

研究室活動状況 平成 28 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) ハイパーカミオカンデと DUNE による振動パラメーター決定の相補性 (安田、ゴッシュ、深澤)

将来のニュートリノ振動実験計画として、加速器ニュートリノ長基線実験では日本の T2HK とアメリカの DUNE が、又、自然のニュートリノ源ではハイパーカミオカンデ (HK) による大気ニュートリノ観測等が現実的なものと考えられている。この研究では、現時点で未定であるニュートリノの質量階層性、 $\pi/4 - \theta_{23}$ の符号、CP 非保存位相 δ に対する上記 3 つの実験の感度を議論した。T2HK + HK の大気ニュートリノ観測と DUNE ではそれぞれ 5σ (8σ) C.L. の質量階層性に対する感度を持つこと、又、これら 3 つを組み合わせた場合には質量二乗差、 $\sin^2 \theta_{23}$ 、 δ の測定精度はそれぞれ 0.3%、2%、20%となることがわかった。又、HK の大気ニュートリノ観測で θ_{23} のパラメーター縮退が起こる機構を明らかにした。

2) 太陽ニュートリノ-カムランド間の齟齬・NOvA-T2K 間の齟齬・T2K-原子炉ニュートリノの齟齬を非標準相互作用により説明する試み (安田、ゴッシュ、深澤)

現在までのニュートリノ振動に関する実験データは、標準的な三世代間の混合によりおおむね説明されているが、必ずしも定量的に整合性があるとは言えないデータが存在する。それらは (i) 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異なっている点、(ii) T2K 実験と NOvA 実験による混合角 θ_{23} の測定値が異なっている点、(iii) T2K 実験と短基線原子炉ニュートリノ実験による混合角 θ_{13} の測定値が異なっている点である。これらの齟齬を、ニュートリノ伝播に影響を与える非標準相互作用により説明できるかどうかを検討した。残念ながら非標準相互作用を導入しても全体のデータへのフィットがわずかに改善する程度で、3 つの齟齬を説明できるほどではないことがわかった。

3) T2HKK 実験の非標準相互作用に対する感度 (安田、ゴッシュ、深澤)

T2K 実験の拡張計画である T2HK 実験は基線長が短く、単独ではニュートリノの質量階層性に対する感度が低いという問題があることが知られている。それを補う計画として、第二の後置検出器を神岡だけではなく、韓国にも置くという T2HKK 実験が提案されている。この研究では、ニュートリノ伝播に影響を与える非標準相互作用に対する T2HKK 実験の感度を、簡単のため、非標準相互作用の μ 成分が 0 でかつ $\tau - \tau$ 成分が高エネルギー大気ニュートリノからの制限により従属変数になるという仮定の元に議論した。その結果、ビームの中心からのずれの角度が小さいほど感度が高くなり、標準的と非標準的の 2 つの CP 非保存位相に対する感度は、T2HKK 実験の方がアメリカの DUNE 実験よりも良いことがわかった。

4) T2HK · T2HKK · DUNE 実験における系統誤差の影響 (安田、ゴッシュ)

将来計画である T2HK 実験、T2HKK 実験、DUNE 実験では、統計量が多いため系統誤差が重要になって来ると期待されている。この研究では、これら 3 つの実験において、ニュートリノの質量階層性、 $\pi/4 - \theta_{23}$ の符号、CP 非保存位相 δ に対する感度の系統誤差の依存性を議論した。又、非標準相互作用に対する感度の依存性も議論した。

5) 軽いステライルニュートリノの (3+1)-スキームにおけるゼロテクスチャが 4 個ある模型の現象論 (ゴッシュ)

複数世代のフェルミオンが存在する時、フェルミオンの質量行列は一般に異なる世代の間に成分を持つが、特定の質量行列の成分が 0 となる場合をゼロテクスチャと呼び、背後にある対称性を現していると

考えられている。この研究では、三世代に軽いステライルニュートリノ1個を加えた、いわゆる(3+1)-スキームにおいて、質量行列にテクスチャが4個ある場合の現象論を、ニュートリノの質量階層性と無ニュートリノ二重ベータ崩壊を中心に議論した。

6) 軽いステライルニュートリノを含む拡張されたシーソー模型の現象論(ゴッシュ)

eV程度の質量を持つ軽いステライルニュートリノはLSND実験、MiniBooNE実験、短基線原子炉実験、ガリウムによる太陽ニュートリノの較正実験の結果からその存在が示唆されており、現在も研究されている粒子である。この研究では、そのような軽いステライルニュートリノ1個を含むI型の拡張されたシーソー模型において、自由度を減らすためにゼロテクスチャを導入し、現実的な振動パラメーターを再現するような解を探した。そのような解は $Z_8 \times Z_2$ という不連続群から得られることがわかった。

7) 弦模型における超対称性の自発的破れの機構(北澤)

超弦理論における超対称性の破れのひとつとして“brane supersymmetry breaking”と呼ばれるものがある。その最も簡単な例として、タイプI型理論によく似た杉本模型というものがある。この模型は超対称性が全く存在しない安定な模型であることが知られている。この模型の開いた弦のゼロ質量粒子に対応する状態の中に超対称性の自発的破れを意味する南部・ゴールドストーン粒子が存在するが、対応するゲージ粒子である重力微子は質量を獲得し得ないことが知られている。なぜなら重力微子はMajorana-Weyl fermionなのでLagrangianに質量項を書くことができないからである。つまり、起きていると期待される超ヒッグス機構が未だに理解されていない。

杉本模型には実は宇宙項があり、したがって時空間は平坦でないド・ジッター時空と呼ばれるものになることに着目し、通常の平坦な時空間におけるヒッグス機構の理解をそのまま持ち込んでいいことを指摘した。すなわち、ド・ジッター時空における質量の定義は平坦な時空における定義とは異なることにより、重力微子がゼロ質量のままで南部・ゴールドストーン粒子の自由度を吸収できることを指摘した。

この研究はピサ高等師範学校のA.Sagnotti氏との共同研究である。

8) 宇宙背景輻射の大きなスケールでのゆらぎの観測(北澤)

宇宙のインフレーションの過程で生成される宇宙背景輻射の長波長領域(大スケール領域)における異常な振る舞い(標準的な Λ CDM模型の予言からのずれ)について昨年度に引き続き研究を行った。PLANCK実験の公式観測データを用い、宇宙背景輻射の観測の際に重要である「銀河マスク」(背景輻射の観測な際に邪魔になる我々の銀河面からの放射を遮る手続き)の大きさを変えながら、長波長領域の角度依存性の偶奇成分を分離して異常な振る舞いについて調べた。その結果、偶成分は銀河マスクの大きさに関係なく長波長になるほど Λ CDM模型からずれて減衰するのに対し、奇成分は銀河マスクが大きい場合には偶成分と同様な振る舞いをするが、銀河マスクが小さい場合(銀河面からの影響を受けやすい場合)にはそのような減衰傾向を示さないことがわかった。この結果は、異常な振る舞いがインフレーションの初期に偶奇の区別なく作られ、銀河面の近くには奇成分に汚染があると理解される。これは、長波長領域における Λ CDM模型の予言からずれた減衰、すなわちインフレーションの始まりが見えていることのさらなる証拠になる。

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

9) BファクトリーにおけるQCDインスタントン効果の検証（北澤、酒井）

軽い中間子の質量の実験値を用いた軽い中間子の物理を記述するカイラル模型のパラメーターの決定を通じて、インスタント効果という強い相互作用（QCD）の非摂動論的効果の大きさを見積もることができる。その結果、インスタント効果の大きさは、アップクォークの質量がゼロということで「強いCPの破れ」の問題を解決できるほどには大きくはないという事実が知られている。同じ考え方で、重いボトムクォークを含む重い中間子を用いた重い中間子の物理を記述する重中間子有効理論のパラメーターの決定を通じて、インスタント効果の大きさへの制限を与えることができることを示した。その制限は軽い中間子からのものと同程度であることがわかり、将来のBファクトリー実験によってその制限をさらに厳しくできる可能性があることがわかった。

2. 研究業績

1) 論文

Naoyuki Haba, Hiroyuki Ishida, Noriaki Kitazawa and Yuya Yamaguchi, A new dynamics of electroweak symmetry breaking with classically scale invariance, *Physics Letters B* **755** (2016) 439–443.

Debasish Borah, Monojit Ghosh, Shivani Gupta, Suprabh Prakash, Sushant K. Raut, Analysis of four-zero textures in the 3+1 neutrino framework, *Physical Review D* **94** (2016) 113001.

Shinya Fukasawa, Osamu Yasuda, The possibility to observe the non-standard interaction by the Hyperkamiokande atmospheric neutrino experiment, *Nuclear Physics B* **914** (2017) 99–116.

Monojit Ghosh, Srubabati Goswami, Sushant K. Raut, Implications of $\delta_{CP} = -90^\circ$ towards determining hierarchy and octant at T2K and T2K-II, *Modern Physics Letters A* **32** (2017) 1750034.

Shinya Fukasawa, Monojit Ghosh, Osamu Yasuda, Sensitivity of the T2HKK experiment to nonstandard interactions, *Physical Review D* **95** (2017) 055005.

Newton Nath, Monojit Ghosh, Srubabati Goswami, Shivani Gupta, Phenomenological study of extended seesaw model for light sterile neutrino, *Journal of High Energy Physics* **1703** (2017) 075.

Shinya Fukasawa, Monojit Ghosh, Osamu Yasuda, Complementarity Between Hyperkamiokande and DUNE in Determining Neutrino Oscillation Parameters, *Nuclear Physics B* **918** (2017) 337–357.

2) 國際会議報告

Osamu Yasuda, The KTY formalism and nonadiabatic contributions to the neutrino oscillation probability, *Nuclear and Particle Physics Proceedings* **273–275** (2016) 1789–1794.

Osamu Yasuda, Constraints on the flavor-dependent non-standard interaction in propagation from atmospheric neutrinos, *Journal of Physics: Conference Series* **718** (2016) 062072.

3) 学会講演

● 日本物理学会 2016 年秋季大会 2016 年 9 月 21 日 – 24 日（宮崎大学）

深澤信也, 安田修：大気ニュートリノ実験からくる異なったパラメトリゼーションの非標準相互作用への制限

- 日本物理学会 第 72 回年次大会 2017 年 3 月 17 日 – 20 日 (大阪大学)

安田修：将来のニュートリノ実験で期待される物理 —CP の破れ・非標準相互作用— (招待講演)

国内研究会

- “KEK 理論センター夏の合宿” 2016 年 08 月 04 日–2016 年 08 月 07 日 (長野県安曇野市)

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

- ニュートリノフロンティア研究会 2016 2016 年 11 月 28 日–30 日, 山代温泉 ゆのくに天祥

M. Ghosh: Tensions in the current neutrino data and non-standard interactions

国際会議

- 3rd International Meeting on Large Neutrino Infrastructures, 30-31 May 2016, KEK, Japan

O. Yasuda: Synergy of T2HK & DUNE (invited talk)

- The XXVII international conference on neutrino physics and astrophysics (Neutrino2016), 4–9 July 2016, Imperial collage London, UK

S. Fukasawa: Sensitivity of atmospheric neutrino experiments to neutrino non-standard interactions (poster)

- 12th Rencontres du Vietnam (NuFact 2016), 21–27 August 2016, ICISE, Quy Nhon, Vietnam

O. Yasuda: Complementarity Between Hyperkamiokande and DUNE (invited talk)

O. Yasuda: Will atmospheric neutrino experiment at Hyper-Kamiokande see non-standard interaction effects?

M. Ghosh: Reason for T2K to run in dominant neutrino mode for detecting CP violation (poster)

- Neutrino Oscillation Workshop (NOW 2016), 4–11 September 2016, Otranto, Lecce Italy

O. Yasuda: Possible observation of the non-standard interaction effects at Hyperkamiokande

- The First Workshop on the Second Hyper-Kamiokande Detector in Korea, 21–22 November 2016, Seoul National University, Seoul, South Korea

M. Ghosh: Sensitivity of T2HKK to non-standard interaction (invited talk)

- XXII DAE-BRNS HIGH ENERGY PHYSICS SYMPOSIUM 2016, 12–16 December 2016, University of Delhi, Delhi, India

M. Ghosh: Reason for T2K to run in dominant neutrino mode for detecting CP

- A topical conference on elementary particle physics and cosmology (Miami2016), 14–20 December 2016, Fort Lauderdale, Florida, USA

O. Yasuda: Is nonstandard interaction a solution to the three neutrino tensions?

- Meeting for the Second Hyper-K Tank in Korea, 16 February 2017, Kavli IPMU, The University of Tokyo, Japan

M. Ghosh: Effect of systematics in T2HKK and DUNE

- DUNE near detector workshop, 27–29 March 2017, Fermilab, USA

M. Ghosh: Role of DUNE near detector to reduce Systematic Uncertainty

高エネルギー理論研究室

1. 研究活動の概要

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

(a) Our first (and main) research project is devoted to a theoretical description of cosmological inflation in early Universe in the context of supergravity theory. This research provides a bridge between gravitational theory and theoretical high energy physics beyond the Standard Model of elementary particles. The central theme of our research is spontaneous supersymmetry breaking after inflation, and the dark energy represented by a positive cosmological constant. We obtained the conditions for a restoration/breaking of supersymmetry after inflation in the supergravity models with a single chiral superfield and a quartic stabilization term in the Kaehler potential. We proposed several new viable inflationary models of that type. The inflaton scalar potential is dynamically stabilized during and after inflation. We demonstrated a possibility of having a small supersymmetry breaking with a tiny cosmological constant. We also found another new class of inflationary models, describing chiral multiplets with non-minimal coupling to a vector multiplet in supergravity. Those models are suitable for the inflationary model building with inflaton sitting in a massive vector multiplet, and spontaneous supersymmetry breaking after inflation, for any value of the tensor-to-scalar ratio of the Cosmic Microwave Background radiation (ケトフ、Aldabergenov).

(b) Our second research project is devoted to superstring cosmology. Motivated by the flux compactifications of type IIA strings on rigid Calabi-Yau manifolds, preserving $N=2$ local supersymmetry in four spacetime dimensions, we derived a non-perturbative scalar potential of all scalars from the exact D-instanton corrected metric on the universal hypermultiplet moduli space. Applying this potential to moduli stabilization, we found a discrete set of vacua for all axions. At these critical points, the stability problem is decoupled into two subspaces spanned by the axions and other fields including dilaton and Kaehler moduli, respectively. We achieved stability in the first subspace, but found instabilities in the second subspace. The superstring cosmology is a very new and extremely complicated subject that deserves further research (ケトフ、脇本).

(c) Our third research project started this year, and is devoted to the braneworld cosmology in modified gravity theory. We modified the Randall-Sundrum braneworld model (with two branes) by adding the scalar curvature squared term in higher (five) spacetime dimensions. We found that this term (needed for cosmological inflation) does not destabilize the Randall-Sundrum famous solution to the hierarchy problem of the Standard Model in particle physics (ケトフ、中田).

2. 研究業績

1) 論文

S.V. Ketov, T. Terada, On SUSY restoration in the single-superfield inflationary models of supergravity, *Eur. Phys. J. C* **76:438** (2016).

Y. Aldabergenov and S.V. Ketov, Generic SUSY breaking after inflation in supergravity with inflaton in a massive vector supermultiplet, *Phys. Lett. B* **761** (2016) 115-118

H. Kuwabara, T. Yumibayashi, H. Harada, Time-dependent Pais-Uhlenbeck oscillator and its decomposition, *Geom. Methods in Physics* (2016) 255-260.

H. Nakada, S.V. Ketov, The Randall-Sundrum braneworld in modified gravity, *Phys. Rev. D* **94** (2016) 103503.

S. Alexandrov, S.V. Ketov, Y. Wakimoto, Non-perturbative scalar potential inspired by type IIA strings on rigid CY, *JHEP* **11** (2016) 066.

2) 学会講演

国際会議

● 3rd Korea-Japan Workshop on Dark Energy (大田、韓国、2016年4月)

S.V. Ketov: Search for dark energy in type IIA superstrings compactified on rigid Calabi-Yau spaces with fluxes

● International Workshop “Random Matrices EurAsia 2016” (マカオ大学、マカオ、中国、2016年7月)

S.V. Ketov: Flux-induced scalar potential in type IIA strings compactified on rigid Calabi-Yau threefolds

● Asia-Europe-Pacific School of High Energy Physics (北京、中国、2016年10月12-25日)

Y. Aldabergenov, S.V. Ketov: SUSY breaking after inflation with inflaton in a massive vector supermultiplet

原子核ハドロン物理研究室

1. 研究活動の概要

1) カイラル摂動論を用いた核媒質における K^+ の波動関数くりこみ (青木、慈道)

Nambu-Goldstone (NG) ボソン-原子核系において, NG ボソンの性質が「カイラル対称性が部分的回復する」というシナリオにしたがって統一的に理解できるか否かという問題は現象論的には明らかになつてない。そこで, ストレングネスを持つ NG ボソンである K^+ 中間子と原子核の弾性散乱においてカイラル対称性の部分的回復の影響がどのように現れるか研究した。 K^+ -原子核弹性散乱の実験データから, 真空中の K^+N 相互作用からの予想と反し, 線形密度近似が破綻する事が明らかになっている。これを, 真空構造の相転移という観点から理解するために, カイラル対称性の部分的回復と密接な関係のある波動関数くりこみの計算を行った。まず, 真空中における K^+N 弹性散乱をカイラル摂動論の NLO まで計算し, K^+N 弹性散乱データを良く再現する散乱振幅を得る事ができた。そして, 真空中の K^+N 散乱振幅を用いて, フェルミ運動を取り入れた核媒質中の K^+ 自己エネルギーのモデルを構築した。 K^+ 自己エネルギーから波動関数くりこみを計算した結果, 核媒質中の K^+N 相互作用が真空中と比べて 5–8 % 斥力的に増大する事が明らかになった。この結果は, 波動関数くりこみが核媒質中における K^+N 相互作用の斥力的な増大の一部を説明できる事を意味しており, 核媒質中の K^+N 相互作用がカイラル対称性の部分的回復の観点から理解できる可能性を示唆している。

2) 相対論的平均場理論による η' 中間子原子核 (榎谷、慈道)

近年、核媒質中で η' の質量が大きく減少することが期待され、 η' を原子核中に生成し、その束縛状態を観測する実験が行われている。本研究では、相対論的平均場理論を用いて、原子核を構成し、その原子核の中に不純物として η' を導入することによって η' と原子核にどのような変化が生じるのかを調べた。先行研究を元に、飽和密度、対称エネルギー、有効核子質量、圧縮モジュール、結合エネルギーを再現する原子核物質のモデルを得た。このモデルに σ 場と結合する η' を導入し、ルンゲクッタ法を用いてその束縛状態を求めた。その結果、 σ - η' 間の結合定数が大きすぎると原子核が崩壊することが分かった。しかし、理論から期待される σ - η' の場合は、原子核は保たれるが中心密度は非常に高くなる。今後は今までフェルミ近似で求めていた核子をディラック方程式を解いて求める。

3) MIT バッグ模型による重いハドロンの質量スペクトル (田中、慈道)

最近になって相次いで発見されているエキゾチックハドロンは、重いクォークと軽いクォークどちらも含むもので多く発見されている。重いクォークをカラーソースとみることで、重いクォークと軽いクォークを含むハドロンの質量スペクトルより、重いクォークと軽いクォークが絡んだ時の軽いクォークのダイナミクスを見る事ができる。このような目的から MIT バッグモデルを用いて重いハドロンについて研究を行った。MIT バッグモデルは低エネルギーの核子を記述するモデルとして導入され、現在はハドロンを記述するモデルとして用いられている。QCD では高エネルギーで摂動的真空が実現し、低エネルギーでは非摂動的真空が実現すると考えらる。ハドロンの中では摂動的真空、外では非摂動的真空として扱い、このエネルギーによって違う真空の相の境界を表現するためにハドロンをバッグ(袋)で表現したのが MIT バッグモデルである。このモデルにおいて、クォークの運動エネルギー、クォーク間のスピン相互作用、カシミアエネルギーをもとにハドロンの質量スペクトルを計算した。重いクォークを一つ含むハドロン ($\Lambda_c, \Sigma_c, D, D^*$ など) の質量差を摂動計算によるクォークスピン相互作用で説明しようとしたところ、実験を再現できなかった。モデルの今後の改良点として、MIT バッグモデルでは軽いクォークのカイラル対称性がバッグの表面で破れているので、このモデルからバッグの表面でのカイ

ラル対称性を回復させるために、バッグの表面でパイオンとクォークのダイナミクスを表現しカイラル対称性を満たすカイラル場を導入した MIT バッグモデルの拡張であるカイラルバッグモデルを用いることが考えられる。このことによって、重いクォークと軽いクォークが絡んだ時の軽いクォークのダイナミクスにおけるパイオンの役割を明らかにするとできると期待される。

4) 大きさを考慮したダイクォーク模型による重いバリオン（隈川、慈道）

バリオン系で予想されるハドロン中の有効自由度の候補として期待されているダイクォークは、2つのクォークからなり、反カラー電荷を持つ。重いクォークを持ったバリオン系では、軽いクォーク2つがダイクォークとして振る舞う可能性がある。先行研究では、重いクォークを1つ持つ Λ_c , Λ_b についてクォークとダイクォークの2体系と仮定して、クォークとダイクォークのカラー構造がメソン系と同じであり、閉じ込めポテンシャルはカラーにのみ依存すると考えられることから、メソン系のポテンシャルでバリオン系を再現できると期待して、バリオン系の励起エネルギーを計算を行ったが、閉じ込めポテンシャルの張力がメソン系と比べて半分でないと、バリオン系の励起エネルギーを再現することができなかった。この結果をもとに本研究では、同じバリオン Λ_c , Λ_b についてクォークとダイクォークの2体系でかつダイクォークに大きさを与える剛体回転子と仮定したときの2体間の相互作用について研究を行った。スピニ $\frac{1}{2}^-, \frac{3}{2}^-$ を持つ $\Lambda(2595)$, $\Lambda(2625)$ を p 軌道励起状態と仮定し、励起エネルギーが実験値にあうようにダイクォークのサイズを求めるとき、ダイクォークのサイズは 1.1 fm を得るに至った。求めたダイクォークのサイズを用いて他の励起状態について計算をしたところ、スピニ $\frac{5}{2}^+$ を持つ $\Lambda(2880)$ は d 軌道励起状態として説明することができたが、通常のクォーク模型では $2s$ 状態と思われている $\Lambda_c(2765)$ は説明ができなかった。しかしながら、この状態のアイソスピンは実験的に確定しておらず Σ_c の可能性がある。この状態のアイソスピンが、ダイクォーク描像の成否の鍵を握ることが分かった。

5) カイラル非対称模型によるマグネターの強い磁場の再現（大西）

マグネターでは表面近くに $\sim 100\text{GT}$ 程度の強い磁場が観測されていて、その起源を簡単な模型で説明する。質量が $1.5M_\odot$, 半径が 12 km の中性子星を考察すると、中性子の密度は 0.24fm^{-3} で Fermi エネルギーは 76 MeV になり、中性子と陽子の Fermi エネルギーの差は約 98 MeV で、ベータ崩壊を防ぐには、電子の Fermi エネルギーは約 100 MeV となり、超相対論的で量子凝縮していると考えられる。この電子系を Dirac-Hartree-Fock 近似で、電磁場と結合させ、Dirac-Maxwell 方程式を自己無撞着に取り扱う。角運動量を核子と分担する電子は赤道面に環状の流れを形成し、ポロイダル磁場を作る。弱い相互作用でカイラリティ負の状態だけが選択的に陽子に捕獲され正の電子は残りトロイダルな磁化が生じる。 $\rho_e = 0.004 \text{ fm}^{-3}$ の密度では磁場は $B = \mu_0 \mu_B \rho_e = 49 \text{ TT}$ となり、必要な強さである。

Gordon 様電流とスピン様電流によるヘリカル電流が磁気ヘリシティ正の磁場を生成する。この磁場の反作用がヘリカル電流を安定にする機構を Weyl 表現でカイラリティ正の状態をヘリシティ表現の基底で解析し、明示的に確認した。

2. 研究業績

1) 論文

Daisuke Jido, Minori Sakashita, *Quark confinement potential examined by excitation energy of the Λ_c and Λ_b baryons in a quark-diquark model*, Prog. Theor. Exp. Phys. 2016, 083D02 (2016), DOI: 10.1093/ptep/ptw113.

Shuntaro Sakai, Daisuke Jido, *Investigation of $\eta'N$ system using linear sigma model*, Prog. Theor. Exp. Phys. 2017, 013D01 (2017), DOI:10.1093/ptep/ptw191.

Y.K. Tanaka, K. Itahashi, H. Fujioka, Y. Ayyad, J. Benlliure, K.-T. Brinkmann, S. Friedrich, H. Geissel, J. Gellanki, C. Guo, E. Gutz, E. Haettner, M.N. Harakeh, R.S. Hayano, Y. Higashi, S. Hirenzaki, C. Hornung, Y. Igarashi, N. Ikeno, M. Iwasaki, D. Jido, N. Kalantar-Nayestanaki, R. Kanungo, R. Knoebel, R. Knobel, N. Kurz, V. Metag, I. Mukha, T. Nagae, H. Nagahiro, M. Nanova, T. Nishi, H.J. Ong, S. Pietri, A. Prochazka, C. Rappold, M.P. Reiter, J.L. Rodríguez-Sánchez, C. Scheidenberger, H. Simon, B. Sitar, P. Strmen, B. Sun, K. Suzuki, I. Szarka, M. Takechi, I. Tanihata, S. Terashima, Y.N. Watanabe, H. Weick, E. Widmann, J.S. Winfield, X. Xu, H. Yamakami, J. Zhao *Measurement of Excitation Spectra in the $^{12}C(p, d)$ Reaction near the η' Emission Threshold*, Phys. Rev. Lett. 117, 202501 (2016), DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.202501.

Takayasu Sekihara, Shuntaro Sakai, Daisuke Jido, *Theoretical study of photoproduction of $\eta'N$ bound state on deuteron target with forward proton emission*, Phys. Rev. C94 025203 (2016), DOI: 10.1103/PhysRevC.94.025203.

Hungchong Kim, K.S. Kim, Myung-Ki Cheoun, Daisuke Jido, Makoto Oka, *Testing the tetraquark structure for the X resonances in low-lying region*, Eur. Phys. J. A52, 184 (2016), DOI: 10.1140/epja/i2016-16184-0.

M. Albaladejo, J. Nieves, E. Oset, D. Jido, *$D_{s0}^*(2317)$ and DK scattering in B decays from BaBar and LHCb data*, Eur. Phys. J. C76, 300 (2016), DOI: 10.1140/epjc/s10052-016-4144-3.

2) 国際会議報告

K. Itahashi, Y. Ayyad, J. Benlliure, K. -T. Brinkmann, S. Friedrich, H. Fujioka, H. Geissel, J. Gellanki, C. Guo, E. Gutz, E. Haettner, M.N. Harakeh, R.S. Hayano, Y. Higashi, S. Hirenzaki, C. Hornung, Y. Igarashi, N. Ikeno, M. Iwasaki, D. Jido, N. Kalantar-Nayestanaki, R. Kanungo, R. Knoebel, N. Kurz, V. Metag, I. Mukha, T. Nagae, H. Nagahiro, M. Nanova, T. Nishi, H.J. Ong, S. Pietri, A. Prochazka, C. Rappold, M.P. Reiter, J.L. Rodríguez-Sánchez, C. Scheidenberger, H. Simon, B. Sitar, P. Strmen, B. Sun, K. Suzuki, I. Szarka, M. Takechi, Y.K. Tanaka, I. Tanihata, S. Terashima, Y.N. Watanabe, H. Weick, E. Widmann, J.S. Winfield, X. Xu, H. Yamakami, J. Zhao *Excitation Spectra of Carbon Nuclei near η' Emission Threshold*, JPS Conf. Proc. 13 (2017) 020030, Proceedings for 14th International Conference on Meson-Nucleon Physics and the Structure of the Nucleon (MENU2016), 25-30 July 2016, Kyoto, Japan, DOI: 10.7566/JPSCP.13.020030.

Y.K. Tanaka, Y. Ayyad, J. Benlliure, K. -T. Brinkmann, S. Friedrich, H. Fujioka, H. Geissel, J. Gellanki, C. Guo, E. Gutz, E. Haettner, M.N. Harakeh, R.S. Hayano, Y. Higashi, S. Hirenzaki, C. Hornung, Y. Igarashi, N. Ikeno, K. Itahashi, M. Iwasaki, D. Jido, N. Kalantar-Nayestanaki, R. Kanungo, R. Knoebel, N. Kurz, V. Metag, I. Mukha, T. Nagae, H. Nagahiro, M. Nanova, T. Nishi, H.J. Ong, S. Pietri, A. Prochazka, C. Rappold, M.P. Reiter, J.L. Rodríguez-Sánchez, C. Scheidenberger, H. Simon, B. Sitar, P. Strmen, B. Sun, K. Suzuki, I. Szarka, M. Takechi, I. Tanihata, S. Terashima, Y.N. Watanabe, H. Weick, E. Widmann, J.S. Winfield, X. Xu, H. Yamakami, J. Zhao *Search for η' mesic nuclei by missing-mass spectroscopy of the $^{12}C(p, d)$ reaction*, EPJ Web of Conferences 130, 02010 (2016) Proceedings for 14th International Workshop on Meson Production, Properties and Interaction (MESON 2016), 2-7 June 2016, Cracow, Poland, DOI: 10.1051/epjconf/201613002010.

3) 学会講演

- 日本物理学会年会 第72回年次大会 2017年3月17日～3月20日（大阪大学 豊中キャンパス）

大西直毅, 丸山智幸: マグネターのカイラル非対称模型 V (17aK22-4)

青木健児, 慶道大介: カイラル摂動論を用いた核媒質における K^+ 中間子の波動関数くりこみ (18pH21-1)

池野なつ美, 永廣秀子, 慶道大介, 比連崎悟: η -nucleus interaction from the $d + d$ reaction around the η production threshold (20aK22-3)

- 日本物理学会年会 秋期大会 2016年9月21日～9月24日（宮崎大学 木花キャンパス）

青木健児, 慶道大介: K^+ 中間子-原子核散乱とカイラル対称性の部分的回復 (22aSN-9)

関原隆泰, 酒井俊太郎, 慶道大介: Theoretical study of photoproduction of $\eta'N$ bound state on deuteron target (22aSN-6)

大西直毅, 丸山智幸: マグネターのカイラル非対称模型 IV (22pSK-3)

国内研究会

- ELPH 研究会「マルチフレーバーで探るエキゾチックハドロンとハドロン多体系の物理」2016.12.1 - 12.2、東北大学電子光理学研究センター

青木健児: K^+ 中間子-原子核散乱とカイラル対称性の部分的回復

- 小規模研究会「中間子原子核の最前線」 2016.12.20 - 12.22、奈良女子大学

青木健児: K^+ 中間子-原子核散乱とカイラル対称性の部分的回復

柳谷花世: 相対論的平均場理論による原子核構造

田中賢基: MIT Bag Model を用いた重いハドロンの質量

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。2016年度の研究室構成はスタッフ2名、大学院生2名である。

1) 高エネルギー天体現象

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

恒星風の流体計算を行い、ブラックホールからの放射による電離フロントの位置を求めて、光度と整合的な捕捉率を計算した。さらに、その捕捉率から実効的な降着率を評価し、降着流の密度に着目して降着円盤が形成され磁気回転不安定性が起きる条件を議論した。降着流において物質が内側に輸送されるには、このような不安定性によって物質の角運動量が外側に輸送される必要がある。その結果、Cyg X-1の光度や伴星の恒星風速度・密度では、降着流に期待される磁場のゆらぎによって状態遷移が起きること、一方で約1桁光度が大きいLMC X-1の伴星の恒星風ではこの条件を満たすことが難しく遷移が起こりにくいことが分かった。

コア崩壊型超新星残骸の進化と熱的・非熱的放射 進化の最終段階において、水素の外層を残しているような比較的大きい星は鉄コアが重力崩壊して爆発し、II型超新星になると考えられている。II型の他、Ib/c型に分類されるような、コアの崩壊による比較的重い星の超新星では、近傍に恒星風物質が残されている可能性があり、そのような環境で起きた超新星の残骸は、低密度の一様な星間空間で爆発・膨張する場合と異なる進化をすることになる。

Cas Aはよく観測してきた新星残骸の一つで、活動的ではないが中心部に中性子星らしき天体が見つかっており、約350年前のコアの重力崩壊による超新星と考えられている。以前は水素の外層を失った星の爆発(Ib型超新星)と考えられていたが、近年、薄い水素の外層があったと考えられるようになりIIIb型超新星に分類された。Ib型超新星とII型超新星の中間と考えられるCas Aの爆発前の星の特性や恒星風活動、環境を探ることを目的として、観測されている熱的X線放射の輝線強度と連続放射強度、シンクロトロン電波放射の強度の経年変化と、残骸の膨張速度との関係について議論した。

2) 高エネルギー天体現象～銀河・銀河団の形成と進化

銀河団ガスにおける粒子加速と加熱 銀河団は10-1000個の銀河の集団で、銀河の総質量の数倍の質量の高温ガスと、さらにその数倍の質量のダークマターから構成されるMpcスケールの天体で、自己重力系と見なせる最大の天体である。銀河団形成における衝突-合体過程で、衝撃波や乱流は粒子を加速しガスを加熱する。実際、~Mpcに広がるGeV電子のシンクロトロン電波ハローは、熱的X線光度の大きい

衝突-合体していると見られる銀河団に多く、また、電波強度とガス温度には正の相関が見られる。銀河団衝突の過程で形成される粒子のエネルギースペクトルをFokker-Planckコードを用いて調べ、放射の特徴を明らかにして、電波ハローと整合的にコアの熱的進化を探る研究を進めている。

銀河団コアのガスの放射冷却時間は宇宙年齢より短くなりうるが、電波ハローの起源が銀河団衝突で乱流加速された電子とするなら、乱流の減衰後、加速された粒子が熱化することでガスの温度が上がる。拡散過程の見直しを進め、より高次の項まで計算に含めることで加熱の手がかりを得た。この項は、低エネルギーの電子とカップリングしやすいので、放射冷却したコアの加熱に効果的である。ただし、加熱後のスペクトルは、温度はwell-definedと云えるものの、Maxwellianからわずかにずれた形をもつことが分かった。乱流は、初期のKolmogorovスペクトルから逆カスケードにより減衰して1Gyrのうちに速度は200km/s以下になると想定している。

3) 銀河・銀河団の形成と進化

銀河団ハローの非球対称性 銀河団の非球対称性を、N体シミュレーションや流体シミュレーションを用いて、統計的に調べた。解析的モデルである楕円体崩壊モデルと比較し、その妥当性、限界について考察を行った。また、非球対称性についてシミュレーション結果とX線観測や重力レンズ観測との比較を行い、標準的な冷たい暗黒物質モデルが観測と無矛盾であることを確かめた。さらに、銀河団中心にある活動銀河核のエネルギー放出が銀河団の非対称性に大きく影響することを見出した。

2. 研究業績

1) 論文

T. Sato et al.: "Multi-year X-Ray Variations of Iron-K and Continuum Emissions in the Young Supernova Remnant Cassiopeia A", *Astrophys. J.*, **836** (2017) 225

D. Suto, T. Kitayama, T. Nishimichi, S. Sasaki, Y. Suto: "Evolution and statistics of non-sphericity of dark matter halos from cosmological N-body simulation", *PASJ*, **68** (2016) 97

D. Suto, S. Peirani, Y. Dubois, T. Kitayama, T. Nishimichi, S. Sasaki, Y. Suto: "Projected Axis Ratios of Galaxy Clusters in the Horizon-AGN Simulation: Impact of Baryon Physics and Comparison with Observations" *PASJ*, **69** (2017) 14

2) 学会講演

● 日本天文学会 2016年秋季年会 2016年9月14日-16日（愛媛大学）

谷治健太郎、政井邦昭、山田真也：High Mass X-ray Binaryにおける恒星風と降着流の整合性

● HEAP2016 高エネルギー宇宙物理学研究会 2016年11月30日-12月2日（青山学院大学）

谷治健太郎、政井邦昭：連星系における光電離を考慮したBondi-Hoyle-Lyttleton 降着

● ブラックホール降着流ミニワークショップ 2017年3月8日（千葉大学）

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

● 高宇連研究会 2017 2017年3月9-11日（名古屋大学）

政井邦昭：宇宙プラズマ 未だ分かっていない物理過程（招待講演）

非線形物理研究室

1. 研究活動の概要

1) 可積分写像におけるトンネル異常

可積分な面積保存写像におけるトンネル効果を調べた。連続時間ハミルトン系の完全可積分性は、自由度数と同数の独立な保存量の存在がその十分条件となることが知られているが、面積保存写像においても同様の定義により可積分な写像を考えることができる。一方トンネル過程について、連続時間ハミルトン系においては、インスタンントと呼ばれる虚時間方向の複素軌道がそのトンネル過程を記述することが古くから知られているが、離散写像においてはあまりよく調べられていない。ここでは、Surisによって発見された、可積分な面積保存写像に対するトンネル効果を調べ、写像系固有のトンネル効果の異常性を見出した。トンネル異常が発現する背景としては、連続時間可積分系には存在しない複素面内における不変曲面の不連続性が関わっていることが示唆される結果を得た。

2) 多重井戸型ポテンシャル問題における同時量子化条件について

多重井戸型ポテンシャル系および標準型ハミルトン系に対して、トンネル分裂の半古典解析に寄与する複素古典軌道のリーマン面上の基本群の観点から考察した。ここでは、古典的には分断された領域（例えば、二重井戸ポテンシャル問題の2つの井戸）に対する古典量子化条件を調べた。その結果、それぞれの井戸に対する古典量子化条件は独立に与えられるものではなく、古典軌道のリーマン面の無限遠点の留数が関係する非自明な関係式によって結ばれていることがわかった。二重井戸に関する結果については、すでに Leboeuf らによって異なる方法を経由して得られた結果であったが、ここでは、より一般的な多重井戸ポテンシャル系、さらには、多項式標準ハミルトン系に関しても同様の関係式が成立することを示した。

3) 区分線型面積保存写像における軌道の異常拡散と連続時間ランダムウォークモデル

強いカオスが支配する系の軌道は通常拡散（変位の二乗平均が時間に比例して増大する）に従うことが知られている。一方、数年前我々は、不安定性をもたないものの軌道が拡散的に振る舞うある種の区分線形写像が、比較的一般的な状況下で、いわゆる劣拡散、すなわち、軌道の平均二乗変位が指数1未満のべき関数に従うことを発見した。本年度は、この劣拡散を最も適切に記述する確率モデルを探った結果、軌道に対する適当な粗視化操作のもとで得られる時系列が、連続時間ランダムウォークモデルとフラクタル格子上のランダムウォークを組み合わせた確率過程の時系列と統計的な類似性をもつ事実を突き止めた。いまのところ、もともとの力学系のなかで何がフラクタル格子の役割を果たすかなど、その類似の起源について不明な点が多いが、近年話題になっている確率モデルにおけるエルゴード性の破綻との関連など、今後興味深い問題に発展していく可能性が見えてきた。

4) カオス系における時間領域半古典近似の有効性

半古典理論は、カオスを示す古典系と対応する量子系とを結びつける現在のところ最も有力かつ自然な方法である。しかしながら、ある意味驚くことと言ってもよいが、カオス系における半古典理論の有効性は未だ十分に確立された状況ではない。既に遡ること25年ほど前に、当時、定説であった、いわゆるエーレンフェスト時間を超えて時間領域半古典近似が有効であることが Tomsovic-Heller によって示されたが、以降、その妥当性、一般性に関する検証はほとんど行われることなく現在に至っている。ここでは、エノン写像を用いて時間領域半古典論の有効性の検証を行った。エノン写像を考察する理由は、系が馬蹄型力学という最も理想的なカオスを実現する状況をもつことにあり、まず馬蹄型条件を満たす

場合に関して解析を開始した。まだ予備的な解析の域を出ないものの、既に、Tomsovic-Heller が得た結論のいくつかには大きな疑義があることが判明している。

5) 断熱サイクルによる量子系の励起

量子系の断熱的な時間発展は、量子論の創世記から調べられている長い歴史を持つ問題であると同時に、近年でも幾何学的位相や断熱量子計算といった新たな話題を提供している。断熱サイクルによる時間発展は、幾何学的な位相を除いて自明、すなわち状態を変化させないとこれまでの多くの研究で暗黙裡に想定されてきた。しかし、我々が近年推進している「新奇な量子ホロノミー」の研究を通じて、系の状態を変化させるような断熱サイクルの例が蓄積されてきた。本年度の成果として一次元的な量子系での準位交差を利用した例を構築した。この模型は様々な断熱状態を繋ぐ断熱サイクルを持つ一方でヒルベルト空間が無限であるために既存の新奇な量子ホロノミーのトポロジカルな定式化が適用できない点で更なる理論的興味をもたらすものもある（この結果は霞江翔氏の卒業研究を宮本学博士（旧所属早大）との共同研究で発展させたもの）。さらに、この例を多粒子系に拡張し、とある断熱サイクルを基底状態に施すと、いわゆる準位反転状態を生成することを見いたした。この現象を誘導放出やレーザーへと応用することは興味深いと思われる（全卓樹教授（高知工科大）との共同研究）。

2. 研究業績

1) 論文

Felix Fritzsch, Arnd Bäcker, Roland Ketzmerick, and Normann Mertig: Complex-path prediction of resonance-assisted tunneling in mixed systems, *Physical Review E* **95** (2017) 020202(R) (6 pages).

Normann Mertig, Julius Kullig, Clemens Löbner, Arnd Bäcker, and Roland Ketzmerick: Perturbation-free prediction of resonance-assisted tunneling in mixed regular-chaotic systems, *Physical Review E* **94** (2016) 062220 (18 pages).

Atushi Tanaka and Taksu Cheon: Complete population inversion of Bose particles by an adiabatic cycle, *New Journal of Physics* **18** (2016) 045023-1–045023-7.

Sho Kasumie, Manabu Miyamoto and Atushi Tanaka: Adiabatic excitation of a confined particle in one dimension with a variable infinitely sharp wall, *Physical Review A* **93** (2016) 042105-1–042105-5.

2) 国際会議報告

Akira Shudo, Yasutaka Hanada and Kensuke S. Ikeda: Quantum tunneling in nonintegrable systems: beyond the leading order semi-classical description, *RIMS Kôkyûroku Bessatsu*, **B57** (2016) 27-38.

3) 学会講演

● 日本物理学会 2016 年秋季大会 2016 年 9 月 13 日–16 日（金沢大学 角間キャンパス）

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

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

花田康高, 首藤啓, 池田研介: 非可積分系のトンネル効果と古典共鳴の役割について

吉田 賢典, 渡邊 真悟, 首藤 啓: 区分線型面積保存写像における劣拡散と連続時間ランダムウォーク

田中篤司, 全卓樹: 断熱的な時間発展の結果は経路のトポロジーで決まる

● 日本物理学会 第 72 回年次大会 2017 年 3 月 17 日–20 日 (大阪大学 豊中キャンパス)

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

花田康高, 首藤啓, 池田研介: 可積分写像におけるトンネル異常

原田浩充, 首藤啓: 複素古典軌道のリーマン面と可積分系のトンネル分裂

吉田 賢典, 渡邊 真悟, 首藤 啓: 劣拡散を示す非カオス的な区分線型面積保存写像における待ち時間分布と連続時間ランダムウォーク

吉野 元, 首藤 啓: カオス系における時間領域半古典近似の破綻するタイムスケールについて

田中篤司, 全卓樹: 断熱サイクルによるボーズ粒子系の準位反転

国内研究会

● 数理解析研究所研究会 『力学系とその関連分野の連携探索』 2016 年 6 月 6 日–10 日 (京都大学)

A. Shudo: Toward pruning theory for the Stokes geometry of the quantum Hénon map (invited)

国際会議

● Exponential Asymptotics of Difference and Differential Equations, June 6–8, 2016 (RIMS Kyoto)

A. Shudo: Anomalous behavior of transition matrix elements in nonintegrable quantum maps (invited)

● PHHQP16: Progress in Quantum Physics with Non-Hermitian Operators, August 8–16, 2016 (Kyoto Univ.)

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

Yasutaka Hanada, Akira Shudo and Kensuke S. Ikeda: Tunneling in nearly integrable systems with a non-hermitian perturbation (poster)

Atushi Tanaka: Non-Hermitian degeneracies in the Lieb-Liniger model and exotic quantum holonomy

● Quantum Chaos, Graphs and Nodal Domains, September 12–16, 2016 (Rehovot, Israel)

A. Shudo: Toward pruning theory for the Stokes geometry of the quantum Hénon map (invited)

● Workshop on Chaos and Diffusion in Leaky Systems, February 21–22, 2017 (Tokyo Metropolitan University, Tokyo)

Yasutaka Hanada: Quantum tunneling in the classically chaotic systems

● The 6th Hamiltonian dynamical systems and related topics, March 7–9, 2017 (Kyoto)

A. Shudo: Infinitely many stability islands and sticky dynamics in a piecewise linear map (invited)

● Workshop on Asymmetric Cavity and Wave Chaos, March 19–22, 2017 (Peking University, China)

Mertig Normann: Semiclassical Prediction of Resonance-Assisted Decay Rates in Mixed Systems (invited)

4) 著書等

首藤 啓: 面積保存写像の解析力学, 『数理科学』 (2016) 11月号 28–34.

量子凝縮系理論研究室

1. 研究活動の概要

1) リング形状に閉じ込められたボーズ・フェルミ混合系のシミュレーションおよび繰り込み群計算

冷却原子系の中でも注目を浴びているボーズ原子とフェルミ原子の混合気体がリング形状に閉じ込められた系を対象とした。原子間相互作用がこの系に多彩な効果をもたらすことは既にその一部が知られているが、その効果をより詳細に調べるために、量子モンテカルロシミュレーションと繰り込み群計算を行なった。とくにリング上を原子が動く際の動きやすさに着目し、ボーズ・フェルミ間相互作用が斥力の場合と引力の場合の両方について、さまざまな原子数において相互作用の影響を調べたところ、特定の粒子数条件において動きやすさ（実際には位相スティフネスを計算）が上昇する現象が見られた。この現象について定性的な説明にも成功した。[森]

2) 人工スピン軌道相互作用を持つボーズ原子系に導入したフェルミ原子のスピン流の解析

電荷を持たない中性原子にはスピン軌道相互作用しない。しかし見かけ上同じ相互作用をする原子系をレーザにより人工的に作成することが可能になった。ある種のスピン軌道相互作用を持ったボーズ原子系は、一定の条件下でスパイラル型のスピン構造を持つことが知られている。このスピン構造を背景としてスピンを持ったフェルミ原子を導入すると、スピン流の発生が期待される。本研究では、フェルミ原子を導入した際のスピン構造を持ったボーズ原子の相の安定性を最初に調べ、それが安定であることを確認した上でフェルミ原子が作るスピン流の大きさを解析的に導出した。[森]

3) ボーズ・フェルミ混合系超流動の音波の伝播

近年、ボーズ原子、フェルミ原子が同時に超流動になるボーズ・フェルミ混合系超流動が実現し、盛んに研究されているが、有限温度における超流動の性質について解析がス進んでいるとは言いかたい。超流動では第一音波、第二音波と呼ばれる特徴的な音波が観測されるが、第二音波は超流動成分と常流動成分が両方存在しないと励起されない音波であり、超流動の熱力学的性質を強く反映する。そこで、ボーズ・フェルミ混合系超流動の音波について調べた。特に、Landau の二流体モデルを用いて現象論に解析し、3つの音波が存在することを明らかにし、それぞれの音波の性質を明らかにした。さらに線形応答理論を用いて、密度の応答関数を計算し、3つ音波が密度の応答として、励起されることを明らかにした。

[荒畑]

4) ボーズ原子気体超流動における量子渦格子の発生機構

量子渦は超流動特有の位相欠陥であり、超流動の性質をよく反映することから、理論、実験の両面から盛んに研究されている。渦形成には散逸の効果が必要であるが、多くの理論的研究では現象論的な散逸項をパラメーターとして導入することでその効果を記述している。しかしながら、量子渦形成のダイナミクスの包括的理解のためには熱的に励起された非凝縮体の影響を現象論的に扱うのではなく、微視的に明らかにする必要がある。我々は、凝縮体と熱的に励起された非凝縮体を同時に取り扱い、微視的機構に基づいた散逸項の計算し、非凝縮体が渦形成に与える影響について解析した。結果として、非凝縮体の存在によって量子渦格子を形成されているということを明らかにした。[荒畑]

5) スピンアイスに対する希釈効果のモンテカルロ法を用いた研究

希土類化合物 Dy₂Ti₂O₇ や Ho₂Ti₂O₇ などのスピナイスの静的動的性質に関する研究が精力的に行われている。特にアイスルールの破れを表す欠陥のもつ性質に起因した興味深い現象が報告され注目されている。本研究ではスピナイスの磁性に対する希釈効果を調べる為、新たなモンテカルロ法を考案

した。従来のシングルスピンフリップを用いる方法では低温において所謂スピンフリージングと呼ばれる困難があった為、高精度の計算が出来なかつたが、クラスター表現に基づくループ-ストリングアルゴリズム [Phys. Rev. B 90 (2014) 220406(R)] により困難は完全に解消されている。我々は同アルゴリズムを参考に、更に希釈がある場合を考慮し最近接相互作用模型に対するグラフ分割の問題を解いた。現在、新しいアルゴリズムの性能評価と温度、希釈率を変えていった場合の相構造を明らかにする計算を行なっている。[大塚]

6) 二次元格子模型の無秩序相での相関関数が示す普遍性に関する研究

二次元格子上に定義された古典スピン模型が無秩序相にて示す相関関数の普遍性について調べている。これまで同相の相関関数に対しては等方的な相関長を持つ Ornstein-Zernike 型の関数形を用いた解析がなされてきたが、実際は相関長は格子の持つ対称性や離散性に起因する異方性を持ち、それにより結晶は異方的な平衡形を持つことが知られている。これに関連して最近 Fujimoto は系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いる。それによると任意の二次元格子模型の相関関数は、振幅、相関長、異方性パラメタの 3 つの量を用いて普遍的に特徴づけられる。本年度は正方格子上の古典 XY 模型について、その相関関数を Wolff のイジング埋め込み法および Evertz-Von del Linden の無限系アルゴリズムを併用するモンテカルロ法を用いて精密に求め、現在上記パラメータを決定する為の解析を行なっている。[大塚、藤本雅文（奈良医大）]

2. 研究業績

1) 論文

Y. Ono, R. Sakamoto, H. Mori, E. Arahata : Sound Modes of a Bose-Fermi Mixture Superfluid at Finite Temperatures, J. Phys. Soc. Jpn. **85** (2016) 065004.

R. Sakamoto, Y. Ono, E. Arahata, H. Mori: Ground state of Bose-Fermi mixture with spin-orbit coupling, J. Phys. Soc. Jpn. **85** (2016) 064401.

E. Arahata and T. Nikuni: Formation of Vortex Lattices in Superfluid Bose Gases at Finite Temperatures, J. Low Temp. Phys. **183** (2016) 191.

S. Tsuchiya, J. Goryo, E. Arahata, and M. Sigrist: Cooperon condensation and intravalley pairing states in honeycomb Dirac systems, Phys. Rev. B **94** (2016) 104508.

2) 和書

森弘之：「元素紀行」（オーム社）

3) 学会講演

● 日本物理学会 2016 年秋季大会 2016 年 9 月 13-16 日 金沢大学 角間キャンパス

小野洋輔、坂本良平、初田黎、荒畑恵美子、森弘之：有限温度の Bose-Fermi 混合超流動原子気体の音波の伝播

坂本良平、初田黎、小野洋輔、荒畑恵美子、森弘之：スピン軌道相互作用をもつ Bose-Einstein 凝縮体に対する Fermi 原子の影響

初田黎、坂本良平、小野洋輔、荒畑恵美子、森弘之：グツツウィラー近似を用いた三次元光格子中ボーズ・フェルミ混合系の量子相の解析

藤本雅文, 大塚博巳 : 蜂の巣格子ポツツ模型における二点相関関数と普遍的代数曲線

● 日本物理学会 第 72 回年次大会 2017 年 3 月 17-29 日 大阪大学 豊中キャンパス

小野洋輔, 坂本良平, 初田黎, 荒畠恵美子, 森弘之 : 有限温度の Bose-Fermi 混合超流動原子気体の音波の伝播 II

坂本良平, 初田黎, 小野洋輔, 荒畠恵美子, 森弘之 : スピン軌道相互作用をもつ Bose-Fermi 混合原子に誘起された Fermi 原子のスピン流

国内研究会

国際会議

●CEMS Topical Meeting on Cold Atoms, Saitama, 6/2016

R. Hatsuda, R.Sakamoto, Y. Ono, H. Mori, and E. Arahata: A New Approach to Rich Phase Structure and Excitations of Cold Atom Mixtures on Optical Lattice

Y. Ono, R. Sakamoto, R. Hatsuda, H. Mori, and E. Arahata: Sound Propagation of a Superfluid of Bose-Fermi Mixture at Finite Temperatures

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

●The 25th International Conference on Atomic Physics (ICAP2016), Seoul, Korea, 7/2016

Y.Ono, R. Sakamoto, R. Hatsuda, H. Mori, and E.Arahata: Sound Propagation of a Bose-Fermi Mixture Superfluid at Finite Temperatures

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

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。2016年度の研究室構成は、常勤教員2名、大学院生8名、卒研生3名であった。なお、2017年1月から、原子力機構の久保勝規副主任研究員が本研究室の連携客員准教授となっている。以下は、2016年度に行った主な研究の概要である。

1) 非クラマース二重項系の多極子相互作用

f 電子系の多極子自由度、特に八極子自由度に関する研究は、結晶場基底状態が Γ_8 である系を主な対象として行われてきた。これは、 Γ_8 四重項には八極子自由度を持つだけの大きな自由度があるためである。実際、 NpO_2 や $\text{Ce}_x\text{La}_{1-x}\text{B}_6$ といった Γ_8 系で八極子秩序が発見されてきたという歴史がある。ただし、四重項のような大きな自由度は、八極子以上の高次多極子の自由度を持つための十分条件ではあるが、必要条件ではないことに注意する必要がある。もし、単重項ではなく、かつ双極子のような低次のモーメントを持たない場合には、必然的に高次の多極子モーメントによってその自由度は記述される。実際、非クラマース二重項 Γ_3 は双極子モーメントを持たず、四極子自由度と八極子自由度で記述される。また、双極子モーメントを持たないという点は、 Γ_3 系が高次多極子を研究する上でよい舞台になっているともいえる。この様な Γ_3 系でどの様な多極子相互作用が典型的となるかを調べるために、我々は f^2 の Γ_3 結晶場状態を記述する单纯化されたモデルを考え、多極子相互作用を導いた。

このモデルでは、一電子状態として全角運動量 $j = 5/2$ の状態を考え、二電子状態として Γ_3 が結晶場基底状態になるような電子間相互作用を取り入れた。そして、この Γ_3 イオン間の電子の飛び移り積分に関する2次摂動論を用いて、多極子相互作用を導出した。得られた多極子相互作用は、単純立方格子では四極子相互作用、体心立方格子と面心立方格子では八極子相互作用が主要な相互作用となった。これは、 Γ_8 系での多極子相互作用と共通する結果となっている。なお、本研究は、久保勝規氏との共同研究である。

2) 局所クーパー対による非従来型超伝導

多軌道系における超伝導は近年の鉄ヒ素系高温超伝導の発見に象徴されるように、ますますその重要性が認識されてきている。従来型の超伝導とは、フォノンがクーパー対を媒介し、基本的には同一サイトの引力を実現し、相対角運動量がs波のものである。本研究では、多軌道系において、超伝導を担うクーパー対が局所的に形成された場合にも、異方的なノードを持つ非従来型の超伝導が実現することを微視的な模型から出発して示した。

具体的には、微視的な模型として単純立方格子上の2軌道(Γ_8)のハバード模型を考え、乱雑位相近似を適用し、超伝導転移温度および、多極子密度波の転移温度を見積もった。四極子秩序状態の近傍に現れる、「従来型」の異方的超伝導とともに、広いパラメータ領域において、上述の局所クーパー対が起源となる異方的超伝導が形成されることを明らかにした。また、強相関f電子系における低エネルギー有効相互作用について系統的に導出する理論を構築し、結晶場準位と相關した非自明なパラメータ領域が出現することを明らかにした。なお、本研究は、野本拓也氏、池田浩章氏との共同研究である。

3) 密度行列くりこみ群による異方的近藤格子模型の横磁場効果の解析

強磁性超伝導体 URhGe では、そのイジング強磁性相の内部で超伝導が現れ、強磁性と超伝導が微視的に共存していると考えられており、近年盛んに研究がなされている。興味深いことにイジング軸に垂直に（横）磁場を印加すると、通常のように超伝導が一旦消失した後、キュリー温度が 0 になる磁場付近で再び現れることが知られている。また、再出現後の超伝導転移温度は零磁場でのそれよりも高く、磁場下での超伝導状態を実験、理論の両面から明らかにすることは、重要な課題となっている。

本研究では、伝導電子とイジングスピンが結合した時にどのような相が横磁場中で現れるかを調べるために、横磁場を印加した 1 次元の $S = 1$ 異方的近藤格子模型を密度行列くりこみ群を用いて解析した。伝導電子数とともに種々の相が現れるが、特にクオーターフィリングより小さいフィリングで強磁性が安定化することがわかった。この領域で横磁場の効果を調べたところ、磁気モーメントが磁場の向きに倒れていく過程で、近藤“プラトー”相、および朝永ラッティンジャー液体相があり、完全偏極した相に達することがわかった。強磁性と近藤“プラトー”相は通常の 2 次元イジングユニバーサリティクラスの二次転移であり、近藤“プラトー”相では伝導電子と局在スピンが強い反強磁性相関を保つことで磁化過程にプラトーのような領域が出現する。また、このことを反映してスピニギャップが有限に開いていることがわかった。朝永ラッティンジャー液体相へは一次転移で転移し、基本的にギャップレスな振る舞いをする。今後は偏極相までに出現するこれらの相や相境界などで、超伝導揺らぎがどのような振る舞いをするのかを調べ、URhGe の超伝導機構について詳細な検討をしたいと考えている。

2. 研究業績

1) 論文

Katsunori Kubo and Takashi Hotta: Influence of lattice structure on multipole interactions in Γ_3 non-Kramers doublet systems, Phys. Rev. B **95**, 054425 (2017).

T. Nomoto, K. Hattori and H. Ikeda: Classification of “multipole” superconductivity in multi-orbital systems and its implications, Phys. Rev. B **94**, 174513 (2016).

Kazumasa Hattori and Hirokazu Tsunetsugu: Classical Monte Carlo Study for Antiferro Quadrupole Orders in a Diamond Lattice, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 094001 (2016).

2) 学会講演

● 日本物理学会 2016 年秋季大会 2016 年 9 月 13 日 (火) – 16 日 (金) (金沢大学)

鈴木雄大, 野本拓也, 服部一匡, 池田浩章 : BiS₂ 系超伝導体における引力起源異方的ギャップ構造の可能性

服部一匡, 野本拓也, 堀田貴嗣, 池田浩章 : 結晶場準位構造による超伝導安定化機構

● 日本物理学会 2017 年第 72 回年次大会 2017 年 3 月 17 日 (金) – 20 日 (月) (大阪大学)

服部一匡 : イジング強磁性超伝導の理論 (シンポジウム講演)

鈴木浩平, 服部一匡 : 横磁場下一軸異方性のある $S = 1$ 一次元近藤格子模型の基底状態

松井大, 堀田貴嗣 : パイエルス・アンダーソンモデルにおける電気双極子感受率の温度依存性

山村諒祐, 堀田貴嗣 : 平均場近似による Γ_8 ハバードモデルの多極子秩序の微視的理解

国内研究会

- J-Physics : 多極子伝導系の物理 平成 28 年度領域全体会議 2016 年 5 月 26 日（木）–28 日（土）（北海道大学）

服部一匡 : 強磁性三重臨界点と強磁性超伝導に関する微視的理論

- J-Physics : 多極子伝導系の物理 理論検討会 2016 年 6 月 4 日（土）–5 日（日）（明治大学）

服部一匡, 野本拓也, 堀田貴嗣, 池田浩章 : 多軌道系における超伝導秩序変数の分類とその応用

- DMFT workshop 2017 2017 年 2 月 16 日（木）–17 日（金）（東京大学）

服部一匡, 野本拓也, 堀田貴嗣, 池田浩章 : On local and nodal superconductivity

- Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems 2017 年 2 月 20 日（月）–22 日（水）（東京大学）

服部一匡, Achim Rosch : Two-particle backscattering at the edge of two-dimensional topological insulators: quantum Monte Carlo analysis

高エネルギー物理実験研究室

1. 研究活動の概要

高エネルギー物理実験研究室では、日本が世界をリードしている B ファクトリーにおける、粒子・反粒子対称性の破れの研究を始めとする高エネルギー衝突型加速器実験の他、加速器や原子炉からのニュートリノを検出するニュートリノ振動実験、宇宙から飛来する高エネルギーのニュートリノ検出実験などの幅広い物理実験を展開している。

1) Belle 実験、Belle II 実験

KEKB 加速器の 50 倍のルミノシティーを目指す SuperKEKB 加速器の試験運転が平成 28 年 2 月 1 日より開始され、その後、Phase I として H28 年 6 月末まで蓄積電流を徐々に増加させながらバックグラウンドの測定及びビームパイプの焼きだしを実施した。夏以降加速器グループは QCS の設置作業を継続した。

Belle 測定器の upgrade 版である Belle II 測定器の建設が順調に進み、TOP カウンターの設置が完了した。その後 10 月には中央飛跡検出器 (CDC) の設置も完了し、引き続いてエンドキャップカロリメータ (ECL) も設置された。当研究室では Belle II 測定器エンドキャップ部の粒子識別装置の性能を改善するために、シリカエアロゲルを輻射体としたリングイメージチェレンコフ検出器 (ARICH) の開発を進めている。

ARICH は 6 つのセクターで構成されているが、現在 2 セクターに光検出器である HAPD を設置し、宇宙線を用いてリングイメージを再構成し、性能評価を行っている。HAPD の感度をモニターするために、青色 LED を光源として光ファイバーを用いて一様な光量を HAPD に照射するモニターシステムを構築した。必要な光量がセクター内の HAPD 全体に照射できていることが確認された。

今年度は Belle 実験で 11 編、Belle II の ARICH 関連で 2 編の欧文雑誌への投稿論文が出版された。

2) Double Chooz 実験

本研究室では、フランス・Chooz 原子力発電所にて進行中の国際共同実験 Double Chooz に参加し、ニュートリノの基本的な性質を担う混合角 θ_{13} の測定を行っている。原子炉コアからの距離が異なる 2 基の検出器を用いて、原子炉から飛来する反電子ニュートリノの振動現象を精度良く観測することで θ_{13} を精密測定する。

近年、Double Chooz 実験・T2K 実験をはじめとする原子炉・加速器ニュートリノ振動実験により θ_{13} が有限値を持つことが発見され、CP 対称性測定の道が拓けた。将来的な CP 対称性測定にむけて、正確かつ精密な θ_{13} 測定の意義は高まっている。首都大学グループでは、混合角 θ_{13} の振動解析・ステライルニュートリノ探索・検出器性能の評価・オフラインツールの開発運用・高電圧電源システムの維持管理などを担当しており、実験グループに大きく貢献している。

本年度は、昨年度までの約 1.5 倍となる 15 ヶ月分の 2 基同時測定データを蓄積した。また、ガドリニウムに加えて水素の中性子捕獲事象を解析に加えたことで、統計量を従来の約 2.5 倍とすることに成功した。この解析手法の変更に伴う偶発的バックグラウンドの増大は、多変量解析を導入することで十分に抑制された。8 月にシカゴで行われた国際会議 (ICHEP 2016) などでそれら実験の現状を報告し、系統誤差の評価を進めて 9 月に暫定的な θ_{13} 測定結果の更新を行った。

その後、さらに詳細に解析手法や系統誤差の評価を進めて、2 基の検出器を用いた最初の結果を論文にとりまとめている。また並行して、増加した統計量と新しい解析手法で期待されるステライルニュートリノ探索感度も見積もられ、実データを用いた探索に向けて準備を進めている。

3) DCBA 実験

ニュートリノは、電荷をもたない「電子の仲間」(=レプトン)であり、弱い相互作用せず物質との相互作用が極めて弱いことから、その多くの性質は今だに分かっていない。その1つに粒子と反粒子の区別がある。電子は電荷を持っているため、粒子と反粒子の区別はその電荷の符号によって明白である。しかしながらニュートリノは電荷を持たないため、そもそも粒子と反粒子の区別があるのかどうか分かっていない。粒子と反粒子の区別がない粒子をマヨラナ粒子と呼び、素粒子の標準模型を超える多くの理論では、ニュートリノがマヨラナ粒子であることを支持している。

もしニュートリノがマヨラナ粒子である場合、ニュートリノレス二重ベータ崩壊という極めて稀な原子核変が起こることが予想されている。DCBA 実験では、将来的なニュートリノレス二重ベータ崩壊の観測を目指して、新しい測定原理(ベータ線の運動量観測)に基く実験装置の開発を進めている。二重ベータ崩壊を起す原子核である ^{100}Mo を 9.6% 含むモリブデンの板を 2 枚のドリフトチェンバーで囲み、超伝導ソレノイドコイルを用いて一様磁場を印加した実験(DCBA-T2.5)を 2011 年から行なっていたが、本年度 7 月にデータ収集を完了した。

現在は、次世代の実験として大型化かつチャンネル間隔を微細化した実験装置(DCBA-T3)の開発に取り組んでいる。DCBA-T3 実験では、 ^{150}Nd を含む酸化ネオジムを塗布した線源板を用いて二重ベータ崩壊の観測を行う予定であり、観測開始に向けて準備を進めている。

4) T2K 実験

茨城県東海村に建設した陽子加速器(J-PARC 加速器)を用いて大強度のミューニュートリノビームを生成し、295km 離れた岐阜県飛騨市にある大型水チエレンコフ検出器スーパーカミオカンデで打ち出されたニュートリノを観測する、ニュートリノ振動実験を行なっている。T2K 実験は 2013 年 7 月にミューニュートリノから電子ニュートリノへ変化する新しいニュートリノ振動を発見した。T2K 実験では、将来的なニュートリノにおける CP 対称性の破れの発見を目指して、従来のレプトン数 1 をもつニュートリノを用いたニュートリノ振動実験に加え、新たにレプトン数 -1 をもつ反ニュートリノを用いたニュートリノ振動実験も 2014 年より開始した。反ニュートリノモードでの 4.01×10^{20} POT(ターゲット上の陽子数)のデータを用いて、ニュートリノ消失事象の解析を行い、反ミューニュートリノによるニュートリノ振動のパラメータは、ミューニュートリノによる振動パラメータと矛盾がないとの結果を得た。現在、ニュートリノモードと反ニュートリノモードでのデータを用いて、CP 対称性の破れの検証およびニュートリノ振動パラメータの精密測定を現在進めている。

5) 宇宙線ミュオンを用いた原子炉の透視

国際廃炉研究開発機構、東京電力、高エネルギー加速器研究機構および筑波大学と共に、2011 年 3 月に発生した東日本大震災に伴う福島第一原発事故で損傷したとされる原子炉炉心部を、宇宙線ミュオンを用いて調査する研究を行なっている。プラスチックシンチレータを荷電粒子が通過した際の発光を波長変換ファイバーを通して半導体光検出器(MPPC)で読み出す実験技術を応用した、宇宙線ミュオンの飛来方向を測定する測定器を作成し、2011 年より 2013 年まで東海第二原発を用いた実証試験を行った。その後、福島第一原発の廃炉に向けた取り組みの一つとして、溶融したと考えられる一号機から三号機の原子炉の炉心の核燃料の状態の調査に協力している。昨年度は、一号機の炉心の状態の調査を行った。本年度は二号機の建屋の西側に、新たに開発した小型ミュオン検出器を設置し、炉心および燃料プールを通過してくるミュオンの数(の減衰率)を用いて二号機の炉心の調査を行い、その結果を公表した。さらに、放射線環境の厳しい場所への設置を可能にするために、小型ミュオン検出器の耐放射線性能を高める改良を行った。また、原子炉の観測と並行して、岩手県立大学などと共同で岩手山の観測を進めて

いる。岩手山は、近年火山活動の兆候が見られた時期があり、現在岩手県立大学などが中心となり、様々な手法を取り入れた観測体制が構築されつつある。その一環として、岩手山を透過してくる宇宙線ミュオンの観測を、本年度10月より開始した。今後、岩手山の山体の内部構造の調査や、火山内部の構造の急激な変化の監視に役立てていく予定である。

6) 岩塩鉱や南極氷床を用いた超高エネルギートリノ検出器の研究開発

超高エネルギートリノ ($> 10^{16} eV$) は宇宙空間において超高エネルギー宇宙線と宇宙を満たしている宇宙背景輻射との衝突で生成されると推測される。超高エネルギートリノは飛来数が極度に低いため 10 事象/年の検出には 50Gt の巨大検出媒質が必要となる。このような巨大質量検出媒質として天然の岩塩鉱や南極氷床中での超高エネルギートリノによる反応シャワーの検出媒質の局所的温度上昇が惹起される。有限要素法によるシミュレーションでは媒質表面に配置したフェーズドアレイアンテナによるレーダーによる局所的温度上昇の検出可能性を示した。

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

CERN の 24GeV 陽子シンクロトロンの陽子ビームをターゲットへ衝突させ、その時発生する $\pi^+\pi^-$ や $K^+\pi^-$ 原子の測定が終了しデータ解析を行った。さらに高エネルギーの CERN の SPS 加速器を利用する計画を検討した。

8) ポジトロニウムの 4 光子、5 光子崩壊過程の研究

未だ検証されていない高次 QED 過程であるポジトロニウムの 5 光子稀崩壊現象の実験を行っている。今年度は、ポジトロニウム生成のための陽電子線源を検出器中央に置き、ガンマ線検出器の鉛シールドを延長し、さらにデータ収集電子回路を行った。

この改良により、バックグラウンドを低減させつつ、検出信号事象数を増加でき、約 1 年の実験で有意な測定結果が得られると期待される。改良された検出器による実験は、2017 年 1 月に開始された。

2. 研究業績

1) 論文

Studies of a hybrid avalanche photo-detector in magnetic field

L. Šantelj *et al.*. 2017. 4 pp.,

Nucl.Instrum.Meth. A845 (2017) 459-462

Large-area silica aerogel for use as Cherenkov radiators with high refractive index, developed by supercritical carbon dioxide drying

Makoto Tabata (Chiba U.), Ichiro Adachi (KEK, Tsukuba), Yoshiaki Hatakeyama, Hideyuki Kawai, Takeshi Morita (Chiba U.), Takayuki Sumiyoshi (Tokyo Metropolitan U., Math. Dept.). Dec 31, 2016. 14 pp.

The Journal of Supercritical Fluids 110 (2016) 183

Lepton-Flavor-Dependent Angular Analysis of $B \rightarrow K^*\ell^+\ell^-$

Belle Collaboration (S. Wehle (DESY) *et al.*). Dec 15, 2016. 7 pp.

Phys.Rev.Lett. 118 (2017) no.11, 111801

Search for D^0 decays to invisible final states at Belle

Belle Collaboration (Y.-T. Lai (Taiwan, Natl. Taiwan U.) *et al.*). Nov 28, 2016. 8 pp.

Phys.Rev. D95 (2017) no.1, 011102

Search for the 0^{--} Glueball in $\Upsilon(1S)$ and $\Upsilon(2S)$ decays

Belle Collaboration (S. Jia (Beihang U.) *et al.*). Nov 21, 2016. 19 pp.

Phys.Rev. D95 (2017) no.1, 012001

Search for a dark vector gauge boson decaying to $\pi^+\pi^-$ using $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$ decays

Belle Collaboration (E. Won (Seoul U.) *et al.*). Sep 19, 2016. 6 pp.

Phys.Rev. D94 (2016) no.9, 092006

Measurement of the branching ratio of $\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+}\tau^-\bar{\nu}_\tau$ relative to $\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+}\ell^-\bar{\nu}_\ell$ decays with a semileptonic tagging method

Belle Collaboration (Y. Sato (Nagoya U.) *et al.*). Jul 26, 2016. 12 pp.

Phys.Rev. D94 (2016) no.7, 072007

Study of Excited Ξ_c States Decaying into Ξ_c^0 and Ξ_c^+ Baryons

Belle Collaboration (J. Yelton (Florida U.) *et al.*). Jul 24, 2016. 14 pp.

Phys.Rev. D94 (2016) no.5, 052011

Measurement of the CKM angle ϕ_1 in $\bar{D}^{(*)0}h^0$, $\bar{D}^0 \rightarrow K_S^0\pi^+\pi^-$ decays with time-dependent binned Dalitz plot analysis

Belle Collaboration (V. Vorobyev (Novosibirsk State U. and Novosibirsk, IYF) *et al.*). Jul 20, 2016. 15 pp.

Phys.Rev. D94 (2016) no.5, 052004

Studies of charmed strange baryons in the ΛD final state at Belle

Belle Collaboration (Y. Kato (Kinki U., Osaka and Osaka City U.) *et al.*). May 30, 2016. 10 pp.

Phys.Rev. D94 (2016) no.3, 032002

Search for a massive invisible particle X^0 in $B^+ \rightarrow e^+X^0$ and $B^+ \rightarrow \mu^+X^0$ decays

Belle Collaboration (C.S. Park (Yonsei U.) *et al.*). May 14, 2016. 8 pp.

Phys.Rev. D94 (2016) no.1, 012003

Search for XYZ states in $\Upsilon(1S)$ inclusive decays

Belle Collaboration (C.P. Shen (BeiHang U.) *et al.*). May 3, 2016. 11 pp.

Phys.Rev. D93 (2016) no.11, 112013

First observation of $\gamma\gamma \rightarrow p\bar{p}K^+K^-$ and search for exotic baryons in pK systems

Belle Collaboration (C.P. Shen (BeiHang U.) *et al.*). Apr 9, 2016. 9 pp.

Phys.Rev. D93 (2016) no.11, 112017

Measurement of the muon neutrino inclusive charged-current cross section in the energy range of 13 GeV with the T2K INGRID detector,

K. Abe *et al.* (T2K Collaboration)

Phys. Rev. D 93, 072002 (2016)

Measurement of Muon Antineutrino Oscillations with an Accelerator-Produced Off-Axis Beam,

K. Abe *et al.* (T2K Collaboration)

Phys. Rev. Lett. 116, 181801 (2016)

Measurement of Coherent π^+ Production in Low Energy Neutrino-Carbon Scattering,
K. Abe *et al.* (T2K Collaboration)
Phys. Rev. Lett. 117, 192501 (2016)

First measurement of the muon neutrino charged current single pion production cross section on water
with the T2K near detector,
K. Abe *et al.* (T2K Collaboration)
Phys. Rev. D 95, 012010 (2017)

Muon capture on light isotopes in Double Chooz
Double Chooz Collaboration (Y. Abe (Tokyo Inst. Tech.) *et al.*)
Phys. Rev. C 93 (2016) 054608.

Characterization of the Spontaneous Light Emission of the PMTs used in the Double Chooz Experiment
Double Chooz Collaboration (Y. Abe (Tokyo Inst. Tech.) *et al.*)
JINST 11 (2016) no.08, P08001

Cosmic-muon characterization and annual modulation measurement with Double Chooz detectors
Double Chooz Collaboration (T. Abrahão (Rio de Janeiro, CBPF) *et al.*)
JCAP 1702 (2017) no.02, 017

Updated DIRAC spectrometer at CERN PS for the investigation of $\pi\pi$ and $K\pi$ atoms
B. Adeva, *et al.* (DIRAC Collaboration)
Nucl. Instr. Meth. A839 (2016) 52-85.

Observation of $K^+\pi^-$ and $K^-\pi^+$ atoms
B. Adeva, *et al.* (DIRAC Collaboration)
Physical Review Letter 117, 112001(2016).

Review of Particle Physics
Particle Data Group (C. Patrignani (Bologna U. and INFN, Bologna) *et al.*). 2016. 1808 pp.
Chin.Phys. C40 (2016) no.10, 100001

2) 国際会議報告

First double-detector results from Double Chooz experiment
T. Matsubara, PoS (ICHEP2016) 469.

Theta-13 oscillation analysis in Double Chooz with two detectors
G. Yang, T. Matsubara *et al.*, PoS (ICHEP2016) 926.

Sterile neutrino search in the Double Chooz experiment
D. Hellwig and T. Matsubara, PoS (ICHEP2016) 927.

3) 学会講演

● 日本物理学会 2016 年秋季大会 2016 年 9 月 21~24 日 (宮崎大学)

Belle II 実験 A-RICH 用データ読み出しシステムの開発

米永匡伸, 住吉孝行, 角野秀一, 渕田哲郎, 岩田修一, 舶谷航暉ほか

● 日本物理学会 第 72 回年次大会 2017 年 3 月 17~20 日 (大阪大学豊中キャンパス)

ポジトロニウム 5 光子崩壊事象観測のための検出装置の改良

吉川広陽, 渕田哲郎, 千葉雅美, 浜津良輔

トロイド磁石を用いたミュオンラジオグラフィシステムの開発

市川星磨, 角野秀一, 高崎史彦, 林浩平, 藤井啓文, 佐藤康太郎, 児玉英世, 原和彦

Belle II 実験 ARICH 用 Slow Control System の開発

米永匡伸, 住吉孝行, 角野秀一, 渕田哲郎, 岩田修一, 舶谷航暉, 野口光太ほか

国際会議

● The 38th International Conference on High Energy Physics (ICHEP2016) August 3-10, 2016, Chicago, USA

T. Matsubara: First double-detector results from Double Chooz experiment

G. Yang, T. Matsubara *et al.*: Theta-13 oscillation analysis in Double Chooz with two detectors

D. Hellwig and T. Matsubara: Sterile neutrino search in the Double Chooz experiment

● The 9th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH 2016)
September 5-9, 2016. Bled, Slovenia

M. Yonenaga: Development of slow control system for the Belle II A-RICH detector

K. Hataya: Development of the ARICH monitor system for the Belle II experiment

4) 学会誌等

千葉雅美「石灰岩や岩塩を用いた超高エネルギー・ニュートリノ検出器に関する研究」

Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan 24, 80-87(2017).

原子物理実験研究室

1. 研究活動の概要

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

1) 静電型イオン蓄積リングを用いた原子分子の衝突・冷却過程の研究

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

(1) 炭素分子負イオンの冷却速度・分光測定 :

星間空間における分子負イオンの内部エネルギー冷却過程を解明すべく, これまで直鎖状炭素分子負イオンを蓄積・レーザー励起して電子脱離寿命の測定を行ってきた。孤立した環境にある分子は, 電子的に励起されると内部転換を通じて自身の内部エネルギーを分子振動として蓄え, やがて輻射遷移により周囲に赤外光を放出して徐々に冷却される(輻射冷却, 典型的に数 ms – 数百 ms の時定数)。また, 分子の内部エネルギー総和が電子脱離や解離の閾値を超える場合, 脱離・解離を起こしてその内部エネルギーを減ずる。さらにこの二つの過程に加え, 分子の内部エネルギーが分子内電子に集中して電子励起状態となり(逆内部転換), その後すぐに電子遷移によって蛍光を放出する『再帰蛍光』に起因した速い冷却過程(時定数 $100 \mu\text{s}$ 以下)が近年見つかった。当研究室では, これまでに静電型イオン蓄積リングを用いた炭素鎖分子負イオン $\text{C}_{4,6}^-$ の研究で再帰蛍光によると考えられる速い冷却を発見, 電子脱離しきい値以下の内部エネルギー領域において冷却速度の内部エネルギー依存性を詳細に測定することで再帰蛍光過程の存在についての強い証拠を得た。さらに C_6^- については放出される再帰蛍光($\text{C}^{\ 2\Pi_g^+} \rightarrow \text{X}^{\ 2\Pi_u}$ 遷移, 608 nm)の直接観測に成功し, 再帰蛍光過程の存在を確かなものとした。

本年度は, これまでに開発した再帰蛍光測定用の光学検出器系を炭素鎖分子負イオン C_4^- に適応し, C_4^- が放出する再帰蛍光($\text{C}^{\ 2\Pi_u^+} \rightarrow \text{X}^{\ 2\Pi_g}$ 遷移, 457 nm)の直接測定実験を行った。実験では静電型イオン蓄積リングに様々なサイズの炭素鎖分子負イオン $\text{C}_n^- (n: 3 - 6)$ を入射し, 蓄積イオンから放出される再帰蛍光を干渉フィルター(透過波長: $460 \pm 7 \text{ nm}$)を通じて光電子増倍管で単一光子計数法により検出した。測定の結果, C_4^- だけでなく今回用いた干渉フィルターでは測定できないはずの C_6^- からの再帰蛍光も観測された。これは, 再帰蛍光が一般的な原子の蛍光とは大きく異なり, 大きく拡がったスペクトル構造を有するためと考えられる。

また, 直鎖状と環状の二種類の構造異性体が存在すると考えられる炭素分子負イオン C_{10}^- について, その冷却速度を測定した。これまで研究を行っていた炭素数 9 以下の炭素鎖分子負イオンの場合, C_4^- や C_6^- など炭素数が偶数であれば低エネルギー電子励起状態を有するため再帰蛍光過程が発現し急激に冷却が進むことがわかっている。しかし, C_{10}^- では炭素数が偶数にも関わらずゆっくりと冷却される成分が存在することが分かった。このゆっくりとした冷却過程は入射 C_{10}^- に混在する環状構造異性体によるものと考えられる。現在, 内部エネルギーごとに冷却速度の測定を行うべく準備を進めている。

(2) 装置・技術開発 :

静電型イオン蓄積リングを用いた実験の高度化を目指し, レーザー冷却技術を利用した蓄積イオンビームの高品質化・低速化や, 極低温冷却イオン源による極低内部エネルギーイオンビーム生成など, 各種の技術開発を進めている。蓄積イオンビームのレーザー冷却については、必要なレーザー光源開発のテス

トとして外部共振器型半導体レーザーを実際に作成し, Rb 原子ビームに対してレーザー照射による運動制御を確認した. また, 極低温冷却イオン源開発ではイオン源全体の設計をイオン光学シミュレーションをベースに進め, レーザースパッタイオン生成部およびイオンビーム輸送部の一部については実際に装置製作も完了した. 現在はイオントラップ・冷却部設計の最終的な詰めの作業を行っている.

2) 多価イオンの電荷移行反応

中性原子から複数の電子を剥ぎ取ること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otron共鳴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) 太陽風電荷交換 :

太陽風には ppm オーダーと僅かではあるが, 炭素より重い元素の高電離原子イオンが含まれている. これらの太陽風多価イオンが宇宙空間の非常に希薄な中性物質と衝突し, 電子捕獲によって高励起状態が生成することで軟 X 線を放出する過程が宇宙物理学では注目されている. X 線観測衛星による観測データの詳細な解析には, この衝突による電荷移行断面積と発光断面積のデータが必要であるが, 信頼できる詳細なデータは不充分であり, 未だに断面積データの誤差は大きい. そのため, 太陽風多価イオンの主要成分である C および O について, 追い返し法による電荷移行断面積の絶対値測定を行ってきたが, 追い返し法では入射イオンビームの調整によって得られる断面積値がばらつき再現性が乏しい上に, 二電子捕獲断面積の測定が非常に難しいという欠点があった. そこで, 偏向電場による価数分析を用いて電荷移行断面積を測定する新たな装置を設計・開発した. まだ調整不足で測定値に対する信頼性が保証できていないが, 従来の報告値と矛盾しない結果が得られており, 今後はこの装置を用いた系統的な測定を予定している.

(2) 熱核融合プラズマ :

国際熱核融合実験炉 (ITER) のダイバータに材料として W が用いられるため, 不純物としてプラズマに混入する W 多価イオンの分光学的データが求められている. 核融合科学研究所との共同研究として W に関する実験を行ってきたが, W は同位体が多いために質量電荷比でイオンビームを選別する実験には適さなかった. しかし, 原子番号が 1 つしか違わない Ta は, 質量数 181 の天然存在度が 99.98799 % であり, 事実上一種類の安定同位体しか存在しないと見なせることに着目して, W の代わりに Ta を用いた分光実験を行った. 高純度の Ta 薄板を希薄な O₂ ガスから生成したプラズマの中に挿入することで, 24 価までの Ta 多価イオンを生成し, 20 kV の電位差でビームとして引き出して, 価数を選別したイオンビームを用いた電荷交換分光を行った. 10 価から 20 価の Ta イオンと O₂ および N₂ 標的の衝突実験を行い, 電荷移行に伴う極端紫外領域の発光スペクトルを測定した. Ta 多価イオンからの発光を思われる 2 系列の非常に波長幅の広い発光帯が観測され, Cowan コードによる予備的な理論計算との比較によって, 4f-5d および 4f-5g 遷移に対応する UTA (Unresolved Transition Array) に帰属するのが妥当と考えることができた. 但し, 他の重元素イオンで観測されている UTA よりも非常に波長幅が広いため, その理由の解明を進めている. 一方, 入射 Ta イオンの価数に依存せず, 標的から生成した O 原子および N 原子の多価イオンからの発光と思われる観測された. 多価イオン衝突実験において標的からの発光を観測した例は少なく, 分子標的実験での解離した原子の多価イオンからの発光について全く報告例がない. 多価イオンによる分子解離の実験では解離イオン片の運動エネルギー (KER, Kinetic Energy Release) を測定する手法が一般的で, 発光に関する報告は全く見当たらない. そのため, 解離に伴う電

子励起機構に着目して、系統的に研究を進めていく予定である。

(3) 中性子星合体による重元素合成過程：

ビックバン以降に起こった重元素合成機構として、恒星内で起こる s 過程 (slow-process) が Fe までの元素については定説とされているが、Fe 以上の重元素については、r 過程 (rapid-process) であると考えられているが、それが起こる場所としては超新星爆発と中性子星合体の二つの説が拮抗しており、今のところ確定していない。中性子星合体の場合には重力波の放出があるため、LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) のような重力波観測装置による観測直後に中性子星合体領域からの可視スペクトルを観測することで、重元素合成機構を明らかにできる可能性が指摘されている。このスペクトルの理論的な理解のためには、発光に寄与する全ての重元素多価イオンの発光波長と遷移確率のデータが必要である。しかし、そのような重元素に対する原子分光学的データは著しく不足しているため、現状のシミュレーションの信頼性は極めて低いのが実情である。この問題を解決するために、中性子星合体の理論的な研究を行っている国立天文台・上智大学・東邦大学の研究グループと原子分光の理論・実験を行っている核融合研・電通大・首都大が共同研究を開始した。首都大では Er イオンに対する可視領域での電荷交換分光を行い、3 倍の Er イオンが 454 nm に非常に波長幅の広い発光線を持つことを見出した。この発光は未同定であるが、今後も重元素イオンの可視領域における新たな発光線の発見を目指した実験を継続する予定である。

3) 低温ヘリウム気体中のイオン移動度

1997 年に開発した低温移動管質量分析装置を用いて、液体窒素および液体ヘリウムによって冷却したヘリウム気体中におけるイオンの移動度測定を継続している。今年度は、重アンモニア水 (ND_3 を D_2O に溶かした試薬) を用いて、 ND_3 蒸気から電子衝撃によって生成した ND_n^+ ($n = 1 - 4$) に関する気体温度 77 K および 4.3 K での測定を行った。昨年度までに行った NH_n^+ ($n = 1 - 4$) の結果と比較すると、同位体効果について議論することができる。 NH^+ と NH_3^+ では到着時間スペクトルに 2 つのピークが現れて電子的な準安定励起状態が観測されたが、 NH_2^+ と NH_4^+ ではピークの分裂は観測されなかった。これに対して、 ND^+ と ND_4^+ では同位体による違いは観測されなかったものの、 ND_3^+ では到着時間スペクトルに分裂は見られず、逆に ND_2^+ では 2 つのピークが観測された。 NH_2^+ の分子内ポテンシャルエネルギー計算結果によれば、H-N-H の変角振動モードにおいて基底状態 $\tilde{X} \ ^3\text{B}_1$ と励起状態 $\tilde{a} \ ^1\text{A}_1$ のポテンシャル曲線が角度 100° 付近において交差している。この変角振動モードの零点振動準位が、換算質量の小さい NH_2^+ では交差点より上にあり、 ND_2^+ では逆に下にあるとすると、交差点を介した状態間の遷移によって NH_2^+ では準安定励起状態 $\tilde{a} \ ^1\text{A}_1$ が脱励起し、 ND_2^+ ではこの経路による脱励起は起こらないのでスピン禁制のために長寿命であると考えられる。この仮説は NH_2^+ と ND_2^+ における同位体効果を説明してくれるが、 NH_3^+ と ND_3^+ に見られた同位体効果については、 NH_3^+ における 2 つのピークの帰属ですら未だに明確ではなく原因は不明である。 OH_n^+ ($n = 1 - 3$) および OD_n^+ ($n = 1 - 3$) では電子状態の分離は全く観測されなかったが、O を N に変えただけで大きな違いが観測された。そこで次には CH_n^+ ($n = 1 - 4$) に関する同様な測定を計画している。また、 OH^+ と OD^+ の移動度の電場依存性には極小があり、その深さには大きな同位体依存性が見られたが、 NH^+ と ND^+ の極小は非常に浅く、同位体依存性も明瞭ではなかった。以上のように、小さな水素化物イオンの移動度には意外なほどの多様性が見られており、その統一的な理解を目的とした研究を進めていく予定である。

2. 研究業績

1) 論文

Kazunari Takaya, Yuya Hasegawa, Tetuo Koizumi, and Hajime Tanuma: Mobilities of polyatomic molecular ions in He gas, *Int. J. Ion Mobil. Spec.* **19**, 183 (2016).

Kazunari Takaya, Takahiro Kaneko, Hajime Tanuma, Tatsuhiro Nishide, Hiroaki Sugiyama, Nobuo Nakano, Hisayuki Nagashima, and Yasuo Seto: Model calculation for ion mobility in air using the MOBCAL program, *Int. J. Ion Mobil. Spec.* **19**, 227 (2016).

Yuta Ebara, Takeshi Furukawa, Jun Matsumoto, Hajime Tanuma, Toshiyuki Azuma, Haruo Shiromaru, and Klavs Hansen: Detection of recurrent fluorescence photons, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 133004 (2016).

2) 國際会議報告

3) 学会講演

● 日本物理学会 2016 年秋季大会 2016 年 9 月 13 日～16 日（金沢大学・角間キャンパス）

河野直子, 吉田茉生, 栗山みさき, 古川武, 松本淳, 東俊行, 田沼肇, Klavs Hansen, 城丸春夫 : C₆⁻ 内部エネルギー分布の輻射冷却による時間変化 II

鈴木竜太, 河野直子, 安藤怜隼, 古川武, 松本淳, 東俊行, 田沼肇, Klavs Hansen, 城丸春夫 : 孤立環境下における C₄⁻ の振動輻射冷却過程

● 原子衝突学会第 41 回年会 2016 年 12 月 10 日～11 日（富山大学・五福キャンパス）

島田健人, 沼館直樹, 内倉義届, 阿久津卓土, Ling Liu, 田沼肇 : 電荷交換衝突における励起状態占有数分布の時間発展シミュレーション

鈴木竜太, 河野直子, 安藤怜隼, 古川武, 松本淳, 東俊行, 田沼肇, Klavs Hansen, 城丸春夫 : 孤立環境下における C₄⁻ の振動脱励起による輻射冷却過程

山崎達朗, 森健汰, 横仁美, 二宮彰啓, 田沼肇 : 低温 He 中における ND_n⁺ (*n*=1–3) の移動度測定

柳ヶ瀬大將, 古川武, 田沼肇, 松本淳, 城丸春夫, 東俊行 : 極低温冷却イオン源のイオン光学シミュレーション

阿久津卓土, 田沼肇 1, 沼館直樹, 内倉義届, 島田健人, Elaine Long, Gerry O'Sullivan : タンタル多価イオンの電荷交換分光

内倉義届, 島田健人, 阿久津卓土, 沼館直樹, 島谷紘史, 石田卓也, 田沼肇 : 太陽風電荷交換反応解析のための断面積測定装置の開発

河野直子, 栗山みさき, 古川武, 松本淳, 田沼肇, 東俊行, Hansen Klavs, 城丸春夫 : 高温な炭素クラスター負イオン C_n⁻ (*n* = 3 – 12) の冷却過程

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

● 「プラズマ科学における分光計測の高度化と原子分子過程研究の新展開」「原子分子データ応用フォーラムセミナー」合同研究会 2016年12月20日～22日（核融合科学研究所, 土岐市）

沼館直樹: 多価 Ta イオンの電荷交換分光およびレーザー生成プラズマ分光

● 日本物理学会 2017 年年次大会 2017 年 3 月 17～20 日（大阪大学・豊中キャンパス）

河野直子, 古川武, 松本淳, 田沼肇, 東俊行, Klavs Hansen, 城丸春夫: 孤立 C_{10}^- 分子負イオンの冷却における構造異性体の寄与

柳ヶ瀬大將, 古川武, 田沼肇, 城丸春夫, 松本淳, 東俊行極低温イオン源の冷却部シミュレーション及びイオン発生実験

高谷一成, 長谷川優也, 山崎達朗, 田沼肇, 小泉哲夫: 4.3 K の He 中における 2-ブタノールのフラグメントトイオンの移動度

山崎達朗, 森健汰, 槙仁美, 二宮彰啓, 田沼肇: 低温ヘリウム気体中の多価重イオン ND_n^+ ($n=1-3$) の移動度

内倉義届, 沼館直樹, 島田健人, 阿久津卓土, 田沼肇, Elaine Long, Gerry O'Sullivan: 多価重イオンと中性分子の衝突における多価フラグメントトイオンからの EUV 発光の観測

沼館直樹, 内倉義届, 島田健人, 阿久津卓土, 田沼肇, Elaine Long, Oisin Maguire, Domagoj Kos, John Sheil, Gerry O'Sullivan: 電荷交換分光とレーザープラズマ分光による多価 Ta イオンの極端紫外領域における発光スペクトル

佐藤智哉, 市川雄一, 井上壮志, 内山愛子, 高峰愛子, 小島修一郎, 舟山智歌子, 田中俊也, 坂本雄, 大友祐一, 平尾千佳, 近森正敏, 彦田絵里, 古川武, 吉見彰洋, C.P. Bidinosti, 猪野隆, 上野秀樹, 松尾由賀利, 福山武志, 吉永尚孝, 酒見泰寛, 旭耕一郎: 能動帰還型核スピナーメーターにおける帰還磁場印加方式と周波数安定性

江上魁, 今村慧, 高峰愛子, 小林航, 藤田朋美, 富永大樹, 三條真, 中村祐太郎, 湧井崇志, 古川武, 上野秀樹, 松尾由賀利: 超流動ヘリウム中に打ち込まれた低収量核原子の超微細構造間隔測定に向けた光学クライオスタッフの開発

小林航, 今村慧, 江上魁, 西坂太志, 高峰愛子, 藤田朋美, 富永大樹, 三條真, 中村祐太郎, 湧井崇志, 古川武, 上野秀樹, 松尾由賀利: 低収量原子核の核構造研究に向けた超流動ヘリウム中原子のレーザー誘起蛍光検出系の高度化

三條真, 今村慧, 高峰愛子, 藤田朋美, 江上魁, 富永大樹, 小林航, 中村祐太郎, 湧井崇志, 古川武, 上野秀樹, 松尾由賀利: 低収量原子核の核構造研究に向けた超流動ヘリウム中原子のレーザー誘起蛍光検出系の高度化

国際会議

● The 6th China-Japan-Korea Joint Seminar on Atomic and Molecular Processes in Plasma (AMPP 2016), Chengdu, China, 26–29 July, 2016

Naoki Numadate, Hirofumi Shimaya, Takuya Ishida, Kunihiro Okada, Nobuyuki Nakamura, and Hajime Tanuma: Observation of forbidden transitions from highly charged ions in a Kingdon trap (oral)

Hajime Tanuma, Naoki Numadate, Yoshiyuki Uchikura, Kento Shimada, Takuto Akutsu, Elaine Long, and Gerry O'Sullivan: Charge exchange spectroscopy for multiply charged ions of high Z elements (oral)

- 18th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions (HCI 2016), Kielce, Poland, 11–16 September, 2016

Naoki Numadate, Hirofumi Shimaya, Takuya Ishida, Kunihiro Okada, Nobuyuki Nakamura, and Hajime Tanuma: Solar wind charge exchange in laboratory - Observation of forbidden x-ray transitions (poster)

Hajime Tanuma, Naoki Numadate, Yoshiyuki Uchikura, Kento Shimada, Takuto Akutsu, Elaine Long, and Gerry O'Sullivan: EUV emission spectra in collisions of highly charged tantalum ions with nitrogen and oxygen molecules (poster)

- ISCA Ireland–Japan Collaboration Workshop , Dublin, Ireland, 3–4 November, 2016

Hajime Tanuma: Charge exchange spectroscopy of high Z element ions in the EUV region (invited)

- International Symposium on Ion Mobility Spectrometry and Mass Spectrometry, Moscow, Russia, 2016

Hajime Tanuma: Mobility and collision dynamics of atomic and small molecular ions in cooled helium gas at 4.3 K (invited)

Hajime Tanuma: Model potentials in the MOBCAL calculation for polyatomic ions in atmospheric air (invited)

- IAEA Technical Meeting on Uncertainty Assessment and Benchmark Experiments for Atomic and Molecular Data for Fusion Applications, Vienna, Austria, 19–21 December, 2016

Hajime Tanuma: Atomic and molecular data provided by multiply charged ion beam collision experiments at low energies (invited)

- 18th International Symposium on Small Particles and Inorganic Clusters (ISSPIC XVIII), Jyvskyl, Finland, 14–19 August, 2016

Naoko Kono, Takeshi Furukawa, Jun Matsumoto, Hajime Tanuma, Toshiyuki Azuma, Klavs Hansen, Haruo Shiromaru: Radiative cooling processes of vibrationally hot C₄- and C₆- stored in an electrostatic ion storage ring (poster)

- The Workshop “From Ultrafast to Ultraslow Dynamics in Molecules and Clusters”, Weizmann Institute of Science, Israel, 23–25 January, 2017

Naoko Kono, Takeshi Furukawa, Jun Matsumoto, Hajime Tanuma, Toshiyuki Azuma, Klavs Hansen, Haruo Shiromaru: Radiative cooling of carbon cluster anions below the threshold for electronic cooling (poster)

宇宙物理実験研究室

1. 研究活動の概要

「ひとみ」衛星 (ASTRO-H) は 2016 年 2 月の打ち上げ後、約 1 ヶ月で観測できない状態になったが、この間に得られたデータの解析や論文作成を進めた。また X 線代替機の計画が立ち上がり、本グループもその検討に参加した。一方、銀河間物質探査を目指す Super DIOS や、惑星探査を目指す将来の X 線ミッションのために、TES マイクロカロリメータや MEMS 技術による X 線望遠鏡の開発を進めた。

1) 「ひとみ」による X 線観測研究

「ひとみ」は姿勢異常となるまでの約 1 ヶ月の間に 6 つの X 線天体を観測した。世界初となる SXS 検出器 (マイクロカロリメータ、その真空断熱容器を図 1 に示す) は、冷却系も含めてこの間順調に動作し、軌道上でエネルギー分解能 4.9 eV (FWHM at 5.9 keV) を達成した。これは従来の CCD 検出器を 25 倍ほど上回る分解能であり、X 線天体におけるさまざまな過程で発生する輝線や吸収線を高い精度で分離観測することができる。また線スペクトルに関するガスの運動を、数 10 km s^{-1} という精度でドップラーパルス光することができ、ガスダイナミクスを通じて宇宙の高エネルギー過程を明らかにするという、X 線天文学の新しい手段を可能にするという意味を持つ。「ひとみ」は特にペルセウス座銀河団を 300 ksec 以上観測し、銀河団の高温プラズマについて新たな制限を与えた。

第一の成果が銀河団中心部における乱流の制限である。図 2 に示すように、鉄の He-like イオンの K 輝線を、共鳴線、禁制線、inter-combination 線などに分離することができた。各輝線は SXS のエネルギー分解能よりも明らかに広がっていて、その幅 (視線速度幅のガウシアンの 1σ 、誤差は 90% 信頼度) は $164 \pm 10 \text{ km s}^{-1}$ となった。乱流の圧力は高温ガスの熱力学的圧力の 4% にすぎない。ペルセウス座銀河団の中心には活動銀河 NGC 1275 が作った電波ロープが高温ガスを押しのけていることがわかっているのだが、本結果は、活動銀河の出すジェットの力学的エネルギーがそのまま乱流を通じてガスの加熱へ伝わるという単純な描像ではないことを示すものである。一方で、ガスは静水圧平衡に近いことが確認され、従来推定されていた銀河団のダークマターの質量には大きな間違いがなさそうであることも示された。本結果は、2016 年 7 月に Nature 誌に発表され、「ひとみ」に参加した多くの機関で記者発表も行われた。

第二の成果が 3.5 keV 付近の輝線構造の制限である。ペルセウス座銀河団をはじめとして、主に XMM-Newton 衛星によって得られた銀河・銀河団のエネルギースペクトル中に、 3.5 keV 付近に弱い輝線構造が残ることが報告されていた。その原因としてステライルニュートリノの崩壊に伴う輝線が一つの可能性として議論されていた。ペルセウス座銀河団は特に強い 3.5 keV 輝線が報告されていたため、「ひとみ」SXS による観測からの制限は重要である。SXS の観測結果は 3.5 keV に明確な輝線構造は見えないというものであり、XMM-Newton の結果を 3σ の信頼度で棄却するものである。ただし、他の多くの銀河団を重ね合わせたデータに対して報告されている 3.5 keV 輝線強度は、さらに $1/30$ という弱いものなので、これを否定するまでの結果には至っていない。本結果は 2017 年 3 月に Astrophysical Journal Letters に報告された。

「ひとみ」の観測結果は、活動銀河 NGC 1275、超新星残骸 N132D, G21.5-0.9, カニ星雲などについて得られており、今後約 10 編の論文を出せると見込まれている。データは 2017 年 10 月 1 日に公開される予定であるが、「ひとみ」チームとしてそれ以前に多くの論文を仕上げるために、論文ごとにチームを組んで解析や執筆を続けている。首都大グループ (大橋) はプロジェクトサイエンティストとしてサイエンス会議 (2016 年 5 月、2017 年 2 月) を主催し、論文製作へ向けたとりまとめ作業を行っている。

また、軌道上データを用いた SXS および X 線望遠鏡 SXT のキャリブレーションにも力を注いだ。ペルセウス座銀河団は、観測中に SXS の温度が平衡に達する途中であったほか、ゲートバルブが開いておらず約 $300\text{ }\mu\text{m}$ 厚のベリリウム窓を通した観測であったため、35 ピクセルのエネルギーースケールと、エネルギー全体にわたっての有効面積を決め、正確な応答関数を確定させるために多くの作業を行った。

2) X 線代替機へ向けた検討

「ひとみ」が早期に X 線観測を断念するに至ったという状況を受けて、JAXA と NASA を中心に SXS のサイエンスを早期に復活させるための新たな衛星 (XARM: X-ray Astronomy Recovery Mission) が検討され提案された。XARM としてはマイクロカロリメータ SXS (その後 Resolve と名称変更) および CCD 検出器 SXI の 2 つを中心とし、硬 X 線検出器と軟ガンマ線検出器は搭載しない方針となっている。首都大グループは Resolve の技術的な検討を中心となって進め、2017 年度のミッション開始へ向けたレビューの準備を行った。XARM の搭載機器は「ひとみ」から最小限の変更とし、衛星計画を進める体制もプロジェクトマネージャーと PI とを別にするなど、これまでと違った形で検討を進めている。

3) 太陽系 X 線の観測的研究

太陽系は我々に最も近い天体であり、探査衛星の「その場」観測と X 線天文衛星を合わせることで、宇宙に普遍的な物理素過程の発見や研究が期待できる領域である。本研究室では、日本の「すざく」衛星を用いた太陽系からの X 線研究を牽引してきた。

我々は「すざく」の全データセット (2007-2015 年、約 3100 個) の系統解析を行い、地球の超高層大気である外圏と太陽風の衝突に伴う電荷交換反応 X 線による発光イベントの初めての系統探査を行い、約 90 イベントを発見した。地球周回の X 線天文衛星の全観測の前景放射となるため重要である上、希薄な外圏を探るプローブとなる。現在、背景 X 線放射への寄与と、視線方向依存性に着目し、論文としてまとめている最中である。その他にも、「すざく」を用いた木星放射線帯からの広がった X 線放射の研究も進めた。

一連の研究成果を元に、将来衛星計画も主導しており、地球周辺の X 線を用いた地球磁気圏 X 線可視化計画 GEO-X の検討を進めている。超小型衛星を月付近に投入し、磁気圏外から世界で初めて地球周辺 X 線の撮像を目指す。今年度は、JAXA 宇宙研にリサーチグループを惑星研究者と共に結成し、衛星の基礎検討を進めている。

4) TES カロリメータの開発

JAXA 宇宙研や産総研との共同で 数 100 素子からなるアレイ型 TES (Transition Edge Sensor) カロリメータの開発を進めている。積層配線という独自の方法で、1 cm 四角の中に 400 素子を配置できるよう Si 基板の厚さ方向へ 2 層の配線を作り込んでいる。超伝導転移特性の良し悪しが、表面粗さに関係していることから、1 nm ほどの精度で表面をスムーズに保つような素子製作を行い、転移についてはほぼ見通しが得られた。これと並行して、K 中間子の質量を精度よく決めるために、TES カロリメータで K 中間子原子の特性 X 線のエネルギーを正確に求める実験を、理研、NIST などと共同で進めている。NIST 製の断熱消磁冷凍機と TES カロリメータを導入し、J-PARC で予備実験を行い、ビーム環境下でも TES として十分よいエネルギー分解能 (約 5 eV) が出ることを確認した。

5) 次世代の超軽量 X 線望遠鏡の開発

我々は宇宙 X 線望遠鏡を次世代に進めるべく、Si 基板の微細加工を用いた独自の光学系の開発を推進している。JAXA 宇宙研、産総研、東北大らと共同であり、ほぼインハウスで設計・製作する。我々の手法は薄い 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する。

我々は光学系の角度分解能の改善に向けて、製作と測定の改善を行った。製作では、微細穴を開けるドライエッティングのプロセスの条件出しを進め、 $100 \mu\text{m}$ スケールでの表面粗さ 15 nm rms を達成した。アニールにより平滑化した鏡に X 線を照射した所、Point Spread Function のコアは 5 分角とまづまづであったが、20 分角程度に Lorentzian 状に広がる成分が見られ、X 線散乱のためと考えられる。目標とする 15 秒角に向けて、表面粗さのさらなる改善が必要である。

そこで側壁の表面粗さの改善に向けて、10 hr の長時間アニールを行い、時間に対する表面粗さの改善率から Si の拡散長を推定し、必要なアニール時間を見積もった所、50-100 hr が必要と分かった。

同時に、天体からの平行 X 線を集光結像するための高温プレス変形の条件出しも行い、新たに表面形状の理想球面からのずれから、鏡の配置精度すなわち角度分解能への寄与を推定する手法を確立し、改善への目処を付けた。

本方式は直径 4 inch でもわずか数 g と超軽量なため、超小型衛星にうってつけである。そこで首都大航空宇宙と共同で、活動銀河中心核を長期間 (~ 1.5 年) 観測し、バイナリブラックホールの兆候を見つけるための ORBIS 計画へ、本望遠鏡を搭載する。今年度は、Wolter I 型望遠鏡の振動試験を行い、環境に耐えることを実証した。文科省の予算を獲得し衛星開発中であり、2020 年頃の打ち上げを目指し、JAXA の相乗り衛星の申請も行った。

6) DIOS の検討

宇宙のバリオン全体の約半分が未検出でダークバリオンと呼ばれる。それを酸素の輝線 (O_{VII}, O_{VIII}) で検出するために、DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) を 2022 年ごろの打ち上げを目指して検討してきた。この時期に XARM が実施され、その 5-6 年後に大型計画 Athena が予定されていることを踏まえて、DIOS は 2030 年ごろの打ち上げを目指して、X 線望遠鏡の角分解能と TES カロリメータの素子数を増強した Super DIOS という新たな計画として検討することとした。本年度は、これまでの検討の母体となってきた DIOS WG を一旦終了させることとし、宇宙研の理学委員会へ終了の報告を行った。なお、DIOS は 2017 年 3 月に公表された日本学術会議のマスタープランに採択されており、ダークバリオン探査の重要性が広く認識されていることの現れである。

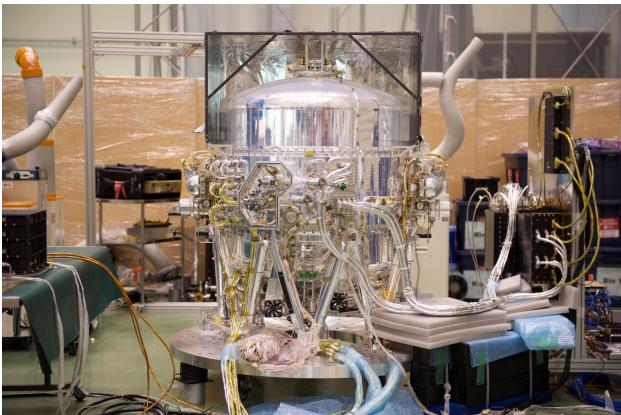


図 1: 「ひとみ」の SXS 検出器を収めた真空断熱容器で、高さは約 1.3 m、総重量約 300 kg、上部が X 線入射窓。液体ヘリウムの排気系は首都大の担当であり、軌道上で正常に動作した。

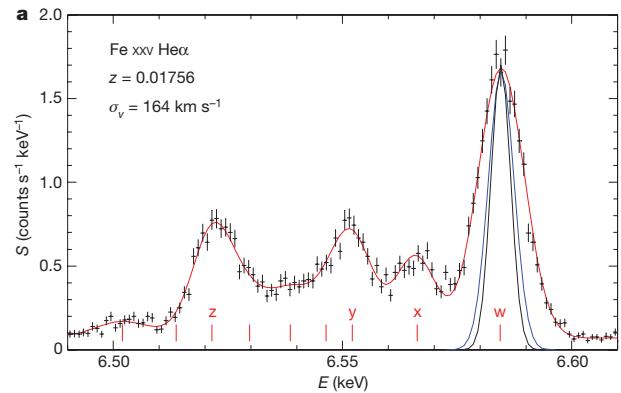


図 2: 「ひとみ」が観測したペルセウス座銀河団からの鉄輝線のエネルギースペクトル。共鳴線 W には、エネルギー分解能の幅 (黒)、プラズマの熱運動による幅 (青) が合わせて示されている。(Nature 535, 117 に発表)

2. 研究業績

1) 論文

Uehara, Sho; Kawahara, Hajime; Masuda, Kento; Yamada, Shin'ya; Aizawa, Masataka: Transiting Planet Candidates Beyond the Snow Line Detected by Visual Inspection of 7557 Kepler Objects of Interest, *The Astrophysical Journal*, **822**, Issue 1, article id. 2, 11 pp., DOI: 10.3847/0004-637X/822/1/2 (2016)

Zhang, Zhongli; Sakurai, Soki; Makishima, Kazuo; Nakazawa, Kazuhiro; Ono, Ko; Yamada, Shin'ya; Xu, Haiguang: Suzaku Observation of the High-inclination Binary EXO 0748-676 in the Hard State, *The Astrophysical Journal*, **823**, Issue 2, article id. 131, 10 pp., DOI: 10.3847/0004-637X/823/2/131 (2016)

Uchida, Yuusuke; Simionescu, Aurora; Takahashi, Tadayuki; Werner, Norbert; Ichinohe, Yuto; Allen, Steven W.; Urban, Ondrej; Matsushita, Kyoko: Suzaku observations of a shock front tracing the western edge of the giant radio halo in the Coma Cluster, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **68**, Issue SP1, id.S20 10 pp., DOI: 10.1093/pasj/psv126 (2016)

Miyake, Katsuma; Noda, Hirofumi; Yamada, Shin'ya; Makishima, Kazuo; Nakazawa, Kazuhiro: The new primary X-ray component confirmed in the Seyfert I galaxy IC 4329A, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **68**, Issue SP1, id.S28 12 pp., DOI: 10.1093/pasj/psw025 (2016)

Noda, Hirofumi; Minezaki, Takeo; Watanabe, Makoto; Kokubo, Mitsuru; Kawaguchi, Kenji; Itoh, Ryosuke; Morihana, Kumiko; Saito, Yoshihiko; Nakao, Hikaru; Imai, Masataka; Moritani, Yuki; Takaki, Katsutoshi; Kawabata, Miho; Nakaoka, Tatsuya; Uemura, Makoto; Kawabata, Koji; Yoshida, Michitoshi; Arai, Akira; Takagi, Yuhei; Morokuma, Tomoki; Doi, Mamoru; Itoh, Yoichi; Yamada, Shin'ya; Nakazawa, Kazuhiro; Fukazawa, Yasushi; Makishima, Kazuo: X-Ray and Optical Correlation of Type I Seyfert NGC 3516 Studied with Suzaku and Japanese Ground-based Telescopes, *The Astrophysical Journal*, **828**, Issue 2, article id. 78, 15 pp., DOI: 10.3847/0004-637X/828/2/78 (2016)

Hitomi Collaboration; Aharonian, Felix; Akamatsu, Hiroki; Akimoto, Fumie; Allen, Steven W.; Anabuki, Naohisa; Angelini, Lorella; Arnaud, Keith; Audard, Marc; Awaki, Hisamitsu; Axelsson, Magnus; Bamba, Aya; Bautz, Marshall; Blandford, Roger; Brenneman, Laura; Brown, Gregory V.; Bulbul, Esra; Cackett, Edward; Chernyakova, Maria; Chiao, Meng; Coppi, Paolo; Costantini, Elisa; de Plaa, Jelle; den Herder, Jan-Willem; Done, Chris; Dotani, Tadayasu; Ebisawa, Ken; Eckart, Megan; Enoto, Teruaki; Ezoe, Yuichiro; Fabian, Andrew C.; Ferrigno, Carlo; Foster, Adam; Fujimoto, Ryuichi; Fukazawa, Yasushi; Furuzawa, Akihiro; Galeazzi, Massimiliano; Gallo, Luigi; Gandhi, Poshak; Giustini, Margherita; Goldwurm, Andrea; Gu, Liyi; Guainazzi, Matteo; Haba, Yoshito; Hagino, Kouichi; Hamaguchi, Kenji; Harrus, Ilana; Hatsukade, Isamu; Hayashi, Katsuhiro; Hayashi, Takayuki; Hayashida, Kiyoshi; Hiraga, Junko; Hornschemeier, Ann; Hoshino, Akio; Hughes, John; Iizuka, Ryo; Inoue, Hajime; Inoue, Yoshiyuki; Ishibashi, Kazunori; Ishida, Manabu; Ishikawa, Kumi; Ishisaki, Yoshitaka; Itoh, Masayuki; Iyomoto, Naoko; Kaastra, Jelle; Kallman, Timothy; Kamae, Tuneyoshi; Kara, Erin; Kataoka, Jun; Katsuda, Satoru; Katsuta, Junichiro; Kawaharada, Madoka; Kawai, Nobuyuki; Kelley, Richard; Khangulyan, Dmitry; Kilbourne, Caroline; King, Ashley; Kitaguchi, Takao; Kitamoto, Shunji; Kitayama, Tetsu; Kohmura, Takayoshi; Kokubun, Mo-

tohide; Koyama, Shu; Koyama, Katsuji; Kretschmar, Peter; Krimm, Hans; Kubota, Aya; Kunieda, Hideyo; Laurent, Philippe; Lebrun, Franois; Lee, Shiu-Hang; Leutenegger, Maurice; Limousin, Olivier; Loewenstein, Michael; Long, Knox S.; Lumb, David; Madejski, Grzegorz; Maeda, Yoshitomo; Maier, Daniel; Makishima, Kazuo; Markevitch, Maxim; Matsumoto, Hironori; Matsushita, Kyoko; McCammon, Dan; McNamara, Brian; Mehdiour, Missagh; Miller, Eric; Miller, Jon; Mineshige, Shin; Mitsuda, Kazuhisa; Mitsuishi, Ikuyuki; Miyazawa, Takuya; Mizuno, Tsunefumi; Mori, Hideyuki; Mori, Koji; Moseley, Harvey; Mukai, Koji; Murakami, Hiroshi; Murakami, Toshio; Mushotzky, Richard; Nagino, Ryo; Nakagawa, Takao; Nakajima, Hiroshi; Nakamori, Takeshi; Nakano, Toshio; Nakashima, Shinya; Nakazawa, Kazuhiro; Nobukawa, Masayoshi; Noda, Hirofumi; Nomachi, Masaharu; O'Dell, Steve; Odaka, Hirokazu; Ohashi, Takaya; Ohno, Masanori; Okajima, Takashi; Ota, Naomi; Ozaki, Masanobu; Paerels, Frits; Paltani, Stephane; Parmar, Arvind; Petre, Robert; Pinto, Ciro; Pohl, Martin; Porter, F. Scott; Pottschmidt, Katja; Ramsey, Brian; Reynolds, Christopher; Russell, Helen; Safi-Harb, Samar; Saito, Shinya; Sakai, Kazuhiro; Sameshima, Hiroaki; Sato, Goro; Sato, Kosuke; Sato, Rie; Sawada, Makoto; Schartel, Norbert; Serlemitsos, Peter; Seta, Hiromi; Shidatsu, Megumi; Simionescu, Aurora; Smith, Randall; Soong, Yang; Stawarz, Lukasz; Sugawara, Yasuharu; Sugita, Satoshi; Szymkowiak, Andrew; Tajima, Hiroyasu; Takahashi, Hiromitsu; Takahashi, Tadayuki; Takeda, Shin'Ichiro; Takei, Yoh; Tamagawa, Toru; Tamura, Keisuke; Tamura, Takayuki; Tanaka, Takaaki; Tanaka, Yasuo; Tanaka, Yasuyuki; Tashiro, Makoto; Tawara, Yuzuru; Terada, Yukikatsu; Terashima, Yuichi; Tombesi, Francesco; Tomida, Hiroshi; Tsuboi, Yohko; Tsujimoto, Masahiro; Tsunemi, Hiroshi; Tsuru, Takeshi; Uchida, Hiroyuki; Uchiyama, Hideki; Uchiyama, Yasunobu; Ueda, Shutaro; Ueda, Yoshihiro; Ueno, Shiro; Uno, Shin'Ichiro; Urry, Meg; Ursino, Eugenio; de Vries, Cor; Watanabe, Shin; Werner, Norbert; Wik, Daniel; Wilkins, Dan; Williams, Brian; Yamada, Shinya; Yamaguchi, Hiroya; Yamaoka, Kazutaka; Yamasaki, Noriko Y.; Yamauchi, Makoto; Yamauchi, Shigeo; Yaqoob, Tahir; Yatsu, Yoichi; Yonetoku, Daisuke; Yoshida, Atsumasa; Yuasa, Takayuki; Zhuravleva, Irina; Zoghbi, Abderahmen: The quiescent intracluster medium in the core of the Perseus cluster, *Nature*, **535**, Issue 7610, pp. 117-121, DOI: 10.1038/nature18627 (2016)

Sato, Toshiki; Iizuka, Ryo; Ishida, Manabu; Kikuchi, Naomichi; Maeda, Yoshitomo; Kurashima, Sho; Nakaniwa, Nozomi; Tomikawa, Kazuki; Hayashi, Takayuki; Mori, Hideyuki; Okajima, Takashi; Serlemitsos, Peter J.; Soong, Yang; Izumiya, Takanori; Minami, Sari: Examining the angular resolution of the ASTRO-H's soft x-ray telescopes, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, **2**, id. 044001, DOI: 10.1117/1.JATIS.2.4.044001 (2016)

Miyazaki, Naoto; Yamada, Shin'ya; Enoto, Teruaki; Axelsson, Magnus; Ohashi, Takaya: Matched-filtering line search methods applied to Suzaku data, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **68**, Issue 6, id.100 10 pp., DOI: 10.1093/pasj/psw091 (2016)

HEATES Collaboration S. Okada D. A. Bennett C. Curceanu W. B. Doriese J. W. Fowler J. D. Gard F. P. Gustafsson T. Hashimoto R. S. Hayano S. Hirenzaki J. P. Hays-Wehle G. C. Hilton N. Ikeno M. Iliescu S. Ishimoto K. Itahashi M. Iwasaki T. Koike K. Kuwabara Y. Ma J. Marton H. Noda G. C. O'Neil H. Outa C. D. Reintsema M. Sato D. R. Schmidt H. Shi K. Suzuki T. Suzuki D. S. Swetz H. Tatsuno J. Uhlig J. N. Ullom E. Widmann S. Yamada J. Yamagata-Sekihara J. Zmeskal: First application of superconducting transition-edge sensor microcalorimeters to hadronic atom X-ray

HEATES Collaboration, T. Hashimoto S. Okada D. A. Bennett C. Curceanu W. B. Doriese J. W. Fowler J. D. Gard F. P. Gustafsson R. S. Hayano S. Hirenzaki J. P. Hays-Wehle G. C. Hilton N. Ikeno M. Iliescu S. Ishimoto K. Itahashi M. Iwasaki T. Koike K. Kuwabara Y. Ma J. Marton H. Noda G. C. O'Neil H. Outa C. D. Reintsema M. Sato D. R. Schmidt H. Shi K. Suzuki T. Suzuki D. S. Swetz H. Tatsuno J. Uhlig J. N. Ullom E. Widmann S. Yamada J. Yamagata-Sekihara J. Zmeskal: Beam-line Test of a Transition-Edge-Sensor Spectrometer in Preparation for Kaonic-Atom Measurements, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Volume 27 Issue 4, doi 10.1109/TASC.2016.2646374 (2016)

M. Numazawa, Y. Ezoe, K. Ishikawa, T. Ogawa, M. Sato, K. Nakamura, K. Takeuchi, M. Terada, T. Ohashi, K. Mitsuda, R. Kelley, and K. Murata: First demonstration of X-ray mirrors using focused ion beam, J. Journal of Applied Physics, 55, 06GP11 (2016)

Sato, Toshiki; Maeda, Yoshitomo; Bamba, Aya; Katsuda, Satoru; Ohira, Yutaka; Yamazaki, Ryo; Masai, Kuniaki; Matsumoto, Hironori; Sawada, Makoto; Terada, Yukikatsu; Hughes, John P.; Ishida, Manabu: Multi-year X-Ray Variations of Iron-K and Continuum Emissions in the Young Supernova Remnant Cassiopeia A, *The Astrophysical Journal*, **836**, Issue 2, article id. 225, 10 pp., DOI: 10.3847/1538-4357/836/2/225 (2017)

Aharonian, F. A.; Akamatsu, H.; Akimoto, F.; Allen, S. W.; Angelini, L.; Arnaud, K. A.; Audard, M.; Awaki, H.; Axelsson, M.; Bamba, A.; Bautz, M. W.; Blandford, R. D.; Bulbul, E.; Brenneman, L. W.; Brown, G. V.; Cackett, E. M.; Chernyakova, M.; Chiao, M. P.; Coppi, P.; Costantini, E.; de Plaa, J.; den Herder, J.-W.; Done, C.; Dotani, T.; Ebisawa, K.; Eckart, M. E.; Enoto, T.; Ezoe, Y.; Fabian, A. C.; Ferrigno, C.; Foster, A. R.; Fujimoto, R.; Fukazawa, Y.; Furuzawa, A.; Galeazzi, M.; Gallo, L. C.; Gandhi, P.; Giustini, M.; Goldwurm, A.; Gu, L.; Guainazzi, M.; Haba, Y.; Hagino, K.; Hamaguchi, K.; Harrus, I.; Hatsukade, I.; Hayashi, K.; Hayashi, T.; Hayashida, K.; Hiraga, J.; Hornschemeier, A. E.; Hoshino, A.; Hughes, J. P.; Ichinohe, Y.; Iizuka, R.; Inoue, H.; Inoue, S.; Inoue, Y.; Ishibashi, K.; Ishida, M.; Ishikawa, K.; Ishisaki, Y.; Itoh, M.; Iwai, M.; Iyomoto, N.; Kaastra, J. S.; Kallman, T.; Kamae, T.; Kara, E.; Kataoka, J.; Katsuda, S.; Katsuta, J.; Kawaharada, M.; Kawai, N.; Kelley, R. L.; Khangulyan, D.; Kilbourne, C. A.; King, A. L.; Kitaguchi, T.; Kitamoto, S.; Kitayama, T.; Kohmura, T.; Kokubun, M.; Koyama, S.; Koyama, K.; Kretschmar, P.; Krimm, H. A.; Kubota, A.; Kunieda, H.; Laurent, P.; Lebrun, F.; Lee, S.-H.; Leutenegger, M. A.; Limousin, O.; Loewenstein, M.; Long, K. S.; Lumb, D. H.; Madejski, G. M.; Maeda, Y.; Maier, D.; Makishima, K.; Markevitch, M.; Matsumoto, H.; Matsushita, K.; McCammon, D.; McNamara, B. R.; Mehdipour, M.; Miller, E. D.; Miller, J. M.; Mineshige, S.; Mitsuda, K.; Mitsuishi, I.; Miyazawa, T.; Mizuno, T.; Mori, H.; Mori, K.; Moseley, H.; Mukai, K.; Murakami, H.; Murakami, T.; Mushotzky, R. F.; Nakagawa, T.; Nakajima, H.; Nakamori, T.; Nakano, T.; Nakashima, S.; Nakazawa, K.; Nobukawa, K.; Nobukawa, M.; Noda, H.; Nomachi, M.; O'Dell, S. L.; Odaka, H.; Ohashi, T.; Ohno, M.; Okajima, T.; Ota, N.; Ozaki, M.; Paerels, F.; Paltani, S.; Parmar, A.; Petre, R.; Pinto, C.; Pohl, M.; Porter, F. S.; Pottschmidt, K.; Ramsey, B. D.; Reynolds, C. S.; Russell, H. R.; Safi-Harb, S.; Saito, S.; Sakai, K.; Sameshima, H.; Sasaki, T.; Sato, G.; Sato, K.; Sato, R.; Sawada, M.; Schartel, N.; Serlemitsos, P. J.; Seta, H.; Shidatsu, M.; Simionescu, A.; Smith, R. K.; Soong, Y.; Stawarz, L.; Sugawara, Y.; Sugita,

S.; Szymkowiak, A. E.; Tajima, H.; Takahashi, H.; Takahashi, T.; Takeda, S.; Takei, Y.; Tamagawa, T.; Tamura, K.; Tamura, T.; Tanaka, T.; Tanaka, Yasuo; Tanaka, Yasuyuki; Tashiro, M.; Tawara, Y.; Terada, Y.; Terashima, Y.; Tombesi, F.; Tomida, H.; Tsuboi, Y.; Tsujimoto, M.; Tsunemi, H.; Tsuru, T.; Uchida, H.; Uchiyama, H.; Uchiyama, Y.; Ueda, S.; Ueda, Y.; Ueno, S.; Uno, S.; Urry, C. M.; Ursino, E.; de Vries, C. P.; Watanabe, S.; Werner, N.; Wik, D. R.; Wilkins, D. R.; Williams, B. J.; Yamada, S.; Yamaguchi, H.; Yamaoka, K.; Yamasaki, N. Y.; Yamauchi, M.; Yamauchi, S.; Yaqoob, T.; Yatsu, Y.; Yonetoku, D.; Yoshida, A.; Zhuravleva, I.; Zoghbi, A.; Hitomi Collaboration: Hitomi Constraints on the 3.5 keV Line in the Perseus Galaxy Cluster, *The Astrophysical Journal Letters*, **837**, Issue 1, article id. L15, 9 pp., DOI: 10.3847/2041-8213/aa61fa (2017)

T. Ogawa, Y. Ezoe, T. Kakiuchi, M. Numazawa, M. Sato, K. Nakamura, K. Takeuchi, M. Terada, T. Ohashi, I. Mitsuishi, K. Ishikawa, K. Mitsuda, K. Morishita, and K. Nakajima: First X-ray imaging with a micromachined Wolter type-I telescope, *Microsys. Tech.*, 23, 1101-1116 (2017)

2) 国際会議報告

Takei, Yoh; Yasuda, Susumu; Ishimura, Kosei; Iwata, Naoko; Okamoto, Atsushi; Sato, Yoichi; Ogawa, Mina; Sawada, Makoto; Kawano, Taro; Obara, Shingo; Natsukari, Chikara; Wada, Atsushi; Yamada, Shinya; Fujimoto, Ryuichi; Kokubun, Motohide; Yamasaki, Noriko Y.; Sugita, Hiroyuki; Minesugi, Kenji; Nakamura, Yasuo; Mitsuda, Kazuhisa; Takahashi, Tadayuki; Yoshida, Seiji; Tsunematsu, Shoji; Kanao, Kenichi; Narasaki, Katsuhiro; Otsuka, Kiyomi; Kelley, Richard L.; Porter, F. S.; Kilbourne, Caroline A.; Chiao, Meng P.; Eckart, Megan E.; Sneiderman, Gary A.; Pontius, James T.; McCammon, Dan; Wilke, Paul; Basile, John: Vibration isolation system for cryocoolers of Soft X-ray Spectrometer (SXS) onboard ASTRO-H (Hitomi), *Proceedings of the SPIE*, **9905**, id. 99050X 12 pp., DOI: 10.1117/12.2231832 (2016)

Sneiderman, Gary A.; Shirron, Peter J.; Fujimoto, Ryuichi; Bialas, Thomas G.; Boyce, Kevin R.; Chiao, Meng P.; DiPirro, Michael J.; Eckart, Megan E.; Hartz, Leslie; Ishisaki, Yoshitaka; Kelley, Richard L.; Kilbourne, Caroline A.; Masters, Candace; McCammon, Dan; Mitsuda, Kazuhisa; Noda, Hirofumi; Porter, Frederick S.; Szymkowiak, Andrew E.; Takei, Yoh; Tsujimoto, Masahiro; Yoshida, Seiji: Cryogen-free operation of the Soft X-ray Spectrometer instrument *Proceedings of the SPIE*, **9905**, id. 99053N 17 pp., DOI: 10.1117/12.2232045 (2016)

Porter, Frederick S.; Boyce, Kevin R.; Chiao, Meng P.; Eckart, Megan E.; Fujimoto, Ryuichi; Ishisaki, Yoshitaka; Kelley, Richard L.; Kilbourne, Caroline A.; Leutenegger, Maurice A.; McCammon, Dan; Mitsuda, Kazuhisa; Sato, Kosuke; Seta, Hiromi; Sawada, Makoto; Sneiderman, Gary A.; Szymkowiak, Andrew E.; Takei, Yoh; Tashiro, Makoto S.; Tsujimoto, Masahiro; Watanabe, Tomomi; Yamada, Shinya: In-flight performance of the Soft X-ray Spectrometer detector system on Astro-H, *Proceedings of the SPIE*, **9905**, id. 99050W 14 pp., DOI: 10.1117/12.2232799 (2016)

Ezoe, Yuichiro; Ishikawa, Kumi; Mitsuishi, Ikuyuki; Ohashi, Takaya; Mitsuda, Kazuhisa; Fujimoto, Ryuichi; Murakami, Masahide; Kanao, Kenichi; Yoshida, Seiji; Tsunematsu, Shoji; DiPirro, Michael; Shirron, Peter: Porous plug phase separator and superfluid film flow suppression system for the soft x-ray spectrometer onboard ASTRO-H, *Proceedings of the SPIE*, **9905**, id. 99053P 10 pp., DOI: 10.1117/12.2231968 (2016)

Ishisaki, Yoshitaka; Yamada, Shinya; Seta, Hiromi; Tashiro, Makoto S.; Takeda, Sawako; Terada, Yukikatsu; Kato, Yuka; Tsujimoto, Masahiro; Koyama, Shu; MItsuda, Kazuhisa; Sawada, Makoto; Boyce, Kevin R.; Chiao, Meng P.; Watanabe, Tomomi; Leutenegger, Maurice A.; Eckart, Megan E.; Porter, F. Scott; Kilbourne, Caroline A.; Kelley, Richard L.: In-flight performance of pulse processing system of the ASTRO-H soft x-ray spectrometer, *Proceedings of the SPIE*, **9905**, id. 99053T 11 pp., DOI: 10.1117/12.2234222 (2016)

Leutenegger, Maurice A.; Audard, Marc; Boyce, Kevin R.; Brown, Gregory V.; Chiao, Meng P.; Eckart, Megan E.; Fujimoto, Ryuichi; Furuzawa, Akihiro; Guainazzi, Matteo; Haas, Daniel; den Herder, Jan-Willem; Hayashi, Takayuki; Iizuka, Ryo; Ishida, Manabu; Ishisaki, Yoshitaka; Kelley, Richard L.; Kikuchi, Naomichi; Kilbourne, Caroline A.; Koyama, Shu; Kurashima, Sho; Maeda, Yoshitomo; Markevitch, Maxim; McCammon, Dan; Mitsuda, Kazuhisa; Mori, Hideyuki; Nakaniwa, Nozomi; Okajima, Takashi; Paltani, Stphane; Petre, Robert; Porter, F. Scott; Sato, Kosuke; Sato, Toshiki; Sawada, Makoto; Serlemitos, Peter J.; Seta, Hiromi; Sneiderman, Gary; Soong, Yang; Sugita, Satoshi; Szymkowiak, Andrew E.; Takei, Yoh; Tashiro, Makoto; Tawara, Yuzuru; Tsujimoto, Masahiro; de Vries, Cor P.; Watanabe, Tomomi; Yamada, Shinya; Yamasaki, Noriko: In-flight verification of the calibration and performance of the ASTRO-H (Hitomi) Soft X-Ray Spectrometer, *Proceedings of the SPIE*, **9905**, id. 99053U 12 pp., DOI: 10.1117/12.2234230 (2016)

Eckart, M. E.; Adams, J. S.; Boyce, K. R.; Brown, G. V.; Chiao, M. P.; Fujimoto, R.; Haas, D.; den Herder, J. W.; Ishisaki, Y.; Kelley, R. L.; Kilbourne, C. A.; Leutenegger, M. A.; McCammon, D.; Mitsuda, K.; Porter, F. S.; Sato, K.; Sawada, M.; Seta, H.; Sneiderman, G. A.; Szymkowiak, A. E.; Takei, Y.; Tashiro, M.; Tsujimoto, M.; de Vries, C. P.; Watanabe, T.; Yamada, S.; Yamasaki, N. Y.: Ground calibration of the Astro-H (Hitomi) soft x-ray spectrometer, *Proceedings of the SPIE*, **9905**, id. 99053W 23 pp., DOI: 10.1117/12.2233053 (2016)

Tsujimoto, Masahiro; Mitsuda, Kazuhisa; Kelley, Richard L.; den Herder, Jan-Willem A.; Akamatsu, Hiroki; Bialas, Thomas G.; Boyce, Kevin R.; Brown, Gregory V.; Chiao, Meng P.; Costantini, Elisa; de Vries, Cor P.; DiPirro, Michael J.; Eckart, Megan E.; Ezoe, Yuichiro; Fujimoto, Ryuichi; Haas, Daniel; Hoshino, Akio; Ishikawa, Kumi; Ishisaki, Yoshitaka; Iyomoto, Naoko; Kilbourne, Caroline A.; Kitamoto, Shunji; Koyama, Shu; Leutenegger, Maurice A.; McCammon, Dan; Mitsuishi, Ikuyuki; Murakami, Hiroshi; Murakami, Masahide; Noda, Hirofumi; Ogawa, Mina; Ota, Naomi; Paltani, Stphane; Porter, Frederick S.; Sato, Kosuke; Sato, Yoichi; Sawada, Makoto; Seta, Hiromi; Shinohara, Keisuke; Shirron, Peter J.; Sneiderman, Gary A.; Sugita, Hiroyuki; Szymkowiak, Andrew E.; Takei, Yoh; Tamagawa, Toru; Tashiro, Makoto S.; Terada, Yukikatsu; Yamada, Shinya; Yamasaki, Noriko Y.; Yatsu, Yoichi: In-orbit operation of the ASTRO-H SXS, *Proceedings of the SPIE*, **9905**, id. 99050Y 10 pp., DOI: 10.1117/12.2231784 (2016)

Noda, Hirofumi; Mitsuda, Kazuhisa; Okamoto, Atsushi; Ezoe, Yuichiro; Ishikawa, Kumi; Fujimoto, Ryuichi; Yamasaki, Noriko; Takei, Yoh; Ohashi, Takaya; Ishisaki, Yoshitaka; Mitsuishi, Ikuyuki; Yoshida, Seiji; DiPirro, Michael; Shirron, Peter: Thermal analyses for initial operations of the Soft X-Ray Spectrometer (SXS) onboard ASTRO-H, *Proceedings of the SPIE*, **9905**, id. 99053R 9 pp., DOI: 10.1117/12.2231356 (2016)

Takahashi, Tadayuki; Kokubun, Motohide; Mitsuda, Kazuhisa; Kelley, Richard; Ohashi, Takaya; Aharonian, Felix; Akamatsu, Hiroki; Akimoto, Fumie; Allen, Steve; Anabuki, Naohisa; Angelini, Lorella; Arnaud, Keith; Asai, Makoto; Audard, Marc; Awaki, Hisamitsu; Axelsson, Magnus; Azzarello, Philipp; Baluta, Chris; Bamba, Aya; Bando, Nobutaka; Bautz, Marshall; Bialas, Thomas; Blandford, Roger; Boyce, Kevin; Brenneman, Laura; Brown, Greg; Bulbul, Esra; Cackett, Edward; Canavan, Edgar; Chernyakova, Maria; Chiao, Meng; Coppi, Paolo; Costantini, Elisa; de Plaa, Jelle; den Herder, Jan-Willem; DiPirro, Michael; Done, Chris; Dotani, Tadayasu; Doty, John; Ebisawa, Ken; Eckart, Megan; Enoto, Teruaki; Ezoe, Yuichiro; Fabian, Andrew; Ferrigno, Carlo; Foster, Adam; Fujimoto, Ryuichi; Fukazawa, Yasushi; Furuzawa, Akihiro; Galeazzi, Massimiliano; Gallo, Luigi; Gandhi, Poshak; Gilmore, Kirk; Giustini, Margherita; Goldwurm, Andrea; Gu, Liyi; Guainazzi, Matteo; Haas, Daniel; Haba, Yoshito; Hagino, Kouichi; Hamaguchi, Kenji; Harayama, Atsushi; Harrus, Ilana; Hatsukade, Isamu; Hayashi, Takayuki; Hayashi, Katsuhiro; Hayashida, Kiyoshi; Hiraga, Junko; Hirose, Kazuyuki; Hornschemeier, Ann; Hoshino, Akio; Hughes, John; Ichinohe, Yuto; Iizuka, Ryo; Inoue, Yoshiyuki; Inoue, Hajime; Ishibashi, Kazunori; Ishida, Manabu; Ishikawa, Kumi; Ishimura, Kosei; Ishisaki, Yoshitaka; Itoh, Masayuki; Iwata, Naoko; Iyomoto, Naoko; Jewell, Chris; Kaastra, Jelle; Kallman, Timothy; Kamae, Tuneyoshi; Kara, Erin; Kataoka, Jun; Katsuda, Satoru; Katsuta, Junichiro; Kawaharada, Madoka; Kawai, Nobuyuki; Kawano, Taro; Kawasaki, Shigeo; Khangulyan, Dmitry; Kilbourne, Caroline; Kimball, Mark; King, Ashley; Kitaguchi, Takao; Kitamoto, Shunji; Kitayama, Tetsu; Kohmura, Takayoshi; Kosaka, Tatsuro; Koujelev, Alex; Koyama, Katsuji; Koyama, Shu; Kretschmar, Peter; Krimm, Hans; Kubota, Aya; Kunieda, Hideyo; Laurent, Philippe; Lebrun, Franois; Lee, Shiu-Huang; Leutenegger, Maurice; Limousin, Olivier; Loewenstein, Michael; Long, Knox; Lumb, David; Madejski, Grzegorz; Maeda, Yoshitomo; Maier, Daniel; Makishima, Kazuo; Markevitch, Maxim; Masters, Candace; Matsumoto, Hironori; Matsushita, Kyoko; McCammon, Dan; McGuinness, Daniel; McNamara, Brian; Mehdipour, Missagh; Miko, Joseph; Miller, Jon; Miller, Eric; Mineshige, Shin; Minesugi, Kenji; Mitsuishi, Ikuyuki; Miyazawa, Takuya; Mizuno, Tsunefumi; Mori, Koji; Mori, Hideyuki; Moroso, Franco; Moseley, Harvey; Muench, Theodore; Mukai, Koji; Murakami, Hiroshi; Murakami, Toshio; Mushotzky, Richard; Nagano, Housei; Nagino, Ryo; Nakagawa, Takao; Nakajima, Hiroshi; Nakamori, Takeshi; Nakano, Toshio; Nakashima, Shinya; Nakazawa, Kazuhiro; Namba, Yoshiharu; Natsukari, Chikara; Nishioka, Yusuke; Nobukawa, Masayoshi; Nobukawa, Kumiko; Noda, Hirofumi; Nomachi, Masaharu; O'Dell, Steve; Odaka, Hirokazu; Ogawa, Hiroyuki; Ogawa, Mina; Ogi, Keiji; Ohno, Masanori; Ohta, Masayuki; Okajima, Takashi; Okamoto, Atsushi; Okazaki, Tsuyoshi; Ota, Naomi; Ozaki, Masanobu; Paerels, Frederik; Paltani, Stphane; Parmar, Arvind; Petre, Robert; Pinto, Ciro; Pohl, Martin; Pontius, James; Porter, F. Scott; Pottschmidt, Katja; Ramsey, Brian; Reynolds, Christopher; Russell, Helen; Safi-Harb, Samar; Saito, Shinya; Sakai, Shin-ichiro; Sakai, Kazuhiro; Sameshima, Hiroaki; Sasaki, Toru; Sato, Goro; Sato, Yoichi; Sato, Kosuke; Sato, Rie; Sawada, Makoto; Schartel, Norbert; Serlemitos, Peter; Seta, Hiromi; Shibano, Yasuko; Shida, Maki; Shidatsu, Megumi; Shimada, Takanobu; Shinozaki, Keisuke; Shirron, Peter; Simionescu, Aurora; Simmons, Cynthia; Smith, Randall; Sneiderman, Gary; Soong, Yang; Stawarz, Lukasz; Sugawara, Yasuharu; Sugita, Hiroyuki; Sugita, Satoshi; Szymkowiak, Andrew; Tajima, Hiroyasu; Takahashi, Hiromitsu; Takeda, Shin'ichiro; Takei, Yoh; Tamagawa, Toru; Tamura, Takayuki; Tamura, Keisuke; Tanaka, Takaaki; Tanaka, Yasuo; Tanaka, Yasuyuki; Tashiro, Makoto; Tawara, Yuzuru; Terada, Yukikatsu; Terashima, Yuichi; Tombesi, Francesco; Tomida, Hiroshi; Tsuboi, Yohko; Tsujimoto,

Masahiro; Tsunemi, Hiroshi; Tsuru, Takeshi; Uchida, Hiroyuki; Uchiyama, Yasunobu; Uchiyama, Hideki; Ueda, Yoshihiro; Ueda, Shutaro; Ueno, Shiro; Uno, Shin'ichiro; Urry, Meg; Ursino, Eugenio; de Vries, Cor; Wada, Atsushi; Watanabe, Shin; Watanabe, Tomomi; Werner, Norbert; Wik, Daniel; Wilkins, Dan; Williams, Brian; Yamada, Takahiro; Yamada, Shinya; Yamaguchi, Hiroya; Yamaoka, Kazutaka; Yamasaki, Noriko; Yamauchi, Makoto; Yamauchi, Shigeo; Yaqoob, Tahir; Yatsu, Yoichi; Yonetoku, Daisuke; Yoshida, Atsumasa; Yuasa, Takayuki; Zhuravleva, Irina; Zoghbi, Abderahmen: The ASTRO-H (Hitomi) x-ray astronomy satellite, *Proceedings of the SPIE*, **9905**, id. 99050U 17 pp., DOI: 10.1117/12.2232379 (2016)

Kelley, Richard L.; Akamatsu, Hiroki; Azzarello, Phillip; Bialas, Tom; Boyce, Kevin R.; Brown, Gregory V.; Canavan, Edgar; Chiao, Meng P.; Costantini, Elisa; DiPirro, Michael J.; Eckart, Megan E.; Ezoe, Yuichiro; Fujimoto, Ryuichi; Haas, Daniel; den Herder, Jan-Willem; Hoshino, Akio; Ishikawa, Kumi; Ishisaki, Yoshitaka; Iyomoto, Naoko; Kilbourne, Caroline A.; Kimball, Mark O.; Kitamoto, Shunji; Konami, Saori; Koyama, Shu; Leutenegger, Maurice A.; McCammon, Dan; Mitsuda, Kazuhisa; Mitsuishi, Ikuyuki; Moseley, Harvey; Murakami, Hiroshi; Murakami, Masahide; Noda, Hirofumi; Ogawa, Mina; Ohashi, Takaya; Okamoto, Atsushi; Ota, Naomi; Paltani, Stphane; Porter, F. S.; Sakai, Kazuhiro; Sato, Kosuke; Sato, Yohichi; Sawada, Makoto; Seta, Hiromi; Shinozaki, Keisuke; Shirron, Peter J.; Sneiderman, Gary A.; Sugita, Hiroyuki; Szymkowiak, Andrew E.; Takei, Yoh; Tamagawa, Toru; Tashiro, Makoto; Terada, Yukikatsu; Tsujimoto, Masahiro; de Vries, Cor P.; Yamada, Shinya; Yamasaki, Noriko Y.; Yatsu, Yoichi: The Astro-H high resolution soft x-ray spectrometer, *Proceedings of the SPIE*, **9905**, id. 99050V 17 pp., DOI: 10.1117/12.2232509 (2016)

Ohashi, T.; Ishisaki, Y.; Ezoe, Y.; Yamada, S.; Kuromaru, G.; Suzuki, S.; Tawara, Y.; Mitsuishi, I.; Babazaki, Y.; Mitsuda, K.; Yamasaki, N. Y.; Takei, Y.; Yamamoto, R.; Hayashi, T.; Ota, N.; Kelley, R. L.; Sakai, K.: DIOS: the dark baryon exploring mission, *Proceedings of the SPIE*, **9905**, id. 99051N 10 pp., DOI: 10.1117/12.2232274 (2016)

Fujimoto, Ryuichi; Takei, Yoh; Mitsuda, Kazuhisa; Yamasaki, Noriko Y.; Tsujimoto, Masahiro; Koyama, Shu; Ishikawa, Kumi; Sugita, Hiroyuki; Sato, Yoichi; Shinozaki, Keisuke; Okamoto, Atsushi; Kitamoto, Shunji; Hoshino, Akio; Sato, Kosuke; Ezoe, Yuichiro; Ishisaki, Yoshitaka; Yamada, Shinya; Seta, Hiromi; Ohashi, Takaya; Tamagawa, Toru; Noda, Hirofumi; Sawada, Makoto; Tashiro, Makoto; Yatsu, Yoichi; Mitsuishi, Ikuyuki; Kanao, Kenichi; Yoshida, Seiji; Miyaoka, Mikio; Tsunematsu, Shoji; Otsuka, Kiyomi; Narasaki, Katsuhiro; DiPirro, Michael J.; Shirron, Peter J.; Sneiderman, Gary A.; Kilbourne, Caroline A.; Porter, F. Scott; Chiao, Meng P.; Eckart, Megan E.; Kelley, Richard L.: Performance of the helium dewar and cryocoolers of ASTRO-H SXS, *Proceedings of the SPIE*, **9905**, id. 99053S 11 pp., DOI: 10.1117/12.2232933 (2016)

Okajima, Takashi; Soong, Yang; Serlemitos, Peter; Mori, Hideyuki; Olsen, Larry; Robinson, David; Koenecke, Richard; Chang, Bill; Hahne, Devin; Iizuka, Ryo; Ishida, Manabu; Maeda, Yoshitomo; Sato, Toshiki; Kikuchi, Naomichi; Kurashima, Sho; Nakaniwa, Nozomi; Hayashi, Takayuki; Ishibashi, Kazunori; Miyazawa, Takuya; Tachibana, Kenji; Tamura, Keisuke; Furuzawa, Akihiro; Tawara, Yuzuru; Sugita, Satoshi: First peek of ASTRO-H Soft X-ray Telescope (SXT) in-orbit performance, *Proceedings of the SPIE*, **9905**, id. 99050Z 8 pp., DOI: 10.1117/12.2231705 (2016)

Sato, Toshiki; Iizuka, Ryo; Mori, Hideyuki; Hayashi, Takayuki; Maeda, Yoshitomo; Ishida, Manabu; Kikuchi, Naomichi; Kurashima, Sho; Nakaniwa, Nozomi; Okajima, Takashi; Soong, Yang; Serlemitos, Peter J.: The ASTRO-H SXT performance to the large off-set angles, *Proceedings of the SPIE*, **9905**, id. 99053X 7 pp., DOI: 10.1117/12.2232175 (2016)

Kurashima, Sho; Furuzawa, Akihiro; Sato, Toshiki; Kikuchi, Naomichi; Nakaniwa, Nozomi; Maeda, Yoshitomo; Ishida, Manabu; Iizuka, Ryo; Okajima, Takashi; Mori, Hideyuki; Matsumoto, Hironori; Tamura, Keisuke; Ishibashi, Kazunori; Hayashi, Takayuki; Miyazawa, Takuya; Maejima, Masato; Yoshikawa, Shun: Reflectivity around the gold M-edges of x-ray reflector of the Soft X-ray Telescope onboard ASTRO-H, *Proceedings of the SPIE*, **9905**, id. 99053Y 10 pp., DOI: 10.1117/12.2231173 (2016)

Maeda, Yoshitomo; Kikuchi, Naomichi; Kurashima, Sho; Ishida, Manabu; Iizuka, Ryo; Hayashi, Takayuki; Okajima, Takashi; Matsumoto, Hironori; Mitsuishi, Ikuyuki; Saji, Shigetaka; Sato, Toshiki; Tachibana, Sasagu; Mori, Hideyuki; Christensen, Finn; Brejholt, Nicolai; Nitta, Kiyofumi; Uruga, Tomoya: Reflectivity around the gold L-edges of x-ray reflector of the soft x-ray telescope onboard ASTRO-H, *Proceedings of the SPIE*, **9905**, id. 99053Z 8 pp., DOI: 10.1117/12.2232727 (2016)

Hayashi, Takayuki; Sato, Toshiki; Kikuchi, Naomichi; Iizuka, Ryo; Maeda, Yoshitomo; Ishida, Manabu; Kurashima, Sho; Nakaniwa, Nozomi; Okajima, Takashi; Mori, Hideyuki; Soong, Yang; Serlemitos, Peter J.: Point spread function of ASTRO-H Soft X-ray Telescope (SXT), *Proceedings of the SPIE*, **9905**, id. 99055D 6 pp., DOI: 10.1117/12.2232007 (2016)

Tatsuno, H.; Doriese, W. B.; Bennett, D. A.; Curceanu, C.; Fowler, J. W.; Gard, J.; Gustafsson, F. P.; Hashimoto, T.; Hayano, R. S.; Hays-Wehle, J. P.; Hilton, G. C.; Iliescu, M.; Ishimoto, S.; Itahashi, K.; Iwasaki, M.; Kuwabara, K.; Ma, Y.; Marton, J.; Noda, H.; O'Neil, G. C.; Okada, S.; Outa, H.; Reintsema, C. D.; Sato, M.; Schmidt, D. R.; Shi, H.; Suzuki, K.; Suzuki, T.; Uhlig, J.; Ullom, J. N.; Widmann, E.; Yamada, S.; Zmeskal, J.; Swetz, D. S.: Absolute Energy Calibration of X-ray TESs with 0.04 eV Uncertainty at 6.4 keV in a Hadron-Beam Environment, *Journal of Low Temperature Physics*, **184**, Issue 3-4, pp. 930-937, DOI: 10.1007/s10909-016-1491-2 (2016)

Porter, F. S.; Chiao, M. P.; Eckart, M. E.; Fujimoto, R.; Ishisaki, Y.; Kelley, R. L.; Kilbourne, C. A.; Leutenegger, M. A.; McCammon, D.; Mitsuda, K.; Sawada, M.; Szymkowiak, A. E.; Takei, Y.; Tashiro, M.; Tsujimoto, M.; Watanabe, T.; Yamada, S.: Temporal Gain Correction for X-ray Calorimeter Spectrometers, *Journal of Low Temperature Physics*, **184**, Issue 1-2, pp. 498-504, DOI: 10.1007/s10909-016-1503-2 (2016)

Kuromaru, G.; Kuwabara, K.; Miyazaki, N.; Suzuki, S.; Hosoya, S.; Koizumi, Y.; Ohashi, T.; Ishisaki, Y.; Ezoe, Y.; Yamada, S.; Mitsuda, K.; Hidaka, M.; Satoh, T.: Investigation of Surface Roughness Effect on Transition Edge Sensor Microcalorimeters Using Multilayer Readout Wiring, *Journal of Low Temperature Physics*, **184**, Issue 1-2, pp. 38-44, DOI: 10.1007/s10909-016-1499-7 (2016)

Yamada, S.; Ohashi, T.; Ishisaki, Y.; Ezoe, Y.; Miyazaki, N.; Kuwabara, K.; Kuromaru, G.; Suzuki, S.; Mitsuda, K.; Yamasaki, N. Y.; Takei, Y.; Sakai, K.; Nagayoshi, K.; Yamamoto, R.; Hayashi, T.; Muramatsu, H.; Tawara, Y.; Mitsuishi, I.; Babasaki, Y.; Nakamichi, R.; Bandai, A.; Yuasa, T.; Ota,

N.: Future Japanese X-ray TES Calorimeter Satellite: DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor), *Journal of Low Temperature Physics*, **184**, Issue 3-4, pp. 688-693, DOI: 10.1007/s10909-015-1362-2 (2016)

Kikuchi, Naomichi; Kurashima, Sho; Ishida, Manabu; Iizuka, Ryo; Maeda, Yoshitomo; Hayashi, Takayuki; Okajima, Takashi; Matsumoto, Hironori; Mitsuishi, Ikuyuki; Saji, Shigetaka; Sato, Toshiki; Tachibana, Sasagu; Mori, Hideyuki; Christensen, Finn; Brejnholt, Nicolai; Nitta, Kiyofumi; Uruga, Tomoya: Atomic scattering factor of the ASTRO-H (Hitomi) SXT reflector around the gold's L edges, *Optics Express*, **24**, issue 22, p. 25548, DOI: 10.1364/OE.24.025548 (2016)

Eckart, M. E.; Boyce, K. R.; Brown, G. V.; Chiao, M. P.; Fujimoto, R.; Haas, D.; den Herder, J.-W.; Ishisaki, Y.; Kelley, R. L.; Kilbourne, C. A.; Leutenegger, M. A.; McCammon, D.; Mitsuda, K.; Porter, F. S.; Sawada, M.; Sneiderman, G. A.; Szymkowiak, A. E.; Takei, Y.; Tashiro, M.; Tsujimoto, M.; de Vries, C. P.; Watanabe, T.; Yamada, S.; Yamasaki, N. Y.: Calibration of the microcalorimeter spectrometer on-board the Hitomi (Astro-H) observatory (invited), *Review of Scientific Instruments*, **87**, Issue 11, id.11D503, DOI: 10.1063/1.4961075 (2016)

3) 学会講演

国内学会

● 産総研 IoT イノベーションマッチングフォーラム 2016 年 9 月 15 日（幕張メッセ）

江副祐一郎: 宇宙のセンシング - MEMS X 線望遠鏡の開発 (招待講演)

● 応用物理学会 2016 年秋季年会 2016 年 9 月 13~16 日（新潟大学）

中村 果澄、江副 祐一郎、石川 久美、沼澤 正樹、武内 数馬、寺田 優、伊師 大貴、藤谷 麻衣子、野田 悠祐、大橋 隆哉、満田 和久: シリコンドライエッティングを用いた 4 インチ X 線光学系開発の現状

● 日本天文学会 2016 年秋季年会 2016 年 9 月 14~16 日（愛媛大学）

Toshiki Sato (Tokyo Metropolitan University, ISAS/JAXA, Rutgers University), John P. Hughes (Rutgers University): Direct Ejecta Velocity Measurements of Tycho's Supernova Remnant

中庭望, 佐藤寿紀, 菊地直道, 倉嶋翔 (首都大学東京), 飯塚亮, 前田良知, 石田學 (ISAS), 岡島崇, 森 英之, 林多佳由 (GSFC), 他 the ASTRO-H SXT team: 「ひとみ (ASTRO-H)」搭載軟 X 線望遠鏡に用いる反射鏡の反射率測定

石崎欣尚, 山田真也, 瀬田裕美 (首都大), 田代信, 寺田幸功, 加藤優花 (埼玉大), 満田和久, 辻本匡 弘, 小山志勇 (ISAS/JAXA), 澤田真理 (青山学院大), Kevin R. Boyce, Meng P. Chiao, Tomomi Watanabe, Megan Eckart, Maurice Leutenegger, F. Scott Porter, Caroline Kilbourne, Richard L. Kelley (NASA/GSFC), 「ひとみ」SXS チーム: 「ひとみ (ASTRO-H)」搭載 SXS の波形処理装置の軌道上性能

● 磁気圏電離圏シンポジウム 2016 年 10 月 20 日 (JAXA 宇宙研)

江副祐一郎: GEO-X : GEospace X-ray imager (招待講演)

● 高宇連ロードマップ改訂に向けたワークショップ 2016 年 12 月 27 日 (首都大学東京)

大橋隆哉、DIOS ワーキンググループ: Future DIOS

- ブラックホール降着流ミニワークショップ 2017年3月8日(千葉大学)

山田真也: Astro-H/Hitomi 衛星の状況報告とその後

- 日本天文学会 2016年春季年会 2017年3月15~18日(九州大学)

大橋隆哉(首都大): 特別セッション:X線天文衛星計画の概要 -「ひとみ」と「X線天文衛星代替機」:「ひとみ衛星初期観測の成果について」

山田真也, 石崎 欣尚, 一戸悠人, 黒丸巖静, 鈴木翔太, 北澤誠一, 早川亮大(首都大理), D.A. Bennett, W.B. Doriese, J.W. Fowler, D.R. Schmidt, D.S. Swetz, J.N. Ullom(NIST), 岡田信二, 橋本直(理研), 野田博文(東北大), 竜野秀行(ルンド大), HEATESチーム: 超伝導TESカロリメータを用いたK中間子原子X線の精密分光プロジェクト(3-1)

早川亮大, 山田真也, 石崎 欣尚, 一戸悠人, 黒丸巖静, 鈴木翔太, 北澤誠一(首都大理), D.A. Bennett, W.B. Doriese, J.W. Fowler, D.R. Schmidt, D.S. Swetz, J.N. Ullom(NIST), 岡田信二, 橋本直(理研), 野田博文(東北大), 竜野秀行(ルンド大), HEATESチーム: 超伝導TESカロリメータを用いたK中間子原子X線の精密分光プロジェクト(3-2)

小坂健吾, 黒丸巖静, 鈴木翔太, 北澤誠一, 山田陽平, 早川亮大, 大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 山田 真也(首都大), 満田和久(宇宙研), 日高睦夫, 永沢秀一, 伊坂美千代(産総研): 将来衛星に向けた積層配線TES型X線マイクロカロリメータの開発

倉嶋翔, 佐藤寿紀, 中庭望, 浅井龍太(首都大学東京), 石田學, 前田良知, 飯塚亮, 上田周太朗(ISAS), 岡島崇, 森英之, 林多佳由(GSFC), 内田裕之, 田中孝明(京都大)、中嶋大、井上翔太(大阪大)、森浩二(宮崎大)、信川正順(奈良教育大): ひとみ(ASTRO-H)搭載軟X線望遠鏡のCrab観測による軌道上の性能評価

中庭望, 佐藤寿紀, 倉嶋翔, 浅井龍太(首都大学東京), 石田學, 前田良知, 飯塚亮, 上田周太朗(ISAS), 内田裕之, 田中孝明(京都大学), 中嶋大, 井上翔太(大阪大学), 森浩二(宮崎大学), 信川正順(奈良教育大学), 岡島崇, 森英之, 林多佳由(GSFC): 「ひとみ(ASTRO-H)」搭載軟X線望遠鏡(SXT)の軌道上の有効面積の評価

伊師大貴(首都大), 石川久美(ISAS), 江副祐一郎, 大橋隆哉(首都大): 「すぐ」衛星による地球周辺からの太陽風電荷交換X線イベントの系統探査

佐藤寿紀(首都大、宇宙研)、勝田哲(中央大)、馬場彩(東京大)、石田學、前田良知(宇宙研): カシオペアAの逆行衝撃波の固有運動とスペクトル変動の調査

- 日本物理学会 2017年春季大会 2014年3月17~20日(大阪大学)

北澤誠一, 大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 山田真也, 黒丸巖静, 鈴木翔太, 小坂健吾, 早川亮大, 山田陽平, 満田和久, 伊坂美千代, 永沢秀一, 日高睦夫: CMP研磨を用いた積層配線TES型X線マイクロカロリメータの開発

- 深宇宙探査学シンポジウム 2017年3月28日(東京大学)

国際会議

- Workshop on Perspectives on the Extragalactic Frontier: from Astrophysics to Fundamental Physics International, Trieste, Italy, May 2 – 6, 2016

M. Axelsson: Fermi observations of Gamma-ray Bursts

- Xmm-Newton: The Next Decade, Madrid, Spain, May 9 – 11, 2016

T. Ohashi: Report of Hitomi (ASTRO-H) (Invited)

- SPIE : Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray, Edinburgh, UK, May 9 – 11, 2016

M. Tsujimoto, Y. Ezoe, Y. Ishisaki, T. Ohashi, S. Yamada, et al.: In-orbit operation of the ASTRO-H SXS

R. Kelley, Y. Ezoe, Y. Ishisaki, T. Ohashi, S. Yamada, et al.: The Astro-H high resolution soft x-ray spectrometer

Y. Ezoe, Y. Ishisaki, T. Ohashi, et al.: Porous plug phase separator and superfluid film flow suppression system for the soft x-ray spectrometer onboard ASTRO-H

H. Noda, Y. Ezoe, T. Ohashi, Y. Ishisaki, et al.: Thermal analyses for initial operations of the Soft X-Ray Spectrometer (SXS) onboard ASTRO-H

T. Ohashi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, S. Yamada, et al.: DIOS: the dark baryon exploring mission

R. Fujimoto, Y. Ezoe, Y. Ishisaki, S. Yamada, T. Ohashi, et al.: Performance of the helium dewar and cryocoolers of ASTRO-H SXS

T. Takahashi, T. Ohashi, Y. Ezoe, Y. Ishisaki, S. Yamada, et al.: The ASTRO-H (Hitomi) x-ray astronomy satellite

M.E. Eckart, Y. Ishisaki, S. Yamada, et al.: Ground calibration of the Astro-H (Hitomi) soft x-ray spectrometer

Y. Ishisaki, S. Yamada, et al.: In-flight performance of pulse processing system of the ASTRO-H soft x-ray spectrometer

F.S. Porter, Y. Ishisaki, S. Yamada, et al.: In-flight performance of the Soft X-ray Spectrometer detector system on Astro-H

Y. Takei, S. Yamada, Y. Ishisaki, et al.: Vibration isolation system for cryocoolers of Soft X-ray Spectrometer (SXS) onboard ASTRO-H

T. Sato, M. Ishida, et al.: Examining the angular resolution of the ASTRO-H's soft x-ray telescopes

M.A. Leutenegger, M. Ishida, S. Kurashima, T. Sato, et al.: In-flight verification of the calibration and performance of the ASTRO-H (Hitomi) Soft X-Ray Spectrometer

T. Hayashi, T. Sato, S. Kurashima, M. Ishida, et al.: Point spread function of ASTRO-H Soft X-ray Telescope (SXT)

S. Kurashima, T. Sato, et al.: Reflectivity around the gold M-edges of x-ray reflector of the Soft X-ray Telescope onboard ASTRO-H

Y. Maeda, M. Ishida, S. Kurashima, T. Sato, et al.: Reflectivity around the gold L-edges of x-ray reflector of the soft x-ray telescope onboard ASTRO-H

T. Okajima, M. Ishida, T. Sato, S. Kurashima, et al.: First peek of ASTRO-H Soft X-ray Telescope (SXT) in-orbit performance

T. Sato, M. Ishida, S. Kurashima, et al.: The ASTRO-H SXT performance to the large off-set angles

● European Week of Astronomy and Space Science, Athens, Greece, July 4 – 8, 2016

M. Axelsson: Constraining emission mechanisms in gamma-ray bursts using spectral width

● ISSI Forum on the Link between Solar wind, Magnetosphere, Ionosphere, Beijing, China, July 6 – 7, 2016

Y. Ezoe: Future mission related to CX in Japan

● Eighth Huntsville Gamma-Ray Burst Symposium, Huntsville, Alabama, October 24 – 28, 2016

E. Moretti, M. Axelsson: Signs of Magnetic Acceleration and Multi-Zone Emission in Grb080825c

● 7 Years of MAXI: monitoring X-ray transients, Wako, Saitama, December 5 – 7, 2016

T. Ohashi: Science from Hitomi: Introduction

● Axro: International workshop on Astronomical X-Ray Telescope, Prague, Chez, December 5 – 8, 2016

Y. Ezoe: MEMS optics for the ORBIS mission

● Annual Symposium 2016 on “New Developments in Astrophysics Through Multi-Messenger Observations of Gravitational Wave Sources”, Kyoto, December 27 – 29, 2016

S. Yamada et al.: A future X-ray mission to survey missing baryons

● KMI2017 International Symposium, Nagoya, January 5 – 7, 2017

T. Ohashi: Hitomi X-ray mission and observation of the Perseus cluster of galaxies (Invited)

電子物性研究室

1. 研究活動の概要

結晶中の電子は「電荷、軌道とスピン（あるいは多極子）」の内部自由度を持つ。これらの内の幾つかは、結晶内の環境に依存して活性化し、多彩な電子物性を生み出す。結晶構造の特徴を反映して電子集団の性質ががらりと変わり、超伝導・磁気秩序・金属絶縁体転移など、多彩な物性が発現することに我々は興味を持っている。特に、磁性イオンの持つ多極子、非従来型の超伝導や量子臨界的挙動などの現象をもたらす強相関効果（量子力学的多体効果）、トロポジカル電子状態、結晶構造の群論的特徴に着目しながら、純良単結晶の育成と各種基礎物性測定により、これまでにない新規現象の探索と創出、その機構解明を目指した実験的研究を行っている。今年度は、スタッフ3名、日本学術振興会外国人特別研究員Rajveer Jha氏、大学院生8名（博士後期2名[学振特別研究員DC1とDC2]と博士前期6名）、学部生5名（留学生1名）の体制で研究を進めた。以下に主要な成果を示す。

1) トポロジカル物質「ワイル半金属」 WTe_2 の世界最高レベルの高純度単結晶の育成: 1,500,000 %に達する巨大磁気抵抗効果

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と呼ばれ、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。この様な特異な性質を持つ電子を3次元空間で見出そうと、物質探索が現在盛んに行われている。Weyl fermion（光速で移動する粒子として1929年にドイツの理論物理学者 Hermann Weylにより理論的に提唱された概念。実存する素粒子として観測はされていない）は、その一つの候補である。最近、半金属である遷移金属ダイカルコゲナイト WTe_2 の物質内に Weyl fermion が存在している可能性が指摘され注目を集めている。Weyl fermionには位相幾何学的（トポロジカル）な性質があり、カイラリティ（電子の運動量ベクトルとスピンが平行か反平行かを表す指標）の符号の異なる2つの粒子がペアで物質中に現れる。この特徴ある性質が、新奇な物性をもたらすことが予想されている。

我々は、その様な「Weyl 半金属」の候補物質である WTe_2 の研究を開始し、残留抵抗比が1,300以上となる世界最高レベルの高純度単結晶の育成に成功した（図1(左)）。この単結晶において、低温磁場中で1,500,000 %にも達する異常な巨大磁気抵抗効果を観測した。この振る舞いは、本物質内に電子と正孔が同数存在し（半金属の証拠）、両者の易動度が極めて大きい値を持つことを示している。図1(右)に、抵抗の磁場依存に現れた量子振動（Shubnikov-de Haas oscillation）を示す。磁場の逆数に対して、周期的に電気抵抗が振動していることがわかる。この振動のフーリエスペクトルには4つのピーク構造が現れ（振動数はフェルミ面の極致断面積に比例する），電子と正孔のフェルミポケットがそれぞれ2つづつあることがわかる。得られた純良単結晶試料を用いて、国内外の多面的な共同研究を開始した。今後、機構解明を目指した研究の大きな進展が期待される。

2) $\text{Ln}(\text{O}_{1-x}\text{F}_x)\text{BiS}_2$ (Ln :希土類イオン) における 4f 電子磁性と超伝導、一軸圧力効果

CeOBiS_2 が極低温度領域において、Ce 4f電子に起因する非従来型の量子臨界的 $\log T$ 比熱発散を示すことを2015年に報告した。この研究をさらに発展させ、 $\text{Ln}=\text{Pr},\text{Nd}$ における4f電子磁性と超伝導の振る舞いを純良単結晶試料を用いて調べた。Nd系では、比熱が低温で $\log T$ 的発散を示さず、あたかも重い電子系であるかのような振る舞いを示す。Pr系では、Prイオンが結晶場一重項基底状態を持っており、 Ce,Nd 系に見られるような比熱異常が低温に見られない。どの系においても、磁化は顕著な異方性を持っており、基本的に局在した4f電子が結晶場効果により複数の準位に分裂した状態にあることがわかった。これらの磁性を相補的に調べるために、 μSR 測定や極低温磁化測定も行った。 BiS_2 系超伝導体

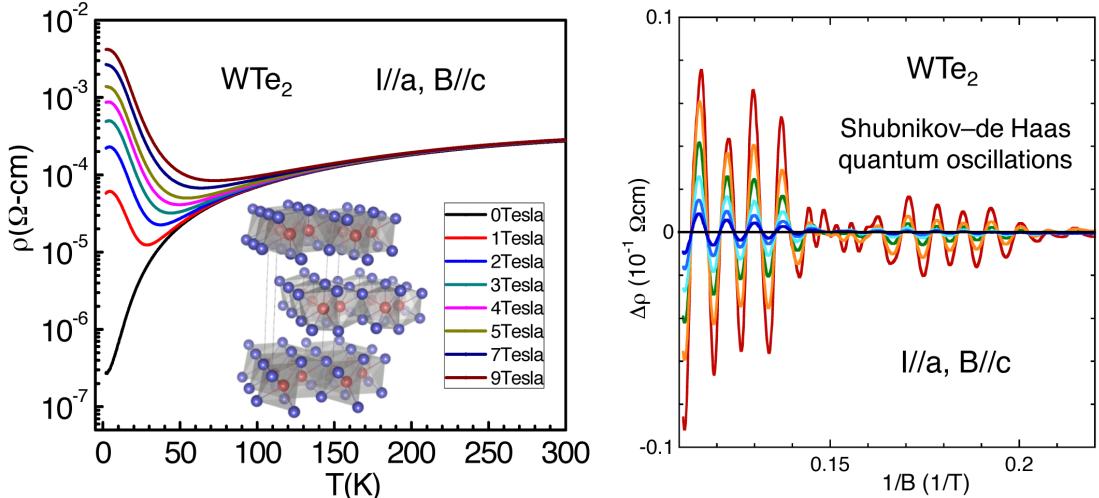


図 1: (左) Weyl 半金属 WTe_2 の磁場中抵抗の温度依存。1,500,000 %に達する巨大磁気抵抗効果が発現している。(右) 磁気抵抗に現れるシュブニコフ・ハース量子振動。単結晶試料が純良高品質であることの証拠である。

の結晶構造の興味ある特徴は、2枚の BiS_2 層が van der Waals 力により結合している点である。 BiS_2 層に垂直に一軸圧力を印加し、超伝導転移温度 T_c がどのように変化するか測定する装置を立ち上げた。 $\text{NdO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ 単結晶試料を用いて予備実験を開始し、0.4 GPa 以下の一軸圧力領域では、 T_c に顕著な変化が見られないことがわかった。

3) BiS_2 系超伝導体の単結晶試料を用いた放射光実験

BiS_2 系超伝導体の単結晶を育成し、研究室内でその基礎物性測定を行いつつ、国内外との共同研究も幅広く進めている。その中で、放射光実験により得た本系の電子構造に関わる重要な成果を以下に示す。

(1) $\text{CeO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ 単結晶の X 線吸収分光と共鳴光電子分光の測定により、Ce 4f 電子が中間価数状態にありつつも局在していることと、4f 電子が Bi-6p_z 軌道と混成していることが明らかとなった。また、 $\text{Eu}_3\text{F}_4\text{Bi}_2\text{S}_4$ 単結晶の X 線吸収分光と角度分解光電子分光(ARPES)の測定により、Eu イオンが中間価数状態にあり、 BiS_2 層にキャリアがドープされており(Bi サイト当たり 0.23 個の電子)、X 点に他の BiS_2 系と同様なフェルミポケットが存在することが明らかとなった。なお、空間分解 ARPES により、マイクロメートルスケールで Eu 価数が均一であることが確認された。

(2) 高精度単結晶構造解析により、超伝導体の母相となる LaOBiS_2 の結晶対称性が、tetragonal $P4/nmm$ から、monoclinic $P2_1m$ へと低下していることを前年度に明らかにしたが、今年度は、部分的に F 置換された $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ へと研究を拡張した。不整合超格子反射を見出しが、これが本系の電子構造が持つ不安定性に起因している可能性があり、電子構造を今後明らかにしていく上で重要な成果である。前者は杉本氏・溝川研究室(早稲田大)、Saini 研究室(ローマ・ラ・サピエンツァ大)と、後者は佐賀山氏・村上研究室(KEK)との共同研究の成果である。

4) $\text{YbOs}_4\text{Sb}_{12}$ の高純度単結晶育成と低温物性

強相関 f 電子系の物理では、近年、希土類元素の価数の自由度に起因すると考えられる低温の物性異常について注目が集まっている。特に化合物中において複数の価数状態をとりうる Ce のみならず、Sm, Eu そして Yb 化合物がそれらの研究対象として重点的に調べられている。我々の研究グループでは、典型的な強相関電子系である充填型スクッテルダイト化合物 RT_4X_{12} (R : 希土類、 T : 遷移金属、 X : プニクトゲン) を研究してきており、特に、この価数の自由度に起因すると考えられる Sm 系の重い電子状態や、未解明な低温の秩序変数の研究を行ってきたが、最近、研究対象を広げ、Yb 充填型スクッテルダイ

ト化合物の研究をすすめている。一般にこの充填型スクッテルダイトは、重希土類系及び、 X を As, Sb とするにつれ、希土類元素の充填率が著しく低下する、あるいは結晶そのものも安定しない傾向が強くなり、合成が極めて難しくなる。我々は、YbOs₄Sb₁₂ の高純度単結晶育成を試み、その物性測定を行った。重希土類充填型スクッテルダイト系の合成は、一般的には高圧合成法が有効とされているが、我々は常圧下での結晶育成も試み、EDX 及び単結晶 X 線回折実験などから丁寧に結晶の質を評価した結果、常圧下で育成した単結晶の質が圧倒的に高いことを明らかにした。その上で、本系の物性を調べた結果、Yb イオンの価数が 2 価に極めて近い状態であるにもかかわらず、電子比熱係数 γ が、50 mJ/K²·mol と、Yb 系では報告例が少ない重い電子系であることが明らかになった。帯磁率のピーク構造、電気抵抗の肩構造、Hall 係数に現れる大きな温度依存性などから、重い電子状態に関わる相互作用の特徴的なエネルギー規模が約 50 ~ 70 K 程度であると考えられることも分かり、今後、極低温物性も含め重点的に研究する必要のある興味深い系であることを見出した。

5) 新規強相関 Sm 化合物の探索

上記でも述べたように、我々は Sm 化合物等において、価数の自由度や磁気的自由度等複数の自由度が絡んだ、強相関電子系について研究を行ってきた。これら興味深い物性を示す系の探索は、組成と温度に関する状態図や化合物データベース、さらに経験則等をもとに探索を行うのが一般的ではあるが、我々の研究では、既に知られている興味深い物質系の結晶構造を基本とし、そこから次元性や注目すべきイオンの持つ局所対称性に注目し、群論的考察から、部分群にあたる空間群に対応する結晶構造を予想した上で、積極的な物質探索を試みている。その結果として、新規物質 RPd₃Ga₈(R:希土類) を発見し、物性研究を行った。RPd₃Ga₈ の結晶構造は、強相関 f 電子系として知られた立方晶 RCd₁₁ の空間群 $Pm\bar{3}m$ の部分群に対応する構造を持つ。RCd₁₁ では、局所対称性の異なる 4 つの Cd サイトを持つが、そのうちの一つを遷移金属元素と Ga 元素に置き換え、結晶構造全体として対称性を低下させることで、菱面体晶系へと変化させたものが RPd₃Ga₈ の構造となる。この結晶構造において、ゼロ磁場下では希土類イオンサイトは 1 つのままであるものの、立方晶系から菱面体晶系になったことで、等価な ⟨111⟩ が 1 つの主軸とそれと異なる 3 つの軸に分かれることで、一軸的な異方性が期待できる。まずこの組成比を持つ化合物は、既に一部報告されているものの、結晶構造の精密化にはいたっておらず、これまで立 方晶系として理解されており、今回の我々の研究から初めて明らかになった。さらに、R 元素について系統的に物質が存在することも初めてあきらかにした。物性測定からは、Sm 系において、温度約 3 K において反強磁性的転移を示すものの、その秩序温度以下において、比熱の振る舞いに異常な構造が現れることがあきらかになった。加えて、秩序相内において、100 mJ/K²·mol 以上の重い電子状態が実現している可能性があることが分かった。このような Sm 系化合物における低温秩序相内における重い電子状態は、これまで我々は、SmPt₂Si₂ において報告しているが、本系で 2 例目となる可能性が高い。SmPt₂Si₂ では、磁気的フラストレーションによる部分無秩序状態が関わる異常である可能性を指摘しているが、SmPd₃Ga₈ においても、[111] に垂直なカゴメ格子が積層した構造を持っており、本系も同様のメカニズムが介在している可能性も考えられ、興味深い系であることを見出した。

6) V₃Al の高温相における熱電物性

V₃Al の室温安定相である A15 構造は初めて 20 K を超える超伝導転移温度を示した物質群として有名であるが、本物質は 650 °C 以上で急冷することにより D0₃ 擬 Heusler 構造が安定相となり、 $T_N \sim 600$ K の反強磁性ギャップレス半導体となることが知られている。フェルミ面近傍で伝導帯と価電子帯間のギャップが消失しているため、V と Al の組成比を少し変化させるだけで有意な量の電子ドープ、ホールドープが可能である。ドープした物質では、フェルミ面がギャップ近傍に存在するため、状態密度のエネルギー依存性が非常に大きくなり、大きな熱電特性を示すことが予想される。さらに、反強磁性相で

は up スピンと down スpin が異なる状態密度のエネルギー依存性を示すため、スピン偏極したバンド構造をとる。そのため、スピン偏極したキャリアーをドープすることが可能なため、本物質では、磁場印加による熱電特性制御の可能性が期待され、さらにはスピントロニクスへの応用も期待できる。サバティカル期間中に滞在したウィーン工科大学において、 $V_{3-x}Al_{1+x}$ ($x = 0, \pm 0.01, \pm 0.05$) の多結晶試料作成に成功し、X線構造解析から全ての組成において高温相である $D0_3$ 構造を形成し、組成に依存して格子定数が変化していることを見いだした。熱電特性を含めた基礎物性測定を現在進めている。

7) $SmPt_2Cd_{20}$ における強磁性量子臨界現象の観測

昨年度単結晶育成に成功した $SmPt_2Cd_{20}$ において、 $T_C = 0.64$ K に強磁性転移を発見した。さらに、 C/T が磁気転移温度以下でも温度の低下とともに増大する異常な振る舞いを示すことを見出した。また、この系の電気抵抗率 ρ は 2 K 以下で $T^{0.74}$ に比例する温度依存性を示しており、これらの低温での物性異常は $SmPt_2Cd_{20}$ が強磁性臨界点近傍に位置する化合物である可能性を示している。この系のゼロ磁場での磁気エントロピーは、 T_C では $R\ln 2$ に達しておらず、近藤効果もしくは T_C 以上の温度領域での短距離秩序の影響が考えられる。この磁気エントロピーと $J = 5/2$ の立方晶の結晶場を考慮した近藤モデルと比較し、基底状態は Γ_7 二重項、結晶場分裂による第一励起エネルギー Δ は約 30 K であるという結果を得た。低温 2 K-10 K の間の磁化率の Curie-Weiss fitting からも磁化率が $0.46\mu_B/Sm$ という Γ_7 二重項の期待値に近い値が得られ、以上の結果は Γ_7 二重項が結晶場基底状態であることを示している。

2. 研究業績

1) 論文

E. Paris, T. Sugimoto, T. Wakita, A. Barinov, K. Terashima, V. Kandyba, O. Proux, J. Kajitani, R. Higashinaka, T.D. Matsuda, Y. Aoki, T. Yokoya, T. Mizokawa, and N.L. Saini : Electronic structure of self-doped layered $Eu_3F_4Bi_2S_4$ material revealed by x-ray absorption spectroscopy and photoelectron spectromicroscopy, *Phys. Rev. B*, **95**, 035152 (2017) [5 pages]. DOI: 10.1103/PhysRevB.95.035152

T. Sugimoto, D. Ootsuki, E. Paris, A. Iadecola, M. Salome, E. F. Schwier, H. Iwasawa, K. Shimada, T. Asano, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, Y. Aoki, N. L. Saini, and T. Mizokawa : Localized and mixed valence state of Ce 4f in superconducting and ferromagnetic $CeO_{1-x}F_xBiS_2$ revealed by x-ray absorption and photoemission spectroscopy, *Phys. Rev. B*, **94**, 081106(R) (2016) [5 pages]. DOI: 10.1103/PhysRevB.94.081106

Wataru Higemoto Yuji Aoki and Douglas E. MacLaughlin : Spin and Time-Reversal Symmetries of Superconducting Electron Pairs Probed by the Muon Spin Rotation and Relaxation Technique, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **85**, 091007 (2016) [11 Pages]. DOI: 10.7566/JPSJ.85.091007

Yoshikazu Mizuguchi, Akira Yamada, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki, Osuke Miura, Masanori Nagao : Specific Heat and Electrical Transport Properties of $Sn_{0.8}Ag_{0.2}Te$ Superconductor, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **85**, 103701 (2016) [4 Pages]. DOI: 10.7566/JPSJ.85.103701

Hiromu Kunitoshi, Tatsuma D. Matsuda, Ryo Midorikawa, Ryuji Higashinaka, Keitaro Kuwahara, Yuji Aoki, Hideyuki Sato : First report on the Electronic, Magnetic and thermal Properties of Filled Skutterudite $YbOs_4Sb_{12}$, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **85**, 114708 (2016) [6 Pages]. DOI: 10.7566/JPSJ.85.114708

Kazuaki Iwasa, Ryuji Higashinaka, Yuji Aoki, Seiko Ohira-Kawamura, and Kenji Nakajima : Broad Excitation Spectra between Crystalline-Electric-Field Levels Associated with Non-Kramers Doublet

Ground State of f Electrons in PrNb₂Al₂₀, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **85**, 123704 (2016) [5 Pages]. DOI: 10.7566/JPSJ.85.123704

Gen Jinno, Rajveer Jha, Akira Yamada, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki, Masanori Nagao, Osuke Miura, Yoshikazu Mizuguchi : Bulk Superconductivity Induced by In-Plane Chemical Pressure Effect in Eu_{0.5}La_{0.5}FBiS_{2-x}Se_x, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **85**, 124708 (2016) [6 Pages]. DOI: 10.7566/JPSJ.85.124708

Takeshi Matsumura, Shinji Michimura, Toshiya Inami, Kengo Fushiya, Tatsuma D. Matsuda, Ryuji Higashinaka, Yuji Aoki, and Hitoshi Sugawara : Atomic displacements and lattice distortion in the magnetic-field-induced charge ordered state of SmRu₄P₁₂, *Phys. Rev. B*, **94**, 184425 (2016) [10 pages]. DOI: 10.1103/PhysRevB.94.184425

T. Hattori, H. Sakai, Y. Tokunaga, S. Kambe, T. D. Matsuda, and Y. Haga : No Detectable Change in In-Plane ²⁹Si Knight Shift in the Superconducting state of URu₂Si₂, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **85**, 073711 (2016) [4 pages]. DOI: 10.7566/JPSJ.85.073711

Y. Matsumoto, Y. Haga, N. Tateiwa, H. Aoki, N. Kimura, T. Yamamura, E. Yamamoto, T. D. Matsuda, Z. Fisk, and H. Yamagami : Fermi Surface of ThRu₂Si₂ as a Reference to the Strongly Correlated Isostructural Metals Investigated by Quantum Oscillations, *J. Phys. Rev. Jpn.*, **85**, 104709 (2016) [7 pages]. DOI: 10.7566/JPSJ.85.104709

2) 学会講演

● 日本物理学会第 2016 年秋季大会 2016 年 9 月 13 日 (火) – 16 日 (金) (金沢大学)

高橋祥平, 大山雄輔, 長谷川潤弥, 中西良樹, 中村光輝, 吉澤正人, 山田瑛, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, 佐藤英行 : 超音波測定で探る籠状物質 SmTa₂Al₂₀ の低温秩序相の弾性特性

山本直季, 三田昌明, 山田瑛, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二 : Pr(O,F)BiS₂ 単結晶の電子輸送特性

梶谷丈, 三田昌明, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨 : 単結晶 LaO_{1-x}F_xBiS₂ の電子輸送効果

久保徹郎, 三宅遼磨, 松野治貴, 小手川恒, 藤秀樹, 播磨尚朝, 東中隆二, 中間章浩, 青木勇二, 佐藤英行, 井原慶彦, 後藤貴行, 佐々木孝彦 : 単結晶 PrT₂Al₂₀(T = Nb, Ta) の NMR による研究

松田達磨, 国利洸貴, 翠川諒, 一ノ瀬すみれ, 岸本美晴, 大西翔太, 東中隆二, 桑原慶太郎, 青木勇二, 佐藤英行 : YbOs₄Sb₁₂ の高压合成法による単結晶育成と低温物性

中瀬迅, 三宅遼磨, 久保徹郎, 小手川恒, 藤秀樹, 山田瑛, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二 : SmTa₂Al₂₀ の Al-NQR による研究

小山岳秀, 梶田幸未, 上田光一, 水戸毅, 山田瑛, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨 : SmGa₂ における磁気構造の NMR 研究

東中隆二, 三田昌明, 浅野卓也, 松田達磨, 青木勇二 : 異常な低エネルギー励起を示す NdO_{1-x}F_xBiS₂ の電気輸送測定

石見聖, 山田瑛, 東中隆二, 松田達, 青木勇二 : SmPtSi₃ の結晶育成と基礎物性

原和輝, 山田瑛, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: 新規希土類化合物 RPd_3Ga_8 の単結晶育成と基礎物性

山田瑛, 大池翔太, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: $SmPt_2Cd_{20}$ の単結晶育成と極低温物性

佐賀山遼子, 佐賀山基, 熊井玲児, 村上洋一, 浅野卓也, 梶谷丈, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: $La(OF)BiS_2$ のフッ素添加量と格子歪の関係

服部泰佑, 酒井宏典, 徳永陽, 神戸振作, 松田達磨, 芳賀芳範: 単結晶 URu_2Si_2 における超伝導状態の ^{29}Si ナイトシフト測定

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

● 日本物理学会 第 72 回年次大会 2017 年 3 月 17 日 – 20 日 (大阪大学)

久保徹郎, 藤秀樹, 三宅遼磨, 松野治貴, 小手川恒, 播磨尚朝, 東中隆二, 中間章浩, 青木勇二, 佐藤英行, 井原慶彦, 後藤貴行, 佐々木孝彦: NMR/NQR による PrT_2Al_{20} ($T=Nb, Ta$) の磁気揺らぎの研究

松田達磨, 一ノ瀬すみれ, 岸本美晴, 山田瑛, 國利洸貴, 東中隆二, 佐藤英行, 青木勇二: 新規重希土類 充填型スクッテルダイトの低温物性

梶谷丈, 三田昌明, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨, 佐賀山基, 佐賀山遼子, 熊井玲児, 村上洋一: $LaO_{1-x}F_xBiS_2$ における長周期格子変調

Yuan Yahua, 松林和幸, 梶谷丈, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: Pressure-induced superconductivity in $EuFBiS_2$ single crystal

飯沼拓也, 鄭譽贊, 東中隆二, 一ノ瀬すみれ, 青木勇二, 松田達磨: RPd_2P_2 (R : 希土類) の純良単結晶育成と物性測定

大西翔太, 山田瑛, 三田昌明, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: BiS_2 系層状超伝導体の超伝導特性に対する一軸圧力効果

岩佐和晃, 東中隆二, 青木勇二, 河村聖子, 中島健次: 中性子非弾性散乱による $PrNb_2Al_{20}$ の結晶場励起スペクトル

水牧仁一朗, 筒井智嗣, 松田達磨, 青木勇二, 長谷川巧: 強四極子秩序化合物 $CeAg$ の構造相転移の起源

石見聖, 山田瑛, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: 新規 Sm 系化合物 $Sm_3Pt_4X_6$ ($X = Si, Ge$) の単結晶育成

山田瑛, 酒井恭兵, 石見聖, 伏屋健吾, 東中隆二, 青木勇二, 本間佳哉, 本多史憲, 青木大, 松田達磨: $SmIr_2Si_2$ の純良単結晶育成と dHvA 測定

筒井智嗣, 中村仁, 小林義男, 久保謙哉, 依田芳卓, 山田瑛, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, 水牧仁一朗, 佐藤英行: Sm 系重い電子化合物の放射光メスバウアーフィルター

中瀬迅, 三宅遼磨, 久保徹郎, 河瀬良亮, 小手川恒, 藤秀樹, 山田瑛, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: 磁場に鈍感な重い電子系化合物 $SmTa_2Al_{20}$ の Al-NQR/NMR

服部泰佑, 酒井宏典, 徳永陽, 神戸振作, 松田達磨, 芳賀芳範: URu_2Si_2 におけるスピントリニティの強い一軸異方性

神戸振作, 酒井宏典, 徳永陽, 服部泰佑, G. Lapertot, 松田達磨, G. Knebel, J. Flouquet, R.E. Walstedt : YbRh₂Si₂ における Fermi 面の温度依存

岡部碧, 中井祐介, 東中隆二, 宮田耕充, 真庭豊 : NMR 測定を用いたディラック物質 PtSn₄ の磁性の研究

髭本亘, 伊藤孝, 大嶋浩平, 三田昌明, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二 : Nd(O_{1-x}F_x)BiS₂ の μ SR

国内研究会

● 第 10 回物性科学領域横断研究会「凝縮系科学の最前線」 2016 年 12 月 9 日 – 10 日 (神戸大学)

Rajveer Jha, Ryuji Higashinaka, Tatsuma D. Matsuda, Raquel A. Ribeiro and Yuji Aoki : Magneto-transport properties of type-II Weyl semimetal WTe₂ single crystals

大西翔太, 山田瑛, 三田昌明, 松田達磨, 東中隆二, 青木勇二 : BiS₂ 系層状超伝導体の超伝導特性に対する一軸圧効果

山田瑛, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二 : カゴ状化合物 SmT₂Al₂₀ の磁場に鈍感な近藤効果と LaT₂Al₂₀ の超伝導特性

● TMU シンポジウム「U 系及び BiS₂ 系の物理の発展」 2016 年 11 月 28 日 (月) (首都大学南大沢キャンパス)

立岩尚之, 芳賀芳範, 山本悦嗣, 松田達磨, Zachary Fisk : ウラン強磁性超伝導物質 UGe₂ と URhGe の非従来型臨界現象

服部泰祐, 酒井宏典, 徳永陽, 神戸振作, 松田達磨, 芳賀芳範 : 単結晶 URu₂Si₂ における超伝導状態の ²⁹Si ナイトシフト

松田達磨 : BiS₂ 系超伝導体における構造および磁気異常研究の現状 (招待講演)

梶谷丈, 三田昌明, 松田達磨, 青木勇二, 佐賀山基 A, 佐賀山遼子 : LaO_{1-x}F_xBiS₂ における格子変調の F 濃度依存性

山田瑛, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二 : カゴ状化合物 LaT₂Al₂₀ の超伝導特性

● J-Physics 平成 28 年度領域全体会議 2016 年 5 月 26 日 (木) – 28 日 (土) (北海道大学)

Tatsuma D. Matsuda, Hiroaki Mita, Ryuji Higashinaka, Yuji Aoki, Youhei Kono, Shota Nakamura, Shunichiro Kittaka, Toshiro Sakakibara : Heavy fermion like anomalous behavior in NdO_{1-x}F_xBiS₂ superconductor

Joe Kajitani, Hideaki Endo, Hiroshi Takatsu, Takuya Asano, Masaaki Mita, Ryuji Higashinaka, Yuji Aoki, Tatsuma D. Matsuda : Single Crystal Growth and Physical Properties of EuFBiS₂

国際会議

● International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2016), Hangzhou, China, May. 8 – 13, 2016

T. Kubo, R. Miyake, H. Kotegawa, H. Tou, H. Harima, R. Higashinaka, A. Nakama, Y. Aoki, H. Sato, Y. Ihara, T. Goto, T. Sasaki : Single Crystal NMR Studies of PrT₂Al₂₀ Systems ($T = \text{Nb}, \text{Ta}$)

粒子ビーム物性研究室

1. 研究活動の概要

$Tb_2Ti_2O_7$ (図1)は、結晶構造が幾何学的フラストレーションと呼ばれる特殊な性質を持つため、低温でもスピンが秩序化しない「スピン液体」と呼ばれる大変珍しい量子状態を示す物質として1999年の発見以来、精力的に研究されてきた。スピン同士の相互作用のみを考えた最も簡単な理論モデルによるとこの物質は低温でスピン整列すべきであると予想されるが、実際にはそのような整列は観測されていないため、これに代わる様々な理論モデルが提案されてきた。一方、実験的にはスピン液体の性質を示す試料はあるものの、いくつかの試料にはスピン整列の秩序とは異なる「隠れた秩序」ともいべき謎の秩序が度々観測されており、この秩序状態は一体何なのか？ $Tb_2Ti_2O_7$ は本当にスピン液体なのか？という問題を、基礎学術上の大好きな研究テーマのひとつと捉えて研究している。

我々は、数年前に行った多結晶を使った研究から、 $Tb_2Ti_2O_7$ にみられるスピン液体相と隠れた秩序相の問題は $Tb_{2+x}Ti_{2-x}O_{7+y}$ というようにxやyの組成がわずかに異なる効果で理解できること、そして、組成xをわずか1%以下と極微少量変化させるとスピン液体から長距離秩序を誘発でき、それが量子相転移として起きている可能性を報告した。秩序の起源が何であるのか決定的にはわからなかったものの、組成をよくコントロールした純良な単結晶を使った実験研究と新しい視点に立った理論研究からのアプローチが $Tb_2Ti_2O_7$ のスピン液体やその近くにあらわれる謎の秩序を理解する上で重要と考えて研究を行って来た。

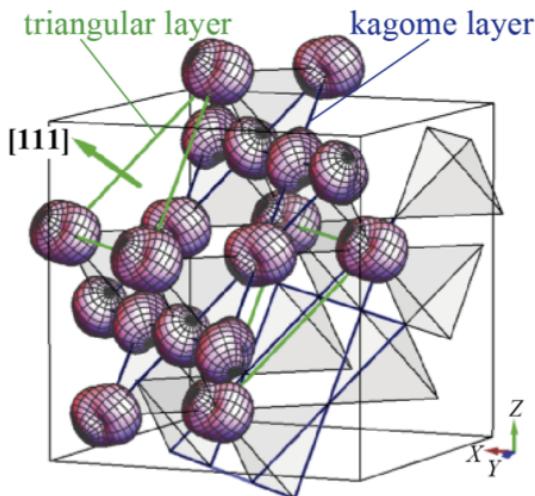


図1: $Tb_2Ti_2O_7$ の結晶構造と四極子秩序構造。 $Tb_2Ti_2O_7$ は、パイロクロア格子呼ばれる四面体(グレーのピラミッド)が点共有で3次元的に連なった構造を形成する。四面体頂点にはテルビウムイオンが配置しており、紫色の歪んだ球は四極子秩序後のテルビウムイオンの電荷分布を表す。パイロクロア格子は、[111]方向に三角格子面とカゴメ格子面が交互に積層する2次元的な特徴も持っている。

その後、長距離秩序の性質を示す $Tb_2Ti_2O_7$ の純良な単結晶を世界に先駆けて合成することについに成功し、その単結晶を使って磁場中における比熱や磁化の精密な物性測定、そして中性子散乱実験に取り組んだ。また、低温状態の $Tb_2Ti_2O_7$ ではTbイオンに内在する「電気四極子」と呼ばれる電子軌道の自由度が秩序相やスピン液体相の出現に重要な役割を担うことが理論的に指摘されていたので、実験結果を理解するために電気四極子の寄与を取り入れた理論モデルを考慮して解析を行った。その結果、 $Tb_2Ti_2O_7$ の様々な実験結果は、量子スピンアイスという量子液体相に非常に近いところに位置する四極子秩序相の

パラメーターで説明できることが分かった。この結果は Tb イオンと Ti イオンの 比率を 1 %以下の極微少量で変化させると、 $Tb_2Ti_2O_7$ がスピニ液体のものから長距離秩序のものに変わるという実験結果とも良く一致する。従って、これまで明らかにされてこなかった $Tb_2Ti_2O_7$ の謎の長距離秩序の問題は、純良な単結晶を得て実験ができたこと、そして新しい視点に立ってその理論的解釈ができたことにより、テルビウムイオンが持つ電気四極子の自由度の秩序化であると約 20 年の時を経て解明されたと言える。
(H. Takatsu et al. PRL 116, 217201 (2016) and <http://www.tmu.ac.jp/news/topics/12819.html>)

2. 研究業績

1) 論文

H. Takatsu, S. Onoda, S. Kittaka, A. Kasahara, Y. Kono, T. Sakakibara, Y. Kato, B. Fâk, J. Ollivier, J. W. Lynn, T. Taniguchi, M. Wakita, H. Kadowaki: Composite spin and quadrupole wave in the ordered phase of $Tb_{2+x}Ti_{2-x}O_{7+y}$, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 217201 (2016).

2) 学会講演

国際会議

● The 8th International Conference on Highly Frustrated Magnetism (HFM 2016), Taipei, Taiwan, Sept. 7 - 11, 2016

H. Takatsu, T. Taniguchi, S. Kittaka, T. Sakakibara, H. Kadowaki: Thermodynamic properties of quadrupolar states in the frustrated pyrochlore magnet $Tb_2Ti_2O_7$.

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。2016年度の主な研究・教育活動の概要は以下のとおりである。

1) 単層カーボンナノチューブの熱電物性

本研究室では、高純度半導体型単層カーボンナノチューブ (SWCNT) フィルムが実用熱電材料に匹敵する大きなゼーベック係数 S (発生熱起電力と試料両端の温度差の比) を有することを見出している (東京理科大学との共同研究)。しかしながら、 S の絶対値は半導体型 SWCNT の理論予測値の 10 分の 1 程度以下しかなく、フィルムへの金属的 SWCNT の混入、および SWCNT – SWCNT 接合の存在がフィルムの熱電物性に与える効果の重要性を指摘した。すなわち金属的 SWCNT のわずかな混入により半導体型 SWCNT の S の絶対値が急激に減少すること、一方で SWCNT – SWCNT 接合はフィルムの S の絶対値にはほとんど影響を与えないが、電気抵抗率を急激に増大させ、フィルムの熱電パフォーマンスを悪くすることを明らかにした。このことより、フィルムの”高品質化”により潜在的パワーファクター P (発電電力量の目安) を現状の 10 倍以上, $1000\mu\text{W}/(\text{mK}^2)$ 以上とすることが可能であるとの予測を行った。この SWCNT フィルムの巨大な P 値は、ごく最近、金属・半導体型混合試料について実際に確認された (W. Zhou *et al.*, Small 12, 3407-3414 (2016))。本年度は、さらにパフォーマンスの向上をめざし、高濃度ホールドーピングの実験的・理論的研究を行った。SWCNT の 1 次元バンドが多重に重なる位置にフェルミレベルをチューニングすることにより、パワーファクター P を著しく改善できることを示した。また、SWCNT フィルムを柔軟な熱電変換素子として利用する場合、薄いフィルム膜方向に有効な温度差を確保する技術の開発が重要である。本年度は、このような素子構造を研究し、熱電素材をフィルム面に対して平行に配置したテープ状形状の素子を提案した (本郷 卒業研究)。

2) 制限空間内の水

水はあらゆるところに存在する。地殻や土壤、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 種類の水に関する第 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、直径の太い SWCNT において、室温で吸着された水が低温で外部に排出される wet-dry 転移機構の研究を行い、その機構を明らかにした。さらに低温で排出されないで内部に残された水が何らかの構造相転移を起こすことを見出した。

3) ナノ構造物質の電子状態および核磁気共鳴 (NMR) による研究

SWCNT などの電子状態を明らかにする目的で微視的プローブである NMR による研究を行った。精製処理により磁性不純物を除去した太い SWCNT 試料の ^{13}C -NMR 測定を行った。スピニ格子緩和時間の測定を行い、ナノチューブが束 (バンドル) を組んだ際の 1 次元金属特有の朝永-ラッティンジャー的電子状態に注目して検討した。その結果、バンドルを組むことによって電子相関が変化し、特に金属型 SWCNT の

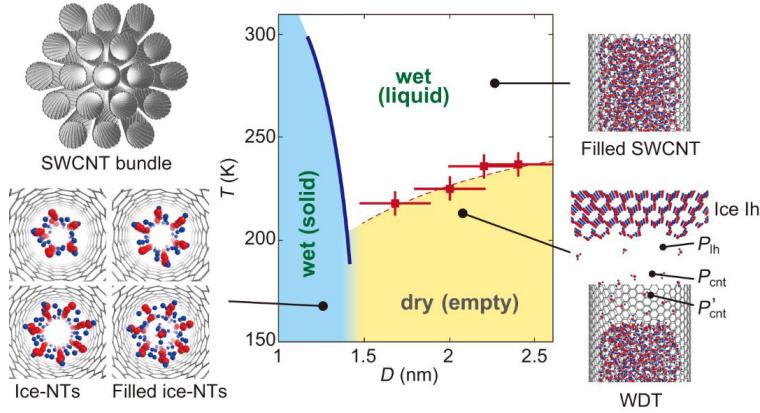


図 1: 単層カーボンナノチューブ内の水の相図. 太い SWCNT は低温で疎水的となり, 水が蒸発する.

みからなるバンドルの場合に電子相関が顕著に抑制されることがわかった(芹田修士論文). ナノカーボン系の三次元版ともいえる三次元 Dirac 電子系候補物質である, PtSn_4 の単結晶合成を行い, ナノカーボン系に普遍的に見られる大きな反磁性を持つことを確認した. また, この物質がグラフェンとは異なる, Dirac Line node と呼ばれる特異な電子状態をもつ可能性を NMR 測定と第一原理計算から指摘した(岡部卒業研究, 電子物性研 東中氏との共同研究)

4) ナノ構造炭素の構造と磁性の研究

グラファイト様ナノ炭素は, 微妙な構造の違いに依存する大きな軌道反磁性をもつ. そこで, 多種類のナノ炭素について, 磁性と構造の相関を研究した. ナノ炭素の軌道反磁性が, 積層構造の微妙な違いに敏感であることが確認された(中村修士論文). また有限サイズのナノグラフェンの構造について分子動力学計算を行った. 有限サイズの多層グラフェンにおいて, 高温において表面融解現象を示唆する結果を得た(深澤修士論文).

5) 新規原子層および原子層ヘテロ構造の結晶成長と物性解明

原子層物質のヘテロ構造は, 従来にはない人口二次元構造として, 特異な物性の発現や光・電子デバイス応用が期待されている. われわれは, 化学気相成長を利用し, 二硫化モリブデンや二硫化タン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く. 特に, 化学気相成長を利用して新しい試料合成に取り組み, 様々な異種元素を含む TMDC や, セレン系の原子層の合成手法を確立してきた. 具体的には, ニオブを不純物として含む二硫化タンゲステン原子層の合成と発光特性の解明(佐々木修士論文, AIST, 京都大学との共同研究), モリブデン・レニウムが混在した单層カルコゲナイト合金の作製と電子状態の解明(森修士論文, 筑波大学, AIST との共同研究), レニウムをドープした单層二硫化モリブデンの電気伝導特性(吉村卒業研究, AIST との共同研究), 二セレン化タンゲステンの合成と電界効果トランジスタの作製(高口卒業研究, 名古屋大学との共同研究)について進めてきた. 今後, 多様な性質を持つ TMDC を複合化したヘテロ構造を作製し, 光・電子物性の制御やデバイス応用へと展開していく.

6) 圧力下 ESR による β' -(BEDT-TTF)₂ICl₂ の電子状態

有機電荷移動錯体 β' -(BEDT-TTF)₂ICl₂ は加圧によって、常圧での絶縁体状態から金属状態へ変化していき、8.2 GPa 以上の圧力下で有機導体としては高い転移温度 14.2 K で超伝導転移を示す。本研究では、常圧の電子状態から圧力下での金属的状態に変化する様子を、圧力下 ESR を用いて磁性の面から調べるために、高圧下（3~10 GPa）測定用のキュービックアンビルセルを利用した ESR 装置開発を進めている。これまで ESR シグナルのベースラインの大きな歪みが大きな課題であったが、試料を収めるガスケットの形状を工夫することで解決できた。これは物性研のグループにより見出されたもので、立方体状ガスケットの各面を、アンビルの先端にフィットするようにあらかじめ加工しておき、初期の加圧が安定して行えるようにするものである。このため、内部の高周波用コイルの歪みが避けられ、また、アンビルに取り付けた静磁場コイルの位置もくるわず静磁場の一様性が保たれると考えられる。これによって、ESR 標準試料 DPPH を用いて、80 ton（約 8 GPa）まで歪みがなく、信号の線幅や面積の解析ができる信号を得ることができた。また、アンビルの材質としては、非磁性のジルコニア (ZrO₂)、金属の炭化カーバイド (WC) どちらも、信号を歪めることなく使用できることがわかった。（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

KEK 放射光施設において共同利用研究を行った。課題名（課題番号）：配向カーボンナノチューブおよびグラフェンの構造研究（2016G634）

京都大学エネルギー理工研究所において顕微分光実験を行った。課題名（課題番号）：光機能性原子層ヘテロ構造の開発（ZE28A-15）

2. 研究業績

1) 論文

Yu Kobayashi, Takashi Taniguchi, Kenji Watanabe, Yutaka Maniwa and Yasumitsu Miyata: "Slidable atomic layers in van der Waals heterostructures", *Applied Physics Express*, **10** (2017) 045201

M. Ichida, K. Nagao, Y. Ikemoto, T. Okazaki, Y. Miyata, A. Kawakami, H. Kataura, I. Umezu, H. Ando: "e-beam irradiation effects on IR absorption bands in single-walled carbon nanotubes" *Solid State Commun.*, **250** (2017) 119-122.

Noboru Serita, Yusuke Nakai, Kazuyuki Matsuda, Kazuhiro Yanagi, Yasumitsu Miyata, Takeshi Saito and Yutaka Maniwa: "Intertube effects on one-dimensional correlated state of metallic single-wall carbon nanotubes probed by ¹³C NMR", *Physical Review B*, **95** (2017) 035128

Hideki Kawai, Mitsunari Sugahara, Ryotaro Okada, Yutaka Maniwa, Yohei Yomogida and Kazuhiro Yanagi: "Thermoelectric properties of WS₂ nanotube networks", *Applied Physics Express*, **9** (2017) 015001

Daisuke Hayashi, Yusuke Nakai, Haruka Kyakuno, Takahiro Yamamoto, Yasumitsu Miyata, Kazuhiro Yanagi and Yutaka Maniwa: "Improvement of thermoelectric performance of single-wall carbon nanotubes by heavy doping: Effect of one-dimensional band multiplicity", *Applied Physics Express*, **9** (2016) 125103

Haruka Kyakuno, Mamoru Fukasawa, Ryota Ichimura, Kazuyuki Matsuda, Yusuke Nakai, Yasumitsu Miyata, Takeshi Saito and Yutaka Maniwa: "Diameter-dependent hydrophobicity in carbon nanotubes", *The Journal of Chemical Physics*, **145** (2016) 064514

Yu Kobayashi, Shoji Yoshida, Ryuji Sakurada, Kengo Takashima, Takahiro Yamamoto, Tetsuki Saito, Satoru Konabe, Takashi Taniguchi, Kenji Watanabe, Yutaka Maniwa, Osamu Takeuchi, Hidemi Shigekawa and Yasumitsu Miyata: "Modulation of electrical potential and conductivity in an atomic-layer semiconductor heterojunction", *Scientific Reports*, **6** (2016) 31223

Shogo Sasaki, Yu Kobayashi, Zheng Liu, Kazutomo Suenaga, Yutaka Maniwa, Yuhei Miyauchi and Yasumitsu Miyata: "Growth and optical properties of Nb-doped WS₂ monolayers", *Applied Physics Express*, **9** (2016) 071201

Mitsunari Sugahara, Hideki Kawai, Yohei Yomogida, Yutaka Maniwa, Susumu Okada and Kazuhiro Yanagi: "Ambipolar transistors based on random networks of WS₂ nanotubes", *Applied Physics Express*, **9** (2016) 075001

J. Nozaki, Y. Kobayashi, Y. Miyata, Y. Maniwa, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Yanagi "Local optical absorption spectra of h-BN-MoS₂ van der Waals heterostructure revealed by scanning near-field optical microscopy" *Jpn. J. Appl. Phys.*, **55** (2016) 06GB01-1-3.

H. Sakamoto, E. Mori *et al.*: Wavefunction Analysis of STM Image: Surface Reconstruction of Organic Charge Transfer Salts, *Microscopy and Analysis* , (355-379) (2016) (DOI: 10.5772/63406)

2) 著書

K. Mizoguchi and H. Sakamoto: DNA Engineering: Properties and Applications, ?it PanStanford, Singapore, (2016) (ISBN: 9789814669467)

3) 特許

特許願 2017-015613 热発電素子 平成 29 年 1 月 31 日, 公立大学法人 首都大学東京, 真庭豊, 中井祐介, 本郷直也, 客野遙

4) 学会講演

● 日本物理学会 第 72 回年次大会 2017 年 3 月 17-20 日 (大阪大学 豊中キャンパス)

客野遙, 松田和之, 中井祐介, 市村遼太, 斎藤毅, 宮田耕充, 真庭豊: 单層カーボンナノチューブに内包された水のダイナミクスと相転移挙動

深澤衛, 客野遙, 市村遼太, 松田和之, 中井祐介, 宮田耕充, 斎藤毅, 真庭豊: カーボンナノチューブ内包水の wet-dry 転移: 古典分子動力学法を用いた研究

野崎純司, 福村武蔵, 青木孝晶, 真庭豊, 蓬田陽平, 柳和宏: 電界効果近接場による单層 MoS₂ 薄膜の局所キャリア注入と構造制御

小林佑, 吉田昭二, 櫻田龍司, 高島健悟, 山本貴博, 斎藤哲輝, 小鍋哲, 谷口尚, 渡邊賢司, 真庭豊, 武内修, 重川秀実, 宮田耕充: WS₂/MoS₂ ヘテロ構造における一次元閉じ込めポテンシャルの形成

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

佐々木将悟, 小林佑, 劉崑, 長谷川勇介, 末永和知, 真庭豊, 宮内雄平, 宮田耕充: 单層 Nb ドープ WS₂ の成長と光学的性質

沢辺健太朗, 柳川勇治, 林大介, 中井祐介, 客野遙, 宮田耕充, 斎藤毅, 真庭豊: 配向单層カーボンナノチューブフィルムの熱電物性

林大介, 柳川勇治, 沢辺健太朗, 中井祐介, 客野遙, 宮田耕充, 山本貴博, 斎藤毅, 真庭豊: 单層カーボンナノチューブ薄膜の熱電物性: 接合界面の効果

中村洋仁, 客野遙, 中井祐介, 宮田耕充, 真庭豊: ナノ炭素材料の軌道反磁性

中村洋仁, 客野遙, 中井祐介, 宮田耕充, 真庭豊: NMR 測定を用いたディラック物質 PtSn₄ の磁性の研究

● 日本物理学会 2016 年秋季大会 2016 年 9 月 13-16 日 (金沢大学 角間キャンパス)

林大介, 上田智大, 中井祐介, 客野遙, 宮田耕充, 山本貴博, 斎藤毅, 畠賢治, 真庭豊: 单層カーボンナノチューブ薄膜の熱電物性の直径依存性

中井祐介, 林大介, 客野遙, 山本貴博, 宮田耕充, 柳和宏, 真庭豊: 高濃度ドーピングによる单層カーボンナノチューブ薄膜の熱電物性の向上

一ノ瀬遙太, 中村昌稔, 河合英輝, 真庭豊, 蓬田陽平, 柳和宏: 金属型单層カーボンナノチューブにおける高ゼーベック・低抵抗状態での光熱電変換現象

野崎純司, 佐々木将悟, 宮田耕充, 真庭豊, 蓬田陽平, 柳和宏: 広帯域近接場分光測定による Nb ドープ WS₂ 单層薄膜の局所光吸収構造の解明

客野遙, 光山遼, 高部陽介, 松田和之, 中井祐介, 宮田耕充, 西原洋知, 京谷隆, 真庭豊: ナノ細孔を用いた新規アモルファス希ガス固体の作製

● 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会 2016 年 9 月 13-16 日 (朱鷺メッセ)

沢辺 健太朗, 柳川 勇治, 林 大介, 中井 祐介, 客野 遙, 宮田 耕充, 斎藤 毅, 真庭 豊: 配向した单層カーボンナノチューブ試料の熱電物性

小川峻, 小林佑, 真庭豊, 宮田耕充: 窒化ホウ素をテンプレートとしたグラフェンの CVD 成長

佐々木將吾, 小林佑, 劉崑, 末永和知, 真庭豊, 宮内雄平, 宮田耕充: 单層 Nb ドープ WS₂ の成長と光学的性質

齊藤哲輝, 小林佑, 渡邊賢司, 谷口尚, 真庭豊, 宮田耕充: 電界効果による二層 MoS₂ のバンドギャップ変調

小林佑, 吉田昭二, 櫻田龍司, 島 健悟, 山本 貴博, 齊藤 哲輝, 小鍋 哲, 渡邊賢司, 谷口尚, 真庭豊, 重川秀実, 宮田耕充: WS₂/MoS₂ ヘテロ構造における一次元閉じ込めポテンシャルの形成

森勝平, 佐々木将悟, 小林佑, 劉崑, 吉田昭二, 竹内高広, 重川秀実, 末永和知, 真庭豊, 宮田耕充: 单層 Mo_{1-x}RexS₂ 合金の成長と評価

宮田耕充: 面内原子層ヘテロ接合の成長と評価

● 第 51 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 2016 年 9 月 7~9 日 (北海道立道民活動センター)

宮田耕充: Growth and characterization of in-plane atomic layer heterostructures

小川峻, 小林佑, 真庭豊, 宮田耕充 : CVD growth of graphene using boron nitride as growth templates

佐々木將吾, 小林佑, 劉崢, 末永和知, 真庭豊, 宮内雄平, 宮田耕充 : Growth and optical properties of Nb-doped WS₂ monolayers

吉村真太郎, 小林佑, 小川峻, 佐々木将悟, 真庭豊, 宮田耕充 : Probing interface strain in graphene and boron nitride in-plane heterostructures

小林佑, 吉田昭二, 櫻田龍司, 島 健悟, 山本 貴博, 斎藤 哲輝, 小鍋 哲, 渡邊賢司, 谷口尚, 真庭豊, 重川秀実, 宮田耕充 : Formation of 1D confining potential in MoS₂/WS₂-based heterostructures

森勝平, 佐々木将悟, 小林佑, 劉崢, 吉田昭二, 竹内高広, 重川秀実, 末永和知, 真庭豊, 宮田耕充 : Growth and characterization of monolayer Mo_{1-x}R_xS₂ alloys

齊藤哲輝, 小林佑, 渡邊賢司, 谷口尚, 真庭豊, 宮田耕充 : Bandgap modulation of bilayer MoS₂ by electric field effect

● シリコン材料・デバイス研究会 (SDM) 2016 年 6 月 29 日

宮田耕充 : 遷移金属ダイカルコゲナイト原子層の成長と評価

国際会議

● The 9th Singapore International Chemical Conference (SICC-9) 2016 年 12 月 12 日

宮田耕充 : Growth and electronic properties of MoS₂/WS₂ lateral heterostructures

表界面光研究室

1. 研究活動の概要

本研究室では、(1) ナノ物質の界面を制御することによりその表面物性を制御すること、(2) ナノ物質の光物性、の二つを主たる課題として研究活動を行っている。主として、単層カーボンナノチューブ(SWCNT) や二次元原子層材料に代表されるナノ物質を研究材料として用いて、単体、複合構造、およびそれらの特異な高次構造における新奇物性探索・物質創製・技術開発・デバイス開発を行っている。最近では、イオン液体を電解質として用い、物質界面に電気二重層を形成させ、キャリア注入を行い、フェルミレベルを自在にシフトさせ、様々な多様な物性を制御する研究を進めている。また、近接場分光技術を開発し局所構造とその光物性との相関の解明を進めている。

1) 光物性研究

電界効果近接場分光測定技術の開発と原子層材料の構造制御と局所光物性 遷移金属カルコゲナイト(TMDC)は層状化合物の一つであり、その多層試料の光物性は1980年代には数多く研究されている。しかし、単層試料や異なる種類のTMDCが積層あるいは平面接合したヘテロ試料が創成され、新たな物性が見い出され、基礎科学・応用の両面から、近年、極めて活発に研究がなされている。最近では、MoS₂やWSe₂において2H構造(半導体相)と1T構造(金属相)間の転移がドーピング・アニーリングにより制御可能であることが報告されている。TMDCにおける新たな光物性は、構造欠陥・グレインバウンダリ(GB)・接合界面といった特異な局所構造において顕著に見られる。例えば、構造欠陥は、発光増強や単一光子発生が見られ量子情報への応用が報告され、GBは非線形光学特性の顕著な増強が知られている。原子層におけるこの特異なサイトは、ダイヤモンドのNVセンターのような量子情報・センサ応用の可能性があり、その基礎物性の解明は緊急性の高い。しかし、これら局所サイトにおける光物性の理解は不十分である。例えば、欠陥由来の束縛励起子からの発光はゲート電圧に大きく依存するが、局所構造と励起子の電場応答特性との対応関係は正確には分かっていない。

そこで我々は、これら特異なサイトで現れる光物性を正確に理解し制御する為には、局所サイトであらわれる光学特性をダイレクトに電界変調できる技術開発が重要であると着眼し、研究を進めている。そのアプローチとして、近接場分光測定技術(SNOM)と電界印加の技術を組み合わせることを検討している。近接場分光測定技術とは、カンチレバの先端にあるナノサイズの孔(60~90nm)において発生する近接場光を用いる分光法である。この近接場光と試料との相互作用により発生した伝播光を対物レンズで検出することで、回折限界を超えた分解能で試料の光学特性を解明可能である。試料が厚いバルクな試料の場合は測定が困難であるが、原子層という単層試料においてはサイトにダイレクトにアクセス可能である為、の局所物性を正確に観測できる特徴を有する。これまで原子層材料に用いられてきたSNOM技術は、その局所発光測定に限られ、最も基本的な光学特性である光吸収スペクトルと局所構造との対応を解明した研究は皆無であった。昨年度は、所有の近接場分光測定装置に広帯域レーザー光源(スーパーコンティニューム光源、SR光源)を組み合わせ、回折限界を超えた分解能で局所的な光吸収・発光スペクトルを取ることに成功した。今年度は、カンチレバの先端より電界を印加する機構を設け、局所的にキャリア注入制御を行い、MoS₂ 単層試料の局所発光の変調が可能であることを明らかにした。更には、電界印加と近接場光照射を組み合わせることにより、局所的に MoS₂ 試料をエッティングすることができることを明らかにした。

2) 低次元ナノ物質系における電子物性とその制御

SWCNTの熱電物性の制御 電気二重層キャリア注入の技術により、SWCNTのフェルミレベルを大きくシフトさせることが可能である。低次元材料、特に一次元材料は、熱電変換性能が高いことが知られている。しかしながら、その性能は大きくフェルミレベルに依存する。我々は、電気二重層キャリア注入技術を発展させ、半導体型SWCNTのゼーベック係数のフェルミレベル依存性を解明し、P型・N型の両方のゼーベック係数制御を行ってきた。現在では、カイラリティ・フェルミレベルおよび熱電特性の三者の関係を解明することを目標に研究を進めている。特に、(6,5)SWCNTにおいて、電荷中性点近傍での振舞いが理論的な予想と大きく異なっていた問題があった。その問題を解決する為、今年度は、(6,5)SWCNTの高純度化に取り組み、純度99%の高純度(6,5)SWCNTを得ることに成功した。同試料に対して熱電測定を行うことにより、半導体型SWCNTにおける熱電特性のフェルミレベル依存性を理論との関係を正確に議論できる状況となった。

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

SWCNTで行ってきたフェルミレベル操作による物性制御の技術が他の一次元物質系においても可能かどうか検証する為、今年度は二次元物質である遷移金属カルコゲナイトが筒状になった遷移金属カルコゲナイトチューブに対して、電気二重層キャリア注入の研究を昨年度より行っている。昨年度においては、明確な両極性の動作を実現することに成功した。WS₂ナノチューブにおいて、世界ではじめての両極性動作を実現することに成功した。WS₂がカイラリティに依存せずに全て半導体的性質を示すことに着目し、その熱電特性の評価を行った。キャリアが注入されていない状況においては、ゼーベック係数を評価することが出来なかったが、キャリア注入とともに、伝導パスが形成され、その結果、P型およびN型の比較的きな($< 200 \mu V K^{-1}$)ゼーベック係数を示すことを明らかにした。

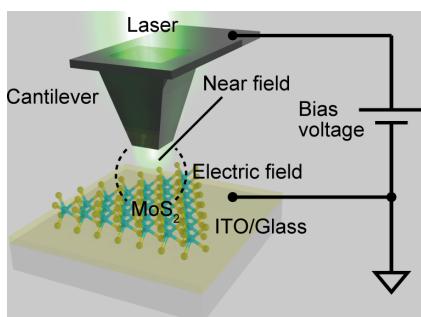


図1: 電界効果近接場分光測定系の開発とMoS₂試料の構造制御と光物性

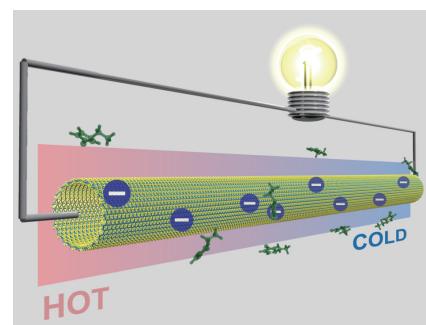


図2: WS₂ナノチューブの熱電物性の制御

2. 研究業績

1) 論文

J. Nozaki, Y. Kobayashi, Y. Miyata, Y. Maniwa, K. Watanabe, T. Naniguchi, K. Yanagi, "Local optical absorption spectra of h-BN-MoS₂ van der Waals heterostructure revealed by scanning near-field optical microscopy", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **55**, (2016) 06GB01

J. Nozaki, S. Mori, Y. Miyata, Y. Maniwa, K. Yanagi, "Local optical absorption spectra of MoS₂ monolayers obtained using scanning near-field optical microscopy measurements", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **55**, (2016) 038003

S. Shimizu, T. Iizuka, K. Kanahashi, J. Pu. K. Yanagi, T. Takenobu, Y. Iwasa, "Thermoelectric detection of multi-subband density of states in semiconducting and metallic single walled carbon nanotubes", *Small*, 12, (2016) 3388

M. Sugahara, H. Kawai, Y. Yomogida, Y. Maniwa, S. Okada, K. Yanagi: "Ambipolar transistors based on random networks of WS₂ nanotubes", *Appl. Phys. Express*, 9 (2016) 075001

D. J Mowbray, A. P. Paz, G. Ruiz-Soria, M. Sauer, P. Lacovig, M. Dalmiglio, S. Lizzit, K. Yanagi, A. Goldoni, T. Pichler, P. Ayala, A. Rubio: "Disentangling Vacancy Oxidation on Metallicity-Sorted Carbon Nanotubes", *J. Phys. Chem. C*, 120 (2016) 18316-18322

D. Hayashi, Y. Nakai, H. Kyakuno, T. Yamamoto, Y. Miyata, K. Yanagi, Y. Maniwa: "Improvement of thermoelectric performance of single-wall carbon nanotubes by heavy doping: Effect of one-dimensional band multiplicity", *Appl. Phys. Express*, 9 (2016) 125103

B. Anis, K. Yanagi, C. A. Kuntscher: "Optical microspectroscopy study on enriched (11,10) SWCNTs encapsulating C₆₀ fullerene molecules", *Carbon*, 107 (2016) 593-599

Y. Yomogida, T. Tanaka, M. Zhang, M. Yudasaka, X. Wei, H. Kataura,: "Industrial-scale separation of high-purity single-chirality single-wall carbon nanotubes for biological imaging", *Nat. Commun.*, 7 (2016) 12056

A. Hirano, T. Kameda, Y. Yomogida, M. Wada, T. Tanaka, H. Kataura: "Origin of the Surfactant-Dependent Redox Chemistry of Single-Wall Carbon Nanotubes", *ChemNanoMat*, 2 (2016) 911-920

X. Wei, T. Tanaka, Y. Yomogida, N. Sato, R. Saito, H. Kataura: "Experimental Determination of Excitonic Band Structures of Single-Wall Carbon Nanotubes using Circular Dichroism Spectra", *Nat. Commun.*, 7 (2016) 12899

2) 特許

特許願 2017-037805 単一カーボンナノチューブの製造方法 平成 29 年 2 月 28 日, 公立大学法人 首都大学東京, 柳和宏, 蓬田陽平, 一ノ瀬遙太

3) 学会講演

● 第 51 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 2016 年 9 月 7-9 日（北海道立道民活動センター）

J. Eda, Y. Yomogida, K. Yanagi: Bolometric performance of highly purified (6,5) Single Walled Carbon Nanotubes

M. Sugahara, K. Hideki, Y. Yomogida, Y. Maniwa, S. Okada, K. Yanagi: Ambipolar transistors based on random networks of WS₂ nanotubes

● 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会 2015 年 9 月 13-16 日（朱鷺メッセ）

岡田遼太朗, 菅原光成, 河合英輝, 蓬田陽平, 真庭豊, 岡田晋, 柳和宏: WS₂ ナノチューブを用いた両極性トランジスタ

中村昌稔, 一ノ瀬遙太, 河合英輝, 蓬田陽平, 柳和宏: ゼーベック係数を精密制御された金属型・半導体型カーボンナノチューブ薄膜における光熱電変換

K. Yanagi: Optical and Photo-thermoelectric Properties of Fermi Level tuned Single Walled Carbon Nanotubes with Selected electronic Structure (招待講演)

● 日本物理学会 2016 年秋季大会 2016 年 9 月 13–16 日 (金沢大学)

一ノ瀬遙太, 中村昌稔, 河合英輝, 真庭豊, 蓬田陽平, 柳和宏: 金属型单層カーボンナノチューブにおける高ゼーベック・低抵抗状態での光熱電変換現象

野崎純司, 佐々木将悟, 宮田耕充, 真庭豊, 蓬田陽平, 柳和宏: 広帯域近接場分光測定による Nb ドープ WS₂ 单層薄膜の局所光吸収構造の解明

● 第 52 回 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム 2017 年 3 月 1–3 日 (東京大学)

J. Nozaki, M. Fukumura, T. Aoki, Y. Maniwa, Y. Yomogida, K. Yanagi: Tuning of local optical properties of MoS₂ monolayer and its structural control using electric-field-effect scanning near-field optical microscopy techniques

Y. Ichinose, J. Eda, Y. Maniwa, Y. Yomogida, K. Yanagi: Extraction of High-Purity Single-Chirality Single-Wall Carbon Nanotubes by Precise Tuning of pH using CO₂ Bubbling

M. Nakamura, Y. Ichinose, H. Kawai, Y. Yomogida, K. Yanagi: Tuning of Photo-thermoelectric effect of Metallic and Semiconducting Single-wall carbon nanotube thin films by electrolyte gating

● 第 64 回 応用物理学会春季学術講演会 2017 年 3 月 14–17 日 (パシフィコ横浜)

野崎純司, 福村武蔵, 青木孝晶, 真庭豊, 蓬田陽平, 柳和宏: 電界効果近接場による单層 MoS₂ 薄膜の局所キャリア注入と構造制御

● 日本物理学会 第 72 回年次大会 2017 年 3 月 17–20 日 (大阪大学)

野崎純司, 福村武蔵, 青木孝晶, 真庭豊, 蓬田陽平, 柳和宏: 電界効果近接場による单層 MoS₂ 薄膜の局所キャリア注入と構造制御

柳和宏: ナノチューブの熱電特性 (招待講演)

● 東京理科大学ナノカーボン研究部門ワークショップ 2016 2017 年 3 月 13 日 (東京理科大学)

柳和宏: ナノチューブ熱電物性の制御 (招待講演)

● 物性研短期研究会 2016 年 12 月 21 日 (東京大学)

柳和宏: 原子層の近接場分光と電界効果 (招待講演)

● WITec workshop 2016 年 10 月 25 日 (神奈川県)

柳和宏: 原子層における近接場分光 (招待講演)

● 蔵王 16 研究会 2016 年 7 月 19–20 日 (山形県)

Y. Yomogida, M. Sugahara, H. Kawai, Y. Maniwa, S. Okada, K. Yanagi: Ambipolar transistors based on random networks of WS₂ nanotubes

● 高分子・ハイブリッド材料研究センター若手フォーラム 2017年2月27日（東北大大学）

蓬田陽平: 1次元物質の構造制御と物性研究 （招待講演）

国際会議

● APS March Meeting 2017年3月13–17日 (New Orleans, USA)

Y. Yomogida, H. Kawai, M. Sugahara, R. Okada, K. Yanagi: Ambipolar behavior and thermoelectric properties of WS₂ nanotubes

● International Winter school of Electronic properties of Novel Materials (IWEPNM 2017) 2016年3月4–11日 (Kirchberg, Austria)

J. Nozaki, M. Fukumura, T. Aoki, Y. Maniwa, Y. Yomogida, K. Yanagi: Tuning of local optical properties of MoS₂ monolayer and its structural control using electric-field-effect scanning near-field optical microscopy techniques

● FET workshop 2016 2016年9月7–11日 (Minnesota, USA)

K. Yanagi: Control of Physical Properties of Nanotubes by Electrolyte Gating (Invited)

● 29th International Microprocessess and Nanotechnoloogy Conference (MNC 2016) 2016年11月8–11日 (Kyoto, Japan)

M. Sugahara, H. Kawai, Y. Yomogida, Y. Maniwa, S. Okada, K. Yanagi: Ambipolar Transistors Based on Random Networks of WS₂ Nanotubes

ソフトマター研究室

1. 研究活動の概要

ソフトマターとは、高分子や液晶、ゴムといった”柔らかい”物質群の総称であり、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。我々の研究室では、主にソフトマターの相転移ダイナミクスや非平衡系に興味を持って、研究を行っている。

1) 温度勾配下における熱エネルギー輸送

界面活性剤・水混合系では、界面活性剤が二分子膜を形成し、その二分子膜がトポロジ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) ゲルの熱対流

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

3) 高分子ブレンドの結晶化ダイナミクス

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

4) 細胞性粘菌の凝集ダイナミクス

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

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

5) 泡沫の状態間転移

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

2. 研究業績

1) 論文

K. U. Kobayashi, N. Oikawa and R. Kurita : Thermal convection in a thermosensitive viscous fluid with inhomogeneous cooling, Journal of Physical Society of Japan **86**, 043402 (2017).

Y. Furuta, N. Oikawa and R. Kurita : Close relationship between a dry-wet transition and a bubble rearrangement in two-dimensional foam, Scientific Reports **6**, 37506 (2016).

K. U. Kobayashi, N. Oikawa and R. Kurita : Common dynamical features for thermal convection in Golden Syrup and a gelatin solution, Journal of Physical Society of Japan **85**, 104402 (2016).

N. Oikawa, D. Tahara and R. Kurita : One-way diffusion of ionic liquids in a mixing process with water, Journal of Physical Society of Japan **85**, 093001 (2016).

N. Oikawa and R. Kurita : A new mechanism for dendritic pattern formation in dense systems, Scientific Reports **6**, 28960 (2016).

2) 学会講演

● 4th International Soft Matter Conference, September 12-16, 2016 (Grenoble, France)

K. U. Kobayashi, N. Oikawa, R. Kurita : Dynamical transition of thermal convection in a physical gel near the sol-gel transition (Poster)

N. Oikawa, R. Kurita : Mixing dynamics of ionic liquids/water systems (Poster)

● 日本物理学会 2016 年秋季大会（金沢大学 角間キャンパス）

森永 恒希, 及川 典子, 栗田 玲 : カリミョウバンの再結晶に対する混合塩溶液の効果

吉田 祐二朗, 及川 典子, 栗田 玲 : 泡沫における dry-wet 転移と力学特性

栗田 玲 : トリガー誘起相分離のパターン形成

石崎 健太, 及川 典子, 栗田 玲 : イソ酪酸-水系の溶解過程における非平衡ダイナミクス

深川 啓太, 及川 典子, 栗田 玲 : 溶液中におけるイオン液体のアーメバ運動の発現

● 第15回 関東ソフトマター研究会（首都大学東京 南大沢キャンパス）

及川 典子, 栗田 玲 : 薄膜への溶解に伴う溶液界面のアクティブ運動

小林 和也, 及川 典子, 栗田 玲 : ゼラチンを用いたくさび型における対流ダイナミクス

深川 啓太, 及川 典子, 栗田 玲 : イオン液体の溶液中におけるアーメバ運動の観察

森永 恒希, 及川 典子, 栗田 玲 : 混合溶液中におけるカリミョウバンの結晶化

石崎 健太, 及川 典子, 栗田 玲 : イソ酪酸-水系を用いた溶解過程における非平衡ダイナミクスの観察

● 日本物理学会 第72回年次大会（大阪大学 豊中キャンパス）

小林 和也, 栗田 玲 : 混合溶液系における異常対流

及川 典子, 栗田 玲 : 高密度粒子系における樹枝状パターン形成の数理モデル

栗田 玲 : 擬2次元泡沫における液体分率の測定

編集後記

先日、引っ越しをした。子供たちが変化を嫌がって引っ越しには強く反対をしていたが、同じ棟で同じ階にある少し広い部屋に空きがでたので、引っ越しすることにした。玄関を出て真向かいの部屋であり、日常生活にもほとんど変化がない。新しい部屋は、ひと部屋増えたことをのぞけば、キッチンもリビングもバスもほとんど同じ間取りになっている。しかし、玄関が向かい合わせということで前の部屋と線対称の関係であって、部屋の中が左右逆になっている。この変化は気にならないだろうと思っていたが、似たような見た目で左右が逆というのは、かなり気持ちが悪い。何気なく電気を消そうとしても逆の方向に手が出る、冷蔵庫を開けようと思って反対方向を向く、等々。日常の些細なことで「あれ?」と思考が入る。人間は日常のなんでもない行動にはいちいち脳を働かせないで済むようにできているのだろう。そうでないと脳が疲れてしまう。何も考えなくても体が動く「ルーティーン」のありがたさに気づかされた。人は変化を好むのだろうか。確かに単調な毎日では退屈である。我々の業種は頭を使うことで日々の糧を得ていて、常に何か変化を求めようとしている。しかし、なんでもかんでも頭を使うことばかりだと疲れてしまう。変化のないルーティーン的な日常には頭を使わず、新しいことの創造や突発的な問題の対応など非日常的なことには脳をフル回転させる。この二つのバランスが大事だと思う。昨今、われわれの取り巻く状況は、組織再編や入試改革、あるいは極端な受験者の増減等、好む好まざるに関係なく変化が押し寄せてくる。非日常が日常化してしまっているようにも思われる。あまり変化ばかりだと脳が疲弊し思考に対して余裕がなくなる。このことが新しいことを生み出す研究活動に大きなマイナスにならないだろうか。

(慈道大介 記)

平成 28 年度 年次報告編集委員
首藤 啓 (2016 年度物理学教室主任)
慈道 大介
蓬田 陽平