究業績

1) 論文

Y. Nakano, R. Igosawa, S. Iida, S. Okada, M. Lindly, S. Menk, R. Nagaoka, T. Hashimoto, S. Yamada, T. Yamaguchi, S. Kuma, and T. Azuma: Status of the laser spectroscopy and merged-beam experiments at RICE, *JPS Conf. Proc.* *in press*.

H. Tanuma and N. 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, *NIFS-PROC* **114**, 1–4 (2019).

2) 学会講演

● 原子衝突学会第 44 回年会 2019 年 9 月 5 日～6 日（電気通信大学）

飯田進平, 久間晋, 松本淳, 古川武, 田沼肇, 城丸春夫, 東俊行, V. Zhaunerchyk, K. Hansen : 高温 Si_2^- の振動・回転励起に伴う遅延電子脱離過程の発見（ホットトピック講演）

井口有紗：光イオン化による 0.4 K のヘリウム液滴内包分子イオンの生成（ホットトピック講演）

田沼肇：多価イオンの電荷移行反応とその断面積（招待講演）

● 日本物理学会 2019 年秋季大会 2019 年 9 月 10 日～13 日（岐阜大学）

飯田進平, 久間晋, 松本淳, 古川武, 田沼肇, 城丸春夫, 東俊行, V. Zhaunerchyk, K. Hansen : Si_2^- の振動回転状態を経由した遅延電子脱離

飯澤正登実, 飯田進平, 久間晋, 東俊行, 中野裕司 : 合流ビーム実験に向けた中性ビーム源の開発 III

野田悠祐, 田沼肇 : 低温ヘリウム気体中における CS_2^+ イオンの移動度

● 第 20 回分子分光研究会 2020 年 3 月 9 日～10 日（北里大学・相模原キャンパス）

井口有紗, 久間晋, 田沼肇, 東俊行 : 超流動ヘリウム液滴中アニリンの光イオン化スペクトル

飯田進平, 久間晋, 松本淳, 古川武, 田沼肇, 城丸春夫, 東俊行, V. Zhaunerchyk, K. Hansen : Si_2^- の振電相互作用を伴う遅延電子脱離過程

● 日本物理学会 第 75 回年次大会 2019 年 3 月 16 日～19 日（名古屋大学・東山キャンパス）

飯田進平, 久間晋, 松本淳, 古川武, 田沼肇, 城丸春夫, 東俊行, V. Zhaunerchyk, K. Hansen : Si_2^- の振動・回転状態を反映した遅延脱離による電子励起スペクトル

国際会議

● International Workshop on Atomic and Molecular Data for Plasma Applications, Sapporo, Japan, 14 July, 2019

H. Tanuma: Mobility measurements for small molecular ions cooled helium gas (invited)

- XXXI International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarm, Belgrade, Serbia, 17–21 July, 2019

H. Tanuma: Crude potential model for mobility of polyatomic molecular ions in nitrogen and oxygen gases using the MOBCAL (poster)

- 31st International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions, Deauville, France, 23–30 July, 2019

M. Iizawa, S. Iida, S. Kuma, T. Azuma, and Y. Nakano: Photodetachment of negative ion beams for the ion-neutral merged-beam experiments at RICE (poster)

T. Yamazaki, K. Mori, and H. Tanuma: Separation of electronic states for small molecular ions by the mobility measurements in cooled He gas (poster)

H. Tanuma, N. Numadate, Y. Yamada, and T. Ohna: Charge exchange UV-Visible and EUV spectroscopy of multiply charged heavy ions (poster)

A. Iguchi, H. Otani, S. Kuma, H. Tanuma, and T. Azuma: Production of cold molecular ions in superfluid helium droplets (poster)

S. Iida, S. Kuma, J. Matsumoto, T. Furukawa, H. Tanuma, H. Shiromaru, T. Azuma, V. Zhaunerchyk, and K. Hansen: High-resolution excitation spectroscopy of delayed detachment of Si_2^- (poster)

- 8th International Workshop on Electrostatic Storage Devices, Tianjin, China, 26–30 August, 2019.

S. Iida, S. Kuma, J. Matsumoto, T. Furukawa, H. Tanuma, H. Shiromaru, T. Azuma, V. Zhaunerchyk, and K. Hansen: High-resolution spectroscopy of Si_2^- stored in the TMU E-ring (invited)

- 15th International Workshop on Slow Positron Beam Techniques and Applications, Prague, Czech Republic, 2–6 September, 2019

Y. Nagashima, K. Michishio, L. Chiari, Y. Nagata, H. Terabe, S. Iida, F. Tanaka, T. Iizuka, and N. Oshima: Progress in the study of energy tunable Ps beams employing the Ps^- photodetachment technique (invited)

3) 学会誌等

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を用いた観測装置 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、銀河間物質探査を目指す Super DIOS 計画や、地球磁気圏探査 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 線望遠鏡の開発のほか、理研、産総研ほかと協力して TES カロリメータを用いた地上実験も進めた。

1) 「すぐく」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。特に、「すぐく」が発見した木星からの広がった硬 X 線放射の解明を目指して、太陽活動が極小に向かった 2006 年だけでなく、極大付近となった 2012 年、2014 年の「すぐく」観測とさらに 2014 年の XMM-Newton 衛星の木星本体の観測データを組み合わせた系統解析から、本放射の長期的な変動の有無と、磁気圏粒子モデルとの比較による高エネルギー粒子の空間・エネルギー分布への制約を行った。

2) 次期 X 線天文衛星 XRISM の開発

X 線分光撮像衛星 XRISM (X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission) は、日米協力で開発中の国際的な大型 X 線天文台であり、2022 年度頃の打ち上げを目指して開発を進めている。首都大の石崎は搭載装置の目玉である X 線マイクロカロリメータ Resolve の PI (Principal Investigator) であり検出器システム全体の責任を負うほか、江副が冷却系、なかでも超流動 He 排気系なども担当している。2019 年度は装置の Flight Model 品の製作と組み上げを行い、新居浜での冷却試験を実施して、目標性能である 5 eV at 5.9 keV (FWHM) のエネルギー分解能を達成した。

3) 地球磁気圏探査衛星 GEO-X の開発

GEO-X は世界初の地球磁気圏の X 線撮像を目指す、50 kg 級超小型衛星計画である。X 線天文衛星の観測で見つかってきた地球周辺からの電荷交換 X 線放射を用いる。次期太陽活動極大期 2022 年頃の打ち上げを目指す。首都大の江副が PI となり、JAXA・東大、北海道大、名古屋大、関東学院大ほかが参画しており、2019 年度 JAXA 小規模計画に応募した。首都大は主に搭載する X 線撮像分光装置と衛星計画全体の取りまとめを担当しており、2019 年度は望遠鏡などの試作品を製作しての X 線評価試験、打ち上げ環境試験を行って、順調に進んでいる。

4) TES カロリメータの開発と地上実験

SuperDIOS を目指した TES 素子のインハウス製作を行った。超伝導 Nb 配線を積層した低ノイズ型であり、Ti/Au の二重薄膜からなる TES の上に Au 吸収体を電子線蒸着し、最後に熱浴となる Si 基板と TES の間の熱リンクとなる SiN/SiO₂ メンブレンを形成して完成する。これまでに 20 × 20 アレイとして完成させた TES の残留抵抗が 50 mΩ 程度と大きく、エネルギー分解能が 95 eV (FWHM) と、Super DIOS で要求される < 5 eV に対して不十分であった。TES 成膜前に基板の裏に熱浴との熱伝導を上げる Ti をスパッタすることで、成膜後の残留抵抗を数 mΩ に抑えたが、吸収体とメンブレン形成をすると残留抵抗は約 30 mΩ に上昇し、将来的な課題となった。

米国 NIST 製の 240 素子からなる TES カロリメータをもちいて、理研、産総研ほかと協力して地上実験を進めた。J-PARC では、K 中間子ヘリウム原子の出す特性 X 線のエネルギー・シフト精密に測定し、強い相互作用ポテンシャルの深さをはじめて正確に求めた。また、SPring-8 では、「はやぶさ 2」が持ち

帰る小惑星サンプルの分析を念頭に、さまざまな物質のX線吸収端構造(XANES)を優れたエネルギー分解能で測定し、将来のX線分析への見通しを得た。

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、衛星搭載へ向け性能向上を進めている。

将来衛星計画GEO-Xを目指して、反射鏡となる微細穴側壁の形状精度の向上に取り組んだ。高温でSi原子の拡散を促して平滑化する高温アニールに着目して、従来にない150時間の長時間アニールを東北大にて実施して側壁の平坦性を触針計やX線を用いて評価した。その結果、50時間では10分角(FWHM)であった光度ピークが150時間では3分角(FWHM)にまで向上した。また、GEO-Xで要求される広がった天体に関する $\text{Grasp} > 10 \text{ cm}^2 \text{ deg}^2$ at 0.6 keVを満たす光学系パターンを光線追跡シミュレーションによって評価した。

6) Super DIOSの検討

宇宙のバリオンの多くを占めると考えられる、温度が数100万度の銀河間物質(ダークバリオン)を酸素の輝線(OVII, OVIII)で検出するために、Super DIOS(Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor)の検討を2030年台はじめ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。JAXA宇宙研にリサーチグループ(主査: 埼玉大、佐藤浩介)の設置を申請し認められた。

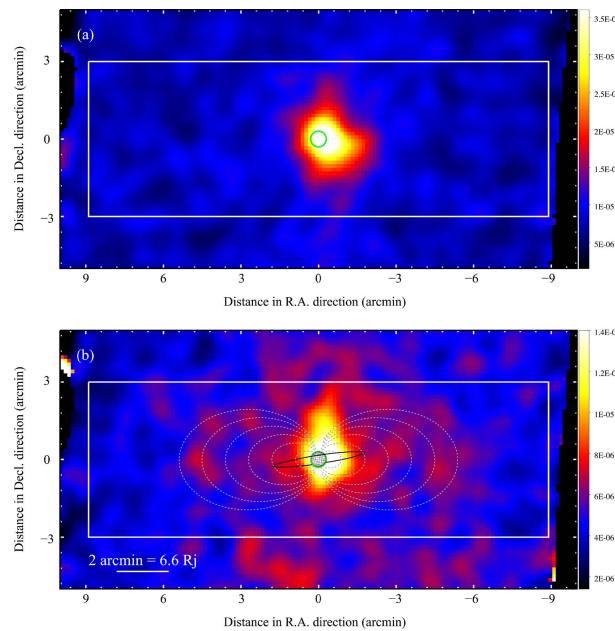


図1: 2006年に「すばく」で観測された木星のX線画像。上が0.4–1 keVの軟X線、下が1–5 keVの硬X線の画像。緑色の丸が木星のサイズを示しており、硬X線で広がったX線放射がみえる(Numazawa et al. 2019, PASJ 71, Issue 5, id.93)。

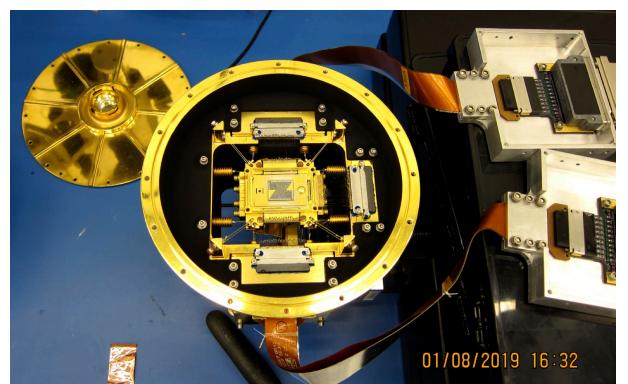


図2: XRISM衛星に搭載される観測装置Resolveのマイクロカロリメータ検出器のフライトモデルの写真。アメリカのNASAゴダード宇宙飛行センターで製作され、断熱消磁冷凍機と組み合わされた後に日本へ運搬、住友重機械工業の新居浜工場で液体ヘリウムデュワに組み込まれた。

2. 研究業績

1) 論文

Katsuda, Satoru; Ohno, Masanori; Mori, Koji; Beppu, Tatsuhiko; Kanemaru, Yoshiaki; Tashiro, Makoto S.; Terada, Yukikatsu; Sato, Kosuke; Morita, Kae; Sagara, Hikari; Ogawa, Futa; Takahashi, Haruya; Murakami, Hiroshi; Nobukawa, Masayoshi; Tsunemi, Hiroshi; Hayashida, Kiyoshi; Matsumoto, Hironori; Noda, Hirofumi; Nakajima, Hiroshi; Ezoe, Yuichiro Tsuboi, Yohko; Maeda, Yoshitomo; Yokoyama, Takaaki; Narukage, Noriyuki: Inverse First Ionization Potential Effects in Giant Solar Flares Found from Earth X-Ray Albedo with Suzaku/XIS, *The Astrophysical Journal*, **891**, Issue 2, id.126, 19 pages, DOI: 10.3847/1538-4357/ab7207 (03/2020)

Ezoe, Yuichiro; Hamaguchi, Kenji; Fukushima, Aoto; Ogawa, Tomohiro; Ohashi, Takaya: Suzaku observation of diffuse X-ray emission from a southwest region of the Carina Nebula, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **71**, Issue 6, id. 122, 26 pages, DOI: 10.1093/pasj/psz107 (12/2019)

Numazawa, Masaki; Ezoe, Yuichiro; Ishikawa, Kumi; Ohashi, Takaya; Miyoshi, Yoshizumi; Kimura, Tomoki; Uchiyama, Yasunobu; Shiota, Daikou; Branduardi-Raymont, Graziella: Suzaku observation of Jupiter's X-rays around solar maximum, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **71**, Issue 5, id.93, 17 pages, DOI: 10.1093/pasj/psz077 (10/2019)

Maeda, Yoshitomo; Iizuka, Ryo; Hayashi, Takayuki; Sato, Toshiki; Nakaniwa, Nozomi; Takeo, Mai; Suzuki, Hitomi; Ishida, Manabu; Ikeda, Shiro; Morii, Mikio: Concept for an X-ray telescope system with an angular resolution booster *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **71**, Issue 5, id.97, 10 pages, DOI: 10.1093/pasj/psz081 (10/2019)

Nakaniwa, Nozomi; Hayashi, Takayuki; Takeo, Mai; Ishida, Manabu: Variation of mass accretion rate on to the white dwarf in the dwarf nova VW Hyi in quiescence, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **488**, Issue 4, p.5104-5113, DOI: 10.1093/mnras/stz1926 (10/2019)

Yamada, Shinya; Axelsson, Magnus; Ishisaki, Yoshitaka; Konami, Saori; Takemura, Nozomi; Kelley, Richard L.; Kilbourne, Caroline A.; Leutenegger, Maurice A.; Porter, F. Scott; Eckart, Megan E.; Szymkowiak, Andrew: Poisson vs. Gaussian statistics for sparse X-ray data: Application to the soft X-ray spectrometer, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **71**, Issue 4, id.75, DOI: 10.1093/pasj/psz053 (08/2019)

Fukushima, Aoto; Fujitani, Maiko; Ishikawa, Kumi; Numazawa, Masaki; Ishi, Daiki; Otsubo, Ryota; Nagatoshi, Hikaru; Suzuki, Hikaru; Yuasa, Tatsuya; Ohashi, Takaya; Mitsuda, Kazuhisa; Ezoe, Yuichiro: Grinding and chemical mechanical polishing process for micropore x-ray optics fabricated with deep reactive ion etching, *Applied Optics*, **58**, issue 19, p. 5240, DOI: 10.1364/AO.58.005240 (07/2019)

2) 國際會議報告

Hashimoto, T.; Bennett, D. A.; Doriese, W. B.; Durkin, M. S.; Fowler, J. W.; Gard, J. D.; Hayakawa, R.; Hayashi, T.; Hilton, G. C.; Ichinohe, Y.; Ishimoto, S.; Morgan, K. M.; Noda, H.; O'Neil, G. C.; Okada, S.; Reintsema, C. D.; Schmidt, D. R.; Suzuki, S.; Swetz, D. S.; Tatsuno, H. Ullom, J. N.;

Yamada, S.; J-PARC E62 Collaboration: Integration of a TES-based X-ray spectrometer in a kaonic atom experiment, *Journal of Low Temperature Physics*, DOI: 10.1007/s10909-020-02434-1 (03/2020)

Yamada, S.; Tatsuno, H.; Okada, S.; Hashimoto, T.: Coevolution of the Technology on Transition-Edge-Sensor Spectrometer and Its Application to Fundamental Science *Journal of Low Temperature Physics*, DOI: 10.1007/s10909-020-02441-2 (03/2020)

Hasebe, Takashi; Hayashi, Tasuku; Takakura, Hayato; Sekimoto, Yutaro; Ishikawa, Kumi; Shohmitsu, Yoshinori; Noda, Kazuhusa; Saeki, Satoshi; Ezoe, Yuichiro; Nitta, Tom: Development of Multi-Layer Anti-Reflection Structures for Millimeter-Wave Silicon Optics Using Deep Reactive Ion Etching Process, *Journal of Low Temperature Physics*, DOI: 10.1007/s10909-019-02286-4 (12/2019)

3) 学会講演

国内学会

● 地球磁気圏 X 線撮像に関する研究会 2019 年 9 月 3 日 (JAXA 宇宙研)

江副祐一郎: GEO-X 計画

三好由純, 江副祐一郎, ほか: SWCX に関するシミュレーションと GEO-X で目指す科学

伊師大貴, 江副祐一郎, ほか: 「すざく」衛星を用いた地球磁気圏における電荷交換 X 線発光の系統解析

石川久美, 江副祐一郎, ほか: MEMS X 線望遠鏡について

● 日本天文学会 秋季年会 2019 年 9 月 11-13 日 (熊本大学)

武尾舞, 大橋隆哉, ほか: U Gem の可視光 outburst における硬 X 線放射の振る舞い

Y. Ishisaki, Y. Ezoe, T. Ohashi, S. Yamada, et al.: X 線撮像分光衛星 XRISM 搭載 Resolve の開発の現状 IV

林多佳理, 石崎欣尚, ほか: X 線撮像分光衛星 XRISM 搭載 X 線望遠鏡 (XMA) 開発の現状 (2)

江副祐一郎, ほか: 地球磁気圏 X 線撮像計画 GEO-X の現状

伊師大貴, 江副祐一郎, ほか: MEMS 技術を用いた超軽量 X 線望遠鏡の ALD による Pt 膜付け

佐藤浩介, 大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 山田真也, ほか: ダークバリオン探査ミッション Super DIOS の開発へ向けた検討 IV

● 日本物理学会 2019 年 9 月 17-20 日 (Makuhari, Japan)

Y. Ishisaki, Y. Ezoe, T. Ohashi, S. Yamada, et al.: X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 Resolve の開発の現状 IV

● 応用物理学会 秋季年会 2019 年 9 月 18-21 日 (北海道大学)

中嶋大, 江副祐一郎, ほか: 宇宙 X 線観測に向けた裏面照射型 CMOS センサの撮像分光性能評価

福島碧都, 江副祐一郎, ほか: プラズマ原子層堆積法を用いた X 線光学系の Pt 膜付け加工 (講演奨励賞)

● 地球磁気圏・惑星圏学会 2019年10月23-27日（熊本大学）

江副祐一郎, ほか: 地球磁気圏X線撮像計画GEO-Xの現状

伊師大貴, 江副祐一郎, ほか: X線天文衛星「すざく」を用いた地球磁気圏における電荷交換X線発光イベントの系統解析

● 宇宙科学シンポジウム 2020年1月8-9日（JAXA宇宙研）

江副祐一郎, ほか: 地球磁気圏X線撮像計画GEO-Xの現状

石崎欣尚, 江副祐一郎, 大橋隆哉, 山田真也, ほか: X線分光撮像衛星(XRISM)搭載Resolveの開発現状

周圓輝, 江副祐一郎, ほか: 撮像素子の数を大幅に削減する多重化ロブスターAI X線光学系の開発実証

佐藤浩介, 大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 山田真也, ほか: ダークバリオン探査衛星Super DIOS

鈴木光, 江副祐一郎, ほか: MEMS技術を用いた超軽量X線望遠鏡の開発

● 高宇連タウンミーティング 2019年12月26日（東工大大井町）

江副祐一郎: 2030年代に向けて

● 低温技術研究会 2020年1月10日（理研 和光キャンパス）

早川亮大: 超伝導遷移端検出器の地上応用と次世代読み出し技術開発の最先端

● 惑星圏シンポジウム 2020年2月17-10日（東北大学）

伊師大貴, 江副祐一郎, ほか: 「すざく」とXMM-Newton衛星で同時検出した地球周辺の電荷交換X線発光

● 高感度・広帯域X線天文衛星FORCEで探る高エネルギー宇宙 2020年2月17-10日（京都大学）

大橋隆哉: 硬X線で探る銀河団の物理（招待講演）

江副祐一郎: 太陽系からのX線（招待講演）

● 高宇連研究会 2020年3月17-10日（立教大学）

沼澤正樹: Suzaku Study of Jovian Divvies Hard X-ray Emission

中嶋大, 江副祐一郎, ほか: 地球磁気圏X線撮像計画GEO-X

佐藤浩介, 大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 山田真也, ほか: ダークバリオン探査ミッション「Super DIOS」の現状～コズミックネットワークを巡るエネルギーと物質の循環～

● 日本天文学会 2020年3月16-19日（筑波大学, コロナの影響で中止）

江副祐一郎, ほか: 地球磁気圏X線撮像計画GEO-Xの現状II

伊師大貴, 江副祐一郎, ほか: 「すざく」とXMM-Newton衛星で同時検出した地球周辺の電荷交換X線発光

鈴木光, 江副祐一郎, ほか: X 線天文衛星「すざく」で観測した彗星における電荷交換反応モデルの検証

佐藤浩介, 大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 山田真也, ほか: ダークバリオン探査ミッション Super DIOS の開発へ向けた検討 V

● 日本物理学会 2020 年 3 月 16-19 日 (名古屋大学, コロナの影響で中止)

Y. Ishisaki, Y. Ezoe, T. Ohashi, S. Yamada, et al.: X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 Resolve の開発の現状 V

● 応用物理学会 2020 年 3 月 10 日 (上智大学, コロナの影響で中止)

福島碧都, 江副祐一郎, ほか: 原子層堆積法の宇宙 X 線望遠鏡への応用 (講演奨励賞受賞講演)

国際会議

● Japan Planet Geophysical Union, 2019 年 5 月 26-30 日 (Makuhari, Japan)

Y. Ezoe: GEO-X (GEOspace X-ray imager) : Imaging the dayside solar wind-terrestrial magnetosphere interaction (Invited)

Y. Miyoshi, Y. Ezoe, et al.: Soft-X-ray imaging of Geospace: GEO-X Satellite Project

K. Ishikawa, Y. Ezoe, et al.: Development of a miniaturized X-ray imager for GEOspace X-ray imager (GEO-X)

● Space Cryogenics Workshop, 2019 年 7 月 17-19 日 (Southbury, USA)

Y. Ezoe, Y. Ishiwaki, et al.: Cooling System for the Resolve onboard XRISM

K. Ishikawa, Y. Ezoe, Y. Ishiwaki, et al.: Phase Separation and Film Flow Suppression System of Super uid Helium for the Resolve onboard XRISM

● Low Temperature Detectors 18, 2019 年 7 月 22-26 日 (Milano, Italy)

S. Yamada, et al.: Coevolution of the technology on Transition-Edge-Sensor spectrometer and its application to fundamental science

S. Yamada, et al.: High energy background event identification using local group trigger in a 240-pixel X-ray TES array

R. Hayakawa, S. Yamada, et al.: Waveform Analysis of a 240 pixel TES for X-rays and charged particles using a function of triggering neighboring pixels

● 32nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference, 2019 年 10 月 28-31 日 (Hiroshima, Japan)

A. Fukushima, Y. Ezoe, et al.: Pt plasma atomic layer deposition for micropore X-ray optics fabricated with silicon deep reactive ion etching

R. Otsubo, Y. Ezoe, et al.: First demonstration of Lobster Eye X-ray optics Fabricated with Deep Reactive Ion Etching

● COSPAR small satellites for sustainable science and development, 2019 年 11 月 4-8 日 (Herzlia, Israel)

Y. Ezoe, et al.: GEO-X (GEOspace X-ray imager)

● SMILE Science Working Team Meeting 14, 2019 年 11 月 18-20 日 (Madrid, Spain)

H. Nakajima, Y. Ezoe, et al.: GEO-X (GEOspace X-ray imager)

● Astronomical X-Ray Optics, 2019 年 12 月 2-6 日 (Prague, Czech)

D. Ishi, Y. Ezoe, et al.: Metal-coated MEMS X-ray optics using atomic layer deposition

Y. Ezoe, et al.: Light-weight X-ray telescope missions in Japan (Invited)

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、3 Sという特徴を持つ。3 S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ー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、過渡的停滯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、非平衡系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してきた。5 %以下であれば、dry foamと呼ばれ、15 %以下であれば、wet foamと分類してきた。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同的な動きを発現し、面白い挙動を示すものがいる。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

Tsuyoshi Tsukada and Rei Kurita : Mechanism behind columnar pattern formation during directional quenching induced phase separation, *Physical Review Research* **2**, 013382 (2020)

Hadrien Bense, Marie Tani, Maïka Saint Jean, Etienne Reyssat, Benoît Roman and José Bico : Elastocapillary adhesion of a soft cap on a rigid sphere, *Softmatter* **16**, 1961 (2020)

Kouki Morinaga, Marie Tani, and Rei Kurita : Formation mechanism of hierarchical structure of crystal morphology in a sessile droplet, *Physical Review Research* **2**, 013098 (2020)

Rei Kurita and Hajime Tanaka : Drastic enhancement of crystal nucleation in a molecular liquid by its liquid-liquid transition, *PNAS* **116 (50)**, 24949 (2019)

Tsuyoshi Tsukada and Rei Kurita : Topological transition by confinement of a phase separating system with radial quenching, *Scientific Reports* **9**, 15764 (2019)

2) 学会講演

● Active Matter Workshop 2020(Tokyo, Japan) Rei Kurita : Active hole generation in an ionic liquid droplet into a binary solvent (Oral)

● Workshop on Physics of Soft, Active and Living Matter (Chiba, Japan)

Marie Tani : Coiling of a soft rod around a cylinder (Invited Talk)

● 2019 International Workshop on Glass Physics in Beijing (Beijing, China)

Naoya Yanagisawa and Rei Kurita : Collective relaxation dynamics in the foam near the jamming point (Poster)

● 6th I2plus Workshop -Wetting and Related Phenomena- (Tokyo, Japan)

Rei Kurita : Statical and dynamical properties of a foam (Oral)

● 日本物理学会 第75回年次大会(名古屋大学 現地開催中止)

Hadrien Bense, Marie Tani, Maïka Saint Jean, Etienne Reyssat, Benoît Roman and José Bico : 弹性球殻の硬球表面への毛管接着

柳沢直也, 栗田玲: 泡沫の協同的崩壊ダイナミクス: 2つの崩壊モード

● 第3回キッチン地球科学研究集会 (東京大学地震研究所)

栗田玲: 2成分混合系における異常対流 (招待講演)

● 日本物理学会 2019年秋季大会 (岐阜大学柳戸キャンパス)

塚田剛, 栗田玲: 温度制御による相分離パターンの形成メカニズム

柳沢直也, 栗田玲: 泡沫の外場に対する応答ダイナミクス

森永恒希, 栗田玲: 溶液蒸発による再結晶化への dewetting の影響

谷茉莉, 栗田玲: 擬2次元泡沫滴の下降ダイナミクス

塚田剛, 栗田玲: 閉じ込め効果による3次元相分離パターンのトポロジカル転移

小林和也, 栗田玲: 粉体系および液体系における重力不安定化現象の共通性

柳沢直也, 栗田玲: 泡沫の協同的緩和ダイナミクス

● 第18回関東ソフトマター研究会 (お茶の水女子大学)

塚田剛, 栗田玲: 温度伝搬系における相分離非平衡ダイナミクス

森永恒希, 谷茉莉, 栗田玲: 蒸発による再結晶化における複雑挙動

柳沢直也, 栗田玲: ジャミング点近傍における泡沫の協同的緩和ダイナミクス

篠原良子, 小林和也, 栗田玲: 2成分系対流における過渡的停滯領域形成のレイリー数依存性

森智哉: 水路型水槽における歩行液滴のトラップ現象

谷茉莉, 栗田玲: 擬2次元泡沫滴の下降

小林和也, 栗田玲: 粉体系および液体系におけるレイリー・テイラーブー不安定性の共通的性質

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 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 [13, 14]. We semi-classically analyzed huge amount of data coming out from modern chopper spectrometers [14], a typical result of which is shown in Fig. 1. This semi-classical analysis strongly suggests that many-body quantum effects are at work for the disordered ground state of $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$. Therefore, at present, we are performing novel analyses using techniques for many-body quantum systems.

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); R. Sibille et al. Nature Physics 14, 711 (2018).
- [10] J. S. Gardner et al. Phys. Rev. Lett. 82, 1012 (1999).
- [11] H. Takatsu et al. Phys. Rev. Lett. 116, 217201 (2016); H. Kadowaki et al. Phys. Rev. B 98, 144410 (2018); T. Taniguchi et al. Phys. Rev. B 87, 060408 (2013).
- [12] M. Wakita et al. J. Phys.: Conf. Series 683, 012023 (2016).
- [13] H. Kadowaki et al. J. Phys. Soc. Jpn. 87, 064704 (2018).
- [14] 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).

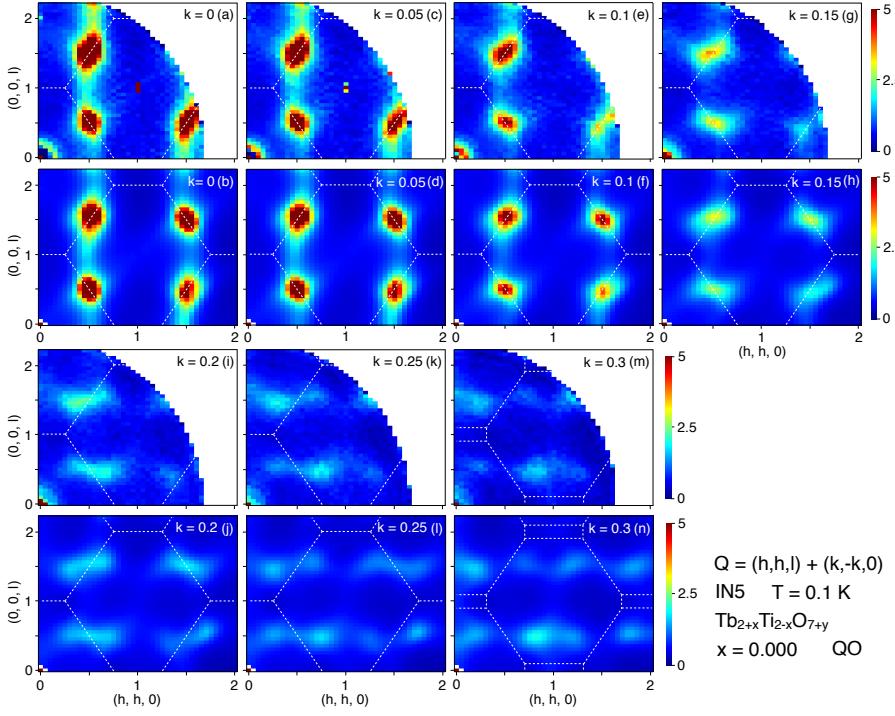


図 1: Intensity maps of 3D data $[S(\mathbf{Q})]_{\text{el}}$ taken at 0.1 K for the QO sample with $x = 0.000$ [14]. The 3D data are viewed by 2D slices (a,c,e,g,i,k,m), which are parallel cross-sections of $\mathbf{Q} = (h, h, l) + (k, -k, 0)$ with fixed k . These can be compared to the typical RPA $[S(\mathbf{Q})]_{\text{el}}$ (b,d,f,h,j,l,n) obtained by least squares fit using the 13 coupling constants, J_1, \dots, J_{13} , listed in Table I of [14]. Dashed lines in these 2D slices (a-n) are boundaries of Brillouin zones.

2. 研究業績

1) 学会講演

- 日本物理学会 2019 年秋季大会 (岐阜大学 柳戸キャンパス 2019/9/10-13)

元木大介, 河野洋平, 橘高俊一郎, 植原俊郎, 高津浩, 門脇広明 : スピンアイス $Dy_2Ti_2O_7$ の気相液相転移の本質的転移幅について

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 8 名（博士後期 1 名 [都市外交人材育成基金による留学生] と博士前期 7 名）、学部生 4 名の体制で研究を進めた。以下に主要な成果を示す。

1) 量子ビームを用いた SmPt_2Si_2 の異常磁気秩序状態の研究

SmPt_2Si_2 は、2014 年に我々の研究グループにおいて、磁気秩序状態と重い電子状態の 2 つの相の性質を合わせ持つ、ハイブリッド型の反強磁性秩序状態（転移温度 $T_N = 5 \text{ K}$ ）を示すことを報告した物質である。我々は、さらにこの特異な磁性の起源を明らかにすべく、大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の物質・生命科学実験施設 (MLF) における μSR 実験及び中性子弹性散乱実験を行った。 μSR の実験結果から、この物質が秩序状態において示す帯磁率の異常な上昇は、秩序相と無秩相が相分離したような物質の不均一性に原因するものではなく、この物質全体として均一な状態が示す特異な磁気状態であることが確かめられた。このことは、2014 年に JPSJ に発表した論文において、我々が議論した基底状態の可能性を裏付ける重要な成果である。さらに、中性子弹性散乱実験は、MLF にあるビームライン 18 のラウエディフラクトメーター SENJU を用いて行った。一般に、Sm 元素は、中性子吸収元素として知られており、Sm 化合物についての中性子回折実験は難しいとされている。J-PARC においては、中性子吸収係数が低くなる高エネルギー領域を使うことで、近年可能となってきた実験である。実験の結果、Sm 化合物としては綺麗な核反射をとらえることに成功したものの、予想される磁気モーメントの大きさから充分観測可能と思われる磁気反射が、主要な逆格子空間の領域において見られないことが分かった。このことは、マクロに観測される磁化の大きさを考慮すると、極めて複雑な磁気構造が実現していることを示していると考えられ、この物質における磁気的基底状態が特異なものであることをミクロスコピックに明らかにした初めての成果となった。

2) Yb 元素を含む超伝導物質のフェルミ面研究

希土類強相関電子系において、希土類元素イオンの価数自由度が引き起こす量子物性異常が注目されている。長年多くの化合物にて研究されてきた Ce 系に加え、近年では Eu, Sm 化合物そして Yb 化合物において重点的に物質開発がすすめられている。Yb 化合物では、この価数自由度に起因する価数揺らぎが、極低温における量子臨界現象や超伝導発現に関わっている典型物質として、 YbRh_2Si_2 や $\beta\text{-YbAlB}_4$ が知られているが、超伝導転移温度は mK オーダーと低く実験的研究がむずかしく、また一方で、他の Yb 系化合物の超伝導物質開発が進んでいなかった。我々の研究グループでは、最近、充填型スクッテルダイト化合物の一つである $\text{YbOs}_4\text{Sb}_{12}$ に加え、1-2-20 系化合物の $\text{YbTr}_2\text{Al}_{20}$ ($\text{Tr} = \text{Ta}, \text{Mo}$) において超伝導を発見することに成功した。さらに、Yb イオンの価数状態を明らかにするため、ドハース・ファンアルフェン (dHvA) 効果測定によるフェルミ面の特性研究を行った。dHvA 効果とは、高純度単結晶のみで観測される、磁場誘起の磁化量子振動現象であるが、この量子振動シグナルを解析することで、物質中の伝導電子の特性に関わるフェルミ面の極値断面積と、サイクロトロン有効質量を決定することができる。 $\text{YbOs}_4\text{Sb}_{12}$ について行った詳細な dHvA 効果の角度依存性測定から、初めてフェルミ面の形状を観測することに成功した。電子のサイクロトロン有効質量は、 $1 \sim 2 m_0$ 程度と明らかな強相関電子状態ではないものの、バンド計算等との比較から、Yb イオンの価数状態が、3 値と 4 値の中間価数状態をとっている可能性を示す結果を得ることに成功した。一般には、dHvA 効果測定により中間価数状態か否かを判断することは難しく、バンド計算や、参照物質との比較において大きな違いがでることは珍しい。 $\text{YbOs}_4\text{Sb}_{12}$ における本研究成果は、この系の超伝導発現メカニズムとの関係において、極めて興

味深い結果であり、今後直接的に Yb イオンの価数状態を観測する X 線吸収実験などへと研究を展開する必要性を示す、重要な成果となった。

3) 正方対称のカゴを持つ立方晶 Sm 化合物 $\text{Sm}_3\text{Tr}_4\text{Ge}_{13}$ ($\text{Tr} = \text{Ru, Rh}$) の基底状態探索

近年、我々は Sm 立方晶化合物において磁場に鈍感な秩序状態、重い電子状態等の非従来型強相関電子物性が現れることを見出した。これらの発見を契機に、改めて Sm 化合物が示す特有の強相関電子物性の形成機構が注目されている。我々は、Sm の f 電子基底状態が持つ自由度(価数、多極子)とこれらの強相関電子物性との関連、そして Sm イオンサイトの局所対称性にも注目し、立方晶系より低対称な構造を持つ Sm 化合物での強相関電子物性の探索を進めている。最近、Sm サイトが正方対称のカゴに内包された構造を持つ $\text{Sm}_3\text{Ru}_4\text{Ge}_{13}$ において磁場に鈍感な相転移及び重い電子状態を示すことが報告され、新たな候補物質として我々は注目している。 $R_3\text{Tr}_4X_{13}$ (R :希土類、 Tr :遷移金属、 X :Ge, Sn) は、低温でカイラル構造へ構造相転移する物質も報告され、最近注目を集めているが、本物質は、空間群 $Pm\bar{3}n$ の立方晶構造をとる。我々は、新たな類縁物質の探索及び異方性を含めた物性を解明するために、 $\text{Sm}_3\text{Tr}_4\text{Ge}_{13}$ ($\text{Tr} = \text{Ru, Rh}$) の多結晶および単結晶育成を行い、それらの基礎物性及び X 線吸収分光(XAS)による Sm 価数測定を行った。

磁化率の温度依存性から、 $\text{Sm}_3\text{Rh}_4\text{Ge}_{13}$ は高温では $\mu_{\text{eff}} = 0.55 \mu_B/\text{Sm}$ のキュリーワイス的な磁性を示し、 $T_1 = 4.7 \text{ K}$, $T_2 = 2.7 \text{ K}$ において逐次相転移を示すを見出した。磁場を印加すると、 T_1 は低温に移行するが、 T_2 は磁場中でも殆ど変化しない。また、常磁性相において $\gamma = 155 \text{ mJ/mol}\cdot\text{f.u.}\cdot\text{K}^2$ 、低温の秩序相内において $\gamma =$ 約 $1.6 \text{ J/mol}\cdot\text{f.u.}\cdot\text{K}^2$ の大きな電子比熱係数を示すを見出した。Sm の価数状態については、 $\text{Tr} = \text{Ru, Rh}$ 共に室温付近ではほぼ 3 価であることが XAS 実験から示唆されているが、温度依存性や価数の揺らぎの有無等に関する詳細な研究は進行中である。今後、単結晶を用いた異方性測定、及び類縁化合物の物性測定を進めていく予定である。

4) 高い特性温度を持つ四極子近藤系 $\text{Pr Tr}_2\text{Al}_{20}$ ($\text{Tr} = \text{Mo, W}$) の単結晶育成と低温物性測定

カゴ状化合物 Pr Tr_2X_{20} (Tr :遷移金属、 X :Al, Zn) では Pr の Γ_3 二重項基底状態が有する四極子自由度に起因した、四極子近藤効果、四極子秩序相内での超伝導を示すことが報告され、注目を集めている。これらの実験を契機に、四極子自由度に起因した物性理論研究も進展し、四極子近藤効果に共通する物性の振る舞いが明らかになりつつある。我々はこれまで、 $\text{Pr Tr}_2\text{Al}_{20}$ ($\text{Tr} = \text{Nb, Ta}$) の単結晶試料を用いた低温物性を報告し、これらの化合物においても同様に四極子近藤格子系で期待される振る舞いを見出した。そこで、我々は、 $\text{Pr Tr}_2\text{Al}_{20}$ で観測される四極子強相関電子物性と Tr の d 電子数の相関を明らかにするため、 d 電子数が増えたときの振る舞いに着目し、 $\text{Pr Tr}_2\text{Al}_{20}$ ($\text{Tr} = \text{Mo, W}$) の単結晶試料純良化、低温物性測定を行った。

一般に $R\text{Tr}_2\text{Al}_{20}$ (特に Tr が $4d, 5d$ の場合) の高純度結晶育成は難しいことが知られていたが、育成条件の最適化により、約 45 倍高い RRR を持つ試料を得ることに成功した。また、単結晶構造解析や SEM-EDX、蛍光 X 線分析による結晶評価の結果から、 $\text{Pr Tr}_2\text{Al}_{20}$, $\text{La Tr}_2\text{Al}_{20}$ ($\text{Tr} = \text{Mo, W}$) では Tr と Al のサイト置換が起きている可能性を見出した。磁化測定では、 $\text{Pr Tr}_2\text{Al}_{20}$ ($\text{Tr} = \text{Mo, W}$) の $H = 0.1 \text{ T}$ における $T = 2 \text{ K}$ での帯磁率の値が他の $\text{Pr Tr}_2\text{Al}_{20}$ と比較して大きいことを見出し、 $\text{Tr} = \text{Mo, W}$ の結晶場は基底状態 Γ_3 二重項と第一励起状態 Γ_4 三重項のエネルギーギャップが小さく、第一励起状態 Γ_4 による Van Vleck 磁化が現れている可能性が高いことが分かった。抵抗率測定では、格子の寄与を差し引いた磁気抵抗の温度依存性を、四極子近藤格子系(QKL) モデルの理論式でフィッティングを行ったところ、 $10 - 20 \text{ K}$ あたりまでよく合う結果が得られ、特性温度 T_{K*} は Nb(7.5 K), Ta(2.9 K) と比較して大きな値(Mo: 11.2 K, W: 19.6 K) を示し、高い四極子特性温度を示すことが分かった。結晶場基底状態が Γ_3 二重項で局在性が強い場合、 $4f$ 電子に起因したエントロピー S_{4f} は $R\ln 2$ (R : 気体定

数)で飽和する傾向が見られることが期待され、実際に、 $Tr = Ti, V, Nb, Ta$ ではその様な振る舞いが見られている。しかし、 $Tr = Mo, W$ では S_{4f} が $Rln2$ で飽和する傾向は見られず、 $Rln5$ に向けて増加率を穏やかに低下させながら上昇していく振る舞いが見られた。このことから、 $Tr = Mo, W$ は基底状態 Γ_3 二重項と第一励起状態 Γ_4 三重項のエネルギーギャップ Δ_{1st} が小さく、擬五重項のような状態となっていることが考えられる。以上の結果より、 d 電子数の多い $Pr Tr_2 Al_{20}$ ($Tr = Mo, W$)は特性温度が高く、結晶場基底状態に擬五重項のような状態を持ち、混成の強い物質であることを明らかにした。

5) 一軸的な異方性を有するカゴ構造を持つ $LaAu_3Al_7$ のフォノン物性

異方的なカゴ構造を持つ希土類化合物の物質探索の結果として、一軸的な異方性を持つカゴ構造を持つ RAu_3Al_7 を見出し、これまで $R = Ce, Sm, Yb$ について単結晶育成を行い、その物性報告を行ってきた。上記の化合物の $4f$ 電子による寄与を見積るために希土類サイトが非磁性元素である化合物が参照物質として必要不可欠であるが、これまで物質合成報告が無かった。そこで我々は高圧合成による参照物質合成を試み、高圧下でのフランクス法により新物質である $LaAu_3Al_7$ の単結晶育成に成功した。合成に成功した単結晶を用いた単結晶構造解析より、 $LaAu_3Al_7$ も他の RAu_3Al_7 と同様に $ScRh_3Si_7$ 型構造を持つことを明らかにした。さらに、 RAu_3Al_7 化合物の物性の非磁性成分の見積を行うために、比熱測定及び第一原理計算から $LaAu_3Al_7$ のフォノン物性についての研究を行った。その結果、 $LaAu_3Al_7$ の比熱は一つのデバイモード($\Theta_D = 315$ K)と一つのAINシュタインモード($\Theta_E = 108$ K)の和で説明可能であり、AINシュタインモードは、Auを主としたLa周りのカゴ構造の光学モードに起因している可能性が高いことを明らかにした。

6) 単体元素の高純度結晶育成と電子物性研究の現状

物質中をあたかも質量ゼロの状態で高速移動する電子は、Dirac fermionとよばれ、グラフェンのような極めて薄い2次元の世界に存在することが知られている。このような特異な性質を持つ電子を3次元空間で見出す、そして基本的な性質を明らかにしようとする研究が盛んに行われている。また、結晶の対称性と、電子に働くスピinn-軌道結合の大小に起因する電子の位相幾何学的(トポロジカル)な性質と、輸送特性との関係を明らかにしようとする研究がすすめられている。このような基礎研究において、近年、化合物のみならず単体元素で構成される金属、あるいは半金属物質の研究が再注目されつつある。Biは3次元Dirac電子系として知られており、同族元素であるSbを混ぜることで、複雑なバンド変化を示すことが知られている。これらの変化の解釈について、改めて精力的に研究がなされている。また別の単体元素の研究としては、Cr元素で発生する磁性と同族のMo元素で発現する超伝導発現との関係について注目した研究は、大変興味深いが、詳細な研究例はなかった。これら単体元素研究の進展を妨げている最大の問題点は、高純度結晶が難しいという点である。Biにおいては、特異な電子状態に起因し、結晶構造がわずかに低対称化し、結晶が双晶化しやすいという点。また、Sbを混ぜる場合、均一に混ぜることが難しいことが知られている。一方CrやMo単体は、それぞれ蒸気圧と融点が極めて高いことが、高純度結晶化を困難にしている。我々の研究グループでは、これらの研究において、決定的な電子物性研究成果をあげるべく、世界最高純度単結晶育成にチャレンジしている。今年度においては、いずれの物質においても、高純度結晶育成条件について、おおよそ絞り込むことに成功した。これらの結晶育成の目処がついたことで、すでに、国内のみならずフランスやドイツの研究グループ等との国際的な共同研究の打診を受けている状態である。

7) カイラル化合物の純良単結晶育成と電子輸送特性

カイラルな結晶構造を持つ化合物中では、それを反映した電子の波動関数が形成され、カイラル特有の性質を持ったトポロジカル電子物性が現れるはずである。幾つかのカイラル物質に着目し、単結晶育

成と電子物性測定を進めた。 α -IrSn₄（図1）では、Sn フラックス法により、結晶の純良性を表す残留抵抗比が630に達する純良な単結晶を育成することに成功した。結晶構造は、右手系と左手系（空間群 $P3_121(\#152)$ と $P3_221(\#154)$ ）の両方の可能性があるが、X線単結晶構造解析により、両者が混ざっていないない單一ドメイン单結晶が合成されていることを確認した。本系は奇数個の電子を持つ非補償金属であるにもかかわらず、磁場 B に対し、 $B^{1.4}$ に比例して増大する異常な磁気抵抗現象を見出した。 α -IrSn₄と同一の結晶構造を持つIrGe₄では、テトラアーク炉を用いたチョクラルスキー引き上げ法による单結晶育成を繰り返し、最終的に3cmに達する單一ドメイン单結晶の合成に成功した。基礎物性およびdHvA効果測定を進めた。

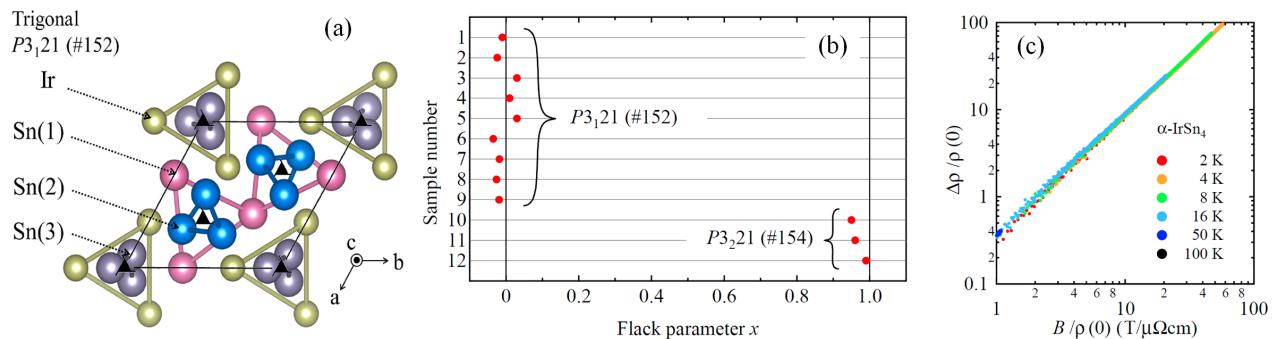


図1: α -IrSn₄ の (a) カイラルな結晶構造, (b) X 線単結晶構造解析により求めた 12 個の単結晶粒の Flack parameter x [右手系と左手系が作り別けられていることの証拠], (c) 磁気抵抗の Kohler plot [$B^{1.4}$ に比例して増大する異常性を示す]。

8) type-II Weyl 半金属: WTe₂ と MoTe₂ の電子状態

type-II Weyl 半金属の候補物質である WTe₂ と MoTe₂について、これまでに世界最高レベルの純良单結晶の育成に成功していたが（残留抵抗比は1,300以上），これを用いた共同研究を進めた。木村研究室（阪大）との共同研究として行った光学伝導度測定では、2つのDrudeピーケーが観測された。巾の狭い方は、温度降下と共に幅が顕著に減少しており、Weyl点を持つバンドを捉えたものと判断でき、type-II Weyl 半金属の証拠を与えている。弱い電子相関効果を示唆する兆候も得た。Shubnikov - de Haas(SdH)量子振動測定の実験を Goh 研究室（香港中文大）と共同で行い、MoTe₂ のホールポケット由来のSdH振動の観測に初めて成功した。このポケットはWeyl電子が関与する重要なフェルミ面でありながら、これまで観測されていなかった。さらに圧力依存性の測定も行い、ホールポケットの大きさが圧力に対して敏感に変化することも見出した。

2. 研究業績

1) 論文

Shin-ichi Kimura, Yuki Nakajima, Zenjiro Mita, Rajveer Jha, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, and Yuji Aoki : "Optical evidence of the type-II Weyl semimetals MoTe₂ and WTe₂", *Phys. Rev. B*, **99** 195203 (2019) [7 pages]. DOI: 10.1103/PhysRevB.99.195203

Hao Yuwen, Yosuke Goto, Rajveer Jha, Akira Miura, Chikako Moriyoshi, Yoshihiro Kuroiwa, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki and Yoshikazu Mizuguchi : "Enhanced superconductivity by Na doping in SnAs-based layered compound Na_{1+x}Sn_{2-x}As₂", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **58** 083001 (2019) [5 Pages]. DOI: 10.7567/1347-4065/ab2eb1

T. Sugimoto, E. Paris, K. Terashima, A. Barinov, A. Giampietri, T. Wakita, T. Yokoya, J. Kajitani, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, Y. Aoki, T. Mizokawa, and N. L. Saini : "Inhomogeneous charge distribution in a self-doped EuFBiS₂ superconductor", *Phys. Rev. B*, **100** 064520 (2019) [6 pages]
DOI: 10.1103/PhysRevB.100.064520

Rajveer Jha, Yosuke Goto, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki, Masanori Nagao, Isao Tanaka, and Yoshikazu Mizuguchi : "Bulk superconductivity in a four-layer-type Bi-based compound La₂O₂Bi₃Ag_{0.6}Sn_{0.4}S_{5.7}Se_{0.3}", *Sci. Rep.*, **9** 13346 (2019). [8 pages] DOI: 10.1038/s41598-019-49934-z

Naoki Nakamura, Ryuji Higashinaka, Kengo Fushiya, Ryo Tsubota, Takashi U. Ito, Wataru Higemoto, Akiko Nakao, Ryoji Kiyanagi, Takashi Ohhara, Koji Kaneko, Tatsuma D. Matsuda, and Yuji Aoki: " μ SR and Neutron Scattering Studied on Possible Partially-Disordered Magnetic State Coexisting with Heavy Quasiparticles in SmPt₂Si₂", *JPS Conf. Proc.*, **29** 012009 (2020) [6 pages]. DOI: 10.7566/JPSCP.29.012009

Tetsuro Kubo, Hideki Tou, Hisashi Kotegawa, Hisatomo Harima, Ryuji Higashinaka, Akihiro Nakama, Yuji Aoki, and Hideyuki Sato : "Development of Short-range Correlations of 4f Electrons in the Non-Kramers Γ_3 System PrNb₂Al₂₀ at Low Temperatures Investigated by NMR Measurements", *JPS Conf. Proc.*, **29** 015003 (2020) [6 pages]. DOI: 10.7566/JPSCP.29.015003

Y. J. Hu, W. C. Yu, Kwing To Lai, D. Sun, F. F. Balakirev, W. Zhang, J. Y. Xie, K. Y. Yip, E. I. Paredes Aulestia, Rajveer Jha, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, Y. Yanase, Yuji Aoki, and Swee K. Goh : "Detection of hole pockets in the candidate type-II Weyl semimetal MoTe₂ from Shubnikov-de Haas quantum oscillations", *Phys. Rev. Lett.*, **124** 076402 (2020) [6 pages]. DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.076402

Md. Riad Kasem, Kazuhisa Hoshi, Rajveer Jha, Masayoshi Katsuno, Aichi Yamashita, Yosuke Goto, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki and Yoshikazu Mizuguchi: "Superconducting properties of high-entropy-alloy tellurides M-Te (M: Ag, In, Cd, Sn, Sb, Pb, Bi) with a NaCl-type structure", *Appl. Phys. Express*, **13** 033001 (2020) [5 pages]. DOI: 10.35848/1882-0786/ab7482

Rumi Omura, Eri Suto, Naoki Nakamura, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, and Yuji Aoki : "Single Crystal Growth and Anomalous Magnetoresistance of Chiral Crystal α -IrSn₄", *JPS Conf. Proc.*, **30** 011018 (2020) [6 pages]. DOI: 10.7566/JPSCP.30.011018

Ryotaro Sakatani, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, and Yuji Aoki : "Anomalous Magnetoresistance of BiS₂-based layered Superconductor Eu₃Bi₂S₄F₄", *JPS Conf. Proc.*, **30** 011059 (2020) [6 pages]. DOI: 10.7566/JPSCP.30.011059

N. Nakamura, R. Higashinaka, Y. Aoki, D. Aoki, and T. D. Matsuda : "Crystal Structure and Magnetic Properties for Single Crystal of YbTr₂Al₂₀ ($Tr = Mo$ and Ta)", *JPS Conf. Proc.*, **30** 011062 (2020) [5 pages]. DOI: 10.7566/JPSCP.30.011062

Ryuji Higashinaka, Yousuke Takahashi, Akira Yamada, Takumi Hasegawa, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki, and Hideyuki Sato : "Single Crystal Structural Analysis and Specific Heat Property of

LaAu₃Al₇ with Anisotropic Cage Structure”, *JPS Conf. Proc.*, **30** 011127 (2020) [7 pages]. DOI: 10.7566/JPSCP.30.011127

Takahiro Komagata, Kazuhei Wakiya, Yuki Sugiyama, Masatomo Uehara, Izuru Umehara, Naoki Nakamura, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki, Jun Gouchi, and Yoshiya Uwatoko: ”Structural and Magnetic Properties of a New Cubic Compound PrRu₂In₂Zn₁₈”, *JPS Conf. Proc.*, **30** 011157 (2020) [5 pages]. DOI: 10.7566/JPSCP.30.011157

Tetsuro Kubo, Hideki Tou, Ryoma Miyake, Haruki Matsuno, Hisashi Kotegawa, Hisatomo Harima, Ryuji Higashinaka, Akihiro Nakama, Yuji Aoki, Hideyuki Sato, Yoshihiko Ihara, Takayuki Goto, Michihiro Hirata, and Takahiko Sasaki : ”²⁷Al-NMR/NQR Spectral Analysis of Single Crystal PrTa₂Al₂₀”, *JPS Conf. Proc.*, **30** 011158 (2020) [7 pages] DOI: 10.7566/JPSCP.30.011158

2) 学会講演

● 日本物理学会 2019 年秋季大会 2019 年 9 月 10 日 (火)～13 日 (金) (岐阜大学)

千葉優馬, 大村瑠美, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: カイラル構造を持つ IrGe₄ の単結晶育成と物性測定

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: Pr(O,F)BiS₂ の Pr 原子価とフェルミ面

島岩泰暉, 密岡拓心, 溝川貴司, 大村瑠美, 千葉優馬, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, 有田将司, A. Barinov, V. Kandyba, A. Giampietri, N. L. Saini: カイラル結晶構造を持つ IrGe₄ の光電子分光

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, 平田倫啓, 佐々木孝彦: PrT₂Al₂₀ (T = Nb, Ta) における超微細結合の ²⁷Al-および ⁹³Nb-NMR による研究

青木勇二: 磁性イオンにより制御可能なスピン軌道強結合電子の巨大磁気抵抗 (領域 8 シンポジウム「BiS₂ 系層状化合物における超伝導発現機構と新規な物性」)

松田達磨, 岸本美晴, 大村瑠美, 後藤陽介, 水口佳一, 東中隆二, 青木勇二: Yb₅Ir₆Sn₁₈ における非フェルミ液体的低温物性異常

中村直貴, 東中隆二, 青木勇二, 佐藤英行, 青木大, 松田達磨: 新 Yb 系超伝導体 YbTr₂Al₂₀ (Tr = Mo, Ta) の超伝導特性とフェルミ面の特性

濱本諭, 藤原秀紀, 木須孝幸, 東谷篤志, 山崎篤志, 今田真, 田中新, 玉作賢治, 矢橋牧名, 石川哲也, 中村直貴, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, 関山明: 充填スクッテルダイト化合物 PrFe₄P₁₂ に対する硬 X 線内殻光電子線二色性の観測

神戸振作, 酒井宏典, 徳永陽, 芳賀芳範, 増田隼人, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: 重い電子系 SmAu₃Al₇ の Al-NMR

坪田椋, 伏屋健吾, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: SmPt₂Si₂ における異常磁気秩序相の高純度単結晶を用いた検証

内藤康氏, 工藤一輝, 有馬寛人, 辻土正人, Rajveer Jha, 後藤陽介, 松田達磨, 青木勇二, 水口佳一, 松林和幸: LaOBiPbS₃ および La₂O₂Bi₃AgS₆ における圧力誘起超伝導と高圧下における電気輸送特性

長谷川巧, 萩田典男, 大村瑠美, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: BiS₂系物質における局所構造乱れのラマン散乱測定

東中隆二, 増田隼人, 松田達磨, 青木勇二: 異方的なカゴ構造を持つ SmAu₃Al₇ の電気輸送特性

井角元, 水牧仁一朗, 鶴部矩正, 保井晃, 明渡悠, 河端拓, 下笠諒平, 柴垣善則, 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, 三村功次郎: 共鳴硬 X 線光電子分光による Ce122 の電子状態の研究

駒形貴裕, 脇舎和平, 郷地順, 上床美也, 松田達磨, 上原政智, 梅原出: 新規立方晶 Pr 化合物 PrRu₂In₂Zn₁₈ の Γ_3 二重項結晶場基底状態

星和久, 木俣基, 後藤陽介, 松田達磨, 水口佳一: BiCh₂ 系超伝導体における超伝導面内異方性

● 日本物理学会第 75 回年次大会 2020 年 3 月 16 日(月)~19 日(木) (名古屋大学)

平岡良太, 中村直貴, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨: 3 次元ディラック電子系 Bi_{1-x}Sb_x の単結晶育成と輸送特性

坪田椋, 東中隆二, 筒井智嗣, 新田清文, 松田達磨, 青木勇二: 希土類内包型カゴ構造を持つ Sm₃Tr₄Ge₁₃ の強相関電子物性

松村武, 塚越舜, 河村直己, 水牧仁一朗, 稲見俊哉, 道村真司, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: 共鳴 X 線回折と XMCD による SmRu₄P₁₂ の磁場誘起電荷秩序状態の研究

中村直貴, 宮脇瑠美佳, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: LaTr₂Al₂₀ ($Tr = Mo, W$) の単結晶育成と低温物性測定

濱本諭, 近藤佑宥, 藤原秀紀, 木須孝幸, 東谷篤志, 山崎篤志, 今田真, 田中新, 玉作賢治, 矢橋牧名, 石川哲也, 中村直貴, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, 関山明: 充填スクッテルダイト化合物 PrFe₄P₁₂ に対する直線偏光依存硬 X 線内殻光電子分光

有長祐人, 濱本諭, 近藤佑宥, 藤原秀紀, 西本幸平, 姫野良介, 木須孝幸, 中田惟奈, 今田真, 中川広野, 山崎篤志, 東谷篤志, 玉作賢治, 矢橋牧名, 石川哲也, 山田瑛, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, 関山明: 内殻硬 X 線光電子線二色性による反強磁性体 SmPt₂Si₂ の 4f 軌道対称性研究

神戸振作, 酒井宏典, 徳永陽, 芳賀芳範, 増田隼人, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: 重い電子系 SmAu₃Al₇ の Al-NMR II

青木勇二, 大村瑠美, 千葉優馬, 中村直貴, 東中隆二, 松田達磨: カイラル結晶構造を持つ IrGe₄ の電子輸送特性

有馬寛人, Y. Yuan, 内藤康氏, 工藤一輝, 矢藤優佑, Rajveer Jha, 後藤陽介, 水口佳一, 松田達磨, 青木勇二, 松林和幸: BiS₂ 系層状化合物の温度-圧力相図

佐賀山遼子, 佐賀山基, 梶谷丈, 山本直季, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: 放射光 X 線による PrOBiS₂ の構造相転移に関する研究

長谷川巧, 萩田典男, 大村瑠美, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: LaOBiS₂ におけるソフトモードのラマン散乱測定

本間佳哉, 垣花将司, Arvind Maurya, 大貫惇睦, 松田達磨, 佐藤芳樹, 仲村愛, 清水悠晴, 李德新, 本多史憲, 青木大: B20 型正方晶カイラル磁性体 EuPtSi および FeGe のメスバウアーフィルム

国際会議

- International Workshop on Spin-Orbit Interaction and G-factor, Collège de France, France, May 9 – 10, 2019

T. D. Matsuda : Shubnikov-de Haas oscillations in type-II semimetal WTe₂. (invited)

- International Conference on Frontiers of Correlated Electron Sciences 2019 (FCES), The University of Tokyo, Japan, May, 29 – 31, 2019

Ryotaro Sakatani, Ryuji Higashinaka, Hideaki Endo, Joe Kajitani, Tatsuma D. Matsuda and Yuji Aoki : Nonmetallicity in self-doped BiS₂-based Eu₃Bi₂S₄F₄: single crystal study.

- J-Physics 2019, International Conference & KINKEN-WAKATE 2019 Multipole Physics, Kobe University, Japan, September 18 – 21, 2019

R. Higashinaka, A. Yamada, T. D. Matsuda and Y. Aoki: Unconventional strongly correlated electronic states induced by multiple degrees of freedom in cubic Sm-based compounds. (invited)

T. Kubo, H. Tou, R. Miyake, H. Matsuno, H. Kotegawa, H. Harima, R. Higashinaka, A. Nakama, Y. Aoki, H. Sato, Y. Ihara, T. Goto, M. Hirata, and T. Sasaki: Development of slow fluctuations low temperatures in PrNb₂Al₂₀ revealed by ²⁷Al-and ⁹³Nb-NMR measurements

N. Nakamura, R. Higashinaka, K. Fushiya, R. Tsubota, T. U Ito, W. Higemoto, A. Nakao, R. Kiyanagi, T. Ohhora, K. Kaneko, T. D. Matsuda and Y. Aoki: Investigations of an anomalous partial magnetic ordered state coexisting with heavy electron state of SmPt₂Si₂

- International Conference on Strongly Correlated Electron Systems(SCES) 2019, Okayama, Japan, September 23 – 28, 2019

Rajaveer Jha, Yosuke Goto, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki, Masanori Nagao, Yoshikazu Mizuguchi: Bulk superconductivity in La₂O₂M₄S₆-type layered oxychalcogenide La₂O₂Bi₃Ag_{0.6}Sn_{0.4}S_{5.7}Se_{0.3}

Kojiro Mimura, Taku Kawabata, Yu Akedo, Kodai Abe, Takayuki Matsumoto, Ryohei Shimokasa, Akira Yasui, Masaichiro Mizumaki, Naomi Kawamura, Eiji Ikenaga, Satoshi Tsutsui, Hitoshi Sato, Takayuki Uozumi, Tatsuma D. Matsuda, Yoshichika Onuki: Yb 4f-5d Coulomb Repulsion of YbCu₂Si₂ Derived from Resonant Hard X ray Photoemission Spectroscopy.

Mizuho Maeda, Noriaki Kimura, Noriyuki Kabeya, Yoshinori Haga, Tatsuma D. Matsuda, Alexander V. Andreev: Low Temperature Specific Heat of UCoAl near the Ferromagnetic Quantum Phase Transition.

Jianyu Xie, Wei Zhang, Esteban Ignacio Paredes Aulestia, Yajian Hu, Kwing To Lai, Rajveer Jha, Ryuji Higashinaka, T.D. Matsuda, Yuji Aoki, Swee.Kuan Goh: Electrical transport of thin film samples under high pressure in a diamond anvil cell.

Ryuji Higashinaka, Yosuke Takahashi, Hayato, Masuda, Akira Yamada, Tatsuma D Matsuda, Yuji Aoki: Anisotropic response of strongly correlated electronic behavior to magnetic field in SmAu₃Al₇ with anisotropic cage structure.

Hajime Sagayama, Joe Kajitani, Ryoko Sagayama, Takumi Hasegawa, Reiji Kumai, Youichi Murakami, Keisuke Matsuura, Masaaki Mita, Takuya Asano, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki: Super lattice structure in BiS₂ layered superconductor LaO_{0.5}F_{0.5}BiS₂

Yuji Aoki, Ryotaro Sakatani, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda: Scaling in the Giant Magnetoresistance of Layered Compound Eu₃Bi₂S₄F₄

Tatsuma D. Matsuda, Naoki Nakamura, Miharu Kishimoto, Sumire Ichinose, Ryuji Higashinaka, Ai Nakamura, Dai Aoki, Hisatomo Harima, Yuji Aoki: The First Discovery of Superconducting State and Fermi Surface Properties of YbOs₄Sb₁₂ (invited)

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 Study of the Microscopic Inhomogeneity in the Non-Kramers System Pr_T₂Al₂₀ (*T*=Nb, Ta)

Rumi Omura, Eri Suto, Yuma Chiba, Naoki Nakamura, Miharu Kishimoto, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki: Crystal Growth and Transport Property Measurements of Chiral Crystal α -IrSn₄ and α -IrGe₄

Ryotaro Sakatani, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki: Transport Properties of BiS₂-Based Superconductor Eu₃Bi₂S₄F₄: Comparison Between Single Crystals and Polycrystals.

Naoki Nakamura, Ryuji Higashinaka, Yuji Aoki, Hideyuki Sato, Dai Aoki, Tatsuma D. Matsuda: A First Discovery of Superconductivity in Yb-based compounds Yb_{Tr}₂Al₂₀ (*Tr* = Mo, Ta)

● Materials Researchmeeting 2019, Yokohama, Japan, December 10 – 14, 2019

T. D. Matsuda : The First Discovery of Superconducting State and Fermi Surface Properties of in Yb-based Skutterudite and 1-2-2- systems (invited)

Naoki Nakamura, Ryuji Higashinaka, Yuji Aoki, Hideyuki Sato, Dai Aoki, Tatsuma D. Matsuda : The First Discovery of superconductivity in Yb-based compounds Yb_{Tr}₂Al₂₀ (*Tr* = Mo, Ta)

Kazuhisa Hoshi, Motoi Kimata, Tatsuma D. Matsuda, Yosuke Goto, Toshikazu Mizuguchi : Two-Fold-Symmetric Magnetization in Single Crystals of Tetragonal BiCh₂-based Superconductor LaO_{0.5}F_{0.5}BiSSe

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、および高エントロピー合金効果に着目した新しい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

新しい BiCh_2 系超伝導体の開発 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、ブロック層に元素置換による乱れを含まない新たな超伝導体を設計することで、機構解明に向けた第一歩とすることを目指し、物質開発を行った。着目したのは、Ceの混合原子価状態が期待できる CeO 層をブロック層とする CeOBiS_2 である。 CeOBiS_2 は1.3 Kの超伝導体と報告があるが、バルク超伝導状態の確証は得られていなかった。本研究では、SサイトをSeで置換することで面内化学圧力を印加し、 $\text{CeOBiS}_{2-x}\text{Se}_x$ が転移温度3 Kのバルク超伝導を示すことを見出した (Kiyama et al., JPSJ 2020)。また、単結晶育成にも成功し、今後 $\text{CeOBiS}_{2-x}\text{Se}_x$ 単結晶を用いた超伝導状態の研究を推進する。

高圧効果を用いた超伝導相図の解明 BiCh_2 系超伝導体は高圧の効果に敏感であり、1～数 GPaの圧力でその超伝導特性が大きく変化することが知られている。本研究では、 $\text{Sr}_{0.5}\text{RE}_{0.5}\text{FBiS}2$ の高純度試料を合成し、高圧下での磁化率測定から、バルク超伝導発現と圧力、結晶構造の相関を研究した。本系はa軸長が比較的大きく、面内化学圧力が不足しており、常圧下ではバルクな超伝導を示さない。RE = La, Ce, Pr, Nd, Smの系において、0.8～1.2 GPa付近で T_c の大幅な上昇を観測した。RE = Laの系において高圧下X線回折を行ったところ、他の BiS_2 系での報告と同様に、単斜晶に構造が相転移していることがわかった。また、構造相転移前の圧力領域(0.5 GPa付近)において、正方晶構造でもバルク超伝導が圧力誘起されることを観測し、本系が2つのバルク超伝導状態を示すことを見出した。

多層型ビスマスカルコゲナイト $\text{RE}_2\text{O}_2\text{M}_4\text{Ch}_6$ におけるバルク超伝導発現 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、カルコゲナイト層を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。2018年度の研究で、 $\text{La}_2\text{O}_2\text{Bi}_3\text{AgS}_6$ において $T_c = 0.5$ 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 $T_c = 3.0$ Kのバルク超伝導を観測することができた (Jha et al., Sci. Rep. 2019)。また、Se置換による化学圧力効果がバルク超伝導発現に有効であったことから、Laサイトを他のREで置換することで面内化学圧力を印加することを試みた。その結果、 $\text{La}_{0.6}\text{RE}_{0.4}\text{Bi}_3\text{Ag}_{0.6}\text{Sn}_{0.4}\text{S}_6$ (RE = Y, Pr, Nd, Sm, Eu)においてバルク超伝導を観測することに成功した (R. Jha et al., submitted)。また、Mサイトが Bi_2Pb_2 である $\text{La}_2\text{O}_2\text{Bi}_2\text{Pb}_2\text{S}_6$ においても、SサイトのSe置換により1.9 Kの超伝導体となることを報告した (R. Jha et al., submitted)。これらのBi系

4層型超伝導体に関する研究動向をまとめたレビュー論文を Condens. Matter 誌にて出版した。(4層型 Bi 系超伝導体の結晶構造を Fig. 1 に示す)

2) 新超伝導体の開発

高エントロピー合金型超伝導体の開発 近年、1つの原子サイトを5種以上の異種元素が占有する「高エントロピー合金(HEA)」が構造材料や生体材料の分野で注目を集めている。我々は、従来の单一サイトからなる、いわゆる合金である HEA から、より複雑な「化合物」に HEA の効果を拡張すべく、「HEA 型化合物」の開発を行っている。2018 年度の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化することを試みた。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開発し、HEA 効果が超伝導特性向上に有効であることを見出した(Sogabe et al., Solid State Commun. 2019)。本研究では、 BiS_2 系同様に層状構造を有する銅酸化物系高温超伝導体 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$ (RE123) の RE サイトを HEA 化することを試みた。その結果、HEA 化による T_c および臨界電流密度 J_c の低下は無く、従来から RE123 系において提唱されてきた orthorhombicity が、HEA 型 RE123 においても超伝導特性と相關することを見出した(Y. Shukunami et al., Physica C 2020)。また、3次元的な NaCl 構造を持つ金属テルラード M-Te の M サイトを HEA 化することにも成功した。AgInSnPbBiTe₅ が 2.6 K の超伝導体であることを発見し(Y. Mizuguchi, JPSJ 2019)，様々な HEA 型 M-Te 超伝導体を開発することに成功した(Md R. Kasem et al., APEX 2020)。これらの結果から、M-Te 系の T_c は格子定数と逆相関することを見出した。また、3次元的な NaCl 構造においては、HEA 化により T_c が低下する傾向があることを見出した。(HEA 型化合物の結晶構造を Fig. 2 に示す)

岩塩型カルコゲナイト $\text{In}_{1-x}\text{Pb}_x\text{Te}$ の高圧合成と超伝導 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、キャリアをドープ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。高圧合成により合成した $\text{In}_{1-x}\text{Pb}_x\text{Te}$ の電気抵抗率、磁化率、比熱測定を行い、幅広い置換領域でバルク超伝導を示すことを確認した。バレンススキップ元素の In を含むが、基本的には弱結合の BCS モデルで超伝導ギャップを説明できることを報告した(M. Katsuno et al., Condens. Matter 2020)。

3) 新熱電材料の開発

REOPnSe₂ 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、ニクトゲン(Pn)を軽元素で置換した場合に高性能熱電材料となることが理論的に予測されていることから、軽元素置換の可能性を検討した。昨年度までは Pn = Sb の場合の合成に成功していたが、さらなる軽元素である As 置換を試み、 $\text{NdO}_{0.8}\text{F}_{0.2}\text{Sb}_{1-x}\text{As}_x\text{Se}_2$ において $x = 0.6$ まで合成可能であることがわかった。As 置換した試料は 600 K 付近において熱伝導率の温度依存性に異常が見られた。放射光 X 線回折の温度依存性を測定したところ、同温度域において c 軸長変化に異常が見られることを確認した。今後、熱伝導率と結晶構造の相関について、詳細な解析を進める予定である。一方で、As 置換により電気抵抗率は大幅に上昇したため、理論予測に反して熱電性能は減少する。局所的構造歪みが絶縁性に重要な役割を果たしていると推測され、局所構造解析を行う準備を進めている。

SnAs 系層状化合物 NaSn_2As_2 をはじめとした SnAs 系層状化合物の超伝導研究と並行して、熱電材料としての可能性を検討している。超伝導転移を示す NaSn_2As_2 に対し、 SrSn_2As_2 は 0.1 eV 程度のバンドギャップを持つことから熱電材料として有望であると推測し、 SrSn_2As_2 の熱電性能を測定した。673

Kにおいて $70 \mu\text{V/K}$ 程度のゼーベック係数が得られ、たしかに高い熱電性能を示す可能性が示唆された。今後ドーピングや合成条件最適化によるキャリア密度の制御による熱電性能の向上を試みる計画である。一方で、Snを含むSnTeなどの類推から、Sn欠損が熱力学的に安定に形成されるためにキャリア密度制御が容易ではない可能性がある。SnをInで置換したSrIn₂As₂などの合成を試み、その熱電特性や結晶構造をSrSn₂As₂と比較することで、本物質群の研究を深める計画である。

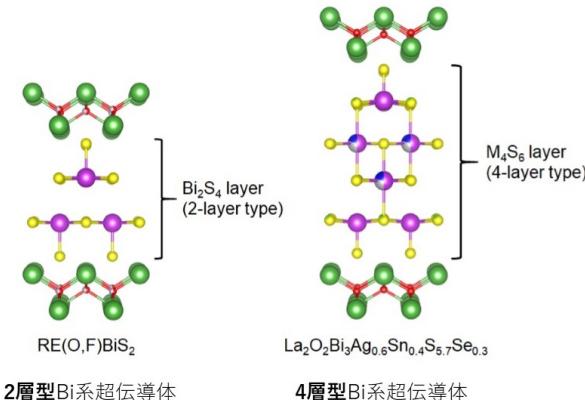


図 1: 2層型 Bi 系超伝導体の結晶構造と 4層型 Bi 系超伝導体の結晶構造図。

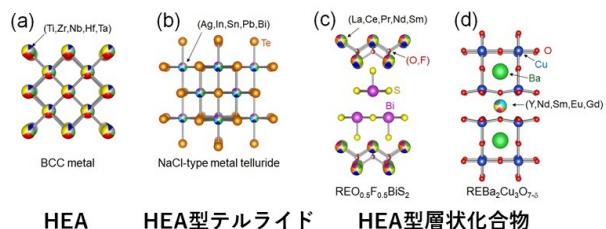


図 2: 高エントロピー合金型超伝導体の結晶構造図。

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.*, **295** (2019) 43
- R. Jha, Y. Goto, T. D. Matsuda, Y. Aoki, M. Nagao, I. Tanaka, Y. Mizuguchi: “Bulk superconductivity in a four-layer-type Bi-based compound La₂O₂Bi₃Ag_{0.6}Sn_{0.4}S_{5.7}Se_{0.3}”, *Sci. Rep.*, **9**, (2019) 13346
- G. M. Pugliese, F. Stramaglia, Y. Goto, K. Terashima, L. Simonelli, H. Fujiwara, A. Puri, C. Marini, M. Y. Hacisalihoglu, F. d’Acapito, T. Yokoya, T. Mizokawa, Y. Mizuguchi, N. L. Saini: “Temperature dependent local atomic displacements in NaSn₂As₂ system”, *J. Phys.: Condens. Matter*, **31** (2019) 425402
- H. Yuwen, Y. Goto, R. Jha, A. Miura, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, T. D. Matsuda, Y. Aoki, Y. Mizuguchi: “Enhanced superconductivity by Na doping in SnAs-based layered compound Na_{1+x}Sn_{2-x}As₂”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **58** (2019) 083001
- R. Matsumoto, Y. Goto, S. Yamamoto, K. Sudo, H. Usui, A. Miura, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, S. Adachi, T. Irifune, H. Takeya, H. Tanaka, K. Kuroki, Y. Mizuguchi, Y. Takano: “Pressure-induced superconductivity in the layered pnictogen diselenide NdO_{0.8}F_{0.2}Sb_{1-x}Bi_xSe₂ (x = 0.3 and 0.7)”, *Phys. Rev. B*, **100** (2019) 094528
- Y. Mizuguchi: “Superconductivity in High-Entropy-Alloy Telluride AgInSnPbBiTe₅”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **88** (2019) 124708

Md. R. Kasem, K. Hoshi, R. Jha, M. Katsuno, A. Yamashita, Y. Goto, T. D. Matsuda, Y. Aoki, Y. Mizuguchi: “Superconducting properties of high-entropy-alloy tellurides M-Te (M: Ag, In, Cd, Sn, Sb, Pb, Bi) with a NaCl-type structure”, *Appl. Phys. Express*, **13** (2020) 033001

M. Nagao, A. Miura, D. Urushihara, Y. Maruyama, Y. Goto, Y. Mizuguchi, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, Y. Wang, S. Watauchi, T. Asaka, Y. Takano, K. Tadanaga, I. Tanaka: “Flux Growth and Superconducting Properties of (Ce,Pr)OBiS₂ Single Crystals”, *Front. Chem.*, **8** (2020) 44

M. Katsuno, R. Jha, K. Hoshi, R. Sogabe, Y. Goto, Y. Mizuguchi: “High-Pressure Synthesis and Superconducting Properties of NaCl-Type In_{1-x}Pb_xTe (x = 0-0.8)”, *Condens. Matter*, **5** (2020) 14

Y. Shukunami, A. Yamashita, Y. Goto, Y. Mizuguchi: “Synthesis of RE123 high-Tc superconductors with a high-entropy-alloy-type RE site”, *Physica C*, **572** (2020) 1353623

K. Sudo, Y. Goto, R. Sogabe, K. Hoshi, A. Miura, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, Y. Mizuguchi: “Doping-Induced Polymorph and Carrier Polarity Changes in Thermoelectric Ag(Bi,Sb)Se₂ Solid Solution”, *Inorg. Chem.*, **58** (2019) 7628

K. Terashima, Y. Yano, E. Paris, Y. Goto, Y. Mizuguchi, Y. Kamihara, T. Wakita, Y. Muraoka, N. L. Saini, T. Yokoya: “Enhanced thermoelectricity by controlled local structure in bismuth-chalcogenides”, *J. Appl. Phys.*, **125** (2019) 145105

2) 著書

該当なし

3) 特許

該当なし

4) 学会講演

国内会議

● 日本物理学会 2019年秋季大会（岐阜大学, 2019年9月10-13日）

水口佳一：BiS₂系層状化合物の新物質開発と超伝導発現条件（シンポジウム講演）

勝野正誉, Rajveer Jha, 後藤陽介, 水口佳一：PbTeに対するIn置換効果

星和久, 木俣基, 後藤陽介, 松田達磨, 水口佳一：BiCh₂系超伝導体における超伝導面内異方性

山下愛智, 後藤陽介, 水口佳一：BiS₂系層状超伝導体 Sr_{1-x}RE_xFBiS₂(RE:La,Ce,Pr,Nd,Sm) の結晶構造と超伝導特性

● 応用物理学会 第80回秋季学術講演会（北海道大学, 2019年9月18-21日）

後藤陽介, 水口佳一：層状アンチモン酸セレン化物の熱電輸送特性

国際会議

- The 2nd Global Forum on Advanced Materials and Technologies for Sustainable Development
2019年7月23日 (Toronto, Canada)

Y. Goto: SbSe₂-based layered oxyselenides as a candidate multifunctional material for thermoelectric conversion and superconductivity(invited)

- MRM 2019 2019年12月10–14日 (Yokohama, Japan)

Y. Shukunami: Superconducting properties of RE123 superconductor with high-entropy-alloy-type RE site

Y. Goto: Layered Tin Pnictides as a New Class of van der Waals-type Superconductors(invited)

K. Hoshi: Two-Fold-Symmetric Magnetoresistance in Single Crystals of Tetragonal BiCh₂-Based Superconductor LaO_{0.5}F_{0.5}BiSSe

A. Yamashita: Crystal structure and superconducting properties of Sr_{1-x}RE_xFBiS₂ (RE: La, Ce, Pr, Nd, Sm) BiS₂-based layered superconductors

R. Jha: Bulk superconductivity induced via two-site substitution in La₂O₂M₄S₆-type layered oxy-chalcogenide La₂O₂Bi₃Ag_{0.6}Sn_{0.4}S_{5.7}Se_{0.3}(invited)

- SCES 2019 2019年9月23–28日 (Okayama, Japan)

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

Y. Goto: Superconductivity in layered tin pnictides

R. Jha, Y. Goto, Y. Mizuguchi: Bulk superconductivity in La₂O₂M₄S₆-type layered oxychalcogenide La₂O₂Bi₃Ag_{0.6}Sn_{0.4}S_{5.7}Se_{0.3}

- ISS 2019 2018年12月3–5日 (Kyoto, Japan)

Y. Goto: Superconductivity in layered tin pnictides with a van der Waals-type structure

- Superstripes 2019 2019年6月23–29日 (Ischia, Italy)

Y. Mizuguchi: BiS₂-based layered superconductor with thick superconducting layers(invited)

A. Yamashita: Electrochemical Synthesis of Iron Chalcogenide Superconductors

- J-Physics 2019 2019年9月18–21日 (Kobe, Japan)

Y. Mizuguchi, R. Jha: Superconductivity in new layered oxychalcogenide RE₂O₂M₄S₆ (M = Bi, Ag, Sn)

- SMEC 2019 2019年3月30–4月6日 (Miami, USA)

Y. Goto: SnPn-based layered superconductors(invited)

表界面光物性研究室

1. 研究活動の概要

界面や表面でおこる様々な現象は、物質の性質やデバイスの性能に大きく影響を及ぼす。界面や表面でおこる様々な物理現象を深く理解し、そして制御することができれば、新たな物性を見出すことや、革新的なデバイスの実現につながる。本研究室では、高効率な光電変換・熱電変換などの創エネルギーのサイエンスに貢献することを目標の一つとして、(1) 界面や表面の制御、(2) 光励起によって生じる非平衡キャリアに由来する光物性、に着目して研究している。一次元材料である単層カーボンナノチューブや無機ナノチューブ・ナノワイヤ、二次元材料である原子層物質などを対象に、合成・精製技術開発、新規測定技術開発、電気伝導特性・磁性・光物性・熱物性の研究を行っている。それら物質の構造、フェルミレベル、界面の接合構造の制御を通して新たな物性の探索を行っている。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、2019年度から熱物性に着目した研究を推進している。

1) 热物性研究

薄膜熱伝導測定系の開発 近年、フレキシブルディスプレイといった柔らかな材料は様々なデバイス応用をなされている。これらフレキシブルデバイスの性能を最大限発揮するには、その熱物性の理解は必要不可欠である。フレキシブル材料は薄膜の形で駆動される。例えば、単層カーボンナノチューブや有機ポリマーといったフレキシブル材料の薄膜は、厚み数10nmの薄膜である為、その熱伝導率を評価するのは通常の手法では非常に困難である。唯一、時間領域サーモリフリフレクタンス法(TDTR法)が、その熱伝導を評価することが可能である。本研究室では、薄膜の電気伝導率と熱伝導率との相関を明らかにする為、電気化学的手法も組み合わせたTDTR測定技術の開発を行っている。TDTR法とは、フェムト秒のパルスレーザーを用い、ポンププローブ分光手法を用いて、金属薄膜ターゲットの反射率の時間変化を明らかにすることで、熱の伝播を解き明かす手法である。通常のTDTR法では、アルミを金属基板として用いるが、アルミは電気化学的に極めて弱い為、我々が目的とする手法に向いていない。電気化学反応に強く、電極として一般的に用いられる金をターゲットとする為には、金の反射率変化を感度よく検出でくる波長520nmを検出光源とした新たなTDTR法の開発をする必要があった。今年度、新規TDTR系の構築を行い、標準試料の評価と、単層カーボンナノチューブ薄膜の熱伝導評価に成功した。得られた熱伝導率は、既存の報告と、バッキーペーパーにおけるものとを比較し、妥当であることを確認した。現在、電気化学的手法を組み合わせたTDTR測定技術開発を更に進めている。

紙状試料の熱伝導評価 热電変換効率を正しく評価する為には、熱伝導率の評価が必要不可欠である。フリースタンディングな状況にある単層カーボンナノチューブ(SWCNT)紙状試料の熱伝導評価においては、周期加熱法を用いてその熱伝導評価が可能である。特に、SWCNT系において電気伝導率と熱伝導率との相関は殆ど理解されていない。この問題を取り組む為、高純度に分離精製を行った半導体型SWCNTのバッキーペーパー試料を作製し、その電気伝導率と熱伝導率との関係を明らかにする研究を進めた。温度依存性や化学ドーピングの実験を行い、電気伝導率が約二桁変動した場合においても、熱伝導率が殆ど変化しないことを突き止めており、それはネットワーク系における熱伝導はフォノンの寄与が支配的であることを示す予備データを明らかにした。

2) 低次元ナノ物質系における電子物性とその制御

ナノチューブの熱電物性の制御 単層カーボンナノチューブ(SWCNT)の熱電物性はこれまで数多く研究がなされているが、1本にみられる1次元電子構造が、SWCNTが束となり、更に薄膜となった構造において現れるのかは未解明な課題であった。2019年度は、純度99%以上の高純度単一カイラリティ半導体の(6,5)SWCNTおよび金属型SWCNTのキャリア注入量を系統的に変化させ、そこでゼーベック係数と電気伝導率との相関を解き明かし、金属型SWCNTに見られる1次元性由来の振る舞いを解き明かした。半導体型SWCNTにおいては、注入キャリア量の増大とともに、電気伝導率は増加し、それと共にゼーベック係数は減少した。これは、一般的な金属材料系でみられる熱電特性のトレードオフの関係に従ったものである。しかし、金属型SWCNTにおいては、キャリア注入量の増加とともに、電気伝導率の増大と、ゼーベック係数の増大が同時に起こるトレードオフの破れがあることを見出した。この背景を理論的に解析し、一次元電子構造由来のものであることを明らかにした。

配向制御ナノチューブの物性 SWCNT薄膜の性質は、構成するナノチューブの接合構造に大きく影響を受ける。一方でSWCNTが配列した大面積薄膜の創出は、SWCNT薄膜の物性を解き明かす上で重要な課題である。同薄膜作製を、再現性良く行う為、作製技術の改良を行い、グループを薄膜作製に必要となるメンブレンフィルター上に人工的に形成することにより、再現よく大面積配列薄膜を作製することに成功した。また、配列した金属型・半導体型SWCNT薄膜の熱電特性のキャリア注入依存性を明らかにし、半導体型では軸に垂直方向と平行方向で伝導機構が異なっている可能性がある予備結果を得られた。現在、その再現性の検証を進めている。

一次元遷移金属カルコゲナイトナノチューブの物性制御 遷移金属カルコゲナイトナノチューブ(TMDC-NT)は、カイラル構造に由来して、非従来型超伝導やバルク光電効果といった新たな物性が報告され、現在活発に研究がなされている。TMDC-NTは、古くからその合成手法の成功は報告されているが、その物性は殆ど明らかにされていない。構造と物性との関係を系統的に議論した研究例は皆無の状況である。その背景は、直径の小さく構造が均一なTMDC-NTの合成手法が確立されていないことが挙げられる。2019年度は同問題を解決する為、新たな合成法に着手し、比較的直径の小さな(約20nm)のWS₂-NTの合成法に成功し、その両極性動作を明らかにした。

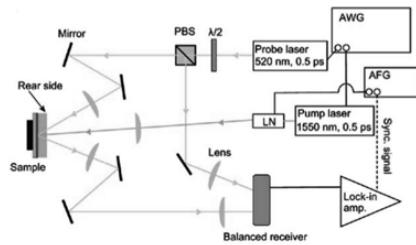


図 1: 新規開発したTDTR測定による薄膜熱伝導の実験配置図

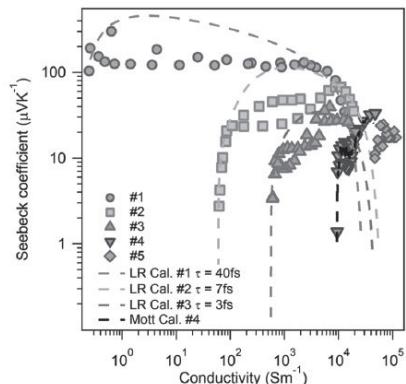


図 2: 金属型 SWCNT の熱電特性的トレードオフの破れ。#1 は高純度 (6,5), #4 と #5 は高純度金属のランダム、配向試料を示す。#2, 3 は (6,5) と金属の 9:1 及び 1:1 の合金試料である。

2. 研究業績

1) 論文

M. V. Kharlamova, C. Kramberger, P. Rudatis, K. Yanagi, D. Eder: "Characterization of the Electronic Properties of Single - Walled Carbon Nanotubes Filled with an Electron Donor—Rubidium Iodide: Multifrequency Raman and X - ray Photoelectron Spectroscopy Studies", *Phys. Stat. Sol. B*, **256** (2019) 1900209

K. Ueji, Y. Matsuoka, H. Matsuo, Y. Yomogida, K. Nomoto, K. Miyamura, T. Yagi, K. Yanagi: "Thermophysical properties of a single-wall carbon nanotube thin film on Au electrodes evaluated by a time-domain thermoreflectance method", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **58** (2019) 1228006

Y. Ichinose, A. Yoshida, K. Horiuchi, K. Fukuhara, N. Komatsu, W. Gao, Y. Yomogida, M. Matsubara, T. Yamamoto, J. Kono, K. Yanagi: "Solving the Thermoelectric Trade-Off Problem with Metallic Carbon Nanotubes", *Nano Lett.*, **19** (2019) 7370-7376

Y. Yomogida, Y. Miyata, K. Yanagi: "Transistor properties of relatively small-diameter tungsten disulfide nanotubes obtained by sulfurization of solution-synthesized tungsten oxide nanowires", *Appl. Phys. Express*, **12** (2019) 085001

D. Hayashi, Y. Nakai, H. Kyakuno, N. Hongo, Y. Miyata, K. Yanagi, Y. Maniwa: "Thermoelectric properties of single-wall carbon nanotube networks", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **58** (2019) 075003

C. Reinoso, C. Berkmann, L. Shi, A. Debut, K. Yanagi, T. Pichler, P. Ayala: "Toward a predominant Substitutional bonding environment in B-doped single-walled carbon nanotubes", *ACS Omega*, **4** (2019) 1941-1946

F. Katsutani, W. Gao, X. Li, Y. Ichinose, Y. Yomogida, K. Yanagi, J. Kono: "Direct observation of cross-polarized excitons in aligned single-chirality single-wall carbon nanotubes", *Phys. Rev. B*, **99** (2019) 035426

W. Gao, N. Komatsu, L. W. Taylor, G. V. Naik, K. Yanagi, M. Pasquali, J. Kono: "Macroscopically aligned carbon nanotubes for flexible and high-temperature electronics, optoelectronics, and thermoelectrics", *J. Phys. D*, **53** (2019) 063001

Y. Kim, K. A. Velizhanin, X. He, I. Sarpkaya, Y. Yomogida, T. Tanaka, H. Kataura, S. K. Doorn, H. Htoon: "Photoluminescence Intensity Fluctuations and Temperature-Dependent Decay Dynamics of Individual Carbon Nanotube sp₃ Defects", *J. Phys. Chem. Lett.*, **10** (2019) 1423-1430

2) 著書

柳和宏: "カーボンナノチューブの薄膜熱電物性", pp94-101, "次世代熱電変換材料・モジュールの開発" シーエムシー出版 (2019)

3) 学会講演

● FNTG 若手研究会 2019 年 9 月 2 日 (名古屋大学)

柳和宏: ナノチューブの上にも 8 年～8 年かけて解決した研究課題について～ (招待講演)

● 第57回フラー・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム 2019年9月3~5日（名古屋大学）

A. Katagiri, N. Komatsu, J. Eda, H. Okubo, K. Horiuchi, K. Ueji, Y. Yomogida, W. Gao, J. Kono, K. Yanagi: Fabrication of large-area aligned films of single-wall carbon nanotubes using artificially grooved membrane filters

Y. Matsuoka, K. Ueji, H. Matsuo, Y. Yomogida, T. Yagi, K. Yanagi: Thermophysical property of single-wall carbon nanotube thin film on Au electrodes by a time-domain thermoreflectance method

Y. Yomogida, Y. Miyata and K. Yanagi: Synthesis of WSe₂ nanotubes by selenization of tungsten oxide nanowires

K. Horiuchi, R. Okada, H. Kawai, K. Ueji, Y. Yomogida, W. Gao, J. Kono, K. Yanagi: Hall Effect on Aligned Metallic Single-Wall Carbon Nanotube Thin Films

A. Yoshida, Y. Ichinose, K. Fukuhara, K. Ueji, Y. Yomogida, K. Yanagi: Transition from Metallic to Semiconducting behaviors in Seebeck coefficients of Semiconducting Single-Wall Carbon Nanotube film

H. Matsuo, K. Ueji, Y. Yomogida, T. Yagi, K. Yanagi : In-plane and out-of plane thermal conductivity of single wall carbon nanotube buckypapers with selected electronic structure

H. Nishidome, K. Nagai, K. Uchida, Y. Ichinose, K. Fukuhara, J. Eda, H. Okubo, Y. Yomogida, K. Tanaka, K. Yanagi: Control of high-harmonic generation in single-wall carbon nanotubes by gating

● 日本物理学会 2019年秋季大会 2019年9月10~13日（岐阜大学）

蓬田陽平, 生駒栄奈, 一ノ瀬遙太, 柳和宏: カイラリティの異なる单層カーボンナノチューブの熱電物性

堀内加奈子, 岡田遼太朗, 河合英輝, 上治寛, 蓬田陽平, W. Gao, 河野淳一郎, 柳和宏: 配列した金属型单層カーボンナノチューブ薄膜のホール効果

西留比呂幸, 永井恒平, 内田健人, 一ノ瀬遙太, 福原健吾, 枝淳子, 大久保瞳, 蓬田陽平, 田中耕一郎, 柳和宏: 单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 2

柳和宏: カーボンナノチューブにおける熱電応答：実験 （招待講演）

● 第80回応用物理学会秋季学術講演会 2019年9月18~21日（北海道大学）

上治 寛, 松岡 勇也, 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による金蒸着膜上の单層カーボンナノチューブ薄膜の熱物性評価

一ノ瀬遙太, 吉田朱里, 堀内加奈子, 福原健吾, 小松夏実, W. Gao, 蓬田 陽平, 松原愛帆, 山本貴博, 河野淳一郎, 柳和宏: フエルミレベル制御された金属型カーボンナノチューブの大きな熱電性能

● Joint workshop on thermal management and Energy harvesnting using nano-materials 2019年10月16日 (Nagoya Univ.)

K. Yanagi: 单層カーボンナノチューブ薄膜の熱物性

● 热電変換材料の科学と工学の新展開 2019年12月25日（東京理科大学）

柳和宏: 单層カーボンナノチューブの熱電特性に見られる一次元性 (招待講演)

● 第 58 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 2020 年 3 月 15–17 日 (東京大学)

Y. Yomogida, Y. Miyata, K. Yanagi: Optical properties of inorganic nanotubes with different diameters

K. Ueji, Y. Matsuoka, T. Yagi, K. Fukuhara, Y. Ichinose, A. Yoshida, Y. Yomogida, K. Yanagi: Evaluation of Thermal Transport in a Single-walled Carbon Nanotube Film by Ionic-liquid Gating

K. Horiuchi, R. Okada, H. Kawai, Y. Yomogida, N. Komatsu, W. Gao, J. Kono, K. Yanagi: Hall Effect at weak-localization conduction in aligned metallic single-walled carbon nanotube thin films

K. Fukuhara, Y. Ichinose, K. Horiuchi, A. Yoshida, Y. Yomogida, W. Gao, N. Komatsu, J. Kono, K. Yanagi: Relationships between Seebeck coefficient and Conduction Directions

K. Yanagi: One dimensional characteristics in thermoelectric properties of semiconducting single walled carbon nanotubes

● 日本物理学会 第 75 回年次大会 2020 年 3 月 16~19 日 (名古屋大学)

蓬田陽平, 生駒栞奈, 一ノ瀬遙太, 柳和宏: カイラリティの異なる单層カーボンナノチューブの熱電物性

堀内加奈子, 岡田遼太朗, 河合英輝, 上治寛, 蓬田陽平, W. Gao, 河野淳一郎, 柳和宏: 配列した金属型单層カーボンナノチューブ薄膜のホール効果

一ノ瀬遙太, 吉田朱里, 堀内加奈子, 福原健吾, 小松夏実, W. Gao, 蓬田 陽平, 松原愛帆, 山本貴博, 河野淳一郎, 柳和宏: 单層カーボンナノチューブにおける一次元的な熱電物性

国際会議

● 235th ECS Meeting 2019 年 5 月 26–30 日 (Dallas, USA)

K. Yanagi: Thermoelectric properties of Fermi-level tuned and Aligned Single Wall Carbon Nanotubes (Invited Talk)

● The 20th International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT19) 2019 年 7 月 21–26 日 (Nagoya Univ., Nagoya Japan)

Y. Ichinose, A. Yoshida, K. Horiuchi, K. Fukuhara, N. Komatsu, W. Gao, Y. Yomogida, M. Matsubara, T. Yamamoto, J. Kono, K. Yanagi: One-Dimensional Thermoelectric Properties of High-Purity Single-Chirality Single-Wall Carbon Nanotube Films

H. Nishidome, K. Nagai, K. Uchida, Y. Ichinose, K. Fukuhara, J. Nozaki, J. Eda, Y. Yomogida, J. Kono, K. Tanaka, K. Yanagi: Fermi-Level Dependence of THz High-Harmonic Generation in Single-Wall Carbon Nanotubes

● Recent progress in graphene & 2D materials research (RPGR 2019) 2019 年 10 月 6–10 日 (Matsue, Shimane, Japan)

Y. Yomogida, Y. Miyata and K. Yanagi: Synthesis and sorting of inorganic nanotubes

● 32nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2019) 2019年10月28–31日 (Hiroshima, Hiroshima, Japan)

Y. Yomogida, Y. Miyata and K. Yanagi: Synthesis of Relatively Small Diameter Inorganic Nanotubes by Sulfurization of Solutionsynthesized Nanowire Precursors and Their Transistor properties

Y. Ichinose, A. Yoshida, K. Horiuchi, K. Fukuhara, N. Komatsu, W. Gao, Y. Yomogida, M. Matsubara, T. Yamamoto, J. Kono, K. Yanagi: Solving the Thermoelectric Trade-Off Problem with Metallic Carbon Nanotubes

K. Ueji, H. Matsuo, Y. Ichinose, Y. Yomogida, and K. Yanagi: Thermal diffusivity of buckypapers prepared from nanotubes of various electrical conductivities

H. Nishidome, K. Nagai, K. Uchida, Y. Ichinose, K. Fukuhara, J. Eda, H. Okubo, Y. Yomogida, K. Tanaka and K. Yanagi: Manipulating THz high-harmonic generation in single-wall carbon nanotubes by tuning bandgap and Fermi level

● EU-Japan Workshop 2019年11月18日 (Pisa, Italy)

K. Yanagi: Intersubband plasmons in tubular nano-carbon structures (Invited Talk)

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. 2019 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) 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ゲステンなどの遷移金属ダイカルコゲナイト (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. 2019 年度は, 化学気相成長させた二硫化モリブデンおよびそのヘテロ構造の光学特性の解明(小島修士論文), 半導体原子層やその面内ヘテロ構造における光電流(清水修士論文), 混晶半導体原子層の作製と発光特性(内藤卒業研究), 二セレン化ニオブ多結晶薄膜の合成と超伝導(三宅・安藤), 半導体ヘテロ構造の接合界面の電界発光(和田)などについて研究を進めてきた. 今後, 多様な組成・構造を持つ TMDC やそのヘテロ構造の合成法の開発を進め, その電気伝導や励起子光物性などの物性解明を通じ, 光・電子デバイス応用への展開も見据えた研究を進めていく.

2) 新規原子細線・ナノワイヤーの合成と物性解明

3 原子程度の直径を持つ, 遷移金属モノカルコゲナイトナノワイヤーは, その一次元構造に由来する電子状態や光学応答が注目を集めている. しかしながら, これまでの研究では, ナノワイヤーの合成法は限られており, その光学応答や電子状態の研究はほとんどなされていない. 今年度は, カーボンナノチューブをテンプレートとしたナノワイヤーの多量合成に成功し, その構造・分光的性質に関する研究を進めた. 今後, 様々なナノワイヤーの電子状態に関する研究を進めていく予定である.

3) 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. 本年度も継続して 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來した熱電物性制御の可能性について研究した. 理論計算によるフィルムを構成する SWCNT バンドルのゼーベック係数の解析を行い, SWCNT フィルムのバルクのゼーベック係数が電子状態が異なる複数種類の SWCNT の並列モデルによりよく理解できる顔がわかった. 一方, SWCNT フィルムの電気伝導度は SWCNT-SWCNT コンタクトにより極めて強く抑制されていることがわかった. このことから, SWCNT フィルムの熱電物性を改善する指針が得られた(林博士論文).

さらに, SWCNT フィルム内の SWCNT-SWCNT コンタクトのゼーベック係数に与える効果を明らかにするために, ゼーベック係数の試料長依存性を測定するゼーベック係数測定法を開発した. 本方法により, SWCNT フィルムの試料長が数十 μm 以下までゼーベック係数がほぼ一定であることがわかり, SWCNT-SWCNT コンタクトがフィルムのゼーベック係数に顕著に影響しないことが実験的に確認された(日高修士論文).

4) 制限空間内の水

水はあらゆるところに存在する。地殻や土壤、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充分に明らかにされているとはいえない。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°Cで密度が最大になるなどの水の異常の起源について議論されている。このような水は、微細な空間内あるいは幾何学的に強く束縛された条件下においても存在し、自然界における様々な現象において支配的な役割を担っている。また微細空間内の水の理解は、プロトン伝導体や新規分離膜などの開発においても重要である。

本年度は、SWCNTの水の輸送特性に関する、分子動力学計算による研究を行った。また、本研究グループが提案している扁平化SWCNT内部でのアイスナノリボンの形成を実証するための圧力印加実験を行った（小倉・客野）。

5) SWCNTの力学特性

SWCNTに軸に垂直方向から力を加えた場合の力学特性に関する分子動力学計算を行った。垂直方向から力を加えると、ある臨界力によりSWCNTは変形するが、通常の物質とは異なり、塑性変形することなく、力を抜くと元に戻るバックリング現象が観察された。また、水を内包したとき、バックリングを起こす臨界力が上昇する傾向が確認された（中山・客野）。

6) 圧力下ESR装置開発と β' -(BEDT-TTF)₂ICl₂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(3～10GPa)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、常圧から80ton(約8GPa)、常温から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。この接続を改善することにより、常圧で、液体ヘリウム温度の低温まで解析可能な信号を得ることができた。試料として取り上げている β' -(BEDT-TTF)₂ICl₂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、8.2GPa以上の圧力下で有機導体としては高い転移温度14.2K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1GPa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(渡邊卒業研究、埼玉大、産総研、千葉大との共同研究)。

7) 学外共同利用施設による研究、その他

産業技術総合研究所NPFにおいて共同利用研究を行った。課題名(課題番号):細線状の遷移金属カルコゲナイトの電気伝導特性の評価(19008709、代表 中西)

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):歪んだカーボンナノチューブに内包された水の構造(2018G572、代表 客野)

2. 研究業績

1) 論文

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.*, **19** (2019) 4845-4851

R. Canton-Vitoria, H. B. Gobezo, 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.*, **131** (2019) 5768-5717

X. Zhang, Z. Jin, L. Wang, J. A. Hachtel, E. Villarreal, Z. Wang, T. Ha, Y. Nakanishi, C. S. Tiwary, J. Lai, L. Dong, J. Yang, R. Vajtai, E. Ringe, J. C. Idrobo, B. I. Yakobson, J. Lou, V. Gambin, R. Koltun, P. M. Ajayan: "Low Contact Barrier in 2H/1T' MoTe₂ In-Plane Heterostructure Synthesized by Chemical Vapor Deposition" *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **11** (2019) 12777-12785

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

Y. Liu, C. Liang, J. Wu, S. J. Varma, Y. Nakanishi, A. Aliyan, A. A. Marti, Y. Wang, B. Xie, J. Kumar, K. Layne, N. Chopra, I. Odeh, R. Vajtai, J. Thomas, X. Peng, W. Yang, P. M. Ajayan: "Reflux Pretreatment-Mediated Sonication: A New Universal Route to Obtain 2D Quantum Dots" *Materials Today*, **22** (2019) 17-24

T. Nakanishi, S. Yoshida, K. Murase, O. Takeuchi, T. Taniguchi, K. Watanabe, H. Shigekawa, Y. Kobayashi, Y. Miyata, H. Shinohara, R. Kitaura: "The Atomic and Electronic structure of 0° and 60° grain boundaries in MoS₂", *Front. Phys.*, **7** (2019) 59-1-7

K. Kojima, H. E. Lim, Z. Liu, W. Zhang, T. Saito, Y. Nakanishi, T. Endo, Y. Kobayashi, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Matsuda, Y. Maniwa, Y. Miyauchi, Y. Miyata: "Restoring the intrinsic optical properties of CVD-grown MoS₂ monolayers and their heterostructures", *Nanoscale*, **11** (2019) 12798-12803

Y. Kobayashi, S. Yoshida, M. Maruyama, H. Mogi, K. Murase, Y. Maniwa, O. Takeuchi, S. Okada, H. Shigekawa, Y. Miyata: "Continuous Heteroepitaxy of Two-Dimensional Heterostructures Based on Layered Chalcogenides" *ACS Nano*, **13** (2019) 7527-7535

Y. Uchiyama, A. Kutana, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Kojima, T. Endo, Y. Miyata, H. Shinohara, R. Kitaura: "Momentum-forbidden dark excitons in hBN-encapsulated monolayer MoS₂" *NPJ 2D Mater. Appl.*, **3** (2019) 26-1-6

Y. Yomogida, Y. Miyata, K. Yanagi: "Transistor properties of relatively small-diameter tungsten disulfide nanotubes obtained by sulfurization of solution-synthesized tungsten oxide nanowires" *Appl. Phys. Express*, **12** (2019) 085001

D. Hayashi, Y. Nakai, H. Kyakuno, N. Hongo, Y. Miyata, K. Yanagi, Y. Maniwa: "Thermoelectric properties of single-wall carbon nanotube networks" *Jap. J. Appl. Phys.*, **58** (2019) 075003

J. Pu, K. Matsuki, L. Chu, Y. Kobayashi, S. Sasaki, Y. Miyata, G. Eda, T. Takenobu: "Exciton Polarization and Renormalization Effect for Optical Modulation in Monolayer Semiconductors" *ACS Nano*, **13** (2019) 9218-9226

H. G. Ji, P. S. - Fernandez, D. Yoshimura, M. Maruyama, T. Endo, Y. Miyata, S. Okada, H. Ago: "Chemically tuned p- and n-type WSe₂ monolayers with high carrier mobility for advanced electronics" *Adv. Mater.*, **31** (2019) 1903613-1-9

H. E. Lim, T. Irisawa, N. Okada, M. Okada, T. Endo, Y. Nakanishi, Y. Maniwa, Y. Miyata: "Monolayer MoS₂ growth at the Au?SiO₂ interface" *Nanoscale*, **11** (2019) 19597-20334

T. Taniguchi, S. Li, L. Nurdwijayanto, Y. Kobayashi, T. Saito, Y. Miyata, S. Obata, K. Saiki, H. Yokoi, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Tsukagoshi, Y. Ebina, T. Sasaki, M. Osada: "Tunable Chemical Coupling in Two-dimensional van der Waals-Electrostatic Heterostructures" *ACS Nano*, **13** (2019) 11214-11223

N. Yoshikawa, K. Nagai, K. Uchida, Y. Takaguchi, S. Sasaki, Y. Miyata, K. Tanaka: "Interband resonant high-harmonic generation by valley polarized electron-hole pairs" *Nat. Commun.*, **10** (2019) 3709-1-7

S. Gupta, F. Rortais, R. Ohshima, Y. Ando, T. Endo, Y. Miyata, M. Shiraishi: "Monolayer MoS₂ field effect transistor with low Schottky barrier height with ferromagnetic metal contacts" *Sci. Rep.*, **9** (2019) 17032-1-7

K. Endo, Y. Miyata, T. Irisawai: "2D Materials For Nano-Device Application" *IEEE Nanotechnol. Mag.*, **13** (2019) 39-42

M. Okada, N. Okada, W.-H. Chang, T. Endo, A. Ando, T. Shimizu, T. Kubo, Y. Miyata, T. Irisawa: "Gas-Source CVD Growth of Atomic Layered WS₂ from WF₆ and H₂S Precursors with High Grain Size Uniformity" *Sci. Rep.*, **9** (2019) 17678-1-10

R. Xiang, T. Inoue, Y. Zheng, A. Kumamoto, Y. Qian, Y. Sato, M. Liu, D. Gokhale, J. Guo, K. Hisama, S. Yotsumoto, T. Ogamoto, H. Arai, Y. Kobayashi, H. Zhang, B. Hou, A. Anisimov, M. Maruyama, Y. Miyata, S. Okada, S. Chiashi, Y. Li, J. Kong, E. I. Kauppinen, Y. Ikuhara, K. Suenaga, S. Maruyama: "One-dimensional van der Waals heterostructures" *Science*, **367** (2020) 537-542

T. Irisawa, N. Okada, W.-H. Chang, M. Okada, T. Mori, T. Endo, Y. Miyata: "CVD grown bilayer WSe₂/MoSe₂ heterostructures for high performance tunnel transistors" *Jap. J. Appl. Phys.*, **59** (2020) SGHH05-1-6

Y. Takahashi, Y. Kobayashi, Z. Wang, Y. Ito, M. Ota, H. Ida, A. Kumatani, K. Miyazawa, T. Fujita, H. Shiku, Y. E. Korchev, Y. Miyata, T. Fukuma, M. Chen, T. Matsue: "High Resolution Electrochemical Mapping of Hydrogen Evolution Reaction on Transition Metal Dichalcogenide Nanosheets" *Angew. Chem.*, **59** (2020) 3601-3608

2) 著書

宮田耕充: "熱化学気相成長法による二次元物質および面内ヘテロ構造の成長", Vacuum and Surface Science, 62巻10号, 2019

宮田耕充: "二次元ヘテロ構造の直接成長", グラフェンから広がる二次元物質の新技術と応用, 第4章第2節, 2020

宮田耕充: "TMDCのCVD成長", グラフェンから広がる二次元物質の新技術と応用, 第6章第5節, 2020

入沢寿史, 宮田耕充: "トンネルFET応用", グラフェンから広がる二次元物質の新技術と応用, 第3章第3節, 2020

中西勇介: "次世代デバイス動向—ナノワイヤデバイス", Yano E PLus, , 2019

3) 特許

佐藤和秀, 中西勇介, 永田雅貴, 安井裕智「Gd内包カーボンナノチューブ含有造影剤」(出願番号: 2020-017491) 名古屋大学, 特許出願中.

4) 学会講演

● ナノ構造物性研究室(岡田・丸山研究室)セミナー 2019年5月17日(筑波大学)

宮田耕充: 原子層ヘテロ構造の合成と機能開拓

● 第4回 固体化学フォーラム 2019年6月10-11日(分子科学研究所)

中西勇介, 永田雅貴, 篠原久典, 劇嶧, 末永和知, 志賀拓磨, 中村優斗, 小山剛史, 岸田英夫: ナノチューブを鋳型にした1次元遷移金属カルコゲナイトの合成

● 蔵王19研究会 2019年8月8-9日(ルーセントタカミヤ)

H. E. Lim, T. Irisawa, N. Okada, T. Endo, Y. Nakanishi, Y. Maniwa, Y. Miyata: MoS₂ Growth at Metal-Insulator Interface

C. Ando, Y. Nakanishi, J. Pu, T. Takenobu, Y. Miyata: Preparation and transport properties of superconducting NbSe₂ Films

K. Kojima, H. E. Lim, Z. Liu, Z. Wenjin, T. Saito, Y. Nakanishi, T. Endo, Y. Kobayashi, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Matsuda, Y. Maniwa, Y. Miyauchi, Y. Miyata: Restoring intrinsic optical properties of CVD-grown MoS₂ monolayers and their heterostructures

N. Wada, J. Pu, W. Zhang, Z. Liu, H. Matsuoka, Y. Nakanishi, Y. Maniwa, K. Matsuda, Y. Miyauchi, T. Takenobu, Y. Miyata: Circular-polarized luminescence from monolayer semiconductor heterojunction

Y. Nakanishi, M. Aizaki, M. Nagata, N. Kanda, Z. Liu, K. Suenaga, H. Shinohara: Atomically Precise Growth of 1D Transition Metal Chalcogenides Inside Nano-Test-Tubes

● 放射光学会若手研究会 2019年8月23日(東北大)

宮田耕充: 原子層ヘテロ構造の成長と評価

● 第9回 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン若手研究会 2019年9月2日（名古屋大学）

中西勇介: カタチから入るナノサイエンス

● 第57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9月3-5日（名古屋大学）

J. Pu, H. Matsuoka, T. Yamada, Y. Koayashi, Y. Takaguchi, Y. Miyata, T. Takenobu : Room-Temperature Valley-Polarized Light-Emitting Devices via Strained Monolayer Semiconductors

小椋 友寛, 山田 知之, 和田 尚樹, 遠藤 尚彦, 山下 兼一, 宮田 耕充, 蒲 江, 竹延 大志 : 微小光共振器を導入した単層 WS₂ 発光デバイス

安藤 千里, 中西 勇介, 蒲 江, 高橋 統吾, 竹延 大志, 宮田 耕充 : Nearly Isotropic and Large Critical Field from Three-Dimensional Networks of Anisotropic Superconducting Flakes

K. Kojima, H. E. Lim, Z. Liu, W. Zhang, T. Endo, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Matsuda, Y. Miyauchi, Y. Miyata, T. Saito, Y. Nakanishi, Y. Kobayashi, Y. Maniwa : Restoring intrinsic optical properties of CVD-grown MoS₂ monolayers and their heterostructures

N. Wada, J. Pu, W. Zhang, Z. Liu, H. Matsuoka, K. Matsuda, Y. Nakanishi, Y. Miyauchi, T. Takenobu, Y. Miyata, Y. Maniwa : Interface electroluminescence from WS₂/WSe₂ in-plane heterostructures

蓬田 陽平, 貝沼 佳希, 遠藤 尚彦, 宮田 耕充, 柳 和宏 : 酸化タンゲステンナノワイヤのセレン化による二セレン化タンゲステンナノチューブの合成

N. Kanda, Y. Nakanishi, D. Liu, Z. Liu, K. Suenaga, D. Tomanek, H. Shinohara: Efficient Production and Characterization of 1D Transition Metal Monochalcogenides Inside Carbon Nanotubes

● 日本物理学会 2019年秋季大会 2019年9月10-13日（岐阜大学）

蒲江, 和田尚樹, Wenjin Zhang, 高口裕平, 中西勇介, 松田一成, 宮内雄平, 宮田耕充, 竹延大志: 原子層面内ヘテロ接合界面における電流励起発光

永井 恒平, 内田 健人, 遠藤 尚彦, 宮田 耕充, 田中 耕一郎: 遷移金属ダイカルコゲナイト単層薄膜における高次高調波発生の光キャリアドーピング効果

● 第80回応用物理学会秋季学術講演会 2019年9月18-21日（北海道大学）

K. Ho, W. Zhang, Y. Kobayashi, Y. Miyata, K. Matsuda, Y. Miyauchi, T. Takenobu: Electroluminescence Imaging of Monolayer Transition Metal Dichalcogenides

T. Yamada, H. Matsuoka, K. Ho, Y. Miyata, T. Takenobu: Atomically Thin Material Light Emitting Devices on Flexible Substrates

H. Mogi, Z.-h. Wang, T. Bamba, Y. Takaguchi, T. Endo, S. Yoshida, A. Taninaka, H. Oigawa, Y. Miyata, O. Takeuchi, H. Shigekawa: Photoresponse measurement of monolayer WSe₂/MoSe₂ in-plane heterostructure by a photo excited multiprobe technique

N. Fujii, K. Murase, S. Yoshida, Y. Kobayashi, Y. Miyata, O. Takeuchi, H. Shigekawa: Band alignment at atomic-layer heterostructure measured by STM/STS

W. H. Chang, N. Okada, H. Asai, K. Fukuda, M. Okada, T. Endo, Y. Miyata, T. Irisawa: Characterization of top-gate MoS₂ MOSFETs with PEALD-ZrO₂ gate dielectric

D. Hayashi, H. Kyakuno, Y. Miyata, Y. Nakai, Y. Maniwa: Thermoelectric properties of single-walled carbon nanotube ropes: temperature dependence

藤井直樹, 村瀬康太, 吉田昭二, 小林祐, 宮田耕充, 武内修, 重川秀実: 原子層ヘテロ接合界面におけるバンドアライメントのSTM/STS計測

● 応物若手チャプター 2019年10月26日（名古屋大学）

中西勇介: ナノチューブのサイエンス-宇宙産業から医療まで-

● 2019年日本表面真空学会学術講演会 2019年10月28-30日（つくば国際会議場）

藤井直樹, 村瀬康太, 吉田昭二, 小林佑, 宮田耕充, 武内修, 重川秀実: MoS₂/MoSe₂ヘテロ接合界面電子状態における格子歪の影響

茂木裕幸, 汪子, 番場隆文, 高口裕平, 遠藤尚彦, 吉田昭二, 谷中淳, 大井川治宏, 宮田耕充, 重川秀実: 光励起多探針計測を用いた単層 WSe₂/MoSe₂面内ヘテロ構造の光応答評価

藤井直樹, 村瀬康太, 吉田昭二, 小林佑, 宮田耕充, 武内修, 重川秀実: MoS₂/MoSe₂ヘテロ接合界面電子状態における格子歪の影響

● 第67回応用物理学会春季学術講演会 2020年3月12-15日（上智大学）

H. G. Ji, P. S.-Fernandez, D. Yoshimura, M. Maruyama, T. Endo, Y. Miyata, S. Okada, H. Ago: Chemically tuned p- and n-type WSe₂ monolayers with higher carrier mobility for advanced electronics

蒲江, Ming-Yang Li, Jing-Kai Huang, 和田尚樹, 山田知之, 宮内雄平, 松田一成, 宮田耕充, Lain-Jong Li, 竹延大志: 原子層面内ヘテロ接合を用いた発光デバイス

高橋統吾, 蒲江, 安藤千里, 中西勇介, 斎藤光史, 宮田耕充, 竹延大志: 化学気相成長した大面積NbSe₂薄膜の超伝導特性

● 第58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 2020年3月15-17日（東京大学）

M. Shimasaki, T. Nishihara, N. Wada, Z. Liu, K. Kojima, K. Shinokita, K. Matsuda, Y. Miyata, Y. Miyauchi: Unidirectional bright exciton transport in a WS₂xSe(2-2x) alloy monolayer

N. Wada, J. Pu, T. Yamada, W. Zhang, Z. Liu, Y. Nakanishi, Y. Maniwa, K. Matsuda, Y. Miyauchi, T. Takenobu, Y. Miyata: Anomalous electroluminescence from WS₂/WSe₂ in plane heterostructures

Y. Yomogida, Y. Miyata, K. Yanagi: Optical properties of inorganic nanotubes with different diameters

K. Kojima, H. E. Lim, Y. Nakanishi, T. Endo, Y. Maniwa, Y. Miyata: Carrier-dependent photoluminescence properties of CVD-grown monolayer MoS₂

● 日本物理学会 第 75 回年次大会 2020 年 3 月 16-19 日（名古屋大学）

永井恒平, 内田健人, 草場哲, 遠藤尚彦, 宮田耕充, 田中耕一郎: WSe₂ 薄膜における高次高調波発生の光キャリアドーピング効果

● 日本化学会 第 100 春季年会 2019 年 3 月 22-25 日（東京理科大学）

Y. Nakanishi, N. Kanda, M. Nagata, Z. Liu, K. Suenaga, and H. Shinohara: Synthesis and Characterization of One-Dimensional Van der Waals Wires Inside Carbon Nanotubes

国際会議

● CSW2019, Nara, Japan, May 19-23, 2019

T. Inoue, T. Saito, K. Takei, T. Arie, Y. Miyata, S. Akita: Persistent resonance frequency shift of MoS₂ mechanical resonator by laser irradiation

● Silicon Nanoelectronics Workshop 2019, Kyoto, Japan, Jun. 9-10, 2019

W. H. Chang, N. Okada, H. Asai, K. Fukuda, M. Okada, T. Endo, Y. Miyata, T. Irisawa: Comparative study of high-k dielectric on MoS₂ deposited by plasma enhanced ALD

● 16th International Conference on Nanosciences and Nanotechnologies 2019, Tessaloniki, Greece, July 2-5, 2019

Y. Nakanishi, M. Aizaki, M. Nagata, N. Kanda, Z. Liu, K. Suenaga, H. Shinohara: Isolation of Single-Wired Transition Metal Monochalcogenides by Carbon Nanotubes

● SSDM2019, Nagoya, Japan, Sep. 2-5, 2019

T. Irisawa, N. Okada, W. H. Chang, M. Okada, T. Mori, T. Endo, Y. Miyata: High On/Off Ratio Tunnel Transistor Formed by CVD-grown Bilayer WSe₂/MoSe₂ van der Waals Heterostructures

J. Pu, H. Matsuoka, Y. Kobayashi, Y. Miyata, T. Takenobu: Room-Temperature Valley-Polarized Light-Emitting Devices via Strained Monolayer Semiconductors

● Graphene Week 2019, Helsinki, Finland, Sep. 23-27, 2019

Y. Miyata, Y. Kobayashi, S. Yoshida, M. Maruyama, H. Mogi: Continuous Heteroepitaxy of Two-Dimensional Heterostructures Based on Layered Chalcogenides

N. Wada, J. Pu, W. Zhang, H. Matsuoka, K. Matsuda, Y. Nakanishi, Y. Maniwa, Y. Miyauchi, T. Takenobu, Y. Miyata: Interface electroluminescence from WS₂/WSe₂ in-plane heterostructures

K. Kojima, H. E. Lim, Z. Liu, W. Zhang, T. Saito, Y. Nakanishi, T. Endo, Y. Kobayashi, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Matsuda, Y. Maniwa, Y. Miyauchi, Y. Miyata: Restoring intrinsic optical properties of CVD-grown MoS₂ monolayers and their heterostructures

H. E. Lim, T. Irisawa, N. Okada, T. Endo, Y. Nakanishi, Y. Maniwa, Y. Miyata: Interface Growth of Molybdenum Disulfide

C. Ando, Y. Nakanishi, J. Pu, T. Takenobu, Y. Miyata: Simple Preparation of Superconducting NbSe₂ Films by Selenization

● RPGR2019, Matsue, Japan, Oct. 6-10, 2019

J. Pu, H. Matsuoka, Y. Kobayashi, Y. Miyata, T. Takenobu: Room-Temperature Valley-Polarized Light-Emitting Devices via Strained Monolayer Semiconductors

H. G. Ji, P. S.-Fernandez, D. Yoshimura, M. Maruyama, Y. Miyata, S. Okada, H. Ago: Chemically tuned p- and n-type WSe₂ monolayers with higher carrier mobility for advanced electronics

M. Shimasaki, N. Wada, Y. Miyata, K. Shinokita, T. Nishihara, K. Matsuda, Y. Miyauchi: Exciton dynamics in a monolayer WS₂-WSe₂ lateral heterostructure with wide alloy region

N. Wada, J. Pu, W. Zhang, H. Matsuoka, K. Matsuda, Y. Nakanishi, Y. Maniwa, Y. Miyauchi, T. Takenobu, Y. Miyata: Interface electroluminescence from WS₂/WSe₂ in-plane heterostructures

K. Kojima, H. E. Lim, Z. Liu, W. Zhang, T. Saito, Y. Nakanishi, T. Endo, Y. Kobayashi, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Matsuda, Y. Maniwa, Y. Miyauchi, Y. Miyata: Restoring intrinsic optical properties of CVD-grown MoS₂ monolayers and their heterostructures

H. E. Lim, T. Irisawa, N. Okada, T. Endo, Y. Nakanishi, Y. Maniwa, Y. Miyata: Monolayer MoS₂ Growth at Metal-Insulator Interface

C. Ando, Y. Nakanishi, J. Pu, T. Takenobu, Y. Miyata: Simple Preparation of Superconducting NbSe₂ Films by Selenization

Y. Kobayashi, S. Yoshida, M. Maruyama, H. Mogi, K. Murase, Y. Maniwa, O. Takeuchi, S. Okada, H. Shigekawa, Y. Miyata: Continuous Heteroepitaxy of Two-Dimensional Heterostructures Based on Layered Chalcogenides

Y. Yomogida, Y. Miyata, K. Yanagi: Synthesis and sorting of inorganic nanotubes

H. Mogi, Z.-H. Wang, T. Bamba, Y. Takaguchi, T. Endo, S. Yoshida, A. Taninaka, H. Oigawa, Y. Miyata, O. Takeuchi, H. Shigekawa: Photoresponse of WSe₂/MoSe₂ in-plane heterostructure probed by a laser-combined multiprobe spectroscopy

Y. Nakanishi, M. Aizaki, M. Nagata, N. Kanda, Z. Liu, K. Suenaga, H. Shinohara: From 2D to 1D: Atomically Precise Bottom-Up Fabrication of 1D Transition Metal Chalcogenides

N. Kanda, Y. Nakanishi, D. Liu, Z. Liu, K. Suenaga, D. Tomanek, H. Shinohara: Growth and Characterization of One-Dimensional Transition Metal Monochalcogenides Inside Carbon Nanotubes

● 13th Pacific Rim Conference of Ceramic Societies(PACRIM13), Okinawa, Japan, Oct.27-Nov.1, 2019

Y. Miyata: Growth and characterization of two-dimensional heterostructures based on layered chalcogenides

● MNC2019, Hiroshima, Japan, Oct.28-31, 2019

Y. Yomogida, Y. Miyata, K. Yanagi: Synthesis of relatively small diameter inorganic nanotubes by sulfurization of solution-synthesized nanowire precursors and their transistor properties

L. Nurdwijayanto, T. Taniguchi, S. Li, Y. Miyata, K. Tsukagoshi, Y. Ebina, M. Osada, T. Sasaki: Two-Dimensional van-der Waals/Electrostatic Heterostructures: Intriguing Electrical and Optical Features from Their Chemical Coupling

● The 4th Graphene Flagship EU-Japan Workshop on Graphene and related 2D materials, Pisa, Italy, Nov.18-20, 2019

Y. Miyata: Growth and device applications of transition-metal-dichalcogenide in-plane heterostructures

● 2019 MRS Fall Meeting and Exhibit, Massachusetts, USA, Dec. 1-6, 2019

M. Shimasaki, N. Wada, Z. Liu, K. Kojima, Y. Miyata, K. Shinokita, T. Nishihara, K. Matsuda, Y. Miyauchi: Directional Exciton Transport in a Monolayer WS₂-WSe₂ Lateral Heterostructure with a Wide Alloy Region

● 27th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy, Shizuoka, Japan, Dec. 5-7, 2019

H. Mogi, Z. Wang, T. Bamba, Y. Takaguchi, T. Endo, S. Yoshida, A. Taninaka, H. Oigawa, Y. Miyata, O. Takeuchi, H. Shigekawa: Ultimate High Conductivity probed by Multiprobe Scanning Tunneling Potentiometry on a High-Quality Graphite Thin Film

● MRM2019, Yokohama, Japan, Dec. 10-14, 2019

Jiang Pu, Hirofumi Matsuoka, Yu Kobayashi, Yasumitsu Miyata, Taishi Takenobu: Room-Temperature Valley-Polarized Light-Emitting Devices via Strained Monolayer Semiconductors

● 1/2DM International Conference 2020, Tokyo, Japan, Jan. 28, 2020

Y. Miyata: Growth and characterization of in-plane heterostructures based on layered chalcogenides

編集後記

本年次報告は令和最初のものであると同時に、首都大から都立大に名称が変わったため、首都大という名前での最後の(名称が戻ることがなければ)年次報告となった。さらに2019年末から流行り始めたコロナウィルスが猛威を振るいはじめて、緊急事態宣言が出るなど色々なことがばたばたと起こり、教員・職員・学生は対処に追われている。各種の春の学会も次々に中止となり、現時点では夏までの国内・国際会議が中止あるいは延期となっている。オリンピックも来年できるか議論を続けており、まさに非常事態でありなおかつ長期戦という様相を呈している。そんな中、新年度のガイダンスや各種の説明会は次々にzoomなどのWeb開催に切り替り、授業のオンライン化もこの機会に一気に進んでいるように思われる。私もたまたまzoomアカウントを個人的に持っていたため、某説明会において会議の開催と準備にご協力させて頂いた。あらためて分かったのはこうした会議の一つ一つに多くの教員・職員の方々の力が注がれていることであり、同時にこれまで交流のなかった他学科の先生方とお話をできたことは非常に良い経験となった。当たり前のことが当たり前でなくなるこうした日常では、ふとした人のありがたみが身にしみるというが、そうしたことでもあったかもと思う。時々刻々変化する環境に対応することは、ある種、生物としての必須事項であり、研究・教育においても同様と思うが、柔軟に力を合わせて対処することの大ささを改めて感じている日々である。こうした状況を一つ一つ乗り越えてゆかなくてはいけないと強く感じる。

(江副祐一郎 記)

2019年度 年次報告編集委員
安田修(2019年度物理学教室主任)
江副祐一郎
中西勇介