

研究室活動状況 平成 26 年度

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

1. 研究活動の概要

2. 研究業績

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

素粒子理論研究室

1. 研究活動の概要

1) 大気ニュートリノによる非標準的相互作用探索の現象論 (安田・深澤)

標準模型を越える物理がある時、レプトンのフレーバーを保存しない有効相互作用が一般には現れ得る。そのような有効相互作用は、ニュートリノの伝播における物質効果に修正項をもたらす。ニュートリノの伝播における物質効果の標準模型からのずれを無次元パラメーター $\epsilon_{\alpha\beta}$ ($\alpha, \beta = e, \mu, \tau$) で表すと、 $\epsilon_{ee}, \epsilon_{e\tau}, \epsilon_{\tau\tau}$ の各成分への制約が現在最も弱く、これらのパラメーターへの制限を改善することで、新しい物理のヒントが得られる可能性がある。ニュートリノの伝播の物質効果は、10GeV 程度のエネルギー領域でかつニュートリノの走る基線が 1000km 以上の長い場合に顕著となることが知られており、このエネルギー領域で基線の長い実験を精密に行うことにより、上記のパラメーターの制約を改善できると考えられる。スーパーカミオカンデにおける大気ニュートリノ観測は、エネルギーしきい値が低く、基線の長さも地球の直径程度まで観測できるので、ニュートリノの伝播における物質効果をテストするのに適した実験であると考えられる。しかし、現在のスーパーカミオカンデ実験は残念ながら統計量がまだ十分とは言えず、統計誤差が支配的となっている。そこで、将来のハイパーカミオカンデ実験について上述のパラメーターに対する感度を数値的方法により詳細に解析した。解析に当たっては、現在すでに強い制約が得られている $\epsilon_{\alpha\mu}$ ($\alpha = e, \mu, \tau$) 成分を 0 とし、 $\epsilon_{\tau\tau}$ 成分は高エネルギー大気ニュートリノからの制約で $\epsilon_{\tau\tau} = |\epsilon_{e\tau}|^2 / (1 + \epsilon_{ee})$ となることを仮定して計算した。ハイパーカミオカンデ実験の場合にはまだデータは存在しないので、ニュートリノの質量による標準的フレーバー転換のみがある場合と新しい物理がある場合のそれぞれのイベント数の理論的予言値の比較によって解析を行った。その結果、異なるデータセットの間での非自明な相殺が起こるため、全イベント数のみによるレート解析は、エネルギースペクトルによる解析にくらべて新物理のパラメーターに対する感度が大きく劣ること、又、逆質量階層性の場合には、ニュートリノと反ニュートリノのイベント数の和のみによる解析がニュートリノと反ニュートリノの識別が出来た場合の解析にくらべて感度が劣ることがわかった。

2) 弦模型における宇宙論 (北澤)

弦理論を用いて記述される素粒子の弦模型において、重力相互作用を自然に含むという要請から、通常は弦の張力のエネルギースケールは非常に大きい（プランクスケール）と考える。この場合、自然界における弦模型に固有の物理現象の発現は宇宙初期の高エネルギーの時代に限られる。精密になってきた最近の宇宙観測の結果によって宇宙初期の情報が得られるようになってきており、弦模型の初期宇宙の現象への予言を行うことによりその痕跡を見つけることのできる可能性がある。

弦模型という大きな枠組みの中で、特に超対称性が “brane supersymmetry breaking” という機構によって破られている模型に着目すると、宇宙のインフレーションを起こすスカラー場がインフレーションの始まりの時期に特殊な動き (“climbing phenomena”) をすることが予言される。これは、宇宙背景放射のゆらぎの大きなスケール（長波長）の領域に独特の予言をすることになるが、それが WMAP や PLANCK 実験で実際に観測されている宇宙背景放射の大きなスケールでのゆらぎの宇宙標準模型 (Λ CDM 模型) からのずれを説明する可能性があることについて詳細に研究した。

この研究はピサ高等師範学校の A.Sagnotti 氏との共同研究であり、さらに PLANCK collaboration の A.Gruppuso 氏 と P.Natoli 氏とも共同研究を行った。

3) 弦模型のコンパクト空間のDブレーンの動力学における安定化 (北澤)

平坦な時空を仮定すると矛盾のない弦理論は10次元の時空間を要求する. 余分な6次元空間は現在の我々が観測できないように小さく丸まったもの(「コンパクト」なもの)でなければならない. さらにこの「コンパクト」な空間の大きさや形を決まったものに固定しないと, 重力に似た長距離相互作用が現れ, 宇宙観測に矛盾する. この「コンパクト空間の安定化」の問題は非常に重要であるにもかかわらず, 現在の弦理論の技術の及ぶ範囲で具体的に実現できている例はごく少ない.

様々なコンパクト空間の可能性のうち, それを変形(体積や形を変えること)する自由度が少なく, かつ現在の弦理論の技術の及ぶ範囲にある, $T^6/Z_3 \times Z_3$ orbifold という空間に着目して, Dブレーンと呼ばれる弦理論における重要な物体による「コンパクト空間の安定化」の達成に向けた試みを行った. この空間は高い対称性を持つために形状を変える自由度がなく, 体積を変える自由度のみがある. 磁気を帯びたDブレーンを導入することにより, その空間の4次元部分空間の体積を固定することができることを具体的な模型を構成して示した. さらに互いに斥力を及ぼし合うブレーンをうまく導入すれば残りの2次元部分空間の体積も固定できる可能性を指摘した. これについては具体的に模型を構成する前に, 2次元空間内における2つのDブレーンの間のポテンシャルエネルギーを求める際に存在する困難(結果が無限大になる)の解決法を提案した.

4) ゲージ・ヒッグス統一模型の LHC 実験における検証 (北澤, 酒井)

ゲージ・ヒッグス統一模型は「コンパクト」で現在の観測にかからない空間次元の存在を仮定して, 電弱ゲージ対称性の破れを通じて素粒子に質量を与えるヒッグス場を「コンパクト」な空間の方向に偏極したゲージ場として導入するものである. 素粒子の標準模型において, 電弱ゲージ対称性の破れを起こすために「手で」導入したヒッグス場の起源を説明するシナリオのひとつである. これは, ある枠組みの弦模型におけるゲージ対称性の破れを場の理論で表現したものになっている.

ヒッグス粒子は LHC 実験で発見され, さらにその細かい性質が少しずつ明らかになってきている. ヒッグス粒子そのものや弱い相互作用に関する LHC 実験によってゲージ・ヒッグス統一模型の検証(または排除)を行う研究はすでになされていた. ゲージ・ヒッグス統一模型の枠組みでは, 強い相互作用のゲージ対称性も「コンパクト」な空間の方向に存在していることが自然であり, これに着目して強い相互作用に関する LHC 実験からゲージ・ヒッグス統一模型に制限を与える研究を行った. おおまかに「コンパクト」な空間の体積に逆比例した重い粒子(Kaluza-Klein グルーオン)が予言され, それが発見されていないことにより, 「コンパクト」な空間の体積に制限を与えた.

2. 研究業績

1) 論文

Osamu Yasuda: On nonadiabatic contributions to the neutrino oscillation probability and the formalism by Kimura, Takamura and Yokomakura, *Physical Review D* **89** (2014) 093023.

Noriaki Kitazawa: Towards the stabilization of extra dimensions by brane dynamics, *International Journal of Modern Physics A* **30** (2015) 1550055.

2) 国際会議報告

Osamu Yasuda: Phenomenology of neutrino oscillation —Brief overview and its relevance to tau physics—, *Nuclear Physics Proceedings Supplement* **253-255** (2014) 139-142.

Shinya Fukasawa: Search for Non-Standard Interactions by atmospheric neutrino, *Proceedings of 49th Rencontres de Moriond on Electroweak Interactions and Unified Theories*, 471-474.

3) 学会講演

国内研究会

● CRC タウンミーティング 2014, 2014 年 7 月 12 日～13 日, 名古屋大学東山キャンパス

安田修: ニュートリノの現象論 (招待講演)

● 第 28 回宇宙ニュートリノ研究会, 2015 年 2 月 21 日, 東大宇宙線研

安田修: ステライルニュートリノの現象論的レビュー

● “Workshop on geometry, extra dimensions and string phenomenology in Miyazaki,” 2014 年 11 月 4 日～6 日 (ANA ホリデー・イン リゾート 宮崎)

北澤敬章: “Towards stabilization of extra dimensions by brane dynamics” (招待講演)

国際会議

● 37th International Conference on High Energy Physics (ICHEP 2014), 2-9 July 2014, Valencia, Spain

O. Yasuda: The KTY formalism and nonadiabatic contributions to the neutrino oscillation probability

● XVIth International Workshop on Neutrino Factories and Future Neutrino Facilities (NUFACT2014), 25-30 August, 2014, Glasgow, UK

O. Yasuda: Constraints on non-standard flavor-dependent interactions from Superkamiokande and Hyperkamiokande

● A topical conference on elementary particle physics and cosmology (Miami2014), December 17-23, 2014, Fort Lauderdale, Florida, USA

O. Yasuda: The KTY formalism and the neutrino oscillation probability including nonadiabatic contributions

● The XXVI International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2014), 2-7 June, 2014, Boston, USA

S. Fukasawa: Search for Non-Standard Interactions by atmospheric neutrino (poster)

高エネルギー理論研究室

1. 研究活動の概要

平成 26 年度, 本研究室の構成員により研究誌または会議にて発表された研究は 3 つのテーマに大別される.

(i) 最近の PLANCK の観測に矛盾しない, 超重力理論に基づく新しいインフレーションモデルの構築. これは, 実際のスカラー粒子としてはインフラトンと同定される 1 つの chiral matter superfield を用いて記述されたものである. (ケトフ)

(ii) クインテセンス (Linde) 描像において二次のインフラトンスカラーポテンシャルで記述されるインフレーションモデルに双対な $f(R)$ 重力関数の計算. (ケトフ, 渡邊)

(iii) 三角圏の射影分解, 特異点閉じ込めの数学的研究, 及び戸田写像における不動点集合の不変量の導出. (齊藤, 弓林, 脇本)

(i) は超重力理論 (一般相対性理論を超対称化することで拡張した重力理論) での素粒子標準模型を超える高エネルギー理論物理分野に属するもので, PLANCK 計画によって現在測定中の宇宙マイクロ波背景放射に密接に関連するものである. (ii) はインフレーションや現在の宇宙のダークエネルギーを記述するに大変有用な $f(R)$ 重力として知られる修正重力理論に関するものである. (iii) は物理数学の分野に属するもので, より抽象的なものになっている.

(i), (ii) については日本学術振興会 (JSPS) 助成金 (26400252) 及び, 文部科学省世界トップレベル研究拠点プログラムによって助成されており, (ケトフ) また, (iii) については日本学生支援機構 (JASSO) 奨学金により助成されている. (弓林)

(i) について, 1 つのカイラル超場によって, Linde 型のカオティックインフレーション及び Starobinsky 型のインフレーションを記述する, 超重力理論を用いた新しいモデルを提唱した. Large field インフレーション中に正の真空エネルギーを得るのに重要なアイデアとしては, (a) ケーラーポテンシャルを修正することで複素インフラトンの実部及び虚部を安定化させること, (b) スカラーポテンシャルにおいて多項式スーパーポテンシャル由来の crossing term を用いること, である. 提唱したインフレーションモデルはシフト対称性をもった minimal なケーラーポテンシャルを出発点として構築されており, no-scale 超重力の場合に拡張されている. また, この手法は超重力理論において 1 つのカイラル超場で記述されたインフレーションモデルにより一般に適用しうるものである.

更に私達は rigid supersymmetry で F-term に似た (ほぼ) 任意の 1 つの場のインフレーションスカラーポテンシャルを生む, 1 つの chiral matter superfield をで記述されたより広範な超重力理論モデルも提唱した. これらのスカラーポテンシャルは (我々の近似では) 半正定値であり, またインフレーションの終期に超対称性を保持しうる. 実際のインフラトンの唯一のスカラー超対称粒子はケーラーポテンシャルの高次元項によって安定化される. また, インフラトンと他の粒子の結合がインフレーションのダイナミクスには影響を及ぼさないこと, 及びインフラトンの崩壊による宇宙の再加熱についても議論した.

(ii) について, クインテセンスモデルと双対な重力理論の記法である $f(R)$ 重力関数を二次の (Linde 型の) スカラーポテンシャル, 正の宇宙項という条件下で導出した. 初期宇宙でカオティックインフレーションに関わる大曲率状態では, $f(R)$ 重力はループ補正を加えた Starobinsky インフレーションモデルによく近似されることが分かった. また現在の宇宙のダークエネルギーに関わる小曲率状態では, $f(R)$ 重力関数は正の宇宙項をもった Einstein-Hilbert の重力関数に帰着することが示された.

(iii) について, 三角圏の理論を用いて広田・三輪方程式の特性を明らかにすることを企図したものであり, これを実現するため多角的な議論を行った. 特に, 可積分写像を特徴づける現象である特異点閉じ込

めがどのように三角圏の射影分解との関連するかを詳しく示した。また, 双有理写像の任意の不変周期点代数多様体の特異点閉じ込めから導く方法発見し, この手法を不変量の数が写像の次元の半分よりも多い任意の双有理写像に適用できる形に一般化を行った。

2. 研究業績

1) 論文

S.V. Ketov, T. Terada, Inflation in supergravity with a single chiral superfield, Phys. Lett. B736 (2014) 272-277

S.V. Ketov and T. Terada, Generic scalar potentials for inflation in supergravity with a single chiral superfield, JHEP 1412 (2014) 062, 18 pages

S. Saito, T. Yumibayashi, Y. Wakimoto, Singularity Confinement and Projective Resolution of Triangulated Category, PTEP (2014) 023A08, 24 pages

S. Saito, T. Yumibayashi, Y. Wakimoto, Derivation of Invariant Varieties of Periodic Points from Singularity Confinement in the case of Toda Map, Phys. Lett. A387 (2014) 480-483

S.V. Ketov and N. Watanabe, The $f(R)$ gravity function of the Linde quintessence, Phys.Lett. B741 (2015) 242-245.

2) 学会講演

国際会議

● International Conference “Quantum Field Theory and Gravity (QFTG’14)” (トムスク, ロシア, 2014 年 7 月)

S.V. Ketov: Minimal Models of Inflation in Supergravity and Superstrings, ; published in the Proceedings: TSPU Bulletin, No. 12 (2014) 127

● International Theory Workshop “Particle Cosmology after Planck” (DESY, Hamburg, Germany, 2014 年 9 月)

S.V.Ketov: Natural Inflation and Universal Hypermultiplet, published in the electronic Proceedings: <https://indico.desy.de/contributionDisplay.py?sessionId=9&contribId=6&confId=9791>

● 4th International Bangkok Workshop on High-Energy Physics (Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, 2015 年 1 月)

S.V. Ketov: Minimal Models of Inflation in Supergravity and type IIA Strings

S.V. Ketov: High Energy Physics from Early Universe to Modern Colliders (invited)

● KEK Theory Workshop 2015, KEK, Tsukuba, Japan (2015 年 1 月 28 日-1 月 31 日)

H.Kuwabara, T.Yumibayashi, H.Harada: A time dependent Pais-Uhlenbeck oscillator and its decomposition

原子核理論研究室

1. 研究活動の概要

1) ハドロン励起状態の複合性 (慈道)

原子核中での中間子の性質を知る上で重要となるのが、中間子と核子からできるバリオン励起状態の構造である。特に、ハドロン励起状態がハドロンの複合状態としてできているのか、あるいはより微視的なクォーク模型的な状態をして記述されるかは、励起状態の構造を知る上で重要となる。今年度は、大阪大学核物理研究センター 関原隆泰氏と京都大学基礎物理学研究所 兵藤哲雄氏との共同研究のもと、ハドロン励起状態の複合性をその波動関数から調べる理論的枠組みを構築して、実験データから複合性を定量的に評価する方法を確立した。粒子状態の複合性は、波動関数の規格化に対する多粒子成分の割合で定義される。本研究では、1 粒子状態と 2 粒子散乱状態を同時に取り扱い、複合性が、励起状態の極の位置、そこで散乱振幅の留数と 2 体散乱状態の自由なグリーン関数の微分で表されることを示した。同時に、励起状態の素粒子性は、1 粒子成分をくりこんだ有効相互作用の微分と励起状態の性質で表される。しかしながら、複合性の定義で最も重要なのは、状態の粒子の数ではなく、励起状態を表現する上で状態を顕わに扱うのか、有効相互作用の中にくりこむかであり、複合性と素粒子性の相対化を行うことができた。このようなスキーム依存性についても適切に議論ができたことが本研究の特徴である。この枠組みの応用として、 $\Lambda(1405)$ やスカラー中間子、ベクター中間子について、チャンネル結合法による洗練された散乱振幅を用いて、複合性・素粒子性を定量的に議論した。その結果、 $\Lambda(1405)$ や $f_0(980)$ は、それぞれ、大部分が $\bar{K}N$ 、 $\bar{K}K$ の成分を持つハドロン複合状態である一方で、 $\rho(770)$ や $K^*(982)$ は素粒子性が強いことが分かった。

2) 原子核中の η' 中間子と $\eta'N$ 少数多体系 (慈道)

η' 中間子は軸性 $U(1)$ 対称性が量子補正によって破れているために、南部ゴールドストーンボソンになることができずに、他の擬スカラー中間子に比べて大きな質量を持つ。軸性 $U(1)$ 対称性の破れの効果が η' 中間子の質量に影響を及ぼすためにはカイラル対称性の破れが必要である。その機構により、 η' 中間子の質量はカイラル対称性の部分的回復に伴って減少をすると期待されている。京都大学理学研究科 酒井俊太郎氏との共同研究で、この効果を線形 σ 模型を用いて定量的に見積もった。同じ模型を用いて、 η' と核子の相互作用を ηN 、 πN のチャンネル結合を取り入れて計算を行い、 η' 中間子の光学ポテンシャルの評価した。今後、この光学ポテンシャルを用いて、 η' 中間子と原子核の束縛状態を計算する。また、本研究では、 $\eta'N$ の 2 体束縛状態の存在を予言しているが、大阪大学核物理研究センター 関原隆泰氏を加えて、2 体束縛状態の生成反応について検討し、 $\gamma d \rightarrow \eta'NN$ 反応過程の理論計算を行った。また、3 体束縛状態 $\eta'NN$ についても研究を始めた。

3) 核物質中の $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊 (慈道)

真空中で破れたカイラル対称性は、核媒質中では部分的に回復すると考えられている。カイラル対称性の自発的破れの南部・ゴールドストーンボソンである π 中間子は、対称性の部分的回復の下では波動関数の再規格化 (wavefunction renormalization) が重要な役割を演じ、 π 中間子に対する媒質効果の重要な要素となっている。 π^0 中間子の $\gamma\gamma$ 崩壊は、軸正 $U(1)$ 対称性を破る電磁気力の量子効果によって引き起こされる。したがって、その頂点補正には強い相互作用の影響が小さいと予想されるが、上述のように波動関数の再規格化によって大きく変更がされると考えられる。本研究では、京都大学基礎物理学研究所に滞在していた Jenifer Nebreda 氏と共同研究の下、核媒質中のカイラル摂動論を用いて、 $\pi_0 \rightarrow \gamma\gamma$ 過程を定量的に評価した。

4) マグネターの強い磁場の起源に対するカイラル非対称模型 (大西)

中性子星の中にマグネターといわれ、表面に $\sim 10^{15}$ G 程度の強い磁場が観測されていて、その起源を求めている提案されているが、いまだ納得のいく回答がえられていない。そこで、少し新たな視点からマグネターの簡単な模型を提案し、その強い磁場の起源について検討した。中性子星は超新星爆発のあとに芯の部分に残された原子核内の核子密度に相当する密度の、主に中性子からなるものと考えられる。生成過程で圧縮された物質の電子の量子縮退圧が高まり、フェルミ面近くの高エネルギーの電子が原子核内の陽子と反応し、中性子とニュートリノに変換する。いま、質量 $1.5M_{\odot}$ 倍で半径が 12 km の中性子星を考え、中性子がフェルミ縮退をしているとすると、そのフェルミエネルギーは 75 MeV となる。対称エネルギーを考慮すると、電子と陽子が弱い相互作用で中性子とニュートリノに変換するには電子のエネルギーは 110 MeV 必要で、それ以下のエネルギーの電子は残留する。このときの電子密度は $5.8 \times 10^{-3} \text{ fm}^{-3}$ と試算できる。また、反応する電子は十分相対論的で、Dirac 粒子として振舞い、低成分が高成分と互角の振幅をもち、カイラリティーの分離がよく、電子のヘリシティの正の成分を主要にもつ電子は弱い相互作用に預かれず溜まっていく。それらが、管状に管にそって整列すると、電子の磁化によって強いトロイダル磁場が管内にできる。上述の密度では 6.8×10^{17} G と試算できる。一端、このような磁場が出来ると質量項によるヘリシティ負状態への変換がエネルギー的に禁止され、それらのトロイダル磁場は準安定に存在し、観測できるほど長時間にゆっくりと減衰していくと考えられる。電子系と電磁場を Dirac 方程式と Maxwell 方程式を自己無撞着に解き、かようなトロイダル磁場とそれに伴うポロイダル磁場ができることを示す計算のプログラムを開発している。

2. 研究業績

1) 国際会議報告

Satoru Hirenzaki, Hideko Nagahiro, Daisuke Jido, Formation of η' Bound States in Nuclei, *JPS Conf. Proc.* **1** 013030 (2014). DOI: 10.7566/JPSCP.1.013030.

Daisuke Jido, Hadron Physics at J-PARC –Exotic Hadrons and Hadrons in Nuclei–, *JPS Conf. Proc.* **4** 014001 (2015). DOI: 10.7566/JPSCP.4.014001.

H. Fujioka, Y. Ayyad, J. Benlliure, K. -T. Brinkmann, S. Friedrich, H. Geissel, J. Gellanki, C. Guo, E. Gutz, E. Haettner, M.N. Harakeh, R.S. Hayano, Y. Higashi, S. Hirenzaki, C. Hornung, Y. Igarashi, N. Ikeno, K. Itahashi, M. Iwasaki, D. Jido, N. Kalantar-Nayestanaki, R. Kanungo, R. Knoebel, N. Kurz, V. Metag, I. Mukha, T. Nagae, H. Nagahiro, M. Nanova, T. Nishi, H.J. Ong, S. Pietri, A. Prochazka, C. Rappold, M.P. Reiter, J.L. 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 (Super-FRS Collaboration), Search for $\eta'(958)$ -nucleus bound states by (p, d) reaction at GSI and FAIR, *Acta Phys. Polon.* **B46** 127-132 (2015), DOI: 10.5506/APhysPolB.46.127.

K.P. Khemchandani, A. Martínez Torres, M. Nielsen, F.S. Navarra, D. Jido, A. Hosaka, E. Oset, The $f_0(1790)$ and $f_0(1800)$ puzzle, *Chiral Symmetry in Hadrons and Nuclei* 74-77 (2014), DOI: 10.1142/9789814618229_0015.

K.P. Khemchandani, A. Martinez Torres, M. Nielsen, F.S. Navarra, D. Jido, A. Hosaka, E. Oset, Interpreting the peak structures around 1800 MeV in the BES data on $J/\psi \rightarrow \phi\pi^+\pi^-$, $J/\psi \rightarrow \gamma\omega\phi$,

AIP Conf.Proc. **1625** 235-239 (2014), DOI: 10.1063/1.4901801.

2) 学会講演

● 日本物理学会年会第70回年次大会 2015年3月21日～3月24日 (早稲田大学早稲田キャンパス)

大西直毅, 丸山智幸: マグネターのカイラル非対称模型 (23pCB-9)

国際会議

● Workshop on "Hadrons in Nuclear medium II", October 24-28, 2014, Tokai, Ibaraki, Japan.

D. Jido; Hadrons in nuclei and partial restoration of chiral symmetry

● International Conference on Exotic Atoms and Related Topics - EXA2014, September 15-19, 2014, Austrian Academy of Sciences, Wien, Austria.

D. Jido; η' -nucleon interaction in chiral dynamics and η' -nucleus bound systems (Invited talk)

● HaPhy-CLAS Workshop on Hadron Physics, August 28-29, 2014, Kyungpook National University, Deagu, Korea.

D. Jido; Hadronic few-body systems in chiral dynamics (Invited talk)

宇宙理論研究室

1. 研究活動の概要

宇宙理論研究室では、高エネルギー天体现象、銀河・銀河団の形成と進化、および関連する宇宙プラズマの基礎的物理過程をテーマとして、様々な天体や現象を対象に理論的研究を進めている。2014年度のグループ構成はスタッフ2名、大学院生1名、客員研究員1名。以下は、2014年度に行った主な研究の概要である。2014年度は、2013年度に引き続いて行った物理過程の研究が中心である。

1) 再結合X線放射を示す超新星残骸

超新星残骸 (SNR) は、星の爆発で放出された超新星物質と周囲の星間物質との相互作用で生じた衝撃波が、星間物質および超新星物質を加熱し光学的に薄い高温プラズマを形成した天体である。比較的若い超新星残骸からは、プラズマの熱的 keV 電子による X 線放射や、衝撃波で加速された非熱的 GeV 電子によるシンクロトロン電波放射が観測される。電波も X 線も強度分布がシェル様の超新星残骸 (shell-type SNR) は一般に電離プラズマ状態にあるが、近年、電波はシェル様であるが X 線はその内部に分布する超新星残骸 (mixed-morphology SNR) から、再結合プラズマ状態の X 線放射が観測されてきた。さらに、再結合プラズマからの放射に基づいてスペクトル解析した結果からは、この種の超新星残骸に特徴的な元素組成も明らかになりつつある。その一つは重い元素の組成比に関するもので、超新星爆発時の非球対称爆発と関連する可能性があり、注目している。

2) 超新星残骸における衝撃波粒子加速

超新星残骸では、衝撃波によって粒子が最高エネルギー 1000 TeV オーダーまで加速されると期待され、そのエネルギー分布は、断熱的な強い衝撃波で期待される 2 に近いベキのパワースペクトルというのが標準的理解である。このスペクトルは、超新星残骸の電波放射に関わる GeV 電子については shell-type SNR, mixed-morphology SNR に依らず普遍的に見えるが、 γ 線放射に関わる、よりエネルギーの高い電子あるいは陽子については 2 より急なベキのスペクトルが観測から推定され、また、前者と後者の超新星残骸で差異がある。地球に届く宇宙線のスペクトルも超新星残骸起源と考えられる knee までベキ 2 より急なスペクトルになっているが、これは銀河内での伝播で説明されるのに対し、加速源つまり超新星残骸でベキの急なスペクトルが見られるのは、宇宙線のベキと比べても単純には説明がつかない。超新星残骸の環境にも依存して、ごく近傍で加速された粒子の拡散が効いている可能性や磁場の増幅の効果など、スペクトルを決める要因を探っている。

3) 星の爆発に伴う相対論的衝撃波のブレイクアウト

超新星爆発の際に、衝撃波が星表面から希薄な星間空間に抜けるブレイクアウトによって軟 X 線光子のフラッシュが起こることが理論的に言われ、近年、超新星爆発から数日以内に可視域でブレイクアウトの痕跡が観測されてきている。一般的な超新星ではこの過程は非相対論的であるが、相対論的なブレイクアウトが起きたらどのような放射になるか、 γ 線バーストとの類似性に着目して、相対論的ジェットの影響が星表面を抜ける過程を調べている。星の外層の密度分布とバルク運動の Lorentz 因子などをパラメータとして Compton 散乱による放出光子スペクトルを計算し、観測されている γ 線バーストのスペクトルや時間変化との比較を進めている。その結果、スペクトルのピークエネルギーや高エネルギー側のスペクトルのベキについては、かなりよい一致を示すことが分かってきた。2014年度は、これまでの相似解析に基づいた研究に加えて、2次元流体力学コードを用いた計算に着手した。

4) 銀河団ガスにおける粒子加速と加熱

銀河団は 10-1000 個の銀河の集団で、銀河の総質量の数倍の質量の高温ガスと、さらにその数倍の質量のダークマターから構成される Mpc スケールの天体である。小規模の銀河団 (銀河群) との衝突-合体では、比較的低温・低密度の銀河団外縁部のガスにおいて衝撃波により粒子が加速され (Fermi 1 次加速), GeV 電子のシンクロトロン放射が電波レリックスとして観測されることが考えられる。しかし、同程度の質量の銀河団どうしの衝突-合体では衝撃波のマッハ数が小さく、一方で、乱流による 2 次加速によって sub-GeV エネルギーの電子がつくられ、このシンクロトロン放射が Mpc スケールの電波ハローとして観測されることが考えられる。また、2 次加速による粒子の一部は熱的粒子と相互作用して銀河団ガスの放射冷却を妨げる効果も期待される。とくにこの加熱への寄与に着目して、電波ハローをもつ銀河団の熱的 X 線放射と整合的かつ硬 X 線観測と矛盾しない、2 次加速の条件と粒子の分布関数の時間発展を調べている。

5) 銀河団外縁部の X 線観測

銀河団外縁部は銀河団がまわりの物質を集めている現場であり、銀河団の進化を考える上で重要な場所である。しかし、密度が小さいため、X 線輝度が低く、背景の雑音の影響をこうむるなど観測が難しかった。「すぎく」衛星は他の X 線衛星に比べバックグラウンドが低く、このような領域を観測するのに適している。銀河団外縁部を調べるために、なめらかな分布を持つ銀河団 Abell 1246 を「すぎく」を用いて観測した。銀河団の大きさの目安となるビリアル半径まで X 線放射を検出した。温度は外側へ向けて低下すること、外側ではガスは静水圧平衡状態からずれていることを見いだした。

2. 研究業績

1) 論文

T. Ohnishi, H. Uchida, T. Tsuru, K. Koyama, K. Masai, M. Sawada: Discovery of Enhanced Radiative Recombination Continua of He-like Iron and Calcium from IC 443 and its Implications, *Astrophys. J.* **784** (2014) 74

K. Sato, K. Matsushita, N. Yamasaki, S. Sasaki, T. Ohashi: Temperature and entropy profiles to the virial radius of the Abell 1246 cluster observed with Suzaku, *Publ. Astron. Soc. Japan* **66** (2014) 8515

2) 学会講演

国際会議

● AtomDB Workshop 2014, Tokyo, Japan, September 6–9, 2014

K. Masai: Recombining Astrophysical Plasmas (Invited).

● Astroparticle View of Galaxy Clusters, Higashi Hiroshima, Japan, March 24–26, 2015

K. Masai: Suprathermal Electrons by 2nd-Order Fermi Acceleration (Invited).

非線形物理研究室

1. 研究活動の概要

1) トンネル確率異常増大の起源

非可積分系において見られるトンネル確率の異常増大の発生機構、およびその起源を調べた。非可積分系におけるトンネル確率の異常増大は、その現象の存在が指摘されてから既に 20 年以上が経ち、さまざまな系での実験的検証も試みられている。そのような中であって、実は「なぜ非可積分系ではトンネル確率の異常増大が起こるのか？」という最も基本的な問いが未解決なままにあった。ここでは、繰り込み可積分系の方法を用いることにより、その発生機構を初めて明らかにするとともに、従来の理論の問題点と限界を指摘した。

2) 半古典最低次近似の破綻と回折効果

上記研究の中で明らかになった事実として、作用表示行列要素の（最低次）半古典近似の困難がある。作用表示行列要素は、半古典論を展開する際の基本であるが、その中に、従来の古典力学を基にした半古典解析が適用不能な、純量子論的過程（広い意味の回折効果）が内在されていることが明らかになった。カオスという現象が古典力学上でしか定義し得ない以上、カオスがいかに量子現象に顕在化するか、という問いに答えるためには、古典力学に依拠した解析、いわゆる半古典理論に頼らざるを得ないことを考えると、行列要素に半古典論の破綻が起きている事実は驚きであり、その理解に向けての詳細な解析が今後強く望まれる。

3) 混合位相空間をもつ区分線型写像における島構造

位相空間に階層的安定構造をもつ 2 次元区分線型写像に、記号力学系を導入することにより、安定島構造の性質を詳細に調べ、安定島構造が無限個存在することを厳密に証明した。混合系において、一般に、安定構造が無限個存在することは、これまで多くの人々の予想するところであったが、実際に正の測度をもって位相空間中に無限個存在することが厳密に証明されたのは、我々の知るところ初めての例である。導入した記号力学に対する詳細な観察をもとに、安定島構造が正の測度をもって無限の深さまで存在し続ける記号列の系列を予想し、系の区分線型性を用いることにその予想を証明した。

4) 1 次元標準ハミルトン力学系の厳密解とその半古典論

多項式で表される 1 次元標準ハミルトン系の古典運動方程式を考察した。特に 4 次の標準ハミルトン系に対してはその解を具体的に書き下すことにより、解を複素領域に拡張した際の時間平面上の現れる特異点、およびそれに付随したリーマン面に関する厳密な考察を行った。さらに、それらを基に、1 次元標準ハミルトン系の半古典解析を行った。今のところ、複素時間面のトポロジーから出現し得る古典作用のバリエーションには一定の制限が加わること、また、素朴な WKB 解析では波動関数が再現されないことなどが明らかになっている。

5) 3 準位非断熱遷移問題に対する完全 WKB 解析の数値的有効性の検証

多準位の非断熱遷移の問題を完全 WKB 解析の観点から考察した。特に、多準位系になってはじめて現れる「新しいストークス線」を見かけ上考慮する必要のない、最も単純な状況における完全 WKB 解析の数値的検証を行った。透熱極限のエネルギー準位が時間に対して線型に変化する場合についての完全 WKB 解析の有効性は既に検証済みであるが、ここでは、透熱極限のエネルギー準位が時間に対して非線形的な依存性をもつ場合について調べた。その結果、そのようなより一般の場合についても、完全 WKB 解析の結果は、極めて高い精度で厳密な非断熱遷移過程の計算を予言することが確認された。

6) 全のアンホロノミー (新奇な量子ホロノミー) のトポロジカルな定式化

定常状態に準備した量子系の断熱準静サイクルに対する非自明な応答として、位相のホロノミー (あるいは幾何学的位相, ベリー位相) が良く知られている。これは状態ベクトルの位相に現れる。一方、断熱サイクルは、(擬) 固有エネルギーや、固有空間にも非自明な変化 (アンホロノミー) をもたらし得ることが、全によって指摘された (Cheon 1998)。これらは、全のアンホロノミー、あるいは、新奇な量子ホロノミーと呼ばれる。我々は、この現象の物理的・数理的な構造を探るとともに、物理系における自然な具体例・応用例を探索している。本年度は、固有空間のアンホロノミーに関するトポロジカルな定式化を構築した。これは、ベリー位相のサイモンによる幾何学的な定式化 (Simon 1983) と対応するものである。この定式化から、断熱サイクルのホモトピーによる分類と対応する固有空間の置換との対応を示した。さらに、二準位系については、固有空間の組を特徴付ける“ブロッホベクトル”から誘導される配向子 (director) の回位 (disclination) と固有空間のアンホロノミーが対応することを示した。(全卓樹教授 (高知工科大) との共同研究)。

2. 研究業績

1) 論文

Akira Shudo, Yasutaka Hanada, Teruaki Okushima and Kensuke S. Ikeda, Instanton-noninstanton transition in nonintegrable tunneling processes: A renormalized perturbation approach, *Europhys. Lett.* **108** (2014) 50004 (6 pages).

Takashi Hotta and Akira Shudo, Chaos in Jahn-Teller Rattling, *J. Phys. Soc. Jpn.* **83** (2014) 083705 (5 pages).

Atushi Tanaka, Sang Wook Kim and Taksu Cheon: Exotic quantum holonomy and higher-order exceptional points in quantum kicked tops, *Physical Review E* **89** (2014) 042904 (8 pages).

2) 学会講演

● 日本物理学会 2014 年秋季大会 2014 年 9 月 7 日–9 月 10 日 (中部大学)

青木和輝, 赤石暁, 首藤啓: 区分線形写像の階層構造と再帰時間の関係

池田研介, 奥島輝昭, 首藤啓, 花田康高: 繰り込み摂動論によるインスタントン-非インスタントン転移の研究

池田研介, 奥島輝昭, 首藤啓, 花田康高: 繰り込み摂動論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複素 KAM トーラスの自然境界

原田浩充, 首藤啓: 複素軌道の特異点構造を非線型共鳴

田中篤司, 全卓樹: 量子ホロノミーの階層について

● 日本物理学会 第 70 回年次大会 2015 年 3 月 21 日–24 日 (早稲田大学早稲田キャンパス)

霞江翔, 田中篤司: 断熱準静サイクルによる量子系の励起

国内研究会

- 第5回ハミルトン系とその周辺 (伊藤秀一先生還暦記念研究集会) 2014年5月29日–2014年5月31日 (金沢大学)

首藤 啓: KAM 曲線の自然境界と動的回折効果について (招待講演)

- 「ソフトな物理工学の未来を考える会」 2014年7月12日–2014年7月13日 (湘南国際村)

首藤 啓: ハミルトン系における遅い緩和現象について (招待講演)

国際会議

- Let's face chaos through nonlinear dynamics, June 22–July 6, 2014 (Maribor, Slovenia)

A. Shudo : Renormalized perturbative analysis of mixed quantum systems and dynamically induced diffraction (invited)

- Several aspects of microlocal analysis, October 20–24, 2014 (RIMS, Kyoto)

A. Shudo : Quantum tunneling in nonintegrable systems: beyond the leading order WKB description (invited)

- Waseda AICS Symposium and the 14th Slovenia-Japan Seminar: New Challenges in Complex System Science, October 24–26, 2014 (Waseda University)

A. Shudo : Introduction to the exact WKB method (invited)

Y. Hanada, A. Shudo, and K.S. Ikeda: Resonance-assisted tunneling in integrable and nonintegrable systems

H. Harada and A. Shudo: Nonlinear resonances and singularity structures of complex classical dynamics

N. Mertig, A. Bäcker, S. Löck, R. Ketzmerick and A. Shudo: Complex paths for regular-to-chaotic tunneling rates

- Quantum chaos: fundamentals and applications, March 14–20, 2015 (Luchon, France)

A. Shudo : Quantum tunneling in nonintegrable systems: beyond the leading order semiclassical description (invited)

Y. Hanada, A. Shudo, and K.S. Ikeda: Staircase structure in the tunneling splitting curve

H. Harada, A. Shudo, A. Mouchet and J. Le Deunff: Complex dynamics in normal form Hamiltonian systems

- The Global Human Resource Program Bridging across Physics and Chemistry, January 30, 2015 (Tokyo Metropolitan University)

S. Sugawara, R. Ohashi and A. Shudo: Validity of the exact WKB analysis for the generalized Landau-Zener model

H. Harada and A. Shudo: Exact solution of one-dimensional normal form Hamiltonian systems.

3) 著書等

首藤 啓: 「単純なカオス」と「複雑なカオス」, サイエンスネット 第 50 号 (2014) pp14–15.

量子凝縮系理論研究室

1. 研究活動の概要

1) モンテカルロ法の GPU による計算の高速化

近年, graphic processing unit (GPU) を高速計算に応用することが試みられ, モンテカルロ法への適用もなされるようになった. クラスタフリップアルゴリズムのモンテカルロ法の場合には, これまで GPU による並列計算は難しいとされてきたが, 我々のグループは, 並列計算用のクラスターラベリングアルゴリズムを用いて GPU 計算を実現した. 2013 年度には, "Comp. Phys. Commun. Library" でプログラムを一般公開した. 東工大学術国際情報センターの TSUBAME2.5 のシステムを利用して, いくつかの問題について, この高速プログラムによる高精度の計算を実行した. [岡部]

2) 2 サイズ確率変動クラスターアルゴリズムの開発

以前に, 相転移の有効なシミュレーション手法として, モーメント比のような物理量を測定し, その量に応じて温度を変動させ, 自動的に系の大きさに応じた臨界点に収束させる「確率変動クラスターアルゴリズム」とよぶ方法を提案した. 有限サイズスケーリングの解析と合わせて無限系の臨界点を効率よく決定することができた. さらに, 2つのサイズのシミュレーションを並行して実行し, それぞれのサイズの物理量の比を測定し, その比の判定により温度を変動させることにより, サイズ依存性に頼ることなく, 急速に無限系の臨界点に収束する手法を新たに考案した. この手法を「2 サイズ確率変動クラスターアルゴリズム」とよぶことにする. [岡部]

3) 1 次元ボーズ・フェルミ混合系の局在現象に対する原子間相互作用の効果

リング形状に冷却原子系を閉じ込める技術や中性原子に仮想的な磁場を印加する技術が確立したことにより, 磁場中低次元粒子系が原理的に作成可能になった. これにより, 金属リングにおける永久電流と同様の現象が, 冷却原子系でも観測される可能性が出てきた. そこで固体物理に対比できる系が存在しない 1 次元ボーズ・フェルミ混合系における永久電流の諸性質について理論的に解析を行った. とくに, 量子モンテカルロシミュレーションにより得られた原子間相互作用の影響について, 繰り込み群計算により解析的に検証したところ, 定性的な理解を得ることに成功した. [森]

4) スピン軌道相互作用を持つボーズ・フェルミ混合系の相図

電荷を持たない中性原子はスピン軌道相互作用しないが, レーザによる人工ゲージ場の作成に成功して以来, 人工的なスピン軌道相互作用が実現可能となった. スピン軌道相互作用の効果は, 電子系においては多くのことが調べられてきたが, ボーズ系, さらにボーズ・フェルミ混合系については知見がほとんどなかった. そこでもっとも解析が遅れているボーズ・フェルミ混合系において, スピン軌道相互作用の効果調べた. とくに絶対零度での相図を思考関数を用いた変分法により解析し, 混合の効果を明らかにした. [森]

5) BCS-BEC クロスオーバー領域での光学格子中 Fermi 原子気体超流動ダイナミクス

BCS-BEC クロスオーバー領域では, フェルミオンの超流動からボソンの超流動への連続的な変遷がみられ, その性質の違いは素励起の違いと密接に関係する. したがって, 超流動を構成する原子対の特定 (クーパー対もしくは 2 原子分子) が重要となる. しかしながら, BCS-BEC クロスオーバー領域では, 光放出分光法による 1 粒子スペクトル密度の研究が盛んに行われる一方, 電子対の性質は調べられていない状況となっている. そこで, 我々は金属超伝導状態の電子対の性質を調べる事が可能な 2 電子放出分光法に着目し, それに相当する解析を BCS-BEC クロスオーバー領域に適用した. 具体的には, 2 電子放出

分光法に相当する“原子対の放出”を記述する表式を導出し、クロスオーバー領域における超流動を構成する原子対の性質を調べた。特に超流動における“原子対放出の流れ密度の角度依存性”を計算することで、クロスオーバー領域での超流動を構成する原子対の性質を明らかにすることに成功した。そして本結果に基づき、2粒子放分光法によるBCS-BEC crossover領域での超流動の性質解明を提言した。[荒畑]

6) 超伝導渦糸系における直流伝導度

第二種超伝導体に代表される超伝導量子渦糸系における輸送現象は超伝導現象を理解するための重要な研究対象の一つであり、多く研究されている。一般的に超伝導量子渦糸系は準古典 green 関数を用いた Eilenberger 方程式でよく記述されることが知られている。最近、いくつかの第二種超伝導体の渦芯付近で非対称な局所電子密度が観測されているが、Eilenberger 方程式にはホール効果を表すホール項がないため、これらの現象を記述できない。ホール効果の影響が重要な現象の研究には、Bogoliubov-de Gennes 方程式が使用されることが多いが、現実の物質に即したパラメータでの計算は難しい。そこで、一般化準古典方程式を数値的に解くことにより、超伝導量子渦糸系における直流伝導度や Hall 伝導度の特性を明らかにした。一般化準古典方程式について Born 近似を用いて clean な超伝導体に適応し、Hall 効果を調べ、ホール伝導度は有限の値を持ち、Hall 効果は無視出来ないことを確認した。[荒畑]

7) ループ-ストリングアルゴリズムによるダイポールアイスの数値的研究

希土類化合物 $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ や $\text{Ho}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ などの所謂ダイポールアイスの静的動的性質に関する研究が精力的に行われている。特にアイスルールの破れを表すディフェクト間には基底状態のもつマクロな縮退を反映したエントロピー由来の、更には双極子相互作用由来のクーロン相互作用が働く為、興味深い現象が報告されている。本研究では基底状態近傍のダイポールアイスの物性を調べる為、新たにハイブリッド型のモンテカルロ法を提案している。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ドーピングと呼ばれる困難があった為、高精度の計算が出来なかったが、クラスター表現に基づくループ-ストリングアルゴリズム [Phys. Rev. B 90 (2014) 220406(R)] により同困難は完全に解消されている。我々は同アルゴリズムを基に、更に双極子相互作用をディフェクト間のクーロン力として再定義してクラスター間の相互作用として扱うことによりディフェクトの希ガス領域である基底状態近傍で効率良く長距離系のシミュレーションが出来る手法を開発した。同手法により比熱や帯磁率などの実験データを定量的に再現できることを確認しているが、更に今現在、ハイブリッド型モンテカルロ法の性能評価を一樣磁化の緩和時間を用いて行なっている。[大塚]

8) 二次元格子模型の無秩序相での相関関数が示す普遍性に関する研究

二次元格子上に定義された古典スピン模型が無秩序相にて示す相関関数の普遍性について調べている。これまで同相の相関関数に対してはオルンシュタイン・ゼルニケ型の等方的な相関長を持つ関数形を用いた解析がなされてきたが、実際は相関長は格子の持つ対称性や離散性に起因する異方性を持ち、それにより結晶は異方的な平衡形を持つことが知られている。これに対して最近 Fujimoto は sn 関数を用いた普遍的な相関関数の近似式を提案している。それによると任意の二次元格子模型の相関関数は、振幅、相関長、異方性パラメタ (b) の3つの量を用いて普遍的に特徴づけられる。我々はこの予想を確かめる目的で正方格子および三角格子上に定義された状態数 $q = 1, 2, 3, 4$ の強磁性ポッツ模型について、その相関関数を Evertz-Von del Linden の無限系アルゴリズムによるモンテカルロ法を用いて精密に求め、上記パラメータを決定した。解析結果によると相関関数の普遍式は格子やモデルに依らず数値データを精密に再現していることが明らかとなった。更に、正方格子上の模型では異方性パラメタは $q = 2$ で厳密値 $b = 1$ をとり、かつ状態数 q に対して一樣変化するが、より対称性が高い三角格子上の模型では q に依らず $b = 1$ に固定されていることが明らかとなった。これは Fujimoto による代数曲線を用いた相関

関数の解析予想を裏付ける根拠の 1 つとなるものである。現在、我々は更に他の格子上の模型について調べている。[大塚, 藤本雅文 (奈良医大)]

2. 研究業績

1) 論文

T. Surungan, Y. Komura, and Y. Okabe: Probing phase transition order of q-state Potts models using Wang-Landau algorithm, AIP Conference Proceedings **1617** (2014) 79-82 (2014)

S. Suga, T. Egawa, A. Masaki, and H. Mori: Bose-Fermi Mixture on Ring Threaded by Magnetic Flux, JPS Conf. Proc. 3, 016001 (2014).

S. Suga, T. Egawa, A. Masaki, and H. Mori: Persistent Current in Bose-Fermi Mixture on a Ring, J. Phys. Soc. Jpn. 83, 024007 (2014) .

E. Arahata and T. Nikuni, Theory of the Two-Particle Emission from Superfluid Fermi Gases in the BCS-BEC Crossover, *Phys. Rev. A*, **90**, 043601 (2014)

E. Arahata and Y.Kato, DC Conductivity in an s-Wave Superconducting Single Vortex System, *J. Low Temp. Phys.* **175** 346 (2014)

N. Kurosawa, N. Hayashi, E. Arahata, and Y. Kato, Impurity Effects in a Vortex Core in a Chiral p-Wave Superconductor Within the t-Matrix Approximation *J. Low Temp. Phys.* **175** 365 (2014)

Hiromi Otsuka: Cluster Algorithm for Monte Carlo Simulations of Spin Ice Phys. Rev. B**90** (2014) 220406(R).

Hiromi Otsuka, Hiroshi Takatsu, Kazuki Goto, and Hiroaki Kadowaki: Scaling Ansatz for ac Magnetic Response in Two-dimensional Spin Ice Phys. Rev. B**90** (2014) 144428.

2) 和書

森弘之 (訳):「スタンフォード物理学再入門 力学」レオナルド・サスキンド, ジョージ・ラボフスキー (日経 BP)

森弘之 (訳):「量子論が試されるとき——画期的な実験で基本原理の未解決問題に挑む」ジョージグリーンスタイン, アーサー・G・ザイアンツ (みすず書房)

3) 学会講演

● 第 23 回医用画像工学会大会 2014 年 7 月 24 日-26 日 (東京慈恵医科大学)

佐次田哲, 岡部豊, H. K. Lee: Mumford-Shah セグメンテーションモデルに基づくモンテカルロ法を用いた三次元画像領域分割

● 日本物理学会 2014 年秋季大会 2014 年 9 月 7 日 中部大学 春日井キャンパス

菅 聡明, 小野 洋輔, 坂本 良平, 荒畑 恵美子, 森 弘之: ボーズ・フェルミ混合系の輸送現象に対する相互作用効果

千枝光司, 大塚博巳, 岡部豊: クラスタールゴリズムモンテカルロ法を用いたスピンアイスの数値的研究

藤本雅文, 大塚博巳: ポッツ模型における二点相関関数と普遍的代数曲線 II: 高温相における解析

● 日本物理学会 第 70 回年次大会 2015 年 3 月 22 日早稲田大学 早稲田キャンパス

菅 聡明, 小野 洋輔, 坂本 良平, 荒畑 恵美子, 森 弘之: 1 次元ボソン-フェルミオン混合系における相互作用の効果

坂本 良平, 小野 洋輔, 菅 聡明, 荒畑 恵美子, 森 弘之: ボーズ・フェルミ混合系に対するスピン軌道相互作用の効果

小野 洋輔, 坂本 良平, 菅 聡明, 荒畑 恵美子, 森 弘之: ボーズ・フェルミ混合超流動原子気体の有限温度効果

大塚博巳: クラスタールゴリズムのダイポールアイスへの適用

藤本雅文, 大塚博巳: 代数曲線を用いた格子模型の臨界現象の解析

国内研究会

● The Global Human Resource Program Bridging across Physics and Chemistry, Tokyo Metropolitan University, January 2015.

S. Suga, R. Sakamoto, Y. Ono, E. Arahata, and H. Mori: Interaction Effects on Transport Phenomena of a Boson-Fermion Mixture System

R. Sakamoto, Y. Ono, S. Suga, E. Arahata and H. Mori: Effect of raman-induced spin-orbit coupling on bose-fermi mixture

Y. Ono, R. Sakamoto, S. Suga, E. Arahata and H. Mori: A superfluid of bose-fermi mixture at finite temperatures

国際会議

● Perspectives of GPU Computing in Physics and Astrophysics, Sapienza University of Rome, Rome, Italy, September 15-17, 2014

Y. Okabe and Y. Komura: GPU-based computation of the Monte Carlo simulation of classical spin systems (invited talk)

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、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の磁性や超伝導の理論研究を行っている。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。2014年度の研究室構成は、スタッフ1名、大学院生6名、卒研2名であった。以下は、2014年度に行った主な研究の概要である。

1) クロム化合物の層状磁気構造の安定化の起源

塩化クロムやフッ化クロムなどのハロゲン化クロムの物性研究の歴史は古く、1950年代から盛んに研究されており、それらの磁気構造自体はよくわかっている。しかし、近年になって、軌道自由度の観点から、クロム化合物の磁性が再び注目されており、今後研究が活性化することが期待されている。

さて、 CrCl_2 と CrF_2 は共に、歪んだルチル型の結晶構造を有しており、クロムイオンは、歪んだ体心立方格子を形成している。それらの磁気構造は1959年の中性子回折実験により決定されており、 CrCl_2 と CrF_2 は共に、室温では常磁性を示すが、低温では異なる反強磁性構造を示す。 CrF_2 は、 MnF_2 、 FeF_2 、 CoF_2 、 NiF_2 などのフッ化物と同様に、単純なネール型の反強磁性を示す。一方、 CrCl_2 の磁気構造はそれより複雑である。(011)面の中でクロムイオンは強磁性的に配列するが、それとは平行な隣の面では磁気モーメントの向きが反転しており、層状の反強磁性構造を持つ。このような CrF_2 と CrCl_2 の磁気構造の違いが何に起因するかは、実はまだよくわかっていない。

そこでまず、クロムイオンの電子配置を考える。ハロゲン化クロムのクロムイオンは2価であり、 $3d$ 電子は4個である。電子配置は、 t_{2g} 軌道に3個、 e_g 軌道に1個となり、これは Mn^{3+} と同じである。つまり、クロム化合物の磁性を考える上で、マンガン酸化物を参考にすることができる。マンガン酸化物の複雑な磁性は、マンガンイオンの間の酸素の p 軌道を介した二重交換機構による運動エネルギーの利得と、隣り合うマンガンイオン間の磁気エネルギーの利得との競合を基本的な考えとして理解されてきた。これは、軌道自由度を考慮した二重交換模型によって考察される。そこで、マンガン酸化物に対する軌道縮退二重交換模型に基づいて、クロム化合物の磁気構造を理解する事を試みた。歪みのない体心立方格子構造とそれを c 軸方向に歪ませた TiO_2 構造（ルチル構造）を考えたところ、体心立方格子構造では、塩化クロムの磁気構造は基底状態として現れることはなかった。しかし、 TiO_2 型の c 軸方向の大きな歪みを考慮すると、比較的広いパラメータ領域において、塩化クロムの磁気構造が基底状態として現れることがわかった。この c 軸方向の歪みによる層状磁気構造の安定化について、今後、より詳細に研究を進める予定である。本研究は、近藤泰弘氏（2014年度 D1）との共同研究である。

2) BiS_2 系層状超伝導体の超伝導ギャップ対称性

2012年に首都大学東京大学院電気電子工学専攻の水口助教らのグループによって、 BiS_2 層という超伝導層をもつ新しい超伝導物質群が発見された。この物質群は、銅酸化物高温超伝導体や鉄系超伝導体と同様、2次元の超伝導層とブロック層から成る構造をしているが、そのうちの一つに $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ がある。この系の母物質は LaOBiS_2 であり、絶縁体であると考えられているが、ブロック層内の O を F に置換することによって、超伝導層に電子ドーピングを行うことができ、ドーピング比 x を変化させることで、超伝導体となることがわかっている。このとき、 $x = 0.5$ 付近で超伝導転移温度 T_c が最高になり、圧力をかけることで T_c が10K程度まで上昇することもわかっているが、何が T_c を上昇させるカギになっているのか、まだよくわかっていない。

これらの新規超伝導体発見の後、 $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ の超伝導層、すなわち BiS_2 層に対する最小限の理論モデルが第一原理計算結果に基づいて臼井らによって提案された。そのモデルは、2次元2軌道の強束縛近似に基づく模型であり、 BiS_2 層の中でも Bi 原子の存在する平面内のみを考え、Bi の $6p_x$ 軌道と $6p_y$ 軌道のみを考慮するものである。我々は、上記の2次元2軌道の強束縛近似モデルに電子間相互作用を取り入れた2軌道ハバードモデルを考え、乱雑位相近似を適用して有効相互作用およびギャップ方程式を導出し、それを数値的に解くことによって、 BiS_2 系超伝導体の T_c とギャップ関数の対称性を調べた。

その結果、ギャップ関数の対称性を見ると、 $x=0.4$ から 0.45 の間で d 波から拡張 s 波へと切り替わることがわかった。このとき、フェルミ面のトポロジーが変化していることに注意する。特に、 $x=0.45$ 以下では、 d 波のノードである $k_x = \pm k_y$ 上にフェルミ面が存在しないため、実質的にノード無しで d 波のギャップ関数は符号を変えることができる。また、 $x=0.6$ の時に T_c が最大となっており、実験結果とやや食い違っているが、実際の物質の x と電子数の関係からすると、この程度のずれはがあってもよいと思われる。本研究は、我妻友明氏（2014年度 M2）との共同研究である。

3) 表面のあるマンガン酸化物におけるフリーデル振動と表面価数状態

近年、マンガン酸化物は酸化還元反応と安価であることから、Li イオン電池の正極材料や人工光合成の触媒への応用に注目が集まっている。これらの物質として機能するのは、主に Mn^{4+} が Mn^{3+} に変化する時であるから、結晶の表面に Mn^{4+} がより多く存在していれば、触媒あるいは正極としての性能が上昇することが期待される。そこで我々は、 z 方向に表面のある層状マンガン酸化物を考え、磁気構造を仮定して各層の Mn^{4+} の数の変化を調べた。本研究では、局在 t_{2g} スピンと結合する遍歴的な e_g 電子に対する二重交換模型を考えるが、 t_{2g} スピンと e_g 電子間のフント結合は無限大とし、ヤーン・テラー効果や電子間クーロン相互作用は無視する。

まず、 z 方向の1次元強磁性鎖が反強磁性的に結合した C 型反強磁性 (C-AF) 状態を考えた。このとき、 Mn^{4+} の総数がある値より大きくなると、表面に Mn^{4+} が多く現れることが分かる。これは、電子が運動エネルギーを稼ぐために端を避ける効果と考えられる。また、各層の Mn^{4+} の数をプロットすると、層毎の平均電子数が z 方向に振動していることが分かる。これは、C-AF の強磁性領域が1次元的事から、表面によって誘起されたフリーデル振動として理解される。実際、各層の平均電子数は良く知られたフリーデル振動の式 $\delta\rho(z) = A \cos(2k_F z)/z$ と一致している。

強磁性領域が x - z 平面の2次元的になる磁気構造では、各層の Mn^{4+} の数は z 軸方向のネスティングベクトルを波数とするフリーデル振動を示し、やはり表面に Mn^{4+} が多く現れることがわかった。特に、ホールドープが非常に小さい場合、各層の Mn^{4+} の数は「うなり」のような奇妙な振動を見せる。このときのフェルミ面は完全ネスティングに近く、2つのネスティングベクトルは非常に近い値を持つが、その2つの波数をもつ波の干渉では理解できない。また強磁性領域が3次元になる磁気構造において、表面に軌道秩序が現れることを見出した。本研究は、山村諒祐氏（2014年度 M1）との共同研究である。

4) ヤーンテラーラットリングにおけるカオス

カゴ状構造をもつ物質において、ラットリングと呼ばれるカゴに内包されるゲスト原子の非調和振動と伝導電子の相互作用が、磁場に鈍感な重い電子のような新奇な電子状態や比較的高温の転移温度をもつ超伝導の出現、さらに、高い熱電変換効率を持つ物質開発の観点から注目を集めている。このラットリングは非線形振動の問題でもあることから、非線形物理の専門家である首藤啓氏と議論をする機会を得た。そのとき、非調和ヤーンテラー振動のポテンシャルが、カオス現象の先駆として有名な Hénon-Heiles ポテンシャルそのものである、という指摘を受けた。そこで、非調和ヤーンテラー振動子のエネルギー準位を非線形物理における標準的な手法に従って解析したところ、確かにカオスの兆候が現れることを確認した。以前から、電子とヤーンテラー振動が結合したバイブロニック状態にカオスが現れることは知

られていたが、それは、空間的特異点となる断熱ポテンシャル中の円錐型交差点によるものと認識されていた。今回の研究によって、実はそうではなく、非線形振動によるカオスであることが明らかになった。さらには、カオスが比熱の異常なピークとして現れ、クラスレート化合物などのカゴ状物質で実際に観測される可能性も指摘した。

非調和ポテンシャル中の原子振動は、フックの法則に従わないバネの非線形振動の問題の一つと考えられるが、それは、戸田格子や Fermi-Pasta-Ulam の問題など、非線形物理において長い研究の歴史がある。しかし、固体電子と非線形振動との結合は、カゴ状物質においてラットリングが注目されるまでは、殆ど研究がなされてこなかったように思われる。カゴ状物質の物性を理解する上で、非線形物理の考え方は極めて重要であり、特に、非線形振動に現れるカオス的な状況が、電子と振動の相互作用を通して、重い電子状態や超伝導の出現、さらにはより高性能の熱電変換物質の開発につながれば、物性物理の新展開をもたらす可能性があり、今後の非線形物理と固体物理の共同研究の展開が楽しみである。

本研究は、首藤啓氏（非線形物理研究室）との共同研究である。

5) 非調和ヤーンテラー振動による近藤効果

最近、カゴ状構造物質において、カゴに内包されたゲストイオンの非調和振動に起因する非磁性の近藤効果に注目が集まっている。ゲストイオンがヤーンテラー振動をする場合には、その回転モードの持つ右回り、左回りの自由度に関する二重縮退に起因した近藤効果が起こることが知られている。そこに非調和性が加わった場合の近藤効果に以前から興味があり、局所非調和ヤーンテラー振動と結合するスピinlessのアンダーソンモデルを数値繰り込み群法によって解析した。非調和性が強い場合のエントロピーおよび比熱の温度依存性に関する典型的な結果は次のようになる。温度を下げていくと、まずエントロピーに $\log 3$ のプラトーが現れ、次に $\log 2$ のプラトーが現れる。さらに温度を下げると $\log 2$ のエントロピーが放出され、近藤効果が起こる。エントロピーが変化するところで比熱にピークが現れる。温度が比較的高い領域の $\log 3$ のエントロピーは、立方非調和性によって生じた3つのポテンシャル最小点に振動子が局在することによる「位置の自由度」によるものである。非調和ヤーンテラー振動と電子が結合したバイブロニック基底状態は、3つの最小点を右回りと左回りに回る回転モードに起因した二重縮退を持つが、高い回転モーメントをもつ励起状態が生じる。それらのエネルギー差よりも温度が下がるとエントロピーは $\log 3$ から $\log 2$ に減少することになる。

2. 研究業績

1) 論文

Tomoya Matsuura and Takashi Hotta: Relation between electron mass enhancement and potential shape: Numerical analysis of two-site anharmonic Holstein-Hubbard model, *J. Phys.: Conf. Ser.* **592**, 012144 (2015).

Takashi Hotta and Akira Shudo: Chaos in Jahn-Teller Rattling, *J. Phys. Soc. Jpn.* **83**, 083705-1-5 (2014).

Takashi Hotta: Kondo Effect of a Jahn-Teller Ion Vibrating in a Cubic Anharmonic Potential, *J. Phys. Soc. Jpn.* **83**, 104706-1-7 (2014).

2) 学会講演

● 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月 7 日–10 日 (中央大学春日井キャンパス)

近藤泰弘・堀田貴嗣: ヤーン・テラー歪みを考慮した二重交換模型に基づくクロム化合物の磁気構造の研究

山村諒祐・堀田貴嗣: 層状マンガン酸化物における界面誘起の電荷密度振動現象

● 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 21 日-24 日 (早稲田大学早稲田キャンパス)

我妻友明・堀田貴嗣: BiS_2 系層状超伝導体の乱雑位相近似による超伝導転移温度の計算

山村諒祐・堀田貴嗣: 層状マンガン酸化物における表面によって誘起された 2 つのフリーデル振動の干渉現象

近藤泰弘・堀田貴嗣: TiO_2 型歪みによるクロム化合物の層状磁気構造の安定化

国内研究会

● 研究環「特異な結晶構造に創出する新奇量子相の解明」第 2 回研究会, 2014 年 9 月 26 日 (首都大学東京南大沢キャンパス)

我妻友明・堀田貴嗣: BiS_2 系新規層状超伝導体の乱雑位相近似によるスピン・軌道感受率の計算

近藤泰弘・堀田貴嗣: ヤーン・テラー歪みを考慮した二重交換模型に基づくクロム化合物の磁気構造の研究

山村諒祐・堀田貴嗣: 層状マンガン酸化物における界面誘起の電荷密度振動現象

● The Global Human Resource Program Bridging across Physics and Chemistry, Tokyo Metropolitan University, January 30, 2015.

Yasuhiro Kondo and Takashi Hotta: Stabilization of layered magnetic structure of chromium compounds due to TiO_2 type distortion

Tomoaki Agatsuma and Takashi Hotta: Calculation of superconducting transition temperature in BiS_2 -based layered superconductors by random phase approximation

Dai Matsui and Takashi Hotta: Research on spin and charge Kondo effects of Anderson model with local repulsive and attractive interactions by numerical renormalization group technique

Ryosuke Yamamura and Takashi Hotta: Valence Imbalance of Manganese Ions between Surface and Bulk due to Quantum Interference of Friedel Oscillations in Layered Manganites

国際会議

● International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2014), Grenoble, France, July 10, 2014.

Takashi Hotta and Tomoya Matsuura: Relation between electron mass enhancement and potential shape: Numerical analysis of two-site anharmonic Holstein-Hubbard model

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

B 中間子の生成・崩壊を通して、小林・益川理論を証明した Belle 実験は、2010 年に実験終了し、現在最終的なデータ解析を進めている。本年度は、Belle 実験および同時期にアメリカで行われた B ファクトリー実験 (BaBar 実験) の成果をまとめた本 “The Physics of B Factories” が出版された。角野らが開発したフレーバタグ法やバックグラウンド除去法 (KSFV) もその成果としておさめられている。

Belle/KEKB 実験の後継実験として、約 40 倍のビーム輝度 (ルミノシティ) を目指し、Super-KEKB 加速器および Belle II 検出器の建設が進められている。本研究室では、とくに Belle II 検出器の前方エンドキャップ部の粒子識別装置の開発を担当している。Belle 実験で用いていたしきい値型のチェレンコフカウンターより広範囲のエネルギー領域でより精度良く粒子識別を行うために、エアロゲルを輻射体としたリングイメージチェレンコフ検出器 (A-RICH) の開発を進めている。

本研究室では、荷電粒子の周りにリング状に放出される光子 (チェレンコフ光) を捕えるためのマルチアノード光センサーの開発を浜松ホトニクスと共同でこれまでに進めてきた。開発した光センサーである HAPD (ハイブリッド・アヴァランシェ・フォト・ディテクタ) の量産を現在すすめており、必要とされる 450 個の HAPD に対し、本年度末までに 413 個が納入された。また、本年度は HAPD の読み出しとして用いる集積回路 (ASIC) の量産も行かない、修士課程の吉田らが中心となってその性能評価を行った結果、必要数の全数が良品であることを確認した。

本研究室では、Belle II 実験のソフトウェアトリガーシステムという、取得したデータをソフトウェアで高速に処理しデータの取舍選択をおこなうシステムの開発も行なっている。本年度は昨年度に開発したシステムの性能評価を進めた。学振研究員の今野は、Belle II のデータ収集および機器制御を行う DAQ グループに参加し、コントロール・モニタリングソフトウェアおよびファイルストレージシステムの開発を担当している。

本年度は BelleII 検出器への組み込みが完了した電磁カロリメータの宇宙線を使った性能試験に DAQ グループ開発のデータ収集システムを使用し、物理データ取得開始後と同様のシステム構成でのデータ取得に成功した。

2) Double Chooz 実験

本研究室では国際共同実験 Double Chooz において、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。近年、本実験をはじめとする原子炉や加速器ニュートリノ振動実験により、 θ_{13} が有限値を持つことが示された。有限値を持つことが明らかになった今、将来の CP 非保存パラメータ測定実験に向けて、その精密測定化の意義は高まっている。首都大学グループでは、混合角 θ_{13} の振動解析、ステライルニュートリノ探索、検出器性能の評価、オフラインツールの開発運用、高電圧電源システムの設置と運用、光電子増倍管の開発と全数検査や設置作業 (いずれも完了)、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。

本年度は特に、学振研究員の松原と修士課程の清水が、実験サイトであるフランスの Chooz 原子力発電所にて前置検出器用の高電圧電源システムの設置作業を行い、それを完了した。現在は安定した運用が行われている。

2014 年度は、これまでの 2 倍以上統計量と改善された解析手法で後置検出器のみを用いた θ_{13} 測定最終結果をまとめ、論文投稿を行った。この結果と合わせて、本年度は 3 編の論文投稿を行った。一方、 θ_{13} 測定精度を決めている系統誤差を大幅に抑制させるための前置検出器が完成し、ニュートリノ信号の初観測にも成功した。

今後、二基の検出器でのデータ取得を続け、必要となる統計量を得ることによって、 θ_{13} の精密測定化がまもなく達成される見通しである。また、ステライルニュートリノ探索といった新しい解析にも力を入れて実験を進めている。

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

DCBA 実験では、将来的なニュートリノレス二重ベータ崩壊の観測を目指して、新しい測定原理(ベータ線の運動量観測)に基く実験装置の開発を進めている。二重ベータ崩壊を起す原子核である ^{100}Mo を 9.6% 含むモリブデンの板を 2 枚のドリフトチェンバーで囲み、超伝導ソレノイドコイルを用いて一様磁場を印加した実験装置(DCBA-T2.5)を用いて 2011 年からデータ取得を行なっている。

本年度は、データ解析を進めると共に、Geant 4 を用いたモンテカルロシミュレーションの整備を行った。また、DCBA-T2.5 実験の後継となる DCBA-T3 実験装置の開発を進め、エネルギー分解能の向上のために微細化したドリフトチェンバーの性能評価や読み出しエレクトロニクスの評価・検討を行った。

4) T2K 実験

茨城県東海村に建設した陽子加速器(J-PARC 加速器)を用いて大強度のミューニュートリノビームを生成し、295km 離れた岐阜県飛騨市にある大型水チェレンコフ検出器スーパーカミオカンデで打ち出されたニュートリノを観測する、ニュートリノ振動実験を行なっている。

T2K 実験は 2013 年 7 月にミューニュートリノから電子ニュートリノへ変化する新しいニュートリノ振動を発見した。ハドロンホールで発生した放射能漏洩事故に伴う約 1 年間の実験停止期間を経て実験再開し、本年度は将来的なニュートリノにおける CP 対称性の破れの発見を目指して、反ミューニュートリノビームでの実験を開始し、スーパーカミオカンデにおいて、その最初の事象を観測した。

本年度末には、ニュートリノモードおよび反ニュートリノの両方の実験を併せて、ニュートリノ生成標的への陽子数が 1×10^{21} 個のマイルストーンに到達した。

5) 宇宙線ミュオンを用いた原子炉の透視

高エネルギー加速器研究機構および筑波大学の研究者と共同で、2011 年 3 月に発生した東日本大震災に伴う福島第一原発事故で損傷したとされる原子炉炉心部を、宇宙線ミュオンを用いて調査する研究を行なっている。

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。

その結果、国際廃炉研究機構 (IRID) による福島第一原発 1～3 号機の廃炉に向けた研究開発の 1 つとして、2014 年度に福島第一原発 1 号機の炉心部および燃料プールの透視を行うことになった。東海第二原発での実証実験に用いた 2 台の検出器を基に、環境放射線対策の鉄シールド等を施した 2 台の検出器を製作して、福島第一原発 1 号機炉心から北北西および北西方向に 35m 程度離れた屋外に設置し、2015 年 2 月 12 日よりデータ収集を開始した。

3 月 19 日の東京電力の定例記者会見において、1 号機炉心部にはあるべき燃料に伴う陰 (ミュオンフラックスの減衰) がみられないこと、逆に燃料プールの位置には期待通り陰がみられることを、速報として公表した。

6) 岩塩鉱や南極氷床を用いた超高エネルギーニュートリノ検出器の研究開発

超高エネルギーニュートリノ ($> 10^{16} \text{eV}$) は宇宙空間において超高エネルギー宇宙線と宇宙背景輻射との衝突で生成されると推測される。飛来数が極度に低いため 10 事象/年の検出には 50Gt の巨大検出媒質が必要となる。岩塩鉱や南極氷床中での巨大検出媒質中の超高エネルギーニュートリノ反応シャワーを効率よく捉える方法として、電波反射効果の利用を検討している。岩塩充填導波管に電子ビーム照射を照射したときの反射電波位相を測定した。その結果照射位置分解能が 2.2 mm であった。電波反射による誘電率変化位置測定から X 線 CT のような人体内の誘電率分布の画像化の可能性を指摘した。

7) 長寿命 $\pi^+\pi^-$ 原子の探索とラムシフト測定へ向けて

CERN の 24GeV 陽子シンクロトロン陽子ビームをターゲットへ衝突させ、その時発生する長寿命 $\pi^+\pi^-$ 原子を測定してきた DIRAC 実験は終了した。その後には計画している更に高エネルギーの陽子ビームを利用して長寿命 $\pi^+\pi^-$ 原子のラムシフト測定に利用する高磁場生成用永久磁石の放射線損傷の測定を京都大学原子炉実験所中性子ビームを利用する準備を行った。

8) ポジトロニウムの 4 光子、5 光子崩壊過程の研究

未だ検証されていない高次 QED 過程であるポジトロニウムの 5 光子稀崩壊現象の実験を行っている。GRACE による QED 計算と GEANT4 を使用した検出器シミュレーションの結果、2008 年から現在までに取得した 1.27×10^{11} 陽電子入射に対応するデータ中、5 光子稀崩壊事象の期待値は 0.035 イベント、3 光子崩壊事象のコンプトン散乱によるバックグラウンド事象は 20 イベントであり、5 光子崩壊事象の検出には、検出効率と S/N 比を高める必要があることが分かった。

陽電子線源を検出器中央に置いて、ポジトロニウム生成数を増加させる。鉛シールドを延長して、コンプトン散乱によるバックグラウンドを低下させる。5 光子崩壊のうち、4 光子のみが検出された場合にもエネルギー運動量保存から 5 光子崩壊を再構成する。などの改良を加えれば、5 光子崩壊事象を 1、2 年程度で検出できる目処がついた。今後は検出器改良の詳細設計を行っていく。

2. 研究業績

1) 論文

Observation of $X(3872)$ in $B \rightarrow X(3872)K\pi$ decays

Belle Collaboration (A. Bala *et al.*), Jan 27, 2015. 7 pp., Phys.Rev. D91 (2015) 5, 051101

Search for $B_s^0 \rightarrow \gamma\gamma$ and a measurement of the branching fraction for $B_s^0 \rightarrow \phi\gamma$
Belle Collaboration (D. Dutta *et al.*), Nov 28, 2014. 6 pp.
Phys.Rev. D91 (2015) 1, 011101

Measurement of the $\bar{B} \rightarrow X_s\gamma$ Branching Fraction with a Sum of Exclusive Decays
Belle Collaboration (T. Saito *et al.*), Nov 26, 2014. 13 pp.
Phys.Rev. D91 (2015) 5, 052004

Aerogel RICH for the Belle II forward PID
S. Nishida, S. Iwata, H. Kakuno, T. Kumita, T. Sumiyoshi, *et al.*, 2014. 3 pp.
Nucl.Instrum.Meth. A766 (2014) 28-31

Monte Carlo study of a Belle II proximity focusing RICH with aerogel as a radiator
R. Pestotnik, S. Iwata, H. Kakuno, T. Kumita, T. Sumiyoshi, *et al.*, 2014. 3 pp. Dec-1
Nucl.Instrum.Meth. A766 (2014) 270-273

Readout ASIC and electronics for the 144ch HAPD for Aerogel RICH at Belle II
H. Kakuno, S. Iwata, T.Kumita, T. Sumiyoshi, *et al.*, 2014. 2 pp. Dec-1
Nucl.Instrum.Meth. A766 (2014) 225-227

Newly developed gaseous photomultiplier
F.Tokanai, T.Moriya, M.Takeyama, H.Sakurai, S.Gunji, T.Sumiyoshi, T.Ito, H.Sugiyama, T.Okada,
N.Ohishi *et al.*, 2014. 3 pp.
Nucl.Instrum.Meth. A766 (2014) 176-179

A 144-channel HAPD for the Aerogel RICH at Belle II
S.Korpar, S.Iwata, H.Kakuno, T.Kumita, T.Sumiyoshi *et al.*, 2014. 2 pp.
Nucl.Instrum.Meth. A766 (2014) 145-147

Evidence of $\Upsilon(1S) \rightarrow J/\psi + \chi_{c1}$ and search for double-charmonium production in $\Upsilon(1S)$ and $\Upsilon(2S)$ decays
Belle Collaboration (S.D.Yang *et al.*), Sep 26, 2014. 9 pp.
Phys.Rev. D90 (2014) 11, 112008

Review of Particle Physics
Particle Data Group Collaboration (K.A. Olive *et al.*), 2014. 1676 pp.
Chin.Phys. C38 (2014) 090001

Observation of a new charged charmoniumlike state in $\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K^- \pi^+$ decays
Belle Collaboration (K. Chilikin *et al.*), Aug 27, 2014. 14 pp.
Phys.Rev. D90 (2014) 11, 112009

Observation of $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\chi_{bJ}$ and Search for $X_b \rightarrow \omega\Upsilon(1S)$ at $\sqrt{s} = 10.867\text{GeV}$
Belle Collaboration (X.H. He *et al.*), Aug 3, 2014. 7 pp.
Phys.Rev.Lett. 113 (2014) 14, 142001

Ortho-positronium observation in the Double Chooz Experiment

Y. Abe, J. Maeda, T. Matsubara, T. Sumiyoshi *et al.*, Jul 25, 2014. 17 pp.

JHEP 10 (2014) 032

Improved measurements of the neutrino mixing angle θ_{13} with the Double Chooz detector

Double Chooz Collaboration (Y. Abe *et al.*), Jun 30, 2014. 44 pp.

JHEP 10 (2014) 086, Erratum-ibid. 1502 (2015) 074

Search for $B^+ \rightarrow e^+ \nu$ and $B^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ decays using hadronic tagging

Belle Collaboration (Y. Yook *et al.*), Jun 24, 2014. 8 pp.

Phys.Rev. D91 (2015) 5, 052016

The Physics of the B Factories

BaBar and Belle Collaborations (A.J. Bevan *et al.*), Jun 24, 2014. 928 pp.

Eur.Phys.J. C74 (2014) 11, 3026

Silica aerogel radiator for use in the A-RICH system utilized in the Belle II experiment

M.Tabata, S. Iwata, H. Kakuno, T. Kumita, T. Sumiyoshi, *et al.*, Jun 17, 2014. 5 pp.

Nucl. Inst. Meth. A766 (2014) 212

Precision Muon Reconstruction in Double Chooz

Double Chooz Collaboration (Y. Abe *et al.*), May 23, 2014. 12 pp.

Nucl. Inst. Meth. A764 (2014) 330-339

Measurements of the masses and widths of the $\Sigma_c(2455)^{0/++}$ and $\Sigma_c(2520)^{0/++}$ baryons

Belle Collaboration (S.H. Lee *et al.*), Apr 22, 2014. 8 pp.

Phys.Rev. D89 (2014) 9, 091102

Measurement of $D^0 \bar{D}^0$ mixing and search for indirect CP violation using $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$ decays

Belle Collaboration (T. Peng *et al.*), Apr 9, 2014. 8 pp.

Phys.Rev. D89 (2014) 9, 091103

Search for CP violation in $D^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$ decays

Belle Collaboration (N.K. Nisar *et al.*), Apr 4, 2014. 6 pp.

Phys.Rev.Lett. 112 (2014) 211601

Precise Measurement of the Neutrino Mixing Parameter θ_{13} from Muon Neutrino Disappearance in an Off-axis Beam

K. Abe *et al.*, T2K Collaboration

Phys. Rev. Lett. 112(2014), 181801

First πK atom lifetime and πK scattering length measurements

B. Adeva *et al.*, Phys. Lett.B 735 (2014) 288-294.

2) 国際会議報告

Development of Hybrid Avalanche Photo Detector and its Readout Electronics for the Belle II Aerogel RICH counter

S.Iwata *et al.*, PoS TIPP2014 (2014) 072, 8pp.

Recent progress in the development of large area silica aerogel for use as RICH radiator in the Belle II experiment

M.Tabata, I.Adachi, H.Kawai, S.Nishida, and T.Sumiyoshi. PoS TIPP2014 (2014) 327, 4pp.

3) 学会講演

● 日本物理学会 2014 年秋季大会 2014 年 9 月 18～21 日（佐賀大学本庄キャンパス）

清水沙也香, 住吉孝行, 松原綱之, 他 Double Chooz 日本グループ

Double Chooz 前置検出器を用いたステライルニュートリノの探査可能性の研究

角野秀一, 伊東孝行, 住吉孝行ほか

DCBA による二重ベータ崩壊実験 XVII

伊東孝行, 住吉孝行, 角野秀一ほか

二重ベータ崩壊実験 DCBA-T3 における飛跡検出器と読み出し機器の開発

今野智之, 伊藤領介, 中尾幹彦, 鈴木聡, 山田悟

Design and Implementation of Slow Control in Belle II DAQ

吉田圭佑, 住吉孝行, 角野秀一, 汲田哲郎, 岩田修一, 梶原春花ほか

Belle II 実験における Aerogel RICH 用読み出し ASIC の量産品性能評価

● 日本物理学会 第 70 回年次大会 2015 年 3 月 21～24 日（早稲田大学）

千葉雅美, 上條敏生, 壺井仁将, 矢吹文昭, 近匡, 清水裕, 近重悠一, 内海倫明, 藤井政俊

超高エネルギーニュートリノ岩塩検出器のレーダー反射波位相からの位置測定

吉田圭佑, 住吉孝行, 角野秀一, 汲田哲郎, 岩田修一, 米永匡伸, 幡谷航暉ほか

Belle II 実験における Aerogel RICH 用読み出しシステムの現状

神田泰地, 汲田哲郎, 浜津良輔, 千葉雅美

ポジトロニウムの 5 光子崩壊事象検出実験の改良

国際会議

● IEEE Real Time (RT) conference 2014, Nara, Japan, May 24 – 30, 2014

Tomoyuki Konno: The slow control and data quality monitoring system for the Belle II experiment

● Technology and Instrumentation in Particle Physics 2014 (TIPP 2014), Amsterdam, the Netherlands, June 2 – 6, 2014

Shuichi Iwata: Development of Hybrid Avalanche Photo Detector and its Readout Electronics for the Belle II Aerogel RICH counter

● 7th New Development In Photodetection (NDIP2014), Tours, France, June 29 – July 5, 2014

Takayuki Sumiyoshi: Recent progress in gaseous PMT

● 2nd International Workshop on Theoretical and Computational Physics (IWTCP-2), Buon Ma Thuot, Vietnam, July 28 – 31, 2014

Tomoyuki Konno: Status and prospects of the Belle II experiment

4) 学会誌等

松原綱之, Emmanuel Chauveau 「Double Chooz 実験の現状と今後」
高エネルギーニュース, Volume 33 Number 3, 187-195, 2014.

伊藤領介, 中尾幹彦, 山田悟, 鈴木聡, 今野智之, 樋口岳雄 「Belle II 実験のデータ収集システム」
高エネルギーニュース, Volume 33 Number 3, 196-204, 2014.

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. なお, 特任研究員の高谷一成は 10 月 1 日付けで立教大学に転出した.

1) 静電型イオン蓄積リングを用いた原子分子の衝突・冷却過程の研究

静電型イオン蓄積リングは, 周回イオンの軌道制御を静電場のみを用いて行うことで, 周回イオン種の質量に関する制限を解決したイオン蓄積リングである. 本学設置の静電型イオン蓄積リング TMU E-ring では, 分子物質化学専攻・城丸グループとの共同研究のもと, 昨年度に引き続き特に星間分子イオンの候補である炭素鎖負イオンを中心として孤立イオンの冷却過程研究を行った.

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

星間空間分子負イオンの内部エネルギー冷却過程探求を目的として, これまで直鎖状炭化水素負イオンを蓄積して電子脱離寿命を測定してきた. 真空中のように周囲と相互作用がない環境に置かれた高温で振動励起状態にある分子負イオンは, 赤外線を放出し 10 ms – 1 s の時定数で徐々に振動輻射冷却される. 一方, 内部エネルギーの総和が電子脱離に必要なエネルギーを超える場合は電子脱離によってエネルギーを消費し中性粒子となる. これまで孤立分子負イオンの冷却はこの二過程の競合によると考えられてきたが, 近年に低エネルギー電子励起状態を持つイオンについては電子遷移による再発蛍光放出により急速 (ms 以下) に冷却される再発蛍光過程が, 電子脱離しきい値近傍のエネルギー領域にある炭素鎖負イオン C_4^- および C_6^- を対象とした我々の研究などから発見され, その電子脱離しきい値以下のエネルギー領域における冷却速度が注目されている.

しかし, これまでの測定法では蓄積イオンをレーザー光吸収によって加熱し, 内部エネルギーが電子脱離しきい値を超えたイオンの遅延電子脱離寿命から冷却速度を決定していたため, 電子脱離しきい値以下のエネルギー領域における冷却速度は原理的に測定することができなかった. 本年度, 我々は炭素クラスター負イオン C_4^- を対象として, レーザー照射前の蓄積時間 (=イオン入射からの冷却時間) を変えながらレーザー誘起電子脱離収量を測定するという新しい測定法を考案, これまで測定できなかった電子脱離しきい値以下の内部エネルギー領域における冷却速度測定を行った. その結果, 電子脱離しきい値近傍の内部エネルギーから冷却速度が急激に上昇するという, 再発蛍光を仮定した冷却速度の理論予想と一致した結果が得られ, これまで予言されていた再発蛍光放出のメカニズムについて実験による確証が得られた.

この再発蛍光過程は, 上記研究などこれまでの研究からその存在が強く示唆されているものの, これまで直接観測された例はない. そこで, C_6^- を対象として再発蛍光過程により放出される蛍光の直接観測を行った. 蓄積イオンから放出される再発蛍光のうち, 実験で測定できるのは観測領域を通過するわずかな時間に放出されたもののみである. この測定に必要となる高感度蛍光分光検出システムを, 電子冷却器付き光電子増倍管と大口径レンズ 4 枚, 波長識別用干渉フィルターを組み合わせで作成した. 本システムにより測定の妨げとなる信号のバックグラウンドを飛躍的に低減することに成功し, 長時間測定が可能となった. およそ 50 時間の長時間測定の結果, 入射直後およびレーザー光吸収後それぞれの C_6^- イオンから再発蛍光 (波長 607 nm) の観測に成功した. 現在は得られた再発蛍光の寿命など定量的な解析を進めている.

(2) 蓄積イオンビーム高品質化・低速化をめざした運動制御技術開発：

静電型イオン蓄積リングに蓄積されたイオンビームの品質を向上させることで、より長時間の蓄積、蓄積ビームの低速化など新たな実験の提案が可能となる。そこで、イオンビーム制御技術を応用し、リング内に蓄積されたイオンの運動制御を行うべく研究開発を進めている。本年度は、レーザー冷却技術を利用した蓄積イオンビームの高品質化・低速化をめざして、中性 Rb 原子ビームに対するレーザー光を用いた運動制御実験を行った。レーザー光波長を Rb 原子の吸収波長に合わせ、レーザー光吸収による Rb 原子ビームの運動量変化を確認した。また、RF バンチャーを用いて C_6^- イオンのバンチ広がり抑制を行った。これまでビーム進行方向に 20 cm 程度の幅で入射したイオンビーム固まりは、その速度ばらつきのため 10 ms 程度の時間でリング全体 (7.728 m) に広がってしまう。そこでビーム通過に同期して進行方向に加減速電場を印加する RF バンチャーを用い、本蓄積リングを用いた実験での典型的な蓄積時間である 100 ms の間イオンビームの広がりを一定に保つことに成功した。

2) 極低温静電型イオン蓄積リングの開発

理研において、極低温静電型イオン蓄積リング (RIken Cryogenic Electrostatic Ring: RICE) の開発を行ってきた。本装置は TMU E-ring と同様に静電場を用いて極低温のリング内にイオンビームを周回蓄積し、レーザーを導入することによる、蓄積大型分子イオンのダイナミクスを追跡するとともに、極低温の特性を活かして振動回転準位をも含めた真空中の単一分子分光や、さらに振動回転準位を制御した上で、中性原子ビームと合流衝突させることによるイオン・中性衝突反応を探索することを狙いとしている。また、装置全体を冷却することで真空度も飛躍的に向上するため、室温で動作する TMU E-ring 室温型リングに比べ長時間のイオン蓄積が可能となる。これにより長寿命準安定状態の検出や反応時間を長い過程を観測することできると期待される。実際の動作として、RICE 内部真空槽の温度は 4.7 K に到達し、その真空度は 10^{-12} Pa 台以上の超高真空度を達成したと間接的に評価された。15 keV Ne^+ イオンを用いて数 10 nA の強度のイオン蓄積にも成功しており、超高真空条件に伴って非破壊型のビーム強度測定が困難になるものの、1 時間以上の蓄積をすでに確認している。

3) 超伝導トンネル接合 (STJ) 検出器による中性粒子検出

静電型イオン蓄積リング実験における中性粒子検出への応用を目的として、アレイ型 STJ (Superconducting Tunneling Junction) カロリメータの開発を、理研・産総研の共同研究体制で進めた。一般には、静電型イオン蓄積リングを周回するイオンのエネルギーは 10 keV 程度であり、反応で生成される中性粒子もほぼ等速であるため、マイクロチャンネルプレート (MCP) が検出器として用いられてきた。MCP には、検出時間情報は得られるものの、入射粒子のエネルギー情報が得られないという欠点があるため、様々な解離生成物を含む生成中性粒子の種類を同定することが困難である。そこでこのエネルギー領域で十分なエネルギー分解能が得られる専用の超伝導トンネル接合 (STJ) 検出器の開発を開始した。また、STJ 検出器は、超伝導転移温度 T_c の 1/10 程度の温度 (0.3 K) で通常動作させるが、我々は素子を改良し、液体 4He のポンピングのみにより達成可能な温度でも、十分なエネルギー分解能を備えた超伝導検出器の開発を目指した。実際のテストは 15q keV Ne^{q+} ($q = 1, 2, 3$) イオンを、1.6 K の温度条件下で $100 \mu m \times 100 \mu m$ の大きさの STJ 検出器に入射し、まず単体素子に対する最適動作条件を探した。その結果 15 keV Ne^+ に対して $\Delta E/E=15-20\%$ 程度の分解能を得ることに成功したが、高分解能化および安定動作化に向けた開発を引き続き行う必要がある。

4) 太陽風多価イオンの電荷移行反応

太陽風にわずかに含まれている炭素より重い原子の多価イオンが、太陽系内の希薄な中性物質と衝突するときに 1 keV 以下のエネルギーの軟 X 線を放出する過程が宇宙物理学で注目されている。また、太陽

系だけでなく、Cygnus ループのような超新星残骸 (SNR) や M82 のようなスターバースト銀河でも、同様に多価イオンの電荷移行反応に起因すると考えられる軟 X 線発光スペクトルが観測されている。その特徴の一つは He 様イオンから禁制線が共鳴線より強いことで、電子との衝突によって励起されて発光する場合とは大きく異なるため、高温プラズマからの発光とは区別することができる。本研究室では、太陽風と同じ速度で多価イオンと中性気体分子を衝突させ、生成した励起状態のイオンをイオントラップに導いて蓄積して、1 ms 程度の発光寿命を持つ禁制線を観測するための装置を開発した。装置はほぼ完成したと考えていたが、軟 X 線検出用の半導体検出器のベローズ部分からのアウトガス (主に内壁に付着している水) が想像以上に多く、ベーキングを繰り返して改善されなかったため、新たな差動排気機構を設計開発した。

5) 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た液体窒素および液体ヘリウムによって冷却したヘリウム気体中におけるイオンの移動度測定を今年度も継続している。昨年度から NH_3 ガスを電子衝撃することで生成した NH_n^+ ($n = 1 - 3$) に関する測定を行っている。昨年度は液体窒素温度 (77 K) のみであったが、今年度は液体ヘリウム温度 (4.3 K) での測定も合わせて行った。 NH^+ はイオン強度が弱いいため、4.3 K での測定は完了していないが、77 K において電場強度 E と気体数密度 N の比 E/N が小さな領域で到着時間スペクトルのピークが分裂する現象が発見された。これは NH^+ の電子基底状態 $X^2\Pi$ と準安定励起状態 $a^4\Sigma^-$ の分離によると考えられ、 E/N が小さいほど a 状態の相対強度が大きいことから、衝突エネルギーが高いほど脱励起が起りやすくなると解釈している。4.3 K での NH_2^+ の移動度には、低 E/N で極小を持つという H_2O^+ と同様の特徴が見られた。これは分子構造の類似性に関係していると思われる。また、 NH_3^+ は 77 K ではピークの分裂は見られなかったが、4.3 K での低 E/N で基底状態と準安定励起状態の分裂が観測された。基底状態の NH_3^+ はピラミッド構造ではなく、平面構造であることが知られているので、移動度が大きい基底状態の NH_3^+ はフリスビー状に飛行するために衝突断面積が小さくなっていることが想像できる。但し、ピークの強度比が E/N に大きく依存することから、脱励起あるいは化学反応の可能性が考えられており、未だに結論は出ていない。

6) イオン移動度分析

旧科学技術振興調整費のプロジェクトとして開始した「化学剤の網羅的迅速検知システムの開発」も最終年度を迎えた。参画機関である理研計器 (株) によって実用機に迫るようなサイズと性能の装置が試作され、市販できる装置まであと一歩という感触を得たところでプロジェクトは終了し、最終的な装置開発は理研計器 (株) に託された。首都大では装置の性能を向上させるため、基礎的研究を行ってきた。今年度は荷電粒子の一次元的な空間分布を直接測定できる IonCCD を用いて、移動管内部におけるイオンの二次元空間分布を測定する装置を開発した。アパーチャーによってイオンの拡がりやを小さな領域に制限し、移動距離を変えながら拡散の様子を測定することで、空気中でのイオンの拡散定数を求める方法を確立した。また、コロナ放電のために針に印加する高電圧によって、イオンの空間分布が敏感に変化することを見出した。また、移動管の中心軸近傍のイオンだけを検出することで、到着時間スペクトルの時間幅が狭まり分解能が向上することも判明した。大気中のイオン軌道を正確に計算することは困難であるが、荷電粒子の軌道を計算する SIMION というプログラムを用いて移動管内部の電場を計算し、定性的には理解することができた。一方、分子イオンに対する量子化学的構造計算の結果を用いて大気中のイオン移動度を計算するプログラムを完成させ、原子数が 40 以上の大きな分子イオンについては実測値と良い一致が得られることを確認した。

2. 研究業績

1) 論文

G. Ito, T. Furukawa, H. Tanuma, J. Matsumoto, H. Shiromaru, T. Majima, M. Goto, T. Azuma, and K. Hansen: Cooling dynamics of photoexcited C_6^- and C_6H^- , *Phys. Rev. Lett.* **112**, 183001 (2014)

N. Numadate, K. Okada, N. Nakamura, and H. Tanuma: Development of a Kingdon ion trap system for trapping externally injected highly charged ions, *Rev. Sci. Instrum.*, **85**, 103119 (2014)

2) 学会講演

● 第3回イオン移動度研究会 2014年4月19日(東邦大学・習志野キャンパス)

森健汰, 二宮彰啓, 伊澤亮介, 田沼肇: 低温 He 中における NH_n^+ ($n = 1 - 3$) の移動度測定

田沼肇, 高谷一成, 金子貴洋, 西出龍弘, 座間洋子, 杉山浩昭, 中野信夫, 瀬戸康雄: イオン移動度プログラム MOBCAL の改良 - 大気中および窒素中での移動度の計算

● 全天軟X線放射研究会 2014年5月27日(理化学研究所, 和光市)

田沼肇: 実験室で電荷交換反応の実験 - Solar Wind Charge Exchange in Laboratory

● 第30回化学反応討論会 2014年6月4日~6日(イーグレ姫路, 姫路市)

T. Furukawa, G. Ito, N. Kono, H. Tanuma, J. Matsumoto, K. Najafian, K. Hansen, T. Azuma, and H. Shiromaru: Inverse internal conversion of laser-heated C_4^- and C_6^-

● 2014年度第4回青山学院大学 物理・数理学科コロキウム 2014年7月10日(青山学院大学・相模原キャンパス)

田沼肇: 太陽風からテロ対策まで - 多様なイオン衝突実験

● 日本物理学会 2014年秋季大会 2014年9月7日~10日(中部大学・春日井キャンパス)

金子貴洋, 細野美薫, 高谷一成, 座間洋子, 田沼肇, 西出龍弘, 杉山浩昭, 中野信夫, 瀬戸康雄: 質量選別型イオン移動度分析装置の開発 IV

森健汰, 槇仁美, 二宮彰啓, 伊澤亮介, 田沼肇: 低温 He 気体中における NH_n^+ ($n = 1 - 3$) の移動度測定

河野直子, 古川武, S. Menk, P. Bertier, 稲嶋旅人, 京牟禮美那, 池田晴喜, 松本淳, 田沼肇, 東俊行, K. Hansen, 城丸春夫: 再帰蛍光放出により冷却された C_4^- の内部エネルギー分布

今村慧, 古川武, Yang Xiaofei, 藤田朋美, 三津谷洋助, 早坂美希, 小林徹, 畠山温, 上野秀樹, 小田島仁司, 松尾由賀利: 超流動ヘリウム中に植え込まれた Cs 原子の超微細構造間隔

● 原子分子データ応用フォーラムセミナー 2014年9月11日~12日(核融合科学研究所, 土岐市)

田沼肇: EUV/BEUV に関連する電荷交換分光研究

● 第8回分子科学討論会 2014年9月21日~24日(広島大学・東広島キャンパス)

稲嶋旅人, 松本淳, 古川武, 田沼肇, 城丸春夫: ススのレーザーアブレーションで生成した炭素クラスターおよびポリイン負イオンの内部温度

古川武, 松本淳, 田沼肇, Klavs Hansen, 東俊行, 城丸春夫: イオン蓄積実験による孤立負イオンの内部エネルギー分布測定

● 原子衝突学会第 39 回年会 2014 年 10 月 4 日～6 日 (東北大学・片平キャンパス)

金子貴洋, 細野美薫, 高谷一成, 座間洋子, 田沼肇, 西出龍弘, 杉山浩昭, 中野信夫, 瀬戸康雄: Development of an ion mobility spectrometer and an ion mobility spectrometry - mass spectrometer

森健汰, 槇仁美, 二宮彰啓, 伊澤亮介, 田沼肇: Mobility measurement of NH_n^+ ($n = 1 - 3$) in He gas at low temperature

沼館直樹, 岡田邦宏, 中村信行, 田沼肇: Development of a Kingdon ion trap for studying the forbidden X-ray transitions of excited highly charged ions

河野直子, 古川武, S. Menk, P. Bertier, 稲嶋旅人, 京牟禮美那, 池田晴喜, 松本淳, 田沼肇, 東俊行, K. Hansen, 城丸春夫: Internal energy distribution of C_4^- cooled by emission of recurrent fluorescence

● 地球磁気圏 X 線可視化に関する研究会 2014 年 11 月 15 日 (首都大学東京・南大沢キャンパス)

田沼肇: 電荷交換反応

● レーザー学会第 469 回研究会「レーザー・ビーム・パルスパワー技術による Beyond EUV 光源」
2014 年 12 月 5 日 (大和川酒造北方風土館, 喜多方市)

田沼肇: 電荷交換分光法による BEUV 光源開発の基礎データ取得計画と与太話

● 日本物理学会 2015 年年次大会 2015 年 3 月 21～24 日 (早稲田大学・早稲田キャンパス)

森健汰, 槇仁美, 二宮彰啓, 伊澤亮介, 田沼肇: 低温 He 気体中における NH_n^+ ($n = 1 - 3$) の移動度測定 II

高谷一成, 中原明思, 長谷川優也, 小泉哲夫, 的場史朗, 小島隆夫, 田沼肇: $\text{Li}^+-(2\text{-butanol})_n$ ($n = 1 - 3$) のヘリウム中における移動度測定

榎本嘉範, 中野祐司, 増永拓也, 木崎達也, Sebastian Menk, Paul Bertier, 東俊行: 極低温静電型イオン蓄積リングの開発 III

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

江原悠太, 古川武, 松本淳, 田沼肇, 東俊行, 城丸春夫: ポアンカレ蛍光検出実験

今村慧, 古川武, 涌井崇志, 藤田朋美, 早坂美希, 松本未来, 江上魁, 富永大樹, 小田島仁司, 上野秀樹, 松尾由賀利: 低収量原子核の核構造研究へ向けたレーザー・RF/MW 二重共鳴信号の高強度化

舟山智歌子, 古川武, 佐藤智哉, 市川雄一, 大友祐一, 坂本雄, 小島修一郎, 鈴木貴大, 平尾千佳, 菅野雄揮, 小峰太郎, 近森正敏, 彦田絵里, 土屋真人, 吉見彰洋, C.P.Bidinosti, 猪野隆, 上野秀樹, 松尾由賀利, 福山武志, 旭耕一郎: $^{129}\text{Xe}/^3\text{He}$ 同時メーザー発振のためのポンピングレーザーシステムの開発

坂本雄, C.P.Bidinosti, 市川雄一, 佐藤智哉, 大友祐一, 小島修一郎, 舟山智歌子, 鈴木貴大, 平尾千佳, 菅野雄揮, 小峰太郎, 土屋真人, 古川武, 吉見彰洋, 猪野隆, 上野秀樹, 松尾由賀利, 福山武志, 旭耕一郎: 一様静磁場環境下での $^{129}\text{Xe}/^3\text{He}$ 同時メーザー発振

小島修一郎, 佐藤智哉, 市川雄一, 大友祐一, 坂本雄, 舟山智歌子, 平尾千佳, 菅野雄揮, 小峰太郎, 鈴木貴大, 近森正敏, 彦田絵里, 土屋真人, 古川武, 吉見彰洋, C.P.Bidinosti, 猪野隆, 上野秀樹, 松尾由賀利, 福山武志, 旭耕一郎: ダブルセルにおける $^{129}\text{Xe}/^3\text{He}$ 核スピンメーザーの周波数特性

佐藤智哉, 市川雄一, 大友祐一, 坂本雄, 小島修一郎, 舟山智歌子, 平尾千佳, 菅野雄揮, 小峰太郎, 鈴木貴大, 近森正敏, 彦田絵里, 土屋真人, 古川武, 吉見彰洋, C.P.Bidinosti, 猪野隆, 上野秀樹, 松尾由賀利, 福山武志, 旭耕一郎: ^3He 共存磁力計の導入による ^{129}Xe 原子 EDM 測定実験 IV

大友祐一, 市川雄一, 石橋陽子, 鈴木貴大, 上野秀樹, 今村慧, 藤田朋美, 早坂美季, 富永大樹, 松本未来, 江上魁, 古川武, 佐藤智哉, 坂本雄, 小島修一郎, 舟山智歌子, 菅野雄揮, 平尾知千佳, 小峰太郎, 旭耕一郎: 中性子過剰 S 同位体の偏極度および磁気モーメント測定

早水友洋, 原田健一, 加藤浩, 青木貴稔, 青木隆宏, 有川裕士, 安藤峻, 石川泰佑, 伊藤正俊, 井上壮志, 内山愛子, 川村広和, 坂本幸祐, 今井憲一, 佐藤智哉, 清水康弘, Hulyar S. Nataraj, 畠山温, 畑中吉治, 古川武, 村上哲也, 吉田英智, 若狭智嗣, 酒見泰寛: 電子 EDM 探索に向けた冷却原子を用いたラムゼーフリンジの観測

● 科学情報学研究会 2015 年 3 月 25 日 (東京理科大学・森戸記念館)

田沼肇: 原子分子データベースと太陽風電荷交換反応 - 原子分子データ応用フォーラムの紹介を兼ねて

国際会議

● 2nd conference on Advanced Radioactive Isotope Science (ARIS2014), University of Tokyo, 1-6 June, 2014

X.F. Yang, T. Furukawa, K. Imamura, T. Fujita, T. Wakui, Y. Mitsuya, M. Hayasaka, Y. Ichikawa, Y. Ishibashi, H. Shirai, T. Suzuki, T. Sato, Y. Otomo, Y. Kojima, Y. Ebara, S. Kishi, T. Sagayama, M. Wada, T. Sonoda, Y. Ito, T. Kobayashi, S. Nishimura, M. Nishimura, Y. Kondo, K. Yoneda, S. Kubono, Y. Ohshiro, A. Hatakeyama, H. Ueno, T. Shinozuka, T. Shimoda, K. Asahi, and Y. Matsuo: A laser spectroscopy method using superfluid helium for measurements of spins and electromagnetic moments in exotic nuclei

K. Imamura, T. Furukawa, T. Wakui, X. F. Yang, Y. Mitsuya, T. Fujita, Y. Ebara, M. Hayasaka, Y. Ichikawa, H. Shirai, T. Suzuki, T. Sato, Y. Ohtomo, S. Kojima, A. Hatakeyama, H. Odashima, T. Kobayashi, H. Ueno, K. Asahi, and Y. Matsuo: Measurement of hyperfine splitting of alkali atoms in superfluid helium for a laser spectroscopy of atoms with unstable nuclei

T. Fujita, T. Furukawa, K. Imamura, X. F. Yang, Y. Mitsuya, M. Hayasaka, T. Sagayama, S. Kishi, T. Kobayashi, H. Ueno, T. Shimoda, Y. Matsuo: Measurement of hyperfine structure of Au atom in superfluid helium

Y. Ichikawa, H. Ueno, Y. Ishii, T. Furukawa, A. Yoshimi, D. Kameda, H. Watanabe, N. Aoi, K. Asahi, D. L. Balabanski, R. Chevrier, J. M. Daugas, N. Fukuda, G. Georgiev, H. Hayashi, H. Iijima, N. Inabe, T. Inoue, M. Ishihara, T. Kubo, T. Nanao, T. Ohnishi, M. M. Rajabali, K. Suzuki, H. Takeda, and M. Tsuchiya: Spin-aligned RI beams and g-factor measurements

T. Sato, Y. Ichikawa, Y. Ohtomo, Y. Sakamoto, S. Kojima, T. Suzuki, H. Shirai, M. Chikamori, E. Hikota, H. Miyatake, T. Nanao, K. Suzuki, M. Tsuchiya, T. Inoue, T. Furukawa, A. Yoshimi, C. P. Bidinosti, T. Ino, H. Ueno, Y. Matsuo, T. Fukuyama, K. Asahi: ^{129}Xe EDM search experiment using active nuclear spin maser

Y. Ohtomo, Y. Ichikawa, T. Sato, Y. Sakamoto, S. Kojima, T. Suzuki, H. Shirai, M. Chikamori, E. Hikota, H. Miyatake, T. Nanao, K. Suzuki, M. Tsuchiya, T. Inoue, T. Furukawa, A. Yoshimi, C. P. Bidinosti, T. Ino, H. Ueno, Y. Matsuo, T. Fukuyama, K. Asahi: Double-cell geometry for $^{129}\text{Xe}/^3\text{He}$ co-magnetometry

H. Kawamura, S. Ando, T. Aoki, H. Arikawa, S. Ezure, K. Harada, T. Hayamizu, T. Inoue, T. Ishikawa, M. Itoh, K. Kato, A. Uchiyama, T. Aoki, T. Furukawa, A. Hatakeyama, K. Hatanaka, K. Imai, T. Murakami, H. S. Nataraj, T. Sato, Y. Shimizu, T. Wakasa, H. P. Yoshida, and Y. Sakemi: Towards the measurement of the electric-dipole moment of radioactive francium using laser-cooling and trapping techniques

T. Inoue, S. Ando, T. Aoki, H. Arikawa, S. Ezure, K. Harada, T. Hayamizu, T. Ishikawa, M. Itoh, K. Kato, H. Kawamura, A. Uchiyama, T. Aoki, K. Asahi, T. Furukawa, A. Hatakeyama, K. Hatanaka, K. Imai, T. Murakami, H. S. Nataraj, T. Sato, Y. Shimizu, T. Wakasa, A. Yoshimi, H. P. Yoshida, and Y. Sakemi: Development of magnetometer based on the Nonlinear Magneto-Optical Rotation effect toward measurements of the electric dipole moment

Y. Togano, Y. Yamada, N. Iwasa, K. Yamada, T. Motobayashi, N. Aoi, H. Baba, S. Bishop, X. Cai, P. Doornenbal, D. Fang, T. Furukawa, K. Ieki, T. Kawabata, S. Kanno, N. Kobayashi, Y. Kondo, T. Kuboki, N. Kume, K. Kurita, M. Kurokawa, Y. G. Ma, Y. Matsuo, H. Murakami, M. Matsushita, T. Nakamura, K. Okada, S. Ota, Y. Satou, S. Shimoura, R. Shioda, K. N. Tanaka, S. Takeuchi, W. Tian, H. Wang, J. Wang, and K. Yoneda: Hindered proton collectivity in the proton-rich nucleus ^{28}S : possible magic number $Z = 16$ at proton-rich side

● The 5th China-Japan-Korea Joint Seminar on Atomic and Molecular Processes in Plasma, Lanzhou, China, 29 July-August 1, 2014

H. Tanuma, H. Shimaya, T. Ishida, N. Nakamura, N. Numadate, and K. Okada: How do we observe the forbidden lines from He-like ions in charge exchange collisions of H-like ions with neutral gases?

● 17th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions (HCI 2014) , San Carlos de Bariloche, Argentina, 31 August-5 September

N. Numadate, K. Okada, N. Nakamura, and H. Tanuma: Development of a Kingdon ion trap for studying the forbidden X-ray transitions of excited highly charged ions

● AtomDB Workshop 2014, Tokyo Metropolitan University, 6-9 September, 2014

H. Tanuma: CX in the laboratory - what we had done and what we can do for the astrophysicists

● International Symposium on Small Particles and Inorganic Clusters (ISSPIC-XVII), Kyushu University, 7-12 September, 2014

T. Furukawa, N. Kono, G. Ito, J. Matsumoto, H. Tanuma, T. Azuma, K. Hansen, H. Shiromaru: Rapid cooling of isolated small carbon cluster anions

● 9th International Conference on Atomic and Molecular Data and Their Applications (ICAMDATA 2014), Jena, Germany, 21-25 September, 2014

H. Tanuma, H. Shimaya, T. Ishida, N. Numadate, K. Okada, and N. Nakamura: Challenge for observation of forbidden transitions in charge exchange collisions of multiply charged ions with neutral gases

● The 5th Joint International Conference on Hyperfine Interactions and Symposium on Nuclear Quadrupole Interactions (HFI/NQI 2014), Canberra, Australia, 21-26 September, 2014

K. Imamura, T. Furukawa, X. F. Yang, Y. Mitsuya, T. Fujita, M. Hayasaka, T. Kobayashi, A. Hatakeyama, H. Ueno, H. Odashima, Y. Matsuo: Measurement of hyperfine splitting of ^{133}Cs atoms in superfluid helium

T. Sato, Y. Ichikawa, Y. Ohtomo, Y. Sakamoto, S. Kojima, C. Funayama, T. Suzuki, M. Chikamori, E. Hikota, M. Tsuchiya, T. Furukawa, A. Yoshimi, C. P. Bidinosti, T. Ino, H. Ueno, Y. Matsuo, T. Fukuyama, K. Asahi: EDM measurement in ^{129}Xe atom using dual active feedback nuclear spin maser

Y. Sakamoto, C. P. Bidinosti, Y. Ichikawa, T. Sato, Y. Ohtomo, S. Kojima, C. Funayama, T. Suzuki, M. Tsuchiya, T. Furukawa, A. Yoshimi, T. Ino, H. Ueno, Y. Matsuo, T. Fukuyama, K. Asahi: Development of high-homogeneity magnetic field coil for ^{129}Xe EDM experiment

● 11th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics (AISAMP 11), Sendai, Japan, 6-10 October, 2014

T. Kaneko, M. Hosono, K. Takaya¹, H. Tanuma, T. Nishide, Y. Zama, H. Sugiyama, N. Nakano, and Y. Seto: Development of an ion mobility spectrometer and an ion mobility spectrometry - mass spectrometer

K. Mori, H. Maki, A. Ninomiya, R. Isawa, and H. Tanuma: Mobility measurement of NH_n^+ ($n = 1 - 3$) in He gas at low temperature

N. Numadate, K. Okada, N. Numadate, and H. Tanuma: Development of a Kingdon ion trap for studying the forbidden X-ray transitions of excited highly charged ions

N. Kono, T. Furukawa, J. Matsumoto, H. Tanuma, T. Azuma, K. Hansen, and H. Shiromaru: Internal energy distribution of C_4^- cooled by emission of recurrent fluorescence

● 4th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (HAWAII2014), Waikoloa, Hawaii, 7-11 October, 2014

T. Furukawa: OROCHI experiment: Laser spectroscopy of RI atoms in superfluid helium for measurements of nuclear spins and electromagnetic moments

K. Imamura, T. Furukawa, X. F. Yang, T. Fujita, T. Wakui, Y. Mitsuya, M. Hayasaka, Y. Ichikawa, A. Hatakeyama, T. Kobayashi, H. Odashima, H. Ueno, Y. Matsuo: Hyperfine structure measurement of ^{87}Rb atoms injected into superfluid helium as highly energetic ion beam

T. Fujita, T. Furukawa, K. Imamura, X. F. Yang, Y. Mitsuya, M. Hayasaka, T. Sagayama, S. Kishi, T. Kobayashi, H. Ueno, T. Shimoda, Y. Matsuo: Sublevel laser spectroscopy of ^{197}Au atom in superfluid helium

M. Hayasaka, T. Furukawa, H. Tomita, T. Takamatsu, K. Imamura, T. Fujita, T. Kobayashi, H. Uematsu, H. Ueno, Y. Matsuo: Effective production of spin polarization of atoms in superfluid helium using pulsed lasers

C. Funayama, T. Furukawa, T. Sato, Y. Ichikawa, Y. Ohtomo, Y. Sakamoto, S. Kojima, T. Suzuki, M. Chikamori, E. Hikota, M. Tsuchiya, A. Yoshimi, C. Bidinosti, T. Ino, H. Ueno, Y. Matsuo, T. Fukuyama, K. Asahi: Development of a high intensity laser for efficient spin exchange optical pumping in a spin maser measurement of the ^{129}Xe EDM

T. Sato, Y. Ichikawa, Y. Ohtomo, Y. Sakamoto, S. Kojima, C. Funayama, T. Suzuki, M. Chikamori, E. Hikota, M. Tsuchiya, T. Furukawa, A. Yoshimi, C. Bidinosti, T. Ino, H. Ueno, Y. Matsuo, T. Fukuyama, K. Asahi: Progress of the ^{129}Xe EDM search using active feedback nuclear spin maser

Y. Ichikawa, T. Sato, Y. Ohtomo, Y. Sakamoto, S. Kojima, C. Funayama, C. Hirao, T. Suzuki, M. Chikamori, E. Hikota, H. Miyatake, T. Nanao, K. Suzuki, M. Tsuchiya, T. Inoue, T. Furukawa, A. Yoshimi, C. Bidinosti, T. Ino, H. Ueno, Y. Matsuo, T. Fukuyama, K. Asahi: Experimental search for EDM in diamagnetic atom ^{129}Xe using active nuclear spin maser

S. Kojima, T. Sato, Y. Ichikawa, Y. Ohtomo, Y. Sakamoto, C. Funayama, T. Suzuki, M. Chikamori, E. Hikota, M. Tsuchiya, T. Furukawa, A. Yoshimi, C. Bidinosti, T. Ino, H. Ueno, Y. Matsuo, T. Fukuyama, K. Asahi: Performance of an active nuclear spin maser with double-cell geometry

Y. Sakamoto, C. Bidinosti, Y. Ichikawa, T. Sato, Y. Ohtomo, S. Kojima, C. Funayama, T. Suzuki, M. Tsuchiya, T. Furukawa, A. Yoshimi, T. Ino, H. Ueno, Y. Matsuo, T. Fukuyama, K. Asahi: Performance check of cell with newly designed electrode for ^{129}Xe EDM measurement

Y. Ohtomo, Y. Ichikawa, H. Shirai, H. Ueno, Y. Ishibashi, T. Suzuki, T. Furukawa, A. Yoshimi, Y. Abe, K. Asahi, J.M. Daugas, T. Fujita, M. Hayasaka, K. Imamura, S. Kishi, S. Kojima, D. Nagae, A. Nakao, T. Sagayama, Y. Sakamoto, T. Sato: Ground-state nuclear-moment measurement of neutron-rich sulfur isotopes

H. Kawamura, S. Ando, T. Aoki, H. Arikawa, S. Ezure, K. Harada, T. Hayamizu, T. Inoue, T. Ishikawa, M. Itoh, K. Kato, K. Sakamoto, A. Uchiyama, T. Aoki, T. Furukawa, A. Hatakeyama, K. Hatanaka, K. Imai, T. Murakami, H. S. Nataraj, T. Sato, Y. Shimizu, H. P. Yoshida, T. Wakasa, and Y. Sakemi: Towards the measurement of the electron EDM with laser cooled francium atoms

● The 21st International Symposium on Spin Physics (SPIN2014), Beijing, China, 20-24 October, 2014

T. Furukawa: Spin polarization of radioisotope atoms with optical pumping in superfluid helium for the measurement of nuclear spins and electromagnetic moments

● 2014 International Workshop on EUV and Soft X-Ray Sources, Dublin, Ireland, 3-6 November, 2014

H. Tanuma, N. Numadate, H. Shimaya, N. Nakamura, and K. Okada: A new setup for observation of forbidden lines from metastable ions produced in charge exchange collisions

● ISCA Japan-Ireland Workshop on Extreme Ultraviolet Source Development for Lithography, Surface Morphology and Biological Imaging, Dublin, Ireland, 6 November, 2014

H. Tanuma: Charge exchange spectroscopy of heavy element ions

● The sixth international conference on Trapped Charged Particles and Fundamental Physics (TCP2014), Takamatsu, Japan, 1-5 December, 2014

T. Furukawa, N. Kono, G. Ito, J. Matsumoto, H. Tanuma, T. Azuma, K. Hansen, H. Shiromaru: Rapid cooling of isolated small carbon cluster anions

N. Numadate, K. Okada, N. Numadate, and H. Tanuma: Development of a Kingdon ion trap for studying the forbidden X-ray transitions of excited highly charged ions

T. Fujita, T. Furukawa, K. Imamura, X. F. Yang, A. Hatakeyama, T. Kobayashi, H. Ueno, K. Asahi, T. Shimoda, Y. Matsuo, OROCHI Collaboration: Laser spectroscopy of atoms in superfluid helium for the measurement of nuclear spins and electromagnetic moments of radioisotope atoms

C. Funayama, T. Furukawa, T. Sato, Y. Ichikawa, Y. Ohtomo, Y. Sakamoto, S. Kojima, T. Suzuki, M. Chikamori, E. Hikota, M. Tsuchiya, A. Yoshimi, C. Bidinosti, T. Ino, H. Ueno, Y. Matsuo, T. Fukuyama, K. Asahi: Performance assessment of a new laser system for efficient spin exchange optical pumping in a spin maser measurement of the ^{129}Xe EDM

3) 学会誌等

田沼肇：イオン移動度の基礎理論，原子衝突学会誌「しょうとつ」，**11** (2), 18–32 (2014)

田沼肇，美齊津文典：原子衝突におけるイオン移動度実験，原子衝突学会誌「しょうとつ」，**11** (4), 104–115 (2014)

宇宙物理実験研究室

1. 研究活動の概要

「すざく」衛星による銀河系内外のさまざまな天体の観測的研究を進めた。次期X線天文衛星 ASTRO-H の開発も 2015 年度後半の打ち上げを目指して最終段階になり、マイクロカロリメータによる世界初の X 線観測を目指し、本グループも搭載機器の設計や試験を進めた。DIOS および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) 銀河団と X 線背景放射の観測

「すざく」の XIS 検出器はバックグラウンドが低くエネルギー分解能が優れているため、銀河団周辺部や銀河群など低光度の領域を高い感度で調べたり、元素分布を詳しく知ることができる。赤方偏移 0.19 にある銀河団 A1246 の「すざく」の観測から、外縁部のエントロピーが理論的予想の $r^{1.1}$ に比べて低い値となることが示され、多くの銀河団の外縁部でガスが非平衡状態にあることが一層確かになってきた。またオランダ SRON 研究所の赤松が PI となって、銀河団の電波 relic を系統的に観測する Key Project が実施された。ASTRO-H で期待される銀河団中心領域からの共鳴散乱効果についてシミュレーションを行い、国際会議等で発表した。2014 年 8 月にモスクワで開催された COSPAR 会議で、大橋が主催者となって“X-ray spectroscopy of large-scale plasmas”というセッションを開催し、銀河団を中心とする X 線観測の現状と今後の見通しを広く議論した。

「すざく」で観測された Lockman Hole 領域の 6 年間にわたる X 線背景放射のデータを解析し、そのエネルギースペクトルと強度を調べた。その結果は、以前に「あすか」で得られたものと誤算の範囲で一致することが確かめられた。また 2006–2009 年にわたる結果から背景放射の強度に有意な変動がないことも確認された。

2) 「すざく」による太陽系天体の研究

「すざく」による太陽系天体(惑星、彗星など)の研究を推進した。我々は 2006 年の木星観測から、木星周辺に広がった 1–5 keV の X 線放射を発見し、放射線帯に付随する数十 MeV の電子による太陽光の逆コンプトン散乱説を提唱した。今年度は、この放射の正体と太陽活動に対する依存性を見るため、「すざく」衛星による木星の観測を 2014 年に新たに行い、X 線を検出した。木星 X 線は 0.2–1 keV では本体の太陽 X 線の散乱と解釈できる。一方、1–5 keV では、本体に加えて広がった放射の兆候が見られ、また 2006 年と比べて、より高エネルギーに伸びたスペクトルを示していた。2006 年との違いを検証すべく、今後、木星近傍での太陽風分布のシミュレーションや、「すざく」データの空間分布の検証を行う。この観測は、真空紫外領域で惑星分光を行う「ひさき」衛星と同時にっており、数十–数百 keV の電子による紫外線オーロラとも比較して、木星圏での粒子加速を今後、議論する。観測結果は、惑星圏研究会で初期成果を発表した。今後は解析を詰めると共に投稿論文にまとめる。

さらに、ASTRO-H の初期観測として、木星、火星、彗星の観測検討を行い、最終的に木星を提案し最高ランクの評価を頂いた。SXS を使えば、輝線の広がりからイオンの運動学をこれまでにない精度で調べることができるため、粒子加速の直接の証拠をつかむことができる。観測成果を最大限に生かすため、NASA の木星探査衛星 JUNO との同時観測も予定しており、着々と準備を進めている。

3) TES カロリメータの開発と応用

JAXA 宇宙研等との共同で数 100 素子からなるアレイ型 TES (Transition Edge Sensor) カロリメータの開発を進めている。積層配線という方法で、1 cm 四角の中に 400 素子を配置できるよう Si 基板の厚

さ方向へ2層の配線を作り込む方法を開発した。産総研の協力により、イオンミリング法で配線の段差を斜めに削り込み、そのスロープの上に上部下部両方の配線をつけた素子を試作した。まだ90 mKまでの冷却では超伝導転移が見られないという問題があり、表面状態を観察しながら製作方法の改良を進めている。

一方、TES カロリメータの原子核物理への応用として、2014 年秋にスイス PSI で行われた π 中間子原子 (π C) の特性X線のエネルギーを高精度で測る実験に参加した。米国 NIST の TES カロリメータを用いた実験で、 π C 4f-3d 遷移による X 線 (6.4 keV 付近の輝線) を検出するという成果を得ることができ、今後 J-PARC における K 中間子原子核の実験へも見通しを得ることができた。

4) ASTRO-H へ向けた作業

2016 年はじめの打ち上げをめざす ASTRO-H フライトモデルの製作と試験を進めた。本研究室も主検出器マイクロカロリメータ (SXS)、X線反射望遠鏡 (HXT および SXT) のさまざまな評価試験を行った。SXT は角分解能約 1.2 分角 (HPD) というよい性能が実現している。口径 45 cm の入射面を 8 mm ごとにスキャンしたデータをもとに結像特性を詳細に把握し、光線追跡プログラムで SXT 全体の X 線イメージをよく再現することができた。こうした地上キャリブレーションの情報は、ASTRO-H 打ち上げ後の観測でも大いに役立つと期待される。

SXS のフライトモデルのサブシステム試験を進め 2015 年 4 月からの衛星総合試験に備えた。図 1 が試験のセットアップの様子である。機械式冷凍機の振動の影響で、SXS 単体でのエネルギー分解能が 6 eV ほどに劣化することが確かとなったため、アイソレーターを組み込むことを決定した。その結果 2 月末以降のエネルギー分解能は 4.5 eV ほどで安定している。衛星に組み込んだ後は外乱等でやや悪くなるが、6 eV またはそれ以上の分解能が期待される。また首都大が担当する、デジタル波形処理を行う PSP の性能の確認を行い、1 CPU あたり 50 c/s、SXS 全体で 200 c/s が上限であり、要求される 150 c/s を満たすことがわかった。2 月にはスターリング冷凍機の高純化を実施した。首都大スタッフも筑波宇宙センターでの試験に多くの時間を割いたほか、首都大の大学院生も出張し試験のサポートを行った。

サイエンスチームのまとめ役として ASTRO-H の検討を行なった。第 5 回 ASTRO-H サマースクールを 7 月にパリで開催、約 40 名の参加があった。また、7 月にはパリ、3 月には首都大でサイエンス会議を開催した。また 16 編からなる ASTRO-H White paper が完成し、12 月に ArXiv で世界へ公開した。図 2 にはペルセウス座銀河団の Fe ラインの観測から、乱流の強さを SXS で決定できる様子を示す。

5) MEMS 技術を用いた超軽量 X 線光学系の開発

我々は、世界最軽量の独自の X 線光学系の開発を主導している。JAXA 宇宙研、産総研、東北大、京都大などと共同研究である。我々の手法は、数 $10\mu\text{m}$ の微細穴を数 $100\mu\text{m}$ の薄い基板に明け、側壁を反射鏡として用いるものである。基板が薄く、原理的に世界最軽量となる上、高精度のマイクロマシン (MEMS) 技術を用いることで、優れた角度分解能も期待できる。目標は、世界最軽量であった「すざく」衛星の望遠鏡を 1 桁以上軽量化し、なおかつ角度分解能として分角の壁を破ることである。

昨年度は直径 4 inch Wolter I 型光学系で X 線の結像集光に成功した。角度分解能は FWHM では 4 分角だが、HPD (全光量の半分が入る像の直径) では 10 分角以上で有効面積も設計値の 1/5 程度であった。今年度はその原因を調査し、鏡の形状精度と配置精度が影響していることをつきとめた。前者は穴開けに用いるドライエッチングによる側壁平坦性の改善、後者はドライエッチングによる側壁垂直性の改善と、変形精度の改善が必要となる。そこでドライエッチングの条件を見直し 10 分角を切る、知る限り世界最高レベルの形状を達成した。さらに基板の変形プロセスと光学系パターンを見直すことで、変形による配置精度を改善した。今後は、形状精度と穴の垂直性のさらなる改善を進めれば、角度分解能と有効面積両方の大幅な改良が期待できると考えている。

また、微細穴を使った光学系の新手法として、Focused Ion Beam を使った方法を考案し、特許を申請するとともに、光学系を試作して、X線照射試験へと移ろうとしている。さらに、産総研が所有する世界最大級のドライエッチング装置を用いて試作した 12 inch 光学系に X線照射を行い、X線全反射を確かめた。世界最大の微細穴光学系の実証となった。これらの成果は、修士論文、国内外の学会発表および招待講演、解説記事などで発表しており、投稿論文を準備中である。

6) X線による惑星探査ミッションの検討

軽量 X線観測装置を用いた将来の惑星探査ミッションの検討も主導的に行っている。特に今年度は地球磁気圏に向けたミッション検討を本格的に進めた。地球の超高層大気である外圏の主に水素原子が、地球磁気圏にトラップされた太陽風のイオンと相互作用して出る、電荷交換 X線を使った、世界初の地球磁気圏境界面の X線可視化ミッション GEO-X である。我々は、惑星研究者と共同で、宇宙研が進める小型計画としての衛星システム検討と、搭載装置のサイエンス検討を進め、成立性を確かめた。今後、宇宙研などにミッション提案を行うことを検討している。得られた成果は、国内外の学会発表や招待講演などとして発表するとともに、X線天文が所属する高エネルギー宇宙連絡会や、地球磁気圏コミュニティの将来計画会議でも発表を行い、将来計画候補の 1つとして現在、認知されている。

平行して、宇宙研が進める工学実証衛星計画 DESTINY の搭載機器としての地球磁気圏 X線観測装置の検討も行い、搭載される理学機器の有力候補の一つとして認知して頂いた。GEO-X に搭載する装置をコンパクト化したものを搭載し、技術・原理実証を行うことを狙い、今後も工学系研究者と共に検討を進めて行く。この検討状況については、GEO-X と同様に国内外の学会発表などを行った。

7) 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。その多くが温度 10^6 K ほどの中高温の銀河間ガスとして、宇宙の大構造をトレースして分布すると予想され、それを酸素の輝線 (O_{VII} , O_{VIII}) で検出するために、小型計画 DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) を 2020 年の打ち上げを目指して提案している。本年度は、観測系と衛星バスを一体とする設計をメーカーとともに進め、電力、熱的な成立性を確認した。一方、4回反射望遠鏡を大型化し、高速姿勢制御を導入する可能性、輝線と吸収線の両方を見ることによるダークバリオンの新たなサイエンスなどを検討した。

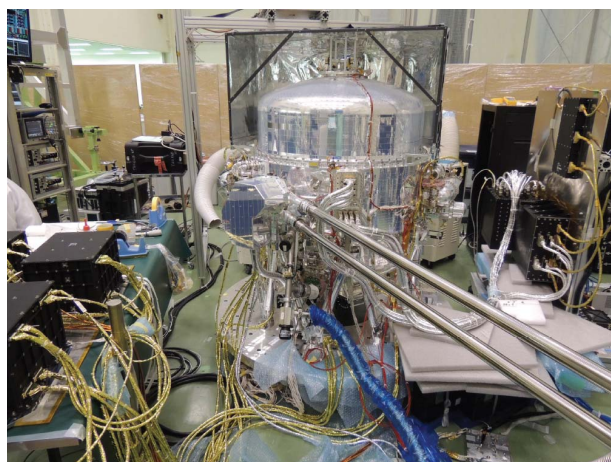


図 1: 2015 年初めに JAXA の筑波宇宙センターで実施された、ASTRO-H SXS フライトモデルの試験の様子。中央のタンクが冷凍機を備えた真空断熱デュワー。

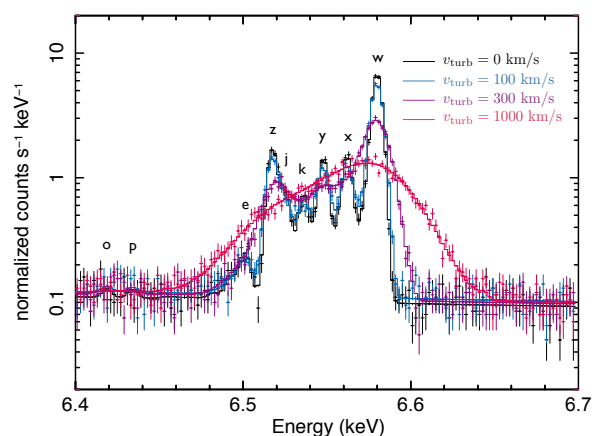


図 2: ASTRO-H で観測が期待されるペルセウス座銀河団からの Fe 輝線プロファイル。乱流の強さに応じて輝線の広がり方が変化することが明確に識別できる。

2. 研究業績

1) 論文

Yoshikawa, Akifumi; Yamada, Shin'ya; Nakahira, Satoshi; Matsuoka, Masaru; Negoro, Hitoshi; Mihara, Tatehiro; Tamagawa, Toru: Repeated short-term spectral softening in the low/hard state of the Galactic black hole candidate Swift J1753.5-0127, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **67**, Issue 1, id.1111 pp. (2014)

Okabe, Nobuhiro; Umetsu, Keiichi; Tamura, Takayuki; Fujita, Yutaka; Takizawa, Motokazu; Zhang, Yu-Ying; Matsushita, Kyoko; Hamana, Takashi; Fukazawa, Yasushi; Futamase, Tasushi; Kawaharada, Madoka; Miyazaki, Satoshi; Mochizuki, Yukiko; Nakazawa, Kazuhiro; Ohashi, Takaya; Ota, Naomi; Sasaki, Toru; Sato, Kosuke; Tam, Sutieng: Universal profiles of the intracluster medium from Suzaku X-ray and Subaru weak-lensing observations, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **66**, Issue 5, id.9914 pp. (2014)

Sato, Kosuke; Matsushita, Kyoko; Yamasaki, Noriko Y.; Sasaki, Shin; Ohashi, Takaya: Temperature and entropy profiles to the virial radius of the Abell 1246 cluster observed with Suzaku, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **66**, Issue 5, id.8515 pp. (2014)

Asami, Fumi; Enoto, Teruaki; Iwakiri, Wataru; Yamada, Shin'ya; Tamagawa, Toru; Mihara, Tatehiro; Nagase, Fumiaki: Broad-band spectroscopy of Hercules X-1 with Suzaku, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **66**, Issue 2, id.44 (2014)

Noda, Hirofumi; Makishima, Kazuo; Yamada, Shin'ya; Nakazawa, Kazuhiro; Sakurai, Soki; Miyake, Katsuma: Suzaku Studies of the Central Engine in the Typical Type I Seyfert NGC 3227: Detection of Multiple Primary X-Ray Continua with Distinct Properties, *The Astrophysical Journal*, **794**, Issue 1, article id. 2, 15 pp. (2014)

Shidatsu, M.; Ueda, Y.; Yamada, S.; Done, C.; Hori, T.; Yamaoka, K.; Kubota, A.; Nagayama, T.; Moritani, Y.: Spectral and Timing Properties of the Black Hole X-Ray Binary H1743-322 in the Low/Hard State Studied with Suzaku, *The Astrophysical Journal*, **789**, Issue 2, article id. 100, 12 pp. (2014)

Enoto, Teruaki; Sasano, Makoto; Yamada, Shin'ya; Tamagawa, Toru; Makishima, Kazuo; Pottschmidt, Katja; Marcu, Diana; Corbet, Robin H. D.; Fuerst, Felix; Wilms, Jörn: Spectral and Timing Nature of the Symbiotic X-Ray Binary 4U 1954+319: The Slowest Rotating Neutron Star in an X-Ray Binary System, *The Astrophysical Journal*, **786**, Issue 2, article id. 127, 16 pp. (2014)

Ishisaki, Y.; Enokijima, Y.; Ezoe, Y.; Ohashi, T.; Akamatsu, H.; Yamamoto, R.; Takei, Y.; Mitsuda, K.; Yamasaki, N. Y.; Yamada, S.: Radiation Tolerance Evaluation of the Ti/Au Bilayer TES Microcalorimeter, *Journal of Low Temperature Physics*, **176**, Issue 3-4, pp. 344-349 (2014)

Yamada, S.; Ezoe, Y.; Ishisaki, Y.; Ohashi, T.; Iijima, N.; Mitsuda, K.; Nagayoshi, K.; Akamatsu, H.; Morooka, T.; Tanaka, K.: Development of Multilayer Readout Wiring TES Calorimeter for Future X-ray Missions, *Journal of Low Temperature Physics*, **176**, Issue 3-4, pp. 310-315 (2014)

Okada, S.; Bennett, D. A.; Doriese, W. B.; Fowler, J. W.; Irwin, K. D.; Ishimoto, S.; Sato, M.; Schmidt, D. R.; Swetz, D. S.; Tatsuno, H.; Ullom, J. N.; Yamada, S.: *Journal of Low Temperature Physics*, **176**, Issue 5-6, pp. 1015-1021 (2014)

2) 国際会議報告

Ohashi, T.; Ishisaki, Y.; Ezoe, Y.; Yamada, S.; Yamaguchi, S.; Miyazaki, N.; Tawara, Y.; Mitsuda, K.; Yamasaki, N. Y.; Takei, Y.; Sakai, K.; Nagayoshi, K.; Yamamoto, R.; Chiba, A.; Hayashi, T.: DIOS: the dark baryon exploring mission, *Proceedings of the SPIE*, **9144**, id. 91442Q 10 pp. (2014)

Mitsuda, Kazuhisa; Kelley, Richard L.; Akamatsu, Hiroki; Bialas, Thomas; Boyce, Kevin R.; Brown, Gregory V.; Canavan, Edgar; Chiao, Meng; Costantini, Elisa; den Herder, Jan-Willem; de Vries, Cor; DiPirro, Michael J.; Eckart, Megan E.; Ezoe, Yuichiro; Fujimoto, Ryuichi; Haas, Daniel; Hoshino, Akio; Ishikawa, Kumi; Ishisaki, Yoshitaka; Iyomoto, Naoko; Kilbourne, Caroline A.; Kimball, Mark; Kitamoto, Shunji; Konami, Saori; Leutenegger, Maurice A.; McCammon, Dan; Miko, Joseph; Mitsuishi, Ikuyuki; Murakami, Hiroshi; Murakami, Masahide; Noda, Hirofumi; Ogawa, Mina; Ohashi, Takaya; Okamoto, Atsushi; Ota, Naomi; Paltani, Stephane; Porter, F. Scott; Sato, Kosuke; Sato, Yoichi; Sawada, Makoto; Seta, Hiromi; Shinozaki, Keisuke; Shirron, Peter J.; Sneiderman, Gary A.; Sugita, Hiroyuki; Szymkowiak, Andrew; Takei, Yoh; Tamagawa, Toru; Tashiro, Makoto S.; Terada, Yukikatsu; Tsujimoto, Masahiro; Yamada, Shinya; Yamasaki, Noriko Y.: Soft x-ray spectrometer (SXS): the high-resolution cryogenic spectrometer onboard ASTRO-H, *Proceedings of the SPIE*, **9144**, id. 91442A 7 pp. (2014)

Takahashi, Tadayuki; Mitsuda, Kazuhisa; Kelley, Richard; Aharonian, Felix; Akamatsu, Hiroki; Akiyama, Fumie; Allen, Steve; Anabuki, Naohisa; Angelini, Lorella; Arnaud, Keith; Asai, Makoto; Audard, Marc; Awaki, Hisamitsu; Azzarello, Philipp; Baluta, Chris; Bamba, Aya; Bando, Nobutaka; Bautz, Marshall; Bialas, Thomas; Blandford, Roger D.; Boyce, Kevin; Brennenman, Laura; Brown, Gregory; Cackett, Ed; 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; Enoto, Teruaki; Ezoe, Yuichiro; Fabian, Andrew; Ferrigno, Carlo; Foster, Adam; Fujimoto, Ryuichi; Fukazawa, Yasushi; Funk, Stefan; Furuzawa, Akihiro; Galeazzi, Massimiliano; Gallo, Luigi; Gandhi, Poshak; Gilmore, Kirk; Guainazzi, Matteo; Haas, Daniel; Haba, Yoshito; Hamaguchi, Kenji; Harayama, Atsushi; Hatsukade, Isamu; Hayashi, Katsuhiro; Hayashi, Takayuki; Hayashida, Kiyoshi; Hiraga, Junko; Hirose, Kazuyuki; Hornschemeier, Ann; Hoshino, Akio; Hughes, John; Hwang, Una; Iizuka, Ryo; Inoue, Yoshiyuki; Ishibashi, Kazunori; Ishida, Manabu; Ishikawa, Kumi; Ishimura, Kosei; Ishisaki, Yoshitaka; Itoh, Masayuki; Iwata, Naoko; Iyomoto, Naoko; Jewell, Chris; Kaastra, Jelle; Kallman, Timothy; Kamae, Tuneyoshi; Kataoka, Jun; Katsuda, Satoru; Katsuta, Junichiro; Kawaharada, Madoka; Kawai, Nobuyuki; Kawano, Taro; Kawasaki, Shigeo; Khangaluyan, Dmitry; Kilbourne, Caroline; Kimball, Mark; Kimura, Masashi; Kitamoto, Shunji; Kitayama, Tetsu; Kohmura, Takayoshi; Kokubun, Motohide; Konami, Saori; Kosaka, Tatsuro; Koujelev, Alexander; Koyama, Katsuji; Krimm, Hans; Kubota, Aya; Kunieda, Hideyo; LaMassa, Stephanie; Laurent, Philippe; Lebrun, Francois; Leutenegger, Maurice; Limousin, Olivier; Loewenstein, Michael; Long, Knox; Lumb, David; Madejski, Grzegorz; Maeda, Yoshitomo; Makishima, Kazuo; Markevitch, Maxim; Masters, Candace; Matsumoto, Hironori; Matsushita, Kyoko; McCammon, Dan; McGuin-

ness, Daniel; McNamara, Brian; Miko, Joseph; Miller, Jon; Miller, Eric; Mineshige, Shin; Minesugi, Kenji; Mitsuishi, Ikuyuki; Miyazawa, Takuya; Mizuno, Tsunefumi; Mori, Koji; Mori, Hideyuki; Moroso, Franco; Muench, Theodore; Mukai, Koji; Murakami, Hiroshi; Murakami, Toshio; Mushotzky, Richard; Nagano, Housei; Nagino, Ryo; Nakagawa, Takao; Nakajima, Hiroshi; Nakamori, Takeshi; Nakashima, Shinya; Nakazawa, Kazuhiro; Namba, Yoshiharu; Natsukari, Chikara; Nishioka, Yusuke; Nobukawa, Masayoshi; Noda, Hirofumi; Nomachi, Masaharu; O'Dell, Steve; Odaka, Hirokazu; Ogawa, Hiroyuki; Ogawa, Mina; Ogi, Keiji; Ohashi, Takaya; Ohno, Masanori; Ohta, Masayuki; Okajima, Takashi; Okazaki, Tsuyoshi; Ota, Naomi; Ozaki, Masanobu; Paerels, Frits; Paltani, Stephane; Parmar, Arvind; Petre, Robert; Pinto, Ciro; Pohl, Martin; Pontius, James; Porter, F. S.; Pottschmidt, Katja; Ramsey, Brian; Reis, Rubens; Reynolds, Christopher; Ricci, Claudio; Russell, Helena; Safi-Harb, Samar; Saito, Shinya; Sakai, Shin-ichiro; Sameshima, Hiroaki; Sato, Kosuke; Sato, Rie; Sato, Goro; Sawada, Makoto; Serlemitsos, Peter; Seta, Hiromi; Shibano, Yasuko; Shida, Maki; Shimada, Takanobu; Shirron, Peter; Simionescu, Aurora; Simmons, Cynthia; Smith, Randall; Sneiderman, Gary; Soong, Yang; Stawarz, Lukasz; Sugawara, Yasuharu; Sugita, Satoshi; Szymkowiak, Andrew; Tajima, Hiroyasu; Takahashi, Hiroaki; Takahashi, Hiromitsu; Takeda, Shin-ichiro; Takei, Yoh; Tamagawa, Toru; Tamura, Keisuke; Tamura, Takayuki; Tanaka, Takaaki; Tanaka, Yasuyuki; Tanaka, Yasuo; Tashiro, Makoto; Tawara, Yuzuru; Terada, Yukikatsu; Terashima, Yuichi; Tombesi, Francesco; Tomida, Hiroshi; Tsuboi, Yoko; Tsujimoto, Masahiro; Tsunemi, Hiroshi; Tsuru, Takeshi; Uchida, Hiroyuki; Uchiyama, Hideki; Uchiyama, Yasunobu; Ueda, Yoshihiro; Ueda, Shutaro; Ueno, Shiro; Uno, Shinichiro; Urry, Meg; Ursino, Eugenio; de Vries, Cor; Wada, Atsushi; Watanabe, Shin; Watanabe, Tomomi; Werner, Norbert; White, Nicholas; Wilkins, Dan; Yamada, Shinya; Yamada, Takahiro; Yamaguchi, Hiroya; Yamaoka, Kazutaka; Yamasaki, Noriko; Yamauchi, Makoto; Yamauchi, Shigeo; Yaqoob, Tahir; Yatsu, Yoichi; Yonetoku, Daisuke; Yoshida, Atsumasa; Yuasa, Takayuki; Zhuravleva, Irina; Zoghbi, Abderahmen; ZuHone, John: The ASTRO-H X-ray astronomy satellite, *Proceedings of the SPIE*, **9144**, id. 914425 24 pp. (2014)

Takeda, Sawako; Tashiro, Makoto S.; Ishisaki, Yoshitaka; Tsujimoto, Masahiro; Seta, Hiromi; Shimoda, Yuya; Yamaguchi, Sunao; Uehara, Sho; Terada, Yukikatsu; Fujimoto, Ryuichi; Mitsuda, Kazuhisa: Performance verification and system integration tests of the pulse shape processor for the soft x-ray spectrometer onboard ASTRO-H, *Proceedings of the SPIE*, **9144**, id. 91445B 7 pp. (2014)

Ohashi, T.; Ishisaki, Y.; Ezoe, Y.; Tawara, Y.; Mitsuda, K.; Yamasaki, N.; Takei, Y.; DIOS Working Group: DIOS: the Dark Baryon Exploring Mission, *Suzaku-MAXI 2014: Expanding the Frontiers of the X-ray Universe, proceedings of a conference held 19-22 February, 2014 at Ehime University, Japan., Edited by M. Ishida, R. Petre, and K. Mitsuda*, p.410 (2014)

Ezoe, Yuichiro; Ishisaki, Yoshitaka; Ohashi, Takaya; Mitsuishi, Ikuyuki; Ishikawa, Kumi; Miyoshi, Yoshizumi; Fujimoto, Ryuichi; Kasahara, Satoshi; Kimura, Tomoki; Hasegawa, Hiroshi; Fujimoto, Masaki; Mitsuda, Kazuhisa; Nishijo, Kunitoshi; Noda, Atsushi: Suzaku observations of diffuse X-rays from the Earth's magnetosphere and beyond, *Suzaku-MAXI 2014: Expanding the Frontiers of the X-ray Universe, proceedings of a conference held 19-22 February, 2014 at Ehime University, Japan. Edited by M. Ishida, R. Petre, and K. Mitsuda*, p.39 (2014)

Shimoda, Yuya; Kawaharada, Madoka; Sato, Kosuke; Okabe, Nobuhiro; Ohashi, Takaya; Ishisaki, Yoshitaka; Mitsuishi, Ikuyuki; Akamatsu, Hiroki; Tashiro, Makoto S.: Metal Enrichment Histories in the Intracluster Medium with Suzaku, *Suzaku-MAXI 2014: Expanding the Frontiers of the X-ray Universe, proceedings of a conference held 19-22 February, 2014 at Ehime University, Japan. Edited by M. Ishida, R. Petre, and K. Mitsuda*, p.418 (2014)

Sato, M.; Mitsuishi, I.; Sasaki, S.; Iijima, N.; Hayashi, K.; Ohashi, T.: Suzaku observation of merging groups of galaxies NGC 7618 and UGC 12491, *Suzaku-MAXI 2014: Expanding the Frontiers of the X-ray Universe, proceedings of a conference held 19-22 February, 2014 at Ehime University, Japan. Edited by M. Ishida, R. Petre, and K. Mitsuda*, p.416 (2014)

Sato, Kosuke; Matsushita, Kyoko; Tamura, Takayuki; Akamatsu, Hiroki; Fukazawa, Yasushi; Fujita, Yutaka; Kawaharada, Madoka; Nakazawa, Kazuhiro; Ohashi, Takaya; Okabe, Nobuhiro; Ota, Naomi; Takizawa, Motokazu: Temperature, entropy, and mass profiles to the virial radius of Abell 2199 with Suzaku, *Suzaku-MAXI 2014: Expanding the Frontiers of the X-ray Universe, proceedings of a conference held 19-22 February, 2014 at Ehime University, Japan. Edited by M. Ishida, R. Petre, and K. Mitsuda*, p.414 (2014)

Mochizuki, Yukiko; Matsushita, Kyoko; Sato, Kosuke; Ichikawa, Kazuya; Okabe, Nobuhiro; Sasaki, Toru; Fabian, Andy C.; Walker, Stephen; Fujita, Yutaka; Tamura, Takayuki; Nakazawa, Kazuhiro; Ohashi, Takaya; Umetsu, Keiichi; Ota, Naomi; Takizawa, Motokazu: Entropy and pressure profiles of Abell 478 out to the virial radius with Suzaku, *Suzaku-MAXI 2014: Expanding the Frontiers of the X-ray Universe, proceedings of a conference held 19-22 February, 2014 at Ehime University, Japan. Edited by M. Ishida, R. Petre, and K. Mitsuda*, p.406 (2014)

Miyake, Katsuma; Noda, Hirofumi; Yamada, Shinya; Makishima, Kazuo: The New Primary Radiation from Seyfert 1 AGNs, *Suzaku-MAXI 2014: Expanding the Frontiers of the X-ray Universe, proceedings of a conference held 19-22 February, 2014 at Ehime University, Japan. Edited by M. Ishida, R. Petre, and K. Mitsuda*, p.331 (2014)

Yoshikawa, Akifumi; Yamada, Shin'ya; Nakahira, Satoshi; Matsuoka, Masaru; Negoro, Hitoshi; Mihara, Tatehiro; Tamagawa, Toru: Discovery of Short-term Spectral Softening in the Low/Hard State of the Galactic Black Hole Swift J1753.5-0127 with MAXI, *Suzaku-MAXI 2014: Expanding the Frontiers of the X-ray Universe, proceedings of a conference held 19-22 February, 2014 at Ehime University, Japan. Edited by M. Ishida, R. Petre, and K. Mitsuda*, p.262 (2014)

Koyama, Shu; Yamada, Shin'ya; Tashiro, Makoto S.; Terada, Yukikatsu; Kubota, Aya; Makishima, Kazuo: Spectral Variability of LMC X-1 with SUZAKU, *Suzaku-MAXI 2014: Expanding the Frontiers of the X-ray Universe, proceedings of a conference held 19-22 February, 2014 at Ehime University, Japan. Edited by M. Ishida, R. Petre, and K. Mitsuda*, p.170 (2014)

Yamada, Shinya: Disk-coronal coexistence around black holes revealed with Suzaku, *Suzaku-MAXI 2014: Expanding the Frontiers of the X-ray Universe, proceedings of a conference held 19-22 February, 2014 at Ehime University, Japan. Edited by M. Ishida, R. Petre, and K. Mitsuda*, p.122 (2014)

Ogawa, Tomohiro; Ezoe, Yuichiro; Hamaguchi, Kenji; Corcoran, Michael; Petre, Robert; Townsley, Leisa; Broos, Patrick; Chu, You-hua; Gruendl, Robert; Pittard, Julian; Montmerle, Thierry: Diffuse X-ray emission from a Southwest Region of Carina Nebula with Suzaku, *Suzaku-MAXI 2014: Expanding the Frontiers of the X-ray Universe, proceedings of a conference held 19-22 February, 2014 at Ehime University, Japan. Edited by M. Ishida, R. Petre, and K. Mitsuda*, p.56 (2014)

Mitsuishi, Ikuyuki; Sato, Toshiki; Mitsuda, Kazuhisa; Yamasaki, Noriko Y.; Ohashi, Takaya; McCammon, Dan: Unresolved Soft X-Ray Emissions from the Galactic Plane, *Suzaku-MAXI 2014: Expanding the Frontiers of the X-ray Universe, proceedings of a conference held 19-22 February, 2014 at Ehime University, Japan. Edited by M. Ishida, R. Petre, and K. Mitsuda*, p.50 (2014)

Mitsuishi, I.; Ezoe, Y.; Ishikawa, K.; Ohashi, T.; Fujimoto, R.; Mitsuda, K.; Tsunematsu, S.; Yoshida, S.; Kanao, K.; Murakami, M.; DiPirro, M.; Shirron, P.: He flow rate measurements on the engineering model for the Astro-H Soft X-ray Spectrometer dewar, *Cryogenics*, **64**, p. 189-193. (2014)

Iwata, T.; Kawakatsu, Y.; Murakami, G.; Ezoe, Y.; Kameda, S.; Keika, K.; Arai, T.; Ikenaga, T.; Saiki, T.: Studies on Solar System Explorations Using DESTINY: The Demonstration and Experiments of Space Technology for Interplanetary Voyage, *46th Lunar and Planetary Science Conference, held March 16-20, 2015 in The Woodlands, Texas. LPI Contribution*, **1832**, p.1727 (2014)

Ohno, Masanori; Tashiro, Makoto S.; Yonetoku, Daisuke; Sameshima, Hiroaki; Seta, Hiromi; Ueno, Haruka; Mushotzky, Richard; Kelley, Richard L.; Nakagawa, Takao; Tamura, Takayuki; Paerels, Frits B.; Kawai, Nobuyuki; Ohashi, Takaya; ASTRO-H Team: Future ASTRO-H observations of chemical evolution in high-z universe, *American Astronomical Society, AAS Meeting #225*, #338.35 (2014)

Kraft, R.; Kimura, T.; Elsner, R.; Branduardi-Raymont, G.; Gladstone, R.; Badman, S. V.; Ezoe, Y.; Murakami, G.; Murray, S. S.; Roediger, E.; Tsuchiya, F.; Yamazaki, A.; Yoshikawa, I.; Yoshioka, K.: Preliminary Results from a Coordinated Hisaki/Chandra/XMM-Newton Study of the Jovian Aurora and Io Plasma Torus, *American Geophysical Union, Fall Meeting 2014*, abstract #P21A-3908 (2014)

Kimura, T.; Badman, S. V.; Tao, C.; Yoshioka, K.; Murakami, G.; Yamazaki, A.; Tsuchiya, F.; Bonfond, B.; Steffl, A. J.; Kraft, R.; Branduardi-Raymont, G.; Elsner, R.; Ezoe, Y.; Fujimoto, M.: Multi-wavelength observations of Jupiter's aurora coordinated with Hisaki and other space telescopes, *American Geophysical Union, Fall Meeting 2014*, abstract #P13E-08 (2014)

Kimura, T.; Badman, S.; Tao, C.; Yoshioka, K.; Murakami, G.; Yamazaki, A.; Tsuchiya, F.; Bonfond, B.; Steffl, A.; Kraft, R.; Branduardi-Raymont, G.; Ezoe, Y.; Hisaki science team; HST Cycle 20 GO 13035 team; CXO Cycle 15 GO 15100276 team: Highlights of the 2014 Jupiter observing campaign by multi-spectral remote sensing using space telescopes, *European Planetary Science Congress 2014, EPSC Abstracts*, **9**, id. EPSC2014-78 (2014)

3) 日本語解説

大橋隆哉 (協力): X線が写し出す高エネルギー宇宙, ニュートン, 2015年2月号

江副祐一郎: 超電導センサ (その6) - 超電導遷移端型センサの原理と応用, 超電導 Web21, 2014年12月号

吉川一朗, 吉岡 和夫, 桂華邦裕, 江副祐一郎: 6. 太陽系プラズマの観測技術 6.2 撮像技術, プラズマ核融合学会誌, 小特集 太陽系内プラズマ, 2014 年, 90 号, 786-788

研究室だより 首都大学東京大学院理工学研究科物理学専攻 宇宙物理実験研究室: 電気学会誌 E(センサ・マイクロマシン部門), 2015 年 3 月号, 2-2

4) 特許

江副祐一郎, 三石郁之, 満田和久: 「X 線光学系基材, 及びその製造方法」, 特許出願 2014-155088

河上聡子, 檜原弘樹, 水島和代, 高橋忠幸, 国分紀秀, 能町正治, 尾崎正伸, 河合誠之, 石崎欣尚, 寺田幸功: 「情報記録再生装置及び記録再生方法」, 特許公開 2014-127076, 公開日 2014 年 7 月 7 日

5) 学会講演

● 日本物理学会 2014 年秋季大会 2014 年 9 月 18~21 日 (佐賀・佐賀大学)

楳本大悟, 土屋晴文, 榎戸輝揚, 湯浅孝行, 山田真也, 中澤知洋, 牧島一夫: GROWTH 実験で 2012 年に検出された北陸冬季雷雲からの対消滅線

● 日本物理学会 2015 年春季大会 2015 年 3 月 21~24 日 (早稲田大学)

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

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

橋本直, D.A. Bennett, C. Curceanu, W.B. Doriese, J.W. Fowler, J. Gard, F.P. Gustafsson, 早野龍五, 施赫將, M. Iliescu, 石元茂, 板橋健太, 岩崎雅彦, 桑原啓介, J. Marton, 野田博文, G.C. O'Neil, 岡田信二, 應田治彦, C.D. Reintsema, 佐藤将春, D.R. Schmidt, 鈴木謙, 鈴木隆敏, D.S. Swetz, 竜野秀行, F. J. Uhlig, J.N. Ullom, E. Widmann, 山田真也, J. Zmeskal: K 中間子原子 X 線分光に向けた超伝導遷移端マイクロカロリメータの π -ビーム試験

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

岡田信二, D.A. Bennett, C. Curceanu, W.B Doriese, J.W. Fowler, J. Gard, F.P. Gustafsson, 橋本直, 早野龍五, 施赫將, M. Iliescu, 石元茂, 板橋健太, 岩崎雅彦, 桑原啓介, J. Marton, 野田博文, G.C. O'Neil, 應田治彦, C.D. Reintsema, 佐藤将春, D.R. Schmidt, 鈴木謙, 鈴木隆敏, D.S. Swetz, 竜野秀行, F. J. Uhlig, J.N. Ullom, E. Widmann, 山田真也, J. Zmeskal: 超伝導遷移端マイクロカロリメータを用いた K 中間子原子 X 線精密分光実験

楳本大悟, 土屋晴文, 湯浅孝行, 中澤知洋, 榎戸輝揚, 古田録大, 山田真也, 牧島一夫: GROWTH 実験 1: 2014 年末に新規設置した雷雲ガンマ線検出器と初期成果

古田録大, 楳本大悟, 土屋晴文, 湯浅孝行, 中澤知洋, 榎戸輝揚, 山田真也, 牧島一夫: GROWTH 実験 2: 2014-2015 冬に観測された雷由来ガンマ線の詳細解析

● 日本天文学会 2014 年秋季年会 2014 年 9 月 11~14 日 (山形大学)

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

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

山口静哉, 宮崎直人, 桑原啓介, 山田真也, 江副祐一郎, 石崎欣尚, 大橋隆哉 (首都大), 満田和久 (宇宙研), 日高睦夫, 佐藤哲朗 (産総研): DIOS 衛星搭載を目指した TES 型 X 線マイクロカロリメータの開発

西頭太郎, 佐原宏典, 江副祐一郎, 佐久間岳志, 堤大樹 (首都大), 磯部直樹 (ISAS/JAXA), 幸村孝由 (東京理科大), 宮村典秀 (明星大), ORBIS チーム: 超小型衛星を用いた天文観測の提案とその初号機 ORBIS の開発状況

江副 祐一郎 (首都大), 三好 由純, (名古屋大), 笠原 慧, 満田 和久, 藤本 正樹, 山崎 敦, 長谷川 洋, 木村 智樹 (ISAS/JAXA), 大橋 隆哉, 石崎 欣尚 (首都大), 三石 郁之 (名古屋大), 石川 久美 (理研), 松本 洋介 (千葉大), 藤本 龍一 (金沢大), 野田 篤司, 西城 邦俊 (TKSC/JAXA): 地球磁気圏 X 線可視化計画の検討現状

上原翔 (首都大), 河原創 (東大), 大橋隆哉 (首都大), 山田真也 (首都大): 恒星フレアが系外惑星大気に及ぼす影響の解析

桑原啓介, 山田真也, 大橋隆哉 (首都大学東京), 野田博文 (理研): 狭輝線 1 型セイファート銀河 PG1244+026 の X 線時間変動解析

佐藤真柚 (首都大学東京), 三石郁之 (名古屋大学), Eric D. Miller (MIT), 大橋隆哉 (首都大学 東京): 「すざく」による近傍 Fossil システム候補天体の系統的観測

栗山翼, 佐藤浩介, 松下恭子 (東京理科大学), 赤松弘規 (SRON), 大橋隆哉 (首都大学東京), 藤田裕 (大阪大学), 川原田円, 田村隆幸 (ISAS/JAXA), 中澤知洋 (東京大学), 岡部信広 (IPMU), 太田直美 (奈良女子大学), 滝沢元和 (山形大学): 銀河団外縁部のエントロピー異常の原因の検証

赤松弘規 (SRON), 河原創 (東大), 石崎欣尚 (首都大), 大橋隆哉 (首都大): 銀河団に付随する電波放射領域 (電波レリックス) の X 線観測の現状

板花まどか (山形大), 滝沢元和 (山形大), 赤松弘規 (SRON), 大橋隆哉 (首都大), 石崎欣尚 (首都大), 河原創 (東京大): 電波レリックスを持つ銀河団 1RXS J0603.3+4214 の衝撃波候補領域の解析

宮崎 直人, 山田 真也 (首都大), 根来 均 (日大), 大橋 隆哉 (首都大): 「すぎく」で観測された MAXI J1659-152 のエネルギースペクトル

吉川瑛文 (理化学研究所/東京理科大学), 山田真也 (首都大学東京), 野田博文, 玉川徹 (理化学研究所): 「すぎく」衛星を用いたブラックホール連星 Cygnus X-1 の high/soft 状態のハード成分の詳細解析

榎戸輝揚 (理研, NASA/GSFC), 笹野理 (東大), 山田真也 (首都大), 玉川徹 (理研), 牧島一夫 (東大, 理研) ほか: 自転周期のきわめて遅い X 線パルサー 4U 1954+319 のすぎく観測

佐藤寿紀, 菊地直道, 倉島翔 (首都大学東京), 林多佳由, 飯塚亮, 前田良知, 石田學 (ISAS), 南沙里 (奈良女子大), 岡島崇, Peter J. Serlemittos, Yang Soong (GSFC), 他 the ASTRO-H SXT team: ASTRO-H 搭載軟 X 線望遠鏡の望遠鏡特性の評価 (2)

菊地直道, 佐藤寿紀, 倉嶋翔 (首都大学東京), 石田學, 前田良知, 飯塚亮, 林多佳由 (ISAS/JAXA), 田原譲, 國枝秀世, 森英之 (名古屋大学), 南沙里 (奈良女子大学), 岡島崇, Peter J. Serlemittos, Yang Soong (NASA/GSFC), 他 the ASTRO-H SXT team: ASTRO-H 搭載軟 X 線望遠鏡 (SXT) の迷光測定

飯塚亮, 前田良知, 林多佳由, 石田学 (ISAS/JAXA), 佐藤寿紀, 菊地直道, 倉嶋翔 (首都大学東京), 岡島崇 (NASA/GSFC), 森英之, 佐治重孝, 立花猷, 松本浩典, 三石郁之, 古澤彰宏, 田村啓輔 (名古屋大学), 宇留賀朋哉, 新田清文 (JASRI/SPRING-8), ほか measurements collaborations: 大型放射光施設 SPRING-8 を用いた Astro-H SXT 用 X 線反射鏡の測定

● 日本天文学会 2015 年春季年会 2015 年 3 月 18~21 日 (大阪大学)

山田真也, “ASTRO-H 特別セッション”, 「ASTRO-H が拓くサイエンス: ブラックホール」 (招待講演)

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

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

「すざく」データを用いた微弱な輝線や吸収線の統計的評価方法: 宮崎直人, 山田真也 (首都大), 榎戸輝揚 (NASA/GSFC), 大橋隆哉 (首都大)

狭輝線 1 型セイファート銀河の X 線時間変動に対する特徴付けとその比較: 桑原啓介, 山田真也, 大橋隆哉 (首都大学東京), 野田博文 (理化学研究所)

銀河団 1RXS J0603.3+4214 の電波レリック周辺領域での物理状態と粒子加速過程: 板花まどか, 滝沢元和 (山形大), 赤松弘規 (SRON), 大橋隆哉, 石崎欣尚 (首都大), 河原創 (東京大)

小林洋明, 三石郁之, 松本浩典, 田原譲 (名古屋大学), Norbert Werner (Stanford), Aurora Simionescu (ISAS/JAXA), 大橋隆哉 (首都大東京): X 線天文衛星 XMM-Newton を用いた近接銀河団 RXC J0751.3+1730 および SDSS +117.7+17.7+0.19 の観測

菅原悠宇紀, 滝沢元和, 板花まどか (山形大学), 赤松弘規 (SRON), 藤田裕 (大阪大学), 大橋隆哉, 石崎欣尚 (首都大学): 「すざく」衛星による銀河団 Abell 3391 と Abell 3395 の連結領域の観測

星野晶夫, 小林頼房, 梨子田礼美, 北本俊二 (立教大学), 小波さおり, 桑原啓介, 石崎欣尚, 田沼肇, 大橋隆哉 (首都大学東京): 電荷交換反応由来の X 線検出を目指した地上分光システムの構築

横田佳奈, 松下恭子, 佐藤浩介, 佐久間絵理, 佐々木亨, 阿部雄介, 栗山翼 (東京理科大学), 石崎欣尚 (首都大学東京), 星野晶夫 (立教大学): 「すざく」による大規模フィラメント上の銀河団 AWM 7 の鉄質量-銀河光度比の方向依存性

笹田真人, 嶺重慎 (京都大学), 山田真也 (首都大学東京), 根来均 (日本大学): ケプラーブレイザー W2R 1926+42 のショット解析による短時間変動の研究

野田博文 (理研), 峰崎岳夫 (東大理), 牧島一夫 (東大理/理研), 中澤知洋, 諸隈智貴, 小久保充, 土居守 (東大理), 河口賢至, 伊藤亮介, 川端弘治, 深沢泰司 (広大理), 中尾光, 渡辺誠 (北大理), 森鼻久美子, 伊藤洋一 (兵庫県立大理), 斉藤嘉彦 (東工大), 山田真也 (首都大): セイファート NGC 3516 の X 線と可視光の間に見られた光度変動の遅延

倉嶋翔 (首都大学東京), 竹井洋, 飯塚亮 (ISAS), 菊地直道, 佐藤寿紀 (首都大学東京), 林多佳由, 前田良知, 石田學 (ISAS): ASTRO-H 搭載 SXS 較正用 ^{55}Fe X 線源の絶対強度測定

菊地直道, 佐藤寿紀, 倉嶋翔 (首都大学東京), 石田學, 前田良知, 飯塚亮, 林多佳由 (ISAS/JAXA), 岡島崇 (NASA/GSFC), 佐治重孝, 立花献, (名古屋大学), 宇留賀朋哉, 新田清文 (JASRI/SPring-8),ほか
measurements collaborations: ASTRO-H SXT 用反射鏡の金の L 吸収端付近の反射率測定

● 応用物理学会 2014 年秋季年会 2014 年 9 月 17~20 日 (北海道大学)

Rasadujjaman Md, 倉島優一, 前田敦彦, 廣島洋, 高木秀樹, 近藤英一, 江副祐一郎: High-precision curving process of Si wafer for X-ray MEMS mirror used in space application

● 応用物理学会 2015 年春季年会 2015 年 3 月 11~14 日 (東海大学)

江副祐一郎: X 線天文・探査衛星に向けたマイクロマシン技術を用いた超軽量 X 線望遠鏡 (招待講演)

国内研究会

● 全天軟 X 線放射研究会 2014 年 5 月 27 日 (理化学研究所)

江副祐一郎: geocoronal SWCX レビュー

石川久美, 大橋隆哉: 「すぎく」 XIS による地球外圏からの軟 X 線の系統探査

江副祐一郎: GEO-X Geocorona O-line 撮像

● 第 47 回 月・惑星シンポジウム, 2014 年 8 月 4~6 日 (ISAS/JAXA)

江副 祐一郎, 桂華邦宏, 亀田真吾, 地球圏イメージング検討チーム: DESTINY 応用ミッション 地球圏イメージング

● 2020 年代の高エネルギー宇宙物理学シンポジウム, 2014 年 8 月 23~24 日 (ISAS/JAXA)

大橋隆哉: 精密 X 線分光のロードマップ (招待講演)

江副祐一郎: 太陽系 diffuse (招待講演)

● 第 13 回マイクロシステム融合研究会, 2014 年 10 月 14 日 (東北大学)

江副祐一郎: MEMS 技術を用いた X 線望遠鏡の開発 (招待講演)

● 東京大学物理学教室コロキウム, 2014 年 10 月 17 日 (東京大学小柴ホール)

大橋隆哉: ASTRO-H 衛星で拓く宇宙 X 線観測の最前線 (招待講演)

● 第 58 回宇宙科学技術連合大会, 2014 年 11 月 12~14 日 (長崎ブリックホール)

江副祐一郎 (首都大), 桂華邦裕 (名大), 亀田真吾 (立教大): DESTINY 応用: 地球圏イメージングミッション

● 地球磁気圏 X 線可視化に関する研究会, 2014 年 11 月 15 日 (首都大学東京)

江副祐一郎: GEO-X ミッション

● 第 3 回 NINS コロキウム, 2014 年 12 月 1~3 日 (ザ・プリンス箱根)

上原翔, 河原創, 山田真也, 大橋隆哉: 恒星フレアが系外惑星大気に及ぼす影響の解析

● 高エネルギー宇宙物理・将来計画討論会, 2014 年 12 月 16 日 (ISAS/JAXA)

大橋隆哉: 精密 X 線分光 (セッション取りまとめ)

● 第 15 回宇宙科学シンポジウム 2015 年 1 月 6~7 日 (ISAS/JAXA)

満田和久 (JAXA), Richard Kelley (NASA/GSFC), 山崎典子, 辻本匡広, 小川美奈, 竹井洋, 杉田寛之, 佐藤洋一, 篠崎慶亮, 岡本篤 (JAXA), 藤本龍一 (金沢大), 大橋 隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 山田真也, 小波さおり (首都大), 田代信, 寺田幸功, 瀬田裕美 (埼玉大), 北本俊二, 星野晶夫 (立教大), 玉川徹, 石川久美, 野田博文 (理研), 佐藤浩介 (東京理科大), 太田直美 (奈良女子大), 澤田真理 (青学大), 三 石郁之 (名大), 村上正秀 (筑波大), 村上弘志 (東北学院大), 伊予本直子 (九大), C.A. Kilborne, F.S. Porter, K.R. Boyce, M.E. Eckart, M.P. Chiao, M.A. Leutenegger (NASA/GSFC), G.V. Brown (LLNL), D. McCammon (Wisconsin Univ.), A. Szymkowiak (Yale Univ.), J-W. den Herder, D. Haas, C. de Vries, E. Costantini, H. Akamatsu (SRON), S. Paltani (Geneva Univ.): ASTRO-H 衛星搭載 SXS-XCS 検出器

大橋隆哉 (首都大), Mushotzky Richard (University of Maryland), 松下恭子 (東京 理科大), 上田佳宏 (京大), 久保田あや (芝浦工大), 太田直美 (奈良女子大), 内山 泰伸 (立教大), Smith Randall (CfA/SAO), 馬場彩 (青学大), 山田真也 (首都大), 湯 浅孝行 (理研), 辻本匡弘, 川原田円, 小高裕和, 中島真也, 高橋忠幸 (JAXA): ASTRO-H の目指すサイエンス

赤松弘規 (SRON), van Weeren Reinout (CfA/SAO), Kawahara Hajime (東 大), Fukazawa Yasushi (広島大), Kaastra Jelle (SRON), 川原田円 (JAXA), 中澤知 洋 (東大), 大橋隆哉 (首都大), 太田直美 (奈良女子大), Roettgering Huub (Leiden Univ.), 滝沢元和 (山形大), Vink Jacco, Zandanel Fabio (Amsterdam Univ.): 「すぎく」 衛星による電波レリッック領域の X 線観測: 銀河団における粒子加速機構の理解に向けて

佐々木亨, 栗山翼, 松下恭子, 佐藤浩介 (東京理科大), 岡部信広 (東大/Kavli IPMU), 赤松弘規 (SRON), 大橋隆哉 (首都大), 藤田裕 (阪大), 川原田円, 田村隆幸 (JAXA), 中澤知洋 (東大), 太田直美 (奈良女子大), 滝沢元和 (山形大): 「すぎく」 で探す銀河団外縁部のサブハロー/ガス塊

大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎 (首都大), 田原譲 (名大), 満田和久, 山崎典子, 竹井洋 (JAXA), DIOSWG: ダークバリオン探索小型衛星 DIOS の開発の現状

宮崎直人, 山口静哉, 桑原啓介, 黒丸厳静, 加藤優花, 大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副 裕一郎, 山田真也 (首都大), 満田和久, 山崎典子, 竹井洋 (JAXA), 関谷典央, 酒井 和広, 永吉賢一郎, 山本亮, 林祐, 村松はるか (東大), 日高睦夫, 佐藤哲郎 (産総 研), 野田博文 (理研): DIOS 衛星搭載を目指した TES 型 X 線マイクロカロリメータ開発の 現状

野地拓匡 (首都大), 宮地晃平, 菊地貴大, 星野全俊, 吉田賢史, 山崎典子, 満田和 久 (JAXA), 大橋隆哉 (首都大), 川崎繁男 (JAXA): 誘電体カロリメータ用極低温動作低雑音増幅 MMIC の検討

佐藤真柚, 江副祐一郎, 小川智弘, 生田昌寛, 沼澤正樹, 中村果澄 (首都大), 石川 久美 (理研), 大橋隆哉 (首都大), 満田和久 (JAXA), 前田龍太郎, 廣島洋, 倉島優 一, 野田大二 (産総研), 金森義明 (東北大), 中嶋一雄 (産総研), 森下浩平 (京大): 将来衛星に向けた超軽量小型 X 線光学系の開発現状

江副祐一郎 (首都大), 三好由純 (名大), 笠原慧, 満田和久, 藤本正樹, 山崎敦, 長 谷川洋, 木村智樹 (JAXA), 大橋隆哉, 石崎欣尚 (首都大), 三石郁之 (名大), 石川 久美 (理研), 藤本龍一 (金沢大), 松本洋介 (千葉大), 野田篤司, 西城邦俊 (JAXA): 地球磁気圏を X 線で可視化する GEO-X 衛星の検討状況

岩田隆浩, 川勝康弘, 村上豪, 池永敏憲 (JAXA), 江副祐一郎 (首都大), 亀田真吾 (立教大), 桂華邦裕 (名大), 荒井朋子 (千葉工大), 松浦周二, 佐伯孝尚, 今村剛 (JAXA), 小郷原一智 (滋賀県立大), 大山聖 (JAXA): DESTINY を用いた太陽系探査

● 電子情報通信学会 MW 研究会, 2015 年 1 月 15-16 日 (機械振興会館, 東京)

野地拓匡, 宮地晃平, 菊地貴大, 山崎典子, 満田和久, 川崎繁男: X 線観測用誘電体マイクロカロリメータに向けた極低温動作下における高利得 X 帯低雑音増幅器の耐放射線性の検討

● 広島大学 CORE-U キックオフシンポジウム, 2015 年 1 月 21 日 (広島大学)

大橋隆哉: ASTRO-H の現状と広島 Core-U への期待 (招待講演)

● 名古屋大学 KMI コロキウム, 2015 年 1 月 28 日 (名古屋大学)

大橋隆哉: Dark baryons in the Universe and DIOS project (招待講演)

● 第 16 回惑星圏研究会 2015 年 2 月 16~18 日 (東北大学)

T. Iwata, Y. Kawakatsu, G. Murakami (ISAS/JAXA), Y. Ezoe (Tokyo Metropol. Univ.), S. Kameda (Rikkyo Univ.), K. Keika (Nagoya Univ.), T. Arai (Chiba Inst. Tech.), S. Matsuura, T. Imamura (ISAS/JAXA) and K. Ogohara (Univ. Shiga Pref.): Solar System Sciences using DESTINY: Demonstration and Experiment of Space Technology for Interplanetary Voyage

Y. Ezoe (Tokyo Metropol. Univ.), Y. Miyoshi (Nagoya Univ.), S. Kasahara (ISAS/JAXA) and the GEO-X team: GEO-X : GEOspace X-ray Imager

M. Numazawa, Y. Ezoe (Tokyo Metropol. Univ.) , K. Ishikawa (RIKEN), T. Ohashi (Tokyo Metropol. Univ.) , Y. Miyoshi (Nagoya Univ.), T. Kimura (ISAS/JAXA), Suzaku Cycle 8 Jupiter team and Hisaki science team: Suzaku observations of Jupiter coordinated with Hisaki

● 電磁気圏観測に向けた将来探査衛星計画に関する研究集会 2015 年 2 月 23 日 (名古屋大学)

江副祐一郎, 三好由純: GEO-X (招待講演)

● 新学術領域 平成 26 年度「系外惑星大研究会」 2015 年 3 月 2-3 日 (東京大学)

上原翔, 河原創, 増田賢人, 山田真也, 大橋隆哉: single-transit 惑星の次回 transit の予報

● 第 4 回超小型衛星 RG 研究会 2015 年 3 月 6 日 (東京工業大学)

江副祐一郎: GEO-X

● 第 2 回宇宙ナノエレクトロニクスワークショップ 2015 年 3 月 6 日 (ISAS/JAXA)

石川久美 (理研), 黒丸厳静 (首都大): マイクロマシン技術を用いた次世代 X 線観測装置の開発

● 第 14 回高宇連研究会 2015 年 3 月 9-11 日 (広島大学)

大橋隆哉: ダークバリオン探査ミッション DIOS の開発の状況

● 電子情報通信学会総合大会, 2015 年 3 月 10-13 日 (立命館大学びわこ・くさつキャンパス)

野地拓匡: S 帯低雑音増幅器と誘電体マイクロカロリメータの X 線検出システム基礎実験

大橋隆哉: ダークバリオン探査ミッション DIOS の開発の状況

国際会議

● Japan Geoscience Union Meeting 2014, Yokohama, Japan, April 28 – May 2, 2014

Y.Ezoe: Development of a wide-field X-ray imaging spectrometer for solar system exploration (Invited)

● 9th IACHEC meeting, Airlie Center, USA May 12 – 14, 2014

T. Ohashi: Dark baryon explorer DIOS: mission and science (Invited)

● SPIE symposium: Space telescopes and instrumentation 2014, Montreal, Canada June 22 – 26, 2014

T. Ohashi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, S. Yamadaa, S. Yamaguchi, N. Miyazaki, Y. Tawara, K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, Y. Takei, K. Sakai, K. Nagayoshi, R. Yamamoto, A. Chiba, and T. Hayashi: DIOS: the dark baryon exploring mission

● The X-ray Universe 2014, Dublin, Ireland June 16 – 19, 2014

S. Konami: Abundance patterns in the Interstellar Medium of early-type galaxies observed with Suzaku

● The 40th COSPAR Scientific Assembly, Moscow, Russia, August 2 – 10, 2014

Y.Ezoe, Y.Ishisaki, T.Ohashi, I.Mitsuishi, K.Ishikawa, Y.Miyoshi, R.Fujimoto, N.Terada, S.Kasahara, T.Kimura, H.Hasegawa, M.Fujimoto, K.Mitsuda, K.Nishijo, A.Noda: GEO-X : GEOSpace X-ray imager

Yuzuru Tawara, Takaya Ohashi, Yoshitaka Ishisaki, Yuichiro Ezoe, Kazuhisa Mitsuda, Noriko Yamasaki, Yoh Takei: Current Status of the DIOS (diffuse intergalactic oxygen surveyor) Mission

S.Konami, I.Zhuravleva, E.Churazov, R.Sunyaev, T.Ohashi, K.Sato: Study of the resonant scattering in the Perseus cluster core with ASTRO-H SXS

A. Simionescu, T.Ohashi, N.Werner, O.Urban: Witnessing the ongoing growth of nearby clusters of galaxies through X-ray spectroscopy

M.Sato, I.Mitsuishi, S.Sasaki, N.Iijima, K.Hayashi, T.Ohashi: Observation of groups of galaxies NGC7618 and UGC12491 with Suzaku

H.Noda, K.Makishima, S.Yamada, T.Minezaki, L.Gu: A Novel Picture of the AGN Central Engine Derived with X-ray and Optical Simultaneous Observations

S.Koyama, S.Yamada, M.Tashiro, Y.Terada, A.Kubota, K.Makishima: A study of X-ray variation in LMC X-1 with Suzaku

● Applied Superconductivity Conference 2014, Charlot, USA, August 10 – 15, 2014

Y.Ezoe, N.Iijima, S.Yamaguchi, N.Miyazaki, Y.Ishisaki, T.Ohashi, S.Yamada, K.Mitsuda, T.Sato, M.Hidaka: Tapered edge readout wiring for TES calorimeter arrays using ion milling (Invited)

● Optical MEMS and Nanophotonics 2014, Glasgow, Scotland, August 18 – 22, 2014

Y.Ezoe, T.Ogawa, M.Sato, K.Mitsuda, H.Yamaguchi, Y.Kanamori, K.Morishita, K.Nakajima, T.Ikehara, H.Hiroshima, and R.Maeda: MEMS-based X-ray Optics for Astronomy, Planetary Exploration, and Earth Observation

T.Ogawa, Y.Ezoe, T.Kakiuchi, M.Ikuta, M.Sato, T.Ohashi, I.Mitsuishi, K.Mitsuda, K.Morishita, and K.Nakajima: X-ray irradiation test of A MEMS-based X-ray optic

● AtomDB 2014, Hachioji, Japan, September 6 – 9, 2014

S. Konami: Study of the resonant scattering in the Perseus cluster core with ASTRO-H SXS

S. Yamada: On ground performance of ASTRO-H Soft X-ray Spectrometer

Y. Ezoe: GEO-X : Geospace X-ray imager

T. Ohashi: DIOS: Dark baryon exploring mission

T. Ogawa: Diffuse X-ray emission from star forming region of Carina nebula

● BepiColombo Science Working Team meeting, Ikebukuro, Japan, September 16 – 18, 2014

Y.Ezoe: Minaturized X-ray Instrument Development (Invited)

● Asia-Pacific Microwave Conference, Sendai, Japan, November 4 – 7, 2014.

T. Noji, A. Miyachi, T. Kikuchi, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda, S. Kawasaki: The X-band High Gain and Radiation-Hardness Low-Noise GaAs MMIC Amplifier with Cryogenic Temperature for X-ray Astronomy

● Thailand-Japan Microwave Conference, Bangkok, Thailand, November 26 – 28, 2014

T. Noji, A. Miyachi, T. Kikuchi, J. Hyeonjae, N. Hasegawa, S. Yoshida, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda, T. Ohashi, S. Kawasaki: Fundamental Experiment of S-band Low Noise Amplifier and Dielectric Microcalorimeter for X-ray Detection System

● Astronomical X-ray Optics, Prague, Czech, December 8 – 11, 2014

Y.Ezoe: Advances in MEMS X-ray optics

● SnowCluster 2015, Snowbird, Uta, USA, March 15 – 20, 2015

T. Ohashi: Cluster science expected from ASTRO-H (Invited)

● Fermi LAT Collaboration Meeting, SLAC, USA March 16 – 20, 2015

M. Axelsson: The width of GRB spectra

● Astroparticle View of Galaxy Clusters, Higashihiroshima, Japan, March 24 – 26, 2015

Y. Tawara, I. Mitsuishi, T. Ohashi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, S. Yamada, K. Mitsuda, N. Yamasaki, Y. Takei, DIOS working group: DIOS: the Dark Baryon Exploring Mission

電子物性研究室

1. 研究活動の概要

希土類イオンを含む化合物では、 f 電子に起因する強相関効果（量子力学的多体効果）が電子集団の性質をがらりと変えることにより、非従来型の超伝導や量子臨界的挙動などの興味ある多彩な現象が発現する。 f 電子が持つ「電荷、軌道とスピン（あるいは多極子）」の内部自由度は、結晶構造または希土類イオンが置かれた結晶内の環境に依存して活性化し、多彩な電子物性を生み出す元となる。我々は、特異な結晶構造を持つ化合物に着目し、純良単結晶を用いた物性研究を行うことにより、これまでにない新規な電子物性の探索と創出、発見した新規現象の機構解明を目指した実験的研究を行っている。今年度は、スタッフ 3 名、大学院生 9 名、学部生 4 名の体制で研究を進め、以下の成果を得た。

1) SmPt_2Si_2 における「揺らぐ磁気モーメント」を含む磁気秩序状態

SmPt_2Si_2 の単結晶育成に成功し、その異方的な低温磁性を初めて明らかにした。中でも注目すべき点は、磁気秩序状態と重い電子状態の 2 つの相の性質を合わせ持つ、ハイブリッド型の反強磁性秩序状態（転移温度は $T_N = 5$ K）の発見である（本成果は、JPSJ 注目論文に選ばれた）。

常磁性状態において、磁場を c 軸方向に印加した際の磁化率 χ_c はキュリーワイス則に良く従うが、 a 軸方向の磁化率は温度依存をほとんど示さない。このことから、Sm イオンが強いイジング性を持っていることがわかる。 χ_c が $T = T_N$ に小さなカスプ構造を示すことから、これが反強磁性転移であることがわかった。しかし、より低温で、 χ_c が再度キュリーワイス則に従う異常を見出した。3K 以下のキュリー一定数が常磁性状態の 70 % であることから、同程度の割合の Sm 磁気モーメントが、反強磁性状態において十分に秩序化せず、揺らいだままになっているものと考えられる。さらに、低温における電子比熱係数は $350 \text{ mJ/K}^2\text{mol}$ に達しており、重い電子状態の形成を示唆している。この反強磁性状態に磁場を印加すると、メタ磁性を経て、磁場誘起相（図 1(右) の II 相： $\uparrow\uparrow\downarrow$ の単純な磁気構造を持つことが推測されている）へ移行するが、そこでは電子比熱係数が大きく減少する。

結晶構造の特徴から、Sm イオン間には複数の互いに拮抗する反強磁性的相関が働いている可能性が高い。よって、Sm イオン間に働く磁氣的相互作用の幾何学的フラストレーションが、「揺らぐ磁気モーメント（部分無秩序状態にある）」を含む反強磁性状態をもたらした可能性がある。

近藤効果と RKKY 相互作用が拮抗する所に、さらに幾何学的フラストレーションが導入された三つ巴の系にどのような強相関状態が発現するのかは、未解明の重要な問題である。最近の求らの理論計算は、近藤効果により磁気モーメントが遮蔽され近藤一重項を形成したイオンと磁気秩序したイオンが、それぞれ互いに入れ子になる副格子を形成する可能性を示している。前者の「近藤副格子」においては、近藤効果により重い有効質量を獲得した準粒子の形成が期待できる。本系に現れた磁気秩序状態は、まさにこのような複合状態かもしれない。

2) Sm 化合物における新規強相関電子系の発見

近年、強相関 f 電子系の研究では、立方晶系の 1-2-20 化合物や充填スクッテルダイト化合物のように、結晶中の希土類元素位置の対称性が極めて高い系で起こる特異な物性が注目されてきた。これらの系では、 f 電子の持つ軌道の自由度が低温まで残る、あるいは周囲の電子との混成効果によって、本来局在性の強い f 電子状態を持つ Sm 等の希土類元素を含む化合物においても f 電子の遍歴性や特異な物性が発見されてきた。

そのような中、我々は、前述した SmPt_2Si_2 をはじめとして、正方晶系の Sm 化合物において、新規強相関電子系の探索をすすめており、結晶の対称性と物性異常の詳細についての比較研究をすすめてい

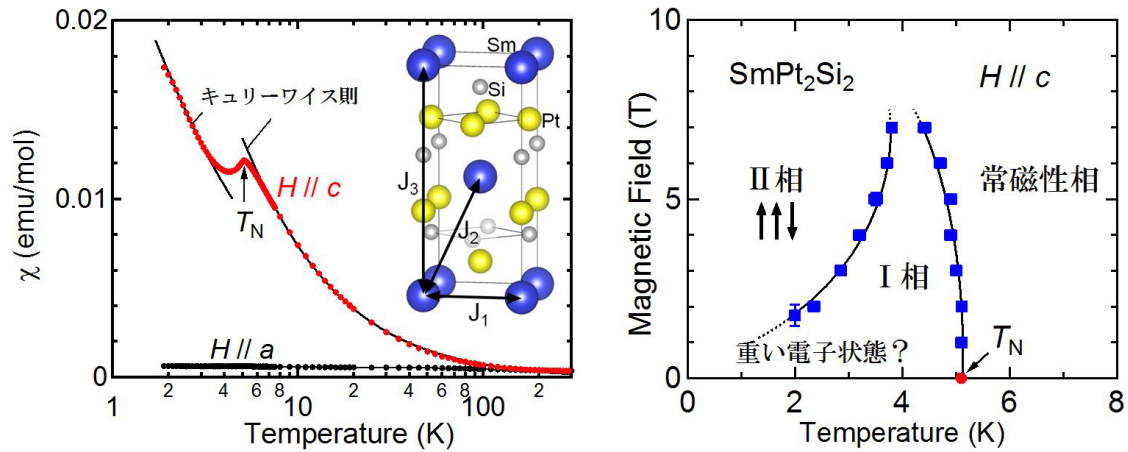


図 1: (左) SmPt_2Si_2 の磁化率の温度依存性. 結晶構造を内挿図として示す. (右) c 軸方向に磁場を印加した場合の磁場-温度相図.

る. ごく最近, 新たに正方晶 SmGa_6 において, 非常に重い電子状態が実現している可能性を見出すことに成功した. そもそも REGa_6 (RE: 希土類) 化合物は, 2 元状態図から包晶系かつ低融点を持つ化合物であり, 高純度単結晶育成が極めて困難な系であることが知られている. 実際, 30 年以上も前に多結晶による大雑把な研究報告がなされているのみである. 我々は, この系の高純度単結晶育成を, Ga 自己フラックス法を用いて初めて行い, 異方性も含めた詳細な物性測定を行うことに成功した. その結果, この物質では低温約 4 K において, 反強磁性的転移を示すことを確認した. 興味深い点は, その秩序状態において 電子比熱係数が $100 \text{ mJ/mol}\cdot\text{K}^2$ と通常の金属の 100 倍近い値をもつこと, さらに, 秩序転移温度より高温側から外挿した, 常磁性状態の電子比熱係数が $1.5 \text{ J/mol}\cdot\text{K}^2$ と, 記録的な重い電子状態を示唆する値を持つことである. このような Sm 化合物の異常な重い電子状態は, 主にこれまで立方晶系の化合物に限られており, 本発見は SmPt_2Si_2 に続き 2 例目となる. また, この重い電子状態は, 磁場に鈍感な性質を持つことが明らかになってきており, この異常が, 磁気的な自由度に由来する異常ではない可能性も示唆され, 新奇強相関電子系として非常に研究価値の高い物質を発見したと考えられる.

3) 新規超伝導体の母物質 CeOBiS_2 における非従来型量子臨界状態の発見

最近発見された BiS_2 系層状超伝導体は, 強相関電子系超伝導体の典型物質である銅酸化物系や鉄系超伝導体と類似して, 伝導層とブロック層が交互に積層した結晶構造を持つ. その超伝導特性や超伝導の発現メカニズムの解明を目指して, 世界中で精力的に研究が行われている. 伝導キャリアのない絶縁体 (母物質と呼ばれる) において, 元素置換により BiS_2 層に伝導キャリアを注入すると, それが低温でクーパー対を形成し, 超伝導が現れる. よって, 超伝導発現の舞台となっている母物質の電子状態を理解することは重要である. 我々は, 母物質 CeOBiS_2 の単結晶育成に成功し, Ce イオンが持つ f 電子の特異な電子状態を世界で初めて明らかにした.

まず, CeOBiS_2 の磁化と比熱の測定から, Ce イオンの価数が $3+$ であり, $4f$ 電子が局在的状态にあること, 全角運動量 $J = 5/2$ の多重項が結晶場効果により分裂し, 結晶場基底状態が $J_z = \pm 1/2$ の状態を取ることを明らかにした. これにより, CeOBiS_2 における f 電子状態がおおまかに理解された.

次に, 極低温領域で比熱を測定したところ, 比熱が 4 K 以下で「 $-\log T$ に比例した特異な発散を示すこと」を発見した. この振る舞いは, 絶対ゼロ度に特異点 (量子臨界点) が存在することを示唆している. 同様な振る舞いは, 近藤効果と RKKY 相互作用が拮抗する強相関電子系金属においてしばしば観測されてきたが, 本系は非金属であり, 同様な解釈は適用できない. 図 2(左) に示した結晶構造の特徴を考慮すると, Ce 磁気モーメント間の超交換相互作用が持つ幾何学的フラストレーションがこの異常

の起源となっている可能性がある。CeOBiS₂ が「幾何学的フラストレーションに基づく量子臨界点を有する世界で初めての磁性体」である可能性がある。

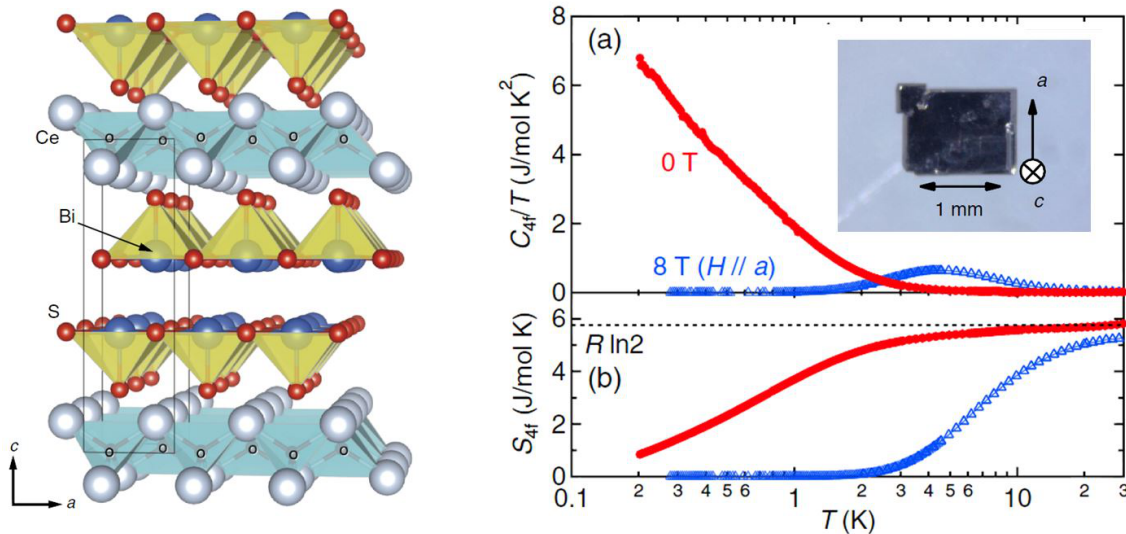


図 2: (左) CeOBiS₂ の結晶構造. (右) CeOBiS₂ の比熱と磁気エントロピーの温度依存性. 内挿図: 育成された単結晶の写真.

4) SmTr₂Al₂₀ の高磁場磁性

我々は, SmTr₂Al₂₀ (Tr : Ti, V, Cr, Nb, Ta) が, 磁場に鈍感な相転移及び重い電子状態を示すことを見出し, その形成機構の解明を目指すべく研究を行っている. 本物質で観測される磁場に鈍感な物性の起源を解明するためには, 超高磁場における磁性研究が不可欠であるが, これまで 9 T までの磁場下での測定しか行っておらず, さらに高磁場での磁性については未解明である. 我々は本物質の超高磁場における磁性を明らかにするために, パルス磁場を用いた 50 T 超までの磁場下での磁化測定を物性研強磁場施設との共同研究で行った. 本物質の磁化は $\sim 0.01 \mu_B/\text{Sm}$ @ 10 T と小さいが, 試料空間の充填率を上げるために大量の粉末試料を用いることにより, 微小な磁化のパルス磁場下での磁化測定に成功し, $Tr = \text{Ti, V, Cr, Ta}$ に関して 55 T まで磁化が単調上昇し, 相転移の兆候は観測されず, 磁場に鈍感な振る舞いは 55 T までは残留していることを見出した.

5) SmTa₂Al₂₀ の磁場に鈍感な散乱機構の解明

我々が見出した SmTa₂Al₂₀ で磁場に鈍感な近藤効果的異常をもたらす 4f 電子状態の知見を得るため, 電子輸送特性に注目し, 詳細な磁場中での電気輸送特性測定を行った. その結果, この系の磁気抵抗は単一の散乱機構に支配される際に成立する Kohler 則には従わず, 温度を下げると磁気抵抗は増加する方向へずれていくことを見出した. Kohler 則から外れる現象は, 緩和時間 $\tau(\mathbf{k})$ が波数依存性をもつことを示しており, 4f 電子によって伝導電子が異方的な散乱を示唆している. 同様の Kohler 則からのずれは SmTi₂Al₂₀ においても見られることから, これは SmTr₂Al₂₀ 系に共通した特徴であると考えられる. また, この系に見られる近藤効果的異常の磁場鈍感性が Sm 単サイトに起因するものかどうか明らかにするため, Sm サイトを 4f 電子をもたない La で置換した Sm_xLa_{1-x}Ta₂Al₂₀ ($x = 0.01, 0.05, 0.25$) の合成と物性測定を行った. その結果 Sm 低濃度の系についても磁場に非常に鈍感な近藤効果的異常を抵抗率の温度依存性に見出した.

2. 研究業績

1) 論文

K. Fushiya, R. Miyazaki, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, and Y. Aoki : Single Crystal Growth and Anisotropic Magnetic Properties of Peanut-Shaped Cage Compound $\text{Tm}_6\text{Cr}_4\text{Al}_{43}$, *JPS. Conf. Proc.* **3** (2014) 011018 (6 pages).

S. Tsutsui, K. Kaneko, R. Miyazaki, R. Higashinaka, Y. Aoki, R. Kobayashi, S. Wakimoto, A. Q. R. Baron, H. Sugawara, and H. Sato : Anharmonic Pr Guest Modes in $\text{Pr}(\text{Os}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sb}_{12}$ Investigated by Inelastic X-ray Scattering, *JPS. Conf. Proc.* **3** (2014) 011060 (5 pages).

R. Higashinaka, A. Yamada, R. Miyazaki, Y. Aoki, M. Mizumaki, S. Tsutsui, K. Nitta, T. Uruga, and H. Sato : Mixed Valence States in $\text{SmTr}_2\text{Al}_{20}$ ($\text{Tr} = \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}$ and Ta), *JPS. Conf. Proc.* **3** (2014) 011079 (6 pages).

T. Kubo, H. Kotegawa, H. Tou, R. Higashinaka, A. Nakama, Y. Aoki, and H. Sato : ^{27}Al and ^{93}Nb NMR/NQR Studies on the Pr-Based Heavy Fermion System $\text{PrNb}_2\text{Al}_{20}$, *JPS. Conf. Proc.* **3** (2014) 012031 (5 pages).

N. Ogita, R. Miyazaki, S. Tsutsui, T. Hasegawa, R. Higashinaka, Y. Aoki, D. Kikuchi, H. Sugawara, H. Sato, and M. Udagawa : Crystal Electric Field Study in $\text{Pr}(\text{Os}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sb}_{12}$ by Raman Scattering, *JPS. Conf. Proc.* **3** (2014) 015040 (5 pages).

T. Matsumura, S. Michimura, T. Inami, Y. Hayashi, K. Fushiya, T. D. Matsuda, R. Higashinaka, Y. Aoki, and H. Sugawara : Magnetic-field-induced charge order in the filled skutterudite $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$: Evidence from resonant and nonresonant x-ray diffraction, *Phys. Rev. B* **89** (2014) 161116(R) (5 pages).

R. Higashinaka, R. Miyazaki, Y. Mizuguchi, O. Miura, and Y. Aoki : Low-Temperature Enhancement in the Upper Critical Field of Underdoped $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ ($x = 0.1-0.3$), *J. Phys. Soc. Jpn.* **83** (2014) 075004 (2 pages).

K. Fushiya, T. D. Matsuda, R. Higashinaka, K. Akiyama, and Y. Aoki : Possible Existence of Partially Disordered Sm Ion in Magnetically Ordered State of Ising Magnet SmPt_2Si_2 : A Single Crystal Study *J. Phys. Soc. Jpn.* **83** (2014) 113708 (4 pages) 注目論文 (Editors' Choice) に選出.

R. Higashinaka, T. Asano, T. Nakashima, K. Fushiya, Y. Mizuguchi, O. Miura, T. D. Matsuda and Y. Aoki : Pronounced $-\log T$ divergence in specific heat of nonmetallic CeOBiS_2 : a mother phase of BiS_2 -based superconductor, *J. Phys. Soc. Jpn.* **84** (2015) 023702 (4 pages).

S. Kambe, H. Sakai, Y. Tokunaga, G. Lapertot, T. D. Matsuda, G. Knebel, J. Flouquet, and R. E. Walstedt : Degenerate Fermi and non-Fermi liquids near a quantum critical phase transition, *Nature Physics* **10** (2014) 840 (5 pages).

T. Yamashita, Y. Shimoyama, Y. Haga, T. D. Matsuda, E. Yamamoto, Y. Onuki, H. Sumiyoshi, S. Fujimoto, A. Levchenko, T. Shibauchi, and Y. Matsuda : Colossal thermomagnetic response in the exotic superconductor URu_2Si_2 , *Nature Physics* **11** (2014) 17 (4 pages).

S. Tonegawa, S. Kasahara, T. Fukuda, K. Sugimoto, N. Yasuda, Y. Tsuruhara, D. Watanabe, Y. Mizukami, Y. Haga, T. D. Matsuda, E. Yamamoto, Y. Onuki, H. Ikeda, Y. Matsuda, and T. Shibauchi: Direct observation of lattice symmetry breaking at the hidden-order transition in URu₂Si₂, *Nature Communications* **5** (2014) 5188 (7 pages).

G. W. Scheerer, W. Knafo, D. Aoki, M. Nardone, A. Zitouni, J. Beard, J. Billette, J. Barata, C. Jaudet, C. M. Suleiman, P. Frings, L. Drigo, A. Audouard, T. D. Matsuda, A. Pourret, G. Knebel, and J. Flouquet: Fermi surface in the hidden-order state of URu₂Si₂ under intense pulsed magnetic fields up to 81 T, *Phys. Rev. B* **89** 165107 (12 pages)

R. Kobayashi, K. Kaneko, K. Saito, J.-M. Mignot, G. Andre, J. Robert, S. Wakimoto, M. Matsuda, S. Chi, Y. Haga, T. D. Matsuda, E. Yamamoto, T. Nishioka, M. Matsumura, H. Tanida, and M. Sera: Influence of Electron Doping on Magnetic Order in CeRu₂Al₁₀, *J. Phys. Soc. Jpn.* **83** (2014) 104707 (5 pages).

Y. Matsumoto, Y. Haga, N. Tateiwa, H. Aoki, N. Kimura, T. D. Matsuda, E. Yamamoto, Z. Fisk, and H. Yamagami: Single-Crystal Growth and de Haas-van Alphen Effect Study of ThRu₂Si₂, *JPS. Conf. Proc.* **3** (2014) 011096 (5 pages).

2) 学会講演

● 日本物理学会 2014 年秋季大会 2014 年 9 月 7 日 (日) – 10 日 (水) (中部大学)

伏屋健吾, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: イジング磁性体 SmPt₂Si₂ に発現する複数の異常磁気秩序相
翠川諒, 伏屋健吾, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト化合物 CeRu₄As₁₂ の電子輸送効果

東中隆二, 浅野卓也, 中島拓也, 伏屋健吾, 水口佳一, 三浦大介, 松田達磨, 青木勇二: 単結晶を用いた層状 BiS₂ 化合物 CeOBiS₂ の低温物性測定

浅野卓也, 中島拓也, 伏屋健吾, 水口佳一, 三浦大介, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: 層状超伝導体 LnO_{1-x}F_xBiS₂ (Ln = La, Ce) の単結晶育成と物性測定

三宅遼磨, 久保徹郎, 小手川恒, 藤秀樹, 東中隆二, 中間章浩, 青木勇二: PrTa₂Al₂₀ の ²⁷Al-NMR/NQR による測定

今井勇輝, 伏屋健吾, 山田瑛, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨: LnGa₆ の単結晶を用いた基礎物性測定

三宅厚志, 小濱芳允, 山田瑛, 松田達磨, 青木勇二, 徳永将史: 重い電子系 CeFe₂Ge₂ のメタ磁性転移

松田達磨, 浅野卓也, 中島拓也, 伏屋健吾, 水口佳一, 三浦大介, 東中隆二, 青木勇二: BiS₂ 系超伝導体の母相系 LnOBiS₂ (Ln: 希土類) の単結晶育成と物性

真岸孝一, 渡邊凌, 久田旭彦, 齊藤隆仁, 小山晋之, 齊藤隆志, 東中隆二, 青木勇二, 佐藤英行: 高圧合成 YbFe₄Sb₁₂ の Sb-NQR

鈴木主翼, 伏屋健吾, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨: Yb 系の三元化合物の単結晶育成と物性

清水祐貴, 赤松類, 小手川恒, 藤秀樹, 井澤宏輝, 水口佳一, 三浦大介, 浅野卓也, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, 田中将嗣, 長尾雅則, 高野義彦: 超伝導体 $\text{La}(\text{O},\text{F})\text{BiS}_2$ と $\text{La}(\text{O},\text{F})\text{BiSe}_2$ の NMR/NQR による研究

秋田星二, 北川俊作, 小手川恒, 藤秀樹, 井澤宏輝, 水口佳一, 三浦大介, 浅野卓也, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, 長尾雅則, 高野義彦: $\text{La}(\text{O},\text{F})\text{BiS}_2$ の圧力下でのホール効果測定

久保徹郎, 小手川恒, 藤秀樹, 東中隆二, 中間章浩, 青木勇二, 佐藤秀行: ^{27}Al -NMR/NQR による $\text{PrT}_2\text{Al}_{20}$ の研究

筒井智嗣, 伏屋健吾, 浅野卓也, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, 内山裕士, Alfred Q. R. Baron, 菅原仁, 佐藤英行: $\text{Sm}_{1-x}\text{La}_x\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$ の X 線非弾性散乱

松村武, 道村真司, 稲見俊哉, 林佑弥, 伏屋健吾, 松田達磨, 東中隆二, 青木勇二, 菅原仁: 磁場中 X 線回折による $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$ の磁場誘起秩序相の研究

山田瑛, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, 佐藤英行: 磁場に鈍感な強相関電子物性を示す $\text{SmTa}_2\text{Al}_{20}$ の電子輸送効果測定

神戸振作, 酒井宏典, 徳永陽, Gerard Lapertot, 松田達磨, Georg Knebel, Jacques Flouquet, Russell E. Walstedt: YbRh_2Si_2 での Fermi と非 Fermi 液体状態

山下卓也, 下山祐介, 利根川翔, 鶴原悠悟, 芳賀芳範, 松田達磨, 山本悦嗣, 大貫惇睦, 住吉浩明, 藤本聡, Alex Levchenko, 芝内孝禎, 松田祐司: 熱磁気効果による URu_2Si_2 における超伝導揺らぎの研究

立岩尚之, 芳賀芳範, 松田達磨, 山本悦嗣, Zachary Fisk: ウラン系強磁性超伝導物質 UGe_2 と URhGe の強磁性転移に伴う臨界現象について

水牧仁一朗, 難波優輔, 岡田耕三, 筒井智嗣, 河村直己, 菅原仁, 佐藤英行: 磁場に鈍感な重い電子系 $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ の Sm の特異な電子状態

● 日本物理学会 2015 年春季大会 2015 年 3 月 21 日 (土) – 24 日 (火) (早稲田大学)

浅野卓也, 中島拓也, 伏屋健吾, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: 層状 BiS_2 化合物 $\text{CeO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ 単結晶の極低温物性

山田瑛, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, 佐藤英行: 磁場に鈍感な物性を示す $\text{SmTa}_2\text{Al}_{20}$ における La 希釈効果

遠藤秀晃, 浅野卓也, 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 $\text{Eu}_3\text{Bi}_2\text{S}_4\text{F}_4$ の単結晶育成と基礎物性測定

三田昌明, 浅野卓也, 遠藤秀晃, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: 層状超伝導体 $\text{LnO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ ($\text{Ln} = \text{Nd}, \text{Eu}$) の単結晶を用いた物性測定

中島拓也, 浅野卓也, 伏屋健吾, 水口佳一, 三浦大介, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: 層状 BiS_2 系化合物 CeOBiS_2 の単結晶を用いた低温物性とその異方性

今井勇輝, 伏屋健吾, 山田瑛, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨: LnGa_6 の単結晶育成と基礎物性測定 II

武野瑞紀, 伏屋健吾, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: RPd_2P_2 ($R = \text{Ce, Yb}$) の結晶育成と物性報告

翠川諒, 伏屋健吾, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト化合物 $\text{CeRu}_4\text{As}_{12}$ の電子輸送効果 II

東中隆二, 山田瑛, 三宅厚志, 徳永将史, 松田達磨, 青木勇二: $\text{SmT}_2\text{Al}_{20}$ の強磁場磁性

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

松田達磨, 伏屋健吾, 鈴木主翼, 東中隆二, 青木勇二: LnPt_2Si_2 (Ln: Sm, Yb) の単結晶育成と物性

久保徹郎, 小手川恒, 藤秀樹, 東中隆二, 中間章浩, 青木勇二, 佐藤英行: $\text{PrNb}_2\text{Al}_{20}$ の結晶場基底状態と低温における磁気揺らぎの発達の解析

梶谷丈, 三浦大介, 水口佳一, 松田達磨, 青木勇二: BiS_2 系超伝導体 EuFBiS_2 の Eu サイトの Ce 置換効果

真砂全宏, 服部泰佑, 山中隆義, 石田憲二, 毛志強, 深澤英人, 前野悦輝, 大貫惇睦, 松田達磨, 矢戸寛明: Sr_2RuO_4 及び他の超伝導体の核スピン-スピン緩和率測定

神戸振作, 酒井宏典, 徳永陽, G. Lapertot, 松田達磨, G. Knebel, J. Flouquet, R.E. Walstedt: 単結晶 YbRh_2Si_2 の NMR ($H // a$)

国内研究会

● 第50回化合物新磁性材料研究会「新超伝導体の探索と物性研究」

東京大学本郷キャンパス, 2014 年 7 月 4 日

東中隆二: カゴ状化合物における強相関電子物性 (招待)

● 首都大学東京研究環「特異な結晶構造に創出する新奇量子相の解明」第2回研究会

首都大学東京 南大沢キャンパス, 2014 年 9 月 26 日

松田達磨, 浅野卓也, 中島拓也, 伏屋健吾, 水口佳一, 三浦大輔, 東中隆二, 青木勇二: LnOBiS_2 系化合物 (Ln : 希土類) の単結晶育成と希土類イオンが示す特異な磁性 (招待)

中島拓也, 浅野卓也, 伏屋健吾, 水口佳一, 三浦大介, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: 層状化合物 CeOBiS_2 の単結晶育成と磁気特性

浅野卓也, 伏屋健吾, 中島拓也, 水口佳一, 三浦大介, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: 層状超伝導体 $\text{LnO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ ($\text{Ln} = \text{La, Ce}$) の単結晶育成と物性測定

翠川 諒, 伏屋健吾, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト化合物 $\text{CeRu}_4\text{As}_{12}$ の電子輸送効果

伏屋健吾, 松田達磨, 東中隆二, 青木勇二: イジング磁性体 SmPt_2Si_2 に発現する複数の異常磁気秩序相

山田 瑛, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, 佐藤英行: 磁場に鈍感な強相関物性を示す $\text{SmTa}_2\text{Al}_{20}$ の電子輸送効果測定

東中隆二, 高橋洋介, 増田隼人, 山田 瑛, 松田達磨, 青木勇二, 佐藤英行: 異方的カゴ状構造を持つ SmAu_3Al_7 の低温物性

今井勇輝, 伏屋健吾, 山田瑛, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨: LnGa_6 の単結晶育成と基礎物性測定

● 東京大学物性研究所 短期研究会「スクッテルダイト化合物及び関連物質を舞台とした強相関電子系物理の新展開」

東京大学柏の葉キャンパス, 2014 年 10 月 10 – 12 日

青木勇二, 東中隆二, 増田隼人, 高橋洋介, 山田 瑛, 松田達磨, 佐藤英行: LnAu_3Al_7 (Ln : 希土類) における新奇物性探索 (口頭)

東中 隆二, 山田 瑛, 宮崎 亮一, 松田 達磨, 青木 勇二, 佐藤 英行: $\text{SmTr}_2\text{Al}_{20}$ における磁場に鈍感な相転移及び重い電子状態 (招待)

国際会議

● Strongly Correlated Electron Systems 2014 (SCES 2014), Campus Saint Martin D'heres, Grenoble, France, Jul. 7 – 11, 2014

Y. Machida, T. Ikeura, A. Nakama, R. Higashinaka, Y. Aoki, H. Sato, A. Sakai, S. Nakatsuji, N. Nagasawa, K. Matsumoto, T. Onimaru, T. Takabatake, and K. Izawa : Anomalous enhancement of Seebeck coefficient in Pr-based 1-2-20 system with non-Kramers doublet ground states (oral)

T. Kubo, H. Kotegawa, H. Tou, R. Higashinaka, A. Nakama, Y. Aoki, and H. Aoki : ^{93}Nb -NMR/NQR studies of non-Fermi liquid like behaviors in the Pr-based $\text{PrNb}_2\text{Al}_{20}$

R. Higashinaka, Y. Takahashi, H. Masuda, A. Yamada, T. D. Matsuda, Y. Aoki and H. Sato : Unconventional Heavy Fermion Behavior in SmAu_3Al_7 with Anisotropic Cage Structure

K. Fushiya, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, and Y. Aoki : Anomalous metamagnetism and possible quasiparticle mass enhancement in the antiferromagnetically ordered SmPt_2Si_2

T. D. Matsuda, T. Asano, T. Nakashima, K. Fushiya, Y. Mizuguchi, R. Higashinaka, H. Sato, and Yuji Aoki : Single Crystal Growth and Transport Properties of BiS_2 -based layered Superconductor $\text{LnO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ (Ln : rare earth)

S. Kambe, H. Sakai, Y. Tokunaga, G. Lapertot, T. D. Matsuda, G. Knebel, and J. Flouquet : Degenerate Fermi and non-Fermi liquids near quantum critical phase transition (oral)

G. W. Scheerer, W. Knafo, D. Aoki, M. Nardone, A. Zitouni, J. Beard, J. Billette, J. Barata, C. Jaudet, M. Suleiman, P. Frings, L. Drigo, A. A. Audouard, T. D. Matsuda, A. Pourret, G. Knebel, J. Flouquet : High-Magnetic Field Study of the Fermi surface in the hidden-order state of URu_2Si_2 (oral)

H. Kotegawa, R. Akebi, H. Nohara, H. Tou, T. D. Matsuda, E. Yamamoto, Y. Haga, Z. Fisk, Y. Onuki, D. Aoki, J. Flouquet : NMR investigation of ferromagnetic quantum criticality in UCoAl

● Ushimado International Workshop on Novel Superconducting Materials, Ushimado, Okayama, Japan, Nov. 8 – 10, 2014

Y. Aoki, R. Higashinaka, T. Asano, T. Nakashima, K. Fushiya, Y. Mizuguchi, O. Miura, T.D. Matsuda: Magnetism and superconductivity in BiS₂-based layered superconductors (invited)

● REIMEI-ICC-IMR Workshop (24th ASRC International Workshop), IMR, Tohoku University, Sendai, Japan, Dec. 4 – 5, 2014

T. D. Matsuda : Anomalous physical properties in magnetically frustrated systems of SmPt₂Si₂ and CeOBiS₂ (invited)

3) 学会誌等

JPSJ の最近の注目論文から : SmPt₂Si₂ で見出された「無秩序磁気モーメントを含む磁気秩序状態」, 日本物理学会誌 **70** (2015) 141

4) 新聞雑誌への掲載

科学新聞「無秩序磁気モーメントを含む磁気秩序状態 SmPt₂Si₂ で発見」 2014 年 12 月 12 日 第 3515 号

ナノ物性I研究室

1. 研究活動の概要

単原子層物質，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．2014年度の主な研究・教育活動の概要は以下のとおりである．

1) 第二，第三世代単層カーボンナノチューブの固体物性

単層カーボンナノチューブ（SWCNT）の構造は，カイラル指数と呼ばれる二つの整数の組 (n, m) により指定できる． (n, m) を与えることによりチューブ直径などの構造のほか，その電子状態も一義的に決定される．たとえば， $n-m$ が3の倍数のSWCNTは金属型，他のものは半導体型となる．したがってSWCNTの固体物性研究においては，単一指数のSWCNTを得ることが極めて重要となるが，このような試みは未だ充分ではない．本グループでは，金属型と半導体型のどちらかが濃縮されたSWCNTを第二世代SWCNT，さらに単一構造（指数）のSWCNTが濃縮されたものを第三世代SWCNTと呼び，これらの試料を作製し，その固体物性の研究を行っている．今年度は，SWCNTの帯磁率測定を系統的に行った（塚田修士論文，中村卒業研究）．また，熱電物性の研究も継続して行っている．特に，第二世代および第三世代SWCNT試料を用いた次の内容の論文を発表した．（ア）粉末X線回折（XRD）法がSWCNT試料に含まれるSWCNTの種類を評価する方法（fingerprinting method）として有効であり（図1），さらに，粉末XRDパターンからSWCNTの詳細構造についての情報が得られることを提案した．実際，指数 $(6, 5)$ が濃縮されたSWCNT試料に適用し，その構造がグラフェンナノリボンのロールアップ構造より太さ方向に約1%膨張し，チューブ軸方向へは変化していないことを明らかにした．（イ）細いSWCNTの1次元空洞内に酸素分子を配列させ，その酸素が低温でハルデン状態と呼ばれる量子磁性体となることを明らかにした．（大阪大学との共同研究）

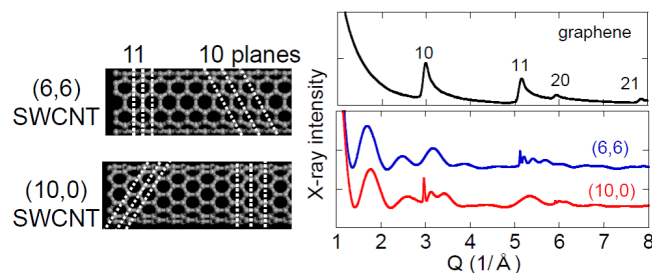


図1: $(6, 6)$ および $(10,0)$ 指数のSWCNTの構造モデル（左）と粉末X線回折パターン（右）．指数により異なった微細構造が現れる．右上は，比較のための単層グラフェンの回折パターン．指数 (n,n) のアームチェアー型SWCNTでは指数11の回折ピークに，また指数 $(n,0)$ のジグザグ型では10回折ピークにシャープな構造が現れる．

2) 制限空間内の水

水はあらゆるところに存在する．地殻や土壌，生体内部や大気中，宇宙空間にさえ存在する．水はごくありふれた物質である．しかしその本質は未だ十分に明らかにされていない．バルクの液体の水には2種類あると考えられている．高密度水と低密度水である．この2種類の水に関わる第2臨界点仮説が提案され，4℃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、太い SWCNT（直径が 1.5 nm 程度以上）で見いだされている wet-dry 転移機構を調べる研究を行った（深澤卒業研究）。また、示差走査熱量 (DSC) 測定による SWCNT 内の水の熱物性の研究を行った（市村修士論文）

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

セメント超伝導体 C12A7、ボロンクラスター固体、SWCNT などの電子状態を明らかにする目的で微視的プローブである NMR による研究を行っている。本年度も継続して、精製処理により磁性不純物を除去した太い SWCNT 試料の ^{13}C -NMR 測定を行った。スピン格子緩和時間の測定を行い、1 次元金属特有の朝永-ラッティンジャー的電子状態の SWCNT 直径依存性に注目して検討した。

4) 2 次元結晶におけるヘテロ構造の結晶成長と物性解明

二次元物質におけるヘテロ接合は、接合部での一次元界面の形成による、特異な物性の発現や光・電子デバイス応用が期待される新しい低次元構造体といえる。このような低次元構造を実現するため、われわれは、グラフェンや窒化ホウ素、および二種類の遷移金属ダイカルコゲナイド (TMDC) を用いたヘテロ構造の作製法と界面構造・物性について研究を進めている。今年度は、主に高品質 TMDC 試料の成長と光物性の評価についての研究を進めてきた。特に、従来は 600–900 °C のシリコン等の基板上で結晶成長を行っていたが、グラファイト基板上かつ 1100 °C 以上の高温条件で行うことで非常に高品質な TMDC を得られることを見出した（佐々木卒業研究）。得られた試料は、低温で極めて線幅の細い発光スペクトルを示すことが明らかとなり、今後の高品質ヘテロ構造の作製と物性解明につながる成果といえる (図 2)。

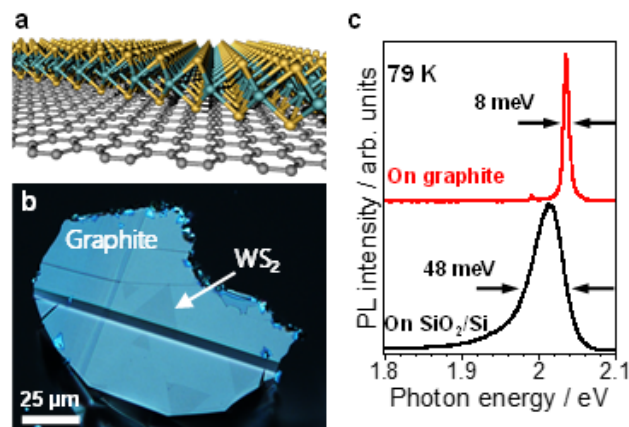


図 2: グラファイト上の単層 WS_2 の (a) 構造モデルと (b) 光学顕微鏡写真。 (c) グラファイトおよび SiO_2/Si 基板上の単層 WS_2 の発光スペクトル

5) グラフェンのエッジ構造制御と評価

炭素の単原子膜であるグラフェンは、その優れた機械的・電気的特性に加え、端構造に依存したユニークな物性を示す。グラフェンの端構造には、ジグザグ端とアームチェア端の二種類が存在し、これら端の選択的な作製が困難であることが実験的な研究における課題となっている。本研究では、グラフェンの合成実験の過程で、試料冷却中にジグザグ端を選択的にもつ亀裂が生成するという興味深い結果が得られた。ラマン分光測定により端の結晶性を評価した結果、亀裂部分のジグザグ端は、化学的に作製さ

れたグレイン端よりも高結晶性であることが示唆された。また、亀裂の生成は、隣接する銅グレインの熱収縮による一軸応力発生が寄与していることが、観察および数値計算より示された。本成果は、直線性の高いジグザグ端を利用した物性研究へと展開できると考えられる。

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

有機電荷移動錯体 β' -(BEDT-TTF) $_2$ ICl $_2$ は常圧、22 K で反強磁性転移を起こす Mott 絶縁体であるが、8.2 GPa 以上の圧力下で有機導体としては高い転移温度 14.2 K で超伝導転移を示すことから注目されている。本研究では、常圧の電子状態がどのような電子状態を経由して圧力下での金属的状态に変化するかを圧力下 ESR を用いて調べている。そのために、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。これまでにアンビルの材質として、1) タングステン・カーバイド (WC)、2) 窒化シリコン (Si $_3$ N $_4$)、3) ジルコニア (ZrO $_2$) を試した結果、ジルコニアが磁性を持たず、また、粘り気があり耐圧性が大きく最も適していることがわかった。ジルコニアのアンビルを使用して 95 ton まで加圧する事ができ、リード線の引き回し等によるベースラインの歪みが乗ってはいたが、解析に耐える信号を得ることができた。30 ton (約 3 GPa) において、室温~77 K の温度変化を測定し、 β' -(BEDT-TTF) $_2$ ICl $_2$ の ESR 線幅の温度変化は、従来のクランプセルによる 2.5 GPa までと Si $_3$ N $_4$ アンビルによる 5 GPa のデータとコンシステントであることを確認した。しかし 60 ton 付近からアンビルにひびが入り始めたので、アンビルの胴体部分の形状を円柱から四角柱に変更してその強度を高めた。四重極共鳴周波数による圧力較正から、70 ton 以上で徐々に圧力が飽和していく傾向が見られた。この点は、試料を収めるガスキットの材質、形状を最適化して改善する予定である。(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

高エネルギー加速器研究機構 (KEK PF) において放射光実験を行った。課題名 (課題番号): 単層カーボンナノチューブとグラフェンの精密構造評価 (2014G561)。

京都大学エネルギー理工研究所において光学測定の実験を行った。課題名 (課題番号): 顕微分光による原子層物質の光学特性解明 (ZE26B-36)。

2. 研究業績

1) 論文

Kazuhiro Yanagi, Shouhei Kanda, Yuki Oshima, Yoshimasa Kitamura, Hideki Kawai, Takahiro Yamamoto, Taishi Takenobu, Yusuke Nakai, and Yutaka Maniwa: Tuning of the Thermoelectric Properties of One-Dimensional Material Networks by Electric Double Layer Techniques using Ionic liquids, *Nano Lett.*, **14**, pp 6437-6442, Oct. 2014.

Ryo Mitsuyama, Shin Tadera, Haruka Kyakuno, Ryosuke Suzuki, Hiroshi Ishii, Yusuke Nakai, Yasumitsu Miyata, Kazuhiro Yanagi, Hiromichi Kataura, Yutaka Maniwa: Chirality fingerprinting and geometrical determination of single-walled carbon nanotubes: Analysis of fine structure of X-ray diffraction pattern, *Carbon*, **75**, pp 299-306, Aug. 2014

Y. Kobayashi, S. Sasaki, S. Mori, H. Hibino, Z. Liu, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Suenaga, Y. Maniwa, Y. Miyata: Growth and Optical Properties of High-Quality Monolayer WS $_2$ on Graphite, *ACS Nano*, **9**, pp 4056-4063, Mar. 2015

Masayuki Hagiwara, Masami Ikeda, Takanori Kida, Kazuyuki Matsuda, Shin Tadera, Haruka Kyakuno, Kazuhiro Yanagi, Yutaka Maniwa, and Kouichi Okunishi: Haldane State Formed by Oxygen Molecules Encapsulated in Single-Walled Carbon Nanotubes, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **83**, pp 113706 (1-4), 2014
JPSJ 誌の注目論文 (Editors' Choice) に選出. 科学新聞 (2014 年 12 月 5 日) に掲載.

T. Kumeta, H. Sakamoto, and K. Mizoguchi: Freeze-dried Zn-DNA: Magnetism dominated by water molecules, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **83**, 084801 (1-6), 2014 (DOI: 10.7566/JPSJ.83.084801)

2) 日本語解説

中井祐介, 真庭豊: 熱電変換材料としてのカーボンナノチューブの可能性: 月刊 機能材料 (シーエムシー出版), 第 35 巻, 第 3 号 通巻 403 号, pp 3-9, Mar. 2015

宮田耕充, 真庭豊: チューブ内ナノ空間の物理と化学: 丸善出版, パリティ 第 29 巻第 9 号, pp13 – 17, 2014 年 9 月

真庭 豊, 中井祐介: 熱電変換材料としてのカーボンナノチューブの可能性と実用化への課題: 情報協会, Energy Device Vol.2, No.2 2014, pp52-56

3) 学会講演

● 第 70 回日本物理学会年次大会

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

● 第 62 回応用物理学会春季学術講演会

林 大介, 中井 祐介, 客野 遥, 柳 和宏, 宮田 耕充, 真庭 豊, 山本 貴博: SWCNT フィルムの熱電物性: 半導体型・金属型混合の効果

藤原美帆, 井上凌介, 真庭豊, 篠原久典, 宮田耕充: グラフェンの亀裂 におけるジグ ザの選択的形成

井上凌介, 真庭豊, 宮田耕充: 金属融解による CVD グラフェンの絶縁性基板上への直接転写

森勝平, 真庭豊, 宮田耕充: WS₂/MoS₂ ヘテロ構造の 2 段階成長と評

佐々木将吾, 真庭豊, 宮田耕充: W ドープ NbS₂ 原子層の成長と評価

● 第 48 回フラーレンナノチューブグラフェン学会

北村典雅, 大島侑己, 神田翔平, 河合英輝, 中井祐介, 真庭豊, 柳和宏: 電気二重層キャリア注入により極性制御された半導体型単層カーボンナノチューブ熱電デバイスの作製

小林佑, 佐々木将吾, 森勝平, 日比野浩樹, 谷口尚, 渡辺賢司, 真庭豊, 宮田耕充: Growth of High-Quality WS₂ Monolayers on Graphite

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

井上凌介, 真庭豊, 宮田耕充: Direct transfer of CVD graphene to insulating substrates by metal melting

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

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

● 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会

大島侑己, 北村典雅, 神田翔平, 河合英輝, 中井祐介, 真庭豊, 柳和宏: イオン液体を用いた電気二重層キャリア注入による半導体型単層カーボンナノチューブの熱電物性の制御

藤原美帆, 宮田耕充, 篠原久典: 面内へき開によるグラフェン端の構造制御

小林佑, 森勝平, 真庭豊, 宮田耕充: 薄膜硫化法による Mo_xW_{1-x}S₂ ヘテロ構造の合成と評価

井上凌介, 小林佑, 森勝平, 真庭豊, 宮田耕充: インジウムはんだを利用した遷移金属ダイカルコゲナイドの電気伝導特性評価

佐々木将吾, 真庭豊, 宮田耕充: 薄膜硫化法による金属性遷移金属ダイカルコゲナイドの結晶成長

● 第 47 回フラーレンナノチューブグラフェン学会

光山遼, 田寺真, 客野遥, 鈴木亮輔, 石井広義, 中井祐介, 宮田耕充, 柳和宏, 片浦弘道, 真庭豊: X 線回折実験によるカーボンナノチューブの精密構造とカイラリティ分布の研究

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

大島侑己, 北村典雅, 神田翔平, 河合英輝, 中井祐介, 真庭豊, 柳和宏: イオン液体を用いた電気二重層キャリア注入による半導体型単層カーボンナノチューブの熱電物性の制御

小林佑, 森勝平, 真庭豊, 宮田耕充: One-step synthesis of heterostructures based on transition metal dichalcogenides by thin-film sulfurization

犬飼絵理, 小林佑, 宮田耕充, 真庭豊, 篠原久典: Optical properties of transition metal dichalcogenides grown by thin-film sulfurization

● 日本物理学会 2014 年秋季大会

藤田圭介, 中井祐介, 宮田耕充, 柳和宏, 真庭豊: n ドープされた高純度半導体型単層カーボンナノチューブの熱電物性

柳和宏, 河合英輝, 神田翔平, 大島侑己, 北村典雅, 山本貴博, 中井祐介, 真庭豊: 電気二重層キャリア注入による半導体型単層カーボンナノチューブの熱電物性の制御

光山遼, 田寺真, 客野遥, 鈴木亮輔, 石井広義, 中井祐介, 宮田耕充, 柳和宏, 片浦弘道, 真庭豊: X 線回折実験によるカーボンナノチューブの精密構造とカイラリティ分布

芹田昇, 中井祐介, 宮田耕充, 真庭豊, 斎藤毅: ¹³C NMR 測定による単層カーボンナノチューブの電子状態の研究

市村遼太, 塚田諒, 芹田昇, 客野遥, 中井祐介, 宮田耕充, 松田和之, 斎藤毅, 畠賢治, 真庭豊: 水・カーボンナノチューブ複合体の物性

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

中井祐介, 芹田昇, 塚田諒, 市村涼太, 宮田耕充, 畠賢治, 斎藤毅, 真庭豊: NMR と磁化率測定からみた高純度単層カーボンナノチューブの磁氣的性質

石田憲二, 花岡洋祐, 北川俊作, 中井祐介, C. Wang, G.-H. Cao, Z.-A. Xu: 鉄系超伝導体 $\text{LaFe}(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)\text{O}$ の NMR

国内研究会

● 第 5 回エネルギー理工学研究所国際シンポジウム, 京都大学, 2014 年 10 月

森勝平, 小林佑, 宮内雄平, 松田一成, 真庭豊, 宮田耕充: Synthesis and characterization of two-dimensional semiconductor heterostructures based on transition metal dichalcogenides

● 第 42 回 東北地区高分子若手研究会夏季ゼミナール, 蔵王, 2014 年 7 月

宮田耕充: カーボンナノ構造をテンプレートとして 利用した機能性材料の開発

● 第 4 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン若手研究会, 名古屋大学 2014 年 9 月

宮田耕充: 原子層ヘテロ構造の結晶成長

国際会議

● APS March Meeting 2015 in San Antonio, Texas. Mar. 2015

宮田耕充, 小林佑, 佐々木將吾, 森勝平, 真庭豊, 谷口尚, 渡辺賢司, 日比野浩樹: Growth and Optical Properties of High-Quality WS_2 Monolayers on Graphite

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

● Recent Progress in Graphene Research (RPGR 2014), September 21-25, 2014

小林佑, 森勝平, 真庭豊, 宮田耕充: Combinatorial synthesis of single-layer $\text{Mo}_{1-x}\text{W}_x\text{S}_2$ by sulfurization of patterned oxide thin films

森勝平, 真庭豊, 宮田耕充: Synthesis and characterization of two-dimensional semiconductor heterostructures based on transition metal dichalcogenides

● Liquids 2014 (9th Liquid Matter Conference), Lisbon, Portugal (24th July 2014)

H. Kyakuno, K. Matsuda, R. Ichimura, Y. Nakai, T. Saito, Y. Maniwa: Water in confined geometry of carbon nanotubes

R. Ichimura, H. Kyakuno, R. Tsukada, N. Serita, K. Matsuda, Y. Nakai, T. Saito, Y. Maniwa: Thermophysical properties of confined water within single-wall carbon nanotubes

● NT14: The Fifteenth International Conference on the Science and Application of Nanotubes, Los Angeles, USA, June 2014

Yusuke Nakai, Kazuya Honda, Kazuhiro Yanagi, Hiromichi Kataura, Teppei Kato, Takahiro Yamamoto, Yutaka Maniwa: Large thermoelectric power of highly concentrated semiconducting single-wall carbon nanotube film

ナノ物性II研究室

1. 研究活動の概要

本研究室では、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。また、光励起によって生じる非平衡キャリアの緩和過程を詳しく調べ、制御していくこと、を研究室の目標として研究活動を行っている。特に、低次元ナノ物質およびその集合した系における光物性・電子物性の研究を行っている。主として、単層カーボンナノチューブ（SWCNT）を研究材料として用いて、SWCNT単体、分子内包複合体、およびそれらの集合体における新奇物性探索・物質創製・技術開発・デバイス開発を行っている。特に最近では、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ことを行っている。今年度より、二次元原子層材料やナノワイヤを対象とした研究にも着手した。

1) 低次元ナノ物質における光物性とその制御

これまで我々は高純度に分離精製を行った単層カーボンナノチューブに対して、イオン液体を電解液として用いた電気化学ドーピング法（電気二重層キャリア注入法）により、フェルミレベルをシフトさせ、その色をパウリの排他原理を用いて制御することに成功してきた。今年度は、同技術を用いた物性制御技術を他のナノ物質系へ応用することを目標に、二次元原子層材料の一つである遷移金属カルコゲナイドや、一次元物質であるGeナノワイヤといった物質に対しての研究をスタートさせた。

遷移金属カルコゲナイド 遷移金属カルコゲナイドは、近年、反転対称性の破れや大きなスピン軌道相互作用から、バレー分極制御などが報告され、極めて活発に研究がなされている。我々の研究室では、大面積に合成した多層遷移金属カルコゲナイド薄膜に対して、SWCNTと同様にキャリア注入ができるかどうか、更にその物性が制御できるかどうか検討することをはじめた。既報の報告を参考に、合成実験を行い、シリコン基盤上に多層のMoS₂やWS₂を合成することに成功した。アルカリによるSiO₂溶解により、作製した薄膜を剥離させ、電極を形成させたガラス基板上への転写にも成功した。更に、電気化学ドーピングによるキャリア注入実験を行ったところ、合成した多層遷移金属カルコゲナイド試料に対してキャリア注入が可能であることを明らかにした。電子ドープにより、A・B励起子に由来するピークを消滅させることに成功している。ホールドープが可能かどうか、更に検討を行っている。

ナノワイヤ SWCNTと同様な一次元性物質であるナノワイヤーに対して、SWCNTで行ってきた物性制御が可能か検証する為、今年度はSWCNTとバンドギャップが同等のGeナノワイヤの合成を進めた。既報の論文従って、シリコン基板上に2nmの厚さで金を蒸着し、それを触媒としてGeナノワイヤを成長させた。結果として、直径数100nm・長さ数 μm のナノワイヤを成長させることに成功した。走査型および透過型電子顕微鏡観察によりナノワイヤ形状を確認し、また顕微ラマン分光測定によりGe由来の振動モードを確認し、Geナノワイヤの合成に成功していることを確認している。合成できたGeナノワイヤは μm スケールの為、顕微ラマン分光測定によってのみ振動モードを捉えることができる。既存の顕微ラマン装置の試料スペースは大気には開放されているが、電気化学ドーピングの実験を行う場合、大気中の酸素や水分は極めて悪影響を及ぼす。よって、正確に電気化学ドーピングの実験が行えるように、今年度は、顕微ラマンの試料室に嫌気下において電気化学実験を行う為のサンプルセルの作製を行った。作製したサンプルセルを用いて、電気化学ドーピングにより振動モードに変化が生じるかどうかを試みた。標準試料として行ったSWCNTにおいては、明確な振動モードの変化を見出したが、合成したGe

ナノワイヤにおいてはキャリア注入によりモードの変化はまったく見られなかった。その原因を調べる為、更に検討を進めている。

SWCNT SWCNT に対して高密度にキャリア注入した場合において、カイラリティに依存して、 $1\mu\text{m}$ 近傍に新たな吸収帯が形成される。この吸収帯の物理的背景に関して、ウィーン大学のトーマスピヒラー教授らと議論を行い、電子エネルギー損失分光法によって得られたアルカリ金属ドーピングされた SWCNT の誘電率の波長依存性を用いて解析を行ったところ、SWCNT バンドルの垂直方向に生じる表面プラズモン散乱に由来することを明らかにすることができた。印加電圧によって、そのピーク強度・位置を変化させることができる為、電気化学ドーピング法が表面プラズモン散乱の制御にも応用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

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。その結果に基づき、他の物性を劇的に変化させることができないかと考え、次の研究ターゲットとしてゼーベック効果に着目して研究を進めた。ゼーベック係数 S の大きさは下記の式で記述することができる。

$$S(E_F) = -\frac{\pi^2 k_B^2 T}{3e} \frac{\ln[\sigma(E_F)]}{dE} \approx \frac{\ln[\text{DOS}(E_F)]}{dE} \quad (1)$$

即ち、フェルミレベル E_F をシフトさせた際、その状態密度 $\text{DOS}(E)$ に依存してゼーベック係数は大きく変化する。また、ホールドーピング、電子ドーピングにより、その符号も反転することが予想される。半導体型 SWCNT はアンバイポーラな特性を示す為、P 型・N 型の両方のゼーベック係数を持たせることが可能と予想される。更には、一次元性に由来したファンホッフ特異点に正確にフェルミレベルをシフトさせることにより、更なるゼーベック係数の増大が期待された。これまでの電気二重層キャリア注入技術に、ゼーベック係数測定系を組み合わせた実験系を構築した。既存の真空プローバー系に改造を加え、測定できる電極端子を増やし、ゼーベック係数の測定系を構築した。イオン液体を用いた電気化学ドーピングにより、ゼーベック係数の符号および大きさを連続的に変化させることができることを明らかにした。特に、ゲート電圧印加によりドーピングした状況を形成し、その後、温度を冷やし、形成された電気二重層を固化させることにより、ドーピングした状態を保持することが出来ることも分かった。結果として、任意のゼーベック係数を自在に形成させることが可能であることを明らかにした。

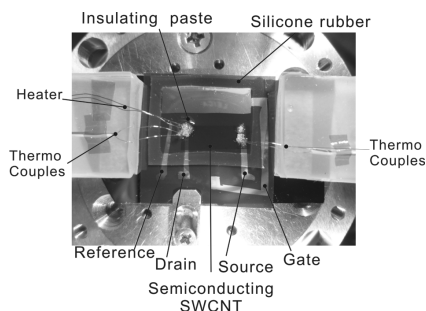


図 1: 電気二重層を用いたゼーベック係数制御系の構築

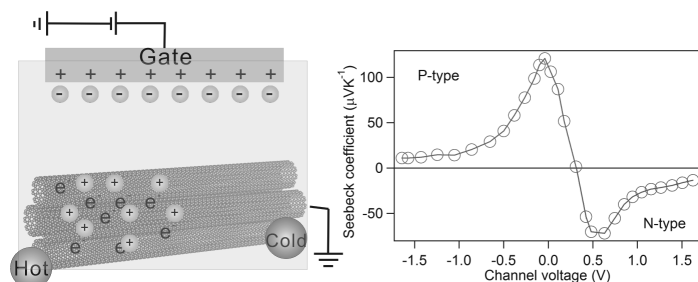


図 2: 電気二重層を用いた半導体型 SWCNT のゼーベック係数の制御

2. 研究業績

1) 論文

- K. Sato, K. Tahara, Y. Minami, I. Katayama, M. Kitajima, H. Kawai, K. Yanagi, J. Takeda: "Resonance enhancement of first- and second-order coherent phonons in metallic single-walled carbon nanotubes", *Phys. Rev. B*, **90**, 235435 (2014)
- C. Kramberger, M. Kharlamova, K. Yanagi: "Multifrequency Raman spectroscopy on bulk (11,10) chirality enriched semiconducting single-walled carbon nanotubes", *Phys. Stat. Sol. B*, **251**, 2432-2436 (2014)
- K. Yanagi, S. Kanda, Y. Oshima, Y. Kitamura, H. Kawai, T. Yamamoto, T. Takenobu, Y. Nakai, Y. Maniwa: "Tuning of the Thermoelectric Properties of One-Dimensional Material Networks by Electric Double Layer Techniques using Ionic liquids", *Nano Lett*, **14**, 6437-6442 (2014)
- M. Hagiwara, M. Ikeda, T. Kida, K. Matsuda, S. Tadera, H. Kyakuno, K. Yanagi, Y. Maniwa, K. Okunishi: "Haldane State Formed by Oxygen Molecules Encapsulated in Single-Walled Carbon Nanotubes", *J. Phys. Soc. Jpn*, **83**, 113706 (2014)
- H. Kawai, K. Hasegawa, A. Oyane, Y. Naito, K. Yanagi: "Self-formation of highly aligned metallic, semiconducting and single chiral single-walled carbon nanotubes assemblies via a crystal template method", *Appl. Phys. Lett*, **105**, 093102 (2014)
- P. Rohringer, L. Shi, X. Liu, K. Yanagi, T. Pichler: "Purification, separation and extraction of inner tubes from double-walled carbon nanotubes by tailoring density gradient ultracentrifugation using optical probes", *Carbon*, **74**, 282-290 (2014)
- H. Shimotani, S. Tsuda, H. Yuan, Y. Yomogida, R. Moriya, T. Takenobu, K. Yanagi, Y. Iwasa: "Continuous band-filling control and one-dimensional transport in metallic and semiconducting carbon nanotube tangled films", *Advanced Functional Materials*, **24**, 3305-3311 (2014)
- R. Mitsuyama, S. Tadera, H. Kyakuno, R. Suzuki, H. Ishii, Y. Nakai, Y. Miyata, K. Yanagi, H. Kataura, Y. Maniwa: "Chirality fingerprinting and geometrical determination of single-walled carbon nanotubes: Analysis of fine structure of X-ray diffraction pattern", *Carbon*, **75**, 299-306 (2014)
- Y. Nakai, K. Honda, K. Yanagi, H. Kataura, T. Kato, T. Yamamoto, Y. Maniwa: "Giant Seebeck coefficient in semiconducting single-wall carbon nanotube film", *Appl. Phys. Express*, **7**, 025103 (2014)
DOI:10.7567/APEX.7.025103
- G. Ruiz-Soria, A. Paz, M. Sauer, D. Mowbray, P. Lacovig, M. Dalmiglio, S. Lizzit, K. Yanagi, A. Rubio, A. Goldoni, P. Ayala, T. Pichler: "Revealing the Adsorption Mechanisms of Nitrooxides on Ultrapure, Metallicity-Sorted Carbon Nanotubes", *ACS Nano*, **8**, 1375-1383 (2014)

2) 著書

- 柳和宏: "エレクトロクロミック材料としての単層カーボンナノチューブ", 第7章5節, p325-p331, 監修 角田祐三 シーエムシー出版 (2014)

K. Yanagi: "Differentiation of Carbon Nanotubes with Different Chirality", Chapter 3, p19-p38, Ed. K. Tanaka, S. Iijima, "Carbon Nanotube and Graphene", Elsevier (2014)

3) 特許

特願 2014-135553 半導体素子の製造方法, 半導体素子の製造デバイス, 半導体素子, 及び該半導体素子を用いてなる熱電変換素子 柳和宏・真庭豊・中井祐介・河合英輝

4) 学会講演

● 第 70 回年次大会 物理学会 2015 年 3 月 21～23 日 (早稲田大学)

本間光太郎, 河合英輝, 柳和宏: 多層遷移金属カルコゲナイド薄膜における光電気化学特性

片山郁文, 許人杰, 南康夫, 柳和宏, 北島正弘, 武田淳: 波長分解コヒーレントフォノン分光法を用いたカーボンナノチューブのカイラリティ同定

北村典雅, 大島侑己, 河合英輝, 柳和宏: 単層カーボンナノチューブの熱電物性のカイラリティ依存性

柳和宏 (招待講演): 単層カーボンナノチューブの物性制御の研究

● 第 62 回応用物理学会春季学術講演会 2015 年 3 月 11～13 日 (東海大学)

北村 典雅, 大島 侑己, 神田 翔平, 河合 英輝, 柳 和宏: 電気二重層キャリア注入により極性制御された半導体型単層カーボンナノチューブ熱電デバイスの作製

許 人杰, 片山 郁文, 南 康夫, 北島 正弘, 柳 和宏, 武田 淳: コヒーレントフォノン分光法によるカーボンナノチューブ混合溶液のカイラリティ同定

林 大介, 中井 祐介, 客野 遥, 柳 和宏, 宮田 耕充, 真庭 豊, 山本 貴博: SWCNT フィルムの熱電物性: 半導体型・金属型混合の効果

● 第 48 回フラーレンナノチューブグラフェンシンポジウム 2015 年 2 月 22 日 (東京大学)

本間 光太郎, 河合 英輝, 柳 和宏: CVD 合成された多層 MoS₂・WS₂ 薄膜の光電気化学特性

大島 侑己, 北村 典雅, 神田 翔平, 河合 英輝, 中井 祐介, 真庭 豊, 柳 和宏: 電気二重層キャリア注入により極性制御された半導体型単層カーボンナノチューブ熱電 デバイスの作製

● 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会 2014 年 9 月 19 日 (北海道大学)

北村典雅, 大島侑己, 神田翔平, 河合英輝, 中井祐介, 真庭豊, 柳和宏: イオン液体を用いた電気二重層キャリア注入による半導体型単層カーボンナノチューブの熱電物性の制御

河合英輝, 長谷川凱, 柳和宏: 結晶鑄型法による金属型・半導体型単層カーボンナノチューブの自己組織的配列集合体形成

● 2014 秋季大会 物理学会 2014 年 9 月 7 日 (中部大学)

飯塚貴彦, 清水直, 蒲江, 濱畑裕紀, 柳和宏, 竹延大志, 岩佐義宏: 電気二重層トランジスタを用いたカーボンナノチューブの熱電能の電界制御

光山遼, 田寺真, 客野遥, 鈴木亮輔, 石井広義, 中井祐介, 宮田耕充, 柳和宏, 片浦弘道, 真庭豊: X線回折実験によるカーボンナノチューブの精密構造とカイラリティ分布

丸本一弘, 松本大佑, 柳和宏, 岡田晋, 竹延大志: 半導体単層カーボンナノチューブにおける両極性電場誘起スピン消失の ESR 直接観測

柳和宏, 河合英輝, 神田翔平, 大島侑己, 北村典雅, 山本貴博, 中井祐介, 真庭豊: 電気二重層キャリア注入による半導体型単層カーボンナノチューブの熱電物性の制御

五十嵐透, 河合英輝, Nguyen Thanh Cuong, 岡田晋, Thomas Pichler, 柳和宏: 高密度キャリア注入により単層カーボンナノチューブに形成される表面プラズモン散乱

藤田圭介, 中井祐介, 宮田耕充, 柳和宏, 真庭豊: n ドープされた高純度半導体型単層カーボンナノチューブの熱電物性

● 第47回フラーレンナノチューブグラフィシンポジウム 2014年9月3～5日 (名古屋大学)

光山 遼, 田寺 真, 客野 遥, 鈴木 亮輔, 石井 広義, 中井 祐介, 宮田 耕充, 柳 和宏, 片浦 弘道, 真庭 豊: X線回折実験によるカーボンナノチューブの精密構造とカイラリティ分布の研究

大島 侑己, 北村 典雅, 神田 翔平, 河合 英輝, 中井 祐介, 真庭 豊, 柳 和宏: イオン液体を用いた電気二重層キャリア注入による半導体型単層カーボンナノチューブの熱電物性の制御

● 新技術説明会 2014年7月11日 (日比谷)

柳和宏: 高純度半導体型のカーボンナノチューブの未来～赤外線受光素子への応用例～

国際会議

● IWEPM2015 2015年3月10～12日 (Kirchberg(Austria))

Yuki Oshima, Yoshimasa Kitamura, Hideki Kawai, Kazuhiro Yanagi: Fabrication of Thermoelectric Devices using Precisely Fermi Level Tuned Single Wall Carbon Nanotubes by Electric Double Layer Carrier Injections

Lei Shi, Philip Rohringer, Kazu Suenaga, Yoshiko Niimi, Jani Kotakoski, Jannik C. Meyer, Herwig Peterlik, Marius Wanko, Seymour Cahangirov, Angel Rubio, Kazuhiro Yanagi, Paola Ayala, Thomas Pichler: Confined linear carbon chains: A route to bulk carbyne

Markus Sauer, Hidetsugu Shiozawa, Antonio Briones Leon, Kazuhiro Yanagi, Takeshi Saito, Karina Schulte, Thomas Pichler: A spectroscopic study of Ni clusters encapsulated in single-walled carbon nanotubes

Thomas Pichler, Filippo Fedi, Oleg Domanov, Hidetsugu Shiozawa, Kazuhiro Yanagi, Andrea Goldoni, Paolao Lacovic, Silvano Lizzit, Paola Ayala: Tailoring the interaction of separated SWCNT with NO₂ by advanced filling reactions

Marianna V. Kharlamova, Christian Kramberger, Hidetsugu Shiozawa, Kazuhiro Yanagi, Takeshi Saito, Thomas Pichler: Synthesis and growth properties of inner tubes inside metallocene-filled singlewalled

Hideki Kawai, Kai Hasegawa, Kazuhiro Yanagi: Electrical property of highly aligned chirality selected single-walled carbon nanotubes assemblies

● MNC2014 2014 年 11 月 4～7 日 (Hilton Fukuoka)

T. Fujimoto, R. Shimizu, Y. Takagi, Y. Wada, K. Yanagi, T. Takenobu: “Laminated” Ion-Gel Film as High Capacitance Insulator for Carbon Nanotube Transistor

Y. Wada, R. Inukai, T. Fujimoto, H. Hamahata, S. Matsuzaki, K. Yanagi, T. Takenobu: Printed SWCNT Thin-Film CMOS Inverters Based On Ion-Gel Chemical Doping

K. Yanagi, S. Kanda, Y. Oshima, Y. Kitamura, H. Kawai, Y. Nakai and Y. Maniwa: Tuning of Thermoelectric Properties of Semiconducting Single Wall Carbon Nanotube Networks by Electric Double Layer Techniques Using Ionic Liquid

粒子ビーム物性研究室

1. 研究活動の概要

本年度の特筆すべき研究成果は、 $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ においてこれまで未解明であった“隠れた秩序”の正体が Tb^{3+} が持つ電気多極子の自由度に起因した長距離秩序で理解可能であることを明らかにした点である。また、単純な金属に現れる巨大磁気抵抗効果の研究にも進展があり、 PtCoO_2 の単結晶の開発や PdCoO_2 の縦磁気抵抗における負の磁気抵抗効果の発現などを新たに見出した。また、比熱測定装置を新たに立ち上げて研究環境の整備を行い、低温物性測定に対する研究の展開ができるようになった。

1) 幾何学的フラストレーションを示す磁性体の研究

パイロクロア構造を持つ $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ は、短距離磁気相関が数ケルビンの温度域で発達しているが、50 mK の極低温まで長距離秩序を示さないことが 1999 年に発見されて以来、その量子的スピン液体状態に興味を持たれて精力的に研究されてきた。一方、最近の研究によると、 $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ では Tb/Ti の組成比率を 1% 以下の極微量変化させることにより長距離秩序を誘発できること、すなわちスピン液体状態と長距離秩序状態の間に量子相転移がある可能性がわかってきた。 $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ におけるこれらの問題は、スピン液体と長距離秩序の関係は何なのか？そして、その秩序相における秩序パラメーターは何なのか？ということについて新たに浮き彫りとなってきた難問である。

我々は、 $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ のスピン液体と長距離秩序の関係性や基底状態について実験的に明らかにするために、 $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$ というように Tb/Ti の組成比率をコントロールした単結晶の育成や、比熱、磁化等の低温基礎物性実験、そして中性子散乱実験から研究を進めている。本年度は、特に、長距離秩序を示す $x = 0.005$ の単結晶を使った研究に大きな進展があり、[111] 磁場下における 0.1 K 以下までの比熱測定と磁化測定の結果に、“隠れた秩序”というべき長距離秩序の謎を解く特徴的な振る舞いを見出した。つまり、長距離秩序の秩序パラメーターが Tb^{3+} が持つ多極子の自由度に起因したものであること、そして、磁場中の物理量はその長距離秩序の構造を反映した振る舞いで理解可能であることを明らかにした。 $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$ では、 x が調整パラメーターとなってスピン液体相近傍に多極子秩序相が現れるという、これまでにない非常にエキゾチックな状態が実現している可能性がわかってきた。

2) フラストレート磁性金属・非磁性金属の電気伝導に現れる巨大応答の研究

固体の中の伝導電子が系の次元性やスピン自由度と結びつくとき電気伝導現象の巨大な応答となって現れる。我々は、局在スピンのフラストレート格子を組む“金属的な”二次元三角格子磁性体 PdCrO_2 や PdCrO_2 と同構造で非磁性金属の PdCoO_2 に着目して研究している。特に、近年は単純な金属に現れる巨大磁気抵抗効果に着目して研究を行っている。

我々は、今年度、パラジウムの部分をプラチナに置き換えた PtCoO_2 の純良単結晶の育成に成功した。そして、 PtCoO_2 の層間方向の磁気抵抗にも巨大磁気抵抗効果が現れることを見出した。また、米国フロリダ州立大学の強磁場施設 (NHMFL) と共同研究を行い、 PdCoO_2 の縦磁気抵抗に大きな負の磁気抵抗効果が現れることも新たに見出した。単純金属に現れる負の磁気抵抗効果は、大変珍しい現象であり、これは磁場によって伝導電子が擬一次元伝導することに起因した効果である可能性がある。この電気伝導現象に現れる一軸異方性の問題は、カイラル対称性の破れに関係する興味深い現象であるため、今後の研究課題として大変興味深い。

3) ヘリウム 3 冷凍機を用いた低温比熱測定装置の開発

1 K 以下の極低温の世界では新奇な超伝導現象や量子磁性現象が現れる。我々は、そのような極低温下の現象の評価・理解のための手法として、比熱測定に注目してその装置開発を行った。具体的には、ヘ

高津浩, 谷口智洋, 門脇広明, 橘高俊一郎, 榊原俊郎: 9pBC-7 「極低温比熱測定からみた $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$ における“隠れた秩序”と磁場誘起相転移」

脇田美香, 谷口智洋, 高津浩, 門脇広明: 7aPS-146 「フラストレート磁性体 $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$ の純良単結晶とその物性」

● 日本物理学会 第 70 回年次大会 2015 年 3 月 21～10 日 (東京・早稲田大学)

高津浩, 谷口智洋, 門脇広明, 橘高俊一郎, 榊原俊郎, 加藤康之, 小野田繁樹, B. Fak, J. Ollivier: 24aBJ-11 「低温磁化測定による $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$ の長距離秩序の起源の検証」

国内研究会

● 第 14 回 CROSSroads 「スピン系とフラストレーション」 2015 年 2 月 3～4 日 (茨城県東海村)

門脇広明: $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ における隠れた秩序とスピン液体状態

ソフトマター物性研究室

1. 研究活動の概要

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

1) 温度勾配下における熱エネルギー輸送

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

2) ゲルの熱対流

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

3) 高分子ブレンドの結晶化ダイナミクス

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

4) 細胞性粘菌の凝集ダイナミクス

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

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

2. 研究業績

1) 学会講演

● 日本物理学会 2014 年秋季大会 2014 年 9 月 7～10 日（中部大学 春日井キャンパス）

三井 駿, 及川 典子, 栗田 玲：温度勾配下における二分子膜の相転移挙動

栗田 玲：サイズ分散系における過冷却のダイナミクス

関口 俊一, 及川 典子, 栗田 玲：溶融体の運動から見た高分子の結晶化

小林 和也, 及川 典子, 栗田 玲：物理ゲルの熱対流

及川 典子, 栗田 玲：細胞の凝集過程におけるネットワークパターン形成の数理モデル

● 日本物理学会 第 70 回年次大会 2015 年 3 月 21～24 日（早稲田大学 早稲田キャンパス）

三井 駿, 及川 典子, 栗田 玲：温度勾配下における二分子膜のラメラ-スポンジ転移

関口 俊一, 及川 典子, 栗田 玲：高分子ブレンド結晶における不均一核形成と成長過程

小林 和也, 及川 典子, 栗田 玲：物理ゲルの熱対流下における温度分布

及川 典子, 田原 大輝, 栗田 玲：イオン液体の界面張力を伴う新規な溶解ダイナミクス

国内研究会

● 第 13 回 関東ソフトマター研究会 2014 年 8 月 19 日（首都大学東京 南大沢キャンパス）

及川 典子, 栗田 玲：細胞間凝集シグナルの時間遅れが作るネットワークパターンの数理モデル

三井 駿, 及川 典子, 栗田 玲：温度勾配下における界面活性剤/水系の相転移

小林 和也, 及川 典子, 栗田 玲：ゾル・ゲル転移点近傍における物理ゲルの熱対流

● 第 4 回 ソフトマター研究会 2015 年 1 月 6～8 日（名古屋大学 東山キャンパス）

田原 大輝, 及川 典子, 栗田 玲：ブラウン運動からみた赤血球間の相互作用

森永 恒希, 及川 典子, 栗田 玲：NaCl の結晶化に対するコロイドの影響

小林 和也, 及川 典子, 栗田 玲：ゼラチン水溶液の熱対流

三井 駿, 及川 典子, 栗田 玲：温度勾配下における二分子膜の相転移

関口 俊一, 及川 典子, 栗田 玲：高分子ブレンド結晶における不均一核形成ダイナミクス

平井 祥太, 及川 典子, 栗田 玲：水の気液転移における泡の発生

● 首都大学東京 公開シンポジウム 2015 年 3 月 9 日 (首都大学東京 南大沢キャンパス)

及川 典子, 田中 良巳, 中垣 俊之: シート状真正粘菌の成長における界面不安定性

国際会議

● Liquids 2014 9th Liquid Matter Conference, The University of Lisbon, Lisbon, Portugal, July, 21-25, 2014

N. Oikawa, R. Kurita: Dynamics of the network pattern formation in Dictyostelium discoideum cells

● Physics of Structural and Dynamical Hierarchy in Soft Matter, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, March, 16-18, 2015

N. Oikawa, R. Kurita: A new type of mixing dynamics between ionic liquids and water

K. Kobayashi, N. Oikawa, R. Kurita: Dynamics of flow and temperature field in thermal convection of physical gels

S. Sekiguchi, N. Oikawa, R. Kurita: Modulations of twist lamella periods in a heterogeneous nucleation of polymer crystals

S. Mitsui, N. Oikawa, R. Kurita: Topological transition of nonionic surfactant bilayer under temperature gradient

編集後記

昔は全く興味が湧かなかった作者の本が、最近、書店で手に取ると、思いがけなくその文章に魅了され、途中で飽きることもなく最後まで読み切ってしまうことがよくある。寺田寅彦随筆集は、そのような本の一つであった。彼の述べている言葉は、自分自身が高校生の時には味気なく映るだけであったが、研究に日々従事している現在の私の心には、とてもよく響き、競争的な研究活動の日々の中、自らを見つめ直すよい切っ掛けとなっている。「純粋な実験物理学者は写実主義の芸術家と似通った点がある。」と述べ、返す刀で、「われわれの目はただ西洋のえらい大家の持ち扱い古した、かびのはえた月並みの現象にのみ目を奪われる」と断罪している。このような文章を目にすると、自らが、学問ができるとても貴重な立場にしながら、本質に挑戦しないことは情けない、とあらためて反省する。しかしながら、ゴッホの向日葵ではなく、映る姿を自らの目で捉えて、自分自身の向日葵を創造することは、やはり極めて困難な仕事であろう。2014年は、私が所属する分野では、青色発光ダイオードの研究を成し遂げてきた赤城・天野・中村らのノーベル賞受賞に大いに沸いた年であった。人には素晴らしい可能性があり、偉大なる先輩方は、見事に自らの向日葵の創造を成し遂げてきている。年次報告をまとめるという一年を振り返る作業を行うにあたり、他者が征服していった焼け野原の落ち穂拾いにすぎないことをしていないかどうか自らを振り返りつつ、今年こそ、と思いを新たにす。

(柳和宏 記)

平成 26 年度 年次報告編集委員

堀田 貴嗣 (2014 年度物理学教室主任)

青木 勇二

柳 和宏

山田 真也