

研究室活動状況 平成 25 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) ニュートリノ振動確率に関する木村-高村-横枕の方法の非断熱的遷移を含む場合への拡張 (安田)

物質中でのニュートリノ振動確率の表式は一般に複雑になるが、物質密度が一定の場合には解析的に与えられることが木村-高村-横枕により示されている。さらに、物質密度が断熱的に変化し、かつ基線の長さが大きいために振動の平均化が起こる場合にも木村-高村-横枕の方法を拡張することにより振動確率が解析的に求められることが筆者の過去の研究により知られている。一方、物質密度が非断熱的に変化する場で基線長が大きくて振動の平均化が起こる場合には、2準位の場合の非断熱的遷移過程のランダウ-ゼナーによる取扱いを各準位交差に適用することによりある程度解析的に議論できると考えられているが、その議論は、有効混合角が求まらなければ具体的に計算することが困難である。この研究では、有効混合角は、エネルギー固有値が何らかの近似により解析的に求まっていれば、木村-高村-横枕の方法により解析的に表すことが可能であることを示した。2つの準位が近接する時の行列の対角化が解析的に実効できない場合、有効混合角の選び方に曖昧さが存在するが、有効混合角は準位交差の近接点で $\pi/4$ になるべし、という条件から曖昧さを除くことができる。この事実により非断熱的遷移を含む場合で振動の平均化が起こる場合にも振動確率を解析的に表せることが示された。その例として、磁気モーメントを持つニュートリノが磁場中を運動する場合について、太陽ニュートリノの質量二乗差を無視でき、位相が存在しないという仮定のもとで議論した。

2) 大気ニュートリノによる非標準的ステライルニュートリノシナリオに対する制限の現象論 (安田・深澤)

1990年代に、標準的な3世代のニュートリノ振動では説明が出来ないLSNDの実験結果が出た後、その現象を追試するためにMiniBooNE実験がスタートした。その結果は2007年~2010年に報告されたが、MiniBooNE実験の結果はニュートリノと反ニュートリノのチャンネルで簡単な2世代のニュートリノ振動で説明できるものではなく、その後ニュートリノと反ニュートリノに差が出るようなシナリオが提唱された。その一つとして、ステライルニュートリノが通常よりもはるかに大きな物質効果を感じ、MiniBooNE実験のような基線の長さが短い場合でもニュートリノと反ニュートリノに違いが出るという可能性がKaragiorgiたちによって提案された。この研究では、このシナリオがスーパーカミオカンデの大気ニュートリノ観測からどれだけ制限を受けるかを議論した。大気ニュートリノは、伝播する基線の長いニュートリノを観測できる点に特徴があり、ステライルニュートリノと通常のニュートリノに小さな混合があると、大気ニュートリノのイベント数には標準的なシナリオの予言値からのずれが出ることになる。ここではスーパーカミオカンデのモンテカルロの結果を厳密には再現できなかったため、我々のシミュレーションの結果を使って、標準的な場合と大きな物質効果のあるステライルニュートリノでKaragiorgiたちによるLSND+MiniBooNEを説明する混合角の場合とで比較をした。詳細な数値結果、Karagiorgiたちのステライルニュートリノシナリオは 3σ 程度の信頼係数で排除できることがわかった。定量的な解析は現在も継続中である。

3) 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は標準模型を越えたものとして期待されているものである。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)と考えられ、その場合には弦の物理を加速器実験で検証することは不可能となる。しかしながら、弦模型の高エネルギーの物理が初期宇宙の高エネルギー現象において重要な役割を果たして

いる可能性があるため、弦模型の初期宇宙の現象への予言を行うことは重要である。最近の宇宙観測の結果は精密になってきており、弦模型の痕跡を見つけることのできる可能性がある。一般に素粒子の弦模型は超対称性を持つとは限らない。超対称性を持たない場合には、そのポテンシャルエネルギーが指数関数で記述されるスカラー場がいくつか現れる。指数関数で記述されるポテンシャルエネルギーにしたがうスカラー場と宇宙膨張の動力学には“climbing phenomena”という興味深いものがある。それは、宇宙のインフレーションの始まりからごく初期の間のこと、スカラー場が指数関数型ポテンシャルエネルギーの低いところから一度登らされてからいったん止まり、そして下っていった後にインフレーションを起こすというものである。この現象がある場合には、大きなスケールの宇宙背景輻射のゆらぎに特有な効果があることを正確に理解し、その結果を実際の観測と比較した。現状では観測はこの現象をサポートしているとは言えないが、排除もしていない。この研究はピサ高等師範学校の A.Sagnotti 氏との共同研究である。

4) 弦理論におけるDブレーンの動力学におけるコンパクト化 (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。この場合、余分な6次元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。この「コンパクト化」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。特に超対称性なしにそれを実現している例は皆無である。超対称性がない場合にはDブレーンと呼ばれる弦理論における重要な物体の間に引力や斥力が働く。Dブレーンの間の引力や斥力のバランスでコンパクト空間を安定に保つ（なぜコンパクトであるのかというより難しい問いには答えない）という可能性を追求した。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）する自由度が少ないものを選び、さらに磁気を帯びたDブレーンを導入するとそれを達成できる可能性がある。この研究は進行中で、来年度からの科学研究費(C)の主な研究課題である。

5) 量子色力学におけるインスタントン効果の実験的検証 (北澤・小原)

量子色力学(QCD)の真空には非自明な構造があると信じられている。それは無限に存在する同等な「真空」の量子力学的な重ね合わせが本当の真空である、というものである。同等な「真空」の間は、量子力学的なトンネル効果によって遷移することができ、そのトンネル効果はユークリッド化された時空での量子色力学のゲージ場の場の方程式の特殊な解(インスタントン解)によって記述されると信じられているので、インスタントン効果と呼ばれる。実はインスタントン効果はまだ純粋に理論的なもので、それは実験的に検証されたものではない。インスタントン効果が理論的にどれほど必然的なものであるかを先入観にとらわれずに慎重に検討した。この効果があるとしたとき、それがどのような実験で検証できるのかを考察することが今後の課題である。特にLHC加速器が高輝度であることを考慮して、その加速器を用いた実験での検証について考察し、必要であれば実験のシミュレーションを行うことも今後の課題である。

2. 研究業績

1) 論文

Noriaki Kitazawa and Augusto Sagnotti, Pre-Inflationary Clues from String Theory?, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **04** (2014) 017.

2) 学会講演

● 日本物理学会年会 第69回年次大会 2014年3月27日～3月30日 (東海大学湘南キャンパス)

深澤信也, 安田修: ステライルニュートリノに働く新しい物質効果の探索 (28aTK-9)

国内研究会

● 研究会「ニュートリノフロンティアの融合と進化」, 東大(本郷キャンパス), 2013年4月21日

安田修: ニュートリノ振動の解明に向けて

国際会議

● JPS-KPS joint meeting, April 24, 2013, Daejeon, South Korea

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

● INTERNATIONAL SCHOOL OF NUCLEAR PHYSICS, 35th Course September 16-24, 2013, Erice-Sicily, Italy

O. Yasuda: Constraints on non-standard interactions by atmospheric neutrinos

● PASCOS2013 November 20-26, 2013, Taipei, Taiwan

O. Yasuda: An analytical treatment of neutrino oscillation probabilities (invited talk)

● A topical conference on elementary particle physics and cosmology (Miami2013), December 12-18, 2013, Fort Lauderdale, Florida, USA

O. Yasuda: Non-standard flavor-dependent interactions and atmospheric neutrinos

高エネルギー理論研究室

1. 研究活動の概要

The research activities of the Laboratory members during the academic year 2013/2014 were in the two different directions (on the two different subjects):

(i) construction of the new inflationary models in the supergravity theory, which are to be consistent with the WMAP and PLANCK measurements,

(ii) making progress in the theory of integrable systems, such as Hirota-Miwa equation, by the use of integrable maps and the (triangulated) category theory.

The first approach belongs to Theoretical Physics and Theory of Gravity, being closely related to current physical observations (phenomenology). The second approach belongs to Mathematical Physics and is more abstract.

The research of (i) was supported by the Norwegian Research Council (RCN) under the Norway-Japan (RCN-JSPS) bilateral agreement for joint research with the Laboratory of Professor A. Raklev at the University of Oslo (ケトフ). The research of (ii) was supported by the TMU scholarship (弓林).

(i) In particular, we extended the $f(R)$ gravity action by including a generic dependence upon the Weyl tensor, and further generalized it to the supergravity theory by using the super-curvature and super-Weyl chiral superfields in $N=1$ chiral curved superspace. Our (super)gravitational actions are the meaningful extensions of the phenomenological $f(R)$ gravity and its locally supersymmetric generalization towards their ultra-violet completion and their embedding into superstring theories. The proposed actions can be used for studies of cosmological perturbations and gravitational instabilities due to a nonvanishing Weyl tensor in gravity and supergravity.

An $N = 1$ Poincare supergravity action, which is suitable for describing the Starobinsky inflation, was proposed. It extends $f(R)$ gravity to supergravity in its old-minimal version. The action is parameterized by a single holomorphic potential and a single non-holomorphic potential, and can be dualized into the standard matter-coupled supergravity action, with the "matter" given by two chiral superfields. The action extends the earlier proposals for embedding the Starobinsky inflation into supergravity, and can be further generalized to include quantum corrections to the inflation. Our approach assumes the gravitational origin of inflaton and quintessence in the context of supergravity, by using a single chiral scalar curvature superfield.

We studied three types of the old-minimal higher-derivative supergravity theories extending the $f(R)$ gravity, towards their use for the inflationary model building in supergravity, by using both superfields and their field components. In the curved superspace all those theories are described in terms of a single chiral scalar curvature superfeld. Each of those theories can be dualized into a matter-coupled supergravity without higher derivatives. The first type is parameterized by a single non-holomorphic potential, and gives rise to the dual matter-coupled supergravities with two dynamical chiral matter superfields having a no-scale Kaehler potential. We find that a generic potential generates both the $(R + R^2)$ gravity and the non-minimal coupling of the propagating complex scalar field to the R , which are needed for the Starobinsky and Higgs inflation, respectively. We found the general conditions for the Starobinsky inflation and computed the inflaton mass. The second type is given by the chiral supergravity actions whose $N = 1$ superfield Lagrangian $F(R, \Sigma)$ also depends upon the

chiral projection Σ of the anti-chiral superfield of R . We found that the actions of the second type always give rise to ghosts. We also revisited the $F(R)$ supergravity actions of the third type (without the Σ -dependence) with a reduced number of the extra physical degrees of freedom, comprising a single chiral matter superfield with a no-scale Kaehler potential.

(ii) We proposed to characterize the Hirota-Miwa equation by means of the theory of triangulated category. We provided the arguments to support the idea. In particular, we showed in detail how the singularity confinement, a phenomenon which was proposed to characterize integrable maps, can be associated with the projective resolution of the triangulated category.

We demonstrated that the invariant varieties of periodic points (IVPP) of all periods of the three-dimensional Lotka-Volterra map can be derived iteratively from the singularity confinement (SC). The method can be applied to any integrable map of dimension d only when the number of the invariants p equals to $d - 1$. We proposed a new algorithm of the derivation which can be used in the cases $d/2 < p < d - 2$. Applying this algorithm to the 3-point Toda map, we derived a series of its IVPP's.

When a non-integrable rational map changes to an integrable one continuously, we showed that a large part of the Julia set of the map approaches indeterminate points (IDP) of the map along algebraic curves. Those IDPs are the singular loci of the curves.

2. 研究業績

1) 論文

S. V. Ketov, T. Terada, New Actions for Modified Gravity and Supergravity, JHEP 1307 (2013) 127, 15 pages

S. V. Ketov, Supergravity and Early Universe: the Meeting Point of Cosmology and High-Energy Physics, Int. J. Mod. Phys. A28 (2013) 1330021 (Invited Review), 53 pages

S. V. Ketov, On the supersymmetrization of inflation in $f(R)$ gravity, PTEP 2013 123B04, 9 pages

S. V. Ketov, T. Terada, Old-minimal supergravity models of inflation, JHEP 1312 (2013) 040, 24 pages

T. Yumibayashi, S. Saito, Y. Wakimoto, Derivation of invariant varieties of periodic points from singularity confinement in the case of Toda map, Phys. Lett. A378 (2014) 480-484

S. Saito, T. Yumibayashi, Y. Wakimoto, Singularity confinement and projective resolution of triangulated category, PTEP 2 (2014) 023A08, 24 pages

2) 国際会議報告

弓林司: 特異点閉じ込めと三角圏の射影分解, 研究集会報告 25AO-S2 「非線形波動研究の広がり」 p.107-113, 九州大学応用力学研究所, 2014年3月

3) 学会講演

● Sergey Ketov: PLANCK mission, Starobinsky inflation and its realization in old-minimal supergravity, December 2-4, 2013 (Kavli IPMU, 東京大学柏キャンパス), invited talk

● 弓林司：特異点閉じ込めと三角圏の射影分解, 2013年10月31日-11月2日 (九州大学応用力学研究所シンポジウム, 福岡)

原子核理論研究室

1. 研究活動の概要

1) η' 中間子と核子の相互作用と $\eta'N_2$ 体束縛状態 (慈道)

η' メゾンは π 中間子と同様に擬スカラー中間子であるが、 π 中間子等の他の擬スカラー中間子より重い質量を持つ。これは、 π 、 K 、 η がカイラル対称性の自発的破れに伴う南部・ゴールドストーンボゾンであるのに対して、 η' は軸性量子異常のために南部・ゴールドストーンボゾンになれず、重い質量を獲得していると理解されている。軸性異常の効果は、カイラル対称性の自発的破れを伴ってはじめて、 η' 質量に寄与することが知られている。したがって、核媒質中などの有限密度でカイラル対称性が部分的に回復をすると、 η' と南部・ゴールドストーンボゾン (例えば η 中間子) との質量差は減少すると予想されている。今年度は、京都大学の酒井俊太郎氏と共同研究のもと、核媒質中でのカイラル対称性の部分的回復を表現するために線形 σ 模型を用いて、 η' と核子の相互作用を計算した。結果、 η' と核子の間には、2体の束縛状態が存在するほど強い引力があることが分かり、本模型においては、7 MeV の束縛エネルギーで 10 MeV 程度の崩壊幅を得た。 η' と核子の引力は、核力の機構と類似している。 η' の質量獲得機構がカイラル対称性の自発的破れに起因していることから、 σ 場との強い結合があり、核子も同様に σ 場との強い結合があるので、 η' と核子の間には、強い σ 交換による引力が予想される。この力により η' と核子は 2体の束縛状態が作られる。

2) 核媒質中での π 中間子の性質とカイラル対称性の部分的回復 (慈道)

真空中で自発的に破れたカイラル対称性は、高温・高密度などの極限的な状況では回復すると考えられている。そのような極限的な状況に至らなくとも、核密度程度の有限密度では、自発的破れの秩序変数の一つであるクォーク凝縮の大きさが優位に減少し、カイラル対称性が部分的 (不完全に) 回復していると予想されている。近年の研究では、深く束縛された π 中間子原子などで、実際に、カイラル対称性が部分的に回復していること示唆する実験的・理論的研究があり、部分的回復の機構に注目が集まっている。我々のグループでは、部分的に回復した真空構造を理解するために、原子核中におけるハドロンの性質の研究を行っている。特に、 π 中間子はカイラル対称性の自発的破れに伴う南部ゴールドストーンボゾンであるので、部分的回復の影響が顕著に現れる。京都大学の郷田創一氏との共同研究で、核媒質中の π 中間子に対する有効理論を構築した。この模型では、物理量を核密度 (核子フェルミ運動量) の展開として表現し、真空中の πN 相互作用をインプットにすることで、有限密度の物理量を予言する。密度の 2 次以上の効果を取り入れるためには、核子相関を考慮する必要があることが分かった。この有効理論を用いて、 π 中間子の崩壊定数、質量、波動関数くりこみの計算を行った。また、この手法を用いて、京都大学基礎物理学研究所の Jenifer Nebreda 氏との共同研究で、有限密度中の $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊の計算も行っている。

3) $\Lambda(1405)$ 共鳴状態の生成機構とその構造 (慈道)

ストレンジクォークを持つ Λ ハイペロンの励起状態として知られている $\Lambda(1405)$ 共鳴状態は、古くより単純なクォーク模型では記述されないエキゾチックハドロンとして知られてきた。近年、カイラル有効理論の発展と詳細な実験データをもとに、 $\Lambda(1405)$ は $\bar{K}N$ - $\pi\Sigma$ のハドロン複合状態であることが有力になってきている。その最も確実な検証方法は、 $\Lambda(1405)$ を $\bar{K}N$ のチャンネルから生成し、そのエネルギースペクトルを観測することにある。今年度は、京都大学基礎物理学研究所の中村聡氏との共同研究で、カイラルユニタリー模型に基づき $\Lambda(1405)$ の光生成反応の理論計算を行った。 $\Lambda(1405)$ の光生成機構は単純ではなく、実験データを再現するためには現象論的なパラメータの導入が不可欠であることが

分かった。Λ(1405)の構造に関して、光生成反応では $\bar{K}N$ から作られるΛ(1405)の成分が主要な寄与を与えていて、Λ(1405)がハドロン複合状態であることをサポートする結果を得た。また、Λ(1405)を $\bar{K}N$ から生成する反応 $K^-d \rightarrow \pi\Sigma n$ の理論計算について、バレンシア大学のOset氏とKEKの関原氏と共同研究のもと、散乱理論に基づき考察を行い、計算に必要な近似の理論的不定性を明らかにし、将来J-PARCで行われる実験に有益な情報を提供した。

4) 「運動方程式の方法」を用いたボース・フェルミ混合系における対形成 (町永, 鈴木)

極低温においてトラップされたボース・フェルミ混合原子気体は、統計性の異なる粒子間の相関という多体問題のテーマを研究する上で、理想的な実験の場を提供している。とりわけ、ボース・フェルミ(BF)原子間の対形成の問題は、この複合系がフェルミ粒子であるという点で、フェルミ対形成における超流動とは根本的に異なる現象の存在が予想される。これまでの研究では、専らBFグリーン関数に基づく研究を進めてきたが、この方法では、形成されたBF対の性質や、粒子の運動量分布の計算において十分な情報が得られていなかった。そこで本研究では、BF対の運動方程式をある状態空間のもとで対角化し、波動関数を具体的に求める「運動方程式の方法」を採用して、二次元でのBF混合系に適用した。対角化する状態空間のサイズに制限があり、高運動量を持つBF対の研究は今後に残されたが、フェルミ運動量以下のBF対スペクトルはグリーン関数の方法による結果が再現された。とりわけ、今回の計算により、BF対の波動関数、および混合系の基底状態におけるボース粒子、フェルミ粒子の運動量分布が求められた。前者からは、基底状態におけるBF対の構造が、BF間引力の強さと共に変化していく様子を調べることができた。また、この方法による方程式は、ハートリー・フォック方程式と同様な構造を持っているため、通常のフェルミ対のRPA方程式と異なり、前方・後方振幅が発散することはなく、相互作用の強度による状態変化の新しい型を提供するものと期待できる。

5) 4体力を含むスキリム HFB 方程式のゴルコフ・グリーン関数法による解法 (大西)

核内の有効相互作用は強い状態依存性をもち、それを反映して3体力を含むスキリム力が導入されたが、対相互作用に強い斥力をもたらすHFBに使えない。壊れた対相互作用を回復するため引力のゼロレンジ4体力を導入し、交換性質を調べてHFB理論を展開した。スキリム力の利点を活かし、有効質量テンソルとして空間交換による非局所性やテンソル相互作用を取り入れ、角度積分を幾何学的に計算し、HFB方程式を動径座標のスツルム・リュウビュ型の連立2階微分方程式に還元した。正しい境界条件でHFB方程式を解くゴルコフ・グリーン関数をヨースト行列関数の援用で構成し、一般化された1体の密度行列を複素エネルギーのグリーン関数のコーシー積分で表し、フォックス・グッドウィンの階差方程式を拡張し7階微分の残留項をもつ積分公式を開発した。

2. 研究業績

1) 論文

S. Goda and D. Jido: Chiral condensate at finite density using chiral ward identity, *Phys. Rev.* **C88** (2013) 065204.

Shuntaro Sakai and Daisuke Jido: In medium η' mass and $\eta'N$ interaction based on chiral effective theory, *Phys. Rev.* **C88** (2013) 064906.

Daisuke Jido, Eulogio Oset, and Takayasu Sekihara: the $K^-d \rightarrow \pi\Sigma n$ reaction revisited, *Eur. J. Phys.* **A49** (2013) 95.

S.X. Nakamura and D. Jido: $\Lambda(1405)$ photoproduction based on chiral unitary model, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2014** (2014) 023D01.

Soichiro Goda and Daisuke Jido: Pion properties at finite nuclear density based on in-medium chiral perturbation theory, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2014** (2014) 033D03.

2) 国際会議報告

Kanabu Nawa, Sho Ozaki, Hideko Nagahiro, Daisuke Jido, Atsushi Hosaka: Complex 2D Matrix Model and Its Application to Nc-dependence of Hadron Structures, *Proceedings of Science (Hadron 2013)* (2014) 108.

Satochi X. Nakamura, Daisuke Jido: Theoretical analysis of $\Lambda(1405)$ photoproduction, *Proceedings of Science (Hadron 2013)* (2014) 141.

Shuntaro Sakai, Daisuke Jido: In-medium η' mass and $\eta'N$ interaction in vacuum in the linear sigma model, *Proceedings of Science (Hadron 2013)* (2014) 164.

K. Suzuki, K.-T. Brinkmann, S. Friedrich, V. Metag, M. Nanova, H. Fujioka, T. Nagae, H. Yamakami, H. Geissel, H. Weick, R.S. Hayano, T. Nishi, T. Suzuki, Y.K. Tanaka, Y.N. Watanabe, Y. Igarashi, Y. Higashi, S. Hirenzaki, N. Ikeno, H. Nagahiro, K. Itahashi, M. Iwasaki, H. Outa, D. Jido: Spectroscopy of η' mesic nuclei using (p, d) reaction, *Proceedings of Science (Hadron 2013)* (2014) 166.

A. Martinez Torres, M. Bayar, D. Jido and E. Oset: Study of the $\bar{K}N$ system and coupled channels in a finite volume, *Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser.* **26** (2014) 1460057.

Yoshiki K. Tanaka, Kai-Thomas Brinkmann, Stefan Friedrich, Hiroyuki Fujioka, Hans Geissel, Ryugo S. Hayano, Satoru Hirenzaki, Kenta Itahashi, Satoshi Itoh, Daisuke Jido, Volker Metag, Hideko Nagahiro, Mariana Nanova, Takahiro Nishi, Kota Okochi, Haruhiko Outa, Ken Suzuki, Takatoshi Suzuki, Yuni N. Watanabe and Helmut Weick: Missing Mass Spectroscopy of η' Mesic Nuclei with the (p, d) Reaction at GSI, *EPJ Web of Conferences* **66** (2014) 09019.

Hiroyuki Fujioka, Kai-Thomas Brinkmann, Stefan Friedrich, Hans Geissel, Ryugo S. Hayano, Satoru Hirenzaki, Kenta Itahashi, Satoshi Itoh, Daisuke Jido, Volker Metag, Hideko Nagahiro, Mariana Nanova, Takahiro Nishi, Kota Okochi, Haruhiko Outa, Ken Suzuki, Takatoshi Suzuki, Yoshiki K. Tanaka, Yuni N. Watanabe and Helmut Weick: Spectroscopy of η' Mesic Nuclei via Semi-Exclusive Measurement at FAIR, *EPJ Web of Conferences* **66** (2014) 09006.

3) 学会講演

● 日本物理学会 2013 年秋期大会 (高知大学朝倉キャンパス, 2013.9.20-23)

相場浩和 (京都光華女子大), 松尾正之 (新潟大), 西崎滋 (岩手大), 鈴木浩大 (明治大), 鈴木徹 (首都大): 強度関数の WTMM 間隔分布による巨大共鳴の減衰過程を特徴付ける物理量の評価

大西直毅 (首都大): ゴルコフ・グリーン関数による密度行列 (21aSB-13)

● 日本物理学会第 69 回年次大会 (東海大学湘南キャンパス 2014.3.27-30)

町永大地, 鈴木徹 (首都大): 運動方程式の方法を用いたボース・フェルミ (BF) 混合系における対形成

大西直毅 (大西) : ゴルコフ・グリーン関数によるスキルム HFB 方程式の解法 (27pTB-6)

国内研究会

● 研究会「原子核媒質中のハドロン研究＝魅力と課題＝」2013年8月5-6日 (高エネルギー加速器研究機構 東海1号館)

慈道大介 : 核媒質中におけるカイラル対称性の部分的回復と中間子の性質 (口頭)

● 研究会「ab initio 核多体問題ワークショップ」2014年2月10-11日 (京都大学理学研究科物理学第二教室)

鈴木徹 : 多体系の自由度と集団変数 (口頭)

● ELPH 研究会「GeV 領域光子で探るメソン生成反応の物理」2014年2月20-21日 (東北大学農学部・農学研究科管理棟)

慈道大介 : 光生成反応によるハドロン分光 (口頭)

4) 学会誌等

慈道大介 : エキゾチックハドロンの一形態 反K中間子を含むハドロン複合状態, 物理科学雑誌「パリテイ」2014年1月号 (2014) 45-47

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、宇宙プラズマの基礎的物理過程の3つを大きなテーマとして、様々な天体や現象を対象に理論的研究を進めている。2013年度のグループ構成はスタッフ2名、大学院生2名。以下は、2013年度に行った主な研究の概要である。

1) 銀河団ガスにおける粒子加速

銀河団と小さな規模の銀河団(銀河群)の衝突-合体においては、比較的低温・低密度の銀河団周縁部で衝撃波によって粒子が加速され、高エネルギー電子のシンクロトロン放射が電波レリックとして観測されると考えられる。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衝撃波で粒子を高エネルギーまで加速するのは難しい。一方で、後者の場合、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 \sim 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。

2) 超新星残骸における粒子加速

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考えられ、粒子のエネルギースペクトルは、断熱的な強い衝撃波で期待されるベキが2に近い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 電子については普遍的に見えるが、 γ 線放射に関わるもっと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されている。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も含め、スペクトルを決める要因を探っている。

3) 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ており、近年、超新星爆発から数日内に可視域でブレイクアウトの痕跡が観測されるようになってきている。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衝撃波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。

4) 銀河団・銀河群プラズマの性質

銀河団・銀河群の高温プラズマは、大雑把には静水圧平衡状態にあると考えられている。しかし、近年、観測が可能になってきた外縁部ではこの仮定は成り立たない可能性がある。そこで、数値シミュレーションを用いて、静水圧平衡がどの程度よい仮定なのか調べた。その結果、外縁部では、プラズマの加速が無視できないことを見つけ、その結果、静水圧平衡を仮定して求めた重力質量に系統的誤差が生じるこ

とを確認した。また, Suzaku 衛星を用いて, フィラメントの交点に存在する銀河群の観測を行い, 高温プラズマ起源の X 線放射を検出した。

2. 研究業績

1) 論文

N. Ota, K. Onzuka, K. Masai: Density Profile of a Cool Core of Galaxy Clusters, *Publ. Astron. Soc. Japan* **65** (2013) 47

T. Shimizu, K. Masai, and K. Koyama: Non-Thermal Radio and Gamma-Ray Emission from a Supernova Remnant by the Blast Wave Breaking Out of the Circumstellar Matter, *Publ. Astron. Soc. Japan* **65** (2013) 69

D. Suto, H. Kawahara, T. Kitayama, S. Sasaki, Y. Suto, R. Cen: Validity of Hydrostatic Equilibrium in Galaxy Clusters from Cosmological Hydrodynamical Simulations, *ApJ* **767** (2013) 79

I. Mitsuishi, H. Kawahara and N. Sekiya, S. Sasaki, T. Sousbie, N. Y. Yamasaki: Exploring Hot Gas at Junctions of Galaxy Filaments with Suzaku, *ApJ* **783** (2014) 137

2) 学会講演

● 日本天文学会 2013 年秋季年会 2013 年 9 月 10–12 日 (東北大学)

清水崇文, 政井邦昭: Mixed-morphology 型及びシェル型の超新星残骸の X 線・ γ 線の観測的特徴

国内研究会

● HEAP2013 (高エネルギー宇宙物理学研究会) 2013 年 11 月 17–19 日 (宮城県松島町)

政井邦昭: Particle Acceleration and Heating in Cool-Core Clusters of Galaxies

国際会議

● CTA X-raying the Gamma-Ray Universe, Hakone, Japan, 4–6 November, 2013

T. Shimizu, K. Masai: X-ray and gamma-ray properties of mixed-morphology supernova remnants compared to shell-like ones

非線形物理研究室

1. 研究活動の概要

1) エネルギー領域における動的トンネル効果の解析

カオスとトーラスがひとつの位相空間に混在する、いわゆる混合系にはエネルギー領域の半古典理論が存在しないため、動的トンネル効果の研究には時間領域からのアプローチしかその解析の方法がなかった。ここでは、Baker-Campbell-Hausdorff 展開を用いて非可積分離散写像に対する連続可積分近似を行い、エネルギー領域の観点からの動的トンネル効果の発生機構の理解を試みた。その結果、連続可積分近似が上がるに従い、最低次半古典近似では記述不可能な状況が動的トンネル効果を支配していることが明らかになった。この事実は、時間領域の半古典論では捉えることのできない、非可積分トンネル効果の全く新しい側面として極めて重要な意味がある。

2) 階層的島構造をもつ混合系における記号力学と再帰時間分布

近可積分系に広く見られる遅い運動の起源を、位相空間に階層的島構造をもつ2次元区分線型写像を用いて探った。特に、個々の規則領域近傍での長時間滞在のみならず、それらが階層構造を成し自己相似状に配置されていることが運動をさらに遅いものとしていることがこれまで予想されてきたが、その妥当性を確認することがここでの一つの大きな目的である。位相空間に適切な分割を考え記号力学系を導入することにより島構造の系統的な分類を行い、再帰時間分布などに対する階層構造の寄与を詳しく調べた結果、この系では階層構造に由来する運動の律速は起こらないことが明らかになった。

3) 一次元三重井戸型ポテンシャル系のエネルギー分裂の半古典論

エネルギー分裂の半古典的な解析を行うに当たって、対応する古典運動方程式の複素領域における振る舞いを把握することは避けて通ることのできない作業行程である。ここでは、6次多項式をポテンシャルにもつ一次元三重井戸型ポテンシャル系の古典運動方程式を調べその解が楕円関数を用いて表されることを見出した。さらに、それを基に複素時間面上の特異点構造を明らかにした。その結果、Le Deunff - Mouchet らがエネルギー分裂の半古典解析を行うために発見的に仮定した複素古典経路のトポロジーに対して厳密な裏付けを得ることができた。

4) ガラス動力学の共変リアプノフベクトル解析

ガラスないし過冷却液体の動力学において、構造緩和に関わる遅い運動の起源を力学系理論の手法、とくにここでは、近年、その効率の良い計算法が提案され、さまざまな力学系に対し有効性の検証が行われている「共変リアプノフベクトル」を調べることによって、遅い運動における運動量成分の役割を探った。具体的な計算には、レナードジョーンズ・ガウスポテンシャルをもつ2次元系を用い、とくにその運動量成分の時間相関に注目した。遅い運動の起こらない液体状態と、平均二乗変位、ボンドの組み替え頻度などから同定される遅い運動が起こる状態との間に明確な差異があることがわかったが、共変リアプノフベクトルのみから抽出される特徴的なタイムスケールの同定までは至らなかった。

5) 全のアンホロノミー (新奇な量子ホロノミー)

定常状態に準備した量子系の断熱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 energy 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。全のアンホロノミーは、幾何学的位相がそうであるように、量子物理の基礎概念

として様々な場面に顔を出すことが期待される。新奇な量子ホロノミーの背後にある数理的な構造として、系を非エルミートに拡張した場合の例外点との対応が知られている。例外点は固有エネルギーの分岐点に対応し、その多価性の源である。これまで縮退次数 2 の最も単純な例外点を“囲む”エルミートあるいはユニタリーな作用素の族が存在し、この族が新奇な量子ホロノミーを誘発することが知られている。本年度は、高次の縮退点およびその分岐と新奇な量子ホロノミーの対応を論じた。(全卓樹教授(高知工科大) および Sang Wook Kim 教授 (Pusan Nat. Univ.) との共同研究)。また、4本の足が生えている節点を持つ量子グラフにおいて、断熱サイクル中で節点のパラメータを調節しグラフの切断と接着を繰り返すことで新奇な量子ホロノミーが起きることを示した。ここで鍵となる考えは、切断されたグラフでは Wigner と von Neumann の無交差定理が無効になり準位交差が実現することである(全卓樹教授および Ondřej Turek 博士(高知工科大) との共同研究)。

2. 研究業績

1) 論文

N. Mertig, A. Bäcker, S. Löck, R. Ketzmerick and A. Shudo: Complex paths for regular-to-chaotic tunneling rates, *Europhys. Lett.* **102** (2013) 10005 (5 pages)

T. Cheon, A. Tanaka and O. Turek: Examples of quantum holonomy with topology change, *Acta Polytechnica* **53** (2013) 410–415

A. Tanaka, N. Yonezawa and T. Cheon: Exotic quantum holonomy and non-Hermitian degeneracies in two-body Lieb-Liniger model, *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical* **46** (2013) 315302-1–315302-17

N. Yonezawa, A. Tanaka and T. Cheon: Quantum holonomy in Lieb-Liniger model, *Physical Review A* **87** (2013) 062113-1–062113-6

2) 学会講演

● 日本物理学会 2013 年秋季大会 2013 年 3 月 27 日–3 月 30 日 (徳島大学 常三島キャンパス)

赤石暁, 青木和輝, 首藤啓: 区分線形写像の階層構造と長時間相関

花田康高, 首藤啓, 池田研介: 近可積分領域における非インスタントンのトンネル効果

● 日本物理学会 第 69 回年次大会 2014 年 3 月 27 日–2014 年 3 月 30 日 (東海大学 湘南キャンパス)

池田研介, 奥島輝昭, 首藤啓, 花田康高: インスタントン–非インスタントン転移: くりこみ摂動論

原田浩充, 首藤啓, 齋藤暁: 一次元三重井戸型ポテンシャル系のエネルギー分裂の半古典論

花田康高, 首藤啓, 池田研介: 近可積分領域における非インスタントンのトンネル効果 2

吉田賢典, 花田康高, 首藤啓: 強いカオス系における波束の再帰現象について

前田郁実 赤石暁 首藤啓: ガラス動力学の共変 Lyapunov ベクトル解析

田中篤司, Sang Wook Kim, 全卓樹: 量子キックドトップにおける新奇な量子ホロノミーと高次の例外点

国際会議

● Exponential analysis of differential equations and related topics October 15-18, 2013 (RIMS, Kyoto)

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

● The Global Human Resource Program Bridging across Physics and Chemistry, January 31, 2014
(Tokyo Metropolitan University)

H. Harada and A. Shudo: Classical and quantum dynamics in the symmetric 6th order potential

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 年度は, これまで我々が提案してきた GPU 用のクラスタモンテカルロ法の方法を整理した論文を公表し [Comp. Phys. Commun. 185 (2014) 1038-1043], プログラムライブラリーとして公開した. Comp. Phys. Commun. Library で一般公開しているので, 広く世界中の研究者の利用に供している. 具体的に, 2次元, 3次元のイジングモデル, ポッツモデル, XY モデルの Swendsen-Wang タイプのクラスタモンテカルロアルゴリズムの CUDA プログラムを整理し, その原理を説明し, その性能評価を行った. この高速プログラムを用いて, 3次元 XY モデルの高精度の計算を実行し, 2次相転移温度の精度の高い決定を行った. [岡部]

2) Wang-Landau 法のパラメータを動的に自動調整する方法

クラスタアルゴリズムと相補的な関係にある拡張アンサンブル法の代表的な方法である Wang-Landau 法について, 連続自由度の場合にエネルギー状態密度を計算するエネルギー間隔を自動的に最適に調整する方法を提案した. また同時に, 繰り返し計算で収束させるために導入する修正因子も自動的に調整する. 2次元 XY モデルの場合に, 我々の提案する方法を適用し, 従来の Wang-Landau 法に比べて, 収束が速いことを示した. [岡部]

3) 1次元ボーズ・フェルミ混合系の位相スティフネス

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. とくに金属リングに磁場を印加して発生する永久電流と同様の現象が, 冷却原子系でも見られると期待されている. 冷却原子系の特徴は, フェルミ原子だけでなくボーズ原子あるいは両者の混合系も作成できる点である. そこでボーズ・フェルミ混合系が示す永久電流の性質を調べるため, 量子モンテカルロシミュレーションと繰り込み群計算を行った. 具体的には流れの強さを表す指標となる位相スティフネスの計算を行い, どちらのアプローチからも一致した結論が得られた. すなわち, ボーズ・フェルミ間相互作用を強めると位相スティフネスが上昇し, 弱めると (あるいは引力として強めると) 低下する様子が見られ, これについて定性的な議論も行った. [森]

4) 2成分フェルミ気体のダイポール振動

質量の異なる2種のフェルミ原子を調和型トラップポテンシャルに閉じ込め, 平衡位置からポテンシャルの位置をずらした後の動的振る舞いを半古典的取り扱いによりシミュレートした. トラップポテンシャルに加えて光学格子がある場合, ポテンシャル斜面の原子集団はプロッホ振動により斜面途中で減衰振動する. これは1成分フェルミ粒子系についてはすでに知られていたが, 2成分系の場合は未解決の問題であった. 2成分間の相互作用を変えながらシミュレーションを行ったところ, 引力相互作用が強い場合に各成分の位置が逆転する現象が見られ, 引き続き解析を進めている. [森]

5) マルチスピンフリップを用いたモンテカルロ法によるスピンアイスの研究

最近 Dy₂Ti₂O₇ や Ho₂Ti₂O₇ などの所謂スピンアイス系に見られる磁気モノポールの励起に注目が集まっており, その静的動的性質に関する研究が精力的に行われている. 同励起子間にはスピンアイスの基

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、さらにはスピン間の双極子相互作用に起因したクーロン相互作用が働く為、多くの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スピンアイスの性質を調べる事を目的として新たにマルチスピンフリップを用いるモンテカルロ法 (MC) を考案した。メトロポリス法によるシングルスピンフリップ MC では従来から低温において所謂スピンフリージングと呼ばれる困難があるため精度のよい計算が出来ないことが知られていたが、スピンアイスのクラスター表現に基づくマルチスピンフリップ (実際にはループまたはストリング状に束ねられたスピン集団のフリップ) を用いることで同困難を完全に克服した。さらにそれを用いて最近接相互作用をもつパイロクロアイジング模型をシミュレートし、励起子の持つ電荷の空間相関を計算した。その結果、相関関数は指数関数的減少を示し、その相関長は粒子数密度の $1/2$ 乗に逆比例しており、所謂デバイ-ヒュッケル理論により与えられる遮蔽効果が古典スピン系の中に確認された。 [大塚]

6) 二次元古典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所謂オルンシュタイン・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、実際には相関長は格子の持つ対称性や離散性に起因する異方性を持ち、実際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模型の相関関数は、振幅、相関長、および異方性パラメタ (b) の3つの量を用いて普遍的に表されるとされている。我々はこの理論予想を確かめる目的で正方格子に定義された状態数 $q = 1, 2, 3, 4$ の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数値的に精度良く求め、上記パラメタを決定した。その結果、相関関数の普遍表式はモデルに依らず数値データを精度よく再現していること、また異方性パラメタの評価値は厳密値のある $q = 2$ での値 $b = 1$ をとり、かつ状態数 q に対して一様変化する事を見出した。更に現在、他の格子上の模型についても調べている。 [大塚, 藤本雅文 (奈良医大)]

2. 研究業績

1) 論文

Y. W. Koh, H. K. Lee, and Y. Okabe: Dynamically optimized Wang-Landau sampling with adaptive trial moves and modification factors, Phys. Rev. E **88** (2013) 053302 (9pp).

S. Sashida, Y. Okabe, and H. K. Lee: Comparison of multi-label graph cuts method and Monte Carlo simulation with block-spin transformation for the piecewise constant Mumford-Shah segmentation model, Computer Vision and Image Understanding, **119** (2014) 15-26.

Y. Komura and Y. Okabe: CUDA programs for the GPU computing of the Swendsen-Wang multi-cluster spin flip algorithm: 2D and 3D Ising, Potts, and XY models, Comp. Phys. Commun., **185** (2014) 1038-1043.

A. Masaki and H. Mori: Visibility Pattern of Bose-Fermi Mixtures in One-Dimensional Incommensurate Lattices, Phil. Mag. Lett. **93**, (2013) 422-430 .

A. Masaki and H. Mori: Mott Transition of Bose-Fermi Mixtures in Optical Lattices Induced by Attractive Interactions, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, (2013) 074002 .

N. Miyamoto and H. Mori: Bose-Einstein Condensation in Layered Lattices under Magnetic Field, J. Phys. Soc. Jpn. 82, (2013) 105001 .

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

N. Nakabayashi and G. Tatara: Rashba-induced spin electromagnetic fields in a strong sd coupling regime, New J. Phys. 16 (2014) 015016.

Y. Sasaki and H. T. Ueda: Reflection and Refraction Process of Spinwave in a Ferromagnet/Frustrated Ferromagnet Junction System, J. Phys. Soc. Jpn. 82, (2013) 074604 .

H. Otsuka: Emergent Criticalities and Phase Transitions in Monomer-Dimer Mixture on a Honeycomb Lattice, J. Kor. Phys. Soc. **63** (2013) 493.

H. Takatsu, K. Goto, H. Otsuka, R. Higashinaka, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko, and H. Kadowaki, Two-Dimensional Monopole Dynamics in the Dipolar Spin Ice $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$, J. Phys. Soc. Jpn. **82** (2013) 073707.

H. Takatsu, K. Goto, H. Otsuka, R. Higashinaka, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko, and H. Kadowaki, Two-Dimensional Monopole Dynamics in the Dipolar Spin Ice $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$, J. Phys. Soc. Jpn. **82** (2013) 073707.

2) 学会講演

● 日本物理学会 2013 秋季大会 9 月 25 日 (水)~9 月 28 日 (土) (徳島大学)

菅聡明, 江川友規, 正木明子, 森弘之: ボーズ-フェルミ混合系の永久電流に対する相互作用効果

中林紀之, 多々良源: 強磁性金属中におけるラッシュバ場による有効磁場

佐々木優太, 多々良源: スピン流によるスピン波の制御

川口秀雄: スピン電磁場と電磁波の結合理論

芹沢佑輔: ラッシュバスピン軌道相互作用系の電磁場特性

後藤和基, 高津浩, 大塚博巳, 東中隆二, 門脇広明, J.W.Lynn, 佐藤卓, 松平和之, 広井善二, 松林和幸, 上床美也: $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ のカゴメアイス状態における磁気モノポールの二次元ダイナミクス

● 日本物理学会 第 69 回年次大会 2014 年 3 月 27 日~30 日 (東海大学湘南キャンパス)

小村幸浩, 岡部豊: 複数 GPU を用いた大規模 3 次元 Swendsen-Wang マルチクラスターアルゴリズムの開発

菅聡明, 木内啓介, 正木晶子, 森弘之: ボーズ・フェルミ混合系の永久電流に対する引力と斥力の相互作用効果

木内啓介, 菅聡明, 森弘之: 1 次元格子上的 2 成分フェルミオン原子集団のダイナミクス

大屋泰夫, 森弘之: 1 次元 2 成分ボーズ粒子系のモット状態における相関関数

川口秀雄, 多々良源: スピン電磁場と電磁波の結合理論 II

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: 数値的検証

千枝光司, 大塚博巳, 岡部豊: マルチスピントリップモンテカルロ法を用いたスピンアイスの数値的研究

国内研究会

● The Global Human Resource Program Bridging across Physics and Chemistry, Tokyo Metropolitan University, January 2014.

S. Suga, K. Kinai, and H. Mori: Interaction effect on persistent current of Bose-Fermi mixture

Y. Oya and H. Mori: Correlation function in Mott state of one-dimensional two-component Boson systems

K. Kinai, S. Suga, and H. Mori: Dynamics of atomic two-component fermions in one-dimensional optical lattice

国際会議

● West-Lake International Workshop on Statistical Physics and Complex Systems, Hangzhou, China, November 8-10, 2013

Y. Okabe and Y. Komura: GPU-based computation with cluster flip algorithm for the simulation of classical spin systems (invited talk)

● Strongly Correlated Electron Systems, University of Tokyo, August 2013.

S. Suga, T. Egawa, A. Masaki, and H. Mori: Bose-Fermi Mixture on Ring Threaded by Magnetic Flux

● The 25th International Conference on Statistical Physics, Seoul, Korea, July 22 – 26, 2013

Masafumi Fujimoto and Hiromi Otsuka: Anisotropic Correlation Lengths in Two-Dimensional Ising Models

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強相関電子系の磁性および超伝導の理論研究を行っている。2013年度の研究室構成は、スタッフ1名、大学院生5名であった。以下は、2013年度に行った主な研究活動の概要である。

1) フェルミ面のトポロジーとヤーンテラーフォノンによる超伝導

1986年にベドノルツとミュラーがペロブスカイト型銅酸化物 $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ の超伝導を発見し、その後、高温超伝導体の研究が爆発的に進んだ。高温超伝導体の超伝導機構について様々な見方はあるが、基本的には強い電子相関の効果が重要である、という理解がなされている。しかし、もともとベドノルツとミュラーは、電子相関ではなくヤーンテラー格子変形と超伝導の関係に興味をもってペロブスカイト型銅酸化物の研究を始めたと言われている。その後の高温超伝導研究の展開を見ると、ベドノルツとミュラーの思惑どおりに事は進まなかったように見受けられるが、ヤーンテラー格子変形と超伝導の関わりが薄いというわけではない。超伝導の基本であるBCS理論では、格子振動（フォノン）に媒介された電子間引力相互作用によるクーパー対形成を考えていたが、ヤーンテラー格子変形もフォノンであり、当然、超伝導を引き起こすと考えられる。電荷密度と結合する通常のフォノンと比べて、ヤーンテラーフォノンが異なる可能性があるのは、それが軌道密度と結合することである。すなわち、軌道揺らぎと結合したヤーンテラーフォノンが特異な超伝導をもたらす可能性が考えられるのである。

本研究では、ミグダル・エリアシュベルグ理論の枠組みを用いて、ヤーンテラーフォノンと結合する2次元 e_g 電子系における超伝導の出現を議論した。ここでは特に、 e_g 電子のSlater-Koster積分によるフェルミ面構造の変化が超伝導転移温度 T_c に与える影響を調べた。一般に、フェルミ面構造が不連続に変化する場合、電子状態密度に van Hove 特異性が表れるので、 T_c の上昇が期待できるが、ヤーンテラーフォノンによる超伝導の場合には、van Hove 特異性のある場合から離れていても、繋がっていないフェルミ面構造が現れる場合には T_c が上昇することが期待される。それがたとえ小さなポケット状フェルミ面であっても、一枚のフェルミ面のときと比較して相対的に高い T_c が得られるのである。これは、ヤーンテラーフォノンによる引力は、クーパー対形成だけでなく、クーパー対のホッピングに寄与することで T_c を上昇させることを意味する。つまり、異なるフェルミ面上のクーパー対の間のペアホッピング引力相互作用がヤーンテラーフォノンによって増強されるために、複数のフェルミ面があるときに相対的に T_c が上昇することになる。これは、高い T_c を得るための一つの指針になるシナリオであり、今後も引き続き研究を続けていく必要がある。

2) スピン・バイプロニック状態に起因する近藤効果

強相関電子論研究室では、近年、カゴ状物質において内包イオンの局所振動が関与した磁性や超伝導の問題に興味をもって研究を行っている。これに関連して、平成25年度は、局所ヤーンテラー振動と動的に結合する伝導電子系の近藤効果について調べた。ヤーンテラー格子変形は、軌道縮退電子系に対して、いわゆる「メキシカンハット」型の断熱ポテンシャルを与えるが、非断熱効果を考えると、ヤーンテラー中心のまわりを時計回りにまわるか、反時計回りにまわるかという回転の自由度が残り、これが軌道自由度と結合すると、二重に縮退した振電状態、すなわちバイプロニック状態が現れることが知られている。このバイプロニック状態の二重縮退が擬スピンの役割を果たし、伝導電子の軌道モーメントによって遮蔽され、近藤効果が起こることは以前に明らかにしたとおりである。しかし、この近藤効果はまず、スピンレスの場合に考えられた。このようなスピンレス状態は、強磁場を考えれば実際に起こり

える状況であり、そのような場合でも、バイブロニック自由度による近藤効果の出現を示したことは意義が大きい。実際の電子にはスピン自由度がある。バイブロニック自由度の擬スピン自由度に、さらに電子の実際のスピン自由度も絡んだ場合に、近藤効果はどのようになるか、非常に興味深い問題である。

そこで、2軌道不純物アンダーソンモデルを考え、不純物サイトにおけるクーロン相互作用と電子とヤーンテラーフォノンの結合を考慮した。なお、不純物サイトの平均電子数は1個のクォーターフィリングの場合を考える。まず最初に、局所電子・フォノン問題を解析し、スピンおよびバイブロニック状態の直積で特徴づけられる4重縮退したスピン・バイブロニック状態を確認した。次に、伝導電子と局在電子の混成項を取り入れ、数値繰り込み群法によってそのモデルを詳細に解析した。エントロピー、比熱、各種感受率（電荷、スピン、軌道）を計算した結果、スピンと全角運動量が同時に伝導電子によって遮蔽され、局所スピン・バイブロニック状態の $\ln 4$ のエントロピーが放出されることによって近藤効果が起こることを見出した。このスピン・バイブロニック近藤効果における重い電子形成の可能性についても議論を行った。

3) 二酸化アクチノイドの電子バンド構造

周期表の中で、原子番号89番のアクチニウムから103番のローレンシウムまではアクチノイドと総称されているが、多くのアクチノイド元素は天然では存在せず、人工的にしか合成されない。従って、超ウラン化合物については従来そのほとんどが、原子力技術開発に関連した応用技術研究（MOX燃料開発、アクチノイド抽出分離、マイナーアクチノイド処分・処理技術等）の一部として行われてきた。しかし、アクチノイドの5f電子は、遍歴性の強い3d電子と局在性の強い4f電子の間に位置し、両者のギャップを埋め、不完全殻電子系の物性に対する統一的理解のために重要な位置を占めており、近年、超ウラン化合物を物性科学研究の俎上に載せようという努力がなされている。

その研究には二つの大きな流れがあり、一つは、希土類やウラン化合物研究で培われた純良単結晶育成技術の粋を結集した新規超ウラン物質の開発である。もう一つの研究の流れは、古くから知られていた物質を現代的な実験・理論手法によって見直そうというものである。その典型例として、二酸化アクチノイド AnO_2 の研究がある。ThからCmまでのすべてのアクチノイド元素は蛍石構造をもつ二酸化物を形成するが、 ThO_2 はアクチノイドに起因する6d-7sの空バンドと酸素の2pに起因する価電子バンドとの間に、約5eVのギャップを持つ絶縁体である。 UO_2 、 NpO_2 、 PuO_2 は、5fレベルがこのギャップ内に位置して半導体となっている。このうち、 UO_2 は反強磁性秩序を示すことが知られている。 NpO_2 については、1953年に比熱の測定が、1967年に磁化率の測定が行われている。そして、25K付近に相転移があることは判明したが、中性子回折で何も見えないことから、少なくとも通常の磁気相ではないことがわかり、その起源は永らく謎のままであった。今世紀になってから、磁気八極子の反強磁性秩序と考えると辻褃が合うという現象論的提案がなされ、欧州、米国、日本において、共鳴X線散乱やNMRなどによる検証実験が進んだ。そして、 $j-j$ 結合描像に基づく有効モデルの解析により、磁気八極子秩序構造が微視的にも理解されるに至っている。最近では、 AmO_2 も多極子秩序を示す可能性があることや、 CmO_2 の奇妙な磁気励起についても研究が進んでいる。しかし、重要な問題が残されている。現実の物質と有効モデルを繋ぐには、第一原理計算による裏づけが必要となるが、 AnO_2 の正確な電子構造は未だに明らかにされていないところが多い。 AnO_2 のような基本的なアクチノイド物質の基礎物性を理解する上で、その電子バンド構造を明らかにすることは、アクチノイド物性研究にとって極めて重要であると考えられる。

本研究では、強束縛近似を用いて二酸化アクチノイドの電子状態の解析を行った。局所項にはスピン軌道相互作用と結晶場ポテンシャルを考慮し、遍歴項としては5f電子の跳び移り、5f電子と酸素の2p電子の混成、2p電子の跳び移りを考慮した。これらによってハミルトニアンを構成し、それを対角化す

ることでバンド構造を決定した。得られたバンド構造と相対論的バンド計算の結果を比較することにより、跳び移り積分のパラメータの値、特に f - p 混成の大きさを決めた。なお、相対論的バンド計算については、局所密度近似に基づく相対論的線形増強平面波法を用いて、二酸化アクチノイド AnO_2 ($\text{An}=\text{Th}, \text{U}, \text{Np}, \text{Pu}$) のエネルギーバンド構造を調べた。その結果、 $5f$ 電子の Γ_7 および Γ_8 状態のエネルギー位置が f - p 混成に依存するすることが明らかになった。以前の研究で、 NpO_2 の八極子秩序が出現するためには、 f - p 混成に対する Slater-Koster 積分の値に、ある特別な条件が必要であることがわかっていたが、なぜそれが必要になるのか、物理的な理由はわかっていなかった。しかし、今回の研究で、 f - p 混成の値が NpO_2 の八極子秩序が出現する条件と合致するときに、局所的な結晶場電子状態との矛盾のない電子バンド構造が得られることが明らかになった。これによって、 AnO_2 の電子バンド構造に関する理解を深めることができた。

2. 研究業績

1) 論文

Yu Hasegawa, Takahiro Maehira, and Takashi Hotta: Key role of hybridization between actinide $5f$ and oxygen $2p$ orbitals for electronic structure of actinide dioxides, *J. Mod. Phys.* **4**, 1574-1582 (2013).

Takahiro Fuse and Takashi Hotta: Kondo effect emerging from a spin-vibronic state, *J. Phys.: Conf. Ser.* **428**, 012013 (2013).

Yuji Shiba and Takashi Hotta: Fermi-Surface Topology and Superconductivity Induced by Jahn-Teller Phonons, *J. Phys.: Conf. Ser.* **428**, 012038 (2013).

Takahiro Fuse and Takashi Hotta : Electric Dipolar Susceptibility of the Anderson-Holstein Model *J. Korean Phys. Soc.* **62**, 1874 (2013).

2) 学会講演

● 日本物理学会第 69 回年次大会 2014 年 3 月 30 日 (東海大学湘南キャンパス)

堀田貴嗣：非調和ヤーンテラー振動と近藤効果

国内研究会

● 首都大学東京・平成 25 年度第 2 回研究者交流サロン 2013 年 7 月 19 日 (首都大学東京南大沢キャンパス)

堀田貴嗣：「ガラガラ」がもたらす“高温”超伝導

国際会議

● International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2013), Tokyo, Japan, August 7, 2013

Takahiro Fuse and Takashi Hotta, Effect of phonon-mediated attraction on the Kondo phenomenon emerging from a vibrating magnetic ion

高エネルギー実験研究室

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

2011 年度から始まった super-KEKB の建設は 2015 年の運転開始に向けて順調に進んでおり、Belle 検出器の upgrade 版である Belle II 検出器の建設も 2016 年度中のデータ収集開始にむけて順調に進んでいる。

当研究室では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。A-RICH で使用する新型の高性能光センサーである HAPD (ハイブリッド・アヴァランシェフォト・ダイオード) を浜松ホトニクス社と共同開発しているが、2013 年度から量産品の納品が始まり、その受け入れ検査を行っている。HAPD へ高電圧を供給する高電圧電源の性能評価、信号読みだし用 ASIC の評価ボードの製作、A-RICH 用モニターシステムのための基礎試験など、A-RICH 建設に向けて大きな進展があった。5 月には博士課程の岩田が参加して、DESY でプロトタイプ A-RICH のビームテストを行った。

一方、首都大学東京は 2013 年度から DAQ グループに参加し、データ収集フレームワーク開発の一環として、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開発を担当している。2013 年度において、一通りのフレームワークが完成し、10 月初めに兵庫県・Spring-8 放射光施設での Belle II CDC 検出器ビームテスト及び 12 月末から 2 月初めにかけてドイツ・DESY 研究所で行われた Belle II PXD/SVD 検出器ビームテストで運用された。学振研究員の今野が、これらのテストに参加し、本測定開始に向けて十分な性能・安定性があることを確認した。

今年度は Belle 実験関係で 28 編の欧文雑誌への投稿論文が出版された。

2) Double Chooz 実験

本研究室では国際共同実験 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を用いた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解明された。有限値を持つことが明らかになった今、レプトンセクターの CP 対称性が破れているかどうかを決める上で、 θ_{13} 測定の精密化の意義は高まっている。

現在はこれまで測定を行ってきた後置検出器に加えて、前置検出器と呼ばれる新たな検出器を建設中である。これにより、これまでの約 3 倍の感度までの精密測定が可能になると期待される。本研究室では特に、ニュートリノ反応の検出に重要となる光電子増倍管と高電圧電源などのシステムを担当しており、グループへの貢献度は高い。学振研究員の前田、松原、博士課程の下島、修士課程の末吉、清水が、2013 年度に実験サイトのフランス・Chooz 原子力発電所を訪れ、光電子増倍管と高電圧システムのインストレーションを行った。

一方、後置検出器を用いた最終結果についても、現在とりまとめを行っている。2013 年度は、これまでの測定データを用いて新たな θ_{13} 解析手法を試みるなど、2 編の欧文雑誌と日本物理学会誌への投稿を行った。

3) DCBA 実験

ニュートリノ振動実験によりニュートリノに質量があることが判明した現在、ニュートリノが Majorana 粒子である可能性が益々大きくなっている。もし、ニュートリノが Majorana 粒子であるなら、ニュートリノを放出しない二重 β 崩壊事象 ($0\nu\beta\beta$) が観測されるはずである。この $0\nu\beta\beta$ 事象を、ドリフトチェンバー (DC) を利用して観測することを目指し、KEK 富士実験室において DCBA 実験を行なっている。

超伝導電磁石と DC を組み合わせたスペクトロメーターの中心に、二重ベータ崩壊を起こす ^{100}Mo を 9.6% 含んだ Mo 板を設置し、二重ベータ崩壊事象を捕える実験 (DCBA-T2.5 実験) が行われており、2013 年度末現在も順調にデータ取得を行なっている。DC の大型化および高精度化を並行して進めており、今年度は次世代実験装置である DCBA-T3 のドリフトチェンバーおよび読み出しシステムの開発を進め、さらに将来計画である MTD 実験に向けた大型 DC の設計も開始した。

4) T2K 実験

茨城県東海村の J-PARC 加速器で大強度のミューオン型ニュートリノビームを生成して打ち出し、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において打ち出されたニュートリノを観測する実験を行なっている。本実験は、約 1GeV のエネルギーを持つミューオン型ニュートリノが 295km の飛行後に電子型ニュートリノへの変化する事象を観測することを目指し、2010 年にデータ取得を開始した。

今年度は、2013 年 4 月までに得られたデータを用いて、上記の電子型ニュートリノ出現現象が確実に起こっていることを示した。今後は、ニュートリノ振動パラメータの精度向上と、レプトンに対する CP 対称性の破れの発見を目指して実験を進めていく。

5) 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

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。電子ビーム照射による岩塩あるいは氷充填同軸管による電波反射実験装置に於いて熱伝搬と電波反射の連成解析法を用いた有限要素法によるシミュレーションを行った。1 分間の電子ビーム照射に対して照射開始から 2 分間のシミュレーションの結果、温度分布と電波反射率の時間経過は絶対値で最大 50% の不一致はあるが実験結果を再現し、電波反射機構が媒質中の温度上昇に伴う誘電率の上昇であることが確認できた。超高エネルギーニュートリノの新しい測定法を検討した。放射線の痕跡検出器として電子ビーム照射された岩塩の ESR 信号を検出し、その可能性を指摘した

6) 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予備的測定を京都大学原子炉実験所の中性子ビームを利用して行った。

7) 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 α^8 の高次 QED 過程であるポジトロニウムの 5 光子稀崩壊現象の解析を行った。2008 年から取得している 1.27×10^{11} 陽電子入射に対応するデータを解析したところ、 24 ± 5 イベントの 5 光子崩壊事象候補が見つかった。

しかし、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、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、検出された 5 光子崩壊事象候補は 3 光子崩壊事象として理解できることが判明した。今後、検出効率と S/N 比を高めるため、検出器の構造、5 光子崩壊事象の選択条件、陽電子線源の強化のスタディを行っている。

2. 研究業績

1) 論文

Aerogel RICH for forward PID at Belle II

R. Pestotnik, S. Iwata, H. Kakuno, T. Kumita, T. Sumiyoshi, et al., Nucl.Instrum.Meth. A732 (2013) 371-374

Novel glass ceramic-type micropattern gas detector with PEG3C

F. Tokanai, T. Sumiyoshi, et al., Nucl.Instrum.Meth. A732 (2013) 273-276

A concise quantum efficiency measurement system for gaseous photomultipliers

T. Moriya, T. Sumiyoshi et al., Nucl.Instrum.Meth. A732 (2013) 269-272

Observation of $D^0 - \bar{D}^0$ Mixing in e^+e^- Collisions

B.R.Ko, E.Won, et al., Belle Collaboration, Phys.Rev.Lett 112, 111801 (2014)

Search for $B^0 \rightarrow p\Lambda\pi^-\gamma$ at Belle

Y.-T. Lai, M.-Z. Wang, et al., Belle Collaboration, Phys.Rev.D 89, 051103(R) (2014)

Search for the process $e^+e^- \rightarrow J/\psi + X(1835)$ at $\sqrt{s} \sim 10.6\text{GeV}$

X.H. He, S. Iwata, H. Kakuno, T. Kumita, T. Sumiyoshi et al. Belle Collaboration, Phys.Rev. D89 (2014) 032003

Measurement of the τ^- lepton lifetime at Belle

K. Belous, S. Iwata, H. Kakuno, T. Kumita, T. Sumiyoshi et al., Belle Collaboration, Phys.Rev.Lett. 112 (2014) 031801

Evidence for the suppressed decay $B^- \rightarrow DK^-$, $D \rightarrow K^+\pi^-\pi^0$

M. Nayak, J. Libby, K. Trabelsi, et al., Belle Collaboration, Phys.Rev.D 88, 091104(R) (2013)

Measurement of the decays $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi(1020)$, $B_s^0 \rightarrow J/\psi f_2'(1525)$ and $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+K^-$ at Belle

F. Thorne, C. Schwandar, et al., Belle Collaboration, Phys.Rev.D 88, 114006 (2013)

Measurement of $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$, $K^*(892)\bar{K}$ and $K_2^*(1430)\bar{K}$ at \sqrt{s} near 10.6 GeV

C.P. Shen, et al. Belle Collaboration, Phys.Rev. D88 (2013) 052019

First observation of the $Z_b^0(10610)$ in a Dalitz analysis of $\Upsilon(5S) \rightarrow \Upsilon(nS)\pi^0\pi^0$

P. Krokovny, A. Bondar, et al., Belle Collaboration, Phys.Rev. D88, 052016 (2013)

- Angular analysis of $B^0 \rightarrow \phi K^*$ decays and search for CP violation at Belle
M. Prim, et al., Belle Collaboration, Phys.Rev. D88 (2013) 072004
- High-statistics study of K_S^0 pair production in two-photon collisions
S. Uehara et al., Belle Collaboration, PTEP 2013 (2013) 123C01
- Measurement of the CP violation parameters in $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ decays
J. Dalseno, K. Prothmann, C. Kiesling, et al., Belle Collaboration, Phys.Rev. D88, 092003 (2013)
- Measurements of branching fractions of leptonic and hadronic D_s^+ meson decays and extraction of the D_s^+ meson decay constant
A. Zupanc et al., Belle Collaboration, JHEP 1309 (2013) 139
- Measurement of the Wrong-Sign Decay $D^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$
E. White et al., Belle Collaboration, Phys.Rev. D88 (2013) 051101
- Search for Bottomonium States in Exclusive Radiative $\Upsilon(2S)$ Decays
S. Sandilya et al., Belle Collaboration, Phys.Rev.Lett. 111 (2013) 112001
- First Observation of Cabibbo-Suppressed Ξ_c^0 Decays
R. Chistov et al., Belle Collaboration, Phys.Rev. D88 (2013) 071103
- Experimental constraints on the spin and parity of the $Z(4430)^+$
K. Chilikin et al., Belle Collaboration, Phys.Rev. D88 (2013) 074026
- Evidence for Semileptonic $B^- \rightarrow p \bar{p} \ell^- \bar{\nu}_\ell$ Decays
K.-J.Tien, M.Z.Wang et al., the Belle Collaboration, Phys.Rev. D89 (2014) 011101
- Study of Exclusive $B \rightarrow X_u \ell \nu$ Decays and Extraction of $|V_{ub}|$ using Full Reconstruction Tagging at the Belle Experiment
A. Sibidanov et al., Belle Collaboration, Phys.Rev. D88 (2013) 032005
- Measurement of exclusive $\Upsilon(1S)$ and $\Upsilon(2S)$ decays into Vector-Pseudoscalar final states
C.P. Shen et al., Belle Collaboration, Phys.Rev. D88 (2013) 1, 011102
- Evidence for $\bar{B}_s^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{\Lambda} \pi^-$
E. Solovieva, R. Chistov, et al., Belle Collaboration, Phys.Lett. B 726, 206-210, (2013)
- Evidence for the decay $B^0 \rightarrow K^+ K^- \pi^0$
V. Gaur et al., Belle Collaboration, Phys.Rev. D87 (2013) 9, 091101
- Evidence of a new narrow resonance decaying to $\chi_{c1} \gamma$ in $B \rightarrow \chi_{c1} \gamma K$
V. Bhardwaj et al., Belle Collaboration, Phys.Rev.Lett. 111 (2013) 3, 032001
- Study of $e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi$ and Observation of a Charged Charmoniumlike State at Belle
Z. Q. Liu, C. P. Shen, C. Z.Yuan, et al., Belle collaboration, Phys.Rev.Lett. 110, 252002 (2013)
- Search for $B \rightarrow h^{(*)} \nu \bar{\nu}$ with the full Belle $\Upsilon(4S)$ data sample
O. Lutz, S. Neubauer, M. Heck, T. Kuhr, et al., Belle collaboration, Phys.Rev. D87, 111103(R) (2013)

Search for an H-Dibaryon with a Mass near $2m_\Lambda$ in $\Upsilon(1S)$ and $\Upsilon(2S)$ Decays

B.H.Kim, S.L.Olsen, et al., Belle collaboration, Phys.Rev.Lett. 110, 222002 (2013)

Precision Measurement of Charged Pion and Kaon Differential Cross Sections in e^+e^- Annihilation at $\sqrt{s} = 10.52\text{GeV}$

M.Leitgab, R. Seidl, M. Grosse Perdekamp, A. Vossen, et al., Belle collaboration, Phys.Rev.Lett. 111, 062002 (2013)

Search for heavy neutrinos at Belle

D.Liventsev, et al., Belle collaboration, Phys.Rev. D87, 071102(R) (2013)

Measurement of the inclusive semileptonic branching fraction $B(B_s^0 \rightarrow X^- \ell^+ \nu_\ell)$ at Belle

C. Oswald, P. Urquijo, J. Dingfelder, et al., Belle collaboration, Phys.Rev. D87, 072008 (2013)

Effective Δm_{31}^2 from Baseline Dependence of Reactor ν_e Disappearance

T. J. C. Bezerra et al., Phys. Lett. B 725 (2013) 271-276.

Evidence of electron neutrino appearance in a muon neutrino beam

T2K Collab. (K. Abe *et al.*). Aug 2013.

Phys. Rev. **D88**, 032002

Measurement of Neutrino Oscillation Parameters from Muon Neutrino Disappearance with an Off-axis Beam

T2K Collab. (K. Abe *et al.*). Nov 2013.

Phys. Rev. Lett. **111**, 211803

Observation of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino beam

T2K Collab. (K. Abe *et al.*). Feb 2014.

Phys. Rev. Lett. **112**, 061802

Performance of a remotely located muon radiography system to identify the inner structure of a nuclear plant

H. Fujii, K. Hara, S. Hashimoto, F. Ito, H. Kakuno, S. H. Kim, M. Kochiyama, K. Nagamine, A. Suzuki, Y. Takada, Y. Takahashi, F. Takasaki, and S. Yamashita. July 2013.

Prog. Theor. Exp. Phys. **2013**, 073C01

2) 国際会議報告

Measurement of a phase of a radio wave reflected from rock salt and ice irradiated by an electron beam for detection of ultra-high-energy neutrinos

M.Chiba, T.Kamijo, T.Tanikawa, H.Yano, F.Yabuki, O.Yasuda, et al., AIP Conf. Proc. 1535, pp. 45-50

Elastic Z^0 production at HERA

J.Maeda, POS(EPS-HEP 2013) 235, Proceedings of Science

3) 学会講演

● 日本物理学会 2013 年秋季大会 2013 年 9 月 20 日～23 日 (高知大学朝倉キャンパス)

浜田尚 (東邦大), 住吉孝行, 角野秀一, 汲田哲郎, 岩田修一, 吉田圭佑ほか: Belle II 実験 A-RICH 用光検出器 HAPD の放射線耐性試験

岩田修一, 住吉孝行, 角野秀一, 汲田哲郎, 吉田圭佑ほか: Belle II 実験用粒子識別装置 A-RICH の電子ビームによるプロトタイプ性能評価

前田順平ほか, Double Chooz 日本グループ: Double Chooz 実験の解析の現状と前置検出器建設状況

山見仁美, 汲田哲郎, 千葉雅美, 浜津良輔: ポジトロニウムの 5 光子消滅反応の測定結果と QED 計算との比較

千葉雅美, 矢野浩之, 上條敏生, 安田修, 矢吹文昭ほか: 岩塩または氷を利用した超高エネルギーニュートリノ検出器のための電子ビームの照射による電波反射測定

矢野浩之, 千葉雅美, 上條敏生, 安田修, 矢吹文昭ほか: 岩塩または氷を利用した超高エネルギーニュートリノ検出器のための電子ビームの照射による電波反射のシミュレーション

伊藤史哲 (筑波大), 角野秀一ほか: 宇宙線ミュオン・ラジオグラフィ・システムの増強と, それを用いた原子炉内構造測定

石原信弘 (KEK), 住吉孝行, 角野秀一, 田島俊英, 伊東孝行ほか: 二重ベータ崩壊実験 MTD 用大型ドリフトチェンバーの開発

岩瀬広 (KEK), 住吉孝行, 角野秀一, 田島俊英, 伊東孝行ほか: DCBA による二重ベータ崩壊実験 XIV

● 日本物理学会 第 69 回年次大会 2014 年 3 月 27 日～30 日 (東海大学湘南キャンパス)

岩瀬広 (KEK), 住吉孝行, 角野秀一, 田島俊英, 伊東孝行ほか: DCBA による二重ベータ崩壊実験 XVI

伊東孝行, 住吉孝行, 角野秀一, 田島俊英ほか: 二重ベータ崩壊実験 MTD 用大型ドリフトチェンバーの開発 II

千葉雅美, 矢野浩之, 上條敏生, 安田修, 矢吹文昭ほか: 岩塩と氷を検出媒質した超高エネルギーニュートリノ検出器のための電子ビームの照射の電波反射のシミュレーション

小串勇太 (成蹊大), 上條敏生, 千葉雅美, 矢野浩之, 安田修, 矢吹文昭ほか: 南極氷床における超高エネルギーニュートリノ検出の為の氷電波減衰長の測定

西田昌平 (KEK), 岩田修一, 住吉孝行, 角野秀一, 吉田圭佑ほか: Belle II Aerogel RICH 用の光検出器 HAPD の量産とその性能評価

吉田圭佑, 岩田修一, 住吉孝行, 角野秀一, 汲田哲郎ほか: Belle II 実験 Aerogel RICH 用読み出し ASIC の量産とその性能評価

岩田修一, 住吉孝行, 角野秀一, 汲田哲郎, 吉田圭佑ほか: Belle II 実験用粒子識別装置 A-RICH における解析手法の確立と識別能力の評価

汲田哲郎, 山見仁美, 千葉雅美, 浜津良輔, 内藤駿介, 栗原良将 (KEK): ポジトロニウム 5 光子崩壊事象の観測とバックグラウンドの評価

角野秀一: DCBA 実験の現状と MTD 実験計画

今野智之: Measurement of reactor anti-neutrino disappearance using the Double Chooz detector (若手奨励賞受賞記念講演)

松原綱之ほか, Double Chooz 日本グループ: Double Chooz 実験におけるガドリニウムの中性子捕獲事象を用いた θ_{13} 測定

国際会議

● EPS 2013: Europhysics conference on High Energy Physics, Jul.17-24, 2013, Stockholm, Sweden.

J. Maeda: Production of Z^0 bosons in elastic and quasi-elastic ep collisions at HERA

● 13th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics, Asilomar, California, USA, 28-13 September, 2013

H. Kakuno: Status of the DCBA/MTD experiment

● NNN 2013: International Workshop on Next generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors, Nov.11-13, 2013, Kavli IPMU, Japan.

J. Maeda: Review on the θ_{13} measurement in reactor neutrino experiments

● 8th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors, Hayama, Kanagawa, Japan, 2-6 December, 2013

H. Kakuno, S. Iwata, T. Sumiyoshi, K. Yoshida *et al.*: Readout ASIC and Electronics for the 144ch HAPD for Aerogel RICH at Belle II (Poster)

● LLWI 2014: Lake Louise Winter Institute, Feb.16-22, 2014, Lake Louise, Canada.

T. Matsubara: Recent results from Double Chooz

● The 7th International Workshop on Very High Energy Particle Astronomy- Next Generation Explorer for Cosmic Ray Origin -VHEPA2014 - March 20, 2014, Tokyo, Japan

M. Chiba: Radar Chamber for Detection of UHE Neutrinos

4) 学会誌等

川崎健夫, 石塚正基, 古田久敬, 松原綱之「原子炉によるニュートリノ混合角 θ_{13} の測定」日本物理学会誌, Vol. 68 (2013) 450-457.

原子物理実験研究室

1. 研究活動の概要

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

1) 静電型イオン蓄積リングを用いた原子分子の衝突・冷却過程の研究

静電型イオン蓄積リングは, 周回イオンの軌道制御を静電場のみで行うイオン蓄積リングである。従来の磁場制御の場合に存在していた周回イオン種の質量に関する制約を原理的に排除し, 生体分子を含む巨大分子やクラスターイオンを長時間蓄積できるのが最大の特徴である。本学設置の静電型イオン蓄積リング TMU E-ring では, 昨年度に引き続き, 主に分子物質化学専攻・城丸グループとの共同研究のもと, クラスターイオンや孤立巨大分子イオンの分光実験および寿命測定を行った。

(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:

星間空間において観測されている負分子イオンに関して, その電子脱離や放射性脱励起などの冷却過程探求のため, これまで直鎖状炭化水素負イオンを蓄積し電子脱離による寿命を測定してきた。イオン源で生成されたこれらの負イオンは, 小型分子イオンであるものの高温で振動励起状態にある。これら分子負イオンは, 自身の内部に一旦蓄えられた振動内部エネルギーを用いてミリ秒程度の長い時定数で電子脱離 (遅延電子脱離) を起こすことが知られており, その遅延電子脱離は熱統計則に従って一般に分子イオンが高温では速く, 低温になるにつれ遅くなると考えられる。つまり, 分子の電子脱離により生成される中性粒子数の時間変化はその分子の冷却過程を強く反映する。これまでに, 直鎖状炭素クラスター負イオン C_6^- および水素付加イオン C_6H^- についてレーザー照射によって加熱した後の電子脱離速度を観測することでその冷却過程を調べ, C_6^- では熱化分子の振動エネルギーが分子内電子の励起エネルギーへと逆内部転換されることによって分子の電子励起状態に対する存在確率が生じ, 励起分子の電子遷移により通常の 10 倍ほど速い冷却が起こる『再発蛍光過程』が起こることが分かった。この『再発蛍光過程』は低エネルギーの励起状態を持つ分子一般に起こりうる過程であり, 既存の分子冷却過程研究のみならず, 星間分子の生成メカニズム研究などにも新たな展開をもたらすものと期待される。本年度は, 同じく炭素クラスター負イオン C_4^- の冷却過程を調べ, C_6^- と同様に『再発蛍光過程』とみられる速い冷却過程の存在が示唆される結果を得た。今後は電子脱離の加熱レーザー波長依存など, 詳細な測定を行っていく。さらに, C_6^- の再発蛍光過程により放出される蛍光の直接観測を行うべく, 高感度な蛍光分光検出システムの開発に着手した。

また, 炭素クラスター以外にも金属クラスター負イオン Al_2^- の生成および冷却過程観測を行い, 遅延電子脱離過程の観測に成功した。Ca⁺ イオンの生成, 蓄積にも成功し, こちらは今後レーザー光を用いたイオンの運動制御法開発に用いる予定である。

(2) 極低温イオントラップを備えた大型分子イオン入射システムの開発:

大型分子イオン生成のためのエレクトロスプレーイオン (ESI) 源および, イオン数の増加と分子の回転・振動冷却を目的としたイオントラップ部を開発している。今年度も昨年度に引き続き入射イオン量向上のため, ESI からトラップを通してリングへと導入するイオン輸送効率を向上すべく, イオン輸送電場など各パラメータの調整を行った。その結果, i) イオントラップにおいて実際にイオンを閉じ込めるための電場が不均一であるためトラップされたイオンの一部がトラップ外へと抜け出ていたこと, ii) トラップされたイオンを冷却後に引き出すために必要な時間が長く, その後の蓄積リング入射に必要な

加速が効率的に行えていなかったこと、が判明した。この問題を解決すべく、電場の均一化など装置の改良を行った。

2) 多価イオンの電荷移行反応

1996年の百武彗星からの軟X線放射がROSAT衛星によって観測されて以来、太陽風にわずかに含まれる重元素多価イオンが宇宙空間の希薄な中性物質と衝突する際に軟X線を放出する過程が宇宙物理学の分野で注目されるようになり、その地上実験が原子物理学者によって行われてきた。宇宙で観測される発光は1~ms程度の寿命を持つ禁制線が主であることが理論的に予想されるが、太陽風の速度は数百km/sであるために実験室で禁制線を観測するためには、衝突によって生成した励起状態のイオンを1~km程度は飛行させなくてはならない。従って、狭い実験室で禁制線を観測するためにはイオントラップを用いて狭い領域に長時間蓄積する必要がある。そこでイオントラップ技術に長けている上智大の岡田邦宏准教授の協力を得てKingdonトラップを開発した。また、高分解能でのX線分光のために電通大の中村信行准教授に新しい斜入射型分光器の製作を依頼した。本年度はそれぞれの装置の特性評価を終了し、2つの装置を首都大に移設して多価イオン衝突実験用ビームラインに接続した。接続直後に $O^{+}-He$ 衝突などの実験を行い、斜入射型分光器によって5-20 nm程度の極端紫外領域における発光を実際に測定することに成功した。まだ1-5 nmの軟X線用回折格子の評価が終わっていないが、計画通りに進んでいると言える。Kingdon型イオントラップの移設は年度末に近かったため、新しい真空排気系によって 10^{-8} Paの高真空が達成できたことの確認に留まっている。来年度は科研費基盤研究(A)の最終年度に当たるため、最終目標であるイオントラップによる準安定状態の蓄積と禁制X線遷移の観測に挑戦する。

一方、熱核融合プラズマ研究の基礎データとして、核融合炉の壁材であるタングステンに関する原子分光データの収集が世界規模で進んでいる。日本では核融合科学研究所の村上泉教授を中心とした研究チームが2011年から組織され、本研究室も電荷交換分光による多価タングステンイオンの遷移波長の測定を担当している。本年度は $W(CO)_6$ の蒸気をECR多価イオン源に導入して生成した W^{18+} について O_2 との衝突における電荷交換反応に伴う極端紫外領域での発光観測を行った。弱い強度ながらも15 nmを中心とするUTA (unresolved transition array) の観測に成功したが、理論的な困難さのために遷移の同定には至っていない。

3) 低温ヘリウム気体中のイオン移動度

液体窒素あるいは液体ヘリウムによって冷却できる移動管装置を用いて、低温ヘリウム気体中におけるイオン移動度を測定している。ここ数年は XH_n^+ ($X = C, N, O, n = 1-3$) という形の分子イオンについて測定を行ってきたが、本年度は NH_n^+ に注目し、 $n = 1-4$ の移動度測定に挑戦した。 NH_3 分子を電子衝撃すると、 $n = 1-3$ のイオンは十分な強度のイオンが生成し、イオン源内部で NH_3^+ と NH_3 が衝突すると NH_4^+ の生成も期待できたからである。実際には、十分な強度の NH_4^+ の生成には至らなかったが、 $n = 1-3$ の3種類の分子イオンについては、液体窒素温度(77 K)のHe気体中における移動度の系統的な測定が行えた。イオン移動度は、イオンと中性気体分子との相互作用ポテンシャルによって決定され、電場強度 E と気体の数密度 N の比 E/N が衝突エネルギーの指標となるため、気体圧力を変化させても同じ E/N であれば、移動度の値は同じになるのが普通である。今年度の測定でも、 E/N の関数としての移動度は極大を持ち、極大の高さは分子イオンの幾何学的サイズ、極大をもつ E/N は粒子間ポテンシャルの(平均的な)深さに対応すると考えると定性的には理解できる結果であった。

4) イオン移動度分析

2010年度から科学警察研究所を中心とした「化学剤の網羅的迅速検知システムの開発」というプロジェクトに参画している。この研究の目的は、イオン移動度分析を利用して大気圧中で化学剤 (chemical warfare

agent) を検出する装置の実用化にある。首都大は基礎研究として、大気中でコロナ放電によって生成したイオンを差動排気系によって高真空槽にまで導き、質量分析を行った上で、それぞれのイオン移動度を測定する装置の開発を担当している。本年度は差動排気系およびイオンレンズ系の改良を行うことで、質量スペクトルや到着時間スペクトルの分解能向上を達成した。その結果、通常の大気には ppm 以下しか含まれていない筈の NH_3 が、放電後に生成する H_3O^+ と反応することで NH_4^+ が大量に検出されることが明確になった。また、複雑な分子イオンの大気中での移動度を、近似的な粒子間ポテンシャルを仮定して古典軌道計算によって求めるプログラム開発にも成功し、実測値と定量的なレベルで比較して分子構造について議論が可能になった。

5) 高速多価重イオンのコヒーレント共鳴励起の研究

単結晶中を通過する高速イオンは、結晶周期ポテンシャルを振動電場として感じる。この振動数が入射イオンの原子準位エネルギー差と一致するとき、共鳴的な励起が期待され、コヒーレント共鳴励起と呼ばれる)。本年度も核子あたり約 400 MeV の 1 個のみ束縛電子を基底準位にもつ水素重イオンを $1\mu\text{m}$ 厚 Si 単結晶標的に通過させ、入射イオン方向に対する結晶の角度を走査しながら、出射イオンの電荷分布、脱励起 X 線を観測する実験研究を引き続いて行った。

(1) Ladder 型 2 重共鳴による高励起状態生成 I: 455.3 MeV/u H-like Ar^{17+} $1s \rightarrow 2p_{3/2} \rightarrow 3s/3d$:

ミラー指数 $(k, l, m) = (1, 1, 0)$ で指定される結晶面配列を用いてまず水素様 Ar^{17+} イオンの $1s$ 基底準位の電子を $2p_{3/2}$ 準位に 3 次元共鳴励起し、引き続いて $2p_{3/2}$ 準位から $3s$, $3d$ 準位へ $(k, l, m) = (0, 8, m)$ ($m = -2, 0, 2$) で指定される結晶面配列を用いて 3 次元共鳴励起した。この条件下では後者の共鳴励起の高次のミラー指数を反映して、結晶角度を走査した場合に極めて狭い共鳴幅を持つ。従って結晶通過後の Ar^{17+} イオン生き残り割合を観測すると、それぞれの共鳴に起因する幅広のピークと幅の狭いピークの重なりが観測された。これは $n = 2, 3$ いずれの準位に励起された場合も結晶原子との衝突によるイオン化が増大するためである。一方で、脱励起 X 線である $n = 2$ 準位からの Lyman α X 線の収量を観測すると、最初の $1s \rightarrow 2p_{3/2}$ 遷移に対応する幅広のピークに対して、2 重共鳴条件下ではピークの中に逆に窪みが現れるという特徴的なプロファイルが観測された。これは、まさしく $2p_{3/2} \rightarrow 3s/3d$ の過程によって脱励起 X 線の発生源である $2p_{3/2}$ 準位のポピュレーションが減少したことに起因しており、Ladder 型 2 重共鳴による高励起状態生成が確実に確認された。

(2) 2 次元共鳴励起を使った準安定状態生成: 391 MeV/u H-like Ar^{17+} $1s \rightarrow n=2$:

3 次元共鳴励起と対照的に、面チャネリング条件下における 2 次元共鳴励起では、結晶内静電場による DC シュタルク効果が大きな役割を果たす。 $n = 2$ 準位は、 l - s 相互作用に加えて電場に依存して 4 本の準位に分裂する。結晶を通過する際には、結晶内静電場に応じて分裂した $n = 2$ エネルギー準位やそれぞれの状態の $2s$, $2p$ 成分の混ざり具合も複雑に変化する。結晶通過後、 $2p$ 成分は 10 fs 程度の寿命で脱励起する一方、 $2s$ 成分は禁制遷移であるため 3.5 ns という長い寿命を持ち、1 m 程度ビームとして飛行する。そこで、我々は Si 結晶標的の後方 50 mm の位置に $8\mu\text{m}$ 厚 Al アモルファスフォイルを設置した。この位置では励起状態として $2s$ 成分のみが生き残り選択的にイオン化される。従ってフォイルを追加することによってイオン化した成分は $2s$ 成分のポピュレーションのみを反映する。実験では、 Ar^{17+} イオンを面チャネリング条件下で $(k = 1, l = 1)$ というミラー指数条件の結晶ストリング配列を利用して $1s \rightarrow n = 2$ の共鳴励起を起こさせた。フォイル挿入の結果、理論的に $2s$ 成分が多く含まれていると予想される、低エネルギー側の 2 箇所の共鳴条件下で Ar^{17+} イオンのイオン化割合の増大が明瞭に観測された。この観測から我々は準安定状態のビームを選択的に取り出すことに成功したと結論した。

2. 研究業績

1) 論文

Y. Nakano, Y. Takano, T. Ikeda, Y. Kanai, S. Suda, T. Azuma, H. Bräuning, A. Bräuning-Demian, Th. Stöhlker, D. Dauvergne, and Y. Yamazaki: Resonant Coherent Excitation of Li-like Uranium in a Silicon Crystal, *Phys. Rev. A* (Rapid Comm.) **87** (2013) 060501R.

M. Goto, A. E. K. Sunden, H. Shiromaru, J. Matsumoto, H. Tanuma, T. Azuma, and K. Hansen: Direct observation of internal energy distribution of C_5^- , *J. Chem. Phys.* **139** (2013) 054306.

K. Takahashi, K. Saito, T. Koizumi, S. Matoba, T. M. Kojima, H. Tanuma, and H. Shiromaru: Mobilities of Li^+ -attached butanol isomers in He gas, *J. Chem. Phys.* **139** (2013) 084317.

H. Shimaya, T. Ishida, S. Ishikawa, S. Suda, H. Tanuma, H. Akamatsu, H. Ohashi, N. Ijima, M. Inoue, Y. Ezoe, Y. Ishisaki, T. Ohashi, K. Shinozaki, K. Mitsuda, L. Liu, and J. Wang: Soft x-ray emission from solar wind charge exchange in laboratory, *Physica Scripta* **T156** (2013) 014002.

Hirokazu Kawamura, H. Arikawa, S. Ezure, K. Harada, T. Hayamizu, T. Inoue, T. Ishikawa, M. Itoh, T. Kato, T. Sato, T. Aoki, T. Furukawa, A. Hatakeyama, K. Hatanaka, K. Imai, T. Murakami, H. S. Nataraj, Y. Shimizu, T. Wakasa, H. P. Yoshida, Y. Sakemi: Laser-cooled radioactive francium factory at CYRIC, *Nucl. Instr. Meth. B* **317** (2013) 582-585.

Takeshi Furukawa, Takashi Wakuic, Xiaofei Yang, Tomomi Fujita, Kei Imamura, Yasuhiro Yamaguchi, Hiroki Tetsuka, Yoshiki Tsutsui, Yosuke Mitsuya, Yuichi Ichikawa, Yoko Ishibashi, Naoki Yoshida, Hazuki Shirai, Yuta Ebara, Miki Hayasaka, Shino Arai, Sosuke Muramoto, Atsushi Hatakeyama, Michiharu Wada, Tetsu Sonoda, Yuta Ito, Tohru Kobayashi, Shunji Nishimura, Mitsuki Nishimura, Yosuke Kondo, Ken-ichiro Yoneda, Shigeru Kubono, Yoshimitsu Ohshiro, Hideki Ueno, Tsutomu Shinozuka, Tadashi Shimoda, Koichiro Asahi, Yukari Matsuo: Novel nuclear laser spectroscopy method using superfluid helium for measurement of spins and moments of exotic nuclei, *Nucl. Instr. Meth. B* **317** (2013) 590-594.

Kei Imamura, Takeshi Furukawa, Takashi Wakuic, Xiaofei Yang, Yasuhiro Yamaguchi, Hiroki Tetsuka, Yosuke Mitsuya, Yoshiki Tsutsui, Tomomi Fujita, Yuta Ebara, Miki Hayasaka, Shino Arai, Sosuke Muramoto, Yuichi Ichikawa, Yoko Ishibashi, Naoki Yoshida, Hazuki Shirai, Atsushi Hatakeyama, Michiharu Wada, Tetsu Sonoda, Yuta Ito, Hitoshi Odashima, Tohru Kobayashi, Hideki Ueno, Tadashi Shimoda, Koichiro Asahi, Yukari Matsuo: Development of a helium cryostat for laser spectroscopy of atoms with unstable nuclei in superfluid helium, *Nucl. Instr. Meth. B* **317** (2013) 595-598.

Xiaofei Yang, Takeshi Furukawa, Takashi Wakuic, Kei Imamura, Hiroki Tetsuka, Tomomi Fujita, Yasuhiro Yamaguchi, Yoshiki Tsutsui, Yosuke Mitsuya, Yuichi Ichikawa, Yoko Ishibashi, Naoki Yoshida, Hazuki Shirai, Yuta Ebara, Miki Hayasaka, Shino Arai, Sosuke Muramoto, Atsushi Hatakeyama, Michiharu Wada, Tetsu Sonoda, Yuta Ito, Tohru Kobayashi, Shunji Nishimura, Mitsuki Nishimura, Yosuke Kondo, Ken-ichiro Yoneda, Hideki Ueno, Tsutomu Shinozuka, Tadashi Shimoda, Koichiro Asahi, Yukari Matsuo: Control of stopping position of radioactive ion beam in superfluid helium for laser spectroscopy experiments, *Nucl. Instr. Meth. B* **317** (2013) 599-602.

N. Yoshida, H. Ueno, A. Yoshimi, Y. Ishibashi, d, Y. Ichikawa, Y. Abe, K. Asahi, M. Chikamori, T. Fujita, T. Furukawa, E. Hikota, D. Nagae, Y. Ohtomo, Y. Saito, H. Shirai, T. Suzuki, X. F. Yang: Development of a new device control system for β -NMR experiments, *Nucl. Instr. Meth. B* **317** (2013) 705-709.

Y. Ishibashi, N. Yoshida, H. Ueno, A. Yoshimi, Y. Ichikawa, Y. Abe, K. Asahi, M. Chikamori, T. Fujita, T. Furukawa, E. Hikota, D. Nagae, Y. Ohtomo, Y. Saito, H. Shirai, T. Suzuki, X. F. Yang, N. Sakamoto: Development of an adiabatic field rotation system to measure spin polarization of unstable nuclei, *Nucl. Instr. Meth. B* **317** (2013) 714-716.

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, K. Suzuki, M. Tsuchiya, H. Takeda, M. M. Rajabali: Spin-aligned RI beams via two-step fragmentation reactions, *Nucl. Instr. Meth. B* **317** (2013) 769-773.

H. Arikawa, S. Ando, T. Aoki, S. Ezure, K. Harada, T. Hayamizu, T. Inoue, T. Ishikawa, M. Itoh, H. Kawamura, K. Kato, T. 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, Y. Sakemi: Radioactive ion beam transportation for the fundamental symmetry study with laser-trapped atoms, *Rev Sci Instrum.* **85** 02A732.

2) 国際会議報告

Hajime Tanuma: Charge exchange spectroscopy of multiply charged ions of industrial and astrophysical interest, in *Proceedings of Eighth International Conference on Atomic and Molecular Data and Their Applications*, *AIP Proceeding* **1545** (2013) 196–201.

E. Hikota, M. Chikamori, Y. Ichikawa, Y. Ohtomo, Y. Sakamoto, T. Suzuki, C. P. Bidinosti, T. Inoue, T. Furukawa, A. Yoshimi, K. Suzuki, T. Nanao, H. Miyatake, M. Tsuchiya, N. Yoshida, H. Shirai, T. Ino, H. Ueno, Y. Matsuo, T. Fukuyama, K. Asahi: Active nuclear spin maser oscillation with double cell, in *Proceedings of INPC 2013 International Nuclear Physics Conference*, *EPJ Web of Conferences* **66** (2014) 05005.

Y. Ichikawa, M. Chikamori, Y. Ohtomo, E. Hikota, Y. Sakamoto, T. Suzuki, C. P. Bidinosti, T. Inoue, T. Furukawa, A. Yoshimi, K. Suzuki, T. Nanao, H. Miyatake, M. Tsuchiya, N. Yoshida, H. Shirai, T. Ino, H. Ueno, Y. Matsuo, T. Fukuyama, K. Asahi: Search for electric dipole moment in ^{129}Xe atom using active nuclear spin maser, in *Proceedings of INPC 2013 International Nuclear Physics Conference*, *EPJ Web of Conferences* **66** (2014) 05007.

T. Inoue, H. Arikawa, S. Ezure, K. Harada, T. Hayamizu, T. Ishikawa, M. Itoh, T. Kato, H. Kawamura, T. Sato, T. Aoki, T. Furukawa, A. Hatakeyama, K. Hatanaka, K. Imai, T. Murakami, Y. Shimizu, T. Wakasa, H.P. Yoshida and Y. Sakemi: Development of the Measurement System for the Search of an Electric Dipole Moment of the Electron with Laser-Cooled Francium Atoms: in *Proceedings of INPC 2013 International Nuclear Physics Conference*, *EPJ Web of Conferences* **66** (2014) 05008.

H. Kawamura, H. Arikawa, S. Ezure, K. Harada, T. Hayamizu, T. Inoue, T. Ishikawa, M. Itoh, T. Kato, T. Sato, T. Aoki, T. Furukawa, A. Hatakeyama, K. Hatanaka, K. Imai, T. Murakami, H. S. Nataraj, Y. Shimizu, T. Wakasa, H.P. Yoshida, and Y. Sakemi: Search for a permanent EDM using laser cooled radioactive atom, in *Proceedings of INPC 2013 International Nuclear Physics Conference, EPJ Web of Conferences* **66** (2014) 05009.

T. Sato, H. Arikawa, S. Ezure, K. Harada, T. Hayamizu, T. Inoue, T. Ishikawa, M. Itoh, T. Kato, H. S. Nataraj, T. Aoki, T. Furukawa, A. Hatakeyama, T. Hatanaka, K. Imai, T. Murakami, Y. Shimizu, T. Wakasa, H. P. Yoshida, Y. Sakemi: Development of francium atomic beam for the search of the electron electric dipole moment, in *Proceedings of INPC 2013 International Nuclear Physics Conference, EPJ Web of Conferences* **66** (2014) 05019.

X. F. Yang, T. Furukawa, K. Imamura, H. Tetsuka, Y. Yamaguchi, Y. Tsutsui, T. Fujita, Y. Mitsuya, Y. Ebara, M. Hayasaka, A. Arai, S. Muramoto, Y. Ichikawa, Y. Ishibashi, N. Yoshida, H. Shirai, T. Wakui, T. Kobayashi, A. Hatakeyama, M. Wada, H. Ueno, T. Shimoda, K. Asahi, Y. Matsuo: An effective method for trapping ion beams in superfluid helium for laser spectroscopy experiments, in *Proceedings of INPC 2013 International Nuclear Physics Conference, EPJ Web of Conferences* **66** (2014) 11041.

3) 学会講演

● 日本物理学会 2013 年秋季大会 (素粒子・原子核・宇宙線領域), 2013 年 9 月 20 日~9 月 23 日 (高知大学・朝倉キャンパス)

園田哲, 和田道治, 飯村秀紀, 上野秀樹, 富田英生, 足立義貴, 高塚卓旦, Wendt.K, 久保敏幸, 若杉昌徳, 日下健祐, 眞家武士, 山澤秀行, 藤縄雅, 片山一郎, 新井郁也, Schury. P, 篠塚勉, 涌井崇志, 松尾由賀利, 古川武, 宮武宇也, 石山博恒, 今井伸明, 平山賀一, 渡辺裕, 鄭淳讚, 岡田邦宏, 伊藤由太, 中尾愛子: RIBF-SLOWRI 共鳴イオン化レーザーイオン源 (PALIS) の開発とレーザー核分光への応用 (口頭, 20aSC-5)

大友祐一, 市川雄一, 佐藤智哉, 坂本雄, 鈴木貴大, 近森正敏, 彦田絵里, 宮武裕和, 七尾翼, 鈴木都文, 土屋真人, 井上壮志, 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: $^{129}\text{Xe}/^3\text{He}$ の偏極生成及び緩和機構 (口頭, 21pSH-5)

佐藤智哉, 市川雄一, 大友祐一, 坂本雄, 鈴木貴大, 近森正敏, 彦田絵里, 宮武裕和, 七尾翼, 鈴木都文, 土屋真人, 井上壮志, 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 共存磁力計のダブルセルへの適用 (口頭, 21pSH-6)

市川雄一, 佐藤智哉, 大友祐一, 坂本雄, 鈴木貴大, 近森正敏, 彦田絵里, 宮武裕和, 七尾翼, 鈴木都文, 土屋真人, 井上壮志, 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 II (口頭, 21pSH-7)

川村広和, 安藤峻, 青木隆宏, 有川裕士, 江連咲紀, 原田健一, 早水友洋, 井上壮志, 石川泰佑, 伊藤正俊, 加藤浩, 加藤智洋, 内山愛子, 青木貴稔, 古川武, 畠山温, 畑中吉治, 今井憲一, 村上哲也, Hulyar S. Nataraj, 佐藤智哉, 清水康弘, 若狭智嗣, 吉田英智, 酒見泰寛 (口頭, 21pSH-9)

● 日本物理学会 2013 年秋季大会 (物性領域), 2013 年 9 月 25 日~9 月 28 日 (徳島大学・常三島キャンパス)

島谷紘史, 舟山智歌子, 石川彰一郎, 石田卓也, 須田慎太郎, 赤松弘規, 飯島律子, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 大橋隆哉, 大橋隼人, 篠崎慶亮, 満田和久, L. Liu, J. Wang, 田沼肇: 太陽風多価イオンの電荷交換反応 VI (口頭, 27pBB-5)

沼館直樹, 岡田邦宏, 中村信行, 田沼肇: 太陽風起源禁制 X 線遷移の実験室観測を目的とした多価イオントラップの開発 II (口頭, 27pBB-6)

高谷一成, ○金子貴洋, 井上洋子, 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 II (口頭, 27pBB-14)

● 原子衝突学会第 38 回年会, 2013 年 11 月 16 日~11 月 17 日 (理化学研究所)

金子貴洋, 高谷一成, 田沼肇, 西出龍弘, 座間洋子, 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 I (P1, ポスター)

江原悠太, 古川武, 松本淳, 伊藤源, 城丸春夫, 東俊行, 田沼肇: ポアンカレ蛍光検出の試み (P21, ポスター)

河野直子, 松本淳, 古川武, 田沼肇, 東俊行, A. E. K. Sunden, K. Hansen, 城丸春夫: TMU E-ring を用いた C_4^- の励起スペクトル測定 (P22, ポスター)

村川卓也, 伊藤源, 古川武, 田沼肇, 城丸春夫, 松本淳, 東俊行: 静電型イオン蓄積リングを用いたアルミニウムクラスター負イオンの研究 (P23, ポスター)

齊藤悠太, 古川武, 松本淳, 田沼肇, 城丸春夫, 東俊行: TMU E-Ring における低速イオンビーム生成のための Ca イオン源製作とその評価 (P27, ポスター)

井上研二, 中野祐司, 東俊行 2,1, 中井陽一, 小牧研一郎, 高田栄一, 村上健: コヒーレント共鳴励起による Ar^{17+} の Ladder 型 2 重共鳴の観測 (Q14, ポスター)

沼館直樹, 岡田邦宏, 中村信行, 田沼肇: 太陽風起源禁制 X 遷移の実験室観測を目的とした多価イオントラップの開発 (Q15, ポスター)

相田裕也, 島谷紘史, 大橋隼人, 中村信行, 岡田邦宏, 田沼肇: 極端紫外領域における多価イオンの電荷交換分光 (Q19, ポスター)

舟山智歌子, 島谷紘史, 石川彰一郎, 石田卓也, 赤松弘規, 飯島律子, 井上真奈, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 大橋隆哉, 大橋隼人, 篠崎慶亮, 満田和久, L. Liu, J. Wang, 田沼肇: 太陽風多価イオンの電荷交換反応 (Q21, ポスター)

● 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 27 日~3 月 30 日 (東海大学・湘南キャンパス)

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: 大気中におけるイオン移動度の理論計算 (口頭, 27aCH-10)

高谷一成, 金子貴洋, 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 III (口頭, 27aCH-11)

小島修一郎, 佐藤智哉, 市川雄一, 大友祐一, 坂本雄, 鈴木貴大, 白井葉月, 近森正敏, 彦田絵里, 宮武裕和, 七尾翼, 鈴木都文, 土屋真人, 井上壮志, 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: EDM 測定のためのスピンメーザーデジタルフィードバックシステム (口頭, 28aTE-1)

坂本雄, C. P. Bidinosti, 市川雄一, 佐藤智哉, 大友祐一, 小島修一郎, 鈴木貴大, 白井葉月, 近森正敏, 彦田絵里, 宮武裕和, 七尾翼, 鈴木都文, 土屋真人, 井上壮志, 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: EDM 測定に向けた改良型磁場安定化システムの構築と性能評価 2 (口頭, 28aTE-2)

大友祐一, 市川雄一, 佐藤智哉, 坂本雄, 小島修一郎, 鈴木貴大, 白井葉月, 近森正敏, 彦田絵里, 宮武裕和, 七尾翼, 鈴木都文, 土屋真人, 井上壮志, 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: $^{129}\text{Xe}/^3\text{He}$ 共存セルの性能評価 (口頭, 28aTE-3)

佐藤智哉, 市川雄一, 大友祐一, 坂本雄, 小島修一郎, 鈴木貴大, 白井葉月, 近森正敏, 彦田絵里, 宮武裕和, 七尾翼, 鈴木都文, 土屋真人, 井上壮志, 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 III (口頭, 28aTE-3)

有川裕士, 安藤峻, 青木隆宏, 石川泰佑, 伊藤正俊, 井上壮志, 内山愛子, 江連咲紀, 加藤浩, 加藤智洋, 川村広和, 早水友洋, 原田健一, 青木貴稔, 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: フランシウムを用いた電子 EDM 探索に向けた磁気光学トラップ装置の開発 (口頭, 28aTE-9)

早水友洋, 原田健一, 江連咲紀, 青木貴稔, 川村広和, 井上壮志, 伊藤正俊, 加藤智洋, 佐藤智哉, 有川裕士, 安藤峻, 石川泰佑, 加藤浩, 青木隆宏, 内山愛子, 今井憲一, 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: フランシウムを用いた電子 EDM 探索のための光双極子トラップ (口頭, 28aTE-10)

白井葉月, 市川雄一, 上野秀樹, 石橋陽子, 鈴木貴大, 古川武, 吉見彰洋, 阿部康志, 旭耕一郎, J. M. Daugas, 藤田朋美, 早坂美季, 今村慧, 岸翔太, 小島修一郎, 長江大輔, 中尾愛子, 大友祐一, 嵯峨山翼, 坂本雄, 佐藤智哉: 中性子過剰核 S 同位体の核磁気モーメント (口頭, 28pTE-10)

沼館直樹, 岡田邦宏, 中村信行, 田沼肇: 太陽風起源禁制 X 遷移の実験室観測を目的とした多価イオントラップの開発 III (口頭, 29pCH-7)

島谷紘史, 舟山智歌子, 石川章一郎, 石田卓也, 赤松弘規, 飯島律子, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 大橋隆哉, 大橋隼人, 篠崎慶亮, 満田和久, L. Liu, J. Wang, 田沼肇: 太陽風多価イオンの電荷交換反応 VII (口頭, 30aBC-1)

藤田朋美, 古川武, 今村慧, 楊曉菲, 三津谷洋助, 早坂美希, 嵯峨山翼, 岸翔太, 小林徹, 上野秀樹, 下田正, 松尾由賀利: 超流動ヘリウム中 Au 原子の超微細構造測定 (口頭, 30pCF-2)

井上研二, 中野祐司, 東俊行, 畠山温, 中井陽一, 小牧研一郎, 高田栄一, 村上健: コヒーレント共鳴励起による 2 重共鳴を利用した高励起状態の生成 (口頭, 30pCH-7)

● 第 2 回イオン移動度研究会, 2013 年 5 月 18 日~19 日 (大阪府立大学・中百舌鳥キャンパス)

金子貴洋, 高谷一成, 田沼肇, 井上洋子, 西出龍弘, 杉山浩昭, 中野信夫, 瀬戸康雄: 質量選別型移動度分析装置の開発

● 第 29 回化学反応討論会, 2013 年 6 月 5 日~6 月 7 日 (東北大学・片平キャンパス)

G. Ito, T. Furukawa, T. Majima, H. Tanuma, J. Matsumoto, H. Shiromaru, M. Goto, T. Azuma, A. E. Sunden, and K. Hansen: Fast radiative cooling of C_6^- revealed by ion storage experiments

T. Kaneko, K. Takaya, H. Tanuma, T. Nishide, H. Sugiyama, N. Nakano, and Y. Seto: Development of ion mobility spectrometry - mass spectrometer for the detection of chemical warfare

● 化学工学会 反応工学部会 CVD 反応分科会 第 20 回シンポジウム「データベースの構築と活用」, 2013 年 9 月 10 日 (東京大学・本郷キャンパス)

田沼肇: meV から keV の衝突エネルギー領域における電子・原子・分子衝突素過程の実験的研究

国際会議

● International Nuclear Physics Conference (INPC2013), Firenze, Italy, 2–7 June, 2013

T. Furukawa, T. Fujita, T. Wakui, X.F. Yang, K. Imamura, Y. Yamaguchi, H. Tetsuka, Y. Tsutsui, Y. Mitsuya, Y. Ichikawa, Y. Ishibashi, N. Yoshida, H. Shirai, Y. Ebara, M. Hayasaka, S. Arai, S. Muramoto, A. Hatakeyama, M. Wada, T. Sonoda, Y. Ito, T. Kobayashi, S. Nishimura, M. Nishimura, Y. Kondo, K. Yoneda, S. Kubono, Y. Ohshiro, H. Ueno, T. Shinozuka, T. Shimoda, K. Asahi, Y. Matsuo: Laser Spectroscopy of RI atoms stopped in Superfluid Helium (NF028, Oral)

K. Imamura, T. Furukawa, T. Wakui, X. F. Yang, T. Fujita, Y. Yamaguchi, H. Tetsuka, Y. Mitsuya, Y. Tsutsui, Y. Ebara, M. Hayasaka, S. Arai, S. Muramoto, Y. Ichikawa, Y. Ishibashi, N. Yoshida, H. Shirai, A. Hatakeyama, M. Wada, T. Sonoda, Y. Ito, H. Odashima, T. Kobayashi, H. Ueno, T. Shimoda, K. Asahi, Y. Matsuo: A helium cryostat for laser spectroscopy of RI atoms in superfluid helium (NF036, Poster)

X. F. Yang, T. Furukawa, K. Imamura, H. Tetsuka, Y. Yamaguchi, Y. Tsutsui, T. Fujita, Y. Mitsuya, Y. Ebara, M. Hayasaka, A. Arai, S. Muramoto, Y. Ichikawa, Y. Ishibashi, N. Yoshida, H. Shirai, T. Wakui, T. Kobayashi, A. Hatakeyama, M. Wada, H. Ueno, T. Shimoda, K. Asahi, Y. Matsuo: A control system for the stopping of Rb beams in superfluid helium for nuclear laser spectroscopy of RI atoms (NF099, Poster)

E. Hikota, M. Chikamori, Y. Ichikawa, Y. Ohtomo, Y. Sakamoto, T. Suzuki, C. P. Bidinosti, T. Inoue, T. Furukawa, A. Yoshimi, K. Suzuki, T. Nanao, H. Miyatake, M. Tsuchiya, N. Yoshida, H. Shirai, T. Ino, H. Ueno, Y. Matsuo, T. Fukuyama K. Asahi: Active nuclear spin maser oscillation with double cell (SY016, Poster)

Y. Ichikawa, M. Chikamori, Y. Ohtomo, E. Hikota, Y. Sakamoto, T. Suzuki, C. P. Bidinosti, T. Inoue, T. Furukawa, A. Yoshimi, K. Suzuki, T. Nanao, H. Miyatake, M. Tsuchiya, N. Yoshida, H. Shirai, T. Ino, H. Ueno, Y. Matsuo, T. Fukuyama, K. Asahi: Experimental search for electric dipole moment in ^{129}Xe atom using active nuclear spin maser (SY019, Poster)

T. Inoue, H. Arikawa, S. Ezure, K. Harada, T. Hayamizu, T. Ishikawa, M. Itoh, T. Kato, H. Kawamura, T. Sato, T. Aoki, T. Furukawa, A. Hatakeyama, K. Hatanaka, K. Imai, T. Murakami, Y. Shimizu, T. Wakasa, H. P. Yoshida and Y. Sakemi: Development of the measurement system toward the electron EDM search experiment using the laser cooled Fr atom (SY020, Poster)

H. Kawamura, H. Arikawa, S. Ezure, K. Harada, T. Hayamizu, T. Inoue, T. Ishikawa, M. Itoh, T. Kato, T. Sato, T. Aoki, T. Furukawa, A. Hatakeyama, K. Hatanaka, K. Imai, T. Murakami, H. S. Nataraj, Y. Shimizu, T. Wakasa, H. P. Yoshida, and Y. Sakemi: Search for a permanent EDM using laser cooled radioactive atom (SY021, Poster)

Y. Ohtomo, Y. Ichikawa, M. Chikamori, E. Hikota, Y. Sakamoto, T. Suzuki, C. P. Bidinosti, T. Inoue, T. Furukawa, A. Yoshimi, K. Suzuki, T. Nanao, H. Miyatake, M. Tsuchiya, N. Yoshida, H. Shirai, T. Ino, H. Ueno, Y. Matsuo, T. Fukuyama, K. Asahi: Optimization of a ^3He co-magnetometer for the EDM measurement of ^{129}Xe (SY035, Poster)

Y. Sakamoto, C. P. Bidinosti, Y. Ichikawa, M. Chikamori, Y. Ohtomo, E. Hikota, T. Suzuki, T. Inoue, T. Furukawa, A. Yoshimi, K. Suzuki, T. Nanao, H. Miyatake, M. Tsuchiya, N. Yoshida, H. Shirai, T. Ino, H. Ueno, Y. Matsuo, T. Fukuyama, K. Asahi Construction and performance test of improved magnetic field stabilization system for EDM measurement (SY039, Poster)

T. Sato, H. Arikawa, S. Ezure, K. Harada, T. Hayamizu, T. Inoue, T. Ishikawa, M. Itoh, T. Kato, H. S. Nataraj, T. Aoki, T. Furukawa, A. Hatakeyama, T. Hatanaka, K. Imai, T. Murakami, Y. Shimizu, T. Wakasa, H. P. Yoshida, Y. Sakemi: Development of francium atomic beam for the search of the electron electric dipole moment (SY040, Poster)

T. Suzuki, Y. Ichikawa, M. Chikamori, Y. Ohtomo, E. Hikota, Y. Sakamoto, C. P. Bidinosti, T. Inoue, T. Furukawa, A. Yoshimi, K. Suzuki, T. Nanao, H. Miyatake, M. Tsuchiya, N. Yoshida, H. Shirai, T. Ino, H. Ueno, Y. Matsuo, T. Fukuyama, K. Asahi Development of electric-field applying system for the measurement of EDM in ^{129}Xe atom (SY042, Poster)

H. Ueno, Y. Ichikawa, 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, K. Suzuki, M. Tsuchiya, H. Takeda, M. M. Rajabali: Production of spin-aligned radioactive isotope beams through the dispersion-matching two-step fragmentation method (NS240, Poster)

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, K. Yoneda: Hindered Proton collectivity in ^{28}S - Possible Magicity at $Z = 16$ (NS234, Poster)

● 11th European Conference on Atoms, Molecules and Photons (ECAMP11), Aarhus, Denmark, 24–28 June, 2013

K. Hansen, M. Goto, A. E. K. Sunden, H. Shiromaru, J. Matsumoto, H. Tanuma, and T. Azuma: Thermionic emission laser spectroscopy of C_4^- and C_6^-

G. Ito, T. Furukawa, H. Tanuma, J. Matsumoto, H. Shiromaru, T. Majima, M. Goto, T. Azuma, and K. Hansen: Cooling dynamics of photo-excited C_6^- and C_6H^-

● RIBF Users Meeting 2013, Saitama, Japan, 26–27 June, 2013

T. Furukawa: OROCHI experiment – Laser spectroscopy of RI atoms stopped in superfluid helium (Oral)

● XVIII International Symposium on Electron–Molecule Collisions and Swarms (EMS-2013), Kanazawa, Japan, 19–21 July, 2013

K. Takaya, T. Kaneko, N. Miyauchi, Y. Inoue, T. Nishide, H. Sugiyama, N. Nakano, H. Tanuma, and Y. Seto: Development of mass-selected ion mobility spectrometer

● 22nd International Conference on Ion Mobility Spectrometry (ISIMS-2013), Boppard, Germany, 22–25 July, 2013

T. Kaneko, K. Takaya, H. Tanuma, T. Nishide, Y. Inoue, H. Sugiyama, N. Nakano, and Y. Seto: Development of ion mobility spectrometry - mass spectrometer with double electric ion gates

● XXVIII International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC-2013), Lanzhou, China, 24–30 July, 2013

H. Shimaya, T. Ishida, S. Ishikawa, S. Suda, H. Tanuma, H. Akamatsu, H. Ohashi, N. Ijima, M. Inoue, Y. Ezoe, Y. Ishisaki, T. Ohashi, K. Shinozaki, K. Mitsuda, L. Liu, and J. Wang: Absolute cross sections of the soft x-ray emission related to the solar wind charge exchange in collisions of C^{6+} with H_2 and He (Poster)

K. Takahashi, K. Saito, T. Koizumi, S. Matoba, T. M. Kojima, H. Tanuma, and H. Shiromaru: Mobilities of Li^+ -attached butanol isomers in He gas (Poster)

G. Ito, T. Furukawa, H. Tanuma, J. Matsumoto, H. Shiromaru, T. Majima, M. Goto, T. Azuma, and K. Hansen: Difference in cooling dynamics between photo-excited C_6^- and C_6H^- (Poster)

4) 学会誌等

田沼肇：(原子衝突のキーワード) 魔法角, 原子衝突学会誌「しょうとつ」, **11** (2014) 6.

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** (2014) 18–32.

宇宙物理実験研究室

1. 研究活動の概要

「すざく」衛星は観測を続けており、本グループも衛星運用やデータ解析プログラムの開発で役割を果たすとともに、銀河系内外のさまざまな天体の観測的研究を進めている。また、日本の次期X線天文衛星ASTRO-Hの準備作業が、2015年の打ち上げを目指して進められ、マイクロカロリメータによる世界初の宇宙X線観測を目指して、本グループも搭載機器の設計や試験を進めた。DIOSなど将来のX線ミッションのために、TESマイクロカロリメータと、超軽量X線望遠鏡の開発を精力的に進めた。

1) 銀河・銀河団の観測

「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。2つの銀河群(NGC7618とUGC12491)が衝突しつつある領域のデータを解析し、温度分布や元素分布に大きな変化がないことから、まだ衝突の初期段階にあると結論した。また、おとめ座銀河団の中心銀河M87の電波アーム方向の元素分布を解析したところ、半径が30 kpcを過ぎると、アーム領域とその周辺とで元素アバンダンスに有意な違いが見えないことがわかった。電波アームに沿ってM87の元素が流出しているが、それは30 kpcほどでは拡散してしまうと考えられる。さらに、 $z = 0.372$ にある銀河団MS1512.4+3647についてMg, Si, Sなどの元素アバンダンスを調べたところ、近傍の銀河団と同様のアバンダンスパターンを示すことがわかった。銀河団における重元素の生成はこの時期までにほぼ完了していると考えられる。一方、多数の楕円銀河の元素アバンダンスを系統的に調べ、速度分散と元素アバンダンスが正の相関を示すこと、我々の銀河に比べてII型超新星の生成物が多い、楕円銀河作った鉄の多くは銀河団に流出したと考えられるなど多くの結果を出した。またオランダSRON研究所の赤松がPIとなって、銀河団の電波リリックを系統的に観測するKey Projectを提案し、総計500 ksecの観測時間が割り当てられた。

2) 「すざく」による惑星の観測

日本の「すざく」衛星は広がったX線に対して世界で最高レベルの感度を持つ。我々は「すざく」の特徴を生かした地球磁気圏の観測を進めた。太陽風に含まれる高階電離した酸素などのイオンは、地球磁気圏中の中性大気と衝突して電荷交換反応を生じる。中性原子・分子に含まれる電子はイオンへと移動し、基底状態に遷移する中でX線領域で輝線を放出する。すなわち地球磁気圏は広がったX線源であり、あらゆる宇宙X線観測にとって雑音になるほか、地球磁気圏を探る新たな手段になると期待される。我々は「すざく」のデータから地球磁気圏X線を、時間変動を手がかりとして探す手段を確立し、2007-12年のデータから38イベントを検出してきた。現在、論文を準備中である。今年度はこの結果をさらに発展すべく、地球磁気圏の外から本放射を観測することで、磁気圏境界面を世界で初めて高感度で可視化する新ミッションの検討を進め、国内外の学会などで示すとともに、地球磁気圏およびX線天文分野の将来計画検討会で発表を行った。平行して、「すざく」による木星のX線観測提案を新たに提出し、採択された。我々は「すざく」で木星周辺に広がったX線を発見し、放射線帯に存在する数十MeVの電子による可視光の逆コンプトン散乱説を提唱した。今回の主目的は、2013年に打ち上げられた極端紫外線で惑星を観測する「ひさき」衛星との同時観測であり、木星オーロラを光らせる数十eVから数keVの電子から、放射線帯の数十MeVの電子まで非常に幅広いエネルギーレンジでの粒子加速現象を世界で初めて押さえることが原理的に可能となる。データ取得が済み次第、解析を行う予定である。

3) TES カロリメータの開発

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に 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。これまでは、積層配線による段差の上に TES の薄膜を製作すると段切れになり、よい特性が得られなかった。産総研に協力を依頼し、配線による段差を斜めに削り込み、そのスロープの上に TES を製作した。試作された TES の超伝導転移特性は転移温度 175 mK で残留抵抗も 0.3 m Ω と極めて良好であり、400 素子の TES を自作する見通しが大きく開けた。また無冷媒の希釈冷凍機が整備され、ヘリウムを消費することなく、しかも冷却の手間も大幅に簡略された形で TES の超伝導転移特性を測定できるようになった。これによって、TES の開発効率が大きく向上した。また、TES の原子核物理への応用として、K 中間子原子の特性 X 線のエネルギーを高精度で測ることで、強い相互作用や K 中間子の質量に制限を与える新しい実験への協力について検討を行った。

4) 断熱消磁冷凍器の開発

小型可搬型の 2 段式 ADR を整備し TES を用いた外部実験に使用できる状態に持っていくことを目指した。クライオパームを用いて磁気シールドを強化し、磁場キャンセルの小型コイルを検討し、ソルトピルの漏れ対策を施し、新型の熱スイッチの実用化へ向けた整備を行った。地上実験等に利用できる X 線分光システムの構築に向けて着実な進展を行うことができた。

5) ASTRO-H へ向けた作業

2015 年の打ち上げをめざす ASTRO-H の観測装置の製作と試験を進めた。各装置のエンジニアリングモデル (EM) の評価を経て、フライトモデル (FM) の製作や試験が進められた。軟 X 線反射望遠鏡 (SXT) の FM が NASA/GSFC で製作され、宇宙研の 30 m ビームラインで性能評価試験が行われた。要求角分解能 1.7 分角 (HPD) に対して約 1.1 分角という非常によい性能が確認され、ASTRO-H により優れた撮像を行えると期待される。

主検出器マイクロカロリメータ (SXS) の開発でも、多くの作業を行なった。図 1 に検出器、液体ヘリウム、冷凍機などを収納する真空断熱デュワーの構造を示す。高さは約 1.5 m である。超流動ヘリウムの流出を阻止する porous plug, knife-edge device などは FM 品がデュワーに組み込まれ、SXS の信号を処理するためのデジタル系 PSP の開発を、埼玉大、宇宙研とともに進めた。その他、機械式冷凍機の振動による影響の評価、ADRC, PSU 等 SXS を構成する各機器の試験を主導した。衛星全体の噛み合わせ試験に向けたさまざまな準備作業が忙しくなり、首都大スタッフもつくば宇宙センターでの試験に多くの時間を割いた。また新居浜の住友重機械では FM センサーの到着に向けて、冷却デュワーの製作が進められた。冷却中は終夜運転となるため、首都大の大学院生もつくばや新居浜に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いう立場で、ASTRO-H の検討を行なった。第 4 回の ASTRO-H Summer School を 9 月に修善寺で開催、銀河団をテーマとして 3 名の講師をお願いし、全体で 50 名の参加があった。また、7 月には米イェール大学で、2 月には松山でサイエンス会議を開催し、White paper の作成や初期観測の観測対象を決めるためのさまざまな議論を行った。

6) 超軽量 X 線光学系の開発

我々は次世代の宇宙 X 線観測に向けて、これまでより一桁軽く、かつ秒角の角度分解能を達成するための独自の手法による超軽量 X 線望遠鏡の開発を進めている。JAXA 宇宙研、産総研、東北大、フロリダ大、京都大らとのマイクロマシン技術の研究者らと共同で進めている。 μm スケールの微細な穴を数百 μm の薄い基板に明け、側壁を反射鏡として利用する。基板は球面変形して平行光を集光する。本手

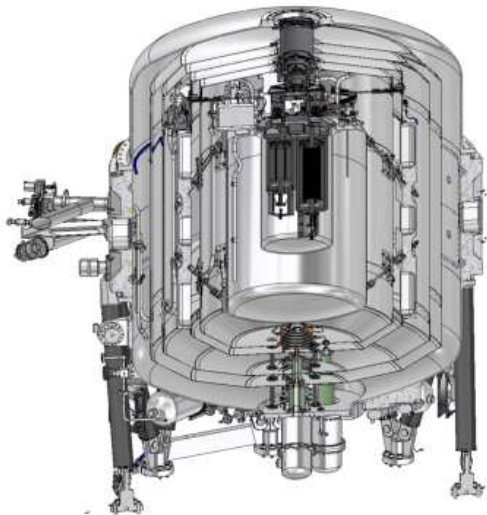


図 1: ASTRO-H SXS の真空断熱デューワー。高さは約 1.5 m。内部にマイクロカロリメータ検出器、断熱消磁冷凍機、ヘリウムタンク、JT 冷凍機、スターリング冷凍機などが組み込まれる。

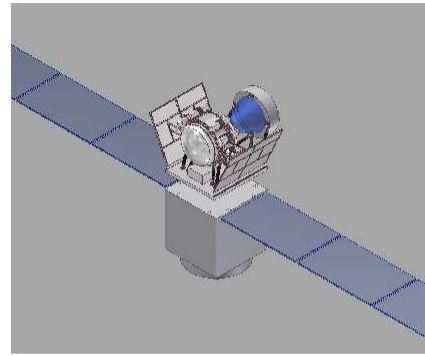


図 2: DIOS 衛星の想像図。4 回反射 X 線望遠鏡と TES カロリメータを入れた真空断熱容器からなり、機械式冷凍機で冷却される。衛星本体の大きさは高さ 2 m 程度で、重量は約 600 kg。日本学術会議が策定したマスタープランに採択され、2020 年の打ち上げを目指して、イプシロンロケット計画に提案する予定である。

法では、基板が薄いため、原理的に世界最軽量が可能であり、しかも一体成形で大量に鏡を生産できる。昨年度、我々は宇宙 X 線観測で用いられる 2 回反射 (Wolter I 型) 望遠鏡を世界で始めて完成したが、角度分解能は 14 分角 (FWHM) であり、集光強度は予想値の 2 桁下であった。そこで性能改善に向けて、今年度は 2 枚の基板を微動台を用いて位置合わせする装置を改良し、真空中にて X 線で自動で位置合わせできるようにした。そして、X 線結像イメージを取得した所、角度分解能は 4 分角 (FWHM) と 3 倍改善し、集光強度も予想値の 20% まで 1 桁改善した。本試験から、さらなる性能向上のためには、側壁の端に存在する“ばり”の除去、反射面の平坦化、基板の変形精度の改善が必要であることも分かった。試験と平行して、光線追跡計算プログラムも改良し Wolter I 型望遠鏡に対応できるようにした。さらに産総研と共同で直径 30cm の世界最大の軽量 X 線望遠鏡の試作を行い、完成した。来年度、X 線で評価予定である。こうした技術開発と平行して、将来の木星探査衛星や地球磁気圏可視化衛星に向けて、本光学系を検討し、望遠鏡の基本デザインを固めた。

7) DIOS の検討

温度 10^6 K ほどの中高温の銀河間ガスは、宇宙のバリオン全体の約半分を占め、宇宙の大構造をトレースして分布すると考えられているが、まだその分布はほとんどわかっていない。これを酸素の輝線 (O_{VII} , O_{VIII}) を使ってサーベイするために、小型計画 DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor, 図 2 参照) を 2020 年の打ち上げを目指して検討した。日本学術会議が 2014 年 3 月に公表した学術の大型研究計画に関するマスタープランに全分野から 207 項目がリストアップされているが、DIOS が唯一の X 線天文学の計画として採択された。JAXA のイプシロンロケットを用いた 4 号機への提案に向けて、宇宙研や名古屋大学と協力して衛星の検討を進めた。

2. 研究業績

1) 論文

Ichikawa, Kazuya; Matsushita, Kyoko; Okabe, Nobuhiro; Sato, Kosuke; Zhang, Y.-Y.; Finoguenov, A.; Fujita, Yutaka; Fukazawa, Yasushi; Kawaharada, Madoka; Nakazawa, Kazuhiro; Ohashi, Takaya; Ota, Naomi; Takizawa, Motokazu; Tamura, Takayuki; Umetsu, Keiichi: Suzaku Observations of the Outskirts of A1835: Deviation from Hydrostatic Equilibrium, *The Astrophysical Journal*, **766**, Issue 2, 90, 19 pp. (2013)

Ishikawa, Kumi; Ezoe, Yuichiro; Miyoshi, Yoshizumi; Terada, Naoki; Mitsuda, Kazuhisa; Ohashi, Takaya: Suzaku Observation of Strong Solar-Wind Charge-Exchange Emission from the Terrestrial Exosphere during a Geomagnetic Storm, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **65**, No.3, Article No.63, 10 pp. (2013)

Akamatsu, Hiroki; Inoue, Susumu; Sato, Takuya; Matsushita, Kyoko; Ishisaki, Yoshitaka; Sarazin, Craig L.: Suzaku X-Ray Observations of the Accreting NGC 4839 Group of Galaxies and a Radio Relic in the Coma Cluster, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **65**, No.4, Article No.89, 14 pp. (2013)

Ogawa, Tomohiro; Ezoe, Yuichiro; Moriyama, Teppei; Mitsuishi, Ikuyuki; Kakiuchi, Takuya; Ohashi, Takaya; Mitsuda, Kazuhisa; Putkonen, Matti: Iridium-coated micropore x-ray optics using dry etching of a silicon wafer and atomic layer deposition, *Applied Optics*, **52**, issue 24, p.5949

Mitsuishi, I., Yamasaki, N. Y., Takei, Y.: An X-Ray Study of the Galactic-Scale Starburst-Driven Outflow in NGC 253, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **65**, No.2, Article No.44, 12 pp. (2013)

Shimoda, Yuya; Kawaharada, Madoka; Sato, Kosuke; Ohashi, Takaya; Ishisaki, Yoshitaka; Mitsuishi, Ikuyuki; Akamatsu, Hiroki; Tashiro, Makoto S.: Metals in the Intracluster Medium of MS 1512.4+3647 Observed with Suzaku: Implications for the Metal Enrichment History, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **65**, No.5, Article No.111, 13 pp. (2013)

Zhuravleva, I.; Churazov, E.; Sunyaev, R.; Sazonov, S.; Allen, S. W.; Werner, N.; Simionescu, A.; Konami, S.; Ohashi, T.: Resonant scattering in the Perseus Cluster: spectral model for constraining gas motions with Astro-H, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **435**, Issue 4, p.3111-3121 (2013)

Gu, L., Gandhi, P., Inada, N., Kawaharada, M., Kodama, T., Konami, S., Nakazawa, K., Shimasaku, K., Xu, H., Makishima, K.: Probing of the Interactions between the Hot Plasmas and Galaxies in Clusters from $z = 0.1$ to 0.9 , *The Astrophysical Journal*, **767**, 157 (2013)

Konami, S., Matsushita, K., Nagino, R., Tamagawa, T.: Abundance Patterns in the Interstellar Medium of Early-type Galaxies Observed with Suzaku, *The Astrophysical Journal*, **783**, Issue 1, article id. 8, 25 pp. (2014)

Mitsuishi, I., Kawahara, H., Sekiya, N., Sasaki, S., Sousbie, T., Yamasaki, N. Y.: Exploring Hot Gas at Junctions of Galaxy Filaments with Suzaku, *The Astrophysical Journal*, **783**, Issue 2, article id. 137, 12 pp. (2014)

2) 国際会議報告

Ohashi, T.; Akamatsu, H.; Kawahara, H.; Sekiya, N.; Takei, Y.: X-ray study of clusters at the outer edge and beyond, *Astronomische Nachrichten*, **334**, Issue 4-5, p.325 (2013)

Gu, L., Gandhi, P., Inada, N., Kawaharada, M., Kodama, T., Konami, S., Nakazawa, K., Shimasaku, K., Xu, H., Makishima, K.: Search for galaxy-ICM interaction in rich clusters of galaxies, *Astronomische Nachrichten*, **334**, Issue 4-5, p.453 (2013)

Ursino, Eugenio; Galeazzi, M.; Mitsuishi, I.; Gupta, A.; Yamasaki, N. Y.; Takei, Y.; Ohashi, T.; Sato, K.; Henry, J. P.; Kelley, R. L.: Investigating the Properties of a WHIM Filament in the Shapley Supercluster, *American Astronomical Society*, HEAD meeting #13, #116.05 (2013)

Ezoe, Y.; Oishi, S.; Yamada, S.; Enokijima, Y.; Iijima, N.; Toba, R.; Ishisaki, Y.; Ohashi, T.; Mitsuda, K.; Morooka, T.; Tanaka, K.: Development of Superconducting Multilayer Wiring for A 400-Pixel TES X-ray Microcalorimeter Array, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **23**, Issue 3, 2100404 (2013)

Ezoe, Yuichiro; Kimura, Tomoki; Kasahara, Satoshi; Yamazaki, Atsushi; Mitsuda, Kazuhisa; Fujimoto, Masaki; Miyoshi, Yoshizumi; Branduardi-Raymont, Graziella; Ishikawa, Kumi; Mitsuishi, Ikuyuki; Ogawa, Tomohiro; Kakiuchi, Takuya; Ohashi, Takaya: JUXTA: A new probe of X-ray emission from the Jupiter system, *Advances in Space Research*, **51**, Issue 9, p.1605-1621 (2013)

Ezoe, Y.; Ohashi, T.; Ishikawa, K.; Fujimoto, R.; Mitsuda, K.; Terada, N.; Miyoshi, Y.: Suzaku observations of solar wind charge exchange and future Japanese missions, *European Planetary Science Congress 2013*, held 8-13 September in London, UK. Online at: <http://meetings.copernicus.org/epsc2013>, id.EPSC2013-565 (2013)

Shimaya, H.; Ishida, T.; Ishikawa, S.; Suda, S.; Tanuma, H.; Akamatsu, H.; Ohashi, H.; Iijima, N.; Inoue, M.; Ezoe, Y.; Ishisaki, Y.; Ohashi, T.; Shinozaki, K.; Mitsuda, K.; Liu, L.; Wang, J.: Soft x-ray emission from solar wind charge exchange in the laboratory, *Physica Scripta*, **156**, Issue, article id. 014002 (2013)

Ezoe, Y.; Ishisaki, Y.; Ohashi, T.; Ishikawa, K.; Miyoshi, Y.; Fujimoto, R.; Terada, N.; Kasahara, S.; Fujimoto, M.; Mitsuda, K.; Nishijo, K.; Noda, A.: Soft X-ray study of solar wind charge exchange from the Earth's magnetosphere : Suzaku observations and a future X-ray imaging mission concept, *American Geophysical Union*, Fall Meeting 2013, abstract #SM23B-07 (2013)

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*, Online First, DOI: 10.1007/s10909-013-1056-6 (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*, Online First, DOI: 10.1007/s10909-013-1058-4 (2014)

Ikuta, M.; Ezoe, Y.; Mitsuishi, I.; Ogawa, T.; Kakiuchi, T.; Ohashi, T.; Mitsuda, K.: Improvement in sidewall roughness of MEMS X-ray optics, *2013 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics*, p113-114 (2013)

Mitsuishi, I.; Ezoe, Y.; Ogawa, T.; Kakiuchi, T.; Ikuta, M.; Hayashi, T.; Sato, T.; Ohashi, T.; Mitsuda, K.; Morishita, K.; Nakajima, K.: Assembly of a MEMS-based Wolter type-I X-ray optic toward a future planetary exploration mission, *2013 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics*, p.115-116 (2013)

3) 学会講演

● 日本物理学会 2013 年秋季大会 2013 年 9 月 20～23 日 (高知・徳島大学)

島谷紘史, 舟山智歌子, 石川章一郎, 石田卓也, 須田慎太郎, 赤松弘規, 飯島律子, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 大橋隆哉, 大橋隼人, 篠崎慶亮, 満田和久, L. Liu, J. Wang, 田沼肇: 太陽風多価イオンの電荷交換反応 VI

● 日本物理学会 2014 年春季大会 2014 年 3 月 27～30 日 (東海大学)

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, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 三石郁之, 小波さおり, 田代信, 寺田幸功, 北本俊二, 星野晶夫, 瀬田裕美, 玉川徹, 山田真也, 石川久美, 佐藤浩介, 太田直美, 澤田真理, 村上正秀, 村上弘志, R.L. Kelley, C.A. Kilbourne, F.S. Porter, G.A. Sneiderman, K.R. Boyce, M.J. DiPirro, P.J. Shirron, G.V. Brown, D. McCammon, A. Szymkowiak, J.-W. den Herder, D. Haas, C. de Vries, E. Costantini, H. Akamatsu, S.Paltani, M.Pohl, 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)

島谷紘史, 舟山智歌子, 石川章一郎, 石田卓也, 赤松弘規, 飯島律子, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 大橋隆哉, 大橋隼人, 篠崎慶亮, 満田和久, L. Liu, J. Wang, 田沼肇: 太陽風多価イオンの電荷交換反応 VII

● 日本天文学会 2013 年秋季年会 2013 年 9 月 10～12 日 (東北大学)

石川久美, 江副祐一郎, 大橋隆哉, 三好由純, 寺田直樹: 「すざく」による地球から広がった軟 X 線放射の観測

三石郁之, 佐藤寿紀, 佐々木伸, 大橋隆哉, 森鼻久美子, 辻本匡弘, 満田和久, 山崎典子, Dan McCammon: 銀河面からの軟 X 線背景放射

横田佳奈, 松下恭子, 佐藤浩介, 佐久間絵理, 石崎欣尚, 星野晶夫: 「すざく」で観測された AWM7 銀河団外縁部の方向依存性と鉄の分布

飯島律子, 三石郁之, 大橋隆哉, 松下恭子, 佐藤浩介: 「すざく」による M87 の重元素分布の観測 (2)

星野晶夫, 小井教江, 菱右京, 三ツ出純真, 高倉奏喜, 藤本龍一, 大島泰, 松尾宏, 岡田則夫, 石崎欣尚, 大橋隆哉: 新構造のガスギャップ式熱スイッチの製作と評価

錦沢 秀太郎, 西 颯太郎, 増田 充宏, 佐原 宏典, 江副 祐一郎, 大橋 隆哉, 磯部 直樹, 幸村 孝由, 宮村 典秀, ORBIS チーム: 超小型衛星を利用した継続的な理学的挑戦

富川和紀, 佐藤寿紀, 菊池直道, 石田學, 前田良知, 飯塚亮, 林多佳由, 田原讓, 國枝秀世, 森英之, 泉谷喬則, 南沙里, 岡島崇, Peter J. Serlemittos, Yang Soong, 他 the ASTRO-H SXT team: ASTRO-H 搭載用 軟 X 線望遠鏡 1 号機 (SXT-1 FM) の地上性能評価

佐藤寿紀, 富川和紀, 菊池直道, 林多佳由, 飯塚亮, 前田良知, 石田學, 泉谷喬則, 森英之, 南沙里, 岡島崇, Peter J. Serlemittos, Yang Soong (GSFC): ASTRO-H 搭載軟 X 線望遠鏡の望遠鏡特性の評価

飯塚亮, 石田学, 前田良知, 林多佳由, 富川和紀, 佐藤寿紀, 菊池直道, 森英之, 宮澤拓也, 黒田祐司, 粟木久光, 幅良統, 泉谷喬則, ほか Astro-H SXT/HXT チーム: Astro-H 搭載 X 線望遠鏡 SXT/HXT のアライメント計測

林多佳由, 富川和紀, 佐藤寿紀, 佐藤拓郎, 菊池直道, 飯塚亮, 前田良知, 石田學, 泉谷喬則: 宇宙科学研究所 新ビームラインの測定精度

田代 信, 寺田幸功, 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, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 三石郁之, 小波さおり, 北本俊二, 星野晶夫, 瀬田裕美, 玉川徹, 山田真也, 石川久美, 佐藤浩介, 澤田真理, 太田直美, 村上正秀, 村上弘志, R.L. Kelley, C.A. Kilbourne, F.S. Porter, G.A. Sneiderman, K.R. Boyce, M.J. DiPirro, P.J. Shirron, K.C. Gendreau, G.V. Brown, D. McCammon, A. Szymkowiak, J.-W. den Herder, C. de Vries, 赤松弘規, S. Paltani, M. Pohl ほか 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 (X)

山口 直, 田代 信, 下田 優弥, 武田 佐和子, 石崎 欣尚, 辻本 匡弘, 満田 和久, 瀬田 裕美, 藤本 龍一, ASTRO-H/SXS チーム: ASTRO-H 搭載 精密軟 X 線分光装置 SXS の波形処理機器 PSP の開発の現状 (VII)

大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 田原 讓, 満田和久, 山崎典子, 竹井 洋, 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 の開発状況

● 日本天文学会 2014 年春季年会 2014 年 3 月 19~22 日 (国際基督大学)

小高裕和, 東郷淳, 高橋忠幸, 江副祐一郎, 内山泰伸: すざく/チャンドラを用いた星形成領域 RCW 38 の X 線解析

小波さおり, Eric D. Miller, Marshall Bautz, 大橋隆哉: 「すざく」による $z \sim 0.1$ に位置する銀河団のピリアル半径の重元素組成

三石郁之, 佐々木伸, 河原創, 関谷典央, 山崎典子, Thierry Sousbie: すざく衛星を用いた大規模構造銀河フィラメントの交差点に付随した高温ガス探査

板花まどか, 滝沢元和, 赤松弘規, 大橋隆哉, 石崎欣尚, 河原創: すざく衛星による 1RXS J0603.3+4214 の電波レリク周辺領域の観測

菊池直道, 富川和紀, 佐藤寿紀, 石田學, 前田良知, 飯塚亮, 林多佳由, 田原讓, 國枝秀世, 森英之, 南沙里, 岡島崇, Peter J. Serlemittos, Yang Soong, 他 the ASTRO-H SXT team: ASTRO-H 搭載 軟 X 線望遠鏡 2 号機 (SXT-2) の地上性能評価

富川和紀, 佐藤寿紀, 菊池直道, 石田學, 前田良知, 飯塚亮, 林多佳由, 田原讓, 國枝秀世, 森英之, 泉谷喬則, 南沙里, 岡島崇, Peter J. Serlemittos, Yang Soong, 他 the ASTRO-H SXT team: ASTRO-H 搭載軟 X 線望遠鏡の迷光測定

竹井洋, 満田和久, 山崎典子, 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, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 三石郁之, 小波さおり, 田代信, 寺田幸功, 北本俊二, 星野晶夫, 瀬田裕美, 玉川徹, 山田真也, 石川久美, 佐藤浩介, 太田直美, 澤田真理, 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 XI

澤田真理, 山田真也, 星野晶夫, 佐藤浩介, 三石郁之, 藤本龍一, 竹井洋, 安田進, 満田和久, 石村康生, 河野太郎, 佐藤洋一, 夏莉権, 和田篤始, 峯杉賢治, 吉田誠至, ほか ASTRO-H/SXS チーム: ASTRO-H 搭載 X 線マイクロカロリメータ SXS の分光性能に対する機械式冷凍機擾乱の影響と対策

山口直, 田代信, 寺田幸功, 下田優弥, 武田佐和子, 石崎欣尚, 上原翔, 辻本匡弘, 満田和久, 瀬田裕美, 藤本龍一, ASTRO-H/SXS チーム: ASTRO-H 搭載 精密軟 X 線分光装置 SXS の波形処理機器 PSP の現状 (VIII)

寺田幸功, 山口直, 杉本樹信, 井上拓, 中谷創平, 小川美奈, 堂谷忠靖, 夏莉権, 尾崎正伸, 国分紀秀, 高橋忠幸, 石崎欣尚, 水島和代, 小湊隆, 峯弘昭, 檜原弘樹, 岩瀬かほり: ASTRO-H 衛星用時刻付けシステムの構築

井上拓, 寺田幸功, 山口直, 杉本樹信, 中谷創平, 小川美奈, 堂谷忠靖, 夏莉権, 尾崎正伸, 国分紀秀, 高橋忠幸, 石崎欣尚, 水島和代, 小湊隆, 峯弘昭, 檜原弘樹, 岩瀬かほり: ASTRO-H 衛星の時刻精度の測定

大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 田原 讓, 満田和久, 山崎典子, 竹井 洋, 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

馬場崎康敬, 滝澤峻也, 中道蓮, 田原讓, 桜井郁也, 渡辺剛, 鳥居龍晴, 立花健二, 大西崇文, 杉田聡司, 前田良和, 飯塚亮, 林多佳由, 富川和紀, 佐藤寿紀, 菊池直道: DIOS 搭載 4 回反射型 X 線望遠鏡 FXT の反射鏡開発

江副 祐一郎, 三好 由純, 笠原 慧, 満田 和久, 藤本 正樹, 山崎 敦, 長谷川 洋, 木村 智樹, 大橋 隆哉, 石崎欣尚, 三石 郁之, 藤本 龍一, 松本 洋介, 野田 篤司, 西城 邦俊, 他 GEO-X チーム: 地球磁気圏を X 線で可視化する GEO-X 衛星の検討

西頭太郎, 増田充宏, 佐原宏典, 江副祐一郎, 大橋隆哉, 磯部直樹, 幸村孝由, 宮村典秀, 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

井上真奈, 星野晶夫, 大橋隆哉, 石崎欣尚, 田沼肇, 山田真也: 電荷交換反応の地上実験を目指した高精度 X 線分光システムの構築

● 応用物理学会 2014 年春季年会 2014 年 3 月 17~20 日 (青山学院大学)

小川智弘, 江副祐一郎, 三石郁之, 垣内巧也, 生田昌寛, 佐藤真柚, 満田和久, 大橋隆哉, 中嶋一雄, 森下浩平: 将来衛星に向けた超軽量 MEMS X 線光学系の高分解能化の研究

国内研究会

● 銀河団研究会 2013 年 12 月 27-28 日 (東京理科大学)

小波さおり: すざく衛星による楕円銀河の高温ガス中の重元素組成/組成比の調査

佐藤真柚: Merging groups NGC 7618 and UGC 12491 の観測

三石郁之: すざく衛星を用いた大規模構造銀河フィラメントの交差点に付随した高温ガス探査

大橋隆哉: X線分光天文学の展望 (招待講演)

● 第14回宇宙科学シンポジウム 2014年1月9~10日 (ISAS/JAXA)

川勝康弘, 坂井真一郎, 大橋隆哉, 郷田直輝, 安東正樹, 宮崎康行, 藤田和央, 森治: グループディスカッション 「次期宇宙科学・探査プログラム計画はどうあるべきか」

大橋隆哉, R. Mushotzky, 松下恭子, 上田佳宏, 久保田あや, 太田直美, 内山泰伸, R. Smith, 馬場 彩, 山田真也, 辻本匡弘, 川原田 円, 湯浅孝行, 小高裕和, 高橋忠幸: ASTRO-H チーム ASTRO-H の目指すサイエンス

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, 大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 三石郁之, 小波さおり, 藤本龍一, 田代 信, 寺田幸功, 北本俊二, 星野晶夫, 瀬田裕美, 玉川徹, 山田真也, 石川久美, 佐藤浩介, 太田直美, 澤田真理, 村上正秀, 村上弘志 R.L. Kelley, C.A. Kilbourne, F.S. Porter, G.A. Sneidermann, K.R. Boyce, M.J. DiPirro, P.J. Shirron, G.V. Brown, D. McCammon, A. Szymkowiak, J.-W. den Herder, D. Haas, C. de Vries, E. Costantini, H. Akamatsu, S.Paltani, M.Pohl, 他 ASTRO-H SXS チーム: ASTRO-H 衛星搭載 SXS-XCS 検出器

大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 田原 譲, 満田和久, 山崎典子, 竹井 洋, 他 DIOS ワーキンググループ: ダークバリオン探査小型衛星 DIOS の開発の現状

林佑, 永吉賢一郎, 満田和久, 山崎典子, 竹井洋, 関谷典 央, 酒井和広, 山本亮, 千葉旭, 大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 山田真也, 飯島律子, 山口静哉: DIOS 衛星搭載に向けた TES 型 X 線マイクロカロリメータアレイ の開発現状

菱右京, 高倉奏喜, 神谷賢太, 小竹美里, 藤本龍一, 井上真奈, 山口静哉, 宮崎直人, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 大橋隆哉, 星野晶夫, 山田真也, 篠崎慶亮: X 線マイクロカロリメータ動作のための断熱消磁冷凍機の開発

江副 祐一郎, 三好 由純, 笠原 慧, 満田 和久, 藤本 正樹, 山崎 敦, 長谷川 洋, 木村 智樹, 大橋 隆哉, 石崎欣尚, 三石 郁之, 藤本 龍一, 松本 洋介, 野田 篤司, 西城 邦俊, 他 GEO-X チーム: 地球磁気圏を X 線で可視化する GEO-X 衛星の検討

西頭太郎, 佐原宏典, ORBIS チーム, 宮村典秀, 磯部直樹, 幸村孝由, 江副祐一郎: 汎用型超小型衛星による継続的な理学的挑戦

生田昌寛, 江副祐一郎, 三石郁之, 小川智弘, 垣内巧也, 佐藤真柚, 大橋隆哉, 満田和久, 中嶋一雄, 森下浩平, 前田龍太郎, 廣島洋, 池原毅, 倉島雄一, 金森義明, 山口ひとみ: 将来衛星に向けた超軽量・高角度分解能 MEMS X 線光学系の開発

野地拓匡, 福田豪, 吉田賢史, 小林雄太, 菊池貴大, 関谷典夫, 山崎典子, 大橋隆哉, 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広帯域高利得な低雑音増幅器の研究

● 高エネルギー宇宙連絡会 「若手放談会」 2014年1月11日 (JAXA 宇宙研)

江副祐一郎: 「Astro-H と Athena の間に何をすべきか？」

● 「イプシロンロケットによる小型惑星探査」に関するシンポジウム 2014年1月22日 (神戸大)

江副祐一郎: 地球磁気圏を可視化する X 線望遠鏡

● 研究環シンポジウム:宇宙の化学進化 2014年1月29~30日 (首都大学東京)

大橋隆哉: あいさつと連絡

三石郁之: 銀河の進化と高温ガスのダイナミクス

小波さおり: 楕円銀河の化学進化

江副 祐一郎, 三好 由純, 笠原 慧, 満田 和久, 藤本 正樹, 山崎 敦, 長谷川 洋, 木村 智樹, 大橋 隆哉, 石崎 欣尚, 三石 郁之, 藤本 龍一, 松本 洋介, 野田 篤司, 西城 邦俊, 他 GEO-X チーム: 地球磁気圏を X 線で可視化する GEO-X 衛星の検討

生田昌寛, 江副祐一郎, 三石郁之, 小川智弘, 垣内巧也, 佐藤真柚, 大橋隆哉, 満田和久, 中嶋一雄, 森下浩平, 前田龍太郎, 廣島洋, 池原毅, 倉島雄一, 金森義明, 山口ひとみ: 将来衛星に向けた超軽量・高角度分解能 MEMS X 線光学系の開発

佐藤真柚, 三石郁之, 佐々木 伸, 飯島律子, 林 克洋, 大橋隆哉: Suzaku Observation of Merging Groups NGC7618 and UGC12491

飯島律子, 三石郁之, 大橋隆哉, 松下恭子, 佐藤浩介: Metal distribution in the center of the Virgo cluster

● 次期地球電磁気圏飛翔体探査検討会 2014年2月18日 (東北大)

江副祐一郎, 三好由純, 笠原慧, ほか GEO-X 衛星検討チーム: 地球磁気圏を可視化する GEO-X 衛星の検討

● 高エネルギー宇宙物理学連絡会シンポジウム 2014年3月10-11日 (東京工業大学)

大橋隆哉: 精密 X 線分光観測 (招待講演)

国際会議

● 13th Meeting of the High Energy Astrophysics Division, Monterey, USA, April 7 – 11, 2013

T. Ohashi and K. Mitsuda; The Near Vision (Next 10 years) of X-ray Astronomy in Japan (Invited)

I. Mitsuishi, T. Sato, S. Kimura, K. Mitsuda, N.Y. Yamasaki, Y. Takei, T. Ohashi, D. McCammon: Unresolved Soft X-Ray Emission from the Galactic Disk

● Space Cryogenics Workshop Alaska, USA, June 23 – 25, 2013

I. Mitsuishi, Y. Ezoe, K. Ishikawa, N. Iijima, T. Ohashi, R. Fujimoto, K. Mitsuda, S. Tsunematsu, S. Yoshida, K. Kanao, M. Murakami, M. DiPirro, P. Shirron: He Flow Rate Measurements on the Engineering Model for the Astro-H Soft X-ray Spectrometer Dewar

● 15th International Workshop on Low Temperature Detectors Pasadena, USA, June 24 – 28, 2013

Y. Ishisaki, Y. Enokijima, Y. Ezoe, T. Ohashi, H. Akamatsu, R. Yamamoto, Y. Takei, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda, S. Yamada: Radiation tolerance evaluation of a Ti/Au bilayer TES microcalorimeter

S. Yamada, Y. Ezoe, Y. Ishisaki, T. Ohashi, N. Iijima, K. Mitsuda, K. Nagayoshi, H. Akamatsu, T. Morooka, K. Takana: Development of Multilayer Readout Wiring TES Calorimeter for Future X-ray Missions

● Optical MEMS and Nanophotonics 2013 Kanazawa, Japan, August 18 – 22, 2013

M. Ikuta, Y. Ezoe, I. Mitsuishi, T. Ogawa, T. Kakiuchi, T. Ohashi, K. Mitsuda: Improvement in sidewall roughness of MEMS X-ray optics

I. Mitsuishi, Y. Ezoe, T. Ogawa, T. Kakiuchi, M. Ikuta, T. Hayashi, T. Sato, T. Ohashi, K. Mitsuda, K. Morishita, K. Nakajima: Assembly of a MEMS-based Wolter type-I X-ray optic toward a future planetary exploration mission

● European Planetary Science Congress, London, UK, September 8 – 13, 2013

Y. Ezoe, T. Ohashi, K. Ishikawa, R. Fujimoto, K. Mitsuda, N. Terada, and Y. Miyoshi: Suzaku observations of solar wind charge exchange and future Japanese missions GEO-X : Imaging of Diffuse X-rays from the Earth's Magnetosphere (Invited)

● ISSI meeting on Solar Wind Charge Exchange Soft X-ray Imaging in the Solar System, Bern, Switzerland, October 20 – 23, 2013

Y. Ezoe: SWCX event search for Suzaku archival data

● Metal Production and Distribution in a Hierarchical Universe, Paris, France, October 21 – 25, 2013

N. Iijima, I. Mitsuishi, T. Ohashi, K. Matsushita, and K. Sato: Metal distribution in the center of the Virgo cluster

● Magnetospheric Plasmas, Ookayama, Japan, November 11 – 13, 2013

Y. Ezoe, Y. Miyoshi, S. Kasahara, and the GEO-X team: GEO-X : Imaging of Diffuse X-rays from the Earth's Magnetosphere (Invited)

Y. Ezoe, T. Kimura, S. Kasahara, A. Yamazaki, K. Mitsuda, M. Fujimoto, Y. Miyoshi, I. Mitsuishi, G. Branduardi-Raymont, and the JMO JUXTA & GEO-X team: Light-weight and compact soft X-ray imaging spectrometer for future solar system explorations

● The 5th Nano-Satellite Symposium, Hongo, Japan, November 20 – 22, 2013

Y. Ezoe, T. Ohashi, T. Kimura, S. Kasahara, A. Yamazaki, K. Mitsuda, M. Fujimoto, Y. Miyoshi, G. Branduardi-Raymont: JUXTA : A New Probe of X-ray Emission from Jupiter and the Solar System

● American Geophysical Union Fall meeting, San Francisco, USA, December 9 – 13, 2013

Y. Ezoe, Y. Ishisaki, T. Ohashi, K. Ishikawa, Y. Miyoshi, R. Fujimoto, N. Terada, S. Kasahara, M. Fujimoto, K. Mitsuda, K. Nishijo, A. Noda: Soft X-ray study of solar wind charge exchange from the Earth ' s magnetosphere : Suzaku observations and a future X-ray imaging mission concept

● Suzaku-MAXI 2014, Ehime, Japan, February 19 – 22, 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: Suzaku observations of diffuse X-rays from the Earth ' s magnetosphere and beyond

T. Ogawa, Y. Ezoe, T. Ohashi, K. Hamaguchi, M. Corcoran, L. Townsley, P. Broos, R. Petre, Y-H. Chu, R. Gruendl, J. Pittard, T. Montmerle: Diffuse X-ray emission from a Southwest Region of Carina Nebula with Suzaku

T. Ohashi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, Y. Tawara, K. Mitsuda, N. Yamasaki, Y. Takei: DIOS: the dark baryon exploring mission

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

I. Mitsuishi: Exploring Hot Gas at Junctions of Galaxy Filaments with Suzaku

M. Sato, I. Mitsuishi, S. Sasaki, N. Iijima, K. Hayashi, T. Ohashi: Suzaku observation of merging groups of galaxies NGC 7618 and UGC 12491

4) 学会誌等

大橋隆哉: 高温プラズマの X 線観測で宇宙の大規模構造の形成を探る, プラズマ核融合学会誌, **90**, 183-189 (2014)

電子物性研究室

1. 研究活動の概要

結晶中の f 電子は、その内部自由度が主たる役割を果たすことにより発現する、新規な超伝導や磁性に関する強相関電子物性の探索とその機構解明が本研究室の研究テーマである。充填スクッテルダイトを始めとして、カゴ状構造を結晶内に持つ化合物や、これまでにないタイプの結晶構造を持つ 3 元系金属間化合物、および、新規 BiS₂ 系層状超伝導体を対象物質とした。2012 年度末に佐藤英行教授が退職された後、2013 年度から松田達磨准教授が加わり、スタッフ 3 名、研究生 1 名、大学院生 8 名、学部生 5 名の体制で以下の研究を進めた。

1) NdFe₄As₁₂ の強磁性相に見られるブロードな比熱ピークの起源

我々は以前に高圧合成法により NdFe₄As₁₂ 単結晶試料の育成に初めて成功し、 $T_c = 14.6$ K の強磁性体であることや、Nd の局在的 $4f$ 電子と Fe の遍歴的 $3d$ 電子の両者が磁気モーメントを持つこと（強磁性状態では両者が自発磁化に寄与している）など、その基礎物性の特徴を初めて明らかにし報告していた。さらに基礎物性を詳細に調べ、伝導電子の $4f$ 電子による散乱成分が常磁性相で $\log T$ 依存する振る舞いを示し、Nd イオンが近藤効果を示す証拠を得た（他の充填スクッテルダイトでも見られているが、Nd イオンの近藤効果は稀有な現象である）。この化合物のもっとも奇妙な振る舞いは、 $4f$ 電子に起因する磁気比熱 C_{mag}/T が強磁性相内の 5 K においてブロードなピーク構造を持つことである。このピーク構造は、 T_c における比熱のとびよりも大きい。Nd の $4f$ 電子が低エネルギー領域に縮退した結晶場準位構造を持ち、それが強磁性転移に伴う自発的内場により分裂することにより、この比熱異常を説明できることを示した。

2) 近藤ギャップ形成の臨界領域に位置する CeFe₄As₁₂ 単結晶試料の電子輸送効果

CeFe₄As₁₂ はこれまでに高圧合成で作られた多結晶試料と、低圧 CdAs フラックス法で作られた単結晶試料の両方で物性が測定されていたが、両者で抵抗の温度依存が大きく異なっており、その原因が不明であった。我々は高圧フラックス法により単結晶試料を育成し、その物性を調べた。高圧フラックス法による単結晶試料も、抵抗の温度依存に大きな試料依存が見られたが、X 線構造解析により調べた結晶構造との相関は見られなかった（この点は、CdAs フラックス法で作られた単結晶で指摘されていた、結晶構造と電気抵抗の振る舞いととの相関とは状況が異なる）。CeFe₄As₁₂ は、Ce 系充填スクッテルダイトにおけるこれまでの系統的な研究から、近藤半導体と金属の狭間に位置していることがわかっており、近藤ギャップ形成の臨界領域に位置すると考えられる。我々がまだ把握できていない微妙な結晶の相違が、電子輸送に大きな効果をもたらしていると考えざるをえない。

3) SmTa₂Al₂₀ の磁場に鈍感な近藤効果と磁気相転移、および磁気秩序相内における重い電子形成の可能性

SmTa₂Al₂₀ が磁場に鈍感な近藤効果や磁気相転移を示すことを昨年度見出したが、さらに詳細にその物性を調べた。電気抵抗は 3 - 30K の温度領域で明瞭な $\log T$ 依存を示すが、9 T 以下の磁場範囲では、磁場印加による抑制が見られない（図 1）。磁化率は、Sm²⁺ や Sm³⁺ で期待される振る舞いとは大きく異なり、20 K 以上の温度領域でほとんど温度依存しない。2 K 以下の磁気秩序相内で C/T は ~ 3 J/molK² の大きな値を持ち（これまで報告されている Sm 化合物の中でもっとも大きな値）、降温とともに増大し続けている。磁気エントロピーの温度依存は、Sm $4f$ 電子の結晶場基底状態が Γ_8 四重項であることと、近藤温度が 7 K 程度であることを示唆する。Sm 核比熱の解析から、Sm の磁気秩序モーメントは

0.22 μ_B 以下であると見積もられ、 Γ_8 四重項で期待される値と比べ、大きく抑制されていることがわかる。四重項基底状態は、八極子自由度を持つため、この八極子成分の相互作用が、抑制された Sm の磁気秩序モーメントの原因となっている可能性がある。

4) 磁場に鈍感な磁気転移及び、重い電子状態を示す $\text{SmTr}_2\text{Al}_{20}$ の La 希釈効果

$\text{SmTr}_2\text{Al}_{20}$ で観測された磁場に鈍感な物性の起源が、Sm 単サイトに起因する可能性を検証するために Sm を La で希釈した試料の単結晶を育成し、その物性測定を行った。格子定数の Sm 濃度依存性測定から Sm サイトがほぼ仕込み量通りに La に置換されていることを確認した。磁場に鈍感な相転移に関して、磁場に鈍感な性質は変化せずに、Sm 濃度の減少に伴い転移温度が線形に減少していくことを見出した。電子間の強い相関効果に関連しては、電気伝導率、低温での電子比熱係数の濃度依存性について、今後研究を行っていく必要がある。

5) 一軸的な異方性を有するカゴ状構造を持つ RAu_3Al_7 (R:希土類) における強相関電子物性研究

我々は、これまでカゴ状化合物における強相関電子系である充填スクッテルダイト化合物、1-2-20 系化合物について研究を行ってきた。これら両物質系ともに立方晶系であり、希土類元素の適度に高い対称性も、特異物性出現のための要素と考えられることから、比較対象として異方的な籠状物質の研究が必要不可欠である。我々は、近年その候補物質として RAu_3Al_7 に注目し、これまで $R = \text{Ce}, \text{Sm}, \text{Yb}$ について単結晶育成を行い、物性研究を進めてきた。本物質系は、我々の研究以前、S.E. Lattturner 等 (2003) による結晶構造及び多結晶の物性報告しかなく、その詳細は明らかになっていなかった。本年度我々は、 $R = \text{La}, \text{Pr}, \text{Tm}$ の単結晶の育成に新たに成功し、異方性を含めた詳細な物性測定を行った。その結果、Pr, Tm 共に異方的な物性を示し、2 K まで相転移がないことを見出した。異方的な振る舞いを示す磁化率の結果を用いた結晶場解析により、両物質共に結晶場基底状態は磁気的な 2 重項であることを明らかにした。その結晶場基底 2 重項がどのようにして縮退を解くかについては、磁場中極低温比熱測定により明らかにする予定である。また、4f 電子を含まない参照物質である La については、高圧フラックス法を適用することにより、初めて合成及び単結晶育成に成功した。その物性測定結果を用いて、先行研究してきた $R = \text{Ce}, \text{Sm}$ の系に関しても 4f 電子以外の寄与のより正確な見積を行い、Ce での強磁性近藤効果、Sm での転移温度以下に存在する大きな電子比熱係数といった興味深い強相関電子物性の起源探索を行った。

6) 層状超伝導化合物 $\text{RO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ の単結晶育成と物性研究

1986 年に銅酸化物高温超伝導体が発見されて以降、層状構造をとる化合物開発が 1 つの指針となっている。2009 年に発見された Fe 系超伝導体に続き、ごく最近発見された BiS_2 系は新しい系として注目されている。この、 BiS_2 系化合物はその名の通り特徴的な BiS_2 層を共通構造として保有しており、2012 年に本学理工学研究科電気電子専攻の水口助教によって発見された超伝導体である。層状構造をとるといふ点において、物性に大きな異方性が期待されるが、この物質系の純良単結晶の育成が困難なため、その超伝導機構の解明は遅れている。我々の研究グループでは、水口氏と協力して、この系の高純度単結晶育成についてフラックス法を用いて取り組んだ。特に $\text{RO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ (R:希土類) 系に注目し、母相である $x = 0$ と超伝導転移温度が最大値をとる $x = 0.5$ 集中して結晶育成を行った。その結果、図に示すような、結晶構造 (正方晶) の対称性を反映した奇麗な単結晶を得ることに成功し、この単結晶を用いた X 線回折実験から、詳細な構造パラメータを決定することができた。これらの単結晶試料を用いることで $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ については、超伝導特性の大きな異方性を、また CeOBiSi_2 については、Ce イオンに起因する異方的かつ低温で異常な比熱の振る舞いを観測することに成功し、この物質系の特異な電子状態を明らかにしつつある。

また、F 濃度の異なる $\text{NdO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ 多結晶試料 (水口・三浦グループ提供) を用いて、ホール効果や熱電能を含めた電子輸送特性を調べた。常伝導相における測定結果から、複数のキャリアが存在していること、中間温度に性質が移り変わるクロスオーバー的な電子状態の変化があることなどがわかった。すでに報告されているバンド計算と比較することにより、この系の超伝導を担う伝導電子の特性が今後明らかになるものと期待している。

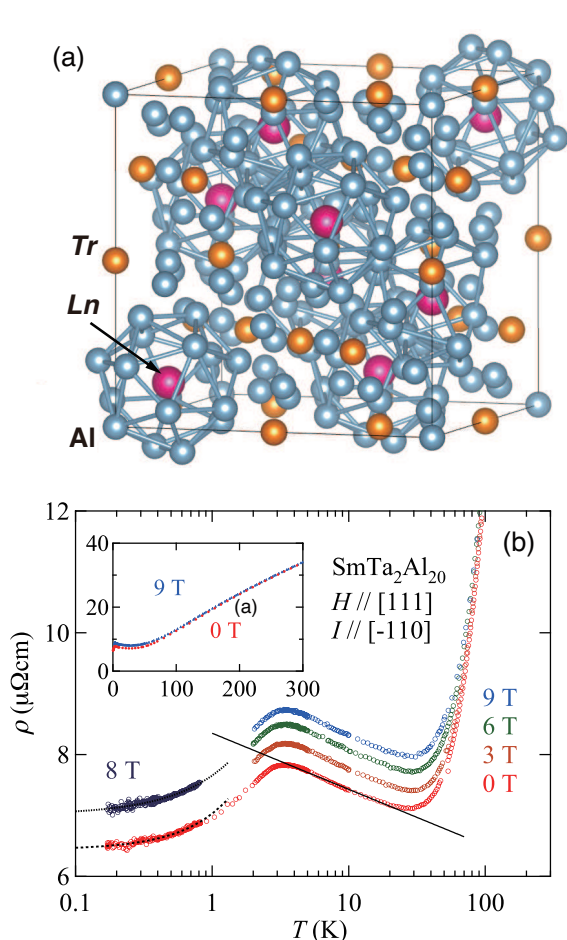


図 1: $\text{SmTa}_2\text{Al}_{20}$ の電気抵抗の温度依存。磁場の影響をほとんど受けない $\log T$ 依存が 3 – 30 K の温度領域に明瞭に見られる。

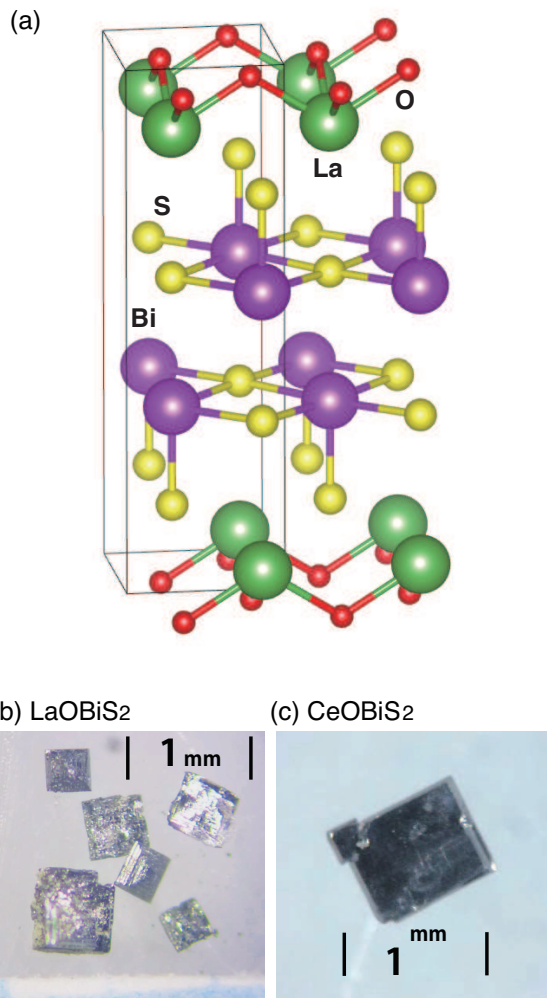


図 2: フラックス法によって育成に成功した (a) LaOBiS_2 と (b) CeOBiS_2 の単結晶

2. 研究業績

1) 論文

R. Higashinaka, K. Takeda, T. Namiki, Y. Aoki, H. Sato: Anomalous Low-Lying Thermal Excitations Deep Inside the Ferromagnetic State in Filled Skutterudite $\text{NdFe}_4\text{As}_{12}$, *J. Phys. Soc. Jpn.* **82** (2013) 114710 (6 pages).

A. Yamada, R. Higashinaka, R. Miyazaki, K. Fushiya, T.D. Matsuda, Y. Aoki, W. Fujita, H. Harima, H. Sato: Anomalous field-insensitive correlated electron behaviors in $\text{SmTa}_2\text{Al}_{20}$, *J. Phys. Soc. Jpn.* **82** (2013) 123710 (5 pages).

S. K. Dhar, Y. Aoki, B. Suemitsu, R. Miyazaki, A. Provino, and P. Manfrinetti: The effect of Au and

- Ni doping on the heavy fermion state of the Kondo lattice antiferromagnet CePtZn *J. Appl. Phys.* **115** (2014) 17E113 (3 pages).
- Y. Ogawa, H. Sato, M. Watanabe, T. Namiki, S. Tatsuoka, R. Higashinaka, Y. Aoki, K. Kuwahara, J. Yamaura, and Z. Hiroi: Electronic State of CeFe₄As₁₂ Investigated by Using Single Crystals Grown under High Pressure of 4 GPa, *J. Phys. Soc. Jpn.* **83** (2014) 034710 (7 Pages).
- 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. 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** (2014) 165107 (12 pages).
- N. Tateiwa, Y. Haga, T. D. Matsuda, E. Yamamoto, and Z. Fisk: Unconventional critical scaling of magnetization in ferromagnetic uranium superconductors UGe₂ and URhGe, *Phys. Rev. B* **89** (2014) 064420 (8 pages).
- N. Tateiwa, T. D. Matsuda, Y. Haga, and Z. Fisk: Pressure-induced ferromagnetism with strong Ising-type anisotropy in YbCu₂Si₂, *Phys. Rev. B* **89** (2014) 035127 (5 pages).
- S. Kambe, Y. Tokunaga, H. Sakai, T. D. Matsuda, Y. Haga, Z. Fisk, and R. E. Walstedt: NMR Study of In-Plane Twofold Ordering in URu₂Si₂, *Phys. Rev. Lett.* **110** (2013) 246406 (5 pages).
- T. D. Matsuda, N. Tateiwa, E. Yamamoto, Y. Haga, Y. Ouki, D. Aoki, J. Flouquet, and Z. Fisk: Magnetic phase diagram of UCoAl, *J. Kore. Phys. Soc.* **63** (2013) 575 (4 pages).
- H. Kotegawa, H. Nohara, H. Tou, T. D. Matsuda, E. Yamamoto, Y. Haga, Z. Fisk, Y. Onuki, D. Aoki, and J. Flouquet: Pressure evolution of the metamagnetic transition in UCoAl As measured using ⁵⁹Co NMR, *J. Kore. Phys. Soc.* **63** (2013) 341 (4 pages).
- N. Metoki, H. Sakai, E. Yamamoto, N. Tateiwa, T. D. Matsuda, and Y. Haga: Neutron Scattering Experiments for the Study of In-Plane Ordered Moment in URu₂Si₂, *J. Phys. Soc. Jpn.* **82** (2013) 055004 (2 pages).
- A. Nakamura, Y. Hiranaka, M. Hedo, T. Nakama, Y. Miura, H. Tsutsumi, A. Mori, K. Ishida, K. Mitamura, Y. Hirose, K. Sugiyama, F. Honda, R. Settai, T. Takeuchi, M. Hagiwara, T. D. Matsuda, E. Yamamoto, Y. Haga, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko, H. Harima, and Y. Ōnuki: Magnetic and Fermi Surface Properties of EuGa₄, *J. Phys. Soc. Jpn.* **82** (2013) 104703 (10 pages).
- A. Pourret, G. Knebel, T. D. Matsuda, G. Lapertot, and J. Flouquet: Magnetic Polarization and Fermi Surface Instability: Case of YbRh₂Si₂, *J. Phys. Soc. Jpn.* **82** (2013) 053704 (5 pages).
- Y. Takeda, Y. Saitoh, T. Okane, H. Yamagami, T. D. Matsuda, E. Yamamoto, Y. Haga, Y. Ōnuki, and Z. Fisk: Separation of magnetic properties at uranium and cobalt sites in UCoAl using soft x-ray magnetic circular dichroism *Phys. Rev. B* **88** (2013) 075108 (6 pages).
- N. Tateiwa, Y. Haga, T. D. Matsuda, Z. Fisk, S. Ikeda, and H. Kobayashi: Note: Improved sensitivity of magnetic measurements under high pressure in miniature ceramic anvil cell for a commercial SQUID, *Rev. Sci. Instrum.* **84** (2013) 046105 (3 pages).

2) 学会講演

● 日本物理学会 2013 年秋季大会 2013 年 9 月 25 日 (水)~28 日 (土) (徳島大学)

筒井智嗣, 金子耕土, 小林理気, 脇本秀一, A. Baron, 宮崎亮一, 青木勇二, 菅原仁, 佐藤英行:
Pr(Os_{1-x}Ru_x)₄Sb₁₂ における Pr 原子の非調和振動

前田佳俊, 小山岳秀, 水戸毅, 上田光一, 小原孝夫, 菅原仁, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト化合物
NdRu₄Sb₁₂ の ¹⁰¹Ru, ^{121/123}Sb の NQR 研究

青木勇二, 鎌田勇人, 伏屋健吾, 宮崎亮一, 東中隆二, 松田達磨, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト
PrRu₄P₁₂ の電子輸送特性: 伝導電子と強く結合した Pr 核スピン-4f 電子複合状態

東中隆二, 澤田潤, 山田瑛, 青木勇二, 佐藤英行: SmTi₂Al₂₀ における La 希釈効果

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: PrNb₂Al₂₀ の (Al, Nb)-NMR,
NQR による研究

池浦徹, 松原毅, 町田洋, 井澤公一, 酒井明人, 辻本真規, 中辻知, 中間章浩, 東中隆二, 青木勇二, 佐
藤英行: 極低温熱電能測定からみる PrT₂Al₂₀ (T=Ti, V, Ta) の電子状態

伏屋健吾, 宮崎亮一, 小野修平, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: 新奇ピーナッツ型カゴ状構造を有す
る Tm₆Cr₄Al₄₃ における特異な秩序状態

小野修平, 伏屋健吾, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: カゴ状化合物単結晶試料の低温熱電能測定 II

鈴木主翼, 野見山上総, 山田瑛, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨: Yb₂T₃X₅ (T: 遷移金属, X: Si, Ge, In)
の単結晶育成と物性

大原繁男, 小林拓也, 福田智寿, 山下哲朗, 松本裕司, 山浦淳一, 宗像孝司, 田中斗志貴, 松林和幸, 上
床美也, 南部雄亮, 宮崎亮一, 青木勇二: 希土類金属間化合物 RNi₃X₉ (R: 希土類金属, X: Al, Ga) の
カイラル構造とその磁性

神戸振作, 徳永陽, 酒井宏典, 松田達磨, 芳賀芳範, G. Lapertot, 青木大, J. Flouquet, J. Brison: 単
結晶 YbRh₂Si₂ の NMR

明比亮介, 小手川恒, 野原弘貴, 藤秀樹, 松田達磨, 山本悦嗣, 芳賀芳範, Z. Fisk, 大貫惇睦, 青木大,
J. Flouquet: UCoAl の圧力下 NMR 測定

山下卓也, 利根川翔, 鶴原悠悟, 芳賀芳範, 松田達磨, 山本悦嗣, 大貫惇睦, 芝内孝禎, 松田祐司: 重
い電子系超伝導体 URu₂Si₂ の異常ネルンスト効果

利根川翔, 笠原成, 鶴原悠悟, 水上雄太, 渡邊大樹, 福田竜生, 杉本邦久, 安田伸広, 芳賀芳範, 松田
達磨, 山本悦嗣, 大貫惇睦, 池田浩章, 松田祐司, 芝内孝禎: 放射光 X 線測定による URu₂Si₂ の隠れた
秩序相における斜方晶歪みの観測

後藤和基, 高津浩, 大塚博巳, 東中隆二, 門脇広明, J.W.Lynn, 佐藤卓, 松平和之, 広井善二, 松林和
幸, 上床美也: Dy₂Ti₂O₇ のカゴメアイス状態における磁気モノポールの二次元ダイナミクス

● 日本物理学会 第 69 回年次大会 2014 年 3 月 27~30 日 (東海大学)

翠川諒, 小野修平, 高橋洋介, 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 $\text{CeRu}_4\text{As}_{12}$ の高圧下高純度単結晶育成と物性

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: 遷移金属サイトにおける
NMR/NQR による $\text{PrT}_2\text{Al}_{20}$ の研究

前田佳俊, 小山岳秀, 水戸毅, 上田光一, 小原孝夫, 菅原仁, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト化合物
 $\text{NdRu}_4\text{Sb}_{12}, \text{EuRu}_4\text{Sb}_{12}$ の NMR, NQR 研究

川嶋源太, 荒木新吾, 小林達生, 東中隆二, 中間章浩, 青木勇二, 佐藤英行: 四極子自由度をもつ $\text{PrTa}_2\text{Al}_{20}$
の圧力効果

東中隆二, 島崎健太, 高橋洋介, 山田瑛, 松田達磨, 青木勇二: 異方的カゴ状構造を持つ RAu_3Al_7 (R
= Pr, Tm) の低温物性

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: 共鳴 X 線
回折による $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$ の磁場誘起秩序相の研究

中島拓也, 伏屋健吾, 浅野卓也, 水口佳一, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨: 層状化合物 CeOBiS_2 系超
伝導体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, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: LaOBiS_2 系超伝導体の単
結晶育成と物性測定

清水祐貴, 富田佑介, 小手川恒, 藤秀樹, 井澤宏輝, 水口佳一, 三浦大介, 浅野卓也, 中島拓也, 東中
隆二, 松田達磨, 青木勇二, 出村郷志, 出口啓太, 長尾雅則, 高野義彦: 新しい超伝導体 $\text{La}(\text{O}, \text{F})\text{BiS}_2$
の NMR/NQR による研究

今井勇輝, 伏屋健吾, 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

鈴木主翼, 伏屋健吾, 小野修平, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨: Yb-Au-In 系 三元化合物の単結晶育
成と物性

伏屋健吾, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: SmT_2X_2 (T : 遷移金属, X : Si, P) の単結晶育成と物性測定

木原工, 小濱芳允, 東中隆二, 山田瑛, 松田達磨, 青木勇二, 徳永将史: 高速比熱測定による電子系と
核スピン系の分離

松田達磨, 中島拓也, 浅野卓也, 水口佳一, 東中隆二, 青木勇二: 層状超伝導化合物 LnOBiS_2 系の単
結晶育成と物性

竹田幸治, 斎藤祐児, 岡根哲夫, 山上浩志, 松田達磨, 山本悦嗣, 芳賀芳範, 大貫惇睦, Z. Fisk: 軟 X
線内殻吸収磁気円二色性による UCoAl の元素選択的磁化測定

松本裕司, 芳賀芳範, 立岩尚之, 山本悦嗣, 松田達磨, Z. Fisk: UPtIn 及び UTC_2 (T =遷移金属) の
結晶育成と物性

谷口智洋, 脇田美香, 東中隆二, 後藤和基, 高津浩, 門脇広明, 池田陽一, 吉澤英樹, J. W. Lynn, J.
Ollivier, B. Fak: 純良単結晶による $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$ の長距離秩序の研究

国内研究会

● 東京大学物性研究所 短期研究会「強相関電子系における局所対称性の破れと量子物性」
東京大学柏の葉キャンパス, 2013年11月27-29日

青木勇二, 伏屋健吾, 東中隆二, 松田達磨: 新規カゴ状構造に発現する特異な f 電子状態の探索 (口頭)

● 琉球大学 第13回琉球物性研究会
琉球大学 理系複合棟, 2013年12月14日(土)

伏屋健吾, 宮崎亮一, 東中隆二, 青木勇二, 佐藤英行: 新奇ピーナツ型カゴ状構造を有する $Tm_6Cr_4Al_{43}$ における特異な秩序状態

山田瑛, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二, 佐藤英行: $SmTa_2Al_{20}$ における磁場に鈍感な強相関電子物性

松田達磨, 中島拓也, 浅野卓也, 水口佳一, 東中隆二, 青木勇二: $ROBiS_2$ 系超伝導体 (R: 希土類) の単結晶育成と物性

● 首都大学東京 新超伝導体研究会 (TMUNSC 2014) 2014年3月26日(水)
首都大学南大沢キャンパス 国際交流会館

松田達磨, 中島拓也, 浅野卓也, 水口佳一, 東中隆二, 青木勇二: $RO_{1-x}F_xBiS_2$ 系超伝導体 (R: 希土類) の単結晶育成と物性

浅野卓也, 伏屋健吾, 中島拓也, 水口佳一, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: $LaOBiS_2$ 系超伝導体の単結晶育成と物性測定

小野修平, 伏屋健吾, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: BiS_2 系層状超伝導体 $NdO_{1-x}F_xBiS_2$ ($x=0.2, 0.5$) の輸送特性

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

伏屋健吾, 東中隆二, 松田達磨, 青木勇二: $SmPt_2Si_2$ の単結晶育成と物性測定

今井勇輝, 伏屋健吾, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨: $LnGa_6$ ($Ln=La\sim Lu$) の単結晶試料育成及び物性

鈴木主翼, 伏屋健吾, 小野修平, 東中隆二, 青木勇二, 松田達磨: Yb-Au-In 系 三元化合物の単結晶育成と物性

国際会議

● Strongly Correlated Electron Systems 2013 (SCES 2013), University of Tokyo, Tokyo, Japan, Aug. 5 - 9, 2013

Y. Aoki, Y. Kamata, R. Higashinaka, K. Fushiya, R. Miyazaki, H. Sato: Strong coupling of conduction electrons with the 4f-electron-nuclear-spin composite states in filled skutterudite $PrRu_4P_{12}$ (oral)

K. Fushiya, Y. Aoki, R. Miyazaki, S. Ono, R. Higashinaka, H. Sato: Tm-based Kondo effect and possible multipole ordering in peanut-shaped cage structure compound $Tm_6Cr_4Al_{43}$

- S. Tsutsui, K. Kaneko, R. Miyazaki, R. Higashinaka, Y. Aoki, R. Kobayashi, S. Wakimoto, A. Baron, H. Sugawara, H. Sato : Relationships between Anharmonic Pr Guest Modes and Electronic States in $\text{Pr}(\text{Os}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sb}_{12}$
- K. Magishi, T. Kusaka, A. Hisada, T. Saito, K. Koyama, H. Sugawara, Y. Sekihara, K. Tanaka, H. Aoki, H. Sato : NMR/NQR Studies of Filled Skutterudite $\text{La}_{0.5}\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$
- R. Higashinaka, A. Yamada, R. Miyazaki, M. Mizumaki, S. Tsutsui, K. Nitta, T. Uruga, G. Nenert, L. Chapon, Y. Aoki, H. Sato : The valence state and possible parameters of the field-insensitive magnetic transition in $\text{SmTr}_2\text{Al}_{20}$
- A. Yamada, R. Higashinaka, R. Miyazaki, K. Fushiya, Y. Aoki, H. Sato, M. Mizumaki, S. Tsutsui, K. Nitta, T. Uruga : Single crystal growth and low-temperature physical properties of cage structure compound $\text{SmTa}_2\text{Al}_{20}$
- T. Kubo, H. Kotegawa, H. Tou, R. Higashinaka, A. Nakama, Y. Aoki, H. Sato : An Al-NMR study of the Pr-based heavy fermion system $\text{PrNb}_2\text{Al}_{20}$
- N. Ogita, R. Miyazaki, S. Tsutsui, T. Hasegawa, R. Higashinaka, D. Kikuchi, Y. Aoki, H. Sugawara, H. Sato, M. Udagawa : Crystal Electric Field study of $\text{Pr}(\text{Os}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sb}_{12}$ by Raman scattering
- W. Knafo, T. Matsuda, D. Aoki, F. Hardy, G. Scheerer, M. Nardone, A. Zitouni, C. Meingast, J. Flouquet, G. Ballon : High-field moment polarization in U-based ferromagnetic superconductors
- T. Matsuda, H. Sakai, E. Yamamoto, Y. Haga, Y. Onuki, Z. Fisk : Crystal Growth and Physical Properties of Actinide 122 Compounds
- Y. Matsumoto, H. Aoki, N. Kimura, N. Tateiwa, T. Matsuda, E. Yamamoto, Z. Fisk, H. Yamagami : Kondo effect in Cerium lattice system: view point from quantum oscillation study on CeRu_2Si_2 , $\text{Ce}_x\text{La}_{1-x}\text{Ru}_2\text{Si}_2$ and ThRu_2Si_2
- Y. Matsumoto, Y. Haga, N. Tateiwa, H. Sakai, T. Matsuda, E. Yamamoto, Z. Fisk : Magnetic Property of New Uranium Compound URhIn_5
- G. Knebel, A. Pourret, M. Boukahil, D. Aoki, G. Lapertot, T. Matsuda, J. Flouquet : Field-Induced Fermi Surface Instability in YbRh_2Si_2
- H. Kotegawa, R. Akebi, H. Tou, T. Matsuda, E. Yamamoto, Y. Haga, Z. Fisk, Y. Onuki, D. Aoki, J. Flouquet : NMR Investigation of Quantum Critical End Point in UCoAl
- N. Metoki, H. Sakai, M. Suzuki, E. Yamamoto, Y. Haga, T. Matsuda, S. Ikeda : Metal-Insulator Crossover in Uranium Dichalcogenides

ナノ物性I研究室

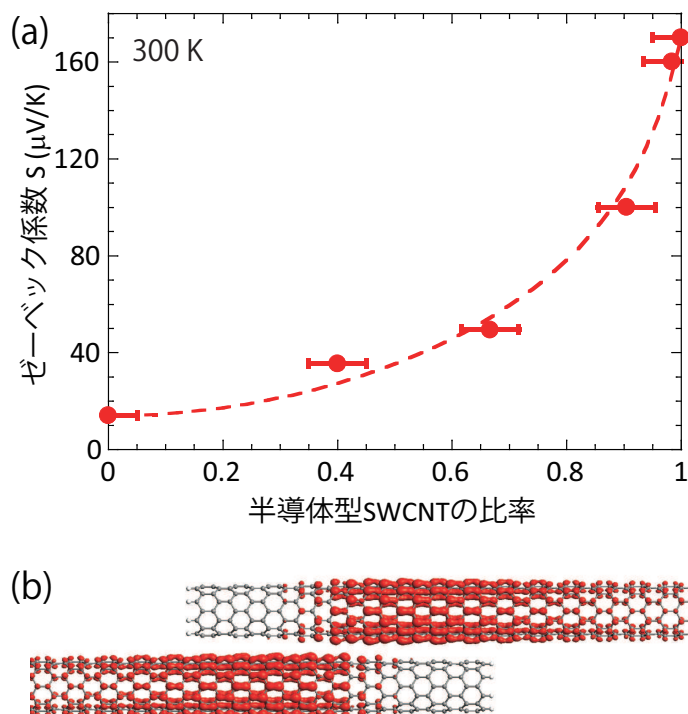
1. 研究活動の概要

カーボンナノチューブ (CNT), ゼオライト, フラーレン, 単原子層物質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を物性実験の種々の手法を用いて研究している. 2013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に行われていない. 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, 平均直径が1.4 nm程度の第二世代SWCNT試料について熱電物性の研究を行った. 半導体型SWCNTと金属型SWCNTの混合比を変えたSWCNTフィルムを作製してゼーベック係数を測定した. 半導体型SWCNTの割合が増えるとゼーベック係数は単調に増大し, 高純度半導体型SWCNTフィルムでは, 市販 Bi_2Te_3 系材料に匹敵する $170 \mu\text{V}/\text{K}$ となることを見いだした. また, その発現機構としてSWCNT界面による熱起電力発生が重要であることを指摘した. (本田修士論文)



第三世代SWCNT試料による研究では, 指数 $(6,5)$ を濃縮したSWCNTおよび $(6,6)$ と $(7,4)$ を濃縮した金属型SWCNT試料についての粉末X線回折 (XRD) パターンを詳細に解析し, XRD法がSWCNT試料に含まれるSWCNTの種類を評価する方法として有効であることを見出した. さらに, SWCNTの構造についての詳細な情報が得られることが分かった. 実際, $(6,5)$ SWCNTはグラフェンリボンのロー

ルアップ構造より太さ方向に約 1%大きくなり、チューブ軸方向へは変化しないことが示された。(光山修士論文)

2) 制限空間内の水

水はあらゆるところに存在する。地殻や土壌、生体内部や大気中、宇宙空間にさえ存在する。水はごくありふれた物質である。しかしその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 °C で密度が最大になるなどの水の異常の起源について議論されている。このような水は、微細な空間内あるいは幾何学的に強く束縛された条件下においても存在し、自然界における様々な現象において支配的な役割を担っている。また微細空間内の水の理解は、プロトン伝導体や新規分離膜などの開発においても重要である。

本年度、SWCNT やゼオライト 鋳型炭素 (ZTC) などのナノ構造物質を用いて、原子スケールからバルク領域に至る微細空間内の水の物性研究を行った。ZTC 内の水は 200 K 以下まで液体的であり、高温ではバルク水と同様に高密度的であるが、220 K 近傍以下では低密度の液体となり、さらに 150 K 近傍以下でガラス転移を示すことを見出した。このガラス転移は、通常と異なり極めて小さい比熱の飛びをしめすことが議論された。また本グループでは、太い SWCNT (直径が 1.5 nm 程度以上) において、SWCNT 内に吸着された水が低温で外部に排出される wet-dry 転移を示すことを提案している。本年度、この wet-dry 転移の顕微鏡による直接観察を試みた。また太い SWCNT 内の水の構造を XRD 実験により調べ、wet-dry 転移機構の詳細を検討し、wet-dry 転移が液-液転移と密接に関連している可能性が議論された。(客野博士論文)

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 $C_{12}A_7$ 、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。本年度は、精製処理により磁性不純物を除去した太い SWCNT 試料を用いて、 ^{13}C -NMR 測定を行った。スピン格子緩和時間を測定し、1 次元金属特有の朝永-ラッティンジャー的電子状態を有することを確認した。

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 (TMD) 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、単層の WS_2 および MoS_2 からなるヘテロ接合の形成について合成と評価を進めてきた。特に、良質な WS_2 や MoS_2 の二次元結晶の成長を確立し、この 2 種類の結晶成長を、同一基板上で行うことによって WS_2/MoS_2 のヘテロ構造を作製に初めて成功した。このような二次元半導体ヘテロ構造は、界面での一次元電子ガスの実現や pn 接合等のデバイス応用への展開が期待される。(森卒業論文)

5) 高品質グラフェンナノリボンの作製と電気伝導特性評価

グラフェンの一次元結晶とも見なせるグラフェンナノリボン (GNR) は、高いキャリア移動度、またエッジ状態に起因する特異な電子・磁気物性より大きな注目を集めている。このような物性解明に向け、高い結晶性を有する GNR 試料の作製が強く望まれている。この課題を解決するために、作製プロセスで重要となるグラフェンの化学反応性について調べた。特筆すべきは、グラフェンの反応性が、成長時の結晶性ではなく基板由来の格子歪みに大きく依存することを示唆する結果が得られた点である。このよ

うな基板の効果は、グラフェンの微細加工や機能化に関する重要な知見になると考えられる。(井上卒業論文)

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

有機電荷移動錯体 β' -(BEDT-TTF)₂ICl₂ は常圧、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、常圧における電子状態がどのような電子状態を経由して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 (Si₃N₄) を試してきた。WC では 80 トン (約 8 GPa) まで信号を観測できたが、アンビル中の強磁性的バインダーのために、その磁気的ヒステリシスに起因する信号のベースラインの大きな歪みが問題であった。また、Si₃N₄ では、強磁性による問題は無くなったが、80 ton 付近で信号が観測できなくなりアンビルが壊れている事が確認され、その強度に難点があった。今年度は、Si₃N₄ よりも粘り気があり耐圧性が大きいと期待されるジルコニア (ZrO₂) アンビルを用いて加圧測定を行った。その結果、95 ton まで加圧する事ができ、強磁性によるものとは別のベースラインの歪みが乗ってはいしたが、解析に耐える信号を得ることができた。圧力較正をまだ行っていないが、ESR 強度較正用の標準試料 DPPH の ESR 線幅の増加から、圧力が期待通り 9 GPa 程度かかっていると考えられる。また、30 ton (約 3 GPa) において、室温~77 K の温度変化も測定でき、 β' -(BEDT-TTF)₂ICl₂ 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 Si₃N₄ アンビルによる 5 GPa のデータとコンシステントであった。ベースラインの歪みは、リード線の配線の形状、引き回し方やアースの取り方に影響されていると思われる、今後はこの点の改善を目指したい。(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): ナノ構造炭素内に吸着された物質の構造物性 (2012G706)。CREST および傾斜的研究費学長裁量枠 (全学,H22-24) の研究成果の一部について特許出願 1 件を行った。また、カーボンナノチューブが熱電変換素子材料として優れた性能を有する発見について、首都大、JST、理科大よりプレスリリースを行った。オープンユニバーシティ「ノーベル賞の物質科学 2」を開講し、核磁気共鳴を使った MRI の原理や極低温物理学の世界を紹介した。(2013 年 8 月 3 日実施、南大沢キャンパス理工棟)

2. 研究業績

1) 論文

Ryo Mitsuyama, Shin Tadera, Haruka Kyakuno, Ryosuke Suzuki, Hiroyoshi 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 in press.

Yusuke Nakai, Kazuya Honda, Kazuhiro Yanagi, Hiromichi Kataura, Teppei Kato, Takahiro Yamamoto, and Yutaka Maniwa: Giant Seebeck coefficient in semiconducting single-wall carbon nanotube film Appl. Phys. Express 7 (2014) 025103.

Haruka Kyakuno, Kazuyuki Matsuda, Yusuke Nakai, Tomoko Fukuoka, Yutaka Maniwa, Hiroto Nishihara, Takashi Kyotani : Amorphous water in three-dimensional confinement of zeolite-templated carbon Chem. Phys. Lett. 571 (2013) 54-60.

Y. Nakanishi, H. Omachi, S. Matsuura, Y. Miyata, R. Kitaura, Y. Segawa, K. Itami, H. Shinohara : Size-Selective Complexation and Extraction of Endohedral Metallofullerenes with Cycloparaphenylene, Angew. Chem., Int. Ed., 53 (2014) 3102.

S. Zhao, Y. Miyata, H. Shinohara, R. Kitaura : Direct observation of zipper-like wall-to-wall coalescence of double-wall carbon nanotubes, Carbon, 71 (2014) 159.

Y. Sun, R. Kitaura, J. Zhang, Y. Miyata, H. Shinohara : Metal catalyst-free mist flow chemical vapor deposition growth of single-wall carbon nanotubes using C₆₀ colloidal solutions, Carbon, 68 (2014) 80.

H. Nagai, Y. Okazaki, S. H. Chew, N. Misawa, Y. Miyata, H. Shinohara, S. Toyokuni : Intraperitoneal administration of tangled multiwalled carbon nanotubes of 15nm in diameter does not induce mesothelial carcinogenesis in rats, Pathology International 63 (2013) 457.

T. Koyama, S. Yoshimitsu, Y. Miyata, H. Shinohara, H. Kishida, A. Nakamura : Transient Absorption Kinetics Associated with Higher Exciton States in Semiconducting Single-Walled Carbon Nanotubes: Relaxation of Excitons and Phonons, J. Phys. Chem. C 117 (2013) 20289.

H. E. Lim, Y. Miyata, R. Kitaura, Y. Nishimura, Y. Nishimoto, S. Irle, J. H. Warner, H. Kataura, H. Shinohara : Growth of carbon nanotubes via twisted graphene nanoribbons, Nature Commun. 4 (2013) 2548.

J. Zhang, F. Zhou, Y. Miyata, R. Kitaura, H. Su, H. Shinohara : Chirally selective growth and extraction of single-wall carbon nanotubes via fullerene nano-peapods, RSC Adv. 3 (2013) 16954.

B. Thendie, Y. Miyata, R. Kitaura, Y. Miyauchi, K. Matsuda, H. Shinohara, Rapid Single-Stage Separation of Micrometer-Long and High-Purity Semiconducting Carbon Nanotubes by Gel Filtration, Appl. Phys. Express 6 (2013) 065101.

T. Koyama, S. Shimizu, Y. Miyata, H. Shinohara, A. Nakamura : Ultrafast formation and decay dynamics of trions in p-doped single-walled carbon nanotubes, Phys. Rev. B 87 (2013) 165430.

D. Choi, Q. Wang, Y. Azuma, Y. Majima, J. H. Warner, Y. Miyata, H. Shinohara, R. Kitaura : Fabrication and Characterization of Fully Flattened Carbon Nanotubes: A New Graphene Nanoribbon Analogue, Sci. Rep. 3 (2013) 1617.

M. Tsuburaya, H. Sakamoto, and K. Mizoguchi: Electronic states of DNA and M-DNA studied by optical absorption, Phys. Rev. E 89 (2014) 022719 (1-7) (DOI: 10.1103/PhysRevE.89.022719)

Shunsaku Kitagawa, Tetsuya Iye, Yusuke Nakai, Kenji Ishida, Cao Wang, Guang-Han Cao, Zhu-An Xu : Relationship between Superconductivity and Antiferromagnetism in LaFe(As_{1-x}P_x)O Revealed by ³¹P-NMR J. Phys. Soc. Jpn. 83 (2014) 023707.

Y. Nakai, T. Iye, S. Kitagawa, K. Ishida, S. Kasahara, T. Shibauchi, Y. Matsuda, H. Ikeda and T. Terashima : Normal-state spin dynamics in the iron-pnictide superconductors $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ and $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ probed with NMR measurements Phys. Rev. B 87 (2013)174507(1-10).

2) 国際会議報告

Y. Ezoe, K. Mitsuda, M. Mita, M. Koshiishi, Y. Ishisaki, K. Shinozaki, A. Hoshino: Research and development of MEMS x-ray optics, *SPIE* **5900** (2005) 328–337

J. Cottam, K. R. Boyce, G. V. Brown, R. Fujimoto, T. Furusho, Y. Ishisaki, R. L. Kelley, C. A. Kilbourne, D. McCammon, K. Mitsuda, U. Morita, F. S. Porter, T. Saab, Y. Takai, M. Yamamoto: The XRS Microcalorimeter on Astro-E2, in *X-RAY DIAGNOSTICS OF ASTROPHYSICAL PLASMAS: Theory, Experiment, and Observation*. AIP Conference Proceedings, **774** (2005) 379-382

M. Ishida: Density Diagnostics of the Hot Plasma in AE Aquarii with XMM-Newton, Proceedings of the *The X-ray Universe 2005*, El Escorial, Madrid, Spain, ESA SP-604 (2006) 145–150

3) 学会講演

● 28th International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials (IWEPNM) Austria, 2014年3月12日

Yasumitsu Miyata : Controlled growth of graphene-related materials using carbon nanostructures with well-defined edges (招待講演)

● ナノフォトニクスシンポジウム 2013年7月18日 (慶応義塾大学)

宮田耕充 : カーボンナノチューブ・グラフェンの精密構造制御と光物性 (招待講演)

● 第45回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 大阪大学

Kenshi Miyaura, Yasumitsu Miyata, Ryo Kitaura, Hisanori Shinohara : Structure and electronic properties of pi-conjugated polymers formed in carbon nanotubes

Eri Inukai, Yasumitsu Miyata, Ryo Kitaura, Hisanori Shinohara : Gas adsorption properties of gel-immobilized ultrathin carbon nanotubes

Eriko Maeda, Yasumitsu Miyata, Ryo Kitaura, and Hisanori Shinohara : Shape-controlled synthesis of graphene and h-BNboron nitride heterostructures

Hong En Lim, Yasumitsu Miyata, Ryo Kitaura, Yoshifumi Nishimura, Yoshio Nishimoto, Stephan Irle, Jamie H. Warner, Hiromichi Kataura and Hisanori Shinohara : Carbon Nanotubes Growth via Twisted Graphene Nanoribbons

中井祐介, 本田和也, 宮田耕充, 柳和宏, 真庭豊 : 高純度半導体型単層カーボンナノチューブバッキーペーパーの熱電能

市村陵太, 宮田耕充, 中井祐介, 柳和宏, 真庭豊 : 高温ゲル濾過法による直径 1.1 nm 単層カーボンナノチューブの濃縮

● The 5th International Conference on Recent Progress in Graphene Research, Sep. 9-13, 2013, Tokyo, Japan.

Eriko Maeda, Yasumitsu Miyata, Hiroki Hibino, Ryo Kitaura, Hisanori Shinohara : Epitaxial growth of graphene and boron nitride lateral heterostructures

● 第 46 回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 東京大学

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

井上凌介, 宮田耕充, 真庭豊 : Influence of growth substrates on chemical reactivity of CVD graphene

Boanerges THENDIE, Yasumitsu MIYATA, Haruka OMACHI, Ryo KITAURA, Yuhei MIYAUCHI, Kazunari MATSUDA, and Hisanori SHINOHARA : Rapid separation of micrometer-long and high-purity semiconducting carbon nanotubes by gel filtration

芹田昇, 中井祐介, 宮田耕充, 真庭豊, 斎藤毅 : ^{13}C を濃縮した単層カーボンナノチューブにおける NMR 測定

上田智大, 中井祐介, 宮田耕充, 真庭豊 : 単層カーボンナノチューブにおける物質内包によるゼーベック係数の制御

● 2014 年 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 青山学院大学相模原キャンパス

森勝平, 宮田耕充, 真庭豊 : 遷移金属ダイカルコゲナイドにおけるヘテロ接合の合成と評価

井上凌介, 宮田耕充, 真庭豊 : グラフェンの化学反応性における成長基板の影響

● 日本化学会第 94 春季年会 (2014), 名古屋大学

前田枝里子, 宮田耕充, 日比野浩樹, 北浦良, 篠原久典 : グラフェンおよび六方晶窒化ホウ素複合シート of 創成と接合界面の評価

宮浦健志, 宮田耕充, 柳和宏, 大町遼, 北浦良, 篠原久典 : カーボンナノチューブ内部で形成された π 共役系高分子へのキャリアドーピング

● 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学 2013 年 9 月

客野遙, 松田和之, 中井祐介, 宮田耕充, 真庭豊, 斎藤毅, 片浦弘道 : 単層カーボンナノチューブに内包された水の研究 (26pKN-2)

本田和也, 中井祐介, 柳和宏, 真庭豊 : 単層カーボンナノチューブの熱電物性の研究 I (25aDF-13)

光山遼, 田寺真, 客野遙, 中井祐介, 宮田耕充, 柳和宏, 片浦弘道, 真庭豊 : 単層カーボンナノチューブのカイラリティの同定 (25aDF-9)

● 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学 湘南キャンパス 2014 年 3 月

中井祐介, 芹田昇, 宮田耕充, 真庭豊, 斎藤毅 : e-DIPS 法により作成された単層カーボンナノチューブの ^{13}C NMR 測定 (27aPS-112)

溝口憲治, 糸田翼, 坂本浩一:凍結乾燥法による Zn-DNA の電子状態と水分子による磁性制御 (28aAN-6)

塚田諒, 市村遼太, 芹田昇, 中井祐介, 宮田耕充, 齋藤毅, 真庭豊:カーボンナノチューブにおける磁性の直径依存性 (28aCL-9)

客野遥, 松田和之, 中井祐介, 宮田耕充, 真庭豊, 齋藤毅:単層カーボンナノチューブに内包された水の研究 II (28pAC-8)

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, 齋藤毅, 真庭豊:水・カーボンナノチューブ複合体の比熱 (28pAC-9)

坂本浩一, 森英一, 生井圭一郎, 田原弘之, 有元秀行, 溝口憲治, 矢持秀起, 平松孝章, 内藤俊雄:STMによる有機結晶の結晶構造と表面再構成の相関 (29pCL-9)

真庭豊:ナノ構造炭素に拘束された水の構造と相転移 (30aAQ-7)

● 日本学術振興会 産学連携「水の先進理工学」第 183 委員会「水の先進理工」にて講演

「ナノ構造炭素内の水の研究」真庭豊 (2014 年 1 月 28 日, 東京理科大学)

ナノ物性II研究室

1. 研究活動の概要

ナノ構造体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、およびそれらの凝集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、電気二重層によるキャリア注入制御を物性制御手法として用いて進めている。

1) ナノ構造体における光物性とその制御

近年になり SWCNT の高純度精製技術が進展し、一様な電子構造を備える SWCNT が得られつつある。その結果、電子構造に依存して特定の吸収帯が可視領域に形成され、鮮やかな色を示す SWCNT を得ることが可能になっている。我々のグループは世界に先駆けて、シアン・マゼンタ・イエロー色の色の三原色を有する試料を SWCNT で得られることを明らかにし、そしてその色を電気化学ドーピングの手法を用いることにより能動的制御可能であることを明らかにしてきた。

SWCNT の光吸収は、一次元性に由来して存在する状態密度の発散点 (ファンホープ特異点) 間の電子遷移に起因する吸収帯、および物理的背景が未だに解明されていない紫外領域に存在する吸収帯、の二種類が存在する。これまでは、前者を高密度キャリア注入により制御可能であることを明らかにしてきた。今年度は、後者の紫外吸収の物理的背景を明らかにすることを目標に研究を進めた。紫外領域 (4.5eV) 付近に存在する光吸収を制御する為には、従来より大きな電位変化を与える必要性があった。しかしながら、室温においては、電気化学反応が起こり、可逆変化を行うことが困難であることが分かった。よってその問題を解決する為、低温 (-40度) において電気化学測定が可能な系を新たに構築し、低温における光電気化学測定を行った。単一カイラリティ試料に同測定を行うことにより、高密度なキャリア注入により、紫外領域の吸収強度が減少するとともに、新たな吸収帯が近赤外領域に出現することを明らかにした。注入キャリア依存性から、同吸収帯の物理的背景を軸と垂直方向の表面プラズモン由来と特定することに成功した。

高純度半導体型 SWCNT は、赤外線受光素子応用が十分に可能な大きな熱抵抗変化率 (TCR 値=-1.4 %K⁻¹) を示すことを、申請者は近年明らかにした。本課題では、NEC社が開発してきたデバイス構造に、申請者が開発してきた高純度単一カイラリティ半導体型 SWCNT を組み込むことで、室温で世界最高性能の感度を備え、且つ、塗布形式によるデバイス構築可能な赤外線受光素子の開発を行った。本研究によって、既存の酸化バナジウム (TCR 値=-2.0 %K⁻¹) より良好な TCR 値 (-2.6 %K⁻¹) を示す高純度単一カイラリティ半導体型 SWCNT ボロメータの作成に成功した。またイオンゲルによる電気二重層による精密ドーピング制御により、TCR 値を制御可能であることを明らかにした。また、ポリイミド上にパリレンによる熱断熱層を形成したプラスチック基板上に同ボロメータを形成した赤外線受光素子は、良好な受光性能を示し、温度分解能が 50mK を備え、人間の体温の検出も非冷却の状態でも可能であることを明らかにした (図1)。

2) ナノ構造体における電子物性とその制御

本研究では、早稲田大学 竹延大志先生との共同研究によって得られた以下の研究成果を記述する。我々は、伸縮性を有する基板上に高密度な半導体型 SWCNT 膜を用いたイオンゲル電気二重層トランジスタ (ECT) を作製し世界に先駆けて s-SWCNT 厚膜を用いた伸縮性高性能エレクトロニクス基板を構築することを目標に研究を行っている。特に、PDMS (ジメチルポリシロキサン) 基板への s-SWCNT 厚膜転写技術の確立、電極およびイオンゲル膜の伸縮性テスト、PDMS 基板上での素子作製および伸縮性

を含めた特性測定、の三つの課題を達成することを目標に研究を進めている。その結果として、今年度において19%の伸縮性を備える電界効果型トランジスタを作製することに成功した。はじめにソース・ドレイン電極を形成したPDMS基板を延伸させ、延伸させた状況下において、密度勾配遠心分離精製によって得たs-SWCNT厚膜の転写を行った。その結果、巧妙にWavyな薄膜構造となったs-SWCNTチャネルの形成に成功した。同チャネルに対して、伸縮性テストを行ったところ、19%まで延伸させた状況においてもON/OFF電流、および移動度がほぼ一定値を示すことを明らかにした。

3) ナノ構造体における熱物性とその制御

昨年度、ナノ物性I研究室の中井先生・真庭先生らと共同で、半導体型SWCNTネットワークが巨大なゼーベック係数を示すことを明らかにした。今年度は、電気二重層によるキャリア注入制御により、ゼーベック係数を制御可能かどうか調べる為の基礎研究を行った。結果として、電気二重層を用いたキャリア注入により、p型・n型、および連続的にゼーベック係数を制御できるという知見を得ることに成功した。

4) ナノ構造体の配列制御技術の開発

ナノ物質の規則配列集合体を形成することにより、単体では見られない物性が現れることが知られている。SWCNTにおいては、これまで結晶状試料は得られておらず、その規則配列集合体の物性は全くの未解明領域となっている。よって、我々は、自己組織的集合体形成技術の開発、およびその物性解明を重要な課題の一つとして捉えて、研究を進めている。SWCNTがランダムに配列したネットワークにおいては、そのランダム性に由来して、必然的に伝導電子は局在し、界面において散乱されてしまう。このような伝導特性の劣化を改善する為にも、SWCNTが規則正しく配列した配列集合体を作製する必要がある。本研究では、単一カイラリティ精製を行ったSWCNTに対し、その結晶作製技術の開発を行っている。昨年度は、溶液中の温度と反応時間を調整することにより、糸状の集合体が形成されることを明らかにした。しかし、同技術では加熱により不可避に熱によるランダム性を誘発する要因があった。同問題を解決する為、今年度は、界面活性剤の結晶を鋳型として用いた自己組織的配列集合体形成に成功し、極めて配向度の良い集合体形成に成功した。得られた配向集合体をチャネルに用いたEDLTを作製しキャリア注入を行ったところ、ON/OFF比= 8×10^5 のデバイス素子が形成可能であることを明らかにした(図2)。

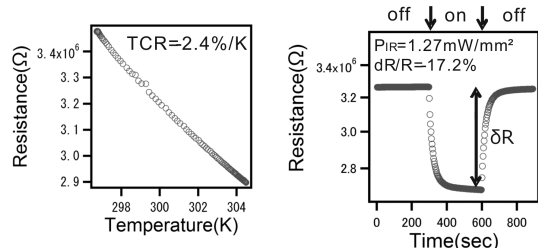


図 1: 高純度半導体型SWCNTのTCR値とIR照射による抵抗変化

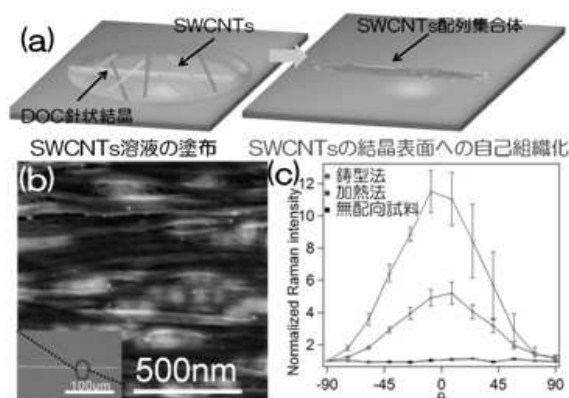


図 2: 鋳型法によって作製した新規SWCNT配向集合体

2. 研究業績

1) 論文

M. Sauer, H. Shiozawa, P. Ayala, G. Ruiz-Soria, X. Liu, K. Yanagi, H. Kataura, S. Krause, T. Pichler: Environmental stability of ferrocene filled in purely metallic single-walled carbon nanotubes, *Physica Status Solidi (B)* **250** (2013) 2599–2604

M. Kharlamova, M. Sauer, T. Saito, S. Krause, X. Liu, K. Yanagi, T. Pichler, H. Shiozawa: Inner tube growth properties and electronic structure of ferrocene-filled large diameter single-walled carbon nanotubes, *Phys. Stat. Sol. (B)* **250** (2013) 2575–2580

A. Briones-Leon, P. Ayala, X. Liu, K. Yanagi, E. Weschke, M. Eisterer, H. Jiang, H. Kataura, T. Pichler, H. Shiozawa,: Orbital and spin magnetic moments of transforming one-dimensional iron inside metallic and semiconducting carbon nanotubes, *Phys. Rev. B* **87** (2013) 195435

H. Kawai, K. Hasegawa, T. Nakatsu, Y. Naitoh, T. Takagi, T. Wada, T. Takenobu, K. Yanagi,: String-like Assembly of Aligned Single-Wall Carbon Nanotubes in a Single-Chiral State, *Appl. Phys. Express* **6** (2013) 065103

M. Ichida, S. Saito, Y. Miyata, K. Yanagi, H. Kataura, H. Ando: Intra- and inter-tube excitation relaxation dynamics in high purity semiconducting and metallic single-walled carbon nanotubes, *Eur. Phys. J. B* **86** (2013) 45

M. Sauer, H. Shiozawa, P. Ayala, G. Ruiz-Soria, X. Liu, A. Chernov, S. Krause, K. Yanagi, H. Kataura, T. Pichler: Internal charge transfer in metallicity sorted ferrocene filled carbon nanotube hybrids, *Carbon* **59** (2013) 237-245

Y. Takagi, Y. Nobusa, S. Gocho, H. Kudou, K. Yanagi, H. Kataura, T. Takenobu: Inkjet printing of aligned single-walled carbon-nanotube thin films, *Appl. Phys. Lett.* **102** (2013) 143107

K. Yanagi, R. Moriya, T. Cuong, M. Otani, S. Okada: Charge manipulation in molecules encapsulated inside single-wall carbon nanotubes, *Phys. Rev. Lett.* **102** (2013) 86801

K. Matsuda, K. Yanagi, H. Kyakuno, S. Sagitani, H. Kataura, Y. Maniwa: ¹³C-NMR shift of highly concentrated metallic and semiconducting single-walled carbon nanotubes, *J. Phys. Soc. Jpn.* **82** (2013) 15001

2) 国際会議報告

● NT13 2013年6月24日～6月29日 (Aalto Univ., Finland)

H. Kawai, K. Hasegawa, T. Nakatsu, Y. Naito, Y. Takagi, Y. Wada, T. Takenobu, K. Yanagi: String-like Assembly of Aligned Single-Wall Carbon Nanotubes in a Single-Chiral State (Poster)

Markus Sauer, , Hidetsugu Shiozawa, , Georgina Ruiz-Soria , Hiromichi Kataura, Kazuhiro Yanagi, Stefan Krause, Thomas Pichler: Tunable metallicity dependent p-type doping in single-walled carbon nanotubes (Poster)

G. Ruiz-Soria, M. Sauer, A. Perez, D. Mowbray, P. Lacovig, M. Dalmiglio, S.Lizzit, K. Yanagi, A. Goldoni, A. Rubio, P. Ayala, T. Pichler: Understanding the Nox adsorption mechanisms on metallicity-sorted single-walled carbon nanotubes (Poster)

Y. Takagi, Y. Oshima, K. Yanagi, T. Takenobu: Solution growth of carbon-nanotube wires (Poster)

Y. Wada, J. Pu, Y. Takagi, K. Yanagi, T. Takenobu: Electrolyte Gated Transistors of Aligned carbon nanotube thin film (Poster)

Julio Chacon, Markus Sauer, Ludger Wirtz, Hiromichi Kataura, Kazuhiro Yanagi, Hidetsugu Shiozawa, Paola Ayala, Thomas Pichler: metrology using doped single-wall carbon nanotubes and graphite intercalation compounds (Poster)

● International Conference on Solid State Device and Materials (SSDM2013), 2013年9月24日～9月27日 (Fukuoka, Japan)

H. Hamahata, Y. Nobusa, K. Yanagi, Y. Iwasa and T. Takenobu: Stretching properties of single-walled carbon nanotube film transistor (口頭)

R. Shimizu, J. Pu, T. Fujimoto, Y. Zhang, K. Yanagi, Y. Iwasa and T. Takenobu: Single-Walled Carbon-Nanotube P-N Junction Diode for Optoelectronics (口頭)

● International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2014), 2014年11月4日～11月7日 (Sapporo, Japan)

H. Hamahata, Y. Nobusa, K. Yanagi and T. Takenobu: Stretchable Single-walled Carbon-nanotube Film Transistors (口頭)

● International Conference on Small Science, 2013年12月15日～12月18日 (Las Vegas, USA)

K. Yanagi: Charge Manipulation in molecules encapsulated inside Single-Wall Carbon Nanotubes (招待講演)

● International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials, 2014年3月8日～3月15日 (Austria)

K. Yanagi: Charge Manipulation in molecules encapsulated inside single-wall carbon nanotubes (招待講演)

3) 学会講演

● 第45回フラーレンナノチューブグラフェンシンポジウム 2013年8月5日 - 8月7日 (大阪大学)

市村 遼太, 宮田 耕充, 中井 祐介, 柳 和宏, 真庭 豊: 高温ゲル濾過法による直径 1.1nm 単層カーボンナノチューブの濃縮 (ポスター)

河合英輝, 長谷川凱, 中津亨, 内藤泰久, 高木勇樹, 和田義史, 竹延大志, 柳和宏: 単一カイラリティ単層カーボンナノチューブにおける自己組織的配列集合体形成と電気伝導特性 (ポスター)

中井 祐介, 本田 和也, 宮田 耕充, 柳 和宏, 真庭 豊: 高純度半導体型単層カーボンナノチューブバッテリーの熱電能 (口頭)

中井 祐介, 本田 和也, 宮田 耕充, 柳 和宏, 真庭 豊: 高純度半導体型単層カーボンナノチューブバッテリーの熱電能 (口頭)

市田 正夫, 宮田 耕充, 伊東 千尋, 村上 俊也, 池本 夕佳, 川上 彰, 柳 和宏, 片浦 弘道, 安藤 弘明: 単層カーボンナノチューブの赤外吸収スペクトルにおける紫外線, X 線, 電子線照射効果 (ポスター)

● 第74回応用物理学会秋季学術講演会 2013年9月16日 - 9月20日 (同志社大学)

工藤光, 加治聖也, 柳和宏: 単一カイラリティ半導体型単層カーボンナノチューブにおける熱抵抗変化率 (口頭)

高木勇樹, 大島勇吾, 和田義史, 河合英輝, 柳和宏, 竹延大志: 液相成長法によるカーボンナノチューブワイヤー (口頭)

河合英輝, 長谷川凱, 工藤光, 中津亨, 内藤泰久, 高木勇樹, 和田義史, 竹延大志, 柳和宏: 単一カイラリティ単層カーボンナノチューブにおける自己組織的配列集合体形成と電気伝導特性 (口頭)

● 日本物理学会2013年秋季大会 2013年9月25日~9月28日 (徳島大学)

佐藤健次, 田原佳祐, 片山郁文, 南康夫, 武田淳, 柳和宏, 北島正弘: カーボンナノチューブにおける高周波コヒーレントフォノンのフェルミエネルギー依存性 (口頭)

本田和也, 中井祐介, 柳和宏, 真庭豊: 単層カーボンナノチューブの熱電物性の研究 I (口頭)

高木勇樹, 大島勇吾, 河合英輝, 柳和宏, 竹延大志: 高密度・高配向カーボンナノチューブワイヤーの成長と電気伝導特性 (口頭)

河合英輝, 長谷川凱, 工藤光, 柳和宏, 中津亨, 内藤泰久, 高木勇樹, 和田義史, 竹延大志: 単一カイラリティ単層カーボンナノチューブにおける自己組織的配列集合体形成と電気伝導特性 (口頭)

光山遼, 田寺真, 客野遙, 中井祐介, 宮田耕充, 柳和宏, 片浦弘道, 真庭豊: 単層カーボンナノチューブのカイラリティの同定 (口頭)

● カロテノイド研究談話会 2013年10月19日~10月20日 (三重大学)

柳和宏: カロテノイドを用いたナノカーボンの物性研究 (招待講演)

● 第46回フラーレンナノチューブグラフェン総合シンポジウム 2014年3月3日~3月5日 (東京大学)

工藤 光, 加治 聖也, 河合 英輝, 竹延 大志, 柳 和宏: 高純度半導体型単層カーボンナノチューブネットワークを用いた赤外線センサ (ポスター)

河合 英輝, 長谷川 凱, 内藤 泰久, 高木 勇樹, 和田 義史, 竹延 大志, 柳 和宏: 結晶鑄型法による金属型/半導体型 SWCNTs 高配向集合体の自己組織形成 (ポスター)

和田 義史, 狗飼 良太, 藤本 太陽, 濱畑 裕紀, 松崎 怜樹, 柳 和宏, 竹延 大志: Printed SWCNT thin film CMOS inverters based on chemically doped ion gels (ポスター)

遠藤 秀晃, 河合 英輝, 長谷川 凱, 加治 聖也, 柳 和宏: MoS₂-単層カーボンナノチューブ複合薄膜の電気化学特性 (ポスター)

● 日本物理学会第69回年次大会 2014年3月27日～3月30日（東海大学）

志村明彦，阿部健太，森田弘平，河合英輝，柳和宏，吉澤雅幸：カーボンナノチューブのコヒーレント振動の可視・近赤外ポンプ-プローブによる実時間分光

佐藤健次，田原佳祐，片山郁文，南康夫，武田淳，柳和宏，北島正弘：金属型カーボンナノチューブにおける高周波コヒーレントフォノンの共鳴効果

遠藤秀晃，加治聖也，工藤光，河合英輝，柳和宏：単層カーボンナノチューブ-MoS₂ 薄膜の電子状態の制御

国内研究会

4) 学会誌等

柳和宏：金属型単層カーボンナノチューブを用いたレアメタルフリーの画像素子開発，化学と工業（化学工業社） **64** (2013) 374

柳和宏：“単層カーボンナノチューブを用いたエレクトロクロミックカラーインク応用”，マテリアルステージ（技術情報協会） **3** (2013) 68

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、非磁性2次元単純金属 PdCoO_2 におけるゼロ磁場抵抗の350倍にも及ぶ巨大磁気抵抗効果の発見

see <http://physics.aps.org/synopsis-for/10.1103/PhysRevLett.111.056601>

である。この研究は、応用的視点から非常に興味深い。また同じ結晶構造を持つ二次元三角格子反強磁性体 PdCrO_2 の新奇な異常ホール効果の原因と考えられていた磁気構造の解明にも成功した。こちらは、学問的価値が高い研究である。我々のグループは、この数年間に、フラストレートしたパイロクロア磁性体の研究を、 $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ における磁気モノポール由来の現象の解明と、何らかの量子スピン液体状態を持つであろうと言われてきた $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$ の基底状態の解明という視点で取り組んで来た。このパイロクロア酸化物の研究には純良単結晶の育成が不可欠だが、なかなかうまくいかず苦労を重ねたがついに純良化の方向性が見つかった。

1) 導電性三角格子反強磁性体の異常ホール効果と磁気構造

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電気伝導現象の巨大な応答となって現れる。これまで、その理解は電子・スピン・軌道の性質に基づいていたが、フラストレーションが働く金属性の磁性体では、スピンの特殊な配置（カイラリティ）が電子系のベリー位相と結びついて巨大な効果となって現れることが最近明らかとなってきた。

我々は、これらの研究の流れの中で二次元三角格子反強磁性体 PdCrO_2 の新奇なホール効果や、同構造で非磁性単純金属 PdCoO_2 の巨大な磁気抵抗効果に着目して研究を行った。 PdCrO_2 では、空間群の既約表現を用いた磁気構造解析から非平面的なスピン配列を見出し、 $T^* = 20 \text{ K}$ 以下の異常なホール効果とカイラリティの関係性を示した。 PdCoO_2 では、ゼロ磁場抵抗の350倍にも及ぶ巨大な磁気抵抗効果を見出し、それがパラジウム層内に閉じ込められた二次元電子が受けるローレンツ力に起因すること、すなわち低次元性を反映したフェルミ面形状と伝導電子の長い緩和時間によって引き起こされる伝導現象であることを明らかにした。単純な非磁性金属でもいくつかの条件を満たせば巨大な磁気抵抗効果を示すという、これまで見落とされてきた事実が浮き彫りとなった。

2) 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磁性体 $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ は、短距離磁気相関が数 K の温度領域で発達しているが、極低温領域の 50 mK まで長距離磁気秩序を持たないことが、1999年に示され、その後多くの興味を集めてきた。 $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ の基底状態が Tb 原子間距離程度の短距離スピン相関しか示さない理由は何なのか？という問題は、幾何学的フラストレーションを示す多くの磁性体の研究の中で、非常に興味深いが大いなる難問だと考えられている。

我々は、 $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ の基底状態について実験的に理解する糸口を見出すべく、以前から問題が多いと言われていたサンプルを純良化する方向で研究を進めている。単結晶より簡単にサンプルをコントロールすることが可能な多結晶 $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$ を合成し、「 x の微小変化が tuning parameter として働き、スピン液体状態 ($x < x_c \sim -0.002$) と未知の order parameter を持つ所謂隠れた秩序状態の間の量子相転移がある」ことを発見した。この order parameter を解明すべく、単結晶サンプルの純良化を行っていたが、ついに小さいながらも純良単結晶を育成することに成功した。現在、中性子弾性散乱実験を NIST で行い、結晶構造の微小な変化を引き起こす長距離秩序が存在するという実験的証拠を得つつあ

る。この隠れた order parameter は、 Tb^{3+} イオンが持つ多極子自由度+スピン自由度が複合したもの (図 1 参照) と思われる。

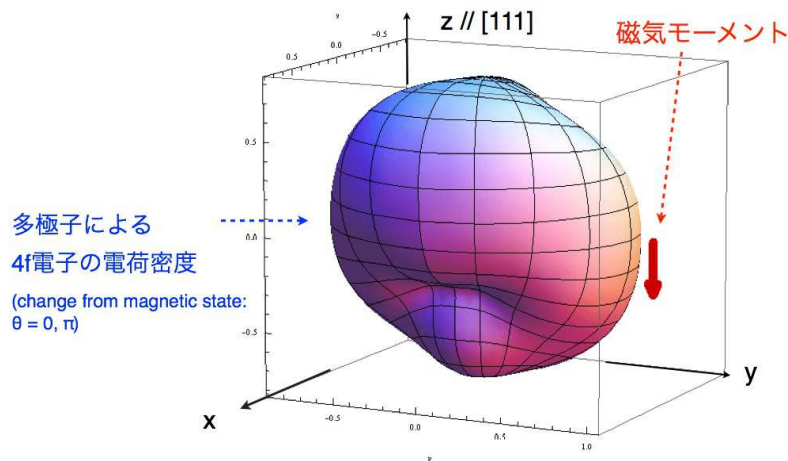


図 1: $Tb_{2+x}Ti_{2-x}O_{7+y}$ における Tb^{3+} イオンの基底状態が持つ多極子自由度 (4f 電子の電荷分布の微小変化) とスピン自由度を模式的に示した図。

2. 研究業績

1) 論文

H. Takatsu, K. Goto, H. Otsuka, R. Higashinaka, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko, H. Kadowaki: Two-Dimensional Monopole Dynamics in the Dipolar Spin Ice $Dy_2Ti_2O_7$, *J. Phys. Soc. Jpn.* **82** (2013) 073707.

H. Takatsu, K. Goto, H. Otsuka, R. Higashinaka, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko, H. Kadowaki: AC Susceptibility of the Dipolar Spin Ice $Dy_2Ti_2O_7$: Experiments and Monte Carlo Simulations, *J. Phys. Soc. Jpn.* **82** (2013) 104710.

H. Takatsu, G. Nenert, H. Kadowaki, H. Yoshizawa, M. Enderle, S. Yonezawa, Y. Maeno, J. Kim, N. Tsuji, M. Takata, Y. Zhao, M. Green, C. Broholm: Magnetic structure of the conductive triangular-lattice antiferromagnet $PdCrO_2$, *Phys. Rev. B* **89** (2014) 104408.

J. A. Sobota, K. Kim, H. Takatsu, M. Hashimoto, S.-K. Mo, Z. Hussain, T. Oguchi, T. Shishidou, Y. Maeno, B. I. Min, Z. X. Shen: Electronic Structure of the Metallic Antiferromagnet $PdCrO_2$ Measured by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88** (2013) 125109.

H. Takatsu, J. J. Ishikawa, S. Yonezawa, H. Yoshino, T. Shishidou, T. Oguchi, K. Murata, and Y. Maeno: Extremely Large Magnetoresistance in the Nonmagnetic Metal $PdCoO_2$, *Phys. Rev. Lett.* **111** (2013) 056601.

J. Kajitani, K. Deguchi, A. Omachi, T. Hiroi, Y. Takano, H. Takatsu, H. Kadowaki, O. Miura, Y. Mizuguchi: Correlation between crystal structure and superconductivity in $LaO_{0.5}F_{0.5}BiS_2$, *Solid State Commun.* **181** (2014) 1.

2) 学会講演

● 日本物理学会 2013 年秋季大会 2013 年 9 月 25 日～9 月 28 日 (徳島大学 三島キャンパス)

25pPSB-49: 「 $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ のカゴメアイス状態における磁気モノポールの二次元ダイナミクス」: 後藤和基, 高津浩, 大塚博巳, 東中隆二, 門脇広明, J.W.Lynn^A, 佐藤卓^B, 松平和之^C, 広井善二^D, 松林和幸^D, 上床美也^D: (首都大理工, NIST^A, 東北大多元研^B, 九工大工^C, 東大物性研^D)

26aPS-80: 「パイロクロア磁性体 $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の異常な負の熱膨張」: 高津浩, 渡邊邦彦, 後藤和基, 門脇広明: (首都大理工)

26pKQ8 (シンポジウム講演): 「A Long-range Order Versus a Spin Liquid in $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$ ($\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$ の長距離秩序と量子スピン液体状態)」: 門脇広明: (首都大理工)

● 日本物理学会第 69 回年次大会 2014 年 3 月 27 日～3 月 30 日 (東海大学 湘南キャンパス)

27aPS-107: 「純良単結晶による $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$ の長距離秩序の研究」: 谷口智洋, 脇田美香, 東中隆二, 後藤和基, 高津浩, 門脇広明, 池田陽一^A, 吉澤英樹^A, J. W. Lynn^B, J. Ollivier^C, B. Fåk^D: (首都大理工, 東大物性研^A, NIST^B, ILL^C, CEA^D)

国際会議

● International Workshop on Frustration and Topology in Condensed Matter Physics: National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan, February 13 – 16, 2014.

H. Kadowaki: Long-range order and spin-liquid state of $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$.

H. Takatsu, K. Goto, H. Otsuka, R. Higashinaka, H. Kadowaki, T. J. Sato, J. W. Lynn, K. Matsuhira, Z. Hiroi, K. Matsubayashi and Y. Uwatoko: Two dimensional monopole dynamics in the kagome ice state of $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$.

K. Goto, H. Takatsu, H. Otsuka, R. Higashinaka, H. Kadowaki, T. J. Sato, J. W. Lynn, K. Matsuhira, Z. Hiroi, K. Matsubayashi and Y. Uwatoko: Dynamics and correlations of monopoles in the two dimensional kagome ice state of $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$.

3) 学会誌等

米澤進吾, 高津浩: 巨大な磁気抵抗効果を示す単純金属, 工業材料 2014 年 1 月号【特集】次代を拓く—工業材料キーワード 32 (日刊工業材料新聞) .

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、非平衡系統計力学においても重要な結果になると考えている。

3) 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、他の高分子も引きずられるなど、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動的な動きを発現し、面白い挙動を示すものがある。例えば、生物がレイリー・テイラー不安定性により対流する生物対流やバクテリアのコロニー形成などが挙げられる。ま

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

● 第3回ソフトマター研究会 2013年12月13日-2013年12月15日（首都大学東京南大沢キャンパス）

栗田玲：温度勾配下における二分子膜ラメラ相のダイナミクス

及川典子，田中良巳，野口貴大，中垣俊之：シート状真正粘菌の成長過程に見られる粘性流体指との類似性

● 日本物理学会 第69回年次大会 2014年3月27日-2014年3月30日（東海大学 湘南キャンパス）

栗田玲，David B Ruffner，Eric R Weeks：コロイドサイズ決定法と結晶化ダイナミクス

及川典子，田中良巳，野口貴大，中垣俊之：シート状真正粘菌の成長パターンの粘性流体指理論を用いた解析

編集後記

テルマエ・ロマエという映画をご存知だろうか？この年次報告の編集を大部分終え、リラックスするためにDVDを借りてきた。内容は、古代ローマのお風呂設計士（ルシウス）が現代にタイムスリップして、現代の想像を絶する技術に驚く様子がコメディタッチで描かれている。古代ローマといえども、力を加えれば物は動く、といった現象は当たり前のように知っていたと思う。しかし、その”当たり前”をニュートンが運動方程式として定式化し、そこを基に飛躍的な発展をとげ、現代の驚くべき技術にたどり着いたのだ。勝手な想像だが、ルシウスにとっても”当たり前”を理解する事が驚きの技術につながったという歴史的背景を知ったら、より一層驚くに違いない。中世において、科学とは身の回りのこと、自然に起こっている事を理解したいというモチベーションが強かったように思える。今では古典と呼ばれ、高校や学部1年生に習っている。現代ではこの基礎をベースに誰も知らない新しい現象の発見にフォーカスが置かれている。もちろん、新しい現象が次の新しい事につながっていくのであり、すばらしい事である。ただ、みんなが知っているつもりだけでも、本当の意味では理解されてこなかった現象も将来の発展につながるという可能性を私は忘れてしまっていた気がしてならない。たまには、先人たちのように身の回りで起きている知っている”つもり”のことを真面目に考えてみるのも一興ではないか、と映画の余韻に浸った夜だった。

(栗田玲 記)

平成 25 年度年次報告編集委員
政井邦昭 (2013 年度物理学教室主任)
堀田貴嗣
栗田玲
及川典子