

研究室活動状況 平成 24 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) 現実的な実験値によるニュートリノ振動のパラメーター縮退に関する考察 (安田)

一定の基線の長さで一定のニュートリノエネルギーを持つニュートリノ長基線実験で、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ と $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ の確率が測定できたとしても、CP位相は必ずしも一意的に決定できない、というパラメーター縮退の問題が以前から知られている。特に深刻なのは、階層性の不定性による縮退で、正常階層か逆階層かで、CP位相の真の値が大きく影響されることも知られている。2012年春に原子炉ニュートリノ観測によって第三番目のニュートリノ混合角 θ_{13} が決定されたのを受け、パラメーター縮退の問題が解決できるかどうか具体的に議論できるようになってきた。そこで安田が2004年に提唱した新しいプロットの方法によりT2Kの第二段階やNova等の近未来の長基線実験で、パラメーター縮退の解決の可能性を議論した。T2KとNovaを議論した理由は、これらがいわゆる off-axis のニュートリノビームを使う長基線実験で、ニュートリノエネルギーが近似的に一定とみなすことができ、この解析方法が正当化できるためである。解析の結果、T2KではCP位相が (90 ± 20) 度という特別な値を取る場合以外には階層性の縮退を取り除くことができず、基線の長いNovaも、ほとんど同じ情報しか与えないことが明らかとなった。これは両者とも同じモードを振動最大に近い条件で測定していることが理由であると考えられる。

2) 大気ニュートリノによる非標準的相互作用探索の現象論 (安田・深澤)

標準模型を越える新物理がある場合、その有効相互作用として、レプトンのフレーバーを保存しないものが現れる可能性がある。そのような有効相互作用のうち、中性カレントの相互作用は、ニュートリノの伝播における物質効果に寄与する。物質効果の標準効果からのずれを $\epsilon_{\alpha\beta}$ ($\alpha, \beta = e, \mu, \tau$) と表すと、 ϵ_{ee} 、 $\epsilon_{e\tau}$ 、 $\epsilon_{\tau\tau}$ の各成分への制約が最も弱いことが知られている。これらの成分が現在の実験からの上限值を取る時、その効果は10GeV程度のエネルギー領域で、通常のニュートリノの振動確率との違いが顕著となることが知られている。エネルギーが10GeV程度のニュートリノを観測し、物質効果をより良くテストするには基線が長い大気ニュートリノ実験（中でもエネルギーしきい値が低いスーパーカミオカンデ型の実験）が望ましいが、現在のスーパーカミオカンデ実験は残念ながら統計量がまだ十分とは言えない。そこで、将来のハイパーカミオカンデ実験について新物理のパラメーターに対する感度を数値的方法により詳細に議論した。解析に当たっては、制約の強い $\epsilon_{\alpha\mu}$ ($\alpha = e, \mu, \tau$) 成分を0とし、 $\epsilon_{\tau\tau}$ 成分は高エネルギー大気ニュートリノからの制約で $\epsilon_{\tau\tau} = |\epsilon_{e\tau}|^2 / (1 + \epsilon_{ee})$ となることを仮定して計算した。系統誤差を簡略化した計算の結果では、パラメーター $|\epsilon_{e\tau}|$ に対しては、これまでの制限を一桁程度改善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)

弦理論を用いて構成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、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。そのようなスカラー場は宇宙のイン

レーションを引き起こす可能性があるものの1つであり、したがって、弦模型は自然に宇宙のインフレーションを説明できる可能性を持つものである。指数関数型ポテンシャルを持つスカラー場がある場合の宇宙の時間発展を分類すると、ビッグバン特異点を時間の原点としたときに、スカラー場が指数関数型のポテンシャルを高いところから単純に下った後にインフレーションを起こすものと、低いところから一度登らされてから下っていった後にインフレーションを起こすものの2種類があることがわかる。前者については、弦模型を参照せずに多くの研究がなされたきたが、後者についての研究は多くない。弦模型については後者の可能性の方が高いという考察ができる。後者の可能性、“climbing phenomena”、が実現している場合の宇宙背景輻射のゆらぎを求めた。大きなスケールのゆらぎが急速なくなってゆくという結果が得られ、これによって、宇宙背景輻射のゆらぎの多重極展開の最も低い部分が観測からずれていることを説明できる可能性を指摘した。

この研究はピサ高等師範学校の A.Sagnotti 氏と、パリ工科大学の E.Dudas 氏および S.P.Patil 氏との共同研究である。

4) 弦理論におけるゲージ対称性の自発的破れ (北澤)

素粒子の世界において、電弱対称性という電磁相互作用と弱い相互作用を表現するためのゲージ対称性が存在し、さらにそれが自発的に破れていることは実験的に高い精度で確認されている。素粒子とそれらのあいだの相互作用を記述する確立した道具として場の量子論という枠組みがある。この枠組みにおいては上記の電弱対称性の自発的破れを実現することは比較的容易であり、欧州原子核研究機構 (CERN) での LHC 実験で発見されたヒッグス粒子の存在はひとつの予言である。しかしながら、素粒子とそれらのあいだの相互作用を記述する道具として弦理論を考える場合、電弱対称性の自発的破れを表現することは容易ではない。

低スケール弦模型、すなわち弦の張力のスケールがテラスケールで LHC 加速器実験で検証できるような模型を想定した場合、実験により弦の張力のエネルギースケールに下限がつくが、実験が進むにつれて、その値が大きくなってゆく可能性がある。どこまで下限が大きくなったら低スケール弦模型が排除されるかどうかを判断するために、弦の張力のエネルギースケールと電弱対称性の自発的破れのエネルギースケールとの間関係を明らかにしなければならない。そのために、最初の試みとして、ゲージ対称性の破れが実際に起こっている簡単かつ具体的な弦模型の構成を行った。ゲージ対称性の自発的破れを弦模型の有効場の理論において起こすことで満足せず、弦模型の構成要素である D ブレーンの配位がどのように変化してそれが起きるのかということをも明らかにした。

この研究は高エネルギー理論研究室の小林秀太郎氏との共同研究である。

5) 低スケール弦模型の LHC 加速器実験における検証に向けた理論的研究 (北澤)

弦模型では異なる素粒子は唯一の弦の異なる振動モードとして表現される。エネルギーの最も低い振動モードが我々の知っている素粒子や力を媒介するゲージ粒子に対応するが、もちろんエネルギーの高い振動モードも存在し、それは未知の重い素粒子に対応するはずである。低スケール弦模型におけるように、弦の張力のエネルギースケールが TeV 程度であれば、弦模型の確実な予言として TeV 程度の質量を持つ粒子が存在しなければならない。欧州原子核研究機構 (CERN) での LHC 加速器実験の主な目的は電弱対称性の破れの物理を解明することであるが、それは同時に TeV のエネルギースケールの新しい物理の探索でもある。低スケール弦模型が真実であれば弦の励起状態が必ず発見されるはずである。しかしながら、TeV 程度の質量を待った新粒子を予言する理論的仮説はたくさんある。そこで重要になるのは、TeV 程度の質量の粒子が見つかった場合、それが弦模型における弦の励起状態であるのか、あるいはそうでないのかということ、どのようにして判定するかということである。

LHC加速器は陽子と陽子を衝突させる（現在の衝突エネルギーは 7TeV）ものであるが、素過程は陽子を構成しているクォークやグルーオンの衝突である。この衝突によって励起状態が生成され、それが再びクォークやグルーオン 2 体崩壊するという過程を探索することが発見に向けて最も有望である。終状態は、互いに正反対の方向に生ずる 2 束の粒子群（ジェット）となる。観測されるたくさん 2 ジェット事象について、各事象ごとの 2 ジェットの不変質量を実験で測定してその分布を見ることができる。既知の物理の範囲では滑らかな分布が期待されるが、もし何らかの励起状態（新粒子）が存在すればその上にガウス関数型の共鳴の分布が見えるはずである。

弦模型の励起状態の特徴のひとつは、励起状態が繰り返すことである。それは、弦の振動状態（モード）が、低エネルギーのものから始まり高エネルギーのものに向けて無限にあることに対応する。そこで、弦模型の検証として興味深いのは、まず 1 つの共鳴状態が発見されたとして、次の 2 番目の共鳴状態をみることができるかどうかということである。2 番目の共鳴状態が実際に実験でどのように見えるかということ、弦模型の細部によらない理論的な計算を基礎として、計算機を用いたモンテカルロシミュレーションを行うことにより調べた。

この研究は東京大学（駒場）の大学院生の橋真奈美氏との共同研究である。

2. 研究業績

1) 論文

Manami Hashi and Noriaki Kitazawa, Detectability of the second resonance of low-scale string models at the LHC, *Journal of High Energy Physics* **03** (2013) 127.

Noriaki Kitazawa and Shutaro Kobayashi, Spontaneous Gauge Symmetry Breaking in a Non-Supersymmetric D-brane Model, *Physics Letters* **B720** (2013) 373-378.

ATLAS Collaboration, ATLAS search for new phenomena in dijet mass and angular distributions using pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV, *Journal of High Energy Physics* **01** (2013) 029.

Emilian Dudas, Noriaki Kitazawa, Subodh P. Patil and Augusto Sagnotti, CMB imprints of a pre-Inflationary climbing phase, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **05** (2012) 012.

2) 国際会議報告

A. Donini, P. Huber, S. Pascoli, W. Winter, O. Yasuda: Neutrino oscillations physics with the Neutrino Factory, *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* **229–232** (2012), 516.

O. Yasuda: Some constraints on new physics by atmospheric neutrinos, *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* **229–232** (2012), 543.

3) 学会講演

● 日本物理学会 2012 年秋季大会 2012 年 9 月 11 日～ 9 月 14 日（京都産業大学）

安田修: Phenomenology of θ_{13} (11pSK-6) (招待講演)

● 日本物理学会年会 第 68 回年次大会 2013 年 3 月 26 日～ 3 月 29 日（広島大学東広島キャンパス）

安田修: 木村-高村-横枕によるニュートリノ振動確率導出方法の応用 (29pRB-4)

深澤信也、安田修: 大気ニュートリノで探る非標準的相互作用 (29pRB-5)

国内研究会

● 研究会「J-PARCにおけるニュートリノ物理の展望」、高エネルギー加速器研究機構、2013年1月31日

安田修: ニュートリノ実験の意義 (招待講演)

国際会議

● The 3rd UTQQuest workshop ExDiP 2012, Superstring Cosmophysics, 6-12, August 2012, Obihiro, Japan

N. Kitazawa: CMB imprints of a pre-inflationary climbing phase

● The 12th International Workshop on Tau Lepton Physics (TAU2012), September 17-21, 2012, Nagoya, Japan

O. Yasuda: Theory/Phenomenology Overview (Invited talk)

● A topical conference on elementary particle physics and cosmology (Miami2012), December 13-20, 2011, Fort Lauderdale, Florida, USA

O. Yasuda: Parameter degeneracy revisited.

高エネルギー理論研究室

1. 研究活動の概要

我々は、 $F(R)$ 超重力理論におけるインフレーションとプリヒーティングが、スカラー自由度（スカラロン）の2つの質量スケール、 M と m によって特徴づけられることを発見した。 M はインフレーション期の、 m はプリヒーティング期のスケールを表している。それぞれの許容範囲は CMB の温度異方性の強度から導かれる。このモデルは WMAP やその他の観測から得られた制限を全て満たしている。また我々は、プリヒーティング期に関わる低エネルギー領域で、インフラトン（スカラロン）と擬スカラー場の相互作用を考慮した有効スカラーポテンシャルを導いた。さらに場の摂動が広範囲のパラメータ共振によって急速に成長する際にプリヒーティング期が存在することを見出した（ケトフ）。

我々は、非最小スカラー曲率結合が加わった Einstein 重力理論と $f(R)$ 重力理論の中でのインフレーションを調査した。その結果、両理論でのスローロールダイナミクスが等価になりうることを明らかにした。超重力理論における非最小結合は、曲がった超空間を用いた物質場と相互作用した標準（最小）の $N=1$ 超重力理論で記述されていた。我々が示した等価性は、2つの理論から得られるインフラトンスカラーポテンシャルが等しくなることを意味している。しかしインフレーション後のダイナミクスや再加熱が等しくなるわけではない（ケトフ）。

$f(R)$ 重力理論の枠組みで Appleby-Battye ポテンシャルの近似ポテンシャルを提案した。Appleby-Battye モデルは $f(R)$ 重力理論を用いたダークエネルギーモデルとして知られており、現在も観測結果と無矛盾なモデルである。しかし彼らのモデルは ad-hoc モデルで、非解析的な領域を含んでいる。我々の提案した近似モデルは二重井戸型ポテンシャルで、全領域で解析的な形状を持つ。この近似モデルを $F(R)$ 超重力理論に拡張し、自発的超対称性の破れを記述できるモデルを導いた（ケトフ、渡邊）。

超弦理論に存在する物質場 D-ブレーンを用いて標準模型を記述するための研究を行った。その最初のステップとしてゲージ対称性の破れが生じる模型について研究をした。具体的には4枚の D3-ブレーンと3枚の反 D7-ブレーンを用いた。また D3-ブレーンを配置した方向とは直行する6次元空間は物質場のゲージ群に対する表現が基本表現になるように Z_3 で割った空間を考えた。これは $U(2) \times U(1) \times U(1) \times U(3)$ ゲージ対称性をもつ理論が得られる。またこの模型はスペクトラムとしては超対称性を持っていない。とくに本研究では物質場についてはスカラー場のみを注目して、スカラー場の中の相互作用を記述する有効ポテンシャルを超弦理論の世界面上の理論から記述した。結果として得られた有効ポテンシャルは、反 D7-ブレーンの方向に対しては D3-ブレーンは余分なエネルギーを使わなくても、4枚の D3-ブレーンを分離できることが示された。また D3-ブレーン上のスカラー場のポテンシャルの平坦方向について、 Z_3 で6次元空間を割ったことにより生じるツイストされた閉弦の効果や物質場を記述する開弦の 1-ループ補正による質量項の補正を考慮して調査した。その結果として、まず質量の量子補正がない場合、D3-ブレーンが原点近傍に存在すると物理系としては不安定になっていて、ある距離だけ D3-ブレーン同士が離れなければならないことが示された。ゲージ対称性は $U(1) \times U(1)$ に破れている。また質量の量子補正を考慮すると、4枚の D3-ブレーンの内2枚は必ず空間の原点で重なっていなければならないことが示された。本研究は首都大学東京素粒子理論研究室北澤敬章氏と共同で研究を行った（小林）。

国際的な活動: S. ケトフは Visiting Professor として、2012年9月にオーストラリア（パース）の西オーストラリア大学、また2012年10月より2013年3月（特別研究期間）にドイツのハノーヴァー大学にて同職の任を務めた。

2. 研究業績

1) 論文

S.V. Ketov, A.A. Starobinsky, Inflation and non-minimal scalar-curvature coupling in gravity and supergravity, JCAP 08 (2012) 022, 18 pages

S.V. Ketov, S. Tsujikawa, Consistency of inflation and preheating in F (R) supergravity, Phys. Rev. D86 (2012) 023529, 12 pages.

S.V. Ketov, N. Watanabe, Dark Energy in Modified Supergravity, Mod. Phys. Lett. A27 (2012) 1250225, 9 pages.

N. Kitazawa, S. Kobayashi, Spontaneous gauge symmetry breaking in a non-supersymmetric D-brane model, Phys. Lett. B720 (2013) 373-378.

2) 学会講演

● 日本物理学会 2012 年秋季大会 [素・核・宇] 2012 年 9 月 11–14 日 (京都産業大学)

渡邊夏輝: Dark energy in modified gravity and supergravity

● 日本物理学会第 68 回年次大会 2013 年 3 月 26 日~ 29 日 (広島大学東広島キャンパス)

渡邊夏輝: Domain wall in f(R) gravity

国内研究会

● 基研研究会「場の理論と弦理論 (2012)」、京都大学基礎物理学研究所、2012 年 7 月 23 日~ 7 月 27 日

渡邊夏輝: Dark energy function in modified gravity and supergravity

小林秀太郎: Gauge symmetry breaking in a D-brane model

国際会議

● NIKHEF Theory Meeting 2012, Amsterdam, Holland, November 16, 2012

Sergey Ketov: Inflation in Supergravity

● PTB Meeting in High-Energy Physics, Braunschweig, Germany, January 15, 2013

Sergey Ketov: Supersymmetrisches Fruehes Universum (ドイツ語での発表)

● DPG Workshop "Beyond the Standard Model", Bad Honnef, Germany, March 18-21, 2013

Sergey Ketov: Inflation in the early universe: the meeting point of cosmology and high-energy physics

● CPT Meeting "Interactions Fondamentales", Marseille, France, March 15, 2013

Sergey Ketov: Supersymmetric Early Universe

● International Exchange Workshop “The Global Human Resource Program Bridging across Physics and Chemistry” , Tokyo Metropolitan University, February 8, 2013

Hirosuke Kuwabara: Quantization of a constant gauge field,

Yuki Wakimoto: Derivation of Invariant Varieties of Periodic Points from Singularity Confinement

原子核理論研究室

1. 研究活動の概要

1) 原子核の巨大共鳴状態における強度関数の分析

原子核の高励起状態を規則性とカオス性という視点から調べる研究を、巨大共鳴領域における強度関数の揺らぎのウェーブレット解析（とくに WTMM 法）を用いて進めている。本年度は、原子核 ^{40}Ca と ^{208}Pb の理論計算に基づく WTMM 間隔分布をランダム行列 GOE による結果と比較した。エネルギースケールが小さい時は両者とも GOE の結果にほぼ一致するが、大きくなるにつれて、とくに Ca で GOE の結果から大きくずれることがわかった。この結果をより定量的に評価しやすい物理量と関連づけるため、強度関数のモデルパラメタとの関連を調べ、戸口状態の幅との相関が重要であるとの結論を得た。これらの研究をまとめて、現在論文を準備中である。

2) 極低温ボース原子気体におけるブロッホ振動の研究

自由な電子は一律な電場をかけると等加速度運動を行う。一方、周期的なポテンシャルに閉じ込められた電子は、一律な電場をかけると一定の条件のもとで振動運動を示すことが理論的に知られており、ブロッホ振動と呼ばれていた。しかし現実の電子系ではこの振動を観測する条件が整わず、実際のブロッホ振動の観測は、1992 年になって半導体超格子において初めて実現された。その後極低温原子気体においても、中性原子を周期的ポテンシャルに閉じ込め、外場をかけてブロッホ振動を観測する実験が成功した。本研究では、まず上と同じ一律外場の条件に基づく理論的モデルにおいて、原子の運動の時間的発展を解いてブロッホ振動の実現を調べ、次いで一律場（線形ポテンシャル）を調和振動子型ポテンシャルに置き換えた場合のブロッホ振動のふるまいを調べた。数値計算によると、一律場のもとではブロッホ振動が明瞭に確認されたのに対し、調和振動子型の外場では、原子の初期条件により変化することがわかった。すなわち、ポテンシャルの底から出発した原子は専ら通常の調和振動をするのに対し、出発位置がポテンシャルの底から離れるに従って通常の振動がブロッホ振動に移行することが確認された。なお、このような調和振動子外場の中でのブロッホ振動は、振れ角と共役運動量を交換した位相空間での単振り子の回転として近似的に扱えることがわかった。

3) 二成分有限フェルミ気体のモデルによるフェルミ対形成の研究

フェルミ粒子間の対相関に伴う超流動（超伝導）現象は、さまざまなフェルミ系の示す最も典型的な相転移現象であるとともに、系を構成する粒子の量子数や相互作用、あるいは粒子密度などの条件により、多様な現れ方を示すことが知られている。極低温のフェルミ原子系においても、さまざまな条件下における実験により、BEC-BCS クロスオーバーや、対を形成する粒子の密度バランスの効果などが調べられている。本研究では、これらの様々な超流動転移現象を同じ枠組みで扱う有限系モデルを構成することを試みた。本年度は、一粒子状態の縮退度が同じで、一粒子エネルギースペクトルの異なる二種のフェルミ粒子が対相互作用を行うモデルを設定した。これを用いて、異なる準位密度をもつ二粒子の場合や、それぞれの粒子数が大きく異なる場合の対形成を調べ、秩序変数（ギャップ・パラメタ）の準位密度や粒子数への依存性を調べた。

4) 1次元リングに捕獲されたボソン・フェルミオン混合気体の動的性質

1次元リングに捕獲されたボソン・フェルミオン混合気体の動的性質を理論的に解析した。リングに外場を与えてできる非一律な密度分布を初期状態とし、外場を外した後の粒子群の時間発展を数値対角化の方法で計算した。その結果、ボソンとフェルミオンはリング内を振動し、それらの振る舞いは、ボソ

ン・フェルミオン間の粒子間相互作用に依存することが判った。また、同様の計算をハートリー・フォック (HF) 近似を用いて実行した結果、粒子間相互作用が強い領域ではHF近似が破綻し、多体相関効果が粒子群の振動に影響を及ぼすことが判った。

5) 核媒質中の η' 中間子の質量とカイラル対称性の部分的回復

擬スカラー中間子である η' メズンは、 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' に対応する flavor singlet の軸性変換は、クォークループによる量子効果のため顕わに破れていて、 η' は南部・ゴールドストーンボゾンにはならず、 π 中間子等とは質量生成機構が異なる。本研究では、 η' 中間子の質量に対する軸性 U(1) 量子異常の効果には、カイラル対称性が破れている必要があることを示し、核媒質中でのカイラル対称性の部分的回復に基づいて、 η' 中間子の質量が大きく減少することが期待されることを示した。さらに、 η' 中間子の質量生成機構をさらに理解するためには、 η' 中間子と原子核の束縛系が実験的情報を得るのに適していることを指摘した。 η' 中間子に対する核媒質効果は、核媒質中で質量が大きく減少する一方で、 η' 中間子の核媒質への吸収幅はあまり大きくならないことがわかり、このような状況では、 η' 中間子が原子核と束縛状態を作る可能性が大きく、さらに束縛すれば幅は狭いことが期待できる。このことは、実験的に η' 中間子原子核束縛状態を観測し、そこから媒質効果を現象論的に引き出すのに有利である。

2. 研究業績

1) 学会講演

- 日本物理学会 2012 年秋季大会 2012 年 9 月 11 日~ 14 日 (京都産業大学)

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、鈴木徹 (首都大) : 「巨大共鳴強度関数のゆらぎの分析における WTMM 間隔分布の有効性」

- 日本物理学会第 67 回年次大会 2012 年 9 月 18 日~ 21 日 (横浜国立大学)

柴藤亮介 (首都大)、西村拓史 1 次元トラス内におけるボース・フェルミ混合系の動的性質

- 日本物理学会第 68 回年次大会 2013 年 3 月 26 日~ 29 日 (広島大学東広島キャンパス)

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、鈴木徹 (首都大) : 「巨大共鳴強度関数のゆらぎに見るカオスからのずれと WTMM 間隔分布」

国際会議

- 4th Int. Conf. on Collective Motion in Nuclei under Extreme Conditions (COMEX4), Shonan Village Center, Japan, October 22-26, 2012

H. Aiba, M. Matsuo, S. Nishizaki, K. Suzuno & T. Suzuki : Analysis of the damping process of the giant resonance by means of the spacing distribution of the wavelet transform modulus maxima

- The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics August 20-25, 2012 (Kyusyu, Japan)

Ryosuke Shibato, Takushi Nishimura: Restoration of Broken Symmetry in Ultra-Cold Atomic Gases (ポスター発表)

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。2012年度のグループ構成はスタッフ2名、大学院生4名。以下は、2012年度に行った主な研究の概要である。

1) 放射冷却する銀河団ガスの特性

重力的に緩和した銀河団では中心部のガスの放射冷却時間が Hubble 時間より短く、圧力の低下を補うように外層部から中心部にガスの流入が起きると考えられる。初期には局所的に平衡が保たれながら緩やかにガスが流入する準静水圧平衡にあると考え、密度分布、エントロピー分布、圧力分布を観測結果と比較した。また、このような冷却コア銀河団を double- β モデルで解析する有効性を議論した。

2) 再結合 X 線放射を示す超新星残骸の非熱的放射

これまで再結合放射が観測された超新星残骸は、電波の強度分布はシェル様であるが X 線はその内部に分布する mixed-morphology SNR に分類される。また、GeV/TeV- γ 線放射や分子雲との相互作用も報告されている。再結合 X 線放射を説明できる超新星残骸モデルで、電波シェルや γ 線強度も矛盾なく説明できるか、衝撃波で加速された粒子による非熱的放射を計算して観測結果と比較した。

3) Kerr ホールの回転エネルギーの引き抜き

ergosphere では降着物質の持ち込む磁場によってブラックホールの回転エネルギーを Poynting フラックスとして引き出すことが理論的に可能である (Blandford & Znajek)。が、物質の慣性が場に比べて十分小さいことが条件になる。ブラックホールへの物質降着と整合的な条件を調べ、降着が小さいと考えられる Sgr A* の観測結果と比較して、現実のブラックホールでこの過程が有効に働くか議論した。

4) Fermi バブルの起源

Fermiによって銀河中心部にバブル様の構造が観測され、また、WMAPによってもほぼ同様の構造 (Haze) が観測されている。Fermi バブルは、その大きさと空間的に様な γ 線放射が特徴的である。銀河中心部で複数回のエネルギー放出が起きたことを想定して、銀緯方向の密度分布を考慮した 2 次元流体計算を行い、形成される構造、衝撃波および乱流によって加速された粒子による γ 線放射を調べた。

5) 相対論的ブレイクアウト

超新星爆発では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 UV-X 線光子のフラッシュが起こる。 γ 線バーストとの類似性に着目し、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た。星の外層の密度分布とバルク運動の Lorentz 因子をパラメータとして Compton 散乱による光子スペクトルを計算し、観測されている γ 線バーストの特性と比較した。

6) 銀河団プラズマの性質

銀河団外縁部の高温プラズマを X 線衛星 Suzaku を用いて観測し、数値シミュレーションの結果が予想するよりも、温度が急激に減少していることを確認した。シミュレーションとのずれがどのような物理過程によるものか検討を行った。

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) in press

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) in press

2) 国際会議報告

T. Ohnishi, K. Koyama, T. G. Tsuru, K. Masai, H. Yamaguchi, M. Ozawa: Extremely over-ionized plasma in the supernova remnant G359.1-0.5, *AIPC* **1427** (2012) 271

M. Sawada, K. Koyama, H. Yamaguchi, K. Masai: The first results from the Suzaku spectroscopic survey of recombining plasma in supernova remnants: W44 and W28, *AIPC* **1427** (2012) 278

3) 学会講演

● 日本物理学会 2012 年秋季大会 [素・核・宇] 2012 年 9 月 11–14 日 (京都産業大学)

政井邦昭: シンポジウム「宇宙 X 線観測の 50 年と物理学へのインパクト」宇宙 X 線観測と放射過程

● 日本天文学会 2013 年春季年会 2013 年 3 月 20–23 日 (埼玉大学)

清水崇文, 政井邦昭: Mixed-morphology 型超新星残骸の非熱的粒子

寺口智文, 政井邦昭: 相対論的衝撃波ブレークアウトにおける光子スペクトル

国内研究会

● HEAP2012 (高エネルギー宇宙物理学研究会) 2012 年 10 月 4–7 日 (首都大学東京)

清水崇文, 政井邦昭: 星周物質と相互作用する超新星残骸の非熱的粒子

● 複合的アプローチで探る宇宙の化学進化 2012 年 10 月 26–28 日 (ホテル伊豆高原)

佐々木伸: 元素の起源と進化

国際会議

● Gamma2012 (5th International Symposium on High-Energy Gamma-Ray Astronomy), Heidelberg, Germany, 9–12 July, 2012

T. Shimizu: Non-thermal emission from mixed-morphology supernova remnants

● Conference on The mass profile of galaxy clusters from the core to the outskirts, Madonna di Campiglio, Italy, 18–22 March, 2013

N. Ota, K. Masai: Density Profile of a Cool Core of Galaxy Clusters

非線形物理研究室

1. 研究活動の概要

1) 動的トンネル効果における不変トーラスの自然境界の役割

混合位相空間中の不変トーラスは実面上においては解析的であり、その上の軌道は一定無理数回転と共役な規則運動を行う。一方、不変トーラスは複素領域においてその解析性が破れ、その解析性が破れた場所にはいわゆる「自然境界」が出現する。これまで、不変トーラスの自然境界が物理的に観測可能なものであるか否かについては賛否両論が交わされてきたが、我々は混合位相空間中の動的トンネル効果におけるトンネル確率の異常増大、という形で量子力学のなかに自然境界が顕在化し観測可能な対象であることを見つけた。

2) 混合位相空間をもつ量子系におけるトンネル効果と回折効果

トンネル効果と回折効果はともに古典軌道が到達不可能な領域に波が到達する波動効果の一種である。ここでは、可積分領域とカオス領域とが混在する混合位相空間において、トンネル効果と回折効果がそれぞれどのように現れ、いかにして区別されるかをいくつかの面積保存写像を用いて調べた。回折効果の同定にはそれに合った適当な表示を取る必要があること、可積分領域に置いた初期波束が回折を誘起する不連続点をそのサポート上にもたないときトンネル効果と回折効果の合成過程が現れること、回折効果が強い極限ではカオスの存在は可積分領域からカオス領域への遷移過程にはいかなる役割をも示さないこと、などが明らかになった。

3) 複素ポテンシャルを用いた量子開放系の解析

非線形共鳴の発生は系の非可積分性と密接に関連する。近年注目されている「非線形共鳴によって促進されたトンネル効果」においては、エネルギー分裂などトンネル効果の特徴づける量に1次元トンネル効果には見られない構造が観測される。我々は、その構造が純粋に非線形共鳴だけが原因のではなく、混合位相空間中のカオスをもその発生に関与しているとの予想を立て、位相空間に局在する吸収ポテンシャルを用いてその作業仮説の妥当性を検討した。

4) 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

完全可積分な系に摂動の加わったハミルトン系の位相空間では、一般に、カオス領域のなかに自己相似状の規則領域が混在する。これら規則領域の周辺で軌道は長時間滞在するが、個々の規則領域近傍での淀みのみならず、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軌道をさらに律速する可能性が以前から指摘されてきた。ここでは、その予想の当否を確かめるため、階層的島構造をもつ区別線型な2次元写像を詳細に解析し軌道の長時間相関に対する階層性の影響を調べた。

5) 3準位非断熱遷移問題に対する完全 WKB 解析の数値的有効性の検証

多準位の非断熱遷移の問題を完全 WKB 解析の観点から考察した。特に、多準位系になってはじめて現れる「新しいストークス線」が本質的役割を果たすことのない最も単純な状況における完全 WKB 解析の表式の数値的な検証を行った。WKB 近似の適用が期待される断熱極限のみならず、その反対の極限である透熱極限、あるいは、従来の多準位非断熱遷移の取り扱いでは対応することのできなかつた、初期時刻にすべての状態に確率が与えられている場合など、極めて広い範囲で完全 WKB 解析が良い近似を与えることを確認した。

6) 全のアンホロノミー (新奇的な量子ホロノミー): 階層的な量子回路での具体例

定常状態に準備した量子系を, 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, 新奇的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. 我々は, その具体例を探索してきた. 本年度は, 量子回路を階層的に接合した模型について, 位相および固有空間のゲージ不変量を調べた. これを求める時に, 模型のパラメーターが一般的な値を取る場合, subset-sum と呼ばれる NP 完全問題を解く必要があることを示した. この意味で, 複雑な anholonomy を持つ例題を得たことになる. (全卓樹教授 (高知工科大) および Kim 准教授 (Pusan Nat. Univ.) との共同研究).

7) 一次元ボーズ系での量子ホロノミー

一次元ボーズ系は, その結合強度を変化させることで, 自由ボゾン系, Tonks-Girardeau 系, super Tonks-Girardeau 系, 自由ボゾン系の順番に閉じた径路を構成することができる. 特に, super Tonks-Girardeau 系の“熱力学的”性質は, 実験・理論の両面から非平衡な強相関関係を調べる舞台として注目されている. 我々は, この径路が全のアンホロノミーを誘発することを示した. さらに, 二体系について, 非エルミート量子論の重要な特徴である加藤の例外点との関連を調べた (米澤信拓博士 (阪市大数研), および, 全卓樹教授 (高知工科大) との共同研究).

2. 研究業績

1) 論文

A. Ishii, A. Akaishi, A. Shudo and H. Schomerus: Weyl law for open systems with sharply divided mixed phase space, *Phys. Rev. E* **85** (2012) 046203 (7 pages)

A. Ishikawa, A. Tanaka, A. Shudo and K.S. Ikeda: Diffraction and tunneling in systems with mixed phase space, *Phys. Rev. E* **86** (2012) 036208 (14 pages)

A. Shudo and K.S. Ikeda: Tunneling effect and natural boundary of invariant torus, *Phys. Rev. Lett.* **109** (2012) 154102 (5 pages)

A. Tanaka, T. Cheon and S. W. Kim: Gauge invariants of eigenspace and eigenvalue anholonomies: Examples in hierarchical quantum circuits, *J. Phys. A: Math. Theor.* **45** (2012) 335305-1–335305-20

2) 国際会議報告

A. Ishikawa, A. Tanaka, Y. Hanada and A. Shudo: Flooding of wave functions in multi-dimensional mixed systems and the possibility of experimental observation, AIP Conference Proceedings Vol. 1468, Proceedings of “Let’s Face Chaos Through Nonlinear Dynamics” 8th International Summer School and Conference, Edited by M. Robnik and V. Romanovski, (2012) pp.3400-349

3) 学会講演

● 日本物理学会 第 67 回年次大会 2012 年 3 月 24 日~ 3 月 27 日 (関西学院大学 西宮上ヶ原キャンパス)

池田研介, 首藤啓: カオスのトンネル効果の複素半古典理論 II

● 日本物理学会第 68 回年次大会 2012 年 3 月 26 日~ 3 月 29 日 (広島大学 東広島キャンパス)

花田康高, 首藤啓: 不安定周期軌道と混合位相空間をもつカオス系のトンネル分裂について

原田浩充, 首藤啓: 離散時間系におけるエネルギー分裂の半古典論について

青木和輝, 赤石暁, 首藤啓: 区分線型写像における階層構造の複雑さ

米澤信拓, 田中篤司, 全卓樹: 一次元ボーズ系での固有値・固有空間のアンホロノミー: (I) 擬運動量を使ったアンホロノミーの計算

田中篤司, 米澤信拓, 全卓樹: 一次元ボーズ系での固有値・固有空間のアンホロノミー: (II) 隠れた複素縮退点

● 日本物理学会 2012 年秋季大会 物性関係 2012 年 9 月 18 日~ 21 日 (横浜国立大学 常盤台キャンパス)

花田康高, 首藤啓: 複素ポテンシャルを用いた量子開放系の解析

原田浩充, 首藤啓: エネルギー分裂に関する半古典論と複素古典軌道のトポロジー

大橋るり子, 金井真澄, 首藤啓: 完全 WKB 解析による 3 準位の非断熱遷移について

青木和輝, 赤石暁, 首藤啓: 区分線型写像における階層構造の系統性

赤石暁, 首藤啓: Sharply-divided Phase Space のベキ則

田中篤司, 全卓樹: kicked top における固有空間と固有値のアンホロノミー

国内研究会

● 非線形・非平衡系シンポジウム —新しいエルゴード問題の探求— 2013 年 3 月 7 日-3 月 8 日 (早稲田大学 染谷記念国際会館)

首藤啓: 混合系の量子論と複素力学系におけるエルゴード問題

花田康高: 非可積分系におけるトンネル効果

● RIMS 研究集会「超局所解析と漸近解析の最近の進展」2012 年 10 月 23 日-10 月 26 日 (京都大学 数理解析研究所)

R. Ohashi and A. Shudo: Numerical verification of the exact WKB analysis for multilevel nonadiabatic transition problems

国際会議

● Post advanced study group meeting October 15-19, 2012 (Max Planck Institute for Physics of Complex Systems, Dresden)

A. Shudo: Tunneling effect and the natural boundary of invariant tori (invited)

● Workshop of Quantum Dynamics and Quantum Walks, November 24–26, 2012 (Institute for Molecular Science)

Y. Hanada, Y. Sugiyama and A. Shudo : Wave packet recurrence in strongly chaotic systems

● The 11th Christmas symposium of Physicists , December 5–7, 2012 (Maribor)

A. Shudo : An introduction to exact WKB method (invited)

● The Global Human Resource Program Bridging across Physics and Chemistry, February 8, 2013 (Tokyo Metropolitan University)

H. Harada and A. Shudo : Semiclassical theory of tunneling splittings and the singularity structure in nonlinear resonances

Y. Hanada, Y. Sugiyama and A. Shudo : Wave packet recurrence in strongly chaotic systems

● Non-Hermitian Operators in Quantum Physics (PHHQP XI), August 27–31, 2012 (University Paris Diderot, Paris, France)

A. Tanaka: Exceptional points behind eigenspace and eigenvalue anholonomies of bound states

4) 著書等

首藤 啓: 数理物理 私の研究 (シュプリンガー量子数理シリーズ) (シュプリンガー, 2012) pp.219–224

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。クラスター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、2011 年度に、並列計算用のクラスターラベリングアルゴリズムを用いて GPU 計算を実現した。2012 年度は複数の GPU を使った大規模なクラスターアルゴリズム・モンテカルロシミュレーションのプログラム改良を行い、さらに具体的な問題として 2 次元 XY モデルを取り上げた。東工大学術国際情報センターの TSUBAME2.0 のシステムを用いて、 65536×65536 という非常に大きいサイズの計算を実行し、従来問題とされてきた対数補正の指数を精度よく決定できた。[岡部]

2) モンテカルロ法の画像処理問題への応用

Mumford-Shah エネルギー汎関数による画像領域分割問題について、モンテカルロ法により低エネルギー解を安定して探索する方法を公表してきたが、さらに、グラフカット法との比較を行った。多値分割の場合、グラフカット法は、初期条件をうまく選ばば、大域的なエネルギー最小値に収束するが、一般的にはよい初期条件を探すのが容易ではない。そこで、2011 年度に、モンテカルロ法とグラフカット法を組み合わせたハイブリッド法を提案した。すなわち、モンテカルロ法により求めた解をグラフカット法の初期条件として用いる方法で、画像によらず、計算時間も短く、大域的な最小値に近づくことを示した。2012 年度には、取り扱う画像の例を増やし、さらに 2 次元画像から 3 次元画像に拡張し、その有効性を示した。[岡部]

3) Fermi 原子が誘発する Bose 原子系の Mott 転移

光学格子上で極低温まで冷やされた超流動状態にある Bose 原子系に対し Fermi 原子を添加すると、Mott 状態に転移する実験が報告されている。この機構について理論的解析がこれまで行われてきているが、確定的な理論が確立されていない。通常、光学格子上の粒子の運動を考える際に用いるのが強結合近似であるが、本現象については強結合近似の範囲内では理論的に再現できないことがすでに知られている。そこで本研究では、強結合近似で従来無視されていた効果を取り入れることでより精密化した強結合近似ハミルトニアンを導出した。その有効性を確認するため、量子モンテカルロシミュレーションを実施したところ、有限の Fermi 原子濃度で Bose 原子系が Mott 転移する様子が観測された。[森]

4) 非整合ポテンシャル中での Bose-Fermi 混合系の局在現象

周期ポテンシャルに加えて、その周期性と非整合なもう一つの周期ポテンシャルを印加すると、そのポテンシャル中での粒子の運動はランダムポテンシャル中の運動とほぼ同等の特性を持つことが知られている。Bose 原子と Fermi 原子を非整合ポテンシャル中に導入し、その局在現象をシミュレーションにより解析した。両種原子間の相互作用が斥力の場合、ポテンシャル井戸の深さが実効的に浅くなり、非局在化が起こることが確認された。一方、この相互作用が引力の場合、ほとんどの状況では引力相互作用を強めると局在化が進んだが、特定の状況では非局在化が発生した。この特定の状況での非局在化について詳細にシミュレーション解析し、そのメカニズムについて解明した。[森]

5) 二次元スピニアイスの動的磁化率に関する理論的考察

最近 Dy₂Ti₂O₇ や Ho₂Ti₂O₇ などの所謂スピニ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。その一つとして [111] 方向に DC 磁場を掛け、さらにそれに垂直面内に AC 磁場をかけることにより得られる AC 磁化率の測定実験が、後藤-高津-門脇グループにより行われ興味深いデータが得られている。私は特に DC 磁場が上記二次元スピニアイスを実現する範囲にありかつ十分低温領域での AC 磁化率に関する理論的考察を行った。ここでは磁気モノポールの励起を表す欠陥の自由度を用いた系の記述が効率的であり、二次元スピニアイスの基底状態のspin配置空間の持つ性質が磁化率に強く反映されることが明らかになった。具体的には AC 磁化率を欠陥の持つ電荷の静的な空間相関を用いて近似的に書き表し、更に上述の有効理論について知られている厳密解の知識を組み合わせることにより解析的表式を得た。またモンテカルロ法を用いた数値計算結果とも定性的に一致する振る舞いを確認することが出来た。更に実験データとの比較も含めた詳細な研究を行った。[大塚]

6) カゴメ格子上反強磁性古典 XY 模型における低温秩序相の可能性

カゴメ格子上に定義された反強磁性古典 XY 模型について考察している。Huse-Rutenberg によると、その基底状態は反強磁性三状態 Potts 模型の基底状態に対応した縮退を持ち、更に同 Potts 模型と等価な SOS 模型はフラット相への相転移点直上にあるとされていることより主要な物理量の持つ次元が求められている。本研究にて我々は Korshunov の議論を下に vector dual sine-Gordon 模型を用いた詳細な解析を行った。関連する物理量の理論的表記およびその性質を明らかにした後、Korshunov の議論に従い低温での交替カイラリティー秩序相の実現の可能性について考察した。更に dislocation が有意になった温度領域における相の性質を Huse-Rutenberg により導入された場を用いて考察したが、その結果 disclination に対応した fractional vortex の励起により更に完全無秩序相へ転移する可能性を確認した。また BKT 転移の普遍性クラスを仮定して行われたモンテカルロ計算による解析結果について考察し再考すべき点があることを見出した。[大塚]

2. 研究業績

1) 論文

Y. Komura and Y. Okabe: Large-Scale Monte Carlo Simulation of Two-Dimensional Classical XY Model Using Multiple GPUs, *J. Phys. Soc. Jpn.* **81** (2012) 113001 (4pp).

Y. Komura and Y. Okabe: Multi-GPU-based Swendsen-Wang multi-cluster algorithm for the simulation of two-dimensional q-state Potts model, *Comp. Phys. Commun.* **184** (2013) 40-44.

2) 国際会議報告

A. Masaki and H. Mori: Localization of Bose-Fermi Mixtures in One-Dimensional Incommensurate Lattices ” *J. Physics, Conf. Ser.* **400** (2012) 012043.

3) 学会講演

● 日本物理学会 2012 年秋季大会 2012 年 09 月 18 日~ 2012 年 09 月 21 日 (横浜国立大学)

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

宮本昇, 森弘之: 積層格子における磁場中 Bose 粒子の振る舞い

大塚博巳、後藤和基、高津浩、門脇広明: 二次元スピンの AC 磁化率に関する理論的考察—運動する defect に着目した磁気応答の解析について—

後藤和基, 高津浩, 大塚博巳, 東中隆二, 門脇広明, 松林和幸, 上床美也: Dy₂Ti₂O₇ のカゴメアイス状態におけるスピンドダイナミクス

● 日本物理学会 第 68 回年次大会 2013 年 3 月 26 日 (火) ?29 日 (金) (広島大学)

菅聡明, 江川友規, 森弘之: ボーズ・フェルミ原子気体における永久電流

大塚博巳: カゴメ格子反強磁性 XY 模型の相転移について

後藤和基, 高津浩, 大塚博巳, 東中隆二, 門脇広明, 松林和幸, 上床美也: スピンの Dy₂Ti₂O₇ のチャージ密度相関

● 日本機械学会 第 25 回計算力学講演会 (CMD2001) 2012 年 10 月 06 日~ 2012 年 10 月 09 日 (神戸ポートアイランド南地区)

野本 祐春, 小村 幸浩, 岡部豊: GPU を用いた融液流動を伴う反応生成物の成長と運動のマルチフェーズフィールド法開発

● 第 17 回計算工学講演会 2012 年 05 月 29 日~ 2012 年 05 月 31 日 (京都教育文化センター)

小村幸浩, 岡部豊: 古典スピン系における GPU コンピューティングの応用

● GTC Japan 2012 2012 年 07 月 26 日~ 2012 年 07 月 26 日 (東京ミッドタウンホール&カンファレンス)

小村幸浩, 岡部豊: Tsubame2.0 を用いた, 大規模な領域分割アルゴリズム: パーコレーション問題への応用

国内研究会

● 基研研究会「量子スピン系の物理」、京都大学 基礎物理学研究所、2012 年 11 月 12~ 14 日

後藤和基, 高津浩, 大塚博巳, 東中隆二, 門脇広明, 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とそのダイナミクス

国際会議

● SC12, The International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, Salt Lake City, Utah, USA, November 10-16, 2012

Y. Komura and Y. Okabe: Multi-GPU-based calculation of percolation problem on the Tsubame 2.0 Supercomputer

● GTC 2013, GPU Technology Conference 2013, San Jose, California, USA, March 18-21, 2013

Y. Komura and Y. Okabe: The Large-Scale Cluster Labeling Algorithm with Multiple GPUs

● 23rd International Conference on Atomic Physics (Paris, France), July 2012.

A. Masaki and H. Mori: Localization of Bose-Fermi Mixtures in One-Dimensional Incommensurate Lattices

● Conference on Computational Physics 2012 (Kobe), October 2012.

A. Masaki and H. Mori: Quantum Monte-Carlo Simulation on Bose-Fermi Mixtures in One-Dimensional Incommensurate Optical Lattices

● The Global Human Resource Program Bridging across Physics and Chemistry (Tokyo Metropolitan University), February 2013.

S. Suga, T. Egawa, and H. Mori: Behavior of fermions and bosons in a ring threaded by a magnetic flux

● The 19th International Conference on Magnetism, Busan, Korea, July 8 – 13, 2012

Hiromi Otuska: Emergent Criticalities and Phase Transitions in Monomer-Dimer Mixture on a Honeycomb Lattice

スピン量子物性論研究室

1. 研究活動の概要

物性研究は物質の最高性能を引き出すための研究です。当研究室ではその中でも特に電子のもつ微小磁石、スピン、に関わる新現象を理論的に開拓しています。現在の技術であるエレクトロニクスでは電子の電荷と電流のみを利用していますが、スピンの制御が可能となればスピンのもつ情報も加えたスピントロニクスが実現され、今よりもはるかに多量の情報を高速で、また低いエネルギー消費で処理することが可能になります。特に現在重要とされている効果としては物質中のスピンにはたらく強い量子相対論効果があり、これをうまく用いると非常に強い磁石ができたり、スピンのもつ情報を電気信号に高効率で変換したりすることができます。解析には主に場の理論という手法を用いています。

1) Rashba 型スピン軌道相互作用から生じるスピン起電力

24 年度の研究では、スピン軌道相互作用のうち特に界面で発生する強い Rashba 型スピン軌道相互作用が、磁性と電気伝導特性に与える効果も解析した。その結果、磁化のダイナミクスと Rashba 型スピン軌道相互作用が組みあわさることで、起電力が発生するという新しい可能性を見出した。この起電力は、磁化の運動から生じるという点では、電磁気における Faraday 則と似ているが、物質中の量子効果によって生みだされている新しい効果で、電磁気効果と比べ物質中では圧倒的に強い効果である。この起電力のメカニズムはスピンのもつ量子的な Berry 位相を拡張した概念で理解することができる。定量的見積もりによると、Rashba 型が強い界面では、一様磁化の運動が 1mm の大きさの薄膜の場合で約 1V という大きな起電力を生み出すことが予想された。Rashba 型相互作用が磁壁移動において果たす役割は非常に重要であることが我々の理論及び英国側のメンバーの過去の実験などで明らかになっており、Rashba 型の磁壁移動における効果を検証する上でもこの新しい起電力は役立つものと期待される。

2) 光によるスピン制御 (幾何学的逆ファラデー効果)

スピンの制御に適したもうひとつの可能性は光である。円偏光した光や電磁場は角運動量を運んでいるので、これをうまく物質内のスピンに受け渡せれば光による磁化制御が可能である。このような円偏光度に比例した磁場や磁化が生成される効果は既に知られており、逆 Faraday 効果とよばれている。この効果は、光のもつ角運動量がまず物質中の電流とのゲージ相互作用を通じて電子系の軌道運動に変換され、ついでスピン軌道相互作用によりスピン系に受け渡されるという過程を経て起きている。つまり通常の逆 Faraday 効果ではスピン軌道相互作用が本質的な役割を担っている。このために、巨大な応答を実現するにはスピン軌道相互作用を強化する必要があるが、これには重い元素や希土類を用いる必要があり資源面コスト面での問題がある。そこで我々はスピン軌道相互作用を他の効果で置き換える可能性を考えた。我々が注目したのは磁気構造のもつスピン Berry 位相で、これは異常ホール効果においてスピン軌道相互作用と同じように座標空間とスピン空間を結びつけるはたらきをすることが知られている。我々はこのことから、幾何学的な磁気構造に対して円偏光の光を照射するだけでスピン軌道相互作用なしに逆 Faraday 効果が生じると予想し理論解析を行った。その結果確かにスピン Berry 位相と円偏光度によりきまる磁場が発生することがわかった。これを用いると磁気渦や skyrmion などの磁気構造を光で制御することができる。注目すべき点は、この幾何学的逆 Faraday 効果はスピン Berry 位相にのみ選択的に作用するため、磁気構造以外の背景磁化にはなんら影響を与えないことである。幾何学的逆 Faraday 効果の磁気渦に対する効果を数値シミュレーションにより解析した結果、実現可能な光の強度内で磁気渦の反転を 150ps という短時間でおこなうことができることがわかった。これは電流による反転と比べると 100 倍の速さである。我々の見出した幾何学的 Faraday 効果は光誘起磁化反転の新しい

メカニズムで、産業化する上でコスト的な問題のある重い元素を用いることなく磁化構造を高速で反転する新たな可能性を示したものである。

光によるスピン制御 (幾何学的逆ファラデー効果) スピンの制御に適したもうひとつの可能性は光である。円偏光した光や電磁場は角運動量を運んでいるので、これをうまく物質内のスピンに受け渡せば光による磁化制御が可能である。このような円偏光度に比例した磁場や磁化が生成される効果は既に知られており、逆 Faraday 効果とよばれている。この効果は、光のもつ角運動量がまず物質中の電流とのゲージ相互作用を通じて電子系の軌道運動に変換され、ついでスピン軌道相互作用によりスピン系に受け渡されるという過程を経て起きている。つまり通常の逆 Faraday 効果ではスピン軌道相互作用が本質的な役割を担っている。このために、巨大な応答を実現するにはスピン軌道相互作用を強化する必要があるが、これには重い元素や希土類を用いる必要があり資源面コスト面での問題がある。そこで我々はスピン軌道相互作用を他の効果で置き換える可能性を考えた。我々が注目したのは磁気構造のもつスピン Berry 位相で、これは異常ホール効果においてスピン軌道相互作用と同じように座標空間とスピン空間を結びつけるはたらきをすることが知られている。我々はこのことから、幾何学的な磁気構造に対して円偏光の光を照射するだけでスピン軌道相互作用なしに逆 Faraday 効果が生じると予想し理論解析を行った。その結果確かにスピン Berry 位相と円偏光度によりきまる磁場が発生することがわかった。これを用いると磁気渦や skyrmion などの磁気構造を光で制御することができる。注目すべき点は、この幾何学的逆 Faraday 効果はスピン Berry 位相にのみ選択的に作用するため、磁気構造以外の背景磁化にはなんら影響を与えないことである。幾何学的逆 Faraday 効果の磁気渦に対しての効果を数値シミュレーションにより解析した結果、実現可能な光の強度内で磁気渦の反転を 150ps という短時間でおこなうことができることがわかった。これは電流による反転と比べると 100 倍の速さである。我々の見出した幾何学的 Faraday 効果は光誘起磁化反転の新しいメカニズムで、産業化する上でコスト的な問題のある重い元素を用いることなく磁化構造を高速で反転する新たな可能性を示したものである。

3) スピントロニクスデバイスの電磁気現象への応用

スピントロニクスデバイスの電磁メタマテリアルへの応用の可能性を議論した。電磁メタマテリアルは屈折率の実部が負になる物質で、これが実現すれば波長限界を超えた分解能をもつスーパーレンズや、物質を電磁波に対して透明にすることができ、応用上の可能性は多岐にわたる。屈折率を負にすることは、共鳴をもちいることで誘電率と透磁率の実部を負にすることで実現でき、実際電波領域ではある制限のもとではあるが負の屈折率が実現されている。透磁率に共鳴を起こすためには磁化の駆動が必要であるが、これには外部磁場だけでなく電流や光などいくつかの方法がある。我々が注目した点は、電流は磁場と異なったトルクを与えることで、このため電流下の磁化に光を照射した場合は負の屈折率の実現だけではなく、透磁率の虚部の符号反転も可能で電磁波の増幅も同時におこなえる可能性が明らかになった。この場合はこれまでの増幅原理と異なり微小な構造でも増幅が可能となり、高効率、省エネルギーの点で大きなメリットがあると予想される。

2. 研究業績

1) 論文

Proposal for an active electromagnetic metamaterial based on spin-torque oscillators

G. Tatara, Hiroaki T. Ueda, Katsuhisa Taguchi, Yuta Sasaki, Miyuki Nishijima and Akihito Takeuchi
Phys. Rev. B, **87**, 155102 (1-8) (2013).

Spin motive force induced by Rashba interaction in the strong sd coupling regime

G. Tatara, N. Nakabayashi and Kyun-Jin Lee
Phys. Rev. B **87** 054403 (1-9) (2013).

Monopoles in ferromagnetic metals

G. Tatara, A. Takeuchi, N. Nakabayashi, and K. Taguchi
J. Korean. Phys. Soc. **61** 1331-1348 (2012).

Ultrafast magnetic vortex core switching driven by topological inverse Faraday effect

Katsuhisa Taguchi, Jun-ichiro Ohe and Gen Tatara
Phys. Rev. Lett. **109**, 127204 (1-5) (2012).

Topological charge pumping effect by the magnetization dynamics on the Surface of Three-Dimensional Topological Insulators

Hiroaki T. Ueda, Akihito Takeuchi, Gen Tatara, Takehito Yokoyama
Phys. Rev. B **85**, 115110 (1-6) (2012).

Spin Damping Monopole

Akihito Takeuchi, Gen Tatara
J. Phys. Soc. Jpn. **81** 033705 (1-4) (2012). (Editors' Choice)

H. T. Ueda and T. Momoi, Nematic phase and phase separation near saturation field in frustrated ferromagnets, Phys. Rev. B **87**, 144417 (1-12) (2013).

2) 国際会議報告

Takeuchi, A. and Tatara, G.

Magnetic Monopole Generated by Spin Damping with Spin-Orbit Coupling
Journal of Physics: Conference Series, **400**, 042058(1-4) (2012).

Taguchi, K. and Tatara, G.

Theory of inverse Faraday effect in Rashba system
Journal of Physics: Conference Series, **400**, 042055(1-4) (2012).

Magnetic monopole in spin pumping systems

Akihito Takeuchi and Gen Tatara
J. Appl. Phys. **111**, 07C509(1-3) (2012).

3) 学会講演

● 応用物理学会春季学術講演会、2013年3月29日(金)、神奈川工科大学

多々良源

磁化ダイナミクス誘起電流における磁気モノポールの可能性 (invited)

シンポジウム「スピンドイナミクス、スピン輸送現象の最前線」

● 日本物理学会第67回年次大会、広島大学(2013年3月)

田口勝久, スピン軌道相互作用下におけるプラズモン

● 日本物理学会秋季大会、横浜国立大学(2012年9月)

植田浩明、戸塚圭介, 飽和磁場直下におけるスピネマティック秩序の安定性

田口勝久, スピングージ場と円偏光誘起の有効理論

田口勝久, スピントルクによる磁気透磁率の変化

国内研究会

● 大阪電気通信大学エレクトロニクス基礎研究所シンポジウム (原子・分子レベルでの材料創製とキャラクター化) 「スピントロニクマテリアルの新しい展開」 2013年1月11日

多々良源

スピン軌道相互作用から生じる起電力とモノポール (invited)

● The Global Human Resource Program Bridging across Physics and Chemistry 物理と化学で紡ぐグローバル人材育成プログラム, 首都大学東京 (2013年2月8日)

田口勝久, Circularly polarized light-induced magnetic vortex core switching (ポスター P-33)

国際会議

● The American Physical Society (APS) March Meeting 2013, Baltimore, Maryland, 18-22, March (2013).

Y. Sasaki, H. Ueda, Refraction and reflection process in a ferromagnet/frustrated-ferromagnet junction

H. Ueda, G. Tatara, K. Taguchi, Y. Sasaki, M. Nishijima and A. Takeuchi, Proposal for an active electromagnetic metamaterial based on spin-torque oscillators

H. Ueda, T. Momoi, Nematic phase and phase separation near saturation field in frustrated ferromagnets

K. Taguchi, Spin Polarization Induced by Rashba Field and Electromagnetic Wave (ポスター:H1.00310)

● WPI-AIMR workshop Topological Functional Materials and Devices, Nov. 30th — Dec. 1st (2012)
WPI main building, Tohoku University, Sendai, Japan

G. Tatara

Magnetic monopole induced by spin-orbit interaction in ferromagnetic metals (invited)

● The 2nd International Conference of the Asia Union of Magnetism Societies (ICAUMS2012), Nara Prefectural New Public Hall, 2-5 October (2012).

G. Tatara

Spin Damping Monopole (Invited)

K. Taguchi, Ultrafast magnetic vortex core switching driven by topological inverse Faraday effect

● The 19th International Conference on Magnetism (ICM2012), Bexco, Busan, Korea, 8-13, August (2012).

H. Ueda, A. Takeuchi, G. Tatara, T. Yokoyama Topological charge pumping effect by the magnetization dynamics on the Surface of Three-Dimensional Topological Insulators

K. Taguchi, Vortex core dynamics driven by a novel inverse Faraday effect

● 4th International Workshop on Spin Caloritronics, June 2-5 (2012), Institute for Materials Research, Tohoku University

Gen Tatara

Spin damping monopoles in spin pumping + inverse spin Hall systems (invited)

田口 勝久, "Ultrafast magnetic vortex core switching driven by topological inverse Faraday effect" (ポスター)

佐々木 優太 (M1), "Spinwave Reflection and Transmission in a ferromagnetic junction" (ポスター)

● The 9th International Workshop on Spintronics, May 31-June 2, 2012 (Sendai, Japan)

田口 勝久, "Ultrafast magnetic vortex core switching driven by topological inverse Faraday effect" (ポスター: P10)

4) 新聞雑誌への掲載

N 極だけの磁石できた

朝日小学生新聞、2012 年 6 月 17 日号

固体の中をモノポールが流れる

日経サイエンス、2012 年 5 月号 (News Scan 国内ウォッチ)

手のひらに N 極だけの磁石を

Newton、2012 年 5 月号 (Focus)

強相関電子論研究室

1. 研究活動の概要

本研究室では、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。2012年度の研究室体制は、スタッフ1名、特任助教1名、大学院生6名であった。2012年度における研究活動の概要は次の通りである。

1) f 電子系の多極子秩序の微視的理論

近年、希土類およびアクチノイド化合物の f 電子系において、軌道の自由度とスピンの自由度が結合した多極子自由度の秩序化や揺らぎに起因した現象が活発に研究されている。特に、電気単極子や磁気双極子を越えた電気四極子や磁気八極子の秩序状態が実際に観測され、さらに高次の電気十六極子秩序の可能性も議論されるようになってきた。しかし、そのような多極子秩序相の安定化機構や、多極子秩序相近傍の多極子揺らぎの電子物性への影響、多極子揺らぎによる超伝導の可能性については、まだまだ研究は進んでいない。今後、多極子揺らぎに起因する新奇物性の発見とその理解を推進するためにも、多極子に関する微視的観点からの研究が必要とされている。そこで本研究では、多極子秩序相の出現およびその近傍の多極子揺らぎによる超伝導の可能性を微視的観点から理解することを目指して、スピン軌道相互作用を考慮した7軌道ハバードモデルを構築し、それを乱雑位相近似で解析し、多極子秩序の出現を微視的観点から議論するスキームを考案した。たとえば、Pr化合物やU化合物を念頭において、サイトあたりの f 電子数が2個の場合の非クラマース Γ_3 四極子秩序相についても、微視的観点からの議論することができる。今後、同じ近似の範囲で、四極子秩序相近傍の超伝導についても研究を進める予定である。

2) ガドリニウム化合物の四極子感受率

f 電子状態を記述する方法として、 LS 結合描像や $j-j$ 結合描像がよく知られている。これらは、クーロン相互作用 U とスピン軌道相互作用 λ を摂動論的に扱うスキームであるが、 $U = \infty$ の極限から λ の影響を摂動論的に考慮するのが LS 結合描像、 $\lambda = \infty$ の極限から U の効果を摂動論的に考慮するのが $j-j$ 結合描像である。現実の物質では、 U の効果の方が大きいので、 LS 結合描像で議論することが多いが、実際には U も λ も有限であり、 LS 結合描像の波動関数に $j-j$ 結合描像の成分が混ざるはずである。しかし、このような波動関数の変化が多極子状態に与える影響はこれまであまり議論されてこなかった。そこで本研究では、 f 軌道における全ての電子配置を用いて電子状態を記述し、系の多極子物性を微視的観点から調べることにした。特に、 LS 結合描像と $j-j$ 結合描像の差がはっきり現れるハーフフィリング近傍のガドリニウムイオン (f^7 系) の四極子モーメントを議論した。この系を単純に LS 結合描像で議論すると、双極子モーメントのみが活性となり、四極子モーメントは存在しないことになる。しかし、上に述べたように、実際には U も λ も有限なので、 $j-j$ 結合描像の波動関数の影響が現れ、四極子モーメントが活性になるはずである。全ての f 電子配置を考慮して四極子感受率を数値計算により求めたところ、ガドリニウムイオンの四極子モーメントの影響が実際に現れることを明らかにした。さらに、四極子感受率の大きさは弾性定数の測定によって検出可能な程度であることを示した。

3) 非調和原子振動による超伝導転移温度の逆同位体効果

充填スクッテルライト化合物や β パイロクロア酸化物、クラスレート化合物などのカゴ状物質において、比較的軽い元素から成る「カゴ」に内包される原子の非調和振動、すなわちラットリングによる電子間相互作用に起因する特異な物性が注目を集めている。これまで、カゴ状物質に特徴的なラットリングによる

電子の有効質量の増大と超伝導転移温度の上昇の関係を明らかにしてきた。しかし、ラットリングが超伝導に関与しているという直接的な証拠はまだ明らかになっていない。そこで本研究では、振動する原子の質量を変えたときに超伝導転移温度がどのように変化するかという同位体効果を、Migdal-Eliashberg理論の枠内で調べた。非調和性の影響を考慮したホルスタイン模型において、フォノンのエネルギー ω が電子のバンド幅よりも十分小さい断熱近似の範囲で、電子フォノン結合定数の2次摂動で電子の異常自己エネルギーを求め、Eliashberg方程式を解くことによって超伝導転移温度を計算した。その結果、ゲストイオンに対するポテンシャルの底が平らで幅が広がると、系が弱結合から強結合状態に移り変わり、質量増強因子が増大するとともに超伝導転移温度が上昇するという従来の結果を再確認するとともに、そのようなラットリングの状況において、原子質量の増加とともに超伝導転移温度が上昇することを見出した。これは、調和フォノンによる従来型超伝導において予想される同位体効果とは逆の変化であり、このような特異な逆同位体効果が、ラットリングによる超伝導の証拠になるという提案を行った。

4) 振動する磁性イオンの近藤効果の理論

カゴ状物質においてラットリングと呼ばれる内包イオンの非調和振動が関与する近藤効果の研究をすすめた。振動の自由度を考えることにより、自動的に2つ以上の部分波が関与することになり、局在スピンを遮蔽する伝導電子のチャンネルは複数となる。フォノンを伴う混成と伴わない混成が拮抗するとき2チャンネル近藤効果が実現する。振動する磁性イオンの近藤効果の基底状態を数値繰り込み群の手法を用いて詳細に解析した。局在軌道のクーロン斥力 U が大きい場合は磁気モーメントが発生するが、それは基底状態で s 部分波、およびフォノンを伴う p 波の部分波によって遮蔽され、両者が拮抗するとき非フェルミ液体の2チャンネル近藤効果の不安定固定点を実現する。この分岐は弱結合領域まで連続的に存在し基底状態の二つの相の間の境界をなしている。2つの基底状態はパリティの違いによって特徴づけられる。弱結合領域の近藤効果は磁気モーメントではなく電気双極子モーメントの近藤効果および2チャンネル近藤効果として特徴づけられることを明らかにした。

2. 研究業績

1) 論文

Takashi Hotta: Microscopic theory of multipole ordering in f -electron systems, *Phys. Res. Int.* **2012**, 762798 (2012).

Fumiaki Niikura and Takashi Hotta: Quadrupole Susceptibility of Gd-Based Filled Skutterudite Compounds, *J. Phys. Soc. Jpn.* **81**, 114720 (2012).

Kunihiro Oshiba and Takashi Hotta: Anomalous Isotope Effect in Rattling-Induced Superconductor, *J. Phys. Soc. Jpn.* **81**, 114711 (2012).

Takashi Hotta and Kazuo Ueda: Electric Dipolar Kondo Effect Emerging from Vibrating Magnetic Ion, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 247214 (2012).

Takahiro Fuse, Yoshiaki Ōno, and Takashi Hotta: Heavy-Electron Formation and Bipolaronic Transition in the Anharmonic Holstein Model, *J. Phys. Soc. Jpn.* **81**, 044701 (2012).

2) 学会講演

● 日本物理学会 2012 年秋季大会 2012 年 9 月 20 日 (横浜国立大学常盤台キャンパス)

布施貴裕、堀田貴嗣：アンダーソン・ホルスタイン模型における電気双極子感受率

長谷川裕、眞榮平孝裕、堀田貴嗣：二酸化アクチノイドの電子状態：強束縛近似による解析

● 日本物理学会第 68 回年次大会 2013 年 3 月 27 日（広島大学東広島キャンパス）

布施貴裕、堀田貴嗣：振動する磁性イオンの近藤効果に対するホルスタインフォノンの影響

国内研究会

● 新学術領域研究「重い電子系の形成と秩序化」ワークショップ~ 重い電子系における格子・フォノンの役割~ 2012 年 6 月 19 日（岩手大学北桐ホール）

堀田貴嗣：ラットリングに関するコメント

● 新学術領域研究「重い電子系の形成と秩序化」ワークショップ~ カゴ状構造に宿る強相関物性~ 2012 年 9 月 27 日（首都大学東京南大沢キャンパス）

布施貴裕、堀田貴嗣：アンダーソン・ホルスタイン模型における電気双極子感受率と近藤効果

大柴邦洋、堀田貴嗣：ラットリングフォノンによる超伝導の異常同位体効果

● 新学術領域研究「重い電子系の形成と秩序化」ワークショップ~ 純良単結晶育成と重い電子系のフェルミ面~ 2012 年 11 月 23 日（琉球大学研究者交流施設（50 周年記念会館））

長谷川裕、眞榮平孝裕、堀田貴嗣：二酸化アクチノイドの電子状態：強束縛近似による解析

● 第 6 回物性科学領域横断研究会「凝縮系科学の最前線」2012 年 11 月 27 日（東京大学武田先端知ビル 5 階武田ホール）

布施貴裕、堀田貴嗣：アンダーソン・ホルスタイン模型における電気双極子モーメントの研究

● 物性研究所共同利用スパコン合同研究会「計算物性物理学の新展開」2013 年 1 月 11 日（東京大学柏の葉キャンパス）

堀田貴嗣：電子・フォノン系の近藤効果の数値繰り込み群法による研究

● 新学術領域研究「重い電子系の形成と秩序化」第 4 回研究会 2013 年 1 月 12 日~ 14 日（東京工業大学大岡山キャンパス）

堀田貴嗣：f 電子の多自由度性に創出する新奇な量子秩序と超伝導の理論

布施貴裕、堀田貴嗣：振動する磁性イオンの近藤効果に対するホルスタインフォノンの影響

国際会議

● International Conference on Magnetism 2012, July 9, 2012, Busan, Korea

Takahiro Fuse and Takashi Hotta,

Electric Dipolar Susceptibility of the Anderson-Holstein Model

● XXIst International Symposium on the Jahn-Teller Effect (JT2012), Tsukuba, Japan, August 30, 2012.

Takashi Hotta and Yuji Shiba, Fermi-Surface Topology and Superconductivity Induced by Jahn-Teller Phonons

Takahiro Fuse and Takashi Hotta, Kondo effect emerging from a spin-vibronic state

● Japan-Swiss Workshop on “Current Topics in Theory of Correlated Materials”, Wako, Saitama, Japan, September 11, 2012.

Takashi Hotta: Quadrupole Susceptibility of Gd-Based Filled Skutterudites (invited)

● The IMR-ASRC 3rd REIMEI International Workshop (6th ASRC International Workshop), Tokyo, Japan, February 19, 2013.

Takashi Hotta: Key role of hybridization between actinide $5f$ and oxygen $2p$ orbitals for electronic structure of actinide dioxides (invited)

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。長い間本研究室で研究と学生指導を行ってきた千葉雅美助教が、今年度末で定年退職された。

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、Belle-II 実験では中性子の照射量が 10 年間で $10^{12}/\text{cm}^2$ 以上、 γ 線の照射量も 100krad におよぶと予想されることから HAPD の放射線耐性が課題となっていた。HAPD の電極構造の改良、読み出し電子回路の時定数の最適化などを行った結果、放射線耐性に関してはほぼ問題は解決した。

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。

今年度は Belle 実験で 15 編の欧文雑誌への投稿論文が出版された。

2) Double Chooz 実験

2012 年は加速器と原子炉ニュートリノ実験の精密測定によって混合角 θ_{13} の有限値が測定され、ニュートリノ物理において重要な年となった。これによりレプトンセクターの CP 非保存パラメータの測定や質量階層性の決定に向けた具体的な将来計画が活発に議論されており、 θ_{13} 測定の精密化はその方向性を決める上でも依然重要な役割を担っている。

当研究室では原子炉ニュートリノ実験 Double Chooz に参加し、ニュートリノ反応検出に重要な光電子増倍管と高電圧電源システムを担当している。Double Chooz 実験は 2011 年度から測定を開始し 9 月に最初の解析結果を発表、他実験と合わせて θ_{13} 有限値の兆候を世界で初めて示した。2012 年 6 月には 2 倍の統計量と解析手法の刷新により測定結果を更新し、 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.109 \pm 0.030(\text{stat}) \pm 0.025(\text{sys})$ と θ_{13} 測定の精密化に成功した。2014 年以降からは建設中の前置検出器も加えた測定により、さらなる θ_{13} 測定精度の向上が期待される。2012 年度は Double Chooz 実験で 3 編の欧文雑誌への投稿論文が受理された。

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す DCBA 実験グループ (KEK などとの共同実験) に参加している。

DCBA-T2 と呼ばれる常伝導電磁石と DC を組み合わせたスペクトロメーターで、二重ベータ崩壊を起こす ^{100}Mo を 9.6% 含んだ Mo 板から複数の 2 電子崩壊事象を検出した。2011 年 7 月より超伝導電磁石を用いた昼夜連続運転が行われており、2012 年度末現在も順調にデータ取得を行なっている。また次世代の実験装置である DCBA-T3 の開発を並行して行なっており、今年度はとくに DCBA-T3 の読み出しシステムの開発を進めた。

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。本実験では、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 の飛行後に電子ニュートリノへの変化する事象を観測することにより有限の θ_{13} の発見を目指している。

2010 年にデータ取得を開始し、2012 年夏の段階で前述の事象候補を 11 事象捉えた。これらの事象を用いて計算される θ_{13} の値は Double Chooz 実験をはじめとする原子炉ニュートリノ実験で得られた値と矛盾がない。5 σ 以上の有意性で有限の θ_{13} を測定することを目指し、データ取得を継続している。

今年度はニュートリノビームフラックス測定に関する論文を共著で執筆し欧文雑誌に受理された。

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 の検出媒質が必要となる。

岩塩鉱や南極氷床中でのニュートリノ反応シャワーを捉える方法として、電波反射効果は媒質中の温度上昇に伴う誘電率の上昇による位相変化が原因であることを明らかとした。

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。10 万年以上の長期間岩石蓄積された放射線損傷を ESR や熱あるいは光刺激による蛍光測定を行い、小質量検出媒質を利用した測定方法を提案した。。

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 $\pi^+\pi^-$ 原子を測定するための永久磁石の製作し、データ取得を行った。さらにラムシフト測定のための高磁場永久磁石の高中性子束中での放射線損傷の測定の準備を行った。

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 光子稀崩壊現象のデータ取得を行った。実験データの解析から 1473 日分のデータを解析した。検出器の検出効率をシミュレーションから求めて QED の予測事象数と比較した結果、QED より大きい可能性が示された。

2. 研究業績

1) 論文

Search for lepton-flavor and lepton-number-violating $\tau \rightarrow \ell hh'$ decay mode

Belle Collaboration (Y. Miyazaki (Nagoya U.) *et al.*). 2013. 8 pp.

Phys. Lett. B719 (2013) 346-353

Search for CP Violation in the Decay $D^+ \rightarrow K_s^0 K^+$
 Belle Collaboration (B.R. Ko (Korea U.) *et al.*). Dec 2012. 15 pp.
 JHEP 1302 (2013) 098

Study of the Hadronic Transitions $\Upsilon(2S) \rightarrow (\eta\pi^0)\Upsilon(1S)$ at Belle
 Belle Collaboration (U. Tamponi (INFN, Turin) *et al.*). Oct 2012. 6 pp.
 Phys. Rev. D87 (2013) 011104

Direct Measurement of Backgrounds using Reactor-Off Data in Double Chooz
 Double Chooz Collaboration (Y. Abe (Tokyo Inst. Tech.) *et al.*). Oct 2012.
 Phys. Rev. D87 (2013) 011102

First Test of Lorentz Violation with a Reactor-based Antineutrino Experiment
 Double Chooz Collaboration (Y. Abe (Tokyo Inst. Tech.) *et al.*). Sep 2012. 6 pp.
 Phys. Rev. D86 (2012) 112009

Review of Particle Physics (RPP)
 Particle Data Group Collaboration (J. Beringer (LBL, Berkeley) *et al.*). Jul 2012. 1528 pp.
 Phys. Rev. D86 (2012) 010001

Reactor electron antineutrino disappearance in the Double Chooz experiment
 Double Chooz Collaboration (Y. Abe (Tokyo Inst. Tech.) *et al.*). Jul 2012.
 Phys. Rev. D86 (2012) 052008

Evidence for $B^- \rightarrow D_s^+ K^- \ell^- \bar{\nu}_\ell$ and search for $B^- \rightarrow D_s^{*+} K^- \ell^- \bar{\nu}_\ell$
 Belle Collaboration (J. Stypula (Cracow, INP) *et al.*). Jul 2012.
 Published in Phys. Rev. D86 (2012) 072007

First observation of CP violation and improved measurement of the branching fraction and polarization
 of $B^0 \rightarrow D^{*+} D^{*-}$ decays
 Belle Collaboration (B. Kronenbitter (Karlsruhe U., EKP) *et al.*). Jul 2012.
 Phys. Rev. D86 (2012) 071103

Search for B^0 decays to invisible final states
 Belle Collaboration (C.L. Hsu (Taiwan, Natl. Taiwan U.) *et al.*). Jun 2012.
 Phys. Rev. D86 (2012) 032002

First study of $\eta_c(1S)$, $\eta(1760)$ and $X(1835)$ production via $\eta'\pi^+\pi^-$ final states in two-photon collisions
 Belle Collaboration (C.C. Zhang (Beijing, Inst. High Energy Phys.) *et al.*). Jun 2012. 13 pp.
 Phys. Rev. D86 (2012) 052002

Search for $B \rightarrow \phi\pi$ decays
 Belle Collaboration (J.H. Kim (Sungkyunkwan U. & KISTI, Daejeon) *et al.*). Jun 2012. 6 pp.
 Phys. Rev. D86 (2012) 031101

Evidence for the $\eta_b(2S)$ and observation of $h_b(1P) \rightarrow \eta_b(1S)\gamma$ and $h_b(2P) \rightarrow \eta_b(1S)\gamma$
 Belle Collaboration (R. Mizuk (Moscow, ITEP) *et al.*). May 2012. 6 pp.
 Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 232002

Measurement of Branching Fraction and First Evidence of CP Violation in $B^0 \rightarrow a_1^\pm(1260)\pi^\mp$ Decays
Belle Collaboration (J. Dalseno (Munich, Max Planck Inst. & Munich, Tech. U.) *et al.*). May 2012.
22 pp.

Phys. Rev. D86 (2012) 092012

Measurement of $\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^0$ transition form factor at Belle

Belle Collaboration (S. Uehara (KEK, Tsukuba) *et al.*). May 2012. 30 pp.

Phys. Rev. D86 (2012) 092007

First observation of exclusive $\Upsilon(1S)$ and $\Upsilon(2S)$ decays into light hadrons

Belle Collaboration (C.P. Shen (Nagoya U.) *et al.*). May 2012. 7 pp.

Phys. Rev. D86 (2012) 031102

Search for the decay $B^0 \rightarrow DK^{*0}$ followed by $D \rightarrow K^-\pi^+$

Belle Collaboration (K. Negishi (Tohoku U.) *et al.*). May 2012. 6 pp.

Phys. Rev. D86 (2012) 011101

First Measurement of ϕ_3 with a Model-independent Dalitz Plot Analysis of $B \rightarrow DK^\pm, D \rightarrow K_S^0\pi^+\pi^-$
Decay

Belle Collaboration (H. Aihara (U. of Tokyo) *et al.*). Apr 2012.

Phys. Rev. D85 (2012) 112014

T2K neutrino flux prediction

T2K collaboration (K.Abe (ICRR, U. of Tokyo) *et al.*). Jan 2013.

Phys. Rev. D87 (2013) 012001

2) 学会講演

● 日本物理学会 2012 年秋季大会 2012 年 9 月 11 日~ 14 日 (京都産業大学)

坂下嘉徳, 住吉孝行, 角野秀一, 汲田哲郎, 岩田修一, 山見仁美ほか: Belle II 実験 A-RICH 用光検出器 HAPD の仕様決定に向けた放射線耐性評価~ 中性子線~

松原綱之: Recent results from Double Chooz

前田順平、他 Double Chooz collaboration: Double Chooz 実験における陽子による中性子捕獲事象を用いた解析 (2)

松本浩平, 住吉孝行, 前田順平, 松原綱之ほか、Double Chooz Japan グループ: Double Chooz 実験におけるエネルギー再構成

田島俊英, 住吉孝行, 角野秀一ほか: 二重ベータ崩壊測定器 DCBA-T3 用 DAQ システムの開発

谷川孝浩, 上條敏生, 千葉雅美, 安田修ほか: 超高エネルギーニュートリノ検出器のための電波反射測定法の構築

矢野浩之, 上條敏生, 谷川孝浩, 千葉雅美, 安田修ほか: 超高エネルギーニュートリノシャワーからのレーダー電波反射シミュレーション

● 日本物理学会 第 68 回年次大会 2013 年 3 月 26 日~ 29 日 (広島大学)

山見仁美, 住吉孝行, 角野秀一, 汲田哲郎, 岩田修一, 坂下嘉徳ほか: Belle II 実験の A-RICH のための読み出し電子回路とその品質評価システムの開発

矢野浩之, 上條敏生, 谷川孝浩, 千葉雅美, 安田修ほか: 超高エネルギーニュートリノ岩塩および氷検出器のための電子ビームの照射による電波反射測定とシミュレーション

千葉雅美, 上條敏生, 谷川孝浩, 安田修ほか: 超高エネルギーニュートリノの新しい測定法: 岩石への熱あるいは光刺激による蛍光測定

末吉賢伍, 住吉孝行, 前田順平, 松原綱之ほか: Double Chooz Japan グループ: Double Chooz 実験における外部ミュオン検出器の性能評価

角野秀一, 田島俊英, 住吉孝行ほか: 二重ベータ崩壊実験 DCBA-T2.5 の現状

田島俊英, 住吉孝行, 角野秀一ほか: 二重ベータ崩壊測定器 DCBA-T3 の開発

国際会議

● The 5th international workshop on Acoustic and Radio EeV Neutrino Detection Activities (ARENA 2012), the Erlangen Centre for Astroparticle Physics (ECAP) of the Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (Germany), June 19-June 22, 2012.

M. Chiba: 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

● IEEE 2012 Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference (NSS/MIC), Oct.29-Nov.3, 2012, Anaheim, USA

S. Iwata: Development of a RICH Counter with 144-ch Hybrid Avalanche Photo-Detectors for the Belle II Experiment

● 8th International Workshop on Neutrino beam & Instrumentation, Nov.6-10, 2012, CERN (Geneva), Switzerland

H. Kakuno: T2K proton beam monitoring

● Rencontres de Physique de la Vallée d'Aoste, Feb.24-Mar.2, 2013, La Thuile, Aosta Valley, Italy

H. Kakuno: The SuperKeKB Project

原子物理実験研究室

1. 研究活動の概要

特任研究員の宮内直弥が転出し、4月1日付けで新たに高谷一成を採用した。連携大院教授である理化学研究所の東俊行主任研究員とその研究室スタッフは継続して客員研究員として籍を置き、また、分子物質化学専攻・城丸春夫教授の研究室とも強固な共同研究体制を維持して、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分光と冷却過程の研究

静電型イオン蓄積リングでは、周回イオンの軌道制御を静電場のみで行う。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 を用いて分子物質化学専攻・城丸グループとの共同研究のもと、昨年度に引き続き、主にクラスター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水素付加炭素クラスター負イオンの寿命・分光測定：

星間空間において観測されている分子負イオンに関して、その電子脱離や放射性脱励起など冷却過程探求のため、これまで直鎖状炭素クラスター負イオンを蓄積し電子脱離による寿命を測定してきた。スパッタイオン源で生成された分子イオンは振動励起した高温状態にあり、その遅延電子脱離は一般に高温では速く、低温になるにつれ遅くなると考えられる。つまり、分子イオンの自動電子脱離により生成される中性粒子数の時間変化は、その分子イオンの冷却過程を強く反映する。この冷却過程に対する統一的理解を目指し、本年度は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^- についてレーザー励起後の電子脱離の観測を行った。 C_6^- と C_6H^- は放射性脱励起過程や電子脱離過程の速度が理論的には同程度と予想されるもののこれまで観測された実験データは両者の冷却時間に大きな違いを示唆していた。今回の測定で、 C_6H^- は冷却速度が電子脱離過程・放射性脱励起過程をもとにした理論予想と一致するのに対し、 C_6^- では理論予想の10倍程度大きな冷却速度が確認された。この速い緩和過程は、レーザー照射によって電子励起されてから内部転換によって高振動状態になった分子の振動エネルギーが、再び電子エネルギーへと逆内部転換されることによって電子励起状態に対する占有確率が生じることで、電子遷移が起こる再発蛍光 (ポアンカレ蛍光) 過程で説明される。この過程は、芳香族炭化水素イオンで存在が示唆されているが、直接的な観測例は未だに報告されていない。励起状態の占有確率は準位の励起エネルギーに依存し、 C_6^- では C_6H^- と異なり、低エネルギー状態が存在するため励起状態の占有確率が大きく、電子脱励起による冷却が速くなる。本過程を考慮した冷却速度に関する理論計算値は、実験で得られた冷却速度と良い一致をみた。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。また、同じイオン源を用いて Al クラスター負イオンの生成実験も開始した。

(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。これまでに、ESIによって生成されたメチレンブルー正イオンをイオントラップにて蓄積し、4 K に冷却されたバッファガスとの衝突によって冷却された分子イオンをトラップから引き出してリングに導入することに成功している。周回メチレンブルー正イオンに対する可視波長可変 OPO レーザー合流実験も開始され、室温冷却したイオンとは明瞭

に異なる挙動も観測された。今年度は入射イオン量の向上をめざし、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の向上を目指し、イオン輸送電場など各パラメータの調整を行った。

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1ms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1km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。本年度はこれらの装置を作成し、予備実験を行ってそれぞれの性能を評価できた。次年度にそれぞれの装置を首都大に移設して、本格的な測定を行う準備が完了したと言える。今年度、首都大では多価炭素イオン C^{6+} についてHeおよび H_2 標的との衝突実験を行い、衛星搭載の検出器と同程度のエネルギー分解能をもつシリコンドリフト型半導体検出器による軟X線発光スペクトルの観測および発光断面積の絶対値を測定した。

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。本年度はタングステンヘキサカルボニル $W(CO)_6$ の蒸気をECR多価イオン源に導入して生成した W^{17+} についてHeおよび H_2 との電荷移行断面積の測定を試みた。分光計測は斜入射型極端紫外分光器が導入されてから実施する予定である。

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。この数年は XH^+ ($X = C, N, O$) という形の二原子分子イオンについて測定を行ってきたが、本年度はこれらの分子イオンとHe原子の間の相互作用ポテンシャルを非経験的量子化学コードを用いて計算した。移動管法では、移動管内の気体圧力と電場強度を制御することで、平均的な衝突エネルギーを変化させることができる。これまでに測定した多くの二原子分子イオンは低電場領域ではほぼ一定の移動度を示すのに対し、 OH^+ と NH^+ は途中で極小をもつことが判っている。また、 CH^+ は電場強度が弱いほど単調減少することが以前に観測されており、分子イオン毎に移動度の電場依存性には特徴が見られている。これらの特徴と粒子間ポテンシャルの配向依存性を比較すると、分子軸方向に深い極小がある分子イオンでのみ移動度の極小が観測されており、分子軸に直角な方向にポテンシャルの極小がある系では移動度の極小が見られないことが判明した。このことから衝突配向による回転励起の違いが移動度に反映していることが予想され、それを実証すべく古典力学的な粒子軌道計算を開始した。

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た大気圧中で化学剤(chemical warfare agent)を検出する装置の開発にある。首都大は基礎研究として、差動排気系によってイオンを高真空中で動作する質量分析装置に導入し、イオンの質量を選別した移動度を測定する装置の開発を担当している。

本年度は装置開発がひとまず完了し、大気圧放電で生成したイオンの質量スペクトルや到着時間スペクトルの測定を開始した。しかしながら、質量分析部の真空度が低く質量スペクトルの分解能が不十分だったため、差動排気を3段に増やすことで真空度ならびに分解能の改善に成功した。改良した装置を用いて、イオンのパルス化方法の検討や時間分解能の評価を行うとともに、化学剤に似た分子構造を持ちながらも毒性のない擬剤を用いてイオン移動度による物質同定のための予備実験を開始した。

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る(この現象はオコロコフ効果もしくはコヒーレント共鳴励起(RCE)と呼ばれている)。本年度もHIMAC(放射線医学総合研究所重イオン加速器)において供給される核子あたり約400 MeVの多価重イオンを薄膜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線を観測することによってX線領域の原子遷移制御を目的として実験研究を引き続いて行った。

(1) Ge単結晶薄膜標的: 460 MeV/u H-like Fe²⁵⁺ 1s → 2p_{1/2}, 2p_{3/2} :

従来、標的結晶としてSi単結晶薄膜のみを採用してきたが、今年度初めて厚さ0.8μm、有効径10mmのGe単結晶薄膜を使ったRCEに挑戦した。X線回折におけるラウエスポットを確認することによって結晶性を確認し、さらにアニーリングを施した。460 MeV/uのFeを実際に使用して面チャネリングに対するチャネリングプロファイルを測定したところ、従来のSi結晶と比較して一桁ほど幅広の角度分布が観測された。これはビーム径の大きさの数mmに及ぶたわみ構造を反映したものであり、全体としての結晶の質としてはあまり高くはないことが判明した。しかしながら、通過イオンの荷電分布によって、Si結晶の場合と比較して同程度の共鳴深さの3次元コヒーレント共鳴励起(3D-RCE)を明瞭に測定することに成功した。一方で、X線収量の変化においては、共鳴条件下での収量増加は、非共鳴条件に比べ10%程度と小さかった。これはGe結晶では非共鳴条件下での励起断面積が大きいことを反映している。なお、2次元コヒーレント共鳴励起(2D-RCE)では、Geのつくる結晶静電場によってDCシュタルク効果を受け、共鳴幅が大きく増大した。このように、Si標的に比べ、様々な点で異なる挙動が観測された。

(2) 水素様イオンに対する高励起状態への共鳴励起: 390 MeV/u H-like Ar¹⁷⁺ 1s → n = 3 - 5 :

水素様(1個の束縛電子をもつ)重イオンの共鳴励起によって生成される高励起状態、すなわちn=3-5の状態の直接励起による生成に挑戦した。通過イオンの荷電分布では、n=2-4の場合共鳴ピークの観測に成功し、n=5においても明瞭ではないものの対応する位置に構造を観測した。さらにn=2-4の共鳴ピーク位置で、X線エネルギースペクトルを観測した。n=3の場合には、Lyman-β線の増大のみならず、n=3→2への脱励起に伴うLy-α線の増大を観測した。同様に、n=4の励起ではLy-γ線よりむしろ、Ly-α、βの両線の増大を観測した。

(3) 水素様イオンに対するLadder型2重共鳴: 455 MeV/u H-like Ar¹⁷⁺ 1s → n = 2 → n = 3 - 5 :

水素様(1個の束縛電子をもつ)重イオンの2重共鳴励起によって生成される高励起状態の生成に挑戦した。すなわちn=3励起では、n=1→2, n=2→3の両条件を満たす条件下で、n=1→2→3のLadder型2重共鳴を起こさせた。注意すべきはこの条件下では結晶電場方向のベクトル合成によりn=1→3も同時に見たされることである。それぞれ2光子遷移、1光子遷移に対応して双極子選択則が適応されるが、実験的には3s, 3p, 3dがエネルギー的に近いため区別して観測されない。2重共鳴条件に加えて、n=1→2, n=1→3それぞれの1重共鳴条件、および非共鳴条件下で、通過イオンの荷電分布およびX線エネルギースペクトルを観測した。2重共鳴条件下で、Lyman-α線が1重共鳴条件下よりむしろ減少しており、階段上にn=3への2重励起が実際に起こったことを確認した。n=1→2→4, n=1→2→5の2重共鳴条件に対しても同様の傾向を示した。

2. 研究業績

1) 論文

R. D'Arcy, O. Morris, B. Li, H. Ohashi, S. Suda, H. Tanuma, S. Fujioka, H. Nishimura, K. Nishihara, C. Suzuki, T. Kato, F. Koike, and G. O'Sullivan: EUV spectra of Xe XVII - Xe XXI produced in charge-exchange collisions, *Phys. Rev. A* **85** (2012) 062513.

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 : Production of spin-controlled rare isotope beams, *Nature Physics* **8** (2012) 918–922.

A. Yoshimi, T. Inoue, T. Furukawa, T. Nanao, K. Suzuki, M. Chikamori, M. Tsuchiya, H. Hayashi, M. Uchida, N. Hatakeyama, S. Kagami, Y. Ichikawa, H. Miyatake, K. Asahi : Low-frequency ^{129}Xe nuclear oscillator with optical detection, *Phys. Lett. A* **376** (2012) 1924–1929.

M. Goto, J. Matsumoto, H. Shiromaru, Y. Achiba, T. Majima, H. Tanuma, T. Azuma: Laser-induced thermal detachment of hot, large molecular ions under multi-photon absorption conditions, *Phys. Rev. A* **87** (2013) 033406.

2) 学会講演

● イオン移動度研究会, 立教大学, 2012年5月19日

田沼肇: 極低温ヘリウム気体中における原子イオンおよび小さな分子イオンの移動度 - 粒子間ポテンシャルと分子回転の寄与 (口頭)

● The Emma Sokel Workshop on Atomic and Molecular Science and their Applications, 上智大学, 2012年7月7日

田沼肇: Charge Exchange Spectroscopy of Multiply Charged Ions (口頭)

● 2012年度 原子分子データ応用フォーラムセミナー - 高Zプラズマの原子過程と, 酸素分子が関係する原子分子過程とその応用, 核融合科学研究所, 2012年12月11日~13日

田沼肇: 多価タングステンの電荷交換分光および電荷移行断面積測定 (口頭)

● プラズマの素過程研究と分光診断の展望, 核融合科学研究所, 2013年1月24日~25日

田沼肇: 太陽風多価イオンおよびタングステン多価イオンの電荷移行衝突過程 (口頭)

● 原子衝突学会 改称記念式典・第37回年会 2012年7月27日~7月29日 (電気通信大学)

島谷紘史, 石川彰一郎, 石田卓也, 須田慎太郎, 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 (ポスター)

相田裕也, 大橋隼人, 中村信行, 岡田邦宏, 田沼肇: 禁制遷移観測のための極端紫外分光器の製作及び評価 (ポスター)

伊藤源, 後藤基, 松本淳, 古川武, 間嶋拓也, 田沼肇, 城丸春夫, 東俊行: TMU E-ring を用いた C6-, C6H- のレーザー照射による輻射冷却速度の測定 (ポスター)

高谷一成, 出口裕理, 鈴木雅之, 平野明日香, 酒井康弘: RF カーペットを用いたイオン付着飛行時間質量分析計による呼気分析 (ポスター)

駒倉健一, 古川武, 間嶋拓也, 大下慶次郎, 松本淳, 後藤基, 伊藤源, 東俊行, 田沼肇, 城丸春夫: TMU E-ring のための巨大分子イオン入射装置の開発 (ポスター)

伊澤亮介, 小川翔平, 田沼肇, 大槻一雅, 南部信孝: 低温 He 気体中における NH_n^+ ($n=1-3$) の特異な運動量移行断面積 (ポスター)

● 日本物理学会 2012 年秋季大会 2012 年 9 月 11 日-9 月 14 日 (京都産業大学)

大友祐一, 近森正敏, 市川雄一, 井上壮志, 古川武, 吉見彰洋, 土屋真人, 吉田直貴, 白井葉月, 猪野隆, 内田誠, 旭耕一郎: ^3He 共存磁力計の導入に向けた ^3He の核スピン偏極生成とその緩和時間測定 (口頭, 13pSC-1)

近森正敏, 市川雄一, 井上壮志, 古川武, 吉見彰洋, 大友祐一, 土屋真人, 吉田直貴, 白井葉月, 猪野隆, 内田誠, 旭耕一郎: ^{129}Xe 原子 EDM 測定にむけた ^3He 共存磁力計の開発 (口頭, 13pSC-2)

市川雄一, 近森正敏, 井上壮志, 古川武, 吉見彰洋, 大友祐一, 土屋真人, 吉田直貴, 白井葉月, 猪野隆, 内田誠, 旭耕一郎: ^3He 共存磁力計を導入した ^{129}Xe 核スピンメーザーによる EDM 測定系の開発 (口頭, 13pSC-3)

加藤智洋, 伊藤正俊, 原田健一, 川村広和, 井上壮志, Hulyar S. Nataraj, 早水友洋, 佐藤智哉, 江連咲紀, 石川泰佑, 有川裕士, 青木貴稔, 古川武, 畠山温, 吉田英智, 畑中吉治, 村上哲也, 清水康弘, 若狭智嗣, 今井憲一, 酒見泰寛: 電子 EDM 探索に向けた外場印加システムの開発 (口頭, 13pSC-1)

● 日本物理学会 2012 年秋季大会 2012 年 9 月 18 日-9 月 21 日 (横浜国立大学)

原田健一, 青木貴稔 A, 早水友洋, 江連咲紀, 伊藤正俊, 川村広和, 井上壮志, H. S. Nataraj, 佐藤智哉, 加藤智洋, 今井憲一, 村上哲也, 畑中吉治, 吉田英智, 古川武, 若狭智嗣, 畠山温, 酒見泰寛: Fr を用いた電子 EDM 探索のための 718nm ヨウ素分子分光 (口頭, 19pAL-9)

島谷紘史, 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 III (口頭, 18pAJ-8)

須田慎太郎, 島谷紘史, 石川彰一郎, 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 IV (口頭, 18pAJ-9)

伊澤亮介, 小川翔平, 田沼肇, 大槻一雅, 南部伸孝: 極低温ヘリウム気体中における NH_n^+ ($n=1-3$) の移動度 II (口頭, 21aAJ-1)

齋藤和幸, 高橋果林, 藤枝美菜, 小泉哲夫, 的場史朗, 小島隆夫, 田沼肇, 城丸春夫: 混合気体中における Li^+ -(2-butanol) イオンの移動度 (口頭, 21aAJ-2)

伊藤源, 後藤基, 松本淳, 古川武, 間嶋拓也, 田沼肇, 城丸春夫, 東俊行: 静電型イオン蓄積リングを用いた水素付加炭素クラスター負イオンの蓄積および分光 III (口頭, 21aAJ-3)

● 日本化学会第 93 春季年会 2013 年 3 月 22 日-25 日 (立命館大学びわこ・くさつキャンパス)

後藤基, 松本淳, 〇城丸春夫, 伊藤源, 古川武, 田沼肇, 東俊行, SUNDEN Erika, HANSEN Klavs: イオン蓄積実験で観測される C5-,C6-,C6H-のサイズ特異的冷却過程 (口頭)

● 日本物理学会第 68 会年次大会 2013 年 3 月 26 日-3 月 29 日 (広島大学東広島キャンパス)

石橋陽子, 吉田直貴, 上野秀樹, 吉見彰洋, 市川雄一, 阿部康志, 旭耕一郎, 近森正敏, 藤田朋美, 古川武, 彦田絵里, 長江大輔, 大友祐一, 齋藤佑多, 白井葉月, 鈴木貴大, X.F. Yang: 不安定核偏極度測定のための永久磁石を用いた断熱磁場回転装置の開発 (口頭, 26aHA-13)

市川雄一, 近森正敏, 大友祐一, 彦田絵里, 坂本雄, 鈴木貴大, C. Bidinosti, 井上壮志, 古川武, 吉見彰洋, 鈴木都文, 七尾翼, 宮武裕和, 土屋真人, 吉田直貴, 白井葉月, 猪野隆, 上野秀樹, 松尾由賀利, 福山武志, 旭耕一郎: ^{129}Xe 原子 EDM 測定実験のための ^3He 共存磁力計の性能評価 (口頭, 27pHB-1)

大友祐一, 市川雄一, 近森正敏, 彦田絵里, 坂本雄, 鈴木貴大, C. Bidinosti, 井上壮志, 古川武, 吉見彰洋, 鈴木都文, 七尾翼, 宮武裕和, 土屋真人, 吉田直貴, 白井葉月, 猪野隆, 上野秀樹, 松尾由賀利, 福山武志, 旭耕一郎: $^{129}\text{Xe}/^3\text{He}$ 共存セルの偏極生成及び緩和機構 (口頭, 27pHB-2)

彦田絵里, 近森正敏, 市川雄一, 大友祐一, 坂本雄, 鈴木貴大, C. Bidinosti, 井上壮志, 古川武, 吉見彰洋, 鈴木都文, 七尾翼, 宮武裕和, 土屋真人, 吉田直貴, 白井葉月, 猪野隆, 上野秀樹, 松尾由賀利, 福山武志, 旭耕一郎: ダブルセルを用いた核スピンメーザー発振 (口頭, 27pHB-3)

鈴木貴大, 市川雄一, 近森正敏, 大友祐一, 彦田絵里, 坂本雄, C. Bidinosti, 井上壮志, 古川武, 吉見彰洋, 鈴木都文, 七尾翼, 宮武裕和, 土屋真人, 吉田直貴, 白井葉月, 猪野隆, 上野秀樹, 松尾由賀利, 福山武志, 旭耕一郎: ^{129}Xe 原子 EDM 測定実験のための電場印加システム開発 (口頭, 27pHB-4)

近森正敏, 市川雄一, 大友祐一, 彦田絵里, 坂本雄, 鈴木貴大, C. Bidinosti, 井上壮志, 古川武, 吉見彰洋, 鈴木都文, 七尾翼, 宮武裕和, 土屋真人, 吉田直貴, 白井葉月, 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 (口頭, 27pHB-5)

坂本雄, C. Bidinosti, 市川雄一, 近森正敏, 大友祐一, 彦田絵里, 鈴木貴大, 井上壮志, 古川武, 吉見彰洋, 鈴木都文, 七尾翼, 宮武裕和, 土屋真人, 吉田直貴, 白井葉月, 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 (口頭, 27pHB-6)

佐藤智哉, 青木貴稔, 有川裕士, 江連咲紀, 古川武, 原田健一, 畠山温, 畑中吉治, 早水友洋, 今井憲一, 井上壮志, 石川泰佑, 伊藤正俊, 加藤智洋, 川村広和, 村上哲也, H. S. Nataraj, 清水康弘, 若狭智嗣, 吉田英智, 酒見泰寛: フランシウムを用いた電子 EDM 探索のための中性化器の開発 (口頭, 27pHB-12)

江連咲紀, 原田健一, 川村広和, 佐藤智哉, 伊藤正俊, 井上壮志, Hulyar S. Nataraj, 早水友洋, 加藤智洋, 石川泰佑, 有川裕士, 青木貴稔, 古川武, 畠山温, 吉田英智, 畑中吉治, 村上哲也, 若狭智嗣, 今井憲一, 酒見泰寛: 冷却 Fr を用いた電子 EDM 探索のための磁気光学トラップ (口頭, 27pHB-13)

島谷紘史, 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 V (口頭, 28pED-3)

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 (口頭, 28pED-4)

相田裕也, 大橋隼人, 岡田邦宏, 田沼肇, 中村信行: 電荷交換分光実験のための極端紫外分光器の開発 (口頭, 28pED-5)

井上研二, 中野祐司, 東俊行, 増永拓也, 渡邊千嘉, 畠山温, 中井陽一, 小牧研一郎, 高田栄一, 村上健: Ge 薄膜結晶中における 460MeV/u Fe^{25+} のコヒーレント共鳴励起の観測 (口頭, 28pED-9)

X.F. Yang, T. Furukawa, K. Imamura, H. Tetsuka, Y. Yamaguchi, Y. Tsutsui, T. Fujita, Y. Mitsuya, Y. Ebara, M. Hayasaka, S. Arai, S. Muramoto, Y. Ichikawa, Y. Ishibashi, N. Yoshida, H. Shirai, T. Wakui, T. Kobayashi, T. Sonoda, Y. Ito, S. Nishimura, M. Nishimura, Y. Kondo, K. Yoneda, S. Kubono, Y. Ohshiro, A. Hatakeyama, M. Wada, H. Ueno, T. Shimoda, K. Asahi and Y. Matsuo: Control the stopping position of $84,85\text{Rb}$ in He II for the laser spectroscopy in OROCHI experiment (口頭, 28pHB-6)

手塚博紀, 涌井崇志, 古川武, Yang Xiaofei, 今村慧, 山口康広, 筒井正機, 藤田朋美, 三津谷洋助, 早坂美希, 江原悠太, 新井信乃, 村本宗将, 市川雄一, 石橋陽子, 吉田直貴, 白井葉月, 和田道治, 上野秀樹, 下田正, 旭耕一郎, 小林徹, 畠山温, 植松晴子, 松尾由賀利: 超流動 He II 中 RI 原子のレーザー分光 OROCHI における蛍光検出系の高度化 (口頭, 28pHB-7)

高谷一成, 金子貴洋, 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 I (口頭, 29aED-1)

伊澤亮介, 小川翔平, 田沼肇, 大槻一雅, 南部伸孝: 極低温ヘリウム気体中における XH^+ ($\text{X}=\text{C}, \text{N}, \text{O}$) の移動度 (口頭, 29aED-3)

齋藤和幸, 高橋果林, 的場史朗, 小泉哲夫, 小島隆夫, 田沼肇, 城丸春夫: 混合気体中における Li^+ -(2-butanol) イオンの移動度 II (口頭, 29aED-4)

伊藤源, 村川卓也, 後藤基, 松本淳, 古川武, 間嶋拓也, 田沼肇, 城丸春夫, 東俊行: 静電型イオン蓄積リングを用いた C_6H^- , C_6^- のレーザー誘起遅延電子脱離過程の観測 (口頭, 29aED-6)

後藤基, スンディエン エリカ, ハンセン クラウス, 座間優, 松本淳, 城丸春夫, 伊藤源, 田沼肇, 〇東俊行: レーザー誘起遅延電子脱離反応を利用した C_5^- 炭素クラスター負イオンの輻射冷却過程の観測 (口頭, 29aED-7)

江原悠太, 三津谷洋助, 古川武, 今村慧, 筒井正機, 手塚博紀, 山口康広, YangXiaofei, 加藤裕樹, 畠山温, 小林徹, 植松晴子, 松尾由賀利: 超流動 He 環境における Ga 原子の励起スペクトル測定 (口頭, 29pEG-7)

三津谷洋助, 古川武, 小林徹, YangXiaofei, 加藤裕樹, 今村慧, 江原悠太, 山口康広, 手塚博紀, 筒井正機, 小田島仁司, 松尾由賀利: 超流動ヘリウム環境での 1 族、および 13 族原子の励起スペクトル (口頭, 29pEG-8)

今村慧, 古川武, YangXiaofei, 山口康広, 手塚博紀, 筒井正機, 三津谷洋助, 小林徹, 畠山温, 小田島仁司, 松尾由賀利: 超流動ヘリウム環境における Cs 原子の超微細構造間隔精密測定 (口頭, 29aED-9)

国際会議

- 21st International Conference on Ion Mobility Spectrometry, Orlando, FL, USA, 22–27 July, 2012

H. Tanuma: New Mechanism in Collisions of Molecular Ions in Cooled Helium Gas (oral)

- The 4th China-Japan Joint Seminar on Atomic and Molecular Processes in Plasma, Lanzhou, China, 30 July – 4 August, 2012

H. Tanuma: Laboratory Experiments for Revealing Soft X-ray Emissions from Solar Wind Charge Exchange (invited)

- 16th International Conference on Physics of Highly Charged Ions, Heidelberg, Germany, 2–7 September, 2012

H. Shimaya, T. Ishida, S. Ishikawa, S. Suda, H. Tanuma, H. Ohashi, H. Akamatsu, 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 (poster)

- 19th International Mass Spectrometry Conference, Kyoto, Japan, 15–21 September, 2012

H. Tanuma, R. Izawa, J. Yamazoe, and S. Matoba: Mobility of Atomic and Small Molecular Ions in Cooled Helium Gas for Investigation on Interaction Potentials and Collision Dynamics (invited)

- 8th International Conference on Atomic and Molecular Data and Their Applications, Gaithersburg, MD, USA, 30 September – 4 October, 2012

H. Tanuma: Charge Exchange Spectroscopy of Multiply Charged Eons of Industrial and Astrophysical Interest (invited)

- The 10th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics, Taipei, Taiwan, 23–27 October, 2012

G. Ito, M. Goto, J. Matsumoto, T. Furukawa, T. Majima, H. Tanuma, H. Shiromaru, and T. Azuma: Measurement of the Radiative Cooling Rate of C_6^- and C_6H^- by the Laser Irradiation in the Electrostatic Ion Storage Ring (poster)

R. Isawa, S. Ogawa, K. Ohtsuki, S. Nanbu, and H. Tanuma: Unexpected Mobilities of XH^+ ($X = C, N, O$) Molecular Ions in Cooled Helium Gas (poster)

- XVI International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Techniques Related to their Applications (EMIS2012), December 2 – 7, 2012 (Shimane, Japan)

T. Furukawa, T. Wakui, X.F. Yang, T. Fujita, 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 : A novel nuclear laser spectroscopy method using superfluid helium for the measurement of spins and moments of exotic nuclei (oral)

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 (oral)

X.F. Yang, T. Furukawa, T. Wakui, K. Imamura, H. Tetsuka, T. Fujita, Y. Yamaguchi, Y. Tsutsui, Y. Mitsuya, Y. Ichikawa, Y. Ishibashi, N. Yoshida, H. Shirai, Y. Ebara, M. Hayasaka, S. Arai, M. Muramoto, A. Hatakeyama, M. Wada, T. Sonoda, Y. Ito, T. Kobayashi, S. Nishimura, M. Nishimura, Y. Kondo, K. Yoneda, H. Ueno, T. Shinozuka, T. Shimoda, K. Asahi, Y. Matsuo : Control of stopping position of unstable Rb beam in superfluid helium (He II) for developing nuclear laser spectroscopy of RI atoms (poster)

K. Imamura, T. Furukawa, T. Wakui, X.F. Yang, Y. Yamaguchi, H. Tetsuka, Y. Mitsuya, Y. Tsutsui, T. Fujita, 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: Development of a helium cryostat for laser spectroscopy of atoms with unstable nuclei in superfluid helium (poster)

N. Yoshida, H. Ueno, A. Yoshimi, Y. Ishibashi, 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 (poster)

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 (poster)

● One-day symposium on E-ring based molecular science, February 7, 2013 (Tokyo Metropolitan University, Japan)

T. Furukawa: Delayed detachment and radiative cooling of C_6^- and C_6H^- (oral)

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・銀河団と活動銀河の観測

「すざく」のXIS検出器はバックグラウンドが低いため、銀河団の周辺部の低温・低密度領域を高い感度で調べられる。さまざまな銀河団について、ビリアル半径付近までの温度、密度、バリオンの割合などを調べ、平衡に達した銀河団はほぼ同じ温度勾配で外側ほど低温になること、ガスのエントロピー($kTn^{-2/3}$)が、外縁部では力学平衡からの予想より低くなること、バリオンの割合は高く出る場合があり、ガスが非平衡であり電子温度が十分高くなっていないと考えられる。また、可視光の銀河分布から大構造フィラメントが交差する場所を特定し、3カ所以上から「すざく」でX線放射を見つけた。これまで知られていなかった楕円銀河や銀河群に付随する高温ガスと考えられ、低密度のバリオンを探り出す上でも意義のある結果である。

また活動銀河NGC 4051の「すざく」による時間変動データにショットノイズ解析を適用し、変動の様子が銀河系内のブラックホール天体とどう異なるかを調べた。その結果NGC 4051では、ショットピーク前後の増光時と減光時のライトカーブがほとんど同じであり、Cyg X-1のような顕著な非対称性が見られないことがわかった。活動銀河と小質量ブラックホールとはX線変動の成因が異なっていることが示唆される結果であり、またショットノイズ解析を活動銀河にまで適用できることも示された。

2) 「すざく」による地球外圏の観測

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ち、地球の超高層大気である外圏からのX線放射の研究を進めた。10地球半径にも広がる希薄な外圏大気は太陽風に含まれる高階電離したイオンと電荷交換反応を生じる。電子はイオンへと移動し、カスケードによりX線輝線を放出する。こうしたX線は銀河団などのあらゆるX線観測の前景放射となるため、太陽風フラックスとの強度関係や視線方向の依存性を押さえることが重要となる。今年度は「すざく」の全観測データを対象とし、太陽風の強度と相関したX線増光を示すデータ38例を取り出した。それらの方向分布はかなり一様に近く、カスプなどへの集中が見られなかった。一方OVII輝線強度から、地球の中性大気密度 N_H を算出したところ、太陽フレアと同期した例についてはフレア強度と N_H とがよく相関した。一方、得られた N_H の値は地球大気モデルより5倍ほど大きく、大気が地球半径の数10倍まで 10 cm^{-3} ほどの高い密度で広がっていることが示唆された。X線観測が惑星科学や磁気圏物理に新たな情報をもたらすことを示した結果である。本研究結果は石川の博士論文としてまとめられた。

こうした地球外圏X線は地球磁気圏を調べる新たな手段として期待される。太陽風イオンの運動は地球磁気圏の磁場に影響を受けるため、イオンが出すX線を手段として、磁気圏のカスプやシースの位置、さらには太陽風フラックスの変化に伴うその時間変動が抑えられる可能性がある。この観点から、米欧の研究者と共にISSI workshopをスイスで開催し、将来の国際協力によるミッション実現について議論した。またJAXAの技術実証衛星にコンパクトな軟X線観測装置を搭載し、磁気圏可視化を行うことも提案している。

3) TES 型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 Si 基板の厚さ方向へ 2 層の配線を作り込むことができていたが、その上に TES カロリメータを形成するときに、配線による段差のために TES が段切れ状態になることが問題であった。このために、400 素子アレイでは超伝導転移がなまった特性を示し、X 線で信号を得るまでに至らなかった。これに対処するため新たに産総研に協力を依頼し、配線による段差をスロープ状に削り込む加工を行った。このスロープの上に TES カロリメータを製作し、性能試験を行うことにしている。一方、TES カロリメータの対放射線特性を調べるために、放射線医学総合研究所で 150 MeV の陽子を TES カロリメータに 10 krad (軌道上 10 年に相当) 照射した。その結果、超伝導転移特性、エネルギー分解能ともにほとんど変化はなく、TES を軌道上で使用することに問題はないことがわかった。

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行くことを目指した。冷凍機内の配線の付け替えや、冷却の際の磁場制御プログラムなどを改良した。その結果、冷凍機としてはほぼ安定に 0.1 K 以下まで冷やせるようになった。TES 実験に使用するためには、磁気シールド強化や、外部から X 線照射できる機構の整備が必要であり、その作業を引き続き進めている。

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) を製作し、その性能評価を行った。軟 X 線反射望遠鏡 (SXT) が宇宙研、NASA/GSFC、名古屋大学との共同で製作されており、宇宙研の 30 m ビームラインの性能評価試験システムを整備し、ASTRO-H ミラーの試験へむけて準備が整った。

主検出器マイクロカロリメータ (SXS) の開発でも、さまざまな検討を行なった。超流動ヘリウムの流出を阻止するための porous plug, knife-edge device などの製作と試験を住友重機械などと進めた。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、NASA/GSFC、三菱重工業、NEC とともに進め、EM 品の試験をもとに性能が実現されることを確かめ、フライト品に搭載するプログラムの整備を行った。

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 3 回の ASTRO-H Summer School を 8 月に京都で開催、超新星残骸と粒子加速をテーマとして 4 名の講師をお願いし、68 名の参加があった。また、7 月には英国ケンブリッジ大学で、2 月にはつくばでサイエンス会議を開催し、新しいサイエンスへ向けた検討や議論を行った。

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微細穴光学系の開発を進めている。開発は宇宙研、産総研、東北大、立命館大、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 の薄い基板にあけ、側壁を反射鏡として利用する。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。今年度はシリコンドライエッチングの条件出しを行い、結像性能に直結する側壁の粗さを約 3 倍改善した。さらに球面変形したドライエッチング済み基板を 2 枚重ねて、本格的 2 回反射段望遠鏡の組み立てを完遂し、世界で初めて本手法で X 線結像イメージを取得することに成功した。角度分解能は 14 分角であり、球面変形精度や、組み立て精度を改善することで、今後、性能を向上する。また性能評価のための CCD を用いた新たなビームラインを首都大に立ち上げる

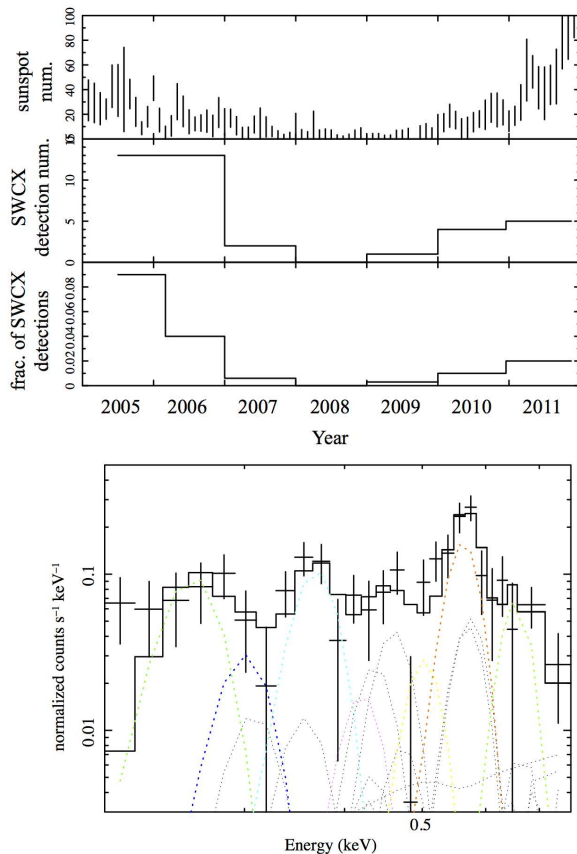


図 1: [左上] 太陽黒点数 (上段)、太陽風と関連した X 線増光の検出数 (中段)、X 線増光の検出割合 (下段) の年ごとの変化。黒点数と X 線増光数が相関する。[左下] X 線増光のエネルギースペクトルの例で、0.57 keV の酸素輝線が強く見える。石川久美博士論文より。

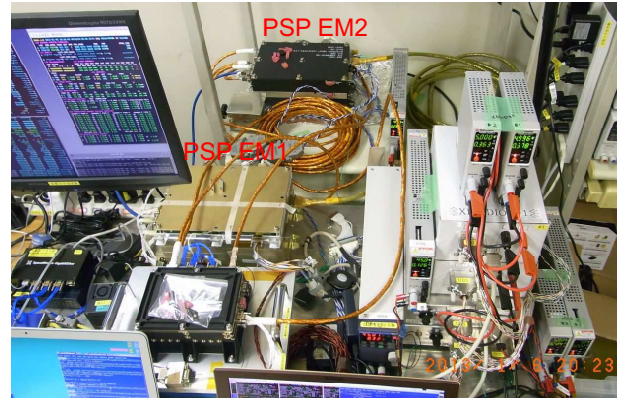


図 2: ASTRO-H カロリメータ検出器 SXS のデジタル処理回路のエンジニアリングモデル (EM) のテスト状況。

と共に、光線追跡計算プログラムを構築した。さらに産総研と共同で新たにこれまでよりも直径が 3 倍大きな 12 インチの光学系の製作の検討も始めており、基板変形に関連した特許も出願した。こうした技術開発と平行して、将来の木星探査衛星などために本光学系を提案しつつあり、望遠鏡のデザインおよび計算による性能検討や、検出器の放射線検討も進めた。

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、小型科学衛星 DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) を 2018 年頃の打ち上げを目指して検討した。10 月には X 線の研究者コミュニティである高エネルギー宇宙物理連絡会の、ミッション評価委員会から最高の S 評価を受け、学術会議マスタープランへ天文学・宇宙物理学分科会から推薦する 8 つのミッションの一つに選ばれた。2013 年に予定される、小型科学衛星 3 号機の募集へ向けて、衛星提案の準備をすすめた。

2. 研究業績

1) 論文

Jan-Willem den Herder, Luigi Piro, Takaya Ohashi, Chryssa Kouveliotou, Dieter H. Hartmann, Jelle S. Kaastra, L. Amati, M. I. Andersen, M. Arnaud, J.-L. Attéa, S. Bandler, M. Barbera, X. Barcons, S. Barthelmy, S. Basa, S. Basso, M. Boer, E. Branchini, G. Branduardi-Raymont, S. Borgani, A. Boyarsky, G. Brunetti, C. Budtz-Jorgensen, D. Burrows, N. Butler, S. Campana, E. Caroli, M. Ceballos, F. Christensen, E. Churazov, A. Comastri, L. Colasanti, R. Cole, R. Content, A. Corsi, E. Costantini,

P. Conconi, G. Cusumano, J. de Plaa, A. De Rosa, M. Del Santo, S. Di Cosimo, M. De Pasquale, R. Doriese, S. Etti, P. Evans, Y. Ezoe, L. Ferrari, H. Finger, T. Figueroa-Feliciano, P. Friedrich, R. Fujimoto, A. Furuzawa, J. Fynbo, F. Gatti, M. Galeazzi, N. Gehrels, B. Gendre, G. Ghirlanda, G. Ghisellini, M. Gilfanov, P. Giommi, M. Girardi, J. Grindlay, M. Cocchi, O. Godet, M. Guedel, F. Haardt, R. den Hartog, I. Hepburn, W. Hermsen, J. Hjorth, H. Hoekstra, A. Holland, A. Hornstrup, A. van der Horst, A. Hoshino, J. in't Zand, K. Irwin, Y. Ishisaki, P. Jonker, T. Kitayama, H. Kawahara, N. Kawai, R. Kelley, C. Kilbourne, P. de Korte, A. Kusenko, I. Kuvvetli, M. Labanti, C. Macculi, R. Maiolino, M. Mas Hesse, K. Matsushita, P. Mazzotta, D. McCammon, M. Méndez, R. Mignani, T. Mineo, K. Mitsuda, R. Mushotzky, S. Molendi, L. Moscardini, L. Natalucci, F. Nicastro, P. O'Brien, J. Osborne, F. Paerels, M. Page, S. Paltani, K. Pedersen, E. Perinati, T. Ponman, E. Pointecouteau, P. Predehl, S. Porter, A. Rasmussen, G. Rauw, H. Röttgering, M. Roncarelli, P. Rosati, E. Quadrini, O. Ruchayskiy, R. Salvaterra, S. Sasaki, K. Sato, S. Savaglio, J. Schaye, S. Sciortino, M. Shaposhnikov, R. Sharples, K. Shinozaki, D. Spiga, R. Sunyaev, Y. Suto, Y. Takei, N. Tanvir, M. Tashiro, T. Tamura, Y. Tawara, E. Troja, M. Tsujimoto, T. Tsuru, P. Ubertini, J. Ullom, E. Ursino, F. Verbunt, F. van de Voort, M. Viel, S. Wachter, D. Watson, M. Weisskopf, N. Werner, N. White, R. Willingale, R. Wijers, N. Yamasaki, K. Yoshikawa, S. Zane: ORIGIN: metal creation and evolution from the cosmic dawn, *Experimental Astronomy*, **34**, Issue 2, pp.519-549 (2012)

Hiroki Akamatsu, Akio Hoshino, Yoshitaka Ishisaki, Takaya Ohashi, Kosuke Sato, Yoh Takei, Naomi Ota: Erratum: X-Ray Study of the Outer Region of Abell 2142 with Suzaku, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **64**, No.4, Article No.90, 1 pages (2012)

Hiroki Akamatsu, Motokazu Takizawa, Kazuhiro Nakazawa, Yasushi Fukazawa, Yoshitaka Ishisaki, Takaya Ohashi: X-Ray View of the Shock Front in the Merging Cluster Abell 3376 with Suzaku, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **64**, No.4, Article No.67, 12 pages (2012)

Hiroki Akamatsu, Jelle de Plaa, Jelle Kaastra, Yoshitaka Ishisaki, Takaya Ohashi, Madoka Kawaharada, Kazuhiro Nakazawa: Properties of the Intracluster Medium of Abell 3667 Observed with Suzaku XIS, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **64**, No.3, Article No.49 (12 pages) (2012)

Takuya Sato, Toru Sasaki, Kyoko Matsushita, Eri Sakuma, Kosuke Sato, Yutaka Fujita, Nobuhiro Okabe, Yasushi Fukazawa, Kazuya Ichikawa, Madoka Kawaharada, Kazuhiro Nakazawa, Takaya Ohashi, Naomi Ota, Motokazu Takizawa, Takayuki Tamura: Suzaku Observations of the Hydra A Cluster out to the Virial Radius, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **64**, No.5, Article No.95 (1 pp.) (2012)

S. Kasahara, Y. Ezoe, T. Kimura, Y. Miyoshi: Radiation background and dose estimates for future X-ray observations in the Jovian magnetosphere, *Planetary and Space Science*, **75**, p. 129-135. (2013)

H. Seta, M. S. Tashiro, Y. Ishisaki, M. Tsujimoto, Y. Shimoda, Y. Abe, T. Yasuda, S. Takeda, M. Asahina, Y. Hiyama, S. Yamaguchi, Y. Terada, K. R. Boyce, F. S. Porter, C. A. Kilbourne, R. L. Kelley, R. Fujimoto, Y. Takei, K. Mitsuda, K. Matsuda, K. Masukawa: The Digital Processing System for the Soft X-Ray Spectrometer Onboard ASTRO-H –The Design and the Performance –, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **59**, issue 2, pp. 366-372 (2012)

Hajime Kawahara, Taro Matsuo, Michihiro Takami, Yuka Fujii, Takayuki Kotani, Naoshi Murakami, Motohide Tamura, Olivier Guyon: Can Ground-based Telescopes Detect the Oxygen 1.27 μm Absorption Feature as a Biomarker in Exoplanets?, *The Astrophysical Journal*, **758**, Issue 1, article id. 13, 11 pp. (2012)

Hajime Kawahara: The Spin Effect on Planetary Radial Velocimetry of Exoplanets, *The Astrophysical Journal Letters*, **760**, Issue 1, article id. L13, 6 pp. (2012)

2) 国際会議報告

T. Ishida, T. Kanda, H. Akamatsu, T. Enoki, K. Henmi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, T. Ohashi, K. Shinozaki, K. Mitsuda, H. Ohashi, L. Liu, J. Wang, H. Tanuma: Soft X-ray emissions related to the solar wind charge exchange observed by the X-ray satellite observatories, *Journal of Physics: Conference Series*, **388**, Issue 8, article id. 082021 (2012).

J. W. den Herder, D. Bagnali, S. Bandler, M. Barbera, X. Barcons, D. Barret, P. Bastia, M. Bisotti, K. Boyce, C. Cara, M. Ceballos, L. Corcione, B. Cobo, L. Colasanti, J. de Plaa, M. DiPirro, W. B. Doriese, Y. Ezoe, R. Fujimoto, F. Gatti, L. Gottardi, P. Guttridge, R. den Hartog, I. Hepburn, R. Kelley, K. Irwin, Y. Ishisaki, C. Kilbourne, P. A. J. de Korte, J. van der Kuur, S. Lotti, C. Macculi, K. Mitsuda, T. Mineo, L. Natalucci, T. Ohashi, M. Page, S. Paltani, E. Perinati, L. Piro, C. Pigot, F. S. Porter, G. Rauw, L. Ravera, E. Renotte, J.-L. Sauvageot, C. Schmid, S. Sciortino, P. Shirron, Y. Takei, G. Torrioli, M. Tsujimoto, L. Valenziano, D. Willingale, C. de Vries, H. van Weers, J. Wilms, N. Y. Yamasaki: The x-ray microcalorimeter spectrometer onboard Athena, *Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray. Proceedings of the SPIE*, **8443**, article id. 84432B, 12 pp. (2012)

Tadayuki Takahashi, Kazuhisa Mitsuda, Richard Kelley, Henri Aarts, Felix Aharonian, Hiroki Akamatsu, Fumie Akimoto, Steve Allen, Naohisa Anabuki, Lorella Angelini, Keith Arnaud, Makoto Asai, Marc Audard, Hisamitsu Awaki, Philipp Azzarello, Chris Baluta, Aya Bamba, Nobutaka Bando, Mark Bautz, Roger Blandford, Kevin Boyce, Greg Brown, Ed Cackett, Mara Chernyakova, Paolo Coppi, Elisa Costantini, Jelle de Plaa, Jan-Willem den Herder, Michael DiPirro, Chris Done, Tadayasu Dotani, John Doty, Ken Ebisawa, Megan Eckart, Teruaki Enoto, Yuichiro Ezoe, Andrew Fabian, Carlo Ferrigno, Adam Foster, Ryuichi Fujimoto, Yasushi Fukazawa, Stefan Funk, Akihiro Furuzawa, Massimiliano Galeazzi, Luigi Gallo, Poshak Gandhi, Keith Gendreau, Kirk Gilmore, Daniel Haas, Yoshito Haba, Kenji Hamaguchi, Isamu Hatsukade, Takayuki Hayashi, Kiyoshi Hayashida, Junko Hiraga, Kazuyuki Hirose, Ann Hornschemeier, Akio Hoshino, John Hughes, Una Hwang, Ryo Iizuka, Yoshiyuki Inoue, Kazunori Ishibashi, Manabu Ishida, Kosei Ishimura, Yoshitaka Ishisaki, Masayuki Ito, Naoko Iwata, Naoko Iyomoto, Jelle Kaastra, Timothy Kallman, Tuneyoshi Kamae, Jun Kataoka, Satoru Katsuda, Hajime Kawahara, Madoka Kawaharada, Nobuyuki Kawai, Shigeo Kawasaki, Dmitry Khangaluyan, Caroline Kilbourne, Masashi Kimura, Kenzo Kinugasa, Shunji Kitamoto, Tetsu Kitayama, Takayoshi Kohmura, Motohide Kokubun, Tatsuro Kosaka, Alex Koujelev, Katsuji Koyama, Hans Krimm, Aya Kubota, Hideyo Kunieda, Stephanie LaMassa, Philippe Laurent, Francois Lebrun, Maurice Leutenegger, Olivier Limousin, Michael Loewenstein, Knox Long, David Lumb, Grzegorz Madejski, Yoshitomo Maeda, Kazuo Makishima, Genevieve Marchand, Maxim Markevitch, Hironori Matsumoto, Kyoko Matsushita, Dan McCammon, Brian McNamara, Jon Miller, Eric Miller, Shin

Mineshige, Kenji Minesugi, Ikuyuki Mitsuishi, Takuya Miyazawa, Tsunefumi Mizuno, Hideyuki Mori, Koji Mori, Koji Mukai, Toshio Murakami, Hiroshi Murakami, Richard Mushotzky, Hosei Nagano, Ryo Nagino, Takao Nakagawa, Hiroshi Nakajima, Takeshi Nakamori, Kazuhiro Nakazawa, Yoshiharu Namba, Chikara Natsukari, Yusuke Nishioka, Masayoshi Nobukawa, Masaharu Nomachi, Steve O'Dell, Hirokazu Odaka, Hiroyuki Ogawa, Mina Ogawa, Keiji Ogi, Takaya Ohashi, Masanori Ohno, Masayuki Ohta, Takashi Okajima, Atsushi Okamoto, Tsuyoshi Okazaki, Naomi Ota, Masanobu Ozaki, Fritzs Paerels, Stéphane Paltani, Arvind Parmar, Robert Petre, Martin Pohl, F. Scott Porter, Brian Ramsey, Rubens Reis, Christopher Reynolds, Helen Russell, Samar Safi-Harb, Shin-ichiro Sakai, Hiroaki Sameshima, Jeremy Sanders, Goro Sato, Rie Sato, Yohichi Sato, Kosuke Sato, Makoto Sawada, Peter Serlemitsos, Hiromi Seta, Yasuko Shibano, Maki Shida, Takanobu Shimada, Keisuke Shinozaki, Peter Shirron, Aurora Simionescu, Cynthia Simmons, Randall Smith, Gary Sneiderman, Yang Soong, Lukasz Stawarz, Yasuharu Sugawara, Hiroyuki Sugita, Satoshi Sugita, Andrew Szymkowiak, Hiroyasu Tajima, Hiromitsu Takahashi, Shin-ichiro Takeda, Yoh Takei, Toru Tamagawa, Takayuki Tamura, Keisuke Tamura, Takaaki Tanaka, Yasuo Tanaka, Makoto Tashiro, Yuzuru Tawara, Yukikatsu Terada, Yuichi Terashima, Francesco Tombesi, Hiroshi Tomida, Yohko Tsuboi, Masahiro Tsujimoto, Hiroshi Tsunemi, Takeshi Tsuru, Hiroyuki Uchida, Yasunobu Uchiyama, Hideki Uchiyama, Yoshihiro Ueda, Shiro Ueno, Shinichiro Uno, Meg Urry, Eugenio Ursino, Cor de Vries, Atsushi Wada, Shin Watanabe, Norbert Werner, Nicholas White, Takahiro Yamada, Shinya Yamada, Hiroya Yamaguchi, Noriko Yamasaki, Shigeo Yamauchi, Makoto Yamauchi, Yoichi Yatsu, Daisuke Yonetoku, Atsumasa Yoshida, Takayuki Yuasa: The ASTRO-H X-ray Observatory, *Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray. Proceedings of the SPIE*, **8443**, article id. 84431Z, 22 pp. (2012)

T. Ohashi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, Y. Tawara, K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, Y. Takei: Status of the Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor (DIOS), *Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray. Proceedings of the SPIE*, **8443**, article id. 844319, 10 pp. (2012)

Yuichiro Ezoe, Teppei Moriyama, Tomohiro Ogawa, Takuya Kakiuchi, Takaya Ohashi, Ikuyuki Mitsuishi, Kazuhisa Mitsuda, Mitsuhiro Horade, Susumu Sugiyama, Raul E. Riveros, Hitomi Yamaguchi, Yoshiaki Kanamori, Kohei Morishita, Kazuo Nakajima, Ryutaro Maeda: Progress with MEMS x-ray micro pore optics, *Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray. Proceedings of the SPIE*, **8443**, article id. 84430U, 11 pp. (2012)

H. Seta, M. S. Tashiro, Y. Ishisaki, M. Tsujimoto, Y. Shimoda, S. Takeda, S. Yamaguchi, K. Mitsuda, R. Fujimoto, Y. Takei, R. L. Kelley, K. R. Boyce, C. A. Kilbourne, F. S. Porter, J. J. Miko, K. Masukawa, K. Matsuda: Development of the onboard digital processing system for the soft x-ray spectrometer of ASTRO-H: performance in the engineering model tests, *Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray. Proceedings of the SPIE*, **8443**, article id. 84435D, 10 pp. (2012)

Taro Matsuo, Takayuki Kotani, Naoshi Murakami, Hajime Kawahara, Yuka Fujii, Shin Oya, Mikio Kurita, Noriaki Natsume, Norio Narita, Kenji Takizawa, Masahiro Ikoma, Jun Minagawa, Naoshi Baba, Motohide Tamura: Second-Earth imager for TMT (SEIT): concept and its numerical simulation, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV. Proceedings of the SPIE*, **8446**, article id. 84461K, 8 pp. (2012)

Naoshi Murakami, Manabu Kida, Naoshi Baba, Taro Matsuo, Takayuki Kotani, Hajime Kawahara, Yuka Fujii, Motohide Tamura: *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV. Proceedings of the SPIE*, **8446**, article id. 84468H, 8 pp. (2012)

Kazuhisa Mitsuda, Richard L. Kelley, Kevin R. Boyce, Gregory V. Brown, Elisa Costantini, Michael J. DiPirro, Yuichiro Ezoe, Ryuichi Fujimoto, Keith C. Gendreau, Jan-Willem den Herder, Akio Hoshino, Yoshitaka Ishisaki, Caroline A. Kilbourne, Shunji Kitamoto, Dan McCammon, Masahide Murakami, Hiroshi Murakami, Mina Ogawa, Takaya Ohashi, Atsushi Okamoto, Stéphane Paltani, Martin Pohl, F. Scott Porter, Yoichi Sato, Keisuke Shinozaki, Peter J. Shirron, Gary A. Sneiderman, Hiroyuki Sugita, Andrew Szymkowiak, Yoh Takei, Toru Tamagawa, Makoto Tashiro, Yukikatsu Terada, Masahiro Tsujimoto, Cor de Vries, Noriko Y. Yamasaki: The High-Resolution X-Ray Microcalorimeter Spectrometer, SXS, on Astro-H, *Journal of Low Temperature Physics*, **167**, Issue 5-6, pp. 795-802 (2012)

T. Enoki, Y. Ishisaki, H. Akamatsu, Y. Ezoe, T. Ohashi, T. Kanda, T. Ishida, H. Tanuma, H. Ohashi, K. Shinozaki, K. Mitsuda: Development of Laboratory Experimental System to Clarify Solar Wind Charge Exchange Mechanism with TES Microcalorimeter, *Journal of Low Temperature Physics*, **167**, Issue 5-6, pp. 771-776 (2012)

S. Oishi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, Y. Abe, Y. Enokijima, R. Hosoya, T. Ohashi, K. Mitsuda, T. Morooka, K. Tanaka: Development of Superconducting Multilayer Wiring for Large Arrays of TES X-Ray Microcalorimeters, *Journal of Low Temperature Physics*, **167**, issue 3-4, pp. 220-225 (2012)

Y. Ishisaki, K. Henmi, H. Akamatsu, T. Enoki, T. Ohashi, A. Hoshino, K. Shinozaki, H. Matsuo, N. Okada, T. Oshima: Development of Active Gas-Gap Heat Switch for Double-Stage Adiabatic Demagnetization Refrigerators, *Journal of Low Temperature Physics*, **167**, Issue 5-6, pp. 777-782 (2012)

Y. Shimoda, H. Seta, M. S. Tashiro, Y. Terada, Y. Ishisaki, M. Tsujimoto, K. Mitsuda, T. Yasuda, S. Takeda, Y. Hiyama, K. Masukawa, K. Matsuda, K. R. Boyce: Development of a Digital Signal Processing System for the X-Ray Microcalorimeter Onboard ASTRO-H (II), *Journal of Low Temperature Physics*, **167**, Issue 5-6, pp. 575-581 (2012)

Yuichiro Ezoe, Satoshi Kasahara, Yoshizumi Miyoshi, Atsushi Yamazaki, Kazuhisa Mitsuda, Tomoki Kimura, Takaya Ohashi, Kumi Ishikawa, Masaki Fujimoto: JUXTA: A Probe of X-ray Emission from Jupiter's Magnetosphere, *39th COSPAR Scientific Assembly. Held 14-22 July 2012, in Mysore, India. Abstract*, E1.15-39-12, p.524

The SXS Team, Yuichiro Ezoe, Kumi Ishikawa, Takaya Ohashi, Hiroya Yamaguchi, Kazuhisa Mitsuda, Ryuichi Fujimoto, Masahide Murakami, Kenichi Kanao, Seiji Yoshida, Shoji Tsunematsu, Michael DiPirro, Peter Shirron: Development of porous plug phase separator and superfluid film flow suppression system for the Soft X-ray Spectrometer onboard ASTRO-H, *Cryogenics*, **52**, Issue 4, p. 178-182. (2012)

Y. Ezoe, R. Fujimoto, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda, T. Ohashi, K. Ishikawa, S. Oishi, Y. Miyoshi, N. Terada, Y. Futaana, F. S. Porter, G. V. Brown: Suzaku observations of charge exchange emission from solar system objects, *Astronomische Nachrichten*, **333**, Issue 4, p.319 (2012)

R.E.Riveros, H.Yamaguchi, T. Boggs, I.Mitsuishi, K.Mitsuda, U.Takagi, Y.Ezoe, K. Ishizu, T.Moriyama: Magnetic Field Assisted Finishing of Silicon MEMS Micropore X-ray Optics *J. Manufacturing Science and Engineering*, **134**, 051001-1 7 (2012)

I.Mitsuishi, Y.Ezoe, K.Ishizu, T.Moriyama, T.Ogawa, M.Mita, N.Y.Yamasaki, K.Mitsuda, M.Horade, S.Sugiyama, R.E.Riveros, H.Yamaguchi, Y.Kanamori, K.Morishita, K.Nakajima, R.Maeda: Novel ultra-lightweight and high-resolution MEMS X-ray optics for space astronomy, *Sensors & Actuators*, **188**, 411-416 (2012)

3) 日本語解説

江副祐一郎: 「X線天文における反射鏡の製作方法と将来技術」, 砥粒加工学会誌、特集「宇宙探査、天文学のための加工技術」、2012年7号

4) 特許

倉島優一、廣島洋、伊藤寿浩、前田龍太郎、高木秀樹、池原毅、江副祐一郎: 「X線反射装置およびその製造方法」、特許出願 2013-014320

河上聡子、檜原弘樹、水島和代、高橋忠幸、国分紀秀、能町正治、尾崎正伸、河合誠之、石崎欣尚、寺田幸功: 「情報記録再生装置および記録再生方法」、特許出願 2012-284142

5) 学会講演

● 日本物理学会 2012年秋季大会 2012年9月11日~14日 (京都産業大学)

山田真也, 榎島陽介, 赤松弘規, 飯島律子, 江副祐一郎, 石崎欣尚, 大橋隆哉, 永吉賢一郎, 満田和久, 師岡利光, 田中啓一, 佐藤浩介: 超伝導積層配線を用いた TES 型 X 線マイクロカロリメーターの性能評価

島谷紘史, 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 III

須田慎太郎, 島谷紘史, 石川彰一郎, 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 IV

● 日本物理学会 2013年春季大会 2013年3月26日~29日 (広島大学)

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, 大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 三石郁之, 藤本龍一, 星野晶夫, 田代信, 寺田幸功, 北本俊二, 村上弘志, 瀬田裕美, 玉川徹, 山田真也, 佐藤浩介, 太田直美, 澤田真理, 伊予本直子, 村上正秀, 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, 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 (V)

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, 藤本龍一, 星野晶夫, 田代信, 寺田幸功, 北本俊二, 村上弘志, 瀬田裕美, 玉川徹, 山田真也, 佐藤浩介, 太田直美, 澤田真理, 伊予本直子, 村上正秀, 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, 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 飛翔体モデルアレイの地上較正試験

島谷紘史, 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 V
石崎欣尚: 宇宙用 X 線マイクロカロリメータ検出器

● 日本天文学会 2012 年秋季年会 2012 年 9 月 19 日~ 21 日 (大分大学)

佐藤浩介、松下恭子 (東京理科大学)、大橋隆哉 (首都大学東京)、藤田 裕 (大阪大学)、川原田 円、田村隆幸 (ISAS/JAXA)、中澤知洋 (東京大学)、岡部信広 (ASIAA)、太田直美 (奈良女子大学)、滝沢元和 (山形大学)、赤松弘規 (SRON): Abell 2199 銀河団の温度、エントロピー分布の方向依存性と鉄の分布

下田 優弥 (埼玉大学)、川原田 円 (ISAS/JAXA)、田代 信 (埼玉大学)、大橋 隆哉、石崎 欣尚、三石 郁之 (首都大学東京)、赤松 弘規 (SRON): 「すざく」による MS 1512.4+3647 銀河団プラズマの重元素組成の研究 (II)

望月ゆきこ、松下恭子、佐藤浩介、佐藤拓也、市川和也、佐々木亨 (東京理科大学)、Andy.C.Fabian (University of Cambridge)、藤田裕 (大阪大学)、深沢泰司 (広島大学)、浜名崇、宮崎聡 (国立天文台)、川原田円、田村隆幸 (ISAS/JAXA)、中澤知洋 (東京大学)、大橋隆哉 (首都大学東京)、岡部信広、梅津敬一 (ASIAA)、太田直美 (奈良女子大学)、滝沢元和 (山形大学): 「すざく」衛星による Abell 478 銀河団の外縁部の観測

石崎欣尚、大橋隆哉、江副祐一郎、三石郁之 (首都大)、満田和久、山崎典子、竹井洋、辻本匡弘、小川美奈 (ISAS/JAXA)、杉田寛之、佐藤洋一、篠崎慶亮、岡本篤 (ARD/JAXA)、藤本龍一、星野晶夫 (金沢大)、田代 信、寺田幸功 (埼玉大)、北本俊二、村上弘志、瀬田裕美 (立教大)、玉川徹 (理研)、佐藤浩介 (東京理科大)、太田直美 (奈良女大)、村上正秀 (筑波大)、澤田真理 (青山学院大)、R.L. Kelley, C.A. Kilbourne, F.S. Porter, G.A. Sneiderman, K.R. Boyce, M.J. DiPirro, P.J. Shirron, K.C. Gendreau (NASA/GSFC), G.V. Brown (LLNL), D. McCammon (Wisconsin 大), A. Szymkowiak (Yale 大), J.-W. den Herder, C. de Vries, 赤松弘規 (SRON), S. Paltani, M. Pohl (Geneva 大) 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 (VIII)

瀬田 裕美 (立教大)、田代 信 (埼玉大)、石崎 欣尚 (首都大)、辻本 匡弘 (JAXA/ISAS)、下田 優弥、武田 佐和子、山口 直 (埼玉大)、藤本 龍一 (金沢大)、満田 和久 (JAXA/ISAS)、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 (V)

寺田幸功 (埼玉大)、Lorella Angelini (NASA/GSFC)、神頭知美 (埼玉大)、上野遥 (埼玉大)、田代信 (埼玉大)、石崎欣尚 (首都大学東京)、尾崎正伸 (ISAS/JAXA)、国分紀秀 (ISAS/JAXA)、大野雅功 (広島大学)、渡辺伸 (ISAS/JAXA)、小高裕和 (ISAS/JAXA)、湯浅孝行 (ISAS/JAXA)、高橋弘充 (広島大学)、高橋忠幸 (ISAS/JAXA)、ASTRO-H Software/Calibration Team: ASTRO-H 衛星の科学解析用時刻づけソフトウェアの開発

江副 祐一郎 (首都大)、木村 智樹、笠原 慧、山崎 敦、藤本 正樹、満田 和久 (JAXA 宇宙研)、三好 由純 (名古屋大)、石川 久美、三石 郁之、小川 智弘、垣内 巧也、大橋 隆哉 (首都大): 将来木星探査衛星を目指す X 線撮像分光装置 JUXTA の検討

磯部 直樹 (ISAS/JAXA), 増田 充宏, 養王田 一尚, 若林 祐介, 佐原宏典, 江副 祐一郎, 大橋 隆哉 (首都大学), 幸村 孝由 (工学院大), ORBIS チーム: 巨大バイナリブラックホール探査超小型衛星 ORBIS の基礎設計

田原 譲、杉田聡司、大橋隆哉、石崎欣尚、江副祐一郎、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

榎島陽介、山田真也、赤松弘規、飯島律子、江副祐一郎、石崎欣尚、大橋隆哉、永吉賢一郎、満田和久、師岡利光、田中啓一、佐藤浩介: DIOS 衛星搭載を目指した TES 型 X 線マイクロカロリメータの性能評価

● 日本天文学会 2013 年春季年会 2013 年 3 月 20 日~ 23 日 (埼玉大学)

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

井上真奈、山田真也、根来均、大橋隆哉: 「すざく」と ASTRO-H 衛星で迫る AGN の激しい X 線時間変動の起源

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、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

渡邊 剛, 田原 譲, 杉田 聡司, 櫻井 郁也, 原 慎二, 増田 忠志, 鳥居 龍晴, 松下 幸司, 立花 健二, 大西 崇文: DIOS 衛星搭載用 4 回反射型 X 線望遠鏡 FXT の大口径反射鏡の開発

榎島陽介、山田真也、飯島律子、江副祐一郎、石崎欣尚、大橋隆哉、永吉賢一郎、満田和久、師岡利光、田中啓一: DIOS 衛星搭載を目指した TES 型 X 線マイクロカロリメータの開発

林多佳由、市原昂、富川和紀、佐藤寿紀、佐藤拓郎、前田良知、石田學: 宇宙科学研究所 新ビームラインの優位性の検証

佐藤寿紀、市原昂、富川和紀、石田學、前田良知、林多佳由: 宇宙科学研究所 新 X 線ビームラインの構築

石崎欣尚、大橋隆哉、江副祐一郎、三石郁之、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、星野晶夫、田代 信、寺田幸功、北本俊二、村上弘志、瀬田裕美、玉川徹、山田真也、佐藤浩介、太田直美、村上正秀、澤田真理、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 (IX)

下田 優弥、田代 信、武田 佐和子、山口 直、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 (VI)

● 応用物理学会 2012 年秋季年会 2012 年 9 月 11 日~ 14 日 (愛媛大学)

垣内巧也、満田和久、洞出光洋、杉山進、Riveros Raul, 山口ひとみ、金森義明、森下浩平、中嶋一雄、前田龍太郎、江副祐一郎、森山鉄平、小川智弘、大橋隆哉、三石郁之: 将来衛星に向けた超軽量、高分解能 MEMS 光学系の基礎開発 (5)

小川智弘, 江副祐一郎, 三石郁之, 垣内巧也, 満田和之, 大橋隆哉, Matti Putkonen: Ir 膜付け MEMS X 線光学系の反射率測定

高野 彬, 前田 亮, 伊豫本直子, 前畑京介, 松村 晶, 原 徹, 満田和久, 山崎典子, 田中啓一, 江副祐一郎: ポリキャピラリー X 線伝送特性測定システムの構築

● 応用物理学会 2013 年春季年会 2013 年 3 月 27 日~ 30 日 (神奈川工科大学)

小川智弘, 江副祐一郎, 三石郁之, 垣内巧也, 満田和久, 大橋隆哉: 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

生田昌寛, 江副祐一郎, 三石郁之, 小川智弘, 垣内巧也, 大橋隆哉, 満田和久, 中嶋一雄, 森下浩平: マイクロマシン技術を用いた Wolter I 型宇宙 X 線望遠鏡の開発 (1)

三石郁之, 江副祐一郎, 小川智弘, 垣内巧也, 生田昌寛, 林多佳由, 佐藤寿紀, 大橋隆哉, 満田和久, 中嶋一雄, 森下浩平: マイクロマシン技術を用いた Wolter I 型宇宙 X 線望遠鏡の開発 (2)

国内研究会

● 名古屋大学理学研究科 公開セミナー「天文学の最前線」 2012 年 8 月 5~ 7 日 (名古屋市立博物館)

江副 祐一郎: 見えてきた太陽系からの X 線 (招待講演)

● 複合的アプローチで探る宇宙の化学進化 2012 年 10 月 26~ 28 日 (ホテル伊豆高原)

江副祐一郎: SWCX のサイエンスと太陽系探査 (招待講演)

大橋隆哉: X 線天文学あれこれ (招待講演)

● 第 13 回宇宙科学シンポジウム 2013 年 1 月 8~ 9 日 (ISAS/JAXA)

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 の目指すサイエンス

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

佐藤浩介, 松下恭子, 市川和也, 佐々木亨, 望月ゆきこ, 大橋隆哉, 藤田 裕, 川原田 円, 田村 隆幸, 中澤知洋, 岡部信広, 太田直美, 滝沢元和, 赤松弘規, 深沢泰司: 「すざく」が捉えた銀河団ビリアル半径までの高温ガスの構造

垣内巧也, 江副祐一郎, 三石郁之, 小川智弘, 生田昌寛, 大橋隆哉, 洞出光洋, 杉山進, 森下浩平, 中嶋一雄, 金森義明: 将来衛星に向けた超軽量高分解能 MEMS X 線光学系の開発

石井亮介, 内田佳秀, 養王田一尚, 若林祐介, 荒井康雄, 川畑諒, 錦沢秀太郎, 増田充宏, 渡邊啓太, 大平健弘, 小黒英樹, 川上翔, 中島研二, 西頭太郎, 佐原 宏典, 磯部 直樹, 江副 祐一郎, 大橋 隆哉: 巨大バイナリブラックホール探査のための超小型衛星 ORBIS の提案

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, 藤本龍一, 星野晶夫, 田代 信, 寺田幸功, 北本俊二, 村上弘志, 瀬田裕美, 玉川徹, 山田真也, 佐藤浩介, 太田直美, 澤田真理, 村上正秀, R.L. Kelley, C.A. Kilbourne, F.S. Porter, G.A. Snedermann, K.R. Boyce, M.J. DiPirro, P.J. Shirron, K.C. Gentreau, G.V. Brown, D. McCammon, A. Szymkowiak, J.-W. den Herder, C. de Vries, E. Costantini, H. Akamatsu, S.Paltani: ASTRO-H 衛星搭載 SXS-XCS 検出器

飯島律子, 井上真奈, 榎島陽介, 江副祐一郎, 石崎欣尚, 大橋隆哉, 菊地貴大, 永吉賢一郎, 山本亮, 酒井和広, 関 谷典夫, 竹井洋, 山崎典子, 満田和久, 菱右京, 國久哲平, 星野晶夫, 藤本龍一, 山田真也, 佐藤浩介, 赤松弘規: DIOS 衛星搭載に向けた TES 型 X 線マイクロカロリメータの開発現状

酒井和広, 山本亮, 竹井洋, 満田和久, 山崎典子, 関谷典夫, 永吉賢一郎, 菊地貴大, 大橋隆哉, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 榎島陽介, 飯島律子, 井上真奈: 小型科学衛星搭載に向けた X 線 TES 型マイクロカロリメータ読み出しシステムの開発

● 学術会議公開シンポジウム 「天文・宇宙分野の将来計画」 2013 年 2 月 17~ 18 日 (東大)

大橋隆哉: DIOS: Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor

● 第 14 回惑星圏研究会 2013 年 2 月 20~ 22 日 (東北大)

K. Ishikawa, Y. Ezoe, T. Ohashi, Y. Miyoshi, N. Terada: Systematic Search for Solar Wind Charge Exchange X-ray Emission from the Earth's Exosphere with Suzaku

Y. Miyoshi, Y. Matsumoto, Y. Ezoe, K. Ishikawa, I. Mitsuishi and geo-planetary X-ray observation team: Simulation on Soft-Xray Emission from Geospace

● 第 3 回小型科学衛星シンポジウム 2013 年 3 月 7~ 8 日 (ISAS/JAXA)

大橋隆哉, DIOS ワーキンググループ: ダークバリオン探査衛星 DIOS の開発の現状

江副祐一郎, 石崎欣尚, 大橋隆哉, 飯島直子, 満田和久, 山崎典子, 竹井 洋, 永吉賢一郎, 山田真也: DIOS に向けた TES 型 X 線マイクロカロリメータの素子開発

国際会議

● Galaxy Clusters as Giant Cosmic Laboratories, ESAC, Madrid, Spain, May 21 – 23, 2012

T. Ohashi, H. Akamatsu, H. Kawahara, N. Sekiya, Y. Takei: X-ray study of clusters at the outer edge and beyond

● Missing Baryons in the Local Universe, Cervia, Italy, May 27 – 30, 2012

T. Ohashi and DIOS working group: The DIOS Mission

● SPIE Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray, Amsterdam, The Netherlands, July 1 – 6, 2012

T. Ohashi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, Y. Tawara, K. Mitsuda, N.Y. Yamasaki, Y. Takei: Status of the Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor (DIOS)

Y. Ezoe, T. Moriyama, T. Ogawa, T. Kakiuchi, T. Ohashi, I. Mitsuishi, K. Mitsuda, M. Horade, S. Sugiyama, R. E. Riveros, H. Yamaguchi, Y. Kanamori, K. Morishita, K. Nakajima, R. Maeda: Progress with MEMS X-ray micro pore optics

T. Takayashi, Y. Ezoe, Y. Ishisaki, T. Ohashi, and 220 authors: The ASTRO-H X-ray Observatory

J. W. den Herder, D. Bagnali, S. Bandler, M. Barbera, X. Barcons, D. Barret, P. Bastia, M. Bisotti, K. Boyce, C. Cara, M. Ceballos, L. Corcione, B. Cobo, L. Colasanti, J. de Plaa, M. DiPirro, W. B. Doriese, Y. Ezoe, R. Fujimoto, F. Gatti, L. Gottardi, P. Guttridge, R. den Hartog, I. Hepburn, R. Kelley, K. Irwin, Y. Ishisaki, C. Kilbourne, P. A. J. de Korte, J. van der Kuur, S. Lotti, C. Macculi, K. Mitsuda, T. Mineo, L. Natalucci, T. Ohashi, M. Page, S. Paltani, E. Perinati, L. Piro, C. Pigot, F. S. Porter, G. Rauw, L. Ravera, E. Renotte, J.-L. Sauvageot, C. Schmid, S. Sciortino, P. Shirron, Y. Takei, G. Torrioli, M. Tsujimoto, L. Valenziano, D. Willingale, C. de Vries, H. van Weers, J. Wilms, N. Y. Yamasaki: The x-ray microcalorimeter spectrometer onboard of Athena

H. Seta, M. S. Tashiro, Y. Ishisaki, M. Tsujimoto, Y. Shimoda, S. Takeda, S. Yamaguchi, K. Mitsuda, R. Fujimoto, Y. Takei, R. L. Kelley, K. R. Boyce, C. A. Kilbourne, F. S. Porter, J. J. Miko, K. Masukawa, K. Matsuda: Development of the onboard digital processing system for the soft x-ray spectrometer of ASTRO-H: performance in the engineering model tests

● 39th Scientific Assembly of the Committee on Space Research (COSPAR), Mysore, India, July 14 – 22, 2012

Y. Ezoe, S. Kasahara, A. Yamazaki, K. Mitsuda, M. Fujimoto, Y. Miyoshi, K. Ishikawa, T. Ohashi: JUXTA: A Probe of X-ray Emission from Jupiter's Magnetosphere

K. Ishikawa, Y. Ezoe, Y. Miyoshi, N. Terada, K. Mitsuda, T. Ohashi: Suzaku observations of terrestrial diffuse X-ray emission during geomagnetic storms

● 2012 IEEE Photonics Society Int'l Conference on Optical MEMS & Nanophotonics (OMN 2012), Banff, Canada, August 6 – 9, 2012

T. Ogawa, Y. Ezoe, I. Mitsuishi, T. Kakiuchi, T. Ohashi, T. Moriyama, K. Mitsuda, M. Putkonen,: X-Ray Reflectivity Measurement of a Iridium Coated MEMS Optic with Atomic Layer Deposition

T. Kakiuchi, Y. Ezoe, T. Moriyama, I. Mitsuishi, T. Ogawa, K. Mitsuda, K. Morishita, K. Nakajima: Assembly of a MEMS-based Wolter Type-I X-Ray Optic

I. Mitsuishi, Y. Ezoe, T. Moriyama, T. Ogawa, T. Kakiuchi, T. Ohashi, M. Mita, Y. Maeda, K. Mitsuda, M. Horade, S. Sugiyama, R. Riveros, H. Yamaguchi, Y. Kanamori, K. Morishita, K. Nakajima, R. Maeda: MEMS-Based Novel X-Ray Optics for Future Astronomical Missions

● Half a Century of X-ray Astronomy, Mykonos Island, Greece, September 17 – 21, 2012

T. Ohashi, ASTRO-H Team: The Astro-H Mission (Invited)

● Applied Superconductivity Conference, Portland, USA, October 7 – 12, 2012

Y. Ezoe, S. Oishi, S. Yamada, Y. Enokijima, N. Iijima, R. Toba, Y. Ishisaki, T. Ohashi, K. Mitsuda, T. Morooka, K. Tanaka: Development of Superconducting Multilayer Wiring for A 400-Pixel TES X-ray Microcalorimeter Array

● Geotail 20th workshop, Ookayama, Japan, November 12 – 14, 2012

Y. Ezoe: Planetary magnetospheres and their solar wind interaction observed in X-rays : Past, present and future (Invited)

● The First International Workshop on Superconducting Sensors and Detectors, Daejeon, Korea, December 12 – 15, 2012

Y. Ezoe: Development of large arrays of TES X-ray microcalorimeters for future astronomy missions (Invited)

● European Large X-ray Observatory Discussion Meeting, Leicester, UK, February 28 – March 1, 2013

T. Ohashi: Japanese program and Athena+ (Invited)

光物性研究室

1. 研究活動の概要

1) 極細単層カーボンナノチューブの光電子分光

単層カーボンナノチューブ (SWCNT) の電子状態の直接的な観測は、直径 1.4 nm 程度の SWCNT からなる混合物試料を用いて行われており、直径 1 nm 以下の単一カイラリティを持つ極細 SWCNT の直接的な電子状態の観測は行われていない。そこで、CoMoCAT 法で合成された 0.8 nm 程度の直径を持つ SWCNT (CoMoCAT 試料) から、アガロースゲル分離法と密度勾配超遠心分離法を組み合わせることにより (6, 5) カイラリティの SWCNT が支配的な試料と、(6, 6) と (7, 4) カイラリティの SWCNT からなる金属型試料を作製し、電子状態の直接的観測を高分解能光電子分光で行った。その結果、以下の結果が得られた。(6, 5) カイラリティの半導体型 SWCNT の van Hove 特異点 (VHS) は、タイトバインディング近似による状態密度計算結果と一致する。カイラリティ(6, 6)、(7, 4) の金属型 SWCNT の VHS は、光吸収実験結果や状態密度計算結果とは整合性がとれなかった。密度汎関数理論などの計算結果との比較から、sp³ 混成などの曲率の影響を考慮した電子構造計算が極細金属型 SWCNT に対しては適当である。(6, 6)、(7, 4) カイラリティを持つ金属型 SWCNT では、フェルミ準位付近に理論から予測された 0.1 eV 程度のエネルギー幅をもつ擬ギャップが存在している可能性が高い。

2) 単層カーボンナノチューブの逆光電子分光

(6,5) カイラリティの SWCNT が支配的な試料と、(6, 6)、(7, 4) カイラリティの金属型 SWCNT からなる試料の非占有電子状態を直接的に観測するために逆光電子分光を行った。その結果、(6, 5) カイラリティの SWCNT の測定では、S1*と S2*と名付けられる VHS から構成された幅広い構造を初めて直接的な手段で観測した。この構造のエネルギー位置は光電子分光の結果と整合すること、さらに、タイトバインディング近似による状態密度計算の結果とも一致することが分かった。

2. 研究業績

1) 学会講演

- 日本物理学会年会 第 68 回年次大会 2013 年 3 月 26 日~ 3 月 29 日 (広島大学東広島キャンパス)

鈴木良輔、米森啓太、石井廣義、真庭豊、柳和宏、羽瀧隆文、平山大裕、林博和、姜健、岩澤英明、島田賢也、生天目博文、谷口雅樹: CoMoCAT 法で合成された極細カーボンナノチューブの光電子分光

国際会議

- The 17th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation, February 28-March 1, 2013, Hiroshima, Japan

R. Suzuki, K. Yonemori, H. Ishii, Y. Mania, K. Yanagi, T. Habuchi, D. Hirayama, H. Hayashi, J. Jiang, H. Iwasawa, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi: Photoemission Study of Electronic States of Carbon Nanotubes Synthesized by CoMoCAT

電子物性研究室

1. 研究活動の概要

希土類イオンを包み込むカゴ状構造を結晶内に持つ物質系を主要な対象として、新奇物性の探索と、見出された興味深い現象の発現機構の解明を目指した研究を進めた。カゴ状構造を持つ化合物として、充填スクッテルダイト RT_4X_{12} (R:希土類、T:遷移金属、X:15 族元素)、 RT_2Al_{20} 、 RAu_3Al_7 、 $R_6T_4Al_{43}$ などに着目し、以下の成果を得た。

1) RAu_3Al_7 (R:希土類) 系の一つとしての $YbAu_3Al_7$ について

この物質の特性については、S.E. Lattturner 等 (2003) により、異方的物質 (菱面体結晶) でありながら、粉末、方向を特定しない試料による報告が一報あるのみである。我々は単結晶を育成して異方性を初めて測定した。特に、Yb 系で重要な価数について、帯磁率の低温での上昇を根拠に、高温で 2 価から 150 K 以下で価数揺動との指摘がなされており、通常の振る舞いと異なっていることから、帯磁率の詳細な測定と新たに電子比熱係数の測定を行った。その結果、帯磁率の低温での上昇は不純物によること、報告とは逆に 100 K 以上で帯磁率が顕著な上昇を示す高い近藤温度を持つ系であること、明白な異方性を示すこと、が確認された。これを検証するために、比熱と電気抵抗率の温度測定を行い、電子比熱係数 γ ($=17 \text{ mJ/mol.K}^2$) と電気抵抗の T^2 依存性係数 A ($=6.5 \times 10^{-4} \mu\Omega \text{ cm/K}^2$) を見積もり、Wilson 比、Kadowaki-Woods 則による比較を行ったところ、典型的な高い近藤温度をもつ $YbAl_2$ に近いことが確認された。高い近藤温度は電気抵抗の T^2 依存性が $\sim 50 \text{ K}$ まで良く従うことも矛盾しない。

2) $SmTr_4As_{12}$ (Tr :Fe, Ru, Os) 系物性評価の更なる進展として

これまで、Sm 系充填スクッテルダイトでは、非フェルミ液体異常を示す $SmFe_4P_{12}$ 、金属非金属転移を示す $SmRu_4P_{12}$ 、磁場に鈍感な重い電子物質 $SmOs_4Sb_{12}$ など興味深い振舞を示すものが多く、精力的な研究が進められてきたが、As 系については試料作成の困難さゆえに、 $SmFe_4P_{12}$ について多結晶を用いた報告があるのみである。我々は高圧フラックス法を用い、最適温度条件を絞り込むことにより $SmOs_4As_{12}$ 単結晶育成に初めて成功した (この物質は高湿度下で腐食され易く、試料の保管は真空封入することが重要である)。電気抵抗は室温から金属的に減少するが、 $\sim 25 \text{ K}$ に極小を示したのち近藤効果を示唆する $-\log T$ で増加する。帯磁率の温度依存性は室温から Sm^{3+} として振舞い、 $\sim 4.7 \text{ K}$ で強磁性的転移を示す。2 K の磁化曲線は保持力 ($\sim 0.06 \text{ A/m}$) のヒステリシスを示し、磁化は顕著な異方性を示す。近藤効果と強磁性が拮抗する興味深い物質であることが分かった。

3) $PeFe_4P_{12}$ の磁場 [111] 方位で見出された新たな高磁場秩序相

$PeFe_4P_{12}$ は、Pr 系において初めて重い電子状態が見出された金属間化合物である。昨年度に引き続き、磁場を [111] 方向に印加した場合に現れる顕著な非フェルミ液体状態と、複数の特異な秩序相 (B 相およびその高磁場側に我々が昨年度見出した C 相) の電子輸送特性を調べた (物質材料研究機構の宇治グループとの共同研究)。明らかとなった磁場-温度相図を図 1 に示す。B 相と C 相の相境界 (約 17T) には、電気抵抗にヒステリシスが現れ、1 次相転移により両者が入れ代わっていることがわかる。この振る舞いは、両者が異なる秩序変数を持つことの証拠である。極低温高磁場中で、この系は複数の互いに競合する内部自由度を持っており、それぞれが B 相と C 相で秩序化したものと考えられる。結晶場準位構造を含めて、この系には未解決の問題が残っているが、今回得た知見が、解明の糸口を与えることが期待される。

4) 近藤ヘリカル磁性体 YbNi₃Al₉ の 2 次元強磁性層中に形成された重い電子状態

YbNi₃Al₉ は、ハニカム構造を持つ 2 次元 Yb 層が大きな距離 (9.1 Å) を離して積層した構造を持つ。名工大の大原グループに提供して頂いた単結晶試料を用いて、極低温磁場中比熱測定を行った。T_{HM}=3.4 K でヘリカル磁気秩序状態へと相転移するが、T_{HM} 以下の秩序相内の電子比熱係数が 110 mJ/K² の値を持つことを見出した。f 電子を持たない参照物質 LuNi₃Al₉ との比較から、約 20 倍もの有効質量を持った重い準粒子が、磁気秩序と共存しながら形成されていることがわかった。さらに、磁気熱量効果測定を組み合わせた磁場-温度相図を明らかにした。ヘリカル磁気構造をもたらす幾つかの磁氣的相互作用強度を分子場モデルに基づいて解析し、Yb 層間の反強磁性相互作用の強度が、Yb 層内の強磁性相互作用に比べて 2 桁小さいことを示した。これにより、Yb イオンが形成する強磁性 2 次元層が、磁氣的には互いにはほぼ独立した強磁性層であることが明らかとなった。本系でもっとも重要な発見は、重い準粒子の有効質量を反映する電子比熱係数が、ヘリカル磁気秩序相の相境界で異常を示さないことである (電気抵抗率がこの相境界で 30 % もの変化を示すことと比べると対照的)。この両者の相違を、ドルーデ描像に基づく 2 キャリアモデルで解析することにより、Yb 層内を運動する準粒子の有効質量が重くなっていることを明らかにした。

5) 新しいカゴ状物質 Tm₆Cr₄Al₄₃ の単結晶育成と物性評価

T₆T₄Al₄₃ はピーナツ型カゴ状構造を持つ化合物である。Jeitschko グループ (独) により合成と磁化率測定の結果があるのみである。我々は、Tm₆Cr₄Al₄₃ の単結晶育成に成功し、その基礎物性測定を行った。残留抵抗値は大きく、電子輸送の観点からの純良性は良くないが、極低温で明瞭な磁気相転移が比熱に観測され (T_N=1.4 K)、磁氣的観点からは問題のない単結晶試料であることがわかる。エントロピーの解析から、擬 2 重項結晶場基底状態が形成されていることがわかった。この擬 2 重項が磁気秩序の形成を担っている。ピーナツ型カゴ状構造内で 2 個の Tm イオンが近接しており、2 量体を形成している可能性もあり、今後基礎物性を調べていく必要がある。

6) 非磁性基底状態を持つ PrTa₂Al₂₀ における非従来型重い電子状態の起源探索

昨年までの我々の研究から、Pr の結晶場基底状態の四極子自由度に起因した秩序状態および重い電子状態が実現していることが明らかになった PrTa₂Al₂₀ について、単結晶を用いた H//[100], [110], [111] 磁場下における極低温までの比熱を測定を行い、相転移の磁場方向依存性について測定を行った。その結果、転移温度の磁場依存性が磁場方向により異なる振る舞いを示すことを観測し、反強四極子転移を示す物質の相図との類似性を見出した。しかし、抵抗率測定に於いて、一次転移を示唆するヒステリシスが観測されたことから、磁場誘起相転移の可能性も含めて、単純な反強四極子秩序で無い可能性が考えられるため、基底状態の詳細については今後さらに研究を進めていく必要がある。また、比熱測定により、四極子秩序温度以下で重い電子状態が形成されていることを我々は見出していたが、共同研究 (東工大、井澤グループ) で行った熱電能測定からも重い電子状態形成を示唆する実験結果を得た。これらの結果は、これまでほとんど例のない、磁性以外の起源による非従来型の四極子誘起の重い電子状態が本物質で発現している可能性が非常に高いことを示している。

7) SmT₂Al₂₀ (T = Ti, V, Cr, Ta) の価数状態および、磁場に鈍感な相転移の秩序変数の探索

昨年度、SmTi₂Al₂₀ が磁場に鈍感な相転移を示し、転移温度以下で磁場に鈍感な重い電子状態を形成することを報告した。今年度は Ti を V, Cr, Ta に置き換えた物質についても単結晶合成を行い、基礎物性測定を行った。その結果、全ての物質において Ti と同様に磁場に鈍感な相転移 (転移温度は異なる)、転移温度以下での磁場に鈍感な重い電子状態を形成することを見いだした (図 2 に比熱の温度依存を示す)。その中で Tr = Ta について、詳細に測定を行い、これまで報告されている Sm 化合物の中でもっと

も大きな電子比熱係数を持ち、磁場に鈍感な相転移以下の 0.4 K 付近に異常が存在することを観測した。Sm は価数揺動を示しやすい性質を持っていることを考慮すると、これらの磁場に鈍感な性質の起源に Sm 価数が関与している可能性が高い。この可能性を明らかにするべく、Sm の価数状態を Sm L₃-edge の X 線吸収スペクトル測定 (透過法) を行ない調べた (SPRING-8 BL01B1 課題番号: 2012B1538)。その結果、どの物質においても価数がほとんど温度に依存せず、 T_r が変化してもほとんど変化しないことを見いだした。この結果は、一見すると価数の自由度はあまり重要な役割を果たしていないように見え、より詳細な検討を今後進めていく予定である。また、磁気八極子の寄与が考えられる磁場に鈍感な相転移の秩序変数を決定するために、中性子吸収係数の小さな ¹⁵⁴Sm 同位体を用いた大型単結晶育成を行った。育成に成功した ~ 2 mm 角の単結晶を用いて、ILL (フランス、グルノーブル) の中性子施設において、単結晶中性子磁気構造解析を行った結果、 $q = 0$ の反強磁秩序であることを見出した。磁気散乱パターンが磁気双極子のみの秩序化では説明できないため、磁気八極子の寄与が考えられる。今後、詳細な解析を行っていく予定である。

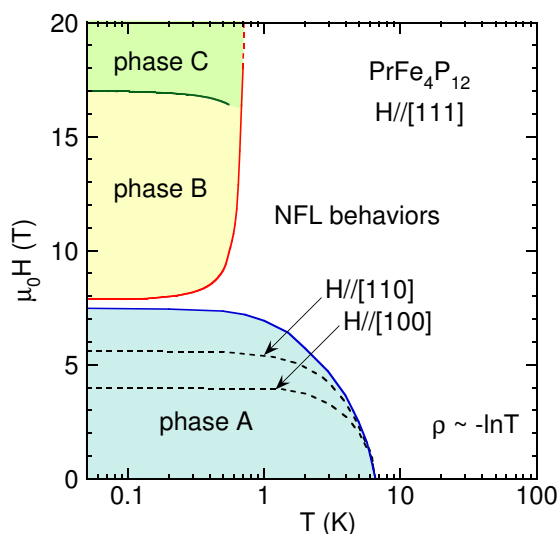


図 1: 磁場を [111] 方向に印加した PrFe₄P₁₂ の磁場-温度相図。B 相の高磁場側に、新たな C 相が存在していることを発見した。

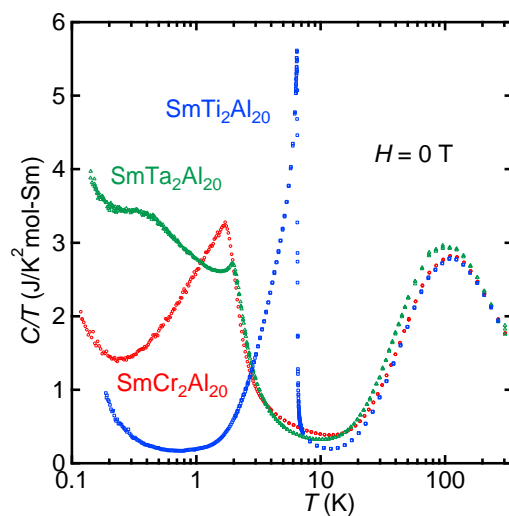


図 2: SmTr₂Al₂₀ 系の比熱の温度依存。磁場に鈍感な相転移や、転移温度以下での磁場に鈍感な重い電子状態が、本系に共通して見られることがわかった。

2. 研究業績

1) 論文

H. Aoki, H. Sato, D. Kikuchi, H. Sugawara, A. Pourret, K. Behnia, S. Uji, T. Terashima, R. Higashinaka, and Y. Aoki: Characterization of the Mysterious High Field Ordered Phase around H//[111] and Finding of a New Phase Boundary in PrFe₄P₁₂, J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 084703 (11 pages).

K. Iwasa, L. Hao, M. Kohgi, K. Kuwahara, J.-M. Mignot, H. Sugawara, Y. Aoki, T.D. Matsuda, and H. Sato: Magnetic Excitation in Totally Symmetric Staggered Ordered Phase of PrFe₄P₁₂, J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 094711(9 pages).

K. Magishi, H. Sugawara, M. Takahashi, T. Saito, K. Koyama, T. Saito, S. Tatsuoka, K. Tanaka, and H. Sato: Effects of Filling Fraction on Magnetic Properties of Filled Skutterudite RFe₄Sb₁₂ (R=La, Ce) Synthesized under High Pressure, Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 124706.

H. Okamura, N. Ohta, A. Takigawa, I. Matsutori, K. Shoji, K. Miyata, M. Matsunami, T. Nanba, H. Sugawara, C. Sekine, I. Shirotnani, H. Sato, T. Moriwaki, Y. Ikemoto, Z. Liu, and G. L. Carr: Pressure suppression of unconventional charge-density-wave state in $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ studied by optical conductivity, *Phys. Rev. B* **85** (2012) 205116.

X. Y. Tee, H. G. Luo, T. Xiang, D. Vandervelde, M. B. Salamon, H. Sugawara, H. Sato, C. Panagopoulos, and Elbert E. M. Chia: Penetration depth study of $\text{LaOs}_4\text{Sb}_{12}$, Multiband s-wave superconductivity, *Phys. Rev. B* **86** (2012) 064518.

R. Miyazaki, Y. Aoki, R. Higashinaka, H. Sato, T. Yamashita and S. Ohara: Heavy quasiparticles formed in the ferromagnetic Yb layers in the Kondo helical magnet YbNi_3Al_9 as revealed by specific-heat measurements, *Phys. Rev. B* **86** (2012) (2012) 155106 (6 pages).

Y. Aoki, T. Namiki, S.R. Saha, H. Sugawara and H. Sato: Thermodynamic properties of the f-electron-nuclear hyperfine-coupled composite multiplets of Pr ions in filled-skutterudite $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$, *J. Phys.: Conf. Ser.* **391** (2012) 012003 (4 pages).

K. Iwasa, T. Orihara, K. Saito, K. Tomiyasu, Y. Murakami, H. Sugawara, K. Kuwahara, H. Kimura, R. Kiyonagi, Y. Ishikawa, Y. Noda, Y. Aoki, H. Sato and M. Kohgi: Neutron scattering study on magnetic ordering in a partially rare-earth filled skutterudite $\text{Pr}_x\text{Fe}_4\text{Sb}_{12}$, *J. Phys.: Conf. Ser.* **391** (2012) 012025 (4 pages).

R. Miyazaki, R. Higashinaka, Y. Aoki, H. Sugawara and H. Sato: Ru substitution effect on the peak effect in superconducting $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$, *J. Phys.: Conf. Ser.* **391** (2012) 012046 (5 pages).

S. Tsutsui, H. Uchiyama, J. P. Sutter, A. Q. R. Baron, J. Yamaura, H. Sugawara, and H. Sato: Inelastic X-ray Scattering of Heavy Fermion Compounds $\text{ROs}_4\text{Sb}_{12}$ (R; Light Rare-Earth), *J. Phys. Conf. Series* **391** (2012) 012074 (4 pages).

M. Yogi, H. Niki, H. Mukuda, Y. Kitaoka, H. Sugawara, and H. Sato: ^{121}Sb -NMR Knight shift study of filled skutterudite $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$, *J. Phys. Conf. Series* **391** (2012) 012080 (4 pages).

2) 学会講演

● 2012 年秋 日本物理学会第 2012 年秋季大会 2012 年 9 月 18 日 (火)~ 21 日 (金) (横浜国立大学)

竹内和也, 瀧川陽, 菅原仁, 佐藤英行, 森脇太郎, 池本夕佳, 岡村英一: $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ の高圧低温での赤外分光による電子状態研究

荻田典男, 長谷川巧, 宮崎亮一, 東中隆二, 青木勇二, 佐藤英行, 宇田川眞行: $\text{Pr}(\text{Os}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sb}_{12}$ のラマン散乱

髭本亘, 伊藤孝, 二宮和彦, 東中隆二, 青木勇二, 佐藤英行: $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ の低温におけるミュオンスピン緩和

與儀護, 二木治雄, 菅原仁, 武田直也, 関根ちひろ, 佐藤英行: $\text{CeRu}_4\text{X}_{12}$ (X=As,Sb) の示す非フェルミ液体的振る舞いの NQR による研究

高橋洋介, 宮崎亮一, 東中隆二, 青木勇二, 佐藤英行: CeAu_3Al_7 の単結晶育成と基礎物性測定

小野修平, 東中隆二, 青木勇二, 佐藤英行: カゴ状化合物微小単結晶試料の熱電能測定

國利洸貴, 高橋洋介, 陶山琢矢, 東中隆二, 青木勇二, 佐藤英行: YbAu_3Al_7 の単結晶育成と物性測定

増田隼人, 高橋洋介, 東中隆二, 青木勇二, 佐藤英行: 反強磁性カゴ状物質 SmAu_3Al_7 の基礎物性評価

宮崎亮一, 青木勇二, 東中隆二, 佐藤英行, 山下哲郎, 大原繁男: ヘリカル磁性体 YbNi_3Al_9 の二次元強磁性層中に形成された重い電子状態

後藤和基, 高津浩, 大塚博己, 東中隆二, 門脇広明, 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スピンドYNAMIX

● 日本物理学会第 2013 年第 68 回年次大会 2013 年 3 月 26 日 (火) ~ 29 日 (金) (広島大学東広島キャンパス)

東中隆二, 山田瑛, 宮崎亮一, 水牧仁一郎, 筒井智嗣, 新田清文, 宇留賀朋哉, G. Nenert, L. Chapon, 青木勇二, 佐藤英行: $\text{SmTr}_2\text{Al}_{20}$ における磁場に鈍感な相転移および重い電子状態の起源探索

宮崎亮一, 筒井智嗣, 青木勇二, 東中隆二, 荻田典男, 長谷川巧, 宇田川眞行, Alfred. Q. Baron, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト $\text{Pr}(\text{Os}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sb}_{12}$ におけるラットリング-結晶場励起間の新奇結合状態

荻田典男, 長谷川巧, 宮崎亮一, 東中隆二, 青木勇二, 佐藤英行, 宇田川眞行: $\text{Pr}(\text{Os}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sb}_{12}$ のラマン散乱 II

小野修平, 東中隆二, 青木勇二, 佐藤英行: カゴ状化合物単結晶試料の低温熱電能測定

山田瑛, 東中隆二, 青木勇二, 佐藤英行, 水牧仁一郎, 筒井智嗣, 新田清文, 宇留賀朋哉: カゴ状化合物 $\text{SmTr}_2\text{Al}_{20}$ ($\text{Tr}=\text{V}, \text{Nb}, \text{Ta}$) の単結晶育成と物性測定

増田隼人, 高橋洋介, 宮崎亮一, 東中隆二, 青木勇二, 佐藤英行: 反強磁性カゴ状物質 SmAu_3Al_7 の単結晶育成と物性測定 II

伏屋健吾, 宮崎亮一, 東中隆二, 青木勇二, 佐藤英行: 新規カゴ状化合物 $\text{Tm}_6\text{Cr}_4\text{Al}_{43}$ の単結晶育成と物性測定

後藤和基, 高津浩, 大塚博己, 東中隆二, 門脇広明, 松林和幸, 上床美也: スピンアイス $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ のチャージ密度相関

筒井智嗣, 水牧仁一郎, 内山裕士, Alfred Q. R. Baron, 菅原仁, 佐藤英行: $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ における非調和フォノンと価数揺動

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 $\text{NdRu}_4\text{Sb}_{12}$ の NQR による物性研究

国内研究会

● 新学術領域研究「重い電子系の形成と秩序化」ワークショップ ~ カゴ状構造に宿る強相関物性 ~ 、首都大学東京南大沢キャンパス、2012 年 9 月 26-28 日

佐藤英行: 充填スクッテルダイトに残された問題と新たな籠状物質 (招待講演)

東中隆二、中間章浩、宮崎亮一、水牧仁一郎、筒井智嗣、青木勇二、佐藤英行: SmTr₂Al₂₀ 系における磁場に鈍感な相転移及び重い電子状態 (口頭)

伏屋健吾、宮崎亮一、青木勇二、水牧仁一郎、筒井智嗣、新田清文、宇留賀朋哉、末光文也、東中隆二、佐藤英行: X線吸収による (Sm_xLa_{1-x})Os₄Sb₁₂ の Sm イオン価数測定

宮崎亮一、筒井智嗣、青木勇二、荻田典男、長谷川巧、水牧仁一郎、A.Q.R. Baron、東中隆二、佐藤英行: 充填スクッテルダイト Pr(Os_{0.32}Ru_{0.68})₄Sb₁₂ における結晶場励起と結合した低エネルギー・ゲスト・モード

高橋洋介、宮崎亮一、東中隆二、青木勇二、佐藤英行: CeAu₃Al₇ の単結晶育成と基礎物性測定

増田隼人、高橋洋介、東中隆二、青木勇二、佐藤英行: 反強磁性カゴ状物質 SmAu₃Al₇ の基礎物性評価

國利洸貴、高橋洋介、陶山琢矢、東中隆二、青木勇二、佐藤英行: YbAu₃Al₇ の単結晶育成と物性測定

前田達矢、東中隆二、青木勇二、佐藤英行: 充填スクッテルダイト化合物 SmOs₄As₁₂ の単結晶育成及び物性評価

● 第6回物性科学領域横断研究会「凝縮系科学の最前線」

東京大学武田先端知ビル5階武田ホール、2012年11月27-28日

宮崎亮一、筒井智嗣、青木勇二、荻田典男、長谷川巧、宇田川眞行、A.Q.R. Baron、東中隆二、佐藤英行: 充填スクッテルダイト Pr(Os_{1-x}Ru_x)₄Sb₁₂ において結晶場励起と結合した希土類ゲストイオンモード

● 新学術領域研究「重い電子系の形成と秩序化」第4回研究会

東京工業大学 大岡山キャンパス、2013年1月12-14日

青木勇二、東中隆二、佐藤英行: スクッテルダイトにおける多極子物理の新展開 (口頭)

東中隆二、中間章浩、宮崎亮一、水牧仁一郎、筒井智嗣、青木勇二、佐藤英行: SmTr₂Al₂₀ における磁場に鈍感な相転移および重い電子状態の起源探索

増田隼人、高橋洋介、東中隆二、青木勇二、佐藤英行: 反強磁性カゴ状物質 SmAu₃Al₇ の単結晶育成と物性測定 II

伏屋健吾、宮崎亮一、小野修平、東中隆二、青木勇二、佐藤英行: 新規カゴ状化合物 Tm₆Cr₄Al₄₃ の単結晶育成と物性測定

國利洸貴、高橋洋介、東中隆二、青木勇二、佐藤英行: YbAu₃Al₇ の単結晶育成と物性測定

国際会議

● The 19th International conference on Magnetism (ICM 2012), Bexco, Busan, Korea, July 8-13, 2012

H. Sugawara, M. Sakoda, E. Matsuoka, T. Saito, S. Tatsuoka, K. Tanaka and H. Sato: Transport and magnetic properties of CeFe₄Sb₁₂ synthesized under high pressure

K. Magishi, H. Sugawara, M. Takahashi, T. Saito, K. Koyama, T. Saito, S. Tatsuoka, K. Tanaka and H. Sato: Sb NQR study of filled skutterdite $\text{CeFe}_4\text{Sb}_{12}$ synthesized under high pressure

R. Higashinaka, A. Nakama, R. Miyazaki, Y. Aoki and H. Sato: Unusual heavy fermion behavior in $\text{PrTr}_2\text{Al}_{20}$ ($Tr = \text{Nb}, \text{Ta}$) associated with Γ_3 quadrupolar degrees of freedom

3) 学会誌等

佐藤英行、青木勇二、菅原仁、播磨尚朝: 充填スクッテルダイト RT_4X_{12} (R: 希土類, T: 遷移金属, X: P, As, Sb) —その結晶構造が可能にした多彩な振る舞い—セラミックス **47**, 5月号 (2012) p340-345

青木勇二、菅原仁、佐藤英行: 充填スクッテルダイトにおける多極子物性固体物理 特集号「重い電子系の物理の最近の発展」**47**, No.11 (2012) p637-649

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、ボロンクラスター固体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- 核磁気共鳴 (NMR)、X線回折、磁化測定、比熱、広帯域インピーダンス測定、計算機実験など- を用いて研究している。2012年度の主な研究・教育活動の概要は以下のとおりである。

1) 第二、第三世代単層カーボンナノチューブの固体物性

単層カーボンナノチューブ (SWCNT) の構造は、カイラル指数と呼ばれる二つの整数の組 (n,m) により指定できる。 (n,m) を与えることによりチューブ直径などの構造のほか、その電子状態も一義的に決定される。たとえば、 $n-m$ が3の倍数のSWCNTは金属型、他のものは半導体型となる。したがってSWCNTの固体物性研究においては、単一指数のSWCNTを得ることが極めて重要となるが、このような試みは未だ充分に行われていない。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い興味深い成果を得た。また第二世代SWCNTフィルムの炭素13核NMRスペクトルにおいて、そのシフトテンソルが半導体型と金属型で有意に異なることを明らかにし、炭素13核NMRがSWCNTの特異な軌道磁性の詳細を調べる有用なプローブとなり得ること報告した。

第三世代SWCNT試料による研究では、 $(6,5)$ SWCNTを濃縮した試料について放射光を用いた粉末X線回折実験を行い、始めてSWCNTのカイラル構造に依存した特徴的な粉末パターンの観測に成功した。また新規磁性ナノワイヤーの開発を目指し、酸素分子 (スピン1) や一酸化窒素分子 (スピン1/2) の内包実験を行った。(田寺修士論文) 図1に、得られた第三世代 $(6,5)$ SWCNT試料の光吸収スペクトルとその溶液の写真を示す。

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充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。関連して第2臨界点仮説が提案され、4°Cで密度が最大になる、などの水の異常について議論されている。このような水の一部は、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。本グループでは、SWCNTやゼオライト鑄型炭素 (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ている。

SWCNT内の水の研究では、平均直径が1.2~2.4 nmのSWCNTについて次の点が明らかになっている。(1) この直径領域のSWCNTは室温、飽和蒸気圧下で水を容易にその空洞内に吸着する。(2) 直径 D が約1.4 nm以下のSWCNT内の水は低温でアイスナノチューブと呼ばれるチューブ状の氷になる。このアイスナノチューブの融点は D が小さくなると上昇し、 $D \sim 1.2$ nmでは室温で5員環のアイスナノチューブを形成する。すなわちアイスナノチューブの融点はバルクキャピラリー内の水の融点 (変形ケルビン式で記述される) と逆の空洞径依存性を示す。(3) アイスナノチューブはプロトンが秩序化した氷

であり、反（フェリ）強誘電体となり、ステップ状の特異な分極過程を示す。(4) D が約 1.5 nm 以上では、内部の水が SWCNT 外部に排出される wet-dry 転移を起こす。その転移温度は、ケルビン式と同じ空洞径依存性すなわち D が大きくなると転移温度が高くなる。(5)したがってバルク領域と分子スケール領域との間で水の性質が不連続的に変化する（バルクと原子スケール領域のクロスオーバー）。(6) ガス雰囲気下におかれた水を内包した SWCNT においては、低温でち雰囲気ガスと水分子の入れ替え（交換転移）が起こる。この転移温度はガスの種類に依存し、窒素-メタン-クリプトン-二酸化炭素と順に上昇する。また圧力が高くなるほど高くなる。この交換転移はガスセンサーや分子選択的ナノバルブ機構として利用可能である。(7) クロスオーバー領域近傍の有限長 SWCNT では、SWCNT の端の効果のため内包する水の量に依存して中空アイスナノチューブから 1 次元水チェーンを内包したアイスナノチューブへと変化する。

本年度は、SWCNT 内の水のダイナミクスを明らかにするために NMR の緩和時間の測定を開始した。また、3 次元的ナノ空洞を有する ZTC 内の水について、示唆走査熱量計 (DSC) による熱測定（田村修士論文）、X 線回折実験、計算機実験、NMR 実験などの結果をまとめて報告した。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 近傍以下において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が示唆された。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。

3) ナノ構造物質の電子状態および核磁気共鳴 (NMR)

セメント超伝導体 C12A7、ボロンクラスター固体、SWCNT などの電子状態を明らかにする目的で微視的プローブである NMR による研究を行っている。本年度は、3 次元的グラファイトというべきゼオライト鑄型炭素 (ZTC) の電子状態を明らかにするために炭素 13 核の NMR 実験を行い、ZTC 骨格が金属的な性質を有していることを明らかにした。（山田修士論文）

4) ゼオライト鑄型炭素 (ZTC) の空洞内に吸着された希ガス

ゼオライト鑄型炭素 (ZTC) はゼオライトを鑄型として作られる炭素を主成分とする細孔性物質である。直径が 1nm 程度の空洞が 3 次元的に配列し、炭素材料の中で最も大きな表面積 $4000\text{m}^2/\text{g}$ をもつ。本グループでは、東北大学との共同研究により、ZTC 空洞に吸着されたガス分子について、その構造と相転移挙動を明らかにする研究を行っている。希ガスは低温ではアモルファス的な構造をとることが示唆されているが、本年度もこの生成機構や凍結過程について引き続き研究した。

5) その他

卒業研究として、水を内包した SWCNT の熱物性解明を目指し、直径制御された SWCNT 試料の開発を行った。（市村）

6) 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) : 複合ナノ炭素材料の構造物性 (2010G667) およびナノ構造炭素内に吸着された物質の構造物性 (2012G706)。

2. 研究業績

1) 論文

Kazuyuki Matsuda, Kazuhiro Yanagi, Haruka Kyakuno, Satoshi Sagitani, Hiromichi Kataura, and Yutaka Maniwa: ^{13}C -NMR Shift of Highly Concentrated Metallic and Semiconducting Single-Walled Carbon Nanotubes, *J. Phys. Soc. Jpn.* **82** (2013) 015001-1 -2. (DOI:10.7566/JPSJ.82.015001)

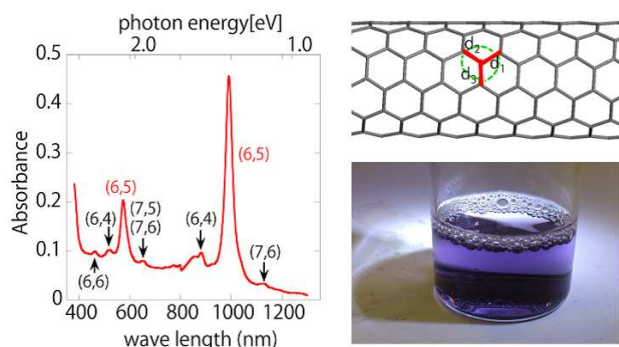


図 1: 第三世代カーボンナノチューブの光吸収スペクトル。(6,5)SWCNTが濃縮されている。右上図は(6,5)SWCNTの構造を示す。3種類の結合長および結合角があるが、その詳細についてはまだ実験的に決定されていない。本グループでは、X線回折実験によりSWCNTの指数と構造を明らかにする研究を行っている。右下図は(6,5)SWCNTの濃縮溶液。指数が異なる多数のSWCNTが混在する市販SWCNT材料を用い、ゲルクロマトグラフィー法と密度勾配超遠心法を用いて精製・分離した。

Masatoshi Kawai, Haruka Kyakuno, Takuya Suzuki, Toru Igarashi, Hironori Suzuki, Toshiya Okazaki, Hiromichi Kataura, Yutaka Maniwa, and Kazuhiro Yanagi: Single Chirality Extraction of Single-Wall Carbon Nanotubes for the Encapsulation of Organic Molecules, *J. Am. Chem. Soc.* **134** (2012) 9545-9548. (DOI:10.1021/ja3013853)

T. Iye, Y. Nakai, S. Kitagawa, K. Ishida, S. Kasahara, T. Shibauchi, Y. Matsuda, and T. Terashima: Gradual suppression of antiferromagnetism in $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$: Zero-temperature evidence for a quantum critical point, *Phys. Rev. B* **85** (2012) 184505(1-5). (DOI:10.1103/PhysRevB.85.184505)

T. Iye, Y. Nakai, S. Kitagawa, K. Ishida, H. Ikeda, S. Kasahara, T. Shibauchi, Y. Matsuda, and T. Terashima: P-concentration dependence of the quasiparticle density of states in $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$, *J. Phys.: Conf. Ser.* **391** (2012) 012127. (DOI:10.1088/1742-6596/391/1/012127)

S. Kitagawa, Y. Nakai, T. Iye, K. Ishida, Y. F. Guo, Y. G. Shi, K. Yamaura, E. Takayama-Muromachi: Nuclear spin-lattice relaxation rate in the superconducting state on $\text{La}(\text{Fe}_{1-x}\text{Zn}_x)\text{AsO}_{0.85}$ studied by ^{75}As -NMR, *J. Phys.: Conf. Ser.* **391** (2012) 012130. (DOI:10.1088/1742-6596/391/1/012130)

Y. Nakai, S. Kitagawa, T. Iye, K. Ishida, Y. Kamihara, M. Hirano, and H. Hosono: Enhanced anisotropic spin fluctuations below tetragonal-to-orthorhombic transition in $\text{LaFeAs}(\text{O}_{1-x}\text{F}_x)$ probed by ^{75}As and ^{139}La NMR, *Phys. Rev. B* **85** (2012) 134408(1-5). (DOI:10.1103/PhysRevB.85.134408)

2) 学会講演

● 日本物理学会 2012 年秋季大会 2012 年 9 月 (横浜国立大学)

客野遥, 松田和之, 中井祐介, 福岡智子, 真庭豊, 西原洋知, 京谷隆: ゼオライト鑄型炭素 (ZTC) 内の水の構造と相挙動 II

田寺真, 客野遥, 中井祐介, 松田和之, 柳和宏, 真庭豊: 単層カーボンナノチューブを用いた一次元磁性体の作製

山田健介, 中井祐介, 真庭豊, 西原洋知, 京谷隆: 核磁気共鳴法によるゼオライト鑄型炭素 (ZTC) の研究

河合将利, 柳和宏, 岡崎俊哉, 真庭豊: C_{60} 内包単一カイラリティ単層カーボンナノチューブにおけるラマン振動モード

家哲也, 中井祐介, 北川俊作, 石田憲二, 笠原成, 芝内孝禎, 松田祐司, 寺嶋孝仁: $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ における磁性-超伝導共存/競合相の磁気応答

● 第43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, 2012年9月 (東北大学百周年記念会館川内萩ホール)

山田健介, 中井祐介, 松田和之, 真庭豊, 西原洋知, 京谷隆: 核磁気共鳴法によるゼオライト鑄型炭素 (ZTC) の研究

客野遥, 松田和之, 中井祐介, 福岡 智子, 真庭 豊, 西原 洋知, 京谷隆: ゼオライト鑄型炭素に内包された水の過冷却およびガラス状態

本田和也, 中井祐介, 柳和宏, 真庭 豊: Thermoelectric Power of Metallic and Semiconducting Single-Wall Carbon Nanotube Buckypaper

● NMR 研究会および 12-1 高分子と水・分離に関する研究会 2012年12月6日、(東工大蔵前会館ロイヤルブルーホール)

真庭豊: ナノ空間の水を観る

● 第44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, 2013年3月 (東京大学 伊藤国際学術研究センター伊藤謝恩ホール)

Tadera Shin, Haruka Kyakuno, Yusuke Nakai, Kazuhiro Yanagi, Yasumitsu Miyata, Hiromichi Kataura, Yutaka Maniwa: X-ray diffraction profile of highly purified (6,5) SWCNTs

● 日本物理学会 第68回年次大会 2013年3月 (広島大学)

山田健介, 中井祐介, 松田和之, 西原洋知, 京谷隆, 真庭豊: 核磁気共鳴法によるゼオライト鑄型炭素 (ZTC) の研究 II

客野遥, 松田和之, 中井祐介, 福岡智子, 真庭豊, 西原洋知, 京谷隆: ナノ構造炭素に束縛された水の研究

松田和之, 鷲谷智, 本田和也, 客野遥, 中井祐介, 柳和宏, 真庭豊, 片浦弘道: 金属・半導体単層カーボンナノチューブの ^{13}C -NMR スペクトル

光山遼, 客野遥, 中井祐介, 西原洋知, 京谷隆, 真庭豊: ZTC (ゼオライト鑄型炭素) の幾何学的束縛効果によるアモルファス化の研究

鈴木良輔, 米森啓太, 石井廣義, 真庭豊, 柳和宏, 羽瀧隆文, 平山大裕, 林博和, 姜健, 岩澤英明, 島田賢也, 生天目博文, 谷口雅樹: CoMoCAT 法で合成された極細カーボンナノチューブの光電子分光 II

家哲也, 中井祐介, 北川俊作, 石田憲二, 笠原成, 芝内孝禎, 松田祐司, 寺嶋孝仁, Hadrien Mayaffre, Marc-Henri Julien: $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ 単結晶を用いた NMR による面内異方性の研究

3) 学会誌等

Kenji Ishida and Yusuke Nakai: Invited book chapter in “Iron-based Superconductors - Materials, Properties and Mechanisms” edited by Pengcheng Dai, Hideo Hosono, Nan Lin Wang, Pan Stanford Publishing

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・デバイス開発を進めている。

1) ナノ構造体の光物性

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（ファンホーベ特異点）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。その結果、紫外領域の吸収変化も可逆的に可能であることを明らかにした。ドープ時におけるスペクトル変化の様子から、これまで提案されてきたモデル（プラズモンや Fano 型の光吸収）では、吸収帯の変化を解釈することが困難であることが分かった。また、電気二重層によってシフトされたフェルミエネルギーの位置は、第一と第二ファンホーベ間までしかシフトしていない状況であるにもかかわらず、紫外領域の吸収変化が起きていることが分かった。また、高ドープ時において新しい吸収帯が出現することが分かった。高分子系において見られるポーラロン・バイポーラロン由来の吸収と帰属することが出来ない為、新しい起源に由来する吸収帯であることが示唆されている。その背景についても、今後明らかにしていく予定である。

2) ナノ構造体のランダムネットワーク系における電気伝導機構の解明と電気伝導制御

SWCNT の電界効果型デバイス（FET）応用において、ネットワーク系における電気伝導機構の解明とその制御は極めて重要である。近年の高純度精製技術により、半導体型 SWCNT に由来する伝導を実現することが可能となっている。しかしながら、その伝導を外部電場で制御する為には、SWCNT における電場遮蔽の影響により、絶縁層の上に SWCNT を一層で配置する膜形成技術が必要不可欠とされていた。その問題を解決する為、我々はイオン液体・ゲルを絶縁層に用いた電気二重層によるキャリア注入制御の技術開発・物性研究を進めている。

これまで、同手法を用いて、数 100 nm の厚みを有する厚膜においてもキャリア注入制御が可能であり、ON/OFF 比 = 10^4 、移動度数数 $10 \text{ cm}^2/\text{VS}$ 程のデバイス素子が形成可能であることを明らかにした。今年度は、SWCNT の電子構造がどのようにデバイス特性に影響を及ぼすのかを明らかにすることを目標に研究を行った。

(6,5) SWCNT および (11,10)SWCNT を単一カイラリティ精製を行い、それらの厚膜をチャンネルに用いる電気二重層トランジスタ（EDLT）を作製した。そのデバイス特性を明らかにしたところ、閾値

電圧にカイラリティ依存性が顕著に出ることを世界ではじめて明らかにした。SWCNTのようなナノ構造試料における電気二重層形成においては、試料のキャパシタンスのゲート電圧依存性が顕著に現れる。試料のキャパシタンスは、等価回路として、量子キャパシタンスと構造キャパシタンスが直列に並んだ形を想定することが可能である。量子キャパシタンスは試料の状態密度を反映する。その結果、半導体SWCNTのバンドギャップ間は理論的には状態密度がゼロであり、それが大きく試料のキャパシタンスに影響を及ぼし、結果として、閾値電圧に影響を及ぼすことを明らかにした。

3) ナノ構造体の高純度精製

SWCNTの物性を真に明らかにする為には、単一カイラリティの試料を得ることは必要不可欠である。近年の分離精製技術の進展により、直径が1.0 nm以下の試料においては、単一カイラリティの試料を得る方法は多く提案されている。しかしながら、それより大きな直径では、単一カイラリティ試料を得る方法はほとんど報告されていない。本研究では、金属型・半導体型分離と直径分離を組み合わせることで、単一カイラリティ試料を得ることを目標に研究を行い、昨年度、(11,10) SWCNTの単一カイラリティ精製に世界ではじめて成功した。同研究を更に推し進め、単一カイラリティ試料に C_{60} 分子を内包することに成功し、世界で初めて単一カイラリティピーポットの作製に成功した。同試料にラマン分光測定を行うことにより、Radial breathing modeが分子内包により 6cm^{-1} 程ソフトニングすることを明確に検出した。この変化は、単一カイラリティ精製によってはじめて明らかになったことである。

また、ゲル濾過分離法において、諸条件を最適化することにより、(6,5)SWCNTの単一カイラリティを容易に得る方向を確立した。

4) ナノ構造体の配列制御技術の開発

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は、SWCNTが規則正しく配列した結晶状試料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(6,5)SWCNTを用いて、その結晶作製技術の開発を行った。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。同集合体において、偏光顕微鏡ラマン分光測定を行うことにより、SWCNTは軸方向に配列していることを明らかにした。界面活性剤の種類によって、配向度が異なり、コール酸ナトリウムを用いた集合体の場合は配向度が6程度を備える集合体を得ることに成功した。これは軸方向に対して分布角度20度程度で配列することを示唆している。実際、走査型顕微鏡観測を行い、SWCNTが軸方向に配列していることを明らかにし、そこから求まる配向分布も19度という値であった。得られた配向集合体をチャンネルに用いたEDLTを作製しキャリア注入を行ったところ、ON/OFF比 $= 8 \times 10^3$ 、最大易動度 $100\text{ cm}^2/\text{VS}$ 程のデバイス素子が形成可能であることを明らかにした。このことは作製した配向集合体に対してキャリア注入制御が可能であることを明確に示している。

2. 研究業績

1) 論文

Sauer, M., Shiozawa, H., Ayala, P., Ruiz-Soria, G., Kataura, H., Yanagi, K., Krause, S., Pichler, T.: In situ filling of metallic single-walled carbon nanotubes with ferrocene molecules, *Physica Status Solidi (B)* **249** (2012) 2408–2411

Shimizu, R., Matsuzaki, S., Yanagi, K., Takenobu, T.: Optical signature of charge transfer in n-type carbon nanotube transistors doped with printable organic molecules, *Applied Physics Express* **5** (2012)

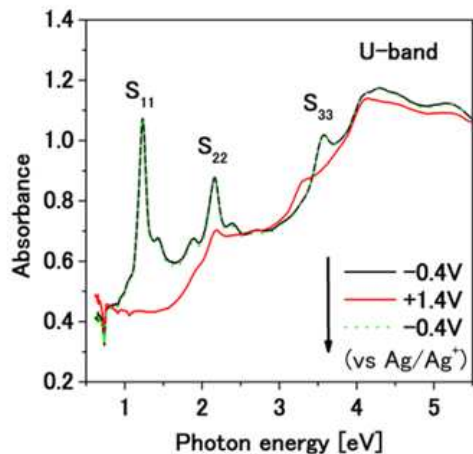


図 1: 低温光電気化学測定による (6,5) 単層カーボンナノチューブの光吸収変化

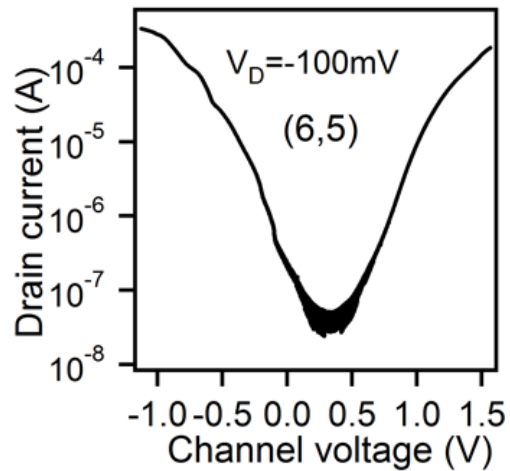


図 2: (6,5)SWCNT をチャンネルに用いた電気二重層トランジスタの伝達特性

125102

Briones-Leon, A., Liu, X., Ayala, P., Kataura, H., Yanagi, K., Weschke, E., Pichler, T., Shiozawa, H.: Orbital and spin magnetic moments of ferrocene encapsulated in metallicity sorted single-walled carbon nanotubes, *Physica Status Solidi (B)* **249** (2012) 2424–2427

Chernov, A., Havlicek, M., Jantsch, W., Rummeli, M.H., Bachmatiuk, A., Yanagi, K., Peterlik, H., Kataura, H., Sauerzopf, F., Resel, R., Simon, F., Kuzmany, H.: Ferromagnetic decoration in metal-semiconductor separated and ferrocene functionalized single-walled carbon nanotubes, *Physica Status Solidi (B)* **249** (2012) 2323–2327

Havlicek, M., Chernov, A., Jantsch, W., Wilamowski, Z., Yanagi, K., Kataura, H., Rummeli, M.H., Malissa, H., Kuzmany, H.: Magnetic phase transition for defect induced electron spins from fully metal-semiconductor separated SWCNTs, *Physica Status Solidi (B)* **249** (2012) 2562–2567

Havlicek, M., Jantsch, W., Wilamowski, Z., Yanagi, K., Kataura, H., Rummeli, M.H., Malissa, H., Tyryshkin, A., Lyon, S., Chernov, A., Kuzmany, H.: Indirect exchange interaction in fully metal-semiconductor separated single-walled carbon nanotubes revealed by electron spin resonance, *Phys. Rev. B* **86** (2012) 45402

Kawai, M., Kyakuno, H., Suzuki, T., Igarashi, T., Suzuki, H., Okazaki, T., Kataura, H., Maniwa, Y., Yanagi, K.: Single chirality extraction of single-wall carbon nanotubes for the encapsulation of organic molecules, *J. Am. Chem. Soc.* **134** (2012) 9545–9548

Matsuzaki, S., Nobusa, Y., Shimizu, R., Yanagi, K., Kataura, H., Takenobu, T.: Continuous electron doping of single-walled carbon nanotube films using inkjet technique, *Jpn. J. Appl. Phys.* **51** (2012) 06FD18

Nobusa, Y., Takagi, Y., Gocho, S., Matsuzaki, S., Yanagi, K., Takenobu, T.: Fine patterning of inkjet-printed single-walled carbon-nanotube thin-film transistors, *Jpn. J. Appl. Phys.* **51** (2012) 06FD15

2) 国際会議報告

- 高次 π 空間の創発と機能開発 第4回国際シンポジウム 2012年11月13日~11月14日 (浜名湖ロイヤルホテル)

Kazuhiro Yanagi, Kai Hasegawa, Hideki Kawai, Ryo Nakatsu (Kyoto Univ.): Alignment Control of Single Wall Carbon Nanotubes during Aggregation (Poster)

- 2012 A3 Symposium of Emerging Materials: Nanomaterials for Energy and Environments 2012年11月29日~12月1日 (Tohoku Univ.)

Yuki Nobusa¹, Hiroki Hamahata¹, Yohei Yomogida¹, Kazuhiro Yanagi², Yoshihiro Iwasa³ and, Taishi Takenobu¹ (Waseda Univ.¹, Tokyo Metropolitan Univ.², Univ. of Tokyo³): "Bending Properties of Single-Walled Carbon Nanotube Film Transistors" (ポスター)

Masatoshi Kawai, Haruka Kyakuno, Takuya Suzuki, Toru Igarashi, Hironori Suzuki¹, Toshiya Okazaki¹, Hiromichi Kataura¹, Kazuhiro Yanagi (Tokyo Metropolitan Univ., AIST¹): "Single Chirality Extraction of Single-Wall Carbon Nanotubes for the Encapsulation of Organic Molecules" (ポスター)

Satoki Matsuzaki¹, Yohei Yomogida¹, Ryota Inukai¹, Kazuhiro Yanagi², Yoshihiro Iwasa³, Taishi Takenobu¹ (Waseda Univ.¹, Tokyo Metropolitan Univ.², Univ. Tokyo³): "Fully Inkjet-Printed All Carbon Flexible Transistor" (ポスター)

- International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials, 2013年13月2日~3月9日 (Austria)

K. Yanagi: Control of Colors of Single-Wall Carbon Nanotubes: -Purification, Electrochromic Properties, and Peapods in a Single-Chirality State- (招待講演)

3) 学会講演

- カロテノイド研究談話会 2011年9月13日 - 9月14日 (函館)

柳和宏、守屋理恵子、Nguyen Thanh Cuong¹、岡田晋¹ (首都大、筑波大¹): π ナノ空間内に束縛された β カロテンの電気化学特性 (口頭)

- 第43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 2011年9月5日~9月7日 (東北大学)

河合 英輝, 長谷川 凱, 藤原 正澄¹, 竹内 繁樹¹, 片浦 弘道², 中津 亨³, 柳 和宏 (首都大、阪大¹、AIST²、京大³): アルコール濃度制御による単層カーボンナノチューブの凝集体の形成と高純度化 (ポスター)

工藤 光, 野房 勇希¹, 片浦 弘道², 竹延 大志¹, 柳 和宏 (首都大、早大¹、AIST²): 単一(6,5)カイラリティ単層カーボンナノチューブ厚膜におけるイオンゲルトランジスタ (ポスター)

柳 和宏, Hideki Kawai, Hikaru Kudo, Kai Hasegawa, Hiromichi Kataura¹, Ryo Nakatzu² (首都大、AIST¹、京大²): 蒸気拡散法によって作製した単層カーボンナノチューブ凝集体の性質 (口頭)

河合 将利, 五十嵐 透, 客野 遥, 岡崎 俊也¹, 真庭 豊, 柳 和宏 (首都大、AIST¹): 単一カイラリティ(11,10)単層カーボンナノチューブへの C60 分子の内包 (ポスター)

● 第44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 2012年3月11日~3月13日 (東京大学 本郷キャンパス)

Tadera Shin, Haruka Kyakuno, Yusuke Nakai, Kazuhiro Yanagi, Yasumitsu Miyata, Hiromichi Kataura¹, Yutaka Maniwa(首都大、AIST¹): X-ray diffraction profile of highly purified (6,5) SWCNTs(ポスター)

Ryo Shimizu, Yijin Zhang, Kazuhiro Yanagi¹, Yoshihiro Iwasa², Taishi Takenobu(早大、首都大¹、東大²): カーボンナノチューブ電気二重層トランジスタにおける p-n 接合の形成 (ポスター)

Hiroki Hamahata, Yuki Nobusa, Yohei Yomogida, Kazuhiro Yanagi¹, Yoshihiro Iwasa², Taishi Takenobu(早大、首都大¹、東大²): Bending Properties of Single-Walled Carbon Nanotube Film Transistors (ポスター)

Yoshifumi Wada, Jiang Pu, Yuki Takagi, Kazuhiro Yanagi¹, Taishi Takenobu (早稲田、首都大¹): Electric double layer transistors of aligned carbon nanotube thin film (ポスター)

高木 勇樹, 大島 勇吾¹, 柳 和宏², 竹延 大志 (早稲田、理研¹、首都大²): 液相法によるカーボンナノチューブワイヤー (ポスター)

河合 英輝, 長谷川 凱, 中津 亨¹, 内藤 泰久², 高木 勇樹³, 竹延 大志³, 柳 和宏 (首都大、京大¹、AIST²、早稲田³): String-like Aggregates of Aligned (6, 5) Single Wall Carbon Nanotubes(ポスター)

工藤 光, 河合 将利, 船迫 友之, 野房 勇希¹, 竹延 大志¹, 柳 和宏 (首都大、早稲田¹): Electric Double Layer Transistors using Thick Films in Single Chiral States of (6,5) and (11,10) Single-Wall Carbon Nanotubes (ポスター)

五十嵐 透, 長谷川 凱, 船迫 友之, 小野 新平¹, 柳 和宏 (首都大、電中研¹): 電気二重層を用いたキャリア注入による単層カーボンナノチューブの光吸収制御 (ポスター)

● 第72回応用物理学会学術講演会 2012年9月12日~9月13日 (愛媛大学)

松本大佑, 辻 大毅, 野房勇希¹, 蓬田陽平¹, 柳 和宏², 竹延大志¹, 丸本一弘 (筑波大、早稲田¹、首都大²): イオンゲルを用いた半導体カーボンナノチューブ薄膜電気二重層トランジスタの電子スピン共鳴によるマイクロ評価 (口頭)

河合将利, 五十嵐透, 客野遥, 岡崎俊也¹, 真庭 豊, 柳 和宏 (首都大、AIST¹): 単一カイラリティ (11,10) 単層カーボンナノチューブへの C60 分子の内包 (口頭)

船迫友之, 小野新平¹, 竹延大志², 柳 和宏 (首都大、電中研¹、早稲田²): 全固体型単層カーボンナノチューブエレクトロクロミック素子の開発 (口頭)

松崎怜樹, 蓬田陽平, 犬飼良太, 柳 和宏¹, 岩佐義宏², 竹延大志 (早稲田、首都大¹、東大²): インクジェット法を用いた完全塗布型オールカーボンフレキシブルトランジスタ (口頭)

工藤 光, 野房勇希, 河合英輝, 片浦弘道¹, 竹延大志², 柳 和宏 (首都大、AIST¹、早稲田²): 単一 (6,5) カイラリティ単層カーボンナノチューブ厚膜におけるイオンゲルトランジスタ (口頭)

野房勇希, 濱畑裕紀, 蓬田陽平, 柳 和宏¹, 岩佐義宏², 竹延大志 (早稲田、首都大¹、東大²): 単層カーボンナノチューブトランジスタの圧縮・引張特性 (口頭)

清水 諒, 松崎怜樹, 柳 和宏¹, 竹延大志 (早稲田、首都大¹): 単層カーボンナノチューブ膜への連続的電子ドーピング (口頭)

● 日本物理学会秋季大会 2012年9月18日~9月19日 (横浜国立大学)

田寺真¹, 客野遥¹, 中井祐介¹, 松田和之², 柳和宏¹, 真庭豊¹(首都大理工¹, 神大工²): 単層カーボンナノチューブを用いた一次元磁性体の作製 (口頭)

米森啓太¹, 柿原隆介¹, 宮尾智章¹, 石井廣義¹, 鷺谷智¹, 真庭豊¹, 柳和宏¹, 羽瀨隆文², 平山大裕², 林博和², 姜健², 岩澤英明³, 島田賢也³, 生天目博文³, 谷口雅樹³(首都大理工¹, 広島大理², 放射光科学研究セ³): 金属及び半導体カーボンナノチューブの光電子分光 II(口頭)

丸本一弘¹, 辻大毅¹, 高橋優貴¹, 松本大佑¹, 野房勇希², 蓬田陽平², 柳和宏³, 竹延大志², 岩佐義宏⁴(筑波大数物¹, 早大先進², 首都大理工³, 東大工⁴): 電気二重層トランジスタにおける高密度電荷の2次元磁気相互作用と磁性 (口頭)

河合将利¹, 柳和宏¹, 岡崎俊哉², 真庭豊¹(首都大理工¹, 産総研²): C60内包単一カイラリティ単層カーボンナノチューブにおけるラマン振動モード (口頭)

● 日本物理学会第68回年次大会 2012年3月26日~3月28日 (広島大学)

五十嵐透, 船迫友之, 長谷川凱, 小野新平¹, 柳和宏(首都大理工, 電中研¹): 電気二重層を用いたキャリア注入による単一電子構造単層カーボンナノチューブの光吸収制御

志村明彦¹, 阿部健太¹, 森田弘平¹, 柳和宏², 吉澤雅幸¹(東北大理¹, 首都大理工²): E11共鳴励起による単層カーボンナノチューブのコヒーレント振動観測

片山郁文, 佐藤健次, 田原佳祐, 南康夫, 武田淳, 柳和宏¹, 北島正弘²(横国大工, 首都大理工¹, 防衛大²): 単層カーボンナノチューブにおけるコヒーレントフォノンの共鳴効果

和田義史, 蒲江, 高木勇樹, 柳和宏¹, 竹延大志 (早大先進, 首都大東京¹): 電気二重層トランジスタにおけるイオン液体の周波数特性

丸本一弘, 高橋優貴, 松本大佑, 櫻井勇希, 野房勇希¹, 蓬田陽平¹, 柳和宏², 竹延大志¹, 岩佐義宏³(筑波大数物, 早大先進¹, 首都大理工², 東大工³): イオンゲルを用いた電気二重層トランジスタのESR研究

鈴木良輔, 米森啓太, 石井廣義, 真庭豊, 柳和宏, 羽瀨隆文¹, 平山大裕¹, 林博和¹, 姜健¹, 岩澤英明², 島田賢也², 生天目博文², 谷口雅樹²(首都大理工, 広島大理¹, 放射光科学研究セ²): CoMoCAT法で合成された極細カーボンナノチューブの光電子分光 II

国内研究会

● 平成24年度 第2回研究者交流サロン 2012年6月22日 (南大沢、首都大)

柳 和宏: エレクトロクロミックカーボン電極

● 高分子同友会 2012年6月13日 (高分子同友会) 柳 和宏: 単層カーボンナノチューブの色の電圧制御 (招待講演)

● 高次 π 空間の創発と機能開発 第 8 回公開シンポジウム 2011 年 7 月 19 日 (ホテルアローレ、金沢)

柳 和宏、中津亨 (京大): 蒸気拡散法による単層カーボンナノチューブの凝集プロセスの制御 (ポスター)

● 高次 π 空間の創発と機能開発 第 9 回公開シンポジウム 2012 年 3 月 13 日~ 3 月 14 日 (シーサイドホテル舞子ビラ神戸)

河合 英輝、長谷川 凱、中津 亨 (京大)、柳 和宏: 単一電子構造単層カーボンナノチューブ配向集合体の創製 (ポスター)

● 横浜国立大学大学院 工学研究院 グループ研究セミナー 2012 年 1 2 月 2 1 日 (横浜国立大学)

柳和宏: "単層カーボンナノチューブ内包分子複合体の光機能" (口頭, invited)

● GMSI International Workshop 2012 年 11 月 5 日 (東京大学)

Yanagi, K: "Single chirality extraction of single-wall carbon nanotubes for the encapsulation of organic molecules" (口頭, invited)

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画像素子開発について、マテリアルステージ (技術情報協会) **12** (2012) 3-6

柳和宏: "高純度単一電子構造単層カーボンナノチューブを用いた高次 π ナノ空間"、高次 π 空間の創発と機能開発 (シーエムシー出版) (2012) 187-194

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、スピニアイス磁性体 $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ において、AC 磁化測定で観測された磁気モノポール由来の現象を理論的に解明したことと、量子スピン液体状態ではなかろうか？と言われていたパイロクロア磁性体 $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$ の謎が隠れた長距離秩序として解明されるであろうという方向性を見出したことである。

1) 幾何学的フラストレーションを示す磁性体の研究

パイロクロア構造を持つ磁性体 $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 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」ことを前年度に発見した。この order parameter を解明すべく、高分解能中性子非弾性散乱実験を ILL で、中性子弾性散乱実験を ORNL と 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であることを発見した。隠れた order parameter の有力な候補は多極子秩序だろうと考えているが、 $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ の難問を解くには、現在取り組んでいる単結晶サンプルの純良化を完成させ、さらに詳しい実験を行う必要がある。

氷 (H_2O) の水素原子は、ふたつの酸素原子を結ぶ線分上にはあるものの、どちらの酸素の近くに位置するかということに関して、局所的に H_2O 分子を構成するというアイスルースが成立する以外は、ランダムな配置をとっている。氷の水素原子の配置はフラストレーションの典型例であり、そのためにゼロ点エントロピーを持つ。スピニアイス $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ は、氷における水素原子の役割を Dy^{3+} のスピンの担う系である。このスピニアイスにおける励起状態を考察すると、磁気モノポール・反磁気モノポールの対生成現象と非常によく似ていることが最近興味を集めている。

スピニアイスの磁気モノポールの考え方は簡単だが、明確な実験を行うのはなかなか難しい。そこで、磁気モノポールの典型と考え得る実験を行うべく、 $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ に [111] 方向の DC 磁場をかけ、その DC 磁場に垂直な方向の AC 磁化を測定する実験を前年度から行っている。この実験結果の解釈は簡単ではないと思われたが、大塚さんに理論的に考察して頂き、磁気モノポール（点欠陥）に注目することにより、2次元クーロンガスモデルと同等になる系では普遍的に観測される動的な性質を観測していること、すなわち磁気モノポール由来の明瞭な現象の観測をしたと結論できることが分かった。

2) 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

幾何学的にフラストレートした磁性体では、結晶構造の幾何学的特徴のために、局所的なスピンの安定配置が系全体では同時に実現できない。このためスピンの熱的な揺らぎが抑えられる低温領域において様々な特異現象が期待される。特にフラストレートした局在スピンを持つ“金属的な”フラストレート

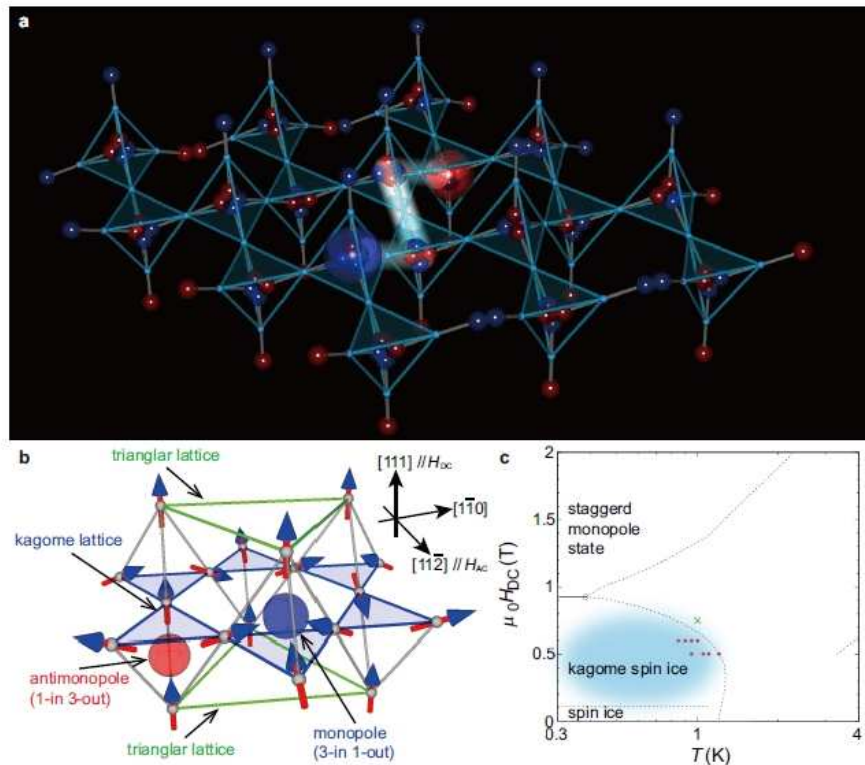


図 1: $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ に直流磁場 H_{DC} を $[111]$ 結晶軸方向に印加した時に現れるカゴメアイス状態の相図 (c) と、磁気モノポール生成 (b) と磁気モノポールが運動する (a) 様子。(b) カゴメアイス状態において、2つの隣り合う四面体で共有される1個のスピンの熱励起により反転すると、モノポール・反モノポール (赤と青の球) の対が生成される。(a) もうひとつのスピンを反転することにより正負のモノポールが、スピン反転可能な経路に沿って離れていく。十分離れた磁気モノポールは2次元クーロンガスモデルの枠内で理解可能である。

磁性体においては、従来のスピン-軌道相互作用に基づく異常ホール効果に加えて、「スピンの幾何学性」に起因する新奇な異常ホール効果の発現の可能性が議論され、注目を集めている。

我々は、この研究の流れの中で、最も基本的なフラストレート格子の「カゴメ格子」を成す Mn_3Sn という物質に着目し、スピン構造と新奇なホール効果発現の関係性について研究を始めた。この物質は Mn スピンが通常の強磁性体や反強磁性体とは異なる非平行なスピン構造をとるため、スピンの特殊な配列が電子系のベリー位相と結びついて巨大なホール効果となって現れることが期待できる。また、我々は導電性二次元三角格子反強磁性体の PdCrO_2 の単結晶を用いた中性子回折実験も行い、この系で実現する非平面型スピン構造が、ホール効果にも影響を与えることを示した。

2. 研究業績

1) 論文

T. Taniguchi, H. Kadowaki, H. Takatsu, B. Fåk, J. Ollivier, T. Yamazaki, T.J. Sato, H. Yoshizawa, Y. Shimura, T. Sakakibara, T. Hong, K. Goto, L.R. Yaraskavitch, J.B. Kycia: Long-range order and spin liquid states of polycrystalline $\text{Tb}_{2+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_{7+y}$, *Phys. Rev. B* **87** (2013) 060408(R)-(1-4).

H. Takatsu, Y. Mizuguchi, H. Izawa, O. Miura, H. Kadowaki: Bulk Superconductivity in $\text{Bi}_4\text{O}_4\text{S}_3$

Revealed by Specific Heat Measurement, *J. Phys. Soc. Jpn.* **81** (2012) 125002-(1-2).

2) 学会講演

● 日本物理学会 2012 年秋季大会 2012 年 9 月 18~ 21 日 (横浜国立大学 横浜キャンパス)

18aPSA-60 : 「パイロクロア磁性体 $Tb_{2+x}Ti_{2-x}O_{7+y}$ のスピン液体状態と長距離秩序状態」: 谷口智洋, 後藤和基, 高津浩, 門脇広明, 山崎照夫^A, 佐藤卓^A, 志村恭通^A, 榊原俊郎^A : (首都大理工, 東大物性研^A)

18pCD-8 : 「 $Dy_2Ti_2O_7$ のカゴメアイス状態におけるスピンドイナミクス」: 後藤和基, 高津浩, 大塚博己, 東中隆二, 門脇広明, 松林和幸^A, 上床美也^A : (首都大理工, 東大物性研^A)

18pCD-9 : 「二次元スピンアイスの AC 磁化率に関する理論的考察」: 大塚博己, 後藤和基, 高津浩, 門脇広明 : (首都大理工)

● 日本物理学会第 68 回年次大会 2013 年 3 月 26~ 29 日 (広島大学 東広島キャンパス)

26aPS-71 : 「スピンアイス $Dy_2Ti_2O_7$ のチャージ密度相関」: 後藤和基, 高津浩, 大塚博己, 東中隆二, 門脇広明, 松林和幸^A, 上床美也^A : (首都大理工, 東大物性研^A)

29aXA-12 : 「パイロクロア磁性体 $Tb_{2+x}Ti_{2-x}O_{7+y}$ におけるスピン液体と格子ゆらぎ」: 高津浩, 谷口智洋, 門脇広明, B. Fåk^A, J. Ollivier^B : (首都大理工, CEA^A, ILL^B)

国内研究会

● 基研研究会 「量子スピン系の物理」、京都大学 基礎物理学研究所、2012 年 11 月 12~ 14 日

PS-B4 : 「 $Dy_2Ti_2O_7$ のカゴメアイス状態における磁気モノポールとそのダイナミクス」: 後藤和基, 高津浩, 大塚博己, 東中隆二, 門脇広明, 松林和幸^A, 上床美也^A : (首都大理工, 東大物性研^A)

国際会議

● The 6-th International Conference on Highly Frustrated Magnetism 2012, McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada, June 4 – 8, 2012.

H. Kadowaki, T. Taniguchi, K. Goto, H. Takatsu, T. Yamazaki, T. J. Sato, J. W. Lynn, Y. Tabata, K. Matsuhira, L. R. Yaraskavitch, and J. B. Kycia: Spin fluctuations in the spin liquid state of $Tb_2Ti_2O_7$.

H. Takatsu, K. Matsuyama, S. Tomiyoshi, and H. Kadowaki: Anomalous Hall effect of the Kagome-lattice itinerant antiferromagnet Mn_3Sn .

ESR 物性研究室

1. 研究活動の概要

電子スピン共鳴 (ESR) 法や SQUID 磁束計を中心手段に特徴的な物性を示す系について研究を進めている。ESR には通常、市販の X-バンド (10 GHz) や Q-バンド (36 GHz) 装置が使われることが多い。これらの装置は感度が高く有用であるが、本研究室の特徴としては分子科学研究所との共同研究により 10~ 94,000 MHz にわたって周波数可変なスペクトロメーターを用い、温度、周波数、圧力をパラメーターとした電子状態の解明を目指してきた。また、圧力に関しては、静水圧と一軸変位が加えられる ESR 装置を用い、一様に、或いは任意の軸方向のみ格子定数を変えて電子間、或いは電子-格子間の相互作用を変調し、物性発現に寄与する相互作用の効果を調べている。現在は更に、産総研との共同研究により、均一で更に高い圧力が発生できる cubic anvil セルを用いた 10 GPa までの高圧下 ESR の開発を進めている。

また、物質の状態を知る方法は多くあるが、その中で、走査型探針顕微鏡 (SPM) を用いた研究も近年続けており、その結果の系統的な解析から、析出型積層構造を持つ電荷移動錯体における表面分子配向の再構成を引き起こす機構を考察した。

以下に今年度行われた研究の概要を整理する。

1) DNA

我々生物の遺伝情報をつかさどる DNA (デオキシリボ核酸) は、リン酸とデオキシリボース糖が交互に結合した高分子からなる DNA 骨格 2 本が互いに向い合い、各デオキシリボース糖に結合した核塩基 (グアニン (G)、シトシン (C)、アデニン (A)、チミン (T) の 4 種) が相補性の元となる水素結合で対をなす有機高分子である。G-C 或は A-T の塩基対のみ水素結合を作ることが可能で、それぞれ 3 本、2 本の結合により 2 重螺旋構造を構成する。この塩基対の配列は任意に設計・合成が可能であり、高い自己組織化能を併せ持つことから任意形状のナノサイズ構造物を DNA の 2 重螺旋で構成出来ることも報告されている。

一方で、人類の DNA の長さは 1m (3.1×10^9 塩基対 $\times 0.34 \times 10^9$ m/塩基対) にも及ぶことが知られているが、放射線照射などにより発生した欠陥から、かなり離れた部分に遺伝情報の異常が発生したりする事から、ソリトン伝導など、何らかの高速な情報伝達機構があるのではないかと等、その本質には未だ計り知れない神秘性が残されている。本研究グループでは、物性的には未知な部分の多い DNA について物性物理の立場からチェックしていくこと、これまでの研究から半導体であることが確認されてきた天然の DNA に電荷担体を導入し、その物性を明らかにすることを通して、ナノエレクトロニクスの素材としての可能性の検証も目的の一つとして研究を進めている。

本年度は、DNA の物性に関して、2つの点に注目して研究を進めた。一つは、Fe-DNA 中の Fe^{3+} が示す高スピン状態と低スピン状態の混在の原因の解明、もう一つは、最近報告された凍結乾燥した Zn-DNA における強相関電子スピン系の発現機構の解明である。

Fe-DNA : これまでの研究結果から、 $S = 5/2$ の高スピンと $S = 1/2$ の低スピンの共存には空気中の酸素よりも水分の存在が本質的である事が明らかになってきた。そこで、今年度は、Fe-DNA の水分量を制御する目的で、凍結乾燥法で作製した Fe-DNA の磁化率を測定した。凍結乾燥法は、Fe-DNA 水溶液を液体窒素温度で凍結し、そのまま真空中に長時間さらす事によって水分を十分に除去する方法である。凍結乾燥用の Fe-DNA 水溶液を用意するために、 FeCl_2 水溶液と DNA 水溶液を混合し、透析法により反応残留物である FeCl_2 を除去した。Fe-DNA 以外の M-DNA 水溶液は、DNA と MCl_2 水溶液に DNA

の溶解度を下げるエタノールを加えて析出させ、それをエタノールで洗浄後、水に再溶解した。しかし Fe-DNA は、一度、膜にすると水には溶解しないためエタノール析出法は適用できない。

凍結乾燥 Fe-DNA の SQUID 磁化率の結果は、 $S = 5/2$ スピンが 16 % で、残りが $S = 1/2$ であった。従来のエタノール析出法の場合は $S = 5/2$ スピンが 27 % 程度なので、凍結乾燥により Fe^{3+} の感じる結晶場が弱い高スピン状態の $S = 5/2$ スピン数が約半減しており、Fe-DNA 中の水分量が Fe^{3+} の電子状態を支配している事は再確認できた。しかし一方で、凍結乾燥しても未だ $S = 5/2$ スピンが 16 % も残留している点を十分に考察する必要がある。今後、十分に水分を含む状態からも Fe-DNA の電子状態を調べて行きたい。

Zn-DNA : エタノール析出法で Zn-DNA を作製すると、 Zn^{2+} は周囲の塩基、DNA 骨格の PO_4^- とイオン結合すると考えられている。しかし、凍結乾燥で作製すると強相関の電子スピン系が現れる、と Omerzu 等により報告された。その発現機構は、Tris-buffer から Zn-DNA に電子が移動するためとされている。しかし、報告で用いられた試料は、Zn-DNA, 多量の ZnCl_2 , Tris-buffer の混合物で、Zn-DNA は数%しか含まれていない。また、従来の結果から、Tris-buffer から電荷移動が起こることは考えにくく、凍結乾燥による水分の除去が本質的であると考えた。そこで、エタノール析出法で Zn-DNA を作成後、凍結乾燥して高純度の凍結乾燥 Zn-DNA とし、強相関電子系の再現を試みた。その結果、以下の点が明らかになった

1. 0.1 T 以下で飽和する塩基対あたり $S = 5/2$ スピン 0.3 % 程度の強磁性的磁化が現れる。
2. 強磁性的磁化に対応して強度が温度に依存しない強い ESR 信号が観測される。
3. 凍結乾燥した試料に特徴的な発泡スチロール様の構造を壊して雰囲気的水分を試料全体に導入すると、図 1 に示す様に強磁性的磁化が減少し、入れ替えに磁場に比例する常磁性が出現する。
4. 最終的に、磁場に比例する常磁性の大きさは各塩基対当り 1 つの π 電子が 300 K 程度のキュリー

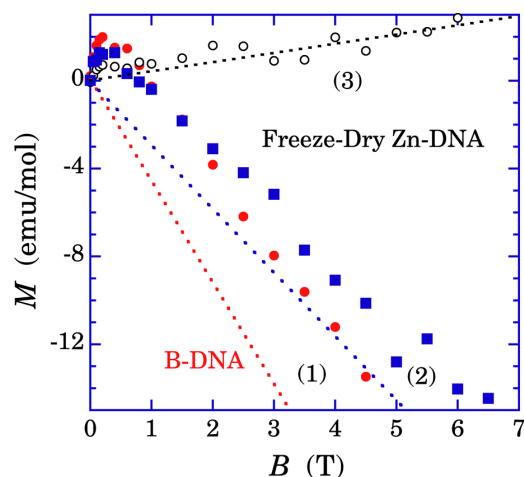


図 1: -15 度 C で凍結乾燥した Zn-DNA の 300 K における SQUID 磁化率 (1) (赤丸)。赤の破線は、サーモンの DNA の反磁性磁化率を表すが、(1) の凍結乾燥 Zn-DNA は DNA の反磁性 + 強磁性的磁化で再現できる。(2) (青四角) は、凍結乾燥試料の発泡スチロール様の構造を壊して雰囲気的水分を導入後の磁化率で、青の破線は強磁性的磁化のベースラインを表す。DNA の反磁性に常磁性的な寄与が現れ始めている。(3) (白丸) 更に発泡スチロール構造を壊した後の磁化で、ほぼ強磁性的磁化は消えかき、大きな常磁性磁化率が現れている。300 K 以下では温度にほとんど依らない。

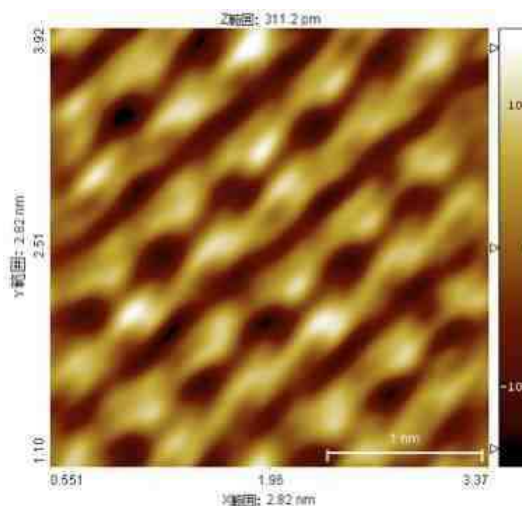


図 2: β -(BEDT-TTF) $_2$ ICl $_2$ の STM 像。明るさが高さに対応する。ドリフトは補正済み。左下から右上に伸びるイメージの帯内では表面から同じ高さに BEDT-TTF 分子が並んでいる。X 線解析による結晶内部の構造は、隣接するイメージの帯毎に高さが 0.1 nm 差がある。STM 像の明るさはノイズのためにバラツキがあるが、平均を取ると有意な差は認められない。結晶表面の BEDT-TTF 層では立体障害となる表面の I_3 分子が存在しないため、全ての BEDT-TTF 分子がほぼ同一の高さに配列して分子間の結合エネルギーを最大にしていると結論される。

ワイス温度を持つとして良く理解される。

これらの実験結果を合理的に理解するモデルとして、

- (1) 凍結乾燥により Zn の水和水が失われるため、イオン結合していた Zn^{2+} が塩基対の 2 つの窒素と直接配位結合をする、
- (2) その際に、イミンの水素が外れて奇数電子系になり、塩基対に 1 つの π 電子スピンの発生する、
- (3) それらの互いに隣接する電子スピン間の強い反強磁性的相互作用によりシングレット或は高い転移温度を持つ反強磁性状態になり、常磁性磁化率はほとんど消失する、
- (4) 凍結乾燥試料の発泡スチロール様構造が破壊されると、雰囲気中の水分が塩基対間に侵入し頻繁な出入りをするため隣接スピン間の反強磁性的相互作用が変調される。その結果、シングレット或は反強磁性的相関が弱められ、300 K 程度のキュリーワイス温度を持ち常温以下では温度に依存しない常磁性が成長する、

と結論された。なお、(1) の弱い強磁性磁化は π 電子系と DNA 中の 3d 不純物の相互作用が原因と考えられる。現在、これらの成果は論文発表準備中である。

2) β' -(BEDT-TTF) $_2$ ICl $_2$

有機電荷移動錯体 β' -(BEDT-TTF) $_2$ ICl $_2$ は常圧、22 K で反強磁性転移を起こす Mott 絶縁体であるが、8.2 GPa 以上の圧力下で有機導体としては高い転移温度 14.2 K で超伝導転移を示すことから注目されている。本研究では、常圧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 80 トン (約 8 GPa) まで信号を観測出来る様になったが、タングステン・カーバイド (WC) アンビル中の強磁性的バインダーのために、その磁氣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。今年度は、WC アンビルの磁性を避けるためにセラミックスアンビルを試行した。セラミックスをキュービックアンビルで用いた例はほとんどなく、どの圧力まで実用になるのかテストを兼ねて β' -(BEDT-TTF) $_2$ ICl $_2$ 試料と参照試料として DPPH を封入して加圧実験を行った。用意したアンビルの材質は、窒化シリコン (Si_3N_4)、ジルコニア (ZrO_2)、シリコンカーバイド (SiC) の 3 種類で、今年度は、窒化シリコンを用いた。

測定圧力は 10 ton 毎に行い、50 ton で液体窒素温度から常温までの温度依存性を測定した。その後 70 ton を経て 80 ton に上げた所、原因は不明だが信号が観測出来なくなり、窒化シリコンアンビルが壊れている事が確認された。約 50 ton までは測定は順調で、さらに圧力を上昇させた際にアンビルのあたりから異音が聞こえた。その時点で破壊が始まったとすると、約 50 ton までは耐えていたと考えられる。幾つかの反省点の中で、アンビルとスライド台の接触部分に緩衝体になる薄い銅板等を挟んでおく事によりセラミックスアンビルへの応力の集中を緩和出来たと考えられる。この点は、次のセラミックスアンビルを用いた実験時に適用し、最高圧の上昇をはかりたい。

50 ton における ESR の温度依存性を解析した所、ESR 線幅は、従来のクランプセルによる 2.5 GPa までのデータとコンシステントであった。しかし、DPPH の ESR 強度で校正した磁化率は 2.5 GPa までの延長上に乗らない事が分かった。その原因の一つとして、試料を接着剤で固めていたことが考えられる。試料と圧縮率が異なるために圧力の一様性が失われて試料が砕け、反強磁性の相関を保てる距離が短くなりキュリーワイス温度の低い常磁性磁化率に変化したと考えることで理解された。次回の実験では、この点も改善を予定している。(埼玉大、産総研 (千葉大) との共同研究)

3) STMによる表面構造と電子状態の研究

走査型トンネル顕微鏡は、単結晶の表面構造や電子状態を探る手段として有効であることは良く知られている。今年度は2つの有機電荷移動結晶に適用し、系統的に表面構造を支配する機構を示唆する結果を得た。一つは β -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ であり、もう一つは β -(EDO-TTF) $_2$ PF $_6$ である。

β -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$: これまでに α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ について詳細なデータと解析結果を報告して来たが、同素体結晶である表記物質についてSTM解析を行った。その際の注目点として、 α 体においては(BEDT-TTF)分子層を挟むカウンターイオン層のI $_3$ 分子とBEDT-TTF分子の両端にあるエチレン基の立体干渉が表面構造を決定する上で重要な役割を担っている点にある。即ち、表面BEDT-TTF分子層は接するI $_3$ 分子層を持たず、エチレン基が熱揺動で2つの安定位置を行き来している高温の金属相と、熱揺動が収まり末端エチレン基が秩序的に配列した低温の電荷秩序相の間の転移を支配するBEDT-TTF分子とI $_3$ 分子間の立体障害が存在しない。そのために高温相の温度である常温において既に、最も安定な低温相で実現しているBEDT-TTF分子間構造が表面BEDT-TTF層で実現していると結論された。一方、 β 体の結晶構造は α 体とは異なり、I $_3$ 分子との立体障害を避ける様に、交互にBEDT-TTF分子位置が大きくずれて積層している。即ち、BEDT-TTF分子間の結合エネルギーを犠牲にして実現していることを示唆する。

β 体の表面構造が結晶内部と変わらないと仮定すると、交互にBEDT-TTF分子位置がずれているため、明確な明暗を持つBEDT-TTF分子の周期的なSTM像が得られるはずである。しかし、図2に示す様に観測された像には隣接するBEDT-TTF分子の明るさにほとんど差がなかった。即ち、STM像で見える限り、表面のBEDT-TTF分子層内の分子が全て同一の高さで積層している事を示唆している。この結果は、表面のI $_3$ 分子が存在しないため、それを避ける様に交互にBEDT-TTF分子の高さをずらす必然性が失われ、BEDT-TTF分子間の結合エネルギーを最大にする様に同じ高さに表面再構成が行われたと理解出来る。

β -(EDO-TTF) $_2$ PF $_6$: 分子構造の変化を伴う電荷秩序転移を室温近辺で起こす(EDO-TTF) $_2$ PF $_6$ のSTM観察と解析を行った。この系は室温近辺に金属-絶縁体転移を持つため室温における固有抵抗が大きくSTM測定に困難が予想されたが、綺麗なユニットセルと同一の分子2枚毎の周期性を持つ像が得られ、STM像を理解する上で表面再構成は必ずしも必要では無かった。EDO-TTF分子は、 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ で見いだされた表面電荷の再構成の原因となった末端のエチレン基を分子の片側だけに持つが、EDO-TTF分子層内では交互に末端エチレン基の位置が反転しており、エチレン基の無い凹みにPF $_6$ 分子が配置する。この時に、EDO-TTF分子の中心構造のTTF骨格の位置は全ての分子でほぼ等しい高さを持つという特徴がある。即ち、EDO-TTF分子間の結合エネルギーは結晶内において取り得る最大値になっていると考えられるため、カウンターイオンの存否に係らず、表面再構成を起こす必然性が無いと結論され、観測されたSTM像と矛盾しない。

次に、STM像に結晶構造のアサインメントを試みたが、STM像を十分な精度で再現する事に成功しなかった。そこで、EDO-TTF分子の末端でHOMO分子軌道を持つ酸素と炭素原子の π 波動関数を用いてSTM像のシミュレーションを行った。その結果、表面からの距離が遠い炭素原子は核電荷が酸素よりも小さいために π 軌道の空間的広がりが酸素よりも大きい事と、 π 電子密度が炭素の方が大きい事から、結果として酸素よりも0.1 pm以上表面から離れているにも係らず、炭素の π 電子像が酸素よりも明るく観測される条件がある事が明らかになった。この結果を考慮すると、観測されたSTM像を合理的に結晶構造にアサインすることが出来た。

以上の α 体と β 体の(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ の解析結果とEDO-TTF系の結果とを勘案すると、有機の析出型の電荷移動結晶表面における再構成の主機構として、表面分子層内の結合エネルギーを最大にする

様に表面再構成が起こる、と結論された。(愛媛大学、京都大学との共同研究)

4) 低周波 ESR による電子状態の研究

昨年度完成し測定に使用できるようになった吸収曲線測定用低周波 ESR 装置を用いて、a) 有機結晶 β'' -(DODHT)₂PF₆ と b) 導電性高分子 PEDOT-PSS の ESR 測定を行い、電子状態を調べた。この装置は、1) 低周波 (< 200 MHz) なので加圧下での測定が容易、2) 微分曲線ではなく吸収曲線を直接測定するので線幅の広い信号測定に適している、3) 空芯コイルを用いるので高速度の磁場掃引が可能、などの特徴を持つ。

a) β'' -(DODHT)₂PF₆ は常圧 255 K で電荷秩序に伴う金属絶縁体転移を示し、1.3 GPa、2.3 K での超伝導転移と電荷揺らぎの関係に興味を持たれている。絶縁相から超伝導相への電子状態の変化を磁性面から調べるために、ESR 測定を続けている。今年度は常圧と 0.5 GPa において、線幅とスピン磁化率(信号強度)の温度変化を詳しく測定した。0.5 GPa では、半導体絶縁体転移が起こると報告されている 200 K 付近で、降温とともに磁化率は連続的であったが、線幅は不連続に減少した。これは、転移が電荷秩序化に起因すると考えると、秩序化に伴うスピン間の距離の広がり、交換相互作用 J よりも双極子-双極子相互作用に、より強く影響を与えることを示唆している。(茨城大との共同研究)

b) PEDOT-PSS は発光ダイオードの極板に用いられる導電性高分子であり、電気抵抗は半導体的ではあるが温度変化と絶対値は非常に小さく、乱れの多い金属と考えられる。常圧で磁化率の温度変化を調べたところ、温度減少とともに、パウリ的な振る舞いからキュリー的な振る舞いへ変化する事がわかった。これは、乱れのためにスピンが局在状態にあり、その状態のオンサイトクーロンエネルギー U よりも低温側ではフェルミ準位近傍に 1 電子占有状態ができキュリー的磁化率を与える。一方、高温側では U が熱エネルギーに消されてしまうので、パウリ的磁化率になると考えられる。これは、乱れの多い金属と考えられることと矛盾しない。(Indian Institute of Science, Bangalore との共同研究)

2. 研究業績

1) 学会講演

● 日本物理学会 第 67 回年次大会 2012 年 3 月 24 日 - 3 月 27 日 (関西学院大学)

高倉寛史, 谷口尚, 溝口憲治, 坂本浩一, 谷口弘三, 竹下直: β' -(BEDT-TTF)₂ICl₂ の電子状態の解明へ向けた高圧下 ESR 装置の開発 II (26pBK-9)

桑田翼, 坂本浩一, 溝口憲治: 凍結乾燥法で作製した Zn-DNA の電子状態 II (26pCC-13)

横矢貴秀, 臼井英正, 坂本浩一, 溝口憲治: STM による Metal-DNA の構造解析 (26pCC-14)

溝口憲治, 森英一, 生井圭一郎, 坂本浩一, 矢持秀起, 平松孝章: (EDO-TTF)₂PF₆ の STM による表面状態 (27aBK-6)

藤巻俊登, 谷口尚, 坂本浩一, 溝口憲治: 吸収曲線測定用低周波 ESR 装置の開発 III (27aCF-1)

● 日本物理学会 2012 年秋季大会 2011 年 9 月 18 日 - 9 月 21 日 (横浜国立大学)

桑田翼, 坂本浩一, 溝口憲治: 凍結乾燥法で作製した Zn-DNA の電子状態 III (20aHA-13)

高倉寛史, 溝口憲治, 坂本浩一, 谷口弘三 A, 竹下直: β' -(BEDT-TTF)₂ICl₂ の電子状態の解明へ向けた高圧下 ESR 装置の開発 III (21aEB-10)

● 日本物理学会 第 68 回年次大会 2013 年 3 月 26 日－3 月 29 日 (広島大学)

高倉寛史, 溝口憲治, 坂本浩一, 谷口弘三, 竹下直: β' -(BEDT-TTF)₂ICl₂ の電子状態の解明へ向けた高圧下 ESR 装置の開発 IV (27pXF-7)

国際会議

● Vth International Conference on Molecular Materials (MOLMAT 2012), Barcelona, Spain, July 2-6, 2012

K. Mizoguchi: The surface electronic states of α -(BEDT-TTF)₂I₃ at RT observed by STM (oral)

H. Sakamoto, T. Fujimaki, M. Hirabayashi, K. Mizoguchi, H. Nishikawa: Electronic States of a Pressure-Induced Superconductor β'' -(DODHT)₂PF₆ Studied by ESR under Pressure

H. Takakura, S. Taniguchi, K. Mizoguchi, H. Sakamoto, H. Taniguchi, N. Takeshita: ESR Study of the electronic states in β' -(BEDT-TTF)₂ICl₂ under pressure up to 10 GPa in a cubic anvil cell

● The Global Human Resource Program Bridging across Physics and Chemistry (GPPC 2012), TMU, Tokyo, Feb 8, 2013

K. Mizoguchi: Physical properties of engineering DNA (oral)

編集後記

Una golondrina no hace verano. スペイン語のことわざで「早合点は禁物」の意味です。直訳をすると「一羽のつばめは夏をなさない」となり、「夏を告げるつばめを一羽見たからと言って、もう暖かい季節だと決めつけてはいけません。まだ寒い日が戻るかもしれない」ということから転じて、「しっかりしない根拠で軽々と結論をだしてはいけません」「早合点は禁物」という教訓として使われるようになったようです。このことわざはヨーロッパでは一般的なようで、英語でも One swallow does not make a summer. という全く同じことわざがあることは後から知りました。

私は、横浜育ちで、高校は川崎にある高校、大学は9年間東工大に通っていきまして、関東に長く住んでいました。学位を取ってから14年間は、ヨーロッパで4年間過ごした以外、国内では京都大阪と関西に住んでいました。本当は、日本のどの地域にもある典型的な風景なのかもしれませんが、初夏のつばめを見ると関東の町のイメージと重なります。それは、かつて、通学の折りに、朝、バスを待っていると、商店の軒先に作った巣に颯爽と飛んでくるつばめをよく見たからだだと思います。寒さが和らいで、これから活動的な夏に向かっていく季節に、町中を縦横にスッと飛び交うつばめに清々しさを感じ、一日の活力をえた覚えがあります。そういえば、東工大のシンボルマークにもつばめが書かれており、私にとっては、つばめが関東のイメージを強くしています。ただ、調べてみると、東工大のシンボルマークのつばめはデザインとして採用されているだけで、東工大や大岡山との関連は特になさそうです。今年は、まだつばめが飛び交うのを見ていません。これはこの辺りにはあまりいないからなののでしょうか、それともまだ時期が早いのでしょうか。首都大のキャンパスは自然が豊かで緑にあふれています。きっと、直に見ることができるでしょう。

本年1月1日付けで首都大に赴任をしまして、新しい場所での新しい生活が始まりました。今までは研究所に勤めておりまして、大学の学部教育に携わることがありませんでした。とても新鮮な気分で日々を過ごしておりますが、今までとは全く異なる仕事環境に戸惑いもあります。研究所では、他分野の研究者に自分の仕事をわかりやすく説明することが要求され、そのように目指してきました。これからは、学部1年生や高校生に物理そのものの楽しさやおもしろさをわかりやすく伝えることも求められています。とてもやりがいのある仕事ですが、今までとは視点を変えて考える必要があるように思います。もっと時間をかけて取り組みたいことなのですが、不慣れなことが多く、一つ一つをあまりよく考えずにこなすことが多くなっています。早合点は禁物。気持ちに余裕を持って、paso a paso (step-by-step)、一步一步着実にあせらずこなしていきたいものです。

(慈道大介 記)

平成24年度年次報告編集委員
政井邦昭 (2012年度物理学教室主任)
青木勇二
慈道大介
大塚博巳