

## サブグループ活動状況 平成 19 年度

サブグループの活動状況を、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)



# 素粒子理論サブグループ

## 1. 研究活動の概要

### 1) ニュートリノファクトリーを使う地球内物質密度測定 (南方・内波)

高輝度のミュオン蓄積リングを使うニュートリノファクトリーはレプトン混合パラメーターの精密測定のための将来計画の第1候補である。一方、ニュートリノファクトリーは3000 km以上の長基線を使うため、このCP非保存発見能力やCP位相測定感度が地球マントル内の物質密度の不定性によって大きく変化することが指摘されてきた。粒子反粒子対称性を破る地球内物質の効果が小林・益川型位相によるCP非保存と紛らわしい効果を生じるためである。本研究においては、発想を逆転して、ニュートリノファクトリー実験自身の中で地球内の物質密度を測定してはどうか、と考えた。まず、50GeV程度のエネルギーを持つニュートリノファクトリー実験を仮定し、どの基線長に検出器をおいた場合に物質密度測定感度が最大になるかという問いを發し、この答えとして、魔法基線と呼ばれる約7000 km程度の基線長が得られた。この魔法基線に置かれた検出器はパラメーター縮退を分解するという要請からすでに考察されていたもので、従ってこの結果は非常に都合が良い。標準的な設定で $\sin^2 2\theta_{13} = 0.01$ の場合には1.3% ( $1\sigma$ )の物質密度測定精度が得られることを示した。

### 2) ニュートリノファクトリーを使う非標準的ニュートリノ相互作用の探索 (南方・内波)

高いエネルギースケールに存在する標準模型を超える新しい物理の効果としてニュートリノを含むフェルミオンの4体有効相互作用を仮定し、この効果をニュートリノ振動を使って探索する試みがここ数年世界中で行われている。上記の研究を發展させ、ニュートリノファクトリー実験において、3000 kmおよび7000 kmの二つの基線長に置かれた2検出器系を用いてこの非標準的ニュートリノ相互作用を探索する方法を提案した。ニュートリノファクトリーを用いる非標準的相互作用の探索において、この新しい相互作用の効果が(フレーバー混合を含むように拡張された)標準理論のそれと紛らわしい効果を生じ、このために混乱が生じるという問題点が指摘されてきた。(1-3)角と非標準的相互作用間の混乱の問題である。我々は、上記の2検出器系を用いてこの混乱を解くことができること、および高精度の非標準的相互作用の決定が可能であることを示した。この結果は、非標準的相互作用の探索と、ニュートリノファクトリーの本来の目的であるレプトン・フレーバー混合パラメーターの精密決定が互いに矛盾せず同時に実行できることを示した初めての研究である。(リオデジャネイロカトリック大学 布川弘志氏・Cipriano Ribeiro氏、およびサンパウロ大学 R. Zukanovich-Funchal氏との共同研究)

### 3) ニュートリノ消失モードのみを用いる質量階層性の決定 (南方)

様々なニュートリノ質量階層性の決定法が提案されているが、我々のこの方法は特定フレーバーニュートリノの消失モードのみを用いるという点でユニークである。大気ニュートリノに関係したニュートリノ振動は、精密に解析すると、実は $\Delta m_{31}^2$ と $\Delta m_{32}^2$ に関係した微妙に異なる二つの振動数から成っていることが分る。この二つの振動の重ね合わせとして、速い振動と「うなり」に相当したゆっくりした振動モードが存在する。この「うなり」に比して速い振動モードの位相が進むか遅れるかが質量階層性によって決まってくる。精密測定を可能にすると思われるメスバウアー増幅された共鳴吸収反応を使い、この原理を利用して速い振動の位相の進み・遅れを測定して質量階層性を決定する方法を提案した。また、この感度領域の評価を与

えた。(リオデジャネイロカトリック大学 布川弘志氏、フェルミ国立加速器研究所 S. J. Parke 氏、およびサンパウロ大学 R. Zukanovich-Funchal 氏との共同研究)

#### 4) 高エネルギー宇宙ニュートリノによる不活性ニュートリノの徴候 (安田)

1990年代半ばの LSND 実験の結果により示唆された4世代目の不活性ニュートリノのシナリオは、2007年に発表された MiniBooNE 実験の否定的結果により排除されたと考えられている。しかし、MiniBooNE を含むこれまでの否定的な諸実験の結果から受ける制限を全てみたとすような不活性ニュートリノのシナリオはまだ排除されている訳ではない。この研究では、活動銀河核やガンマ線バーストなどから来ると考えられている高エネルギー宇宙ニュートリノの観測において、上記の条件をみたす(3+1) - スキームと呼ばれる不活性ニュートリノのシナリオが検証できる可能性について議論した。これら宇宙ニュートリノのフレーバーの比率には理論的不定性があるが、 $\mu$  ニュートリノと  $\tau$  ニュートリノの比を議論すれば理論的不定性やエネルギー依存性に左右されずに不活性ニュートリノの徴候を見出すことが出来る可能性があることを示した。(上記課題はマドリッド自治大学のアンドレア・ドニーニ氏との共同研究)

#### 5) ニュートリノ振動確率に関する木村-高村-横枕の方法の拡張—非断熱的遷移を含む場合— (安田)

3世代の有質量ニュートリノの標準的な枠組みにおいて、一定密度の物質中での木村-高村-横枕によるニュートリノ振動確率の解析的表式は、前年度の研究で、物質効果が一般的な場合や物質密度が断熱的に変化する場合に拡張されている。今年度の研究では、特に3世代の場合に対し、木村-高村-横枕による定式化を使って有効混合角の解析的な表式を求めることにより、非断熱的遷移を含む場合にも振動確率を解析的に表せることを示した。その非自明な例として磁気モーメントを持つニュートリノが磁場中を運動する場合について議論した。この処方箋は、ハミルトニアン固有値が解析的に求まること、多重準位の非断熱的遷移が2準位の場合の積で近似的に取り扱えること、2準位の場合の非断熱的遷移のランダウ-ゼナー因子が解析的に評価出来ること等の諸条件を前提としているが、それらが満たされていれば、4世代以上の場合にも有効であると考えられる。

#### 6) 近似的 $\mu - \tau$ 対称性ニュートリノ質量行列の分類 (婦木)

ニュートリノ振動実験の結果から混合角  $\theta_{13}$  が他の混合角  $\theta_{12}$ 、 $\theta_{23}$  に比べて非常に小さく、太陽ニュートリノの質量二乗差  $\Delta m_{\odot}^2$  が大気ニュートリノの質量二乗差  $\Delta m_{atm}^2$  に比べて非常に小さい事が分かっている。この小さな混合角  $\theta_{13}$  と質量二乗差の比  $\Delta m_{\odot}^2 / \Delta m_{atm}^2$  の起源はニュートリノ質量を生成する物理を考えると興味深い。昨年度の研究で近似的  $\mu - \tau$  対称性がこの起源の候補となる事を示したが、この対称性から混合角等の値へ課される制限はニュートリノ質量行列の構造により複数に場合分けされる事を示唆していた。また、この対称性の有無を判断するためにも具体的な解析が必要であった。そこで、近似的  $\mu - \tau$  対称性からの制限を満たすニュートリノ質量行列を具体的に考え、各々の質量行列から導かれる混合角等の値の範囲を示した。また、各々の質量行列の場合に成り立つ混合角間の関係式があることを明らかにした。(東海大学 安江正樹氏との共同研究)

#### 7) 超対称性のない弦模型における NS-NS タドポール問題 (北澤)

超対称性のない弦模型においては、一般に「NS-NS タドポール」というものが存在し、それは真空からひとつの粒子が突然生成され得るということを意味する。より物理的には背景時空

や背景場が弦理論の解になっていない、すなわち、基底状態（真空状態）としてより安定な状態が存在することを意味する。真の真空に移行することは極めて困難であることが知られているが、超対称性のない弦模型を使って素粒子現象を理解するためには、この問題の解決または回避は避けられない。なぜなら、実質的な困難として、物理量（例えば質量への量子補正）が「NS-NS タドポール」の存在により発散してしまうからである。弦理論ではなく、場の理論においては、「タドポール再足し上げ」という手法で問題を回避できることが知られている。これは、偽の真空にいながら真の真空での物理量を得る手法である。弦理論においてこの手法を実行する方法を開発し提案した。この方法は、閉じた弦に関する boundary state formalism が適用できる限り、超弦理論に基づく様々な模型（現実的の物理の記述や理解をめざすものを含む）に応用できるものである。

#### 8) 弦模型におけるゲージ対称性の自発的破れ (北澤)

ゲージ対称性の自発的破れという現象は、電弱対称性の自発的破れとして実在することが知られている。場の理論に基づいた素粒子の「標準模型」においては、この現象を起こすためにだけ必要な粒子（ヒッグス粒子）を導入し、それに特殊なポテンシャルエネルギーを手で与えている。ローレンツスカラーの粒子であるヒッグス粒子に「手で」真空期待値を持たせることにより、電弱対称性の破れを起こしている。従って、電弱対称性の自発的破れは必然的に起こるという記述になっておらず、この不自然さが問題となっている。弦模型では、超対称性がなくても、質量がゼロのローレンツスカラーの粒子を導入することができ、その質量に対する量子補正量子補正いかんによっては、ゲージ対称性の自発的破れが引き起こされる可能性がある。そこで、開弦の自由度からのローレンツスカラーの粒子（Dブレーン上の開弦からのスカラー粒子）を分類し、その質量やポテンシャルの新しい計算法を開発した。質量などの物理量を計算する方法は以前から知られていたが、経験を要する非常に面倒なものであった。新しい方法の特徴は、boundary state formalism を使用して開弦から閉弦の描像は移ることにより、実際の計算を容易にするものである。また、自ら開発した NS-NS タドポールの再足し上げの方法を直接に適用することができるものである。この計算法を適用することにより、これまで抽象的、定性的に行われてきた電弱対称性の自発的破れが自然に起きる弦模型の構成を具体的に試みることができる。

#### 9) 弦模型における自然なインフレーションの機構 (北澤)

弦理論におけるDブレーンという物体がある場合、非常に特殊な設定をしなくても、自動的に宇宙のインフレーションが起きる可能性を見つけた。考察は弦理論においてではなく、その低エネルギー有効理論である超重力理論において行った。Dブレーンが存在する特定の系においては、ディラトン場といわれるスカラー場が指数関数のポテンシャルエネルギーを持つ。ディラトン場の真空期待値の宇宙論的發展を追ってみると、宇宙初期にゼロから出発して、指数関数の「ポテンシャルエネルギーの壁」を上りつめ、そしてまた転がり下りてくるという解がある。指数関数の「ポテンシャルエネルギーの壁」を上りつめたときに、このポテンシャルエネルギーが宇宙のエネルギーを支配し、したがって、指数関数的な膨張（インフレーション）が引き起こされる。この可能性を機構を本当のインフレーションに応用できるかどうかはこれからの課題である。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 氏との共同研究で、まだ進行中のものである。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

N. Cipriano Ribeiro, H. Minakata, H. Nunokawa, S. Uchinami, and R. Zukanovich Funchal: Probing Nonstandard Neutrino Interactions with Neutrino Factories, *Journal of High Energy Physics*, **12** (2007) 002-1-46.

E. Fernandez-Martinez, M. B. Gavela, J. Lopez-Pavon and O. Yasuda: CP-Violation from Non-Unitary Leptonic Mixing, *Physics Letters B* **649** (2007) 427-435.

K. Fuki and M. Yasue: Two categories of approximately mu - tau symmetric neutrino mass textures, *Nuclear Physics* **B783** (2007) 31-56.

N. Kitazawa: Tadpole Resummations in String Theory, *Physics Letters* **B660** (2008) 415-421.

H. Minakata and S. Uchinami: *In situ* Determination of Earth Matter Density in a Neutrino Factory, *Physical Review D* **75** (2007) 073013-1-12.

H. Minakata, H. Nunokawa, S. J. Parke, and R. Zukanovich Funchal: Determination of the Neutrino Mass Hierarchy via the Phase of the Disappearance Oscillation Probability with a Monochromatic  $\bar{\nu}_e$  Source, *Physical Review D* **76** (2007) 053004-1-14.

H. Sugiyama and O. Yasuda: A Formula for the sensitivity to  $\sin^2 2\theta_{13}$  in reactor experiments with a spectral analysis, *International Journal of Modern Physics* **A22** (2007) 3407-3428.

### 2) 国際会議報告

K. Inoue and H. Minakata: Neutrino Physics around MeV Energies, *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements* **168** (2007) 389-394.

H. Minakata: Neutrinos; Looking Forward to the Future, *International Journal of Modern Physics E*, **16** (2007) 1313-1329.

H. Minakata: Measuring Earth Matter Density and Testing the MSW Theory, in \*Venice 2007, Neutrino telescopes\* 163-178.

H. Minakata: Looking for Leptonic CP Violation with Neutrinos, *Acta Physica Polonica B* **39** (2) 283-294.

O. Yasuda: New Physics Effects in Long Baseline Experiments, *Acta Physica Polonica B* **38** (2007) 3381-3388.

M. Chiba, O. Yasuda *et al.*, Measurement Of Attenuation Length For Radio Wave In Natural Rock Salt And Performance Of Detecting Ultra High-Energy Neutrinos, *Journal of Physics, Conference Series* **81** (2007) 012003-1-7.

P. Hernandez, C.W. Walter, and O. Yasuda: Summary of Working Group One, *AIP Conference Proceedings* **981** (2008) 135-138

A. Donini, P. Huber, S. Pascoli, W. Winter, and O. Yasuda: Physics and performance evaluation group, *AIP Conference Proceedings* **981** (2008) 43-45

### 3) 将来計画の実験計画書

A. Bandyopadhyay et al. (94 authors including N. Kitazawa and O. Yasuda), Physics at a future Neutrino Factory and super-beam facility, e-Print: arXiv:0710.4947 [hep-ph], Oct 2007.

### 4) 学会講演

#### 国際会議

International Workshop on Double Beta Decay and Neutrinos,  
Osaka, Japan, June 11-13, 2007

H. Minakata: What Can Double Beta Decay Experiments Do? (Invited talk)

9th International Workshop on the Neutrino Factories, Superbeams, and Beta Beams,  
Okayama University, Okayama, August 6-11, 2007

O. Yasuda: Summary of WG1 (Theoretical Part) (Invited talk)

13th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics  
Moscow State University, Moscow, Russia, August 23-29, 2007

N. Cipriano Ribeiro, T. Kajita, P. Ko, H. Minakata, S. Nakayama, H. Nunokawa: Non-Standard Neutrino Physics Probed by Tokai-to-Kamioka-Korea Two-Detector Complex (Invited talk)

XXX Mazurian Lakes Conference on Physics, Piaski, Poland, September 2-9, 2007

H. Minakata: Looking for Leptonic CP Violation with Neutrinos (Invited talk)

31st International Conference on Theoretical Physics, Ustron, Poland, September 5-11, 2007

O. Yasuda: New physics effects in long baseline experiments (Invited talk)

Fourth International Conference on Flavor Physics (ICFP2007)  
Beijing, China, September 24-28, 2007

H. Minakata: Long Baseline Neutrino Experiments with Two-Detector Setup (Invited talk)

3rd International Workshop on a Far Detector in Korea for the J-PARC Neutrino Beam  
Tokyo, Japan, Sep. 30-Oct. 1 2007

N. Cipriano Ribeiro, T. Kajita, P. Ko, H. Minakata, S. Nakayama, H. Nunokawa: Probing Nonstandard Neutrino Physics at T2KK (Invited talk)

Workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors 2007 (NNN07)  
Hamamatsu, Japan, October 2 - 5, 2007

H. Minakata: Prospects of Supernova Neutrino Observation by Large Detectors

INO-KEK Meeting, 高エネルギー加速器研究機構, つくば市, November 27, 2007

O. Yasuda: Neutrino Phenomenology (Invited talk)

5) 学会誌等

南方久和：ニュートリノの質量 数理科学 No. 533 (2007) 42-46.

6) 編著書等

O. Yasuda, C. Ohmori, and N. Mondal (ed.): *NEUTRINO FACTORIES, SUPERBEAMS AND BETABEAMS*, Proceedings of the 9th International Workshop on Neutrino Factories, Superbeams, and Betabeams - NuFact 07, (408 pages), AIP Conference Proceedings Volume 981, American Institute of Physics, February 2008.

# 高エネルギー理論サブグループ

## 1. 研究活動の概要

Our research during the year 2007 was concentrated on two scientific projects. The first project is devoted to physical applications of the perturbative low-energy effective action of compactified type-II superstrings and M-theory to early cosmology and inflationary Universe. That research was financially supported by the JSPS grant (Kiban C) 18540283 during the year 2007, which was the second year of the project. Another research project was devoted to formal studies of new field-theoretical models in the non-anti-commutative supersymmetric field theory. That research was done jointly in collaboration with the German team of Professor Olaf Lechtenfeld at Leibniz University in Hannover, Germany. This research project was financially supported in 2007 by the joint German-Japanese research grant from the JSPS (= Japanese Society for Promotion of Science) and the DFG (= Deutsche Forschungsgemeinschaft). It was the second (and last) year of our joint research. This research project is now successfully finished.

### 1) コンパクト化されたタイプ II 型超弦理論とM理論の低エネルギー有効理論

We proposed a new mechanism of geometrical inflation for a very early Universe, which is based on the known quantum corrections to the Einstein gravity, originating from superstrings theory and M-theory. The leading quantum corrections are of the fourth-order in the spacetime curvature, while their detailed (full curvature, or on-shell) structure in four spacetime dimensions is given by square of the Bel-Robinson tensor. We derived the generalized Friedmann equation with higher derivatives, in the Context the FRW cosmology, and found that it has an inflationary (de Sitter) exact solution. The inflationary scenario we proposed is completely geometrical, it does not require a new scalar particle (inflaton) or a scalar potential, though achieving the realistic number of e-foldings for inflation still remains a problem. The outstanding problem of quantum ambiguities in the definition of the off-shell gravitational effective action for superstrings was constrained by imposing the scale factor duality. The quantum ambiguities arise due to a possible presence of arbitrary Ricci-tensor dependent terms in the off-shell gravitational action, while fixing those terms is crucial in superstring cosmology. We find that the quartic (full) curvature terms, given by the Bel-Robinson tensor squared, are ruled out by duality, thus giving the evidence for the necessity of extra quartic (Ricci tensor-dependent) terms in the off-shell superstring effective action. Our methods are generalizable to higher orders in the spacetime curvature.

### 2) 非可換超対称場の理論

We constructed the  $N=1/2$  supergravity with generic matter couplings in four dimensions for the first time. It may serve as the theoretical framework for a unification of all elementary particles within the ‘most minimal’ supergravity theory with merely  $N=1/2$  local supersymmetry. The  $N=1/2$  supergravity with matter was constructed by using the  $N=2$  superconformal tensor calculus. Our results imply the existence of even more general couplings allowed by local  $N=1/2$  supersymmetry. T. Hatanaka successfully defended his PhD Thesis ‘ $N=1/2$  Supersymmetry and Supergravity in Four Euclidean Dimensions’ at TMU, and got a doctor degree in Physics from TMU.

## 2. 研究業績

### 1) 論文

T. Hatanaka and S.V. Ketov: N=1/2 supergravity with matter in four Euclidean dimensions, *Nucl.Phys.* **B794** (2008) 495-511.

M. Irisawa, Y. Kobayashi and S. Sasaki: Drinfel'd twisted superconformal algebra and structure of unbroken symmetries, *Prog. Theor. Phys.* **118**, (2007) 83-96.

### 国際会議 (Invited talks)

JPS meeting, Sapporo, Japan, 21–24 September 2007

S.V. Ketov: On the superstring-generated gravitational equations of motion (plenary talk)

International Workshop ‘Progress of String Theory and Quantum Field Theory’, Osaka, Japan, 7–10 December

S.V. Ketov: On the quartic curvature gravity in the context of FRW cosmology

German-Japanese Workshop ‘Strings, Non-commutativity and All That’, Hannover, Germany, 3–5 January 2008

S.V. Ketov: Geometrical inflation driven by superstrings-induced quartic curvature terms

German-Japanese Workshop ‘Strings, Non-commutativity and All That’, Hannover, Germany, 3–5 January 2008

T. Hatanaka: N=1/2 supergravity with matter in four Euclidean dimensions

German-Japanese Workshop ‘Strings, Non-commutativity and All That’, Hannover, Germany, 3–5 January 2008

M. Iihoshi: Conformally flat FRW metrics and their physical applications

# 原子核理論サブグループ

## 1. 研究活動の概要

### 1) 重い原子核における強度関数のゆらぎ

原子核の巨大共鳴領域の強度関数は、大局的な性質は集団的な励起である巨大共鳴の特徴に支配されると考えられ、一方(エネルギーについて)局所的なゆらぎは、量子非可積分系の示すユニバーサルな特徴を反映すると予想される。実験で見られる巨大共鳴領域の強度関数の特徴は、両極端のエネルギー・スケールでこれら両者を併せ持つが、その中間のスケールでは、「戸口状態」と呼ばれる簡単な配位に強く依存する。我々は、鉛(Pb)原子核の四重極共鳴領域における強度関数の計算を行い、軽い原子核であるカルシウム(Ca)の計算と比較した。その結果、前者で明確に見られた「戸口状態」の効果は重い原子核である鉛では明瞭に現れないことを見いだした。この原因として、高いエネルギー順位密度や状態間の強い結合との関係を考察した。

### 2) 極低温原子気体の静的・動的性質の研究

トラップで閉じこめられた極低温原子気体の性質は、有限な量子多体系として原子核との共通性が多い。当研究室ではとくにボソンやフェルミオンの種々の混合気体の特徴を、基底状態の種々の相や安定性、粒子間相関と集団励起、分子形成などに注目して研究している。

#### a) 捕獲された極低温原子気体系における超変形効果と分子形成の理論的研究

捕獲された極低温原子気体系における超変形効果と分子形成を理論的に研究した。調和振動子ポテンシャルに捕獲された極低温原子気体は、その捕獲ポテンシャルを異方的に変形させていくと、3次元的な気体から擬低次元的な気体への移り変わりを見せる。そこでは、徐々に量子気体の基底状態が移り変わっていき、それに伴って、系の集団運動や原子・分子の化学平衡状態の様相も変化していく。本研究では、その様相の移り変わりを平均場近似に基づく手法で定量的に解析して明らかにした。

#### b) ボソン・フェルミオン(BF)混合原子気体系におけるP波-超流動状態と相分離

昨年引き続き、偏極したBF混合原子気体系において、ボソンのポゴリューボフ音波を交換することによりフェルミオン間に引力が生じ、フェルミ系のp波超流動が実現する可能性を検討した。BF間に引力が働く場合は、系の引力崩壊と、また斥力の場合は系の相分離との競合関係が存在する。我々は、斥力が非常に強い場合には、相分離に対して超流動相が安定化することを見いだした。これは、相分離が実現した段階では相互作用がほぼ効かなくなるのに対し、超流動相では斥力の強度とともにフェルミ原子間の有効引力がより効いてくる事による。超流動相におけるギャップおよび、準粒子励起の分散関係を調べ、p波超流動としての特徴をあらゆる観測量について議論を行い、論文として出版した。

#### d) 大散乱長領域におけるボーズ・フェルミ混合原子気体の不安定性と対形成の理論

散乱長を実験的に変化するフェッシュバハ共鳴の技術が、ボーズ・フェルミ混合原子気体の系に適応され始めたのを受けて、散乱長が大きな状況下での、系の不安定性と対形成を議論した。混合系における不安定性は以前から理論、実験的にも議論されていたことであるが、以前の研究では、散乱長が非常に大きくなる領域については考えられていなかった。本研究では大散乱長領域まで考察できる理論を構築し、さらにそれをボーズ粒子とフェルミ粒子の対形成

の議論にも用いる事で、系の基底状態についての包括的な理解を目指した。年度の後半からはフランスのIPN研究所の多体論の専門家であるシュック教授と直接の共同作業を進めている。

#### e) 光学格子中におけるダイポール相互作用とd波超流動

クロム原子のダイポールの大きさに注目が集まって以来、ダイポール相互作用がもたらす効果についての研究が多く現れている。ダイポール相互作用は長距離力であり、有機超伝導体においてクーロン力の長距離成分が非従来型の超伝導状態をもたらしたことを鑑みると、ダイポール相互作用が原子気体系にこの種の超流動状態をもたらすことが期待される。本研究ではレーザーによって作られる二次元の光学格子上での超流動状態について、各部分波ごとに展開する方法を用い、非従来型、ここではd波超流動状態が現れうるかについて議論した。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

K.Suzuki, T.Miyakawa and T.Suzuki:

p-Wave superfluid and phase separation in atomic Bose-Fermi mixtures

*Phys.Rev.A* **77** (2008) 043629

### 2) 学会講演

日本物理学会「2007年春期大会」 2007年3月25-28日(首都大学東京)

相場浩和、松尾正之、西崎滋、鈴木徹：巨大共鳴の強度関数のゆらぎと戸口状態の性質

鈴野浩大、鈴木徹：ウェーブレットを用いた強度関数の分析

日本物理学会「2007年春期大会」 2007年3月18-21日(鹿児島大学)

鈴木和典、宮川貴彦、鈴木徹：斥力ボース・フェルミ混合気体系におけるP波クーパー対形成と相分離

渡辺隆之、鈴木徹：ユニタリティリミット近傍におけるボース・フェルミ混合原子気体の不安定性

細野一彦、鈴木徹：ボース・フェルミ(BF)混合原子気体中のBF対形成下における運動量分布

西村拓史、丸山智幸：変形捕獲ポテンシャル中の極低温2成分原子気体の理論的研究

日本物理学会「第62回年次大会」 2007年9月21-24日(北海道大学)

相場浩和、松尾正之、西崎滋、鈴木徹：巨大共鳴の強度関数におけるゆらぎの特徴と各種指標との関係

渡辺隆之：ダイポール格子中におけるs波、d波超流動

西村拓史：変形捕獲ポテンシャル中の極低温原子分子混在気体の理論的研究

国際会議

Bose Einstein Condensation in dilute atomic gases and in condensed matter  
Jan.28-30,2008 ( EPFL, Swiss )

T. Watanabe: Bose-Fermi pair Correlations in Attractively Interacting Bose-Fermi Atomic Mixtures

# 宇宙物理理論サブグループ

## 1. 研究活動の概要

宇宙理論サブグループでは、高エネルギー天体現象、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、様々な天体を対象に理論的研究を進めている。以下は、2007年度に行った主な研究の概要である。

### 1) 銀河団の進化と超熱的粒子

2005-2006年度のコア半径分布の研究で示唆した、銀河団の合体が放射冷却の抑制に関わっている可能性を理論的に裏付けるため、合体に伴う粒子の加熱・加速過程について研究を行った。銀河団-小規模銀河団（銀河群）衝突では、小規模銀河団のガス温度が低く、相互作用が密度の低い周縁部で起こるので粒子は高エネルギーまで加速されやすいが、そのような非熱的粒子は熱的粒子と殆ど相互作用せず、また、周縁部であるためコアの熱的状態に及ぼす影響は小さいと考えられる。一方、同じくらいの規模の銀河団-銀河団衝突では、ガス温度が比較的高いため発生する衝撃波が弱く1次の粒子加速は期待できないが、緩やかな2次の加速が起きる可能性がある：衝撃波が伝播した後不規則な磁場が残され、それによって熱的粒子が散乱・加速されうる。加速された粒子は熱的粒子と相互作用して一部は準熱的分布を形成し、非熱的粒子は殆ど生成されない。ガスの熱的状態への影響という観点からは、このような加速の方が重要である。銀河団ガスの典型的温度は4-5 keVで、準静水圧平衡の下で放射冷却しているとすれば、中心部のガスは $\sim 1-2$  keVである。 $\sim 1$  keVのガスで2次の粒子加速が起きると、熱的-準熱的粒子相互作用によって非平衡放射となり、4-5 keVの“熱的”放射のように見える。この非平衡状態では、平衡にある熱的放射に比べ著しく放射冷却率が小さく、銀河団ガスの実際の放射冷却時間スケールは、観測で平衡を仮定して得た温度・密度から推定されるものより長い可能性がある。

### 2) 超新星残骸衝撃波による粒子加速・加熱

超新星残骸の高分解能観測やPICシミュレーションによる微視的過程の研究の進展によって、衝撃波による粒子加速の理解は急速に進みつつある。また、GLASTによって、EGRETソースの検証が進むことが期待される。このような状況を背景として、超新星残骸の力学的進化、衝撃波の構造、無衝突衝撃波の物理過程と古典的な拡散的描像との対応などについて、問題点の整理、見直しを始めた。衝撃波加速では、準熱的粒子の生成は小さく相対論的領域まで粒子が加速されることが期待される。実際、 $\sim$ GHzの電波シェルが普遍的に見られることは、ほぼ普遍的に $\sim$ GeV電子が生成されていることを示している。しかし一方で、多くのシェル型超新星残骸では熱的な放射成分が支配的である。準熱的粒子群はe-foldingスペクトルで、そのエネルギー領域はいわゆる injection エネルギー域に当たり、熱的粒子と相互作用する一方で、非熱的粒子生成の種となることを意味している。したがって、衝撃波加速においても、熱的粒子+非熱的粒子という2元的描像や単純な thermal leakage 描像は適切でなく、熱化プロセスも含めた粒子スペクトル形成の素過程の理解が、粒子加速の定量的な解明につながると考えられる。

### 3) 中高温銀河間ガスの検出可能性

宇宙に存在するバリオンの総量は宇宙背景放射の非等方性の観測や、ビッグバン元素合成の理論などにより精度よく評価することができる。しかし、現在、それらのバリオンの全てが観測されているわけではなく、星や銀河団中の高温ガスとして観測されているバリオンの量は、推定されている総量の半分以下でしかない。残りのバリオンの多くは中高温のガスとして銀河間に存在していると考えられている。計画中のX線天文衛星 DIOS などによる検出可能性、観測からどのようなことを知ることが出来るのか議論をした。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

T. Akahori, K. Masai: Core structure of Intracluster Gas: Effects of Radiative Cooling on Core Sizes, *Heating versus Cooling in Galaxies and Clusters of Galaxies*, ESO Astrophysics Symposia, Springer-Verlag, (2007) 39-41.

K. Masai: Suprathermal Electrons in Hot Interstellar/Intracluster Media, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **169** (2007) 41-44.

E. Miyata, J. P. Hughes, M. Kokubun, F. S. Porter, K. Masai, Suzaku Team: Suzaku Observation of the CNO Emission Lines from the Cygnus Loop, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **169**, (2007) 92-96.

V. A. Dogiel, K. Masai, C. M. Ko, P. Kuo, C. Hwang, W. Ip: Continuum and Line Emissions from the Galactic Ridge and Clusters: Problems of Interpretation and Ways of Solution, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **169** (2007) 131-135.

H. Kawahara, Y. Suto, T. Kitayama, S. Sasaki, M. Shimizu, E. Rasia, and K. Dolag: Radial profile and log-normal fluctuations of intra-cluster medium as an origin of systematic bias of spectroscopic temperature, *Astrophys. J.* **659** (2007) 257-266.

H. Kawahara, T. Kitayama, S. Sasaki, and Y. Suto: Systematic Errors in the Hubble Constant Measurement from the Sunyaev-Zel'dovich effect, *Astrophys. J.* **674** (2008) 11-21.

K. Sato, K. Matsushita, Y. Ishisaki, N. Y. Yamasaki, M. Ishida, S. Sasaki, and T. Ohashi: Suzaku Observations of AWM 7 Cluster of Galaxies: Temperature, Abundance and Bulk Motions, *Publ. Astron. Soc. Japan* **60** (2008) S333-S342

### 2) 学会講演

日本天文学会 2007 年春季年会, 2007 年 3 月 28 日-30 日 (東海大学)

赤堀卓也, 太田直美, 政井邦昭:  $\beta$  モデルに基づいた中心ガス/質量比の放射冷却による熱的進化

赤堀卓也: 小規模銀河群捕捉の流体シミュレーションに向けた SPH コードの最適化 II

日本物理学会 2007 年春季大会, 2007 年 3 月 25 日-28 日 (首都大学東京)

政井邦昭: シンポジウム「すざく衛星の拓く高エネルギー宇宙物理学」X線によるプラズマ診断

ワークショップ・研究会

マクロでマイクロな銀河団, 2007 年 10 月 24-26 日 (山形市)

政井邦昭: 銀河団ガスの熱的構造と超熱的粒子

高エネルギー天体現象と粒子加速理論 2007, 2007 年 12 月 21-23 日 (大阪大学)

政井邦昭: 超新星残骸の進化と熱的・非熱的現象

# 非線形物理サブグループ

## 1. 研究活動の概要

### 1) 多次元量子系における動的トンネル効果と動的局在

カオスの発生する非可積分系には、完全可積分系には存在しない非可積分系固有の量子現象が多くある。ランダム系のアンダーソン局在に類似した「動的局在現象」は位相空間上で起こる波動関数の局在現象であり、カオス系固有の量子効果としてよく知られる。一方、古典力学的に遷移の禁止された領域の間で起こるトンネル効果は「動的トンネル効果」と呼ばれるが、これも、系にカオスが内在することを反映して通常のトンネル効果とは多くの点で異なった性質をもつ。こういったカオス系固有の量子効果は、これまで、それぞれについての研究は盛んに行われたが、相互の関連についての踏み込んだ議論はあまりされなかった。われわれは、「両生固有状態」と呼ばれる非可積分系の新しい固有状態の発見に触発され、動的局在とカオス的トンネル効果との間の関係の詳しい解析を続けている。今年度は、2次元系（具体的に解析したのは結合した撃力振動子系）における動的トンネル効果を、時間領域・エネルギー領域双方について調べ、カオス領域の動的局在の効果が弱くなることによる（規則領域からカオス領域への）トンネル確率の異常増大を確認した。この事実は、前年度行った雑音印加による動的局在効果の無効化によるトンネル確率の増大と矛盾のない結果である。

### 2) KAM トーラスの複素拡張と自然境界

動的トンネル効果の解析には、よく知られたインスタント法をはじめ複素 WKB 理論が有効である。近年の研究により、カオスの関与するトンネル効果（カオス的トンネル効果）については、ジュリア集合と呼ばれる、複素位相空間内の自己相似状の軌道群が重要であることが明らかになってきた。しかしながら、この事実が厳密なレベルで確立されたのは、カオスが理想カオス系においてのみであり、本来、非可積分系のトンネル現象が問題になるトーラス・カオス混合系については多くの点で未解決である。ここでは、複素空間上に解析接続された可積分成分（複素 KAM 曲線）とジュリア集合との関係を明らかにするために、トーラスとカオスの境界が比較的単純になる 2次元保測写像を用いて、複素 KAM トーラス構成の計算アルゴリズムを開発し、実面上のトーラス・カオスの境界と複素 KAM トーラスの収束限界（自然境界）との関係を調べた。

### 3) 双曲空間上の剛体粒子モデルの局所秩序構造とガラスの動力学

過冷却液体を急冷していくと、非常に長い緩和時間を持ったガラス状態となる。過冷却状態やガラス状態は準安定な状態であり、結晶のような長距離の秩序構造を持たない。そのため、局所的な秩序構造が時間的にも空間的にも間欠的に、不均一に変化する「動的不均一性」と呼ばれる現象があらわれる。このような現象は、過冷却液体だけでなくコロイド分散系などの様々な系で見られることが、実験とシミュレーションで確かめられている。ここでは、動的不均一性を発生し、遅い緩和過程を引き起こすためのミニマムな条件を探るべく、2次元の双曲空間上の剛体粒子のモデルの研究を開始した。負曲率面上においては平面のもっていた並進対称性が失われるため、局所的な格子構造は保持しつつも長距離秩序を保つことができなくなる。結果、ランダムネスを手で入れることなく、系にフラストレーションを内在させることが可能になり、条件次第では動力学にフラストレーション解消に伴う遅い遷移運動を発生させることができる。定負曲率面上での一粒子問題は、カオスのプロトタイプとしてよく知られており、ガラスの動力学理論と力学系理論との橋渡しとしてもっとも相応しいモデルと考えられ、今後も研究を進めるつもりである。

#### 4) 量子写像における全の anholonomy 達の研究

周期的なパラメータ依存を持つ Hamiltonian に対し、その固有状態を始状態としてパラメータを断熱的に一周期分変化させたときの時間発展は、断熱定理のため、動力学的な位相を被った上で始状態に戻ると素朴には予想される。実は、これに加えて、幾何学的位相 (Berry 位相) が生じることが良く知られている。一方、全の anholonomy (Cheon 1998) を持つ系では、パラメータに対して周期的な依存性を持つ Hamiltonian の固有値 (固有エネルギー) が、そのパラメータの周期性に従わない。このため、固有値の縮退が無い (つまり、Wilczek-Zee の幾何学的位相が発現し得ない) 場合においてすら、上述と同様の時間発展では、驚くべきことに、始状態と終状態は直交する。全の anholonomy は、幾何学的位相とは異なり、微分幾何学的でのホロノミーとしての解釈が確立していない一方、全の anholonomy はパラメータに対して周期的な依存性を持つ系 (ハミルトニアン) の物理の理論的根幹を危ういものにする: 例えば、エネルギーバンドの波数依存性や、断熱ポテンシャル面の核の配位に関する一価性は、通例は疑問にすらならないが、全の anholonomy はこれらを壊してしまう。しかし、既知の、全の anholonomy を持つ系は、特異性を持つ potential と波動関数の非自明な接続条件を要求するため、実現が疑われる例のみであった。2006 年度に引き続き、これらを調べた。

特に、本年度は、階数一の摂動下での量子写像の、Hilbert 空間が有限次元の場合における、全の anholonomy の完全な解析を示した。これは、摂動における巡回性の有無と縮退固有値の関係、および、Hilbert 空間の簡約化の解析を含む。以上は宮本博士 (早大理工) との共同研究である。さらに、より一般の量子写像での解析を、全教授 (高知工科大) との共同研究で進めている。

#### 5) anholonomic 断熱量子計算の研究

全の anholonomy 達の量子状態制御への応用の一例として、田中と宮本は、全の anholonomy 達に沿った断熱量子計算である、anholonomic 断熱量子計算を提案した (2007)。断熱量子計算は、準備の容易な量子状態から出発して、断熱的な時間発展により、解くべき問題の解が埋め込まれた量子状態を得る計算手続である (Farhi ら 2000)。我々の提案の核心は、断熱経路の設計において全の anholonomy 達を利用することにある。既存の断熱量子計算との違いは、計算を律速する固有値の gap を調節する parameter が導入できることである。

本年度は、anholonomic 断熱量子計算について、Grover の検索問題での性能を調べた。この結果、計算速度と、計算量論的な複雑さの間に相補的な関係を示唆した。これは、根本准教授 (国立情報学研) との共同研究である。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

A. Ishikawa, A. Tanaka and A. Shudo: Quantum suppression of chaotic tunneling, *J. Phys. A: Math. Theor.* **40** (2007) F397–F405.

A. Shudo, Y. Ishii and K.S. Ikeda: Chaos Attracts Tunneling Trajectories: A Universal Mechanism of Chaotic tunneling, *Europhys. Lett.* **81** (2008) 50003 (5 pages)

A. Shudo: Virtual Turning Points and New Stokes Curves in Stokes Geometry of Quantum Hénon map, *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*, **10** (2007) 41–50

T. Onishi, A. Shudo and K.S. Ikeda: Trajectory descriptions of ionization processes in laser fields, *Progress in Ultrafast Intense Laser Science III* (Springer, 2008) 33–52.

M. Miyamoto and A. Tanaka: Cheon's anholonomies in Floquet operators, *Phys. Rev. A* **76** (2007) 042115 (9 pages)

A. Tanaka and M. Miyamoto: Quasienergy anholonomy and its application to adiabatic quantum state manipulation, *Phys. Rev. Lett.* **98** (2007) 160407-1–160407-4

## 2) 国際会議報告

A. Shudo: A Role of Virtual Turning Points and New Stokes Curves in Stokes Geometry of the Quantum Hénon Map, in *Algebraic analysis of differential equations — from microlocal analysis to exponential asymptotics — Festschrift in Honor of Takahiro KAWAI*, Eds. T. Aoki, H. Majima, Y. Takei, N. Tose (Springer, 2007) 251–264.

T. Aoki, N. Honda, T. Kawai, T. Koike, S. Sasaki, A. Shudo and Y. Takei: Virtual turning points — A gift of microlocal analysis to the exact WKB analysis —, in *Algebraic analysis of differential equations — from microlocal analysis to exponential asymptotics — Festschrift in Honor of Takahiro KAWAI*, Eds. T. Aoki, H. Majima, Y. Takei, N. Tose (Springer, 2007) 29–43.

A. Akaishi and A. Shudo: Algebraic correlations of hard spheres in a rectangular box, AIP Conference Proceedings, **982** (2008) 744–747.

## 3) 学会講演

日本物理学会 2007 年春季大会 2007 年 3 月 18 日–21 日 (鹿児島大学)

赤石暁, 奥島輝昭 (立命館理工), 首藤啓: 多体ビリヤードの bouncing wall orbit

田中篤司, 宮本学 (早大理工): 全の anholonomy を用いた断熱量子計算

宮本学 (早大理工), 田中篤司: 量子写像系における全の anholonomy

日本物理学会第 62 回年次大会 2007 年 9 月 21 日–24 日 (北海道大学)

赤石暁, 首藤啓: 2 次元区分線形写像の不安定周期軌道と長時間相関

石川明幸, 田中篤司, 首藤啓: 2 自由度系での Delocalization によるカオスのトンネル効果の回復

## 国内研究会

ENCOUNTER with MATHEMATICS — 数学との遭遇, 中央大学, 2007 年 5 月 18 日–19 日

首藤啓: 量子カオスの諸問題と半古典ゼータ関数 (2 lectures)

分子研研究会「分子科学における連成シミュレーションの基礎理論と応用」, 分子科学研究所, 2007 年 8 月 29 日–30 日

赤石暁, 首藤啓: 長時間相関のある 2 次元区分線形写像の不安定周期軌道

「ハミルトン系とその周辺」小研究会, 岐阜大学, 2007 年 11 月 1 日–2 日

首藤啓: カオスのトンネル効果の基本仮説と未解決問題

分子研研究会「スーパーコンピュータワークショップ 2008」, 分子科学研究所, 2008年2月18日-19日

赤石暁, 首藤啓: 長時間相関のある2次元区分線形写像の不安定周期軌道

#### 国際会議

8th Japan-Slovenia Seminar on Nonlinear Dynamics, Maribor, Slovenia, July 2-6, 2007

A. Shudo: Quantum Suppression of Chaotic Tunneling

9th Japan-Slovenia Seminar on Nonlinear Science,  
Osaka City University, Osaka, Japan, Nov. 12-14, 2007

A. Shudo: Exact WKB analysis for the multilevel non-adiabatic transition problem

A. Akaishi and A. Shudo: Stickiness for the 2-dimensional piecewise linear map

A. Ishikawa, A. Tanaka and A. Shudo: Flooding of wavefunctions in two-dimensional coupled rotors

A. Tanaka and M. Miyamoto: Cheon's quasienergy and eigenspace anholonomies in quantum maps

International Workshop on Complex Systems,  
Sendai International Center, Sendai, Japan, Sep. 25-28 2007

A. Akaishi and A. Shudo: Algebraic correlations of hard spheres in a rectangular box

TMU/SNU Joint Seminar on Nano-Science and Related Topics, Tokyo Metropolitan University,  
Tokyo, Japan, Feb. 4-5, 2008

A. Shudo: Ergodic problems and slow relaxation in many dimensional Hamiltonian systems

A. Akaishi and A. Shudo: Slow dynamics on the hyperbolic plane: as a study on the glass dynamics

A. Ishikawa, A. Tanaka and A. Shudo: Suppression of Tunneling Effect due to Dynamical Localization

# 凝縮系理論サブグループ

## 1. 研究活動の概要

本サブグループは、凝縮系物理の理論的研究を行っている。2006年度をもって、酒井治が定年退職し、2007年度後期より、堀田貴嗣が加わった。2007年度における研究活動の概要は次の通りである。

### 1) 立方対称性をもつ2次元スピン系の相転移

2次元古典スピン系の相転移について多くの研究がなされているが、本研究ではその中で、立方対称性を持つモデルを考えた。具体的には、取り得るスピンの向きが立方体の6つの面心方向のみとなるような強磁性系の6状態のモデルを扱い、6状態立方モデルと呼ぶことにする。これは Heisenberg モデルの離散モデルとして考えることもできる。比較的簡単なモデルであるが、これまで調べられてこなかった。ここでは、モンテカルロ法のクラスターフリップを用いた方法でこのモデルの相転移を調べ、有限サイズスケーリングの観点から臨界現象を論じた。6状態立方モデルの持つ対称性に注目し、対称性と universality class の関係について調べた。具体的には、6状態立方モデルと同様の対称性をもつモデルとして4状態 Potts モデルとの類似性に着目して、universality class について議論した。本研究で初めて6状態立方モデルに関する臨界指数などを求めることができた。得られた臨界指数、スケーリング関数などは、4状態 Potts モデルのものと非常に近いが、同じ universality class に属するかの断定的な結論には至っていない。[岡部]

### 2) 画像領域分割問題へのモンテカルロ法の応用

統計力学分野での画像処理は確率的画像処理と呼ばれ、本格的な研究が行われ始めたのはごく最近のことである。従来モンテカルロ法などの確率的手法は実際的な計算効率がよくないとの理由で余りとりあげられてこなかったが、最近のモンテカルロ法の手法的な発展を応用すれば新しい展開が期待される。具体例として、画像領域分割 (image segmentation) をとりあげた。画像領域分割とは画像を幾つかの領域に分割することをいうが、単に画像を分割するだけではなく、画像から対象物の輪郭を取り出し、閉曲線により領域を分割、抽出することを含めて画像領域分割と呼ぶ。本研究では、Mumford-Shah エネルギーモデルに基づき画像領域分割の問題を考察した。画像の各ピクセルごとの強度を表す関数  $u(r)$  を与えたとき、Mumford-Shah エネルギーは、強度のヒストグラムに関連する項と領域のスムーズさを表す項の和で表され、問題は領域の境界  $C$  を変化させたときのエネルギー最小化問題となる。この表式による画像領域分割は、ノイズに強く、ロバスト性にすぐれているのが特徴であるが、具体的に最小の  $E(C)$  を探すことは決して容易ではない。エネルギーモデルの解法には決定論的な数値解法など様々な手法が提案されているが、どれも、時間がかかる、局所解につかまる、などという問題を抱えている。本研究では、このエネルギーモデルを Ising モデル等のスピンモデルと同様のものとして捉え、モンテカルロ法によって最小解を探し出す手法を提案した。コントロールパラメータに関するシミュレーテッド・アニーリングの適用、ブロックスピン変換のアイデアの応用など、多くの計算手法上の工夫をすることにより、効率よく画像領域分割を実現することに成功した。具体的に、腫瘍のある脳の MRI 画像の腫瘍部分の抽出などの応用を示した。[岡部]

### 3) 1次元ボーズ・フェルミ混合系のモット状態および局在状態

磁気光学トラップにより閉じ込められた原子系に関し、とくにボーズ・フェルミ混合系を中心として理論解析を進めた。光学格子の存在下で1次元領域に閉じ込めた場合のモット状態に関し、数値シミュレーションにより幅広いパラメータ領域で探った。これにより、単一種の原子が発現するモット状態とは異なる新たなふるまいが見られた。

さらに、ランダムネスが存在する場合の一次元ボーズ・フェルミ混合系について解析した。フェルミ系はランダムネスの存在下で全原子が局在するが、ボーズ系は斥力相互作用によって超流動状態が保たれることが知られている。両者を混合することにより、それぞれの状態にどのような変化が起きるのかを数値シミュレーションを用いて観測した。その結果、フェルミ系は非局在化する一方、ボーズ系は超流動密度が上昇することが明らかになった。またその物理的背景についても詳細な吟味を行った。[森]

### 4) メビウスの帯状物質における電子状態

メビウスの帯状物質が発見されたことにより、トポロジカル物質が現実味を帯びてきた。通常のリングと異なり、メビウスの帯という空間形状においては、電子の振る舞いにコヒーレントな特徴が出るのではと期待されていた。これを背景に、強い相関をもつ電子がメビウスの帯状物質上でどのような挙動を観測するために、コメンシュレートなフィリングによるモット状態を考え、その安定性を相互作用の関数としてシミュレーションにより解析した。

その結果、粒子数の偶奇により、メビウスの帯の長さ方向の相互作用により安定化されるモット状態が、幅方向の相互作用により不安定になることがあることが明らかになった。さらに不純物を加えた際のデコヒーレンスも見出された。[森]

### 5) 逆スピホール効果による電流生成の理論

交換相互作用とスピン軌道相互作用は、共に電気伝導と磁化との間の相互変換であるため、スピン軌道相互作用を用いれば、電流を流すことでスピンの流れ(スピン流)を発生し、結果として磁化を発生することが可能である(スピホール効果)。一方、交換相互作用は磁化からスピン流や電流という電子の流れを生じるはたらきがある)。これらを組み合わせると磁化から発生したスピン流をスピン軌道相互作用を用いて電流に変換することが期待される。これは逆スピホール効果とよべる現象で、磁場をかけるだけで電圧を全くかけずに電流が取り出せることになる。これはスピン電池ともいえる磁気エネルギーを電氣的エネルギーに変換する新しいメカニズムである。

この効果を半導体のRashbaスピン軌道相互作用の場合に解析した。その結果、強磁性磁化(任意の空間配置と時間依存を持つとする)をRashba系につけると、その磁化の運動から同じ周波数成分の電流が発生することがわかった。この電流は磁氣的なエネルギーを電氣的なエネルギーに変換したもので、さまざまな応用が期待できる。[多々良、大江順一郎(金研)]

### 6) スピン移行トルクに対するスピン軌道相互作用の影響と量子補正

ハードディスク等の比較的大規模な磁気記憶媒体において、情報の書き込みは外部磁場により磁性体中の磁化を反転させることで行っている。しかしながら高密度化により、磁性体が小さくなると情報の書き込みに必要な外部磁場は急激に増大してしまう。また外部磁場の発生装置の必要性もあるため、小型化を目指す際に不利である。このように従来の方法では限界が予想されるため新しい手法を用いての情報の書き込みが求められている。従来の方法に変わる手段

として、注目を集めている1つのメカニズムがスピン偏極電流のもつスピン移行トルク効果である。この効果に対して Rashba 型スピン軌道相互作用の与える影響と不純物散乱に伴う電子の干渉効果により引き起こされる弱局在の効果の解析を行った。[多々良]

#### 7) 多極子相の NMR と超微細相互作用

核スピン共鳴 (NMR) は物質の構成原子の核上の磁場や電気四極子場を直接的に見ることの出来る手段である。我々は、隠れた秩序変数として知られる高次多極子の NMR による同定手法に関する理論研究を継続的に進めている。最近、スクッテルダイト  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  の秩序相につき、四極子相というこれまでの予想に反して、恒等表現型の高次多極子秩序を仮定したモデルによって NMR の実験結果が解釈できることを指摘してきた。本年度は、磁場強度などのより広いパラメータ領域で実験とモデル解析の定量的一致を示すことが出来た。また、 $\text{Ce}_{1-x}\text{La}_x\text{B}_6$  について、La 置換によるランダム効果を考慮した NMR 解析を行い、提案されている八極子モデルと整合する結果を得た。[椎名、酒井 (物材機構)、斯波 (東工大)]

#### 8) 八極子による弾性中性子散乱の理論

磁性体における中性子散乱では、通常、磁気双極子が主要な寄与を与えるが、実験結果には必ず高次補正が含まれており、それが価電子の軌道自由度に関する情報を担っている。我々は、高次多極子の観測手法に関連して、八極子秩序状態における中性子散乱断面積の解析を進めており、具体例として  $\text{Ce}_{1-x}\text{La}_x\text{B}_6$  と  $\text{NpO}_2$  の磁気形状因子の定量計算を行っている。特に、これまで八極子は中性子散乱では観測不能とされてきたが、短波長中性子線を用いることで有意な強度が得られることを理論的に示してきた。現在、上記物質において、磁場による長波長領域での強度増強と波数異方性を調べている。また、本年度は、形状因子の多極子展開としての一般的な定式化を行い、各種多極子の型に依存した波数依存などを明らかにした。[椎名、酒井 (物材機構)、斯波 (東工大)]

#### 9) 電子フォノン系の近藤効果

最近、充填スクッテルダイト化合物やクラスレート化合物、パイロクロア酸化物のように、ゲストイオンを内包する比較的軽い元素から成るカゴ状構造をもつ物質において、ラットリング (非調和性局所フォノン) の重要性が指摘されている。特に、ラットリングと電子自由度の複合化による重い電子形成の可能性に興味を持たれている。そこでまず、非調和性をもたない局所的な光学フォノンと結合する伝導電子系の近藤効果を詳しく調べた。具体的には、ホルスタインアンダーソンモデルを数値繰り込み群法によって解析し、スピン磁化率、電荷感受率、エントロピー、比熱を計算した。電子格子相互作用  $g$  が増加すると、近藤温度  $T_K$  は増大するが、これは、クーロン相互作用  $U$  がフォノン媒介の電子間引力  $U_{\text{ph}}$  によって弱められるからである。そして、 $U = U_{\text{ph}}$  では、局所電子状態は 4 重縮退を持ち、 $T_K$  は最大となる。さらに  $g$  を大きくして  $U < U_{\text{ph}}$  になると、 $g$  の増加とともに  $T_K$  は減りはじめる。つまり、 $U$  が  $U_{\text{ph}}$  によって殆ど打ち消されるあたりで近藤効果は顕著に強められることになる。この現象は、分子性ナノクラスターや有機量子ドット系における近藤効果の増強の原因として考えられることを指摘した。今後、重い電子形成と非調和性の関連を明らかにする必要がある。[堀田]

#### 10) 重希土類充填スクッテルダイト化合物の多極子状態

充填スクッテルダイト構造を舞台にした  $f$  電子系化合物、特に、複数の  $f$  電子をもつ希土類イオンを含む化合物の特異な磁性や超伝導の研究が進展した。これまで、Pr から Sm までの軽希

土類の場合に、 $j$ - $j$  結合描像に基づく多極子物性の微視的理論研究を展開してきたが、さらに7つの  $f$  軌道を考慮して、重希土類化合物の多極子状態を明らかにした。具体的には、7軌道アンダーソンモデルを数値繰り込み群法によって解析し、重希土類原子を含む充填スクッテルダイト化合物の多極子物性を調べた。このとき、ランク7までの  $f$  電子のすべての多極子感受率を計算し、線形応答理論に基づいて最適な多極子状態を決定した。Gdの場合、教科書的なLS結合描像から単純に期待されるものとは異なり、メインの双極子モーメントに加えて、四極子モーメントの影響が現れる。Hoの場合には、八極子モーメントに支配されるエキゾチック磁性状態を見出した。TbとTmに対しては、低温では顕著な多極子モーメントは期待されないが、Dy、Er、Ybの場合には、双極子やより高次の磁気多極子モーメントが支配的になることを明らかにした。[堀田]

#### 11) 三体相互作用を持つクロックスピン模型の場の理論的考察

アルカラッツらにより考案された三体相互作用を持つ三角格子上クロックスピン模型の解析の場の理論と数値計算を組み合わせることで定量的に行っている。この系は状態数が4以上の場合、低温秩序相と高温無秩序相との間に、臨界的中間相を持つことが予想されていた。我々はベクトル双対サインゴルドン場の理論によりこの系の取り扱いが可能であることを既に示しているが、本年度は更に系の持つ2つの相転移点近傍での性質を詳しく議論した。くりこみ群解析から相転移は共にBKT的な連続転移であることが分かるが、その取り扱いにはBKT転移の場合と同様、マージナルカップリングの適切な取り扱いが重要となる。我々はまず転移点近傍での主要な演算子のくりこまれたスケール次元をワンループまでの摂動計算より求め、低エネルギー励起の性質を明らかにした。またその結果を下に転移点を決定する為の準位交差条件を与えた。更に、励起レベル間に成り立つ幾つかの普遍な関係式を演算子積展開係数を用いて見出した。これらの解析は所謂レベルスペクトロスコピーと呼ばれる手法をベクトル双対サインゴルドン模型に対しても適用できるよう拡張したことに対応するが、実際状態数6の場合に転送行列の固有値解析を厳密対角化法を用いて行うことにより、その有効性も確かめている。[大塚、野村清英 (九大)]

## 2. 研究業績

### 1) 論文

Jun-ichiro Ohe, Akihito Takeuchi and Gen Tatara: Charge current driven by spin dynamics in disordered Rashba spin-orbit system, Phys. Rev. Lett. **99** (2007) 266603-1-4.

G. Tatara, H. Kohno and J. Shibata: Theory of Domain Wall Dynamics under Current, J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) 031003-1-14.

Gen Tatara, Hiroshi Kohno, Junya Shibata, Yann Lemaho and Kyung-Jin Lee: Spin Torque and Force due to Current for General Spin Textures, J. Phys. Soc. Jpn. **76** (2007) 054707-1-13.

R. Shiina, O. Sakai and H. Shiba: Magnetic Form Factor of Elastic Neutron Scattering Expected for Octupolar Phases of  $Ce_{1-x}La_xB_6$  and  $NpO_2$ , J. Phys. Soc. Jpn. **76** (2007) 094702-1-11.

O. Sakai, R. Shiina and H. Shiba: Analysis of Hyperfine Interactions in NMR Studies of Pr Skutterudites, J. Phys. Chem. Sol. **68** (2007) 2084-2086.

A. Masaki, S. Tsukada and H. Mori: Mott Plateau in Trapped Bose-Fermi Mixture, J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) 054301-1-3.

Takashi Hotta: Enhanced Kondo Effect in an Electron System Dynamically Coupled with Local Optical Phonon, J. Phys. Soc. Jpn. **76** (2007) 084702-1-8.

Takashi Hotta: Multipole State of Heavy Lanthanide Filled Skutterudites, J. Phys. Soc. Jpn. **76** (2007) 083705-1-5.

Takashi Hotta: Multipoles in  $\delta$ -Pu, J. of Alloys Compd. **444-445** (2007) 162-167.

Takashi Hotta: Exotic Kondo effects in electron-phonon systems, Physica B **403** (2008) 1371-1372.

H. Otsuka: Effective Field Theory of Triangular-Lattice Three-Spin Interaction Model, J. Phys. Soc. Jpn. **76** (2007) 073002-1-4.

## 2) 学会講演

日本物理学会 2007 年春季大会 2007 年 3 月 18 日 ~ 3 月 21 日 (鹿児島大学)

高山利彦、岡部豊: ランダムカイラル Villain モデルの双対性とモンテカルロシミュレーション

森弘之: 1 次元領域に閉じ込められた Bose-Fermi 混合系

椎名亮輔、酒井治、斯波弘行:  $Ce_{1-x}La_xB_6$  と  $NpO_2$  における八重極モーメントによる中性子弾性散乱の理論

小幡一智、多々良源: Rashba 系における spin torque 効果

佐藤克幸、多々良源: スピントルクの量子補正

竹内祥人、多々良源: スピンダイナミクスによる電流生成

大石龍哉、酒井治: 量子ドットの近藤効果に対する有限バイアス効果

堀田貴嗣: 電子フォノン系の近藤効果

大塚博巳、野村清英: 三体相互作用を持つ三角格子上  $Z_p$  スピンモデルの解析 III

日本物理学会 2007 年第 62 回年次大会 2007 年 9 月 21 日 ~ 9 月 24 日 (北海道大学)

渡辺博史、岡部豊: 画像領域分割とモンテカルロ法

安田建、岡部豊、川島直輝: cubic 対称性をもつ 2 次元スピン系の相転移

森弘之: Bose-Fermi 混合系のモット絶縁体状態

小幡一智、多々良源: 電流駆動磁化ダイナミクスのスピン軌道相互作用補正

佐藤克幸、多々良源: スピントルクの量子補正 II

竹内祥人、多々良源: スピンダイナミクスによる電流生成 II

堀田貴嗣: 重希土類充填スクッテルライト化合物の多極子状態

大塚博巳、野村清英: 三体相互作用を持つ三角格子上  $Z_p$  スピン模型の解析 IV

第 31 回日本応用磁気学会 2007 年 9 月 11 日 ~ 9 月 14 日 (学習院大学)

小幡一智、多々良源: スピントルク効果のスピン軌道相互作用補正

佐藤克幸、多々良源: スピントルク効果の量子補正

東大物性研究所短期研究会「計算物性物理の進展」 2007 年 11 月 1 日 ~ 11 月 2 日

岡部豊、渡辺博史: スピンモデルと画像領域分割

第 45 回茅コンファレンス 2007 年 8 月 19 日 ~ 8 月 22 日 (信州松代ロイヤルホテル)

多々良源: スピンと電流磁気効果 (invited)

小幡一智: 電流誘起磁化反転のスピン軌道相互作用補正 (ポスター)

佐藤克幸: スピントルク効果の量子補正 (ポスター)

「ラットリング振動が誘起する新物性」研究会 2008 年 3 月 27 日 ~ 3 月 29 日 (広島大学)

堀田貴嗣: 局所フォノンによる近藤効果

### 国際会議

International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications (ISAMMA)  
Hotel Shilla, Jeju Island, Korea, May 28-June 1, 2007

Gen Tatara: Microscopic theory of current-induced magnetization dynamics (invited)

Dynamical Phenomena in NEMS & Nanoelectronics  
Daejeon, Korea, August 9-10, 2007

Gen Tatara: Microscopic theory of current-induced domain wall dynamics (invited)

Euroscience Foundation projects “Fundamental of Nanoelectronics”  
Naples, Italy, December 10-13, 2007

Gen Tatara: Novel magneto-electric effects : Current-driven magnetization dynamics and inverse spin Hall effect (invited)

3rd Indo-Japan Conference on Ferroics and Multiferroics (DST-JSPS Program)  
Kolkata, India, February 4-6, 2008

Gen Tatara: Novel magneto-electric effect: Current-induced domain wall motion and inverse spin Hall effect (invited)

International Conference on “New Quantum Phenomena in Skutterudite and Related Systems”  
Kobe, Japan, September 26-20, 2007

Takashi Hotta: Multipole expansion of  $f$ -electron spin-charge density in filled skutterudites (contributed talk)

R. Shiina, O. Sakai, and H. Shiba: Theory of Elastic Neutron Scattering by Ordered Magnetic Octupoles in  $f$ -Electron Systems (poster)

International Symposium on Strongly Correlated Electron Systems  
Houston, U. S. A., 13-18 May 2007

Takashi Hotta: Exotic Kondo effects in electron-phonon systems (poster)

NSFC-JSPS Joint Conference on Novel Quantum Phenomena in  
Strongly Correlated Electron Systems  
Renmin University, Beijing, P. R. China, June 25-29, 2007

Takashi Hotta: Multipoles in  $f$ -electron systems (invited talk)

Heavy Fermion Frontier workshop in honor of Joe D. Thompson’s 60th birthday  
Santa Fe, U. S. A., November 11-14, 2007

Takashi Hotta: Multipoles in  $f$ -electron systems (invited talk)

The 23rd International Conference on Statistical Physics (STATPHYS23)  
Genova, Italy, July 9-13, 2007

H. Otsuka: A New Transfer-Matrix Calculation Approach to Classical Spin Systems in Two Dimension

The 10th Asia Pacific Physics Conference (APPC10)  
Pohang, Korea, August 21-24, 2007

H. Otsuka and Y. Okabe: Crossover of Criticality in Three-State Potts Antiferromagnet with Staggered Polarization Field

物理・化学大学院 GP による日韓ワークショップ  
首都大学東京, 2008年2月4日～5日

Hiroshi WATANABE: Image segmentation and Monte Carlo simulation with Mumford-Shah energy model

Shuuichi IKEDA: Numerical analysis of 1D Bose-Fermi mixtures

Kazuhiro HOSONO: Perturbation theory of charge current driven by magnetization dynamics in metal

Katsunori OBATA: Current-induced domain wall motion in Rashba spin-orbit system

### 3) 学会誌等

誌上セミナー（連載）「スピントロニクス理論の基礎」

多々良源、河野浩、柴田絢也: 固体物理 48 (2008) 131-143.

### 4) 著書等

森弘之、五味壮平、藤原進、米沢富美子 共訳

「自己組織化と進化の論理」スチュアート・カウフマン（ちくま学芸文庫）

# 高エネルギー実験サブグループ

## 1. 研究活動の概要

高エネルギー実験サブグループでは、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、原子炉を用いたニュートリノ振動実験、宇宙から飛来する高エネルギーのニュートリノ検出実験などの幅広い物理実験を展開している。

### 1) 衝突型加速器実験

粒子加速器によって、電子・陽電子などの素粒子を高エネルギーに加速して衝突させる実験である。日常には存在しない重い素粒子の生成、さらには理論的に予言されているが未だに発見されていない新粒子の探索などの研究が行なわれている。

#### $B$ ファクトリー実験 ( Belle )

KEK-B 加速器は昨年度よりルミノシティの向上を目指して、Crab Cavity を導入して運転を継続している。残念ながら、今の所は期待したルミノシティの増加は得られていないが、今後の machine study の進み具合で大きく増加する可能性は残されている。積分ルミノシティも  $710 fb^{-1}$  から  $810 fb^{-1}$  へと増加した。これで 2009 年度には未曾有の  $1 ab^{-1}$  の実現が夢ではなくなってきた。

今年度の物理解析で得られた成果としては、Nature 誌にも掲載されたが、これまで中性  $B$  中間子が  $K$  中間子 +  $\pi$  中間子に崩壊する事象で観測されていた CP 非対称性が、荷電  $B$  中間子でも発見されたことが挙げられる。これは標準モデルを超える物理による効果の可能性もあり、大きな注目を浴びている。また、 $Z(4430)$  と呼ばれる新しい粒子の発見があった。これは  $B$  中間子が  $K$  中間子 +  $Z(4430)$  に崩壊し、 $Z(4430)$  が更に  $\psi'$  粒子 +  $\pi$  中間子に崩壊する現象を捉えて発見された。この  $Z(4430)$  は電荷を持って居り、 $c$  クォークと反  $c$  クォーク対で出来たチャームニウム粒子とは異なり、4 個のクォークで構成される新奇の粒子である可能性が高く、その性質の解明が急がれている。

一方、2010 年から始まる KEK-B 加速器の性能向上に呼応して、Belle 検出器の性能改善のための開発研究を進めている。特に本研究室では将来の粒子識別装置として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の開発を KEK、名古屋大、千葉大、リュブリアナ大学などと協力して進めている。この検出器に使用する新型の高性能光センサーとして、HAPD (ハイブリッド・アヴァランシェフォト・ダイオード) と呼ばれる高性能の光検出器を浜松ホトニクス社と共同開発している。この HAPD からの信号読み出しには、ASIC を用いた電子回路の開発が必要で、本研究室がその開発を担当している。この ASIC もほぼ期待通りの性能が確認されており、2008 年 2 月に行われた HAPD と ASIC を組み合わせたテスト実験で、見事にリングイメージが観測された。

今年度は 27 編の欧文雑誌への投稿論文、55 編の国際会議への contribution 論文が出版された。

### 2) ニュートリノ観測実験

#### Double-Chooz 実験

ニュートリノ振動実験パラメータ  $\theta_{13}$  角を測定するために、フランスの Chooz 原子力発電所を用いたニュートリノ振動実験グループ Double-Chooz に参加している。

当研究室は新潟大学・東北大学・神戸大学・東京工業大学などと協力して、Double-Chooz 実験でニュートリノ反応を検出するために最も重要となる、約 800 本の光電子増倍管の設置を担当することになった。特に光電子増倍管の受け入れ及びそれらの性能評価システムを構築するという重要な役割を担うことになり、今年度その評価システムを完成させた。評価項目は、 $1 \times 10^7$  のゲインを得るための高電圧値、単光

電子事象に対する P/V 値、バックグランド計数、検出率の一様性、などである。2008 年 5 月から PMT を受け取り、それらの評価を行った後に、2008 年 11 月から PMT の設置が始まる。

#### 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崩壊事象 ( $0\nu\beta\beta$ ) が観測されるはずである。この  $0\nu\beta\beta$  事象を、ドリフトチェンバー (DC) を利用して観測することを目指している DCBA 実験グループ (KEK、静岡大などとの共同実験) に参加した。

これまでに 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、 $^{207}\text{Bi}$  の崩壊で生成された電子のエネルギー分布を測定している。当研究室ではこのデータの解析を進めている。一方、より高いエネルギー分解能を目指して超伝導電磁石を用いた、より大型の DCBA-T3 検出器の製作が始まっており、2008 年度の完成を目指している。

#### 岩塩を用いた超高エネルギーニュートリノ観測のための基礎研究

宇宙から飛来する超高エネルギーニュートリノ ( $> 10^{16}\text{eV}$ ) のうち超高エネルギー宇宙線と宇宙背景輻射との衝突で生成する GZK ニュートリノは存在が確実視されているが、飛来数は非常に稀なため、検出するためには 50Gton (体積  $3\text{km} \times 3\text{km} \times 3\text{km}$ ) の巨大質量の検出器が必要となる。これまで行ってきた天然岩塩鉱中でのニュートリノ反応で惹起した電磁シャワーによって発生した干渉チェレンコフ電波 (アスカラヤン効果) を捉える方法の研究に加えて、レーダー法によるニュートリノ検出の研究を行なった。

電波に対する低損失の岩塩電波減衰長を封鎖型摂動空洞共振器法で測定した。封鎖用キャップへ圧力を掛けてキャップと試料両端への密着性を高めたところ各岩塩試料の測定値のバラツキを五分の一へ減少させることに成功した。レーダー法においてはアスカラヤン法検出器の建設費の大半を占めるアンテナ挿入用ポアホールなしでパルスレーダー波をニュートリノ反応生成電磁シャワーへ照射し、その反射波を測定する能動的方法の可能性を追求した。

KEK-PF-AR の放射光と同時にマイクロ波を岩塩試料へ照射を行ったところ、マイクロ波の反射波が観測された。天然岩塩鉱に適用すると、10MHz の 1GW パルスレーダーでは  $10^{19}\text{eV}$  においては探索距離が 3km に達する。存在が確実視されている GZK ニュートリノが比較的簡単な装置で年間約 10 個の検出可能性が示された。

#### 3) 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  $\alpha^7$  と  $\alpha^8$  の高次 QED 過程の検証を目的とした、ポジトロニウムの稀崩壊現象のデータ取得を行った。2, 3 ガンマ線のエネルギー和の条件を加えたデータ解析により 5 光子消滅過程のバックグランドが減少した。さらに sphericity 等の条件を加える必要がある。。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

Study of a proximity focusing RICH with a silica aerogel radiator.

I. Adachi *et al.* 2007. 4pp. Nucl.Instrum.Meth. A581: 415-418, 2007.

A study of proximity focusing RICH with aerogel radiator.

I. Adachi *et al.* 2007. 4pp. Nucl.Instrum.Meth. A580: 1042-1045, 2007.

Proximity focusing RICH with TOF capabilities.

S. Korpar *et al.* 2007. 2pp. Nucl.Instrum.Meth. A572: 432-433, 2007.

A novel type of proximity focusing RICH counter with multiple refractive index aerogel radiator.  
S. Korpar *et al.* 2007. 3pp. Nucl. Instrum. Meth. A572: 429-431, 2007.

Gain of a gas photomultiplier with CsI photocathode.

H. Sakurai, F. Tokanai, S. Gunji, T. Sumiyoshi, Y. Fujita, T. Okada, H. Sugiyama, Y. Ohishi, T. Atsumi

2007. 5pp. J. Phys. Conf. Ser.65: 012020, 2007.

Evaluation of a capillary plate gas detector filled with  $Ne + CF_4$  and  $Ar + CF_4$  gas mixture.

F. Tokanai, H. Sakurai, S. Gunji, T. Sumiyoshi, H. Sugiyama, Y. Fujita, T. Atsumi, Y. Ohishi, T. Okada, S. Kishimoto

Nucl. Instrum. Meth. A581: 236-240, 2007

Observation of  $D_{s1}(2536)^+ \rightarrow D^+\pi^-K^+$  and angular decomposition of  $D_{s1}(2536)^+ \rightarrow D^{*+}K_S^0$ .

By Belle Collaboration (V. Balagura *et al.*). Sep 2007. 16pp. Phys. Rev. D77: 032001, 2008.

Observation of  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-J/\psi$  via initial state radiation at Belle.

By Belle Collaboration (C.Z. Yuan *et al.*). Sep 2007. 9pp. Phys. Rev. D77: 011105, 2008.

Observation of  $\psi(4415) \rightarrow D\bar{D}_2^*(2460)$  decay using initial-state radiation.

By Belle Collaboration (G. Pakhlova *et al.*). Aug 2007. 6pp. Phys. Rev. Lett. 100: 062001, 2008.

Search for lepton flavor violating tau decays into three leptons.

By Belle Collaboration (K. Abe *et al.*). Aug 2007. 12pp. Phys. Lett. B660: 154-160, 2008.

Search for  $\bar{B}^0 \rightarrow \Lambda_c^+\bar{\Lambda}_c^-$  decay at Belle.

By Belle Collaboration (K. Abe *et al.*). Aug 2007. 12pp. Phys. Rev. D77: 051101, 2008.

Measurement of the near-threshold  $e^+e^- \rightarrow D\bar{D}$  cross section using initial-state radiation.

By Belle Collaboration (G. Pakhlova *et al.*). Oct 2007. 5pp. Phys. Rev. D77: 011103, 2008.

Search for the CP-violating decays  $\Upsilon(4S)B0\bar{B}0J/K0_S + J/\psi(\eta_c)K0_S$ .

O. Tajima *et al.* Jul 2007. 5pp. Phys. Rev. Lett. 99: 211601, 2007

Observation of Two Resonant Structures in  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\psi(2S)$  via Initial State Radiation at Belle.

By Belle Collaboration (X.L. Wang *et al.*). Jul 2007. 10pp. Phys. Rev. Lett. 99: 142002, 2007.

Observation of a new  $D_{sJ}$  meson in  $B^+ \rightarrow \bar{D}^0D^0K^+$  decays.

By Belle Collaboration (J. Brodzicka *et al.*). Jul 2007. 7pp. Phys. Rev. Lett. 100: 092001, 2008.

Measurements of exclusive  $B_s^0$  decays at the  $\Upsilon(5S)$  resonance.

A. Drutskoy *et al.* Jul 1, 2007. 9pp. Phys. Rev. D76: 012002, 2007.

Measurement of  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-J/\psi$  cross-section via initial state radiation at Belle.

By Belle Collaboration (C.Z. Yuan *et al.*). Jul 2007. 11pp. Phys. Rev. Lett. 99: 182004, 2007

Search for  $B \rightarrow h^{(*)}\nu\bar{\nu}$  decays at Belle.

By BELLE Collaboration (K.-F. Chen *et al.*). Jul 2007. 6pp. Phys. Rev. Lett. 99: 221802, 2007.

Observation of  $B^0 \rightarrow D^{*-} \tau^+ \nu_\tau$  decay at Belle.

By Belle Collaboration (A. Matyja *et al.*). Jun 2007. 6pp. Phys. Rev. Lett. 99: 191807, 2007.

Study of decay mechanism for  $B^+ \rightarrow p \bar{p} K^+$  and  $B^+ \rightarrow p \bar{p} \pi^+$ .

By BELLE Collaboration (J.-T. Wei *et al.*). Jun 2007. 15pp. Phys. Lett. B659: 80-86, 2008.

Study of charmonia in four-meson final states produced in two-photon collisions.

By Belle Collaboration (S. Uehara *et al.*). Jun 2007. 21pp. Eur. Phys. J.C53: 1-14, 2008.

Study of  $\tau^- \rightarrow K_S \pi^- \nu_\tau$  decay at Belle.

By Belle Collaboration (D. Epifanov *et al.*). Jun 2007. 19pp. Phys. Lett. B654: 65-73, 2007.

Measurement of Branching Fraction and Time-Dependent CP Asymmetry Parameters in  $B^0 \rightarrow D^{*+} D^{*-} K_s^0$  Decays.

By Belle Collaboration (J. Dalseno *et al.*). Jun 2007. 13pp. Phys. Rev. D76: 072004, 2007

High statistics measurement of the cross-sections of  $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+ \pi^-$  production.

By Belle Collaboration (T. Mori *et al.*). Apr 2007. 20pp. J. Phys. Soc. Jap. 76: 074102, 2007.

Study of  $B^+ \rightarrow p \bar{\Lambda} \gamma$ ,  $p \bar{\Lambda} \pi^0$  and  $B^0 \rightarrow p \bar{\Lambda} \pi^-$ .

By Belle Collaboration (M.-Z. Wang *et al.*). Apr 2007. 12pp. Phys. Rev. D76: 052004, 2007.

Observation of the decay  $\bar{B}^0 \rightarrow D_s^+ \Lambda \bar{p}$ .

By Belle Collaboration (T. Medvedeva *et al.*). Apr 2007. 5pp. Phys. Rev. D76: 051102, 2007.

Measurement of  $D^0 - \bar{D}^0$  mixing in  $D^0 \rightarrow K_s^0 \pi^+ \pi^-$  decays.

By BELLE Collaboration (K. Abe *et al.*). Apr 2007. 7pp. Phys. Rev. Lett. 99: 131803, 2007

## 2) 国際会議報告

M Chiba, Y Watanabe, Y Shibasaki, F Yabuki, O Yasuda, *et al.*

Measurement of Attenuation Length for Radio Wave in Natural Rock Salt and Performance of Detecting Ultra High-Energy Neutrinos

Journal of Physics: Conference Series, jpcs.iop.org, Volume 81, (2007) 012003, pp1-7 ARENA2006-Acoustic and Radio EeV Neutrino detection Activities, University of Nothumbria, Newcastle, UK, 28-30 June 2006

Published by IOP Publishing, Institute of Physics, London ISSN-1742-6588

M.Chiba, Y.Arakawa, S.Nakamura, Y.Shibasaki, Y.Watanabe, F.Yabuki, O.Yasuda, *et al.*

Reflection of Microwave from Energy Deposit by X-ray Irradiation in Rock Salt: Implying Salt Ultra High Energy Neutrino Detector to act like a Radio Bubble Chamber

Proceedings of The 15th international Conference on Supersymmetry and the Unification of fundamental Interactions, Volume I, pp850-853

Published by the University of Karlsruhe in collaboration with Tribun EU s.r.o. First Edition, Bruno 2008 ISBN-978-80-7399-268-2

### 3) 学会講演

第 44 回 アイソトープ・放射線 研究発表会 2007 年 7 月 4 日～7 月 6 日 (日本青年館)

谷内康行, 池田吉総, 内海倫明, 押尾悠司, 川邊昌彦, 平勝良, 竹内健太, 野崎拓馬, 千葉雅美, 藤井政俊, 白川利昭 : 「小型中性子発生装置の製作と予備的考察」

日本物理学会第 62 回年次大会 2007 年 9 月 21 日～9 月 24 日 (北海道大学)

遠藤裕介ほか : 「原子炉ニュートリノ振動実験 Double Chooz のための 10 "PMT 試験システムの構築」

中村俊介, 荒川葉子, 上條敏生, 千葉雅美, 安田修, 矢吹文昭, 伊部圭介, 近匡, 清水裕, 近重悠一, 二宮壯介, 内海倫明, 谷内康行, 藤井政俊 : 「超高エネルギーニュートリノの検出のための岩塩中電磁シャワーからのダイポールアンテナによる電波検出シミュレーション」

荒川葉子, 上條敏生, 千葉雅美, 中村俊介, 安田修, 矢吹文昭, 伊部圭介, 近匡, 清水裕, 近重悠一, 二宮壯介, 内海倫明, 谷内康行 : 「超高エネルギーニュートリノ検出のための岩塩電離状態からの反射電波の精密測定」

亀島敬, 汲田哲郎ほか : 「キャピラリ放電管を用いたレーザープラズマ電子加速」

第 14 回素粒子物理国際研究センターシンポジウム 2008 年 2 月 17 日～2 月 20 日 (長野県白馬村)

春名毅 : 「原子炉ニュートリノ振動実験 Double Chooz と PMT の現状」

日本物理学会第 63 回年次大会 2008 年 3 月 22 日～3 月 26 日 (近畿大学)

遠藤裕介ほか : 「原子炉ニュートリノ振動実験 Double Chooz のための 10 "PMT (8 本同時) 検査システムの開発」

佐久間哲哉ほか : 「DCBA による二重ベータ崩壊実験 VIII」

西澤勲ほか : 「Aerogel RICH 検出器における HAPD 読み出し用 ASIC の開発」

伊部圭介, 近匡, 清水裕, 近重悠一, 二宮壯介, 荒川葉子, 上條敏生, 千葉雅美, 中村俊介, 安田修, 矢吹文昭, 内海倫明, 谷内康行 : 「岩塩ニュートリノ検出器の為の UHE ニュートリノ核子散乱計算」

二宮壯介, 伊部圭介, 近匡, 清水裕, 近重悠一, 荒川葉子, 上條敏生, 千葉雅美, 中村俊介, 安田修, 矢吹文昭, 内海倫明, 谷内康行, 藤井政俊 : 「岩塩ニュートリノ検出器の為の 300MHz 共振器の改良と UHF 帯における岩塩減衰長の測定」

千葉雅美, 荒川葉子, 上條敏生, 中村俊介, 安田修, 矢吹文昭, 伊部圭介, 近匡, 清水裕, 近重悠一, 二宮壯介, 内海倫明, 谷内康行, 藤井政俊 : 「岩塩ニュートリノ検出器の為の X 線照射による岩塩からのマイクロ波反射測定」

荒川葉子, 上條敏生, 千葉雅美, 中村俊介, 安田修, 矢吹文昭, 伊部圭介, 近匡, 清水裕, 近重悠一, 二宮壯介, 内海倫明, 谷内康行, 藤井政俊 : 「岩塩ニュートリノ検出器の為の X 線照射による岩塩からの電波反射実験」

中村俊介, 上條敏生, 千葉雅美, 荒川葉子, 安田修, 矢吹文昭, 伊部圭介, 近匡, 清水裕, 近重悠一, 二宮壯介, 内海倫明, 谷内康行, 藤井政俊 : 「平面アンテナの特性と岩塩鉱での応用」

亀島敬、汲田哲郎ほか：「レーザープラズマ電子加速で用いるキャピラリ放電管内のプラズマ密度分布計測」

第55回応用物理学関係連合講演会 2008年3月27日～3月30日（日本大学船橋キャンパス）

谷内康行、内海倫明、松村義人、押尾悠司、川辺昌彦、平勝良、野崎拓馬、千葉雅美、藤井政俊：「小型中性子発生装置の開発」

#### 国際会議

2007 Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, October 27 - November 3, 2007  
Honolulu, Hawaii, USA

T. Sumiyoshi: Present status of KEKB and Belle

The 15th international Conference on Supersymmetry and the Unification of fundamental Interactions  
(SUSY07): July26 - August1, University of Karlsruhe, Germany

Masami Chiba: Reflection of Microwave from Energy Deposit by X-ray Irradiation in Rock Salt:  
Implying Salt Ultra High Energy Neutrino Detector to act like a Radio Bubble Chamber

# 原子物理実験サブグループ

## 1. 研究活動の概要

今年度も、meV から GeV までの非常に広い衝突エネルギーに亘る原子衝突現象のダイナミクスを原子・分子・結晶などの様々な標的に対して独自の装置と測定手法を開発しながら実験的に解明する、という本グループの特徴を生かした研究が展開された。

### 1) 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）。我々は、HIMAC（放射線医学総合研究所重イオン加速器）から供給される約 400 MeV/u の多価重イオンを Si 結晶に通過させ、出射イオンの電荷や脱励起 X 線を観測することによって実験研究を行ってきたが、本年度は、1 $\mu$ m 厚の Si 薄膜結晶による通過原子面の周期性を利用する 3D-RCE(3次元 RCE) 条件下での 2 重共鳴を使って様々な系への応用を試みた。また新たに、ドイツ・GSI 重イオン研究所における RCE を利用した分光実験へ向けての準備も開始した。

#### (1) 3D-RCE を利用した 2 重共鳴による Li-like イオンに対するホローアトム生成の試み:



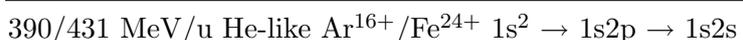
Li-like Ar<sup>15+</sup> に対してその 3 個の軌道電子をすべて  $n=2$  軌道に配置させた 3 重電子励起状態の生成を、3D-RCE による 2 重共鳴を利用して試みた。このような内殻軌道がすべて空になった特異な原子は「ホローアトム」と呼ばれ、そのエネルギー準位や崩壊過程が、電子相関の観点から理論的に注目を集めているが、実験的には Z の大きい重イオンに対しては、利用できる光源の波長の制限から困難であった。我々は、3D-RCE において、ミラー指数表記で (1,-2,-3) および (1,-1,2) の 2 つの原子面配列の周波数成分を使って、 $1s 2s^2(2S) \rightarrow 1s 2s 2p(2P) \rightarrow 2s 2p^2(2D)$  へと順次遷移させた。結晶通過後のイオンの電荷分布を観測した結果、初めの RCE のみが共鳴条件下にあるときに比べ、両方の RCE が共鳴条件下にあるとき (2 重共鳴) に、Ar<sup>15+</sup> の生き残り割合が大きく減少した。これは、ホローアトムの生成によって標的電子と衝突によるイオン化やオージェ過程によってイオン化確率が増大したことに起因する。

#### (2) 3D-RCE による励起 He-like イオンのアラインメントの詳細観測:



3D-RCE では、振動電場が原子面配列の逆格子ベクトルの向きに直線偏光しているため、励起状態を特定の磁気副準位にアラインメントさせることができる。我々はその様子を脱励起 X 線の異方的放出から観測してきた。今年度は、このアラインメント効果についての詳細な理解のため、様々な条件下で水平・垂直方向に放出された X 線収量を測定した。試みた原子面配列はミラー指数表示で  $(k, l, m) = (1, \pm 1, 0), (1, \pm 1, \pm 2), (1, \pm 1, \pm 4), (2, \pm 1, \pm 1)$ , および  $(2, \pm 1, \pm 3)$  であり、結晶の対称性を確認するため、結晶回転角を正負両方向に走査した。また、X 線収量比を正確に評価するため、 $(\theta, \phi)$  両結晶回転角に対して検出見込み角度の相対論補正を行った。得られた結果は、(i) 測定結果は理論予想と 10% 以内の精度で一致したが、(ii) 総体的傾向として観測された異方性は理論値よりやや小さめで、アラインメントの緩和過程の存在を示唆している。(iii) 回転角に対する正負対称性は予想通り確認されたが、 $m$  の正負によって違いが観測され、対称性が破れている場合があることを見いだした。

#### (3) 3D-RCE を利用した 2 重共鳴による He-like イオンの準安定励起状態の生成:



振動電場によって、通過イオンの2つの励起準位間が強くカップリングしている場合、ドレスド原子が生成される。我々はこの過程を特徴的な Autler-Townes(AT-) 2重項の観測によって研究してきた。今年度はプローブ電場の方向・強度を変化させたり、異なるイオン種を用いて観測を行った。実験は、 $1s^2$ ,  $1s2p$ ,  $1s2s$  の  $\Lambda$  型3準位系に対して2重共鳴を行い、 $1s2p-1s2s$  間をカップリングさせた状態を  $1s^2-1s2p$  間の遷移でプローブした。イオン進行方向を  $z$  方向とし、結晶の  $(2\bar{2}0)$  面を水平に設置し、この面の法線方向を  $x$  方向と定義した場合、カップリングとプローブ電場両者の偏光方向をほぼ  $x$  方向に並行にして共鳴を観測した。その結果、 $2^1S$  と混合した  $2^1P_x$  成分のみをプローブすることに成功した。さらに、 $431 \text{ MeV/u Fe}^{24+}$  に対して同じ準位系の実験を行ったところ、 $x$  方向に偏光した振動電場による  $2^1P_x$  から  $2^1S$  への電子移行による水平方向への X 線放出量の減少が観測されたものの、AT-2重項は現れなかった。これは  $2^1P$  の短い放射寿命によるコヒーレンスの低下や準位間の弱いカップリングに起因すると考えられる。

(4) GSI 重イオン研究所における RCE 実験に向けての準備:  $190 \text{ MeV/u Li-like U}^{89+} 2s_{1/2} \rightarrow 2p_{3/2}$   
HIMAC に比べて質量数  $Z$  の大きい重イオンビームを利用できるドイツ GSI 重イオン研究所の施設を利用して、Li-like  $\text{U}^{89+}$  における  $2s_{1/2}$  から  $2p_{3/2}$  への遷移 (遷移エネルギー: 約  $4.5 \text{ keV}$ ) を精密測定することによる QED テストを目標とした実験を計画している。 $Z$  が大きくなると短寿命で X 線放出して脱励起するため、観測は X 線が主となる。ビーム強度、RCE 励起確率がともに弱いと予想されることから、検出効率の良い X 線測定が必須であるため、大面積 X 線検出器を複数個配置することを目指して、ベルチエ効果による冷却による大面積 ( $100 \text{ mm}^2$ ) Si ドリフト型 X 線検出器の導入を決定した。付随するプリアンプ回路の放熱対策や、複数検出器に対応した同時計測回路の R&D を開始した。

## 2) 静電型イオン蓄積リングによる原子分子衝突の研究

化学科・城丸グループと共に開発してきた静電型イオン蓄積リング (TMU E-Ring) 実験は、昨年度からいよいよ本格的な実験を開始した。今年度は、装置の改良を伴ったリング冷却による黒体放射の影響の観測や色素分子イオンの波長可変レーザーによる分光測定などを行った。

### (1) 装置の改造:

従来の TMU E-ring では、ビーム軌道周辺部を液体窒素温度まで冷却する際、その被覆は完全ではなく室温部分を周回イオンが通過する割合が数 10% 以上あった。そこで、これらの部分を液体窒素温度まで冷却する電極を 2カ所に設置した。

### (2) フタロシアニン亜鉛負イオンのレーザー分光:

TMU E-ring を用いた孤立状態における巨大分子イオンの分光学的研究として、今年度はフタロシアニン亜鉛負イオンを周回させ、レーザー分光実験を行った。すなわち、リング一方の直線部において波長可変レーザーを負イオンに照射し、電子脱離により生成した中性粒子をもう一方の直線部下流に設置した MCP を用いて測定し、その収量のレーザー波長依存性を観測した。数  $100 \text{ ms}$  の領域での吸収スペクトルの蓄積時間依存性を測定した結果、負イオンの輻射冷却によると考えられるスペクトル形状の先鋭化を観測した。また、十分冷却が進んだ蓄積時間領域でのスペクトルは、溶液中におけるものとよく一致していることを観測した。

### (3) 負炭素原子イオンおよび負炭素クラスターの環境温度依存性:

昨年度生成・蓄積に成功した負炭素原子イオン  $\text{C}^-$  および小型の負炭素クラスターイオン  $\text{C}_n^-$  ( $n = 2 - 8$ ) に関して、短寿命成分の環境温度依存性をより低温領域まで測定した。 $\text{C}^-$  は、数  $10 \text{ meV}$  という小さい束縛エネルギーの励起状態に起因する数  $10 \text{ ms}$  の寿命成分が黒体放射によって中性化している。今回の改良装置による実験ではリング冷却に伴って短寿命成分の寿命がさらに長くなることを実証した。その一方で  $\text{C}_n^-$  ではその寿命は環境温度に依存しないことも併せて確認した。

### 3) 低温ヘリウム気体中のイオン移動度

希薄な気体中におけるイオン移動度は、イオンと気体分子の間に働く相互作用ポテンシャルに非常に敏感であるため、粒子間ポテンシャルの決定手段として昔から活用されている。我々は液体窒素によって 77 K、液体ヘリウムによって 4.2 K にまで冷却したヘリウム気体の中でのイオン移動度を測定できる世界で唯一の装置を開発して、これまでに様々な種類のイオンについて移動度の測定を行ってきた。さらに数年前から、古典論に基づいて移動度を計算するプログラムを開発し、測定した移動度データを再現する粒子間ポテンシャルを求める試みも行っている。特に、閉殻構造を持つイオンではヘリウム原子との衝突対の電子状態が  $1\Sigma^+$  に限定されるために理論的取扱が単純化できるので、アルカリイオンについて移動度測定を進めてきた。今年度は 6 種類のアルカリイオン、 $^6\text{Li}^+$ 、 $^7\text{Li}^+$ 、 $^{23}\text{Na}^+$ 、 $^{39}\text{K}^+$ 、 $^{85}\text{Rb}^+$ 、および  $^{133}\text{Cs}^+$  についての系統的な測定が完了し、非経験的方法で計算した粒子間ポテンシャルを用いた古典的および量子的な移動度の計算結果との比較を行った。その結果、ポテンシャルの極小が分極ポテンシャルより深い場合にのみ移動度に極小が表れることが判明した。

アルカリイオンと同様にハロゲン負イオンも閉殻構造を持つ。イオンが点電荷で近似できる長距離相互作用は共通であるが、短距離では相互作用に大きな違いがあることが理論的に予想されている。そのポテンシャルの極小は非常に浅いため、実験的な検証には meV 程度の低エネルギー衝突が必要である。そのためには低温における移動度の測定は非常に適るので、ハロゲン負イオン源の開発に着手した。ヨウ素負イオン  $\text{I}^-$  について予備的な実験を行い、100 pA 程度のイオン生成を確認した。

### 4) 多価イオンの電荷交換分光

次世代半導体製造技術として波長 13.5 nm の極端紫外 (EUV) 光を用いたリソグラフィーが注目されており、そのための光源として Xe あるいは Sn のレーザープラズマあるいは放電プラズマが精力的に研究されている。しかしながら、プラズマ内部で EUV 領域での発光に寄与している多価イオンに関しては、エネルギー準位・遷移波長・遷移確率といった原子分光学的データが殆ど報告されていない。そこで 2003 年度より阪大レーザー研を中心に文部科学省リーディングプロジェクト「極端紫外 (EUV) 光源等の先進半導体製造技術の実用化」が立ち上がり、我々も再委託研究として多価イオン原子物理の手法を活かした実験を開始した。電子サイクロトロン共鳴型イオン源を用いて多価イオンを生成し、これを電場によって引き出した後に磁場によって価数を選別して衝突実験槽に導き、標的気体と衝突させて電荷移行反応によって生成した励起状態からの発光を観測してきた。今年度は 16 価から 21 価までの Sn イオンについて実験を行った。

EUV 光源プラズマからは EUV 以外の波長領域にも強い発光がある。特に 130 から 400 nm の光はリソグラフィー用の Mo/Si 多層膜ミラーによって高い効率で反射される上に、レジストが感度を持つため大きな問題となっている。この帯域外 (out-of-band) 放射は低価数のイオンによると言われているが、分光学的データは不足しているので新たに VUV 分光器を導入して 40–160 nm の領域で電荷交換分光による測定を行った。2 価および 7 価以上のスズイオンと希ガスでの衝突では全く発光が観測されなかったが、3–6 価を用いた実験ではスペクトルが測定できた。レーザー生成プラズマからの発光スペクトルとの比較を行い、プラズマ中における原子過程の理解を進めているところである。

また、発光強度に関する定量的な議論のためには、EUV および VUV 領域での測定に用いている分光器および CCD カメラの絶対検出感度が必要である。そこで分子科学研究所の放射光実験施設 UVSOR において感度校正実験を行った。その結果はレーザー生成プラズマの絶対発光強度の評価に用いられた。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

M. Goto, Y. Yasuda, S. Jinno, T. Takao, K. Hanada, H. Tanuma, T. Azuma, K.-i. Sugiura, H. Shiromaru, and Y. Achiba : “Electron detachment of super-excited porphyrin anions in an electrostatic ion storage ring”, *Eur. Phys. J. D* **43** (2007) 65-68.

T. Kato, H. Funada, K. Sato, D. Kato, M-Y. Song, N. Yamamoto, H. Tanuma, H. Ohashi, A. Sasaki, F. Koike, K. Nishihara, K. Fahy, and G. O’Sullivan : “EUV spectroscopy of Xe ions from the large helical device at the National Institute for Fusion Science for stable plasmas and plasmas undergoing radiation collapse”, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **41** (2008) 035703.

H. Sakaguchi, S. Fujioka, S. Namba, H. Tanuma, H. Ohashi, S. Suda, M. Shimomura, Y. Nakai, Y. Kimura, Y. Yasuda, H. Nishimura, T. Norimatsu, A. Sunahara, K. Nishihara, N. Miyanaga, Y. Izawa, and K. Mima : “Absolute evaluation of out-of-band radiation from laser-produced tin plasmas for extreme ultraviolet lithography”, *Appl. Phys. Lett.* **92** (2008) 111503.

### 2) 国際会議報告

T. Takao, S. Jinno, K. Hanada, M. Goto, K. Oshikiri, K. Okuno, H. Tanuma, T. Azuma and H. Shiromaru : “Storage of negative carbon ions in an electrostatic ring”, *J. Phys. Conf.* **88** (2007) 012044.

H. Tanuma, S. Jinno, T. Takao, K. Hanada, K. Oshikiri, M. Goto, M. Togawa, J. Matsumoto, K. Okuno, T. Azuma, and H. Shiromaru : “Storage and cooling of ions in an electrostatic ring”, *NIFS-PROC Series*, **73** (2008) 93.

### 3) 学会講演

レーザー研シンポジウム 2007, 2007年4月19日～20日(阪大レーザー研, 吹田市)

大橋隼人, 須田慎太郎, 田沼肇, 佐々木明, 藤岡慎介, 西村博明, 西原功修: レーザープラズマ放射における原子素過程の研究

第23回化学反応討論会, 2007年6月13日～15日(神戸大学, 神戸市)

後藤基, 神野智史, 高雄智治, 田沼肇, 東俊行, 奥野和彦, 城丸春夫, 阿知波洋次: レーザー脱着で生成したポルフィリンアニオンの輻射冷却

原子衝突研究協会第32回研究会, 2007年8月22日～24日(東京工業大学, 大岡山)

井上岳史, 中野祐司, 東俊行, 中井陽一, 水野智也, 土田秀次, 伊藤秋男, 井上洋子, 石井邦和: 高速重イオンによる分子反応イメージング実験の現状報告

中野祐司, 井上岳史, 目時健一, 東俊行, 近藤力, 畠山温, 中井陽一, 小牧研一郎, 山崎泰規, 高田栄一, 村上健: コヒーレント共鳴励起によるドレスト状態の形成

須田慎太郎, 大橋隼人, 田沼肇, 佐々木明, 藤岡慎介, 西村博明, 西原功修: EUV領域におかる多価 Sn 及び Xe イオンの電荷交換分光

東俊行, 神野智史, 高雄智治, 花田勝彦, 押切航希, 河東礼子, 古橋健一郎, 後藤基, 外川茉実, 山田充子, 奥野和彦, 田沼肇, 城丸春夫: TMU E-ring による原子分子イオンの準安定励起状態の観測

後藤基, 外川茉実, 神野智史, 高雄智治, 奥野和彦, 田沼肇, 東俊行, 兒玉健, 城丸春夫, 阿知波洋次: 静電型イオン蓄積リングにおけるフラレン負イオンビームとレーザー合流実験

山田充子, 奥野和彦, 城丸春夫, 阿知波洋次: 6 極イオンガイドを用いたレーザー脱着型イオン源の開発  
的場史朗, 田沼肇, 大槻一雅: 気相中の原子イオン移動度における近距離引力相互作用依存性

第 1 回分子化学会, 2007 年 9 月 17 日 ~ 20 日 (東北大学, 仙台市)

後藤基, 外川茉実, 神野智史, 高雄智治, 奥野和彦, 田沼肇, 東俊行, 兒玉健, 城丸春夫, 阿知波洋次: 静電型イオン蓄積リングを用いたフラレン負イオンの分光学的研究

日本物理学会第 62 回年次大会, 2007 年 9 月 21 日 ~ 24 日 (北海道大学, 札幌市)

田沼肇, 的場史朗, 大槻一雅: 極低温ヘリウム気体中におけるアルカリ原子イオンの移動度 IV

須田慎太郎, 大橋隼人, 田沼肇, 藤岡慎介, 西村博明, 西原功修, 佐々木明: 多価 Sn イオンの電荷移行衝突 III

高雄智治, 神野智史, 後藤基, 河東礼子, 古橋健一郎, 外川茉実, 山田充子, 奥野和彦, 田沼肇, 東俊行, 城丸春夫: TMU E-ring を用いた負イオンの蓄積実験

中村信行, 菊池浩行, 大谷俊介, 田沼肇, 坂上裕之, 甲斐健師, 藤岡慎介, 西村博明, 西原功修: 電子ビームイオントラップによる Sn, Xe 多価イオンの EUV 分光測定

坂上裕之, 菊池浩行, 中村信行, 大谷俊介, 田沼肇, 山本則正, 加藤太治, 加藤隆子, 原弘久, 渡邊鉄哉: 電子ビームイオントラップによる鉄多価イオンの EUV 分光

日本化学会第 1 回関東支部大会, 2007 年 9 月 27 日 ~ 28 日 (首都大学東京, 八王子市)

田沼肇, 的場史朗, 大槻一雅: イオン移動度とイオン-ヘリウム間相互作用ポテンシャル

理研シンポジウム「原子衝突から生体分子分析まで広がる化学反応研究の最前線」

2008 年 1 月 22 日 ~ 23 日 (理化学研究所, 和光市)

東俊行: 静電型蓄積リングを用いた原子・分子イオン冷却ダイナミクスの観測

日本物理学会第 63 回年次大会, 2008 年 3 月 22 日 ~ 26 日 (近畿大学, 東大阪市)

東俊行, 目時健一, 井上岳史, 中野祐司, 高野靖史, 畠山温, 小牧研一郎, 中井陽一, 山崎泰規, 高田栄一, 村上健: 様々な結晶面配列を用いた 3 次元コヒーレント共鳴励起の観測

中野祐司, 目時健一, 井上岳史, 東俊行, 高野靖史, 畠山温, 小牧研一郎, 中井陽一, 山崎泰規, 高田栄一, 村上健: コヒーレント共鳴励起による中空原子イオンの生成

大橋隼人, 須田慎太郎, 田沼肇, 藤岡慎介, 西村博明, 西原功修: 多価 Sn イオンの電荷移行衝突 IV

後藤基, 外川茉実, 山田充子, 高雄智治, 河東礼子, 古橋健一郎, 間宮佑介, 奥野和彦, 田沼肇, 東俊行, 城丸春夫: TMU E-ring における色素分子イオンの蓄積と輻射冷却

鈴木千尋, 加藤隆子, 佐藤国憲, 田村直樹, 加藤太治, 山本則正, 田沼肇 : LHD を用いた希薄プラズマからのスズイオン EUV スペクトルの観測

日本化学会第 88 回春季年会, 2008 年 3 月 26 日 ~ 30 日 (立教大学, 池袋)

後藤基, 外川茉実, 神野智史, 高雄智治, 奥野和彦, 田沼肇, 東俊行, 松本淳, 城丸春夫, 阿知波洋次 : 静電型イオン蓄積リングにおけるフタロシアニン亜鉛負イオンのレーザー分光

#### 国際会議

2nd International Workshop on Electrostatic Storage Devices (ESD2007),  
Stockholm, Sweden, June 17 – 23, 2007

T. Azuma : Storage of  $C_n^- (n = 1 \sim 8)$  clusters and observation of their electronically-excited states

7th International Symposium on Dissociative Recombination (DR2007),  
Ameland, The Netherlands, July 18 – 23, 2007

H. Tanuma : Cooling of molecular ions in an electrostatic storage ring

25th International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (XXV ICPEAC),  
Freiburg, Germany, July 25 – 31, 2007

Y. Nakano, T. Inoue, C. Kondo, A. Hatakeyama, Y. Nakai, T. Azuma, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada, and T. Murakami : Dressed state formation of heavy ions by resonant coherent excitation in a crystal

T. Takao, S. Jinno, K. Hanada, M. Goto, K. Oshikiri, K. Okuno, H. Tanuma, T. Azuma and H. Shiromaru : Storage of negative carbon ions in an electrostatic ring

M. Goto, S. Jinno, T. Takao, H. Tanuma, T. Azuma, K. Okuno, H. Shiromaru, and Y. Achiba : Radiative cooling of porphyrin anions stored in an electrostatic ion storage ring

S. Matoba, H. Tanuma, and K. Ohtsuki : Dependence of mobility on the attractive long-range interaction between ions and neutrals

H. Tanuma, H. Ohashi, S. Fujioka, H. Nishimura, A. Sasaki, and K. Nishihara : Charge exchange spectroscopy of multiply charged tin ions in extreme ultra-violet region

H. Ohashi, H. Tanuma, S. Fujioka, H. Nishimura, and K. Nishihara : Target dependence EUV emissions of multiply charged Sn and Xe ions in charge exchange spectroscopy

20th International Symposium on Ion - Atom Collisions (XX ISIAC),  
Agios Nikolaos, Crete, Greece, August 1 – 4, 2007

T. Azuma : Crystal-dressed highly-charged ions observed through doubly-resonant coherent excitation

15th International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarm (EMS2007),  
Reading, UK, August 1 – 4, 2007

S. Matoba, H. Tanuma, and K. Ohtsuki : Effect of attractive long-range interaction on mobility of alkali ions in cooled helium gas

18th International Conference on Ion-Surface Interactions (ISI2007),  
Zvenigorod near Moscow, Russia, August 24 – 28, 2007

T. Azuma: Recent progress of resonant coherent excitation: double resonance and 3-dimensional RCE

2nd China-Japan Joint Seminar on Atomic and Molecular Processes in Plasma (AMPP)  
Dunhuang, China, October 8 – 13, 2007

H. Tanuma : Storage and cooling of ions in an electrostatic ring

International Symposium on EUV Lithography, Sapporo, Japan, October 28 – 31, 2007

H. Tanuma, H. Ohashi, S. Suda, S. Fujioka, H. Nishimura, K. Nishihara, and A. Sasaki : In-band and out-of-band emissions from charge-selected Xe and Sn ions

TMU/SNU Joint Seminar on Nano-Science and Related Topics, Tokyo, February 4 – 5, 2008

Y. Nakano : Resonant coherent excitation of heavy ions in a crystal

H. Ohashi : EUV emissions of multiply charged Sn and Xe ions in charge exchange collisions

S. Matoba : Mobilities of metastable atomic ions in cooled helium gas

12th East Asian Workshop on Chemical Dynamics (EAWCD),  
Soul, Korea, March 19 – 21, 2008

T. Azuma : Atomic and molecular dynamics studied by an electrostatic ion storage ring

#### 4) 学会誌等

田沼肇, 佐々木明: “多価イオンを用いたプラズマ光源”, プラズマ核融合学会誌, **83** (8), 679 (2007).

東俊行: “静電型蓄積リング”, パリティ, **23** (1), 11 (2008).

# 宇宙物理実験サブグループ

## 1. 研究活動の概要

2007年度は、4月より石崎が准教授に就任、10月には江副が助教として新たに加わり、研究室の運営体制が新しくなった。前の准教授であった石田はJAXA宇宙科学研究本部の教授に就任してからも、激変星の観測および薄板多重積層型X線望遠鏡の開発に関して実質的な学生指導を行なっている。

本サブグループでは、X線天文衛星を用いて宇宙の観測的研究を行なうとともに、将来の衛星搭載を目指した次世代X線観測機器の開発を行っている。特に、現在軌道上にあって観測を続けている「すざく」衛星の搭載機器の軌道上較正やデータ解析プログラムの開発で主要な役割を果たすと同時に、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、「すざく」では果たせなかった、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、新しい検出器や冷凍機システムの開発も進めている。

### 1) 銀河・銀河団の観測

「すざく」では、これまでの鉄、シリコン以外に、酸素からマグネシウムに至る元素の存在量を精度よく決定できる(図1)。今年度は特に、Abell 1060、AWM 7、HCG 62について「すざく」のデータを解析した結果を論文としてまとめた。比較的低温の銀河団と銀河群あわせて4つのシステムの元素存在量について、Ia型およびII型超新星で生成される各元素の存在比と比較した。その結果、II型超新星がIa型に対して3倍多く発生したとすれば、これら銀河団の重元素量をほぼ統一的に説明できることがわかった。これは宇宙の歴史のなかで発生したすべての超新星爆発に対して制限を与える意義の高い結果であり、秋の天文学会の開催された岐阜大学において記者会見を行なった。

「すざく」は低軌道衛星で焦点距離が短いため非X線バックグラウンドが他の衛星よりも低く、銀河団の周辺部などの低密度領域についても高い感度をもつ特徴がある。特に赤方偏移 $z = 0.143$ にある高温の銀河団Abell 1413について、世界でもほぼ初めてとあって良いピリアル半径までにいたる銀河団成分の放射の検出に成功した。また、温度が周辺部になるほど下がっていることを明らかにし、銀河団質量を決める際に等温静水圧平衡を仮定するのは適切でないことを示唆している。これは、銀河団を使って宇宙の平均密度を決定する際に重要な意味を持つ。

また、かみのけ座銀河団(Coma Cluster)のオフセット領域を観測し、XMM-Newtonが以前に報告した軟X線の超過が無いことを確認した。この結果からダークバリオンの量に制限を与えると同時に、XMMの観測が太陽風の影響を受けていた可能性が高まった。またAbell 2052銀河団領域のスペクトル中に0.2 keV相当の超過成分があり、放射源として銀河系内、銀河団の両方の可能性を検討した。

### 2) 「すざく」による激変星の観測

自転周期が33.08秒の強磁場激変星AE AqrからはHXD-PINにより、10–30 keVのバンドで1周期に2つの強度ピークを示す非熱的パルスを検出した。これは白色矮星で粒子加速が起きていることの初めての証拠であり、論文は日本天文学会の欧文報告に受理されると共に、埼玉県庁において記者会見を行った。DQ Her型強磁場激変星のEX HyaとV1223 Sgrからは、XISの高いエネルギー分解能により、白色矮星へ落ち込むガスのドップラー偏移を初めて捉えることに成功した。

### 3) 「すざく」による地球外圏の観測

我々は「すざく」による銀河面観測中に思いがけず強い酸素輝線(O<sub>VII</sub>)を検出した。輝線は太陽風と良く時間的に相関した変動を示し、地球外圏の希薄な水素大気と太陽風との電荷交換反応によるものと考えられる。我々は地球磁場による太陽風の侵入深さと地球外圏密度モデルから、輝線強度を見積もり、

予想よりも1桁以上、観測された強度が強いことを明らかにした。こうした放射は天体からの酸素輝線のバックグラウンドとして重要であり、今後の銀河団などの観測にフィードバックをかける予定である。

#### 4) TES 型カロリメータの開発

将来の X 線天文衛星への搭載を目指し、宇宙研、産総研、MHI、SII ナノテクノロジーらと共同で TES (Transition Edge Sensor) 型カロリメータの開発を進めている。最終目標は  $\sim 2$  eV のエネルギー分解能と  $\sim 1000$  ピクセルからなる多ピクセルアレイである。昨年度は自作素子で、5.9 keV でのエネルギー分解能 4.8 eV (FWHM) を達成し、日本記録を更新するとともに世界記録 ( $\sim 2$  eV) に近づいた。今年度は、多ピクセルアレイの自作を目指し、産総研のシリコンドライエッチング装置を用いたプロセス条件だしを進めた。そして MHI と共同で製作した TES 256 ピクセルアレイを完成した。メンブレン構造に用いた窒化膜の応力制御の問題によって、エネルギー分解能は 27 eV とまだ満足ゆくものではないが、ドライエッチングプロセスの目処を付けることができた。

#### 5) 断熱消磁冷凍器の開発

TES カロリメータの動作環境として、コンパクトかつ温度精度の高い断熱消磁冷凍器 (ADR) の開発を行なっている。従来の鉄ミョウバンに比べて到達温度を低くすることが可能であり、強酸を溶媒として必要としないため取り扱い易いクロムカリウムミョウバンを用い、溶液を 36 と 15 の間で連続循環させることで、約 1 週間でカプセル内に磁性塩結晶を製作した。これをウイスコンシン大学の装置と組み合わせて冷却実験を行い、64 mK まで冷えることを確認した。宇宙研の 2 段式 ADR や首都大の自作 ADR にも組み込んでテストを行なったが、磁場強度や断熱消磁開始温度が十分でなく、最低到達温度は 120 mK にとどまった。

#### 6) 連続型 ADR と TES カロリメータを組み合わせた動作試験と無重力航空機実験

通常断熱消磁冷凍機 (ADR) は、磁場が完全に 0 になった時点でリサイクルを行なう必要があり、長時間連続的に低温を保ことは困難である。この欠点を解決するため、物質・材料研究機構 (NIMS) は NASA ゴダード研究所と協力して、ADR を 4 段直列に接続して位相を最適化して動作させることで連続的な運転を可能とした連続型 ADR (cADR) を開発している。我々は、この cADR に TES カロリメータを組み合わせて動作させる実験を NIMS において行なった。この cADR は国際宇宙ステーションの実験プラットフォームである「きぼう」への搭載も視野に入れており、名古屋のダイヤモンドエアサービス社の飛行機に載せて無重力状態での試験を NIMS、首都大、金沢大のグループで行なった。残念ながら航空機上では冷凍機が TES の転移温度以下まで冷却が行なえなかったため、カロリメータを動作させることはできなかったが、cADR という将来有望な冷凍機に対して貴重な実験データを得ることができた。

#### 7) 超軽量 MEMS X 線光学系の開発

次世代の宇宙 X 線望遠鏡には、従来の鏡に比べ 1 桁以上軽い軽量性と秒角の角度分解能が求められる。我々は、宇宙研、産総研、東北大、立命館大、フロリダ大と共同で、マイクロマシン技術を用いた独自のマイクロポアオプティクス (微細な穴の光学系) 開発を進めている。マイクロマシン技術を用いて  $\mu\text{m}$  スケールの微細な穴を、数百  $\mu\text{m}$  の薄い基板に開け、その側壁を X 線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、しかも一度のプロセスで穴を大量に開けることで、鏡製作を大量生産することができる。我々はシリコン結晶異方性エッチングを用いた鏡チップを用いて、1 回反射型 MEMS X 線光学系を製作し、世界で初め X 線撮像の実証に成功した。反射率は表面粗さ 1 nm 程度の鏡として理解でき、次世代の衛星搭載へのはずみとなった。またこの結果はマイクロマシン最大の国際学会の一つ Transducers にて、Late News Paper に選出された。さらに高い角度分解能を達成す

るため、我々は産総研、東北大、立命館大、フロリダ大とともに新手法を考案し、2件の関連特許の申請を行った。これらは共同研究機関の産学で承認済みであり、来年度に出願予定である。

#### 8) 高い空間分解能を有するX線望遠鏡の開発

前年度に引続き「薄板多重積層型X線望遠鏡」の高解像度化に取り組んだ。昨年度までに、反射鏡の中に極端に厚さの厚いものが混ざっており、これが反射鏡の位置決め精度を制限していることがわかったため、反射鏡基板の端をあらかじめテープでマスクすることで反射鏡の支持部分が基板のみになるような新たな反射鏡を製作した。改良した反射鏡と可動式アライメントプレートによる望遠鏡の溝の遊びを調整により詰めた前後で位置決めによる結像性能がどのように変化するか調べた結果、位置決め誤差については調整後は0.55分角となり、「すざく」の1.5分角に比べて大きく向上させることに成功した。

また、望遠鏡の性能評価を行なうための宇宙研の30 m ビームラインを望遠鏡の大型化に対応させるため、可動式X線発生装置とピンホールコリメータを使用したラスタスキャンシステムを構築した。上記の望遠鏡を新システムにおいても測定し、矛盾のない性能が得られることを確認した。

#### 9) 「すざく」衛星の軌道上較正とデータ解析システムの開発

首都大グループは「すざく」チームにおいて主に、X線望遠鏡(XRT)の較正、およびXRT/XISを組み合わせたデータ解析用ソフトウェアの開発を担当している。ソフトウェア開発は石崎が中心となって、宇宙研およびNASAゴダード研究所と連絡を取りつつプログラム開発を行なっている。特にXRTのレイトレーシングプログラム用いたモンテカルロシミュレーションにより検出器の応答関数を計算するツール、およびXISの非X線バックグラウンドを夜地球観測のデータベースから生成するためのツールを作成、「すざく」の標準解析パッケージの一部として無償で配布されている。その他にも、熱歪みによる衛星の姿勢の揺れを補正するツールやX線イベントに対する高精度な時刻づけツールのプログラム製作を担い、これらのアルゴリズムの詳細が論文として発表されている。

#### 10) 次期X線天文衛星の提案および開発

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、宇宙の大構造を非常に良くトレースして分布すると考えられているが、まだその全貌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、専用小型衛星DIOS(Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor)を提案してきた。これをスケールアップしたものをEDGEという名で、オランダ、イタリア、

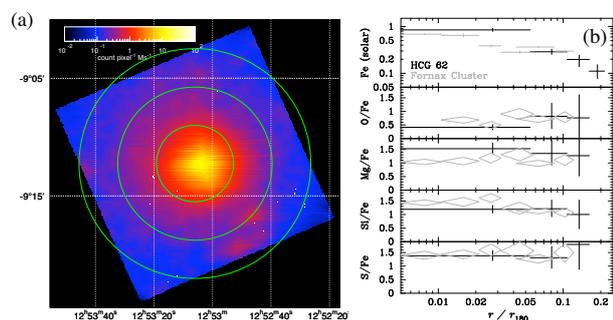


図 1: (a) X線天文衛星「すざく」で観測したHCG 62銀河群の画像。緑の円は銀河群中心から3.3', 6.5', 9.8'に対応する。(b)「すざく」で決定された鉄の重元素量の太陽組成に対する比、酸素/鉄、マグネシウム/鉄、シリコン/鉄、硫黄/酸素/鉄の太陽組成比を上段より順に銀河団中心からの距離に応じてプロットしたもの。黒線がHCG 62銀河群に対する結果で、灰色線はFornax銀河団に対する結果。

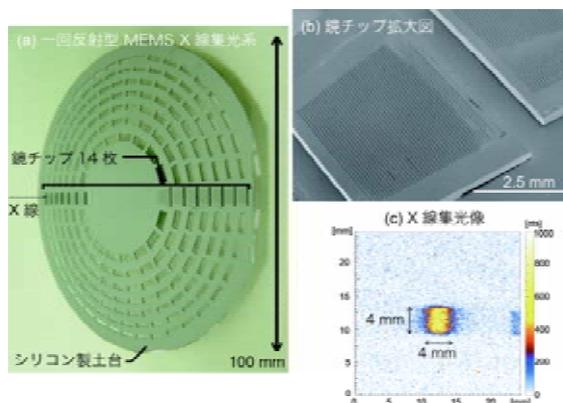


図 2: 1回反射型MEMS X線集光系の(a)全体図、(b)鏡チップの拡大図、および(c)X線集光像(Al K 1.49 keV)。試作品のため(a)に示すように一部だけ鏡チップを配置。(b)のスリット状の穴の側壁を反射鏡として利用。

日本の協力でヨーロッパの次期科学衛星シリーズ Cosmic Vision に提案したが、残念ながら不採択となった。これを焼き直したものを、現在、XENIA としてアメリカの Decadal Survey に提案中である。

さらに、2011年に打ち上げ予定のロシアの大型衛星 Spectrum-Röntgen-Gamma (SRG) 衛星に、日米欧の協力でカロリメータを搭載する計画が承認され、3月には日本が担当する冷凍機系の PDR (Preliminary Design Review) が行なわれた。首都大は、大橋がサイエンス、石崎がデジタルエレクトロニクスを担当する。また、2013年に打ち上げを目指す NEXT (New Exploration X-ray Telescope) もプロジェクト化を目指す最終段階に入り、検出器システム設計の詰めに入っている。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

K. Sato, N.Y. Yamasaki, M. Ishida, Y. Ishisaki, T. Ohashi, H. Kawahara, T. Kitaguchi, M. Kawaharada, M. Kokubun, K. Makishima, N. Ota, K. Nakazawa, T. Tamura, K. Matsushita, N. Kawano, Y. Fukazawa, J.P. Hughes: X-Ray Study of Temperature and Abundance Profiles of the Cluster of Galaxies Abell 1060 with Suzaku, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **59** (2007) pp.299–317

F. Aharonian, A. G. Akhperjanian, Bachi, A. R. Bazer-M. Beilicke, W. Benbow, D. Berge, K. Bernlöhr, C. Boisson, O. Bolz, V. Borrel, I. Braun, A. M. Brown, hler, R.I. Büsching, S. Carrigan, P. M. Chadwick, L.-M. Chounet, G. Coignet, R. Cornils, L. Costamante, B. Degrange, H. J. Dickinson, A. Djannati-Ataï, G. Dubus, K. Egberts, D. Emmanoulopoulos, P. Espigat, F. Feinstein, E. Ferrero, A. Fiasson, M. D. Filipovic, G. Fontaine, Y. Fukui, Seb. Funk, S. Funk, ling, M. Füßling, A. Gallant, B. Giebels, J. F. Glicenstein, P. Goret, C. Hadjichristidis, D. Hauser, M. Hauser, G. Heinzelmann, G. Henri, G. Hermann, J. A. Hinton, J. S. Hiraga, A. Hoffmann, W. Hofmann, M. Holleran, S. Hoppe, D. Horns, Y. Ishisaki, A. Jacholkowska, Jager, O. C. de E. Kendziorra, M. Kerschhaggl, lifi, B. Khélifi, N. Komin, A. Konopelko, K. Kosack, G. Lamanna, I. J. Latham, Gallou, R. Le Gallou, A. Lemièrre, M. Lemoine-Goumard, T. Lohse, J. M. Martin, O. Martineau-Huynh, A. Marcowith, C. Masterson, G. Maurin, T. J. L. McComb, E. Moulin, Y. Moriguchi, M. de Naurois, D. Nedbal, S. J. Nolan, A. Noutsos, K. J. Orford, J. L. Osborne, M. Ouchrif, M. Panter, G. Pelletier, S. Pita, G. Pühlhofer, M. Punch, S. Ranchon, B. C. Raubenheimer, M. Raue, S. M. Rayner, A. Reimer, J. Ripken, L. Rob, L. Roland, S. Rosier-Lees, G. Rowell, V. Sahakian, A. Santangelo, L. Saugé, S. Schlenker, R. Schlickeiser, R. Schröder, U. Schwanke, S. Schwarzburg, S. Schwemmer, A. Shalchi, H. Sol, D. Spangler, F. Spanier, R. Steenkamp, C. Stegmann, G. Superina, P. H. Tam, J.-P. Tavernet, R. Terrier, M. Tluczykont, C. van Eldik, G. Vasileiadis, C. Venter, J. P. Vialle, P. Vincent, H. J. Völk, S. J. Wagner, M. Ward: H.E.S.S. Observations of the Supernova Remnant RX J0852.0-4622: Shell-Type Morphology and Spectrum of a Widely Extended Very High Energy Gamma-Ray Source, *Astrophys. J.* **661** (2007) pp.236–249

H. Böhringer, P. Schuecker, G. W. Pratt, M. Arnaud, T. J. Ponman, J. H. Croston, S. Borgani, R. G. Bower, U. G. Briel, C. A. Collins, M. Donahue, W. R. Forman, A. Finoguenov, M. J. Geller, L. Guzzo, J. P. Henry, R. Kneissl, J. J. Mohr, K. Matsushita, C. R. Mullis, T. Ohashi, K. Pedersen, D. Pierini, H. Quintana, S. Raychaudhury, T. H. Reiprich, A. K. Romer, P. Rosati, K. Sibirli, R. F. Temple, P. T. P. Viana, A. Vikhlinin, G. M. Voit, Y.-Y. Zhang: The representative XMM-Newton cluster structure survey (REXCESS) of an X-ray luminosity selected galaxy cluster sample, *Astronomy and Astrophysics* **469** (2007) pp.363–377

- K. Sato, K. Tokoi, K. Matsushita, Y. Ishisaki, N.Y. Yamasaki, M. Ishida, T. Ohashi: Type Ia and II Supernovae Contributions to Metal Enrichment in the Intracluster Medium Observed with Suzaku, *Astrophys. J. Letters* **667** (2007) pp.41–44
- Y. Ezoe, M. Koshiishi, M. Mita, K. Mitsuda, A. Hoshino, Y. Ishisaki, T. Takano, R. Maeda: Silicon micro-pore X-ray optics, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **579** (2007) pp.817–820
- N. Tawa, K. Hayashida, M. Nagai, H. Nakamoto, H. Tsunemi, H. Yamaguchi, Y. Ishisaki, E. D. Miller, T. Mizuno, T. Dotani, M. Ozaki, H. Katayama: Reproducibility of Non-X-Ray Background for the X-Ray Imaging Spectrometer aboard Suzaku, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **60** SP1 (2008) pp.11–24
- Y. Terada, T. Enoto, R. Miyawaki, Y. Ishisaki, T. Dotani, K. Ebisawa, M. Ozaki, Y. Ueda, L. Kuiper, M. Endo, Y. Fukazawa, T. Kamae, M. Kawaharada, M. Kokubun, Y. Kuroda, K. Makishima, K. Masukawa, T. Mizuno, T. Murakami, K. Nakazawa, A. Nakajima, M. Nomach, N. Shibayama, T. Takahashi, H. Takahashi, M. S. Tashiro, T. Tamagawa, S. Watanabe, M. Yamaguchi, K. Yamaoka, D. Yonetoku: In-Orbit Timing Calibration of the Hard X-Ray Detector on Board Suzaku, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **60** SP1 (2008) pp.25–34
- Y. Uchiyama, Y. Maeda, M. Ebara, R. Fujimoto, Y. Ishisaki, M. Ishida, R. Iizuka, M. Ushio, H. Inoue, S. Okada, H. Mori, M. Ozaki: Restoring the Suzaku Source Position Accuracy and Point-Spread Function, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **60** SP1 (2008) pp.35–42
- Y. Hyodo, M. Tsujimoto, K. Hamaguchi, K. Koyama, S. Kitamoto, Y. Maeda, Y. Tsuboi, Y. Ezoe: Suzaku Spectroscopy of Extended X-Ray Emission in M17, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **60** SP1 (2008) pp.85–94
- K. Ebisawa, S. Yamauchi, Y. Tanaka, K. Koyama, Y. Ezoe, A. Bamba, M. Kokubun, Y. Hyodo, Tsujimoto, H. Takahashi: Spectral Study of the Galactic Ridge X-Ray Emission with Suzaku, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **60** SP1 (2008) pp.223–230
- K. Tokoi, K. Sato, Y. Ishisaki, T. Ohashi, N. Y. Yamasaki, K. Nakazawa, K. Matsushita, Y. Fukazawa, A. Hoshino, T. Tamura, C. Egawa, N. Kawano, N. Ota, N. Isobe, M. Kawaharada, H. Awaki, J.P. Hughes: Suzaku Observation of HCG 62: Temperature, Abundance, and Extended Hard X-Ray Emission Profiles, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **60** SP1 (2008) pp.317–332
- K. Sato, K. Matsushita, Y. Ishisaki, S. Sasaki, T. Ohashi, N. Y. Yamasaki, M. Ishida: Suzaku Observations of AWM 7 Cluster of Galaxies: Temperatures, Abundances, and Bulk Motions, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **60** SP1 (2008) pp.333–342
- J. S. Kaastra, A. M. Bykov, S. Schindler, J. A. M. Bleeker, S. Borgani, A. Diaferio, K. Dolag, F. Durret, J. Nevalainen, T. Ohashi, F. B. S. Paerels, V. Petrosian, Y. Rephaeli, P. Richter, J. Schaye, N. Werner: Clusters of Galaxies: Beyond the Thermal View, *Space Science Reviews* **134** (2008) pp.1–6
- F. Durret, J. S. Kaastra, J. Nevalainen, T. Ohashi, N. Werner: Soft X-Ray and Extreme Ultraviolet Excess Emission from Clusters of Galaxies, *Space Science Reviews* **134** (2008) pp.51–70

Y. Rephaeli, J. Nevalainen, T. Ohashi, A.M. Bykov: Nonthermal Phenomena in Clusters of Galaxies, *Space Science Reviews* **134** (2008) pp.71–92

N. Werner, F. Durret, T. Ohashi, S. Schindler, R.P.C. Wiersma: Observations of Metals in the Intra-Cluster Medium, *Space Science Reviews* **134** (2008) pp.337-362

F. Paerels, J. Kaastra, T. Ohashi, P. Richter, A. Bykov, J. Nevalainen: Future Instrumentation for the Study of the Warm-Hot Intergalactic Medium, *Space Science Reviews* **134** (2008) pp.405-418

## 2) 国際会議報告

Y. Maeda, M. Ebara, R. Fujimoto, T. Hayashi, H. Inoue, Y. Ishisaki, H. Mori, S. Okada, K. Suzuki, Y. Uchiyama, P. J. Serlemitsos, Y. Soong, K.-W. Chan, T. Okajima, J. P. Lehan, K. Itoh, A. Itoh, Y. Yokoyama, Y. Itoh, R. Nakamura, M. Ishida, A. Hayakawa, C. Inoue, S. Okuma, R. Kubota, M. Suzuki, T. Osawa, K. Yamashita, H. Kunieda, Y. Tawara, Y. Ogasaka, A. Furuzawa, K. Tamura, R. Shibata, Y. Haba, M. Naitou, K. Misaki, R. Iizuka: On-Orbit Performance of the X-Ray Telescopes and Thermal Wobbling of the Suzaku Satellite, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **169** (2007) pp.322-325

M. Ishida, S. Okada, R. Nakamura, Y. Terada, T. Hayashi, K. Mukai, K. Hamaguchi: Suzaku Observations of the Dwarf Nova SS Cyg in Quiescence and Outburst, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **169** (2007) pp.178-181

T. Ohashi, J. P. Henry: Summary of the Conference Papers on Clusters of Galaxies, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **169** (2007) pp.65-70

T. H. Reiprich, D. S. Hudson, O. Nenestyan, K. Sato, Y. Ishisaki, A. Hoshino, T. Ohashi, N. Ota, Y. Fujita, G. Hasinger: Suzaku Observation of Abell 2204: Galaxy Cluster Gas Temperature Measurement Up to the Virial Radius, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **169** (2007) pp.33-36

Y. Takei, T. Ohashi, J. P. Henry, K. Mitsuda: The Warm-Hot Intergalactic Medium in Cluster Vicinities, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **169** (2007) pp.29-32

N. Ota, Y. Fukazawa, A. C. Fabian, T. Kanamaru, M. Kawaharada, N. Kawano, R. L. Kelley, T. Kitaguchi, K. Makishima, K. Matsushita, K. Murase, K. Nakazawa, T. Ohashi, J. S. Sanders, T. Tamura, Y. Urata, the Suzaku Team: Absence of Bulk Motions of the Intracluster Medium in the Centaurus Cluster, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **169** (2007) pp.25-28

Y. Terada, A. Bamba, J. S. Hiraga, N. Isobe, A. Kubota, N. Ota, P. Ranalli, A. Senda, M. Suzuki, T. Tamagawa, Y. Urata (Suzaku Help Desk Members), M. Ozaki, K. Ebisawa, Y. Ishisaki, H. Matsumoto, I. Yamagishi, T. Tamura, K. Mukai, L. Angelini, K. Hamaguchi, Suzaku Processing Members: The 7-Steps of the Data Analysis, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **169** (2007) pp.312-315

R. Fujimoto, K. Mitsuda, D. McCammon, Y. Takei, M. Bauer, Y. Ishisaki, F. Porter, H. Yamaguchi, K. Hayashida, N. Yamasaki: Evidence for Solar-Wind Charge-Exchange X-Ray Emission from the Earth's Magnetosheath, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **169** (2007) pp.71-74

K. Nakazawa, N. Kawano, Y. Fukazawa, C. Egawa, T. Kitaguchi, M. Kawaharada, K. Makishima, N. Ota, K. Tokoi, K. Sato, Y. Ishisaki, T. Ohashi, N. Yamasaki, the Suzaku Team: Suzaku Survey for

Non-Thermal Hard X-Ray Emission from Clusters of Galaxies, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **169** (2007) pp.45-48

M. Koshiishi, Y. Ezoe, M. Mita, Y. Maeda, K. Mitsuda, T. Osawa, M. Suzuki, A. Hoshino, Y. Ishisaki, T. Takano, R. Maeda: The first light of a single-stage MEMS x-ray optic, Optics for EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Astronomy III, Edited by O'Dell, Stephen L.; Pareschi, Giovanni, *Proceedings of the SPIE* **6688** (2007) pp.668814

S. Okada, M. Ebara, H. Mori, R. Iizuka, H. Inoue, M. Ishida, Y. Maeda, R. Nakamura, K. Suzuki, K. Someya, Y. Ishisaki, T. Hayashi, T. Shirata: Establishing the response function of the x-ray telescopes onboard the Suzaku satellite, Optics for EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Astronomy III, Edited by O'Dell, Stephen L.; Pareschi, Giovanni, *Proceedings of the SPIE* **6688** (2007) pp.66880F.

J.W. den Herder, L. Piro, T. Ohashi, L. Amati, J. Atteia, S. Barthelmy, M. Barbera, D. Barret, S. Basso, M. Boer, S. Borgani, O. Boyarskiy, E. Branchini, G. Branduardi-Raymont, M. Briggs, G. Brunetti, C. Budtz-Jorgensen, D. Burrows, S. Campana, E. Caroli, G. Chincarini, F. Christensen, M. Cocchi, A. Comastri, A. Corsi, V. Cotroneo, P. Conconi, L. Colasanti, G. Cusamano, A. de Rosa, M. Del Santo, S. Etori, Y. Ezoe, L. Ferrari, M. Feroci, M. Finger, G. Fishman, R. Fujimoto, M. Galeazzi, A. Galli, F. Gatti, N. Gehrels, B. Gendre, G. Ghirlanda, G. Ghisellini, P. Giommi, M. Girardi, L. Guzzo, F. Haardt, I. Hepburn, W. Hermsen, H. Hoovers, A. Holland, J. In't Zand, Y. Ishisaki, H. Kawahara, N. Kawai, J. Kaastra, M. Kippen, P. A. J. de Korte, C. Kouveliotou, A. Kusenko, C. Labanti, R. Lieu, C. Macculi, K. Makishima, G. Matt, P. Mazotta, D. McCammon, M. Méndez, T. Mineo, S. Mitchell, K. Mitsuda, S. Molendi, L. Moscardini, R. Mushotzky, L. Natalucci, F. Nicastro, P. O'Brien, J. Osborne, F. Paerels, M. Page, S. Paltani, G. Pareschi, E. Perinati, C. Perola, T. Ponman, A. Rasmussen, M. Roncarelli, P. Rosati, O. Ruchayskiy, E. Quadrini, I. Sakurai, R. Salvaterra, S. Sasaki, G. Sato, J. Schaye, J. Schmitt, S. Scioritino, M. Shaposhnikov, K. Shinozaki, D. Spiga, Y. Suto, G. Tagliaferri, T. Takahashi, Y. Takei, Y. Tawara, P. Tozzi, H. Tsunemi, T. Tsuru, P. Ubertini, E. Ursino, M. Viel, J. Vink, N. White, R. Willingale, R. Wijers, K. Yoshikawa, N. Yamasaki: EDGE: explorer of diffuse emission and gamma-ray burst explosions, Optics for EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Astronomy III. Edited by O'Dell, Stephen L.; Pareschi, Giovanni, *Proceedings of the SPIE* **6688** (2007) pp.668805

Y. Ishisaki, H. Kurabayashi, A. Hoshino, T. Ohashi, T. Yoshino, T. Hagihara, K. Mitsuda, K. Tanaka: Effect of On-Chip Magnetic Shielding for TES Microcalorimeters, *Journal of Low Temperature Physics* **151** (2008) pp.131-137

T. Yoshino, K. Mukai, Y. Ezoe, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda, H. Kurabayashi, Y. Ishisaki, T. Takano, R. Maeda: The Noise and Energy Resolution of the Ti/Au Bilayer X-ray TES Calorimeter with an Au Absorber, *Journal of Low Temperature Physics* **151** (2008) pp.185-189

T. Oshima, Y. Yamakawa, H. Kurabayashi, A. Hoshino, Y. Ishisaki, T. Ohashi, K. Mitsuda, K. Tanaka: A High Energy Resolution Gamma-Ray TES Microcalorimeter with Fast Response Time, *Journal of Low Temperature Physics* **151** (2008) pp.430-435

A. Hoshino, K. Tokoi, Y. Ishisaki, K. Shinozaki, D. McCammon: Fabrication of CPA Salt Pill with Circulating Solution Method, *Journal of Low Temperature Physics* **151** (2008) pp.655-661

K. Mitsuda, R. Kelley, D. McCammon, J.W. den Herder, T. Ohashi: Microcalorimeter Instruments for the Spectrum-R(X)G and NeXT Missions, *Journal of Low Temperature Physics* **151** (2008) pp.703–708

P.A.J. de Korte, J.V. Anquita, X. Barcons, P. Bastia, J. Beyer, F. Briones, Brockley C. Blatt, M. Bruijn, J. Bussons, A. Camon, M.T. Ceballos, D. Drung, C. Enns, L. Fabrega, G. Fraser, F. Gatti, L. Gottardi, W. Hajdas, Helistö, Panu; I. Hepburn, J. den Herder, H. Hoevers, Y. Ishisaki, M. Kiviranta, J. van der Kuur, A. Mchedlishvili, K. Mitsuda, L. Piro, J. Sese, N. Yamasaki, C. Whitford: EURECA: a European-Japanese micro-calorimeter array, *Journal of Low Temperature Physics* **151** (2008) pp.733–739

Y. Ezoe, M. Koshiishi, M. Mita, Y. Maeda, K. Mitsuda, T. Osawa, M. Suzuki, A. Hoshino, Y. Ishisaki, T. Takano, and R. Maeda: Michromachined X-ray Collector For Space Astronomy, *Sensors & Actuators A* (2008) in press

### 3) 学会講演

日本物理学会 2007 年春季大会 2007 年 3 月 25 日～28 日 (首都大学東京 南大沢キャンパス)

北口貴雄、川原田円(東大)、牧島一夫(東大、理研)、小高裕和、国分紀秀、高橋忠幸、尾崎正伸(ISAS/JAXA)、寺田幸功(理研)、石崎欣尚(首都大)、他 HXD チーム: 「すざく」衛星搭載硬 X 線検出器 (HXD-II) のバックグラウンドシミュレーション

床井和世、佐藤浩介、星野晶夫、石崎欣尚、大橋隆哉(首都大)、中澤知洋、国分紀秀、田村隆幸、山崎典子、石田学(ISAS/JAXA)、川原田円(東大)、江川千尋、戸塚都、深沢泰司(広島大)、太田直美、磯部直樹(理研)、松下恭子(東京理科大)、粟木久光(愛媛大)、Ann. Hornschemeier(NASA/GSFC)、John P. Hughes(Rutger 大): 「すざく」で観測された銀河群 HCG62 の温度と重元素分布の研究

佐藤浩介(首都大)、山崎典子(ISAS/JAXA)、石崎欣尚(首都大)、石田学(ISAS/JAXA)、大橋隆哉(首都大): 「すざく」衛星の X 線観測による銀河群・銀河団の温度と重元素量の研究

大橋隆哉(首都大): 銀河団およびその周辺のプラズマ観測

日本天文学会 2007 年春季大会 2007 年 3 月 28 日～30 日 (東海大学湘南校舎)

北口 貴雄、川原田 円(東京大)、牧島 一夫(東京大/理研)、太田 直美(理研)、中澤 知洋、国分 紀秀、山崎 典子(ISAS/JAXA)、佐藤 浩介、大橋 隆哉(首都大)、村瀬 弘一、浦田 裕次、田代 信(埼玉大)、古澤 彰浩(名古屋大)、他すざくチーム: 「すざく」衛星による銀河団からの硬 X 線放射の分光観測

小宮山 円、松下 恭子(東理大)、佐藤 浩介、大橋 隆哉(首都大): すざく衛星による NGC5044 銀河群の観測

星野晶夫、佐藤浩介、床井和世、石崎欣尚、大橋隆哉(首都大)、林田清、田和憲明、長井雅章(大阪大)、J.Patric Henry(ハワイ大): 「すざく」による Abell 1413 銀河団の周辺部の観測

長井雅章、田和憲明、林田 清(大阪大)、星野晶夫、佐藤浩介、床井和世、石崎欣尚、大橋隆哉(首都大)、深沢泰司、川埜直美(広島大)、中澤知洋(ISAS/JAXA)、J.P. Henry(ハワイ大)、E. Miller、M. W.Bautz(MIT): すざく衛星 XIS による銀河団外縁部の観測: バックグラウンドの差し引きについて

田和憲明、長井雅章、林田清 (大阪大学)、山口弘悦 (京都大学)、石崎欣尚 (都立大)、水野恒史、深澤泰司、高橋弘充 (広島大学)、穴田貴康 (ISAS): すざく衛星搭載 X 線 CCD カメラ XIS のバックグラウンドについて 2

倉林 元、石崎欣尚 (首都大学東京)、向井一馬、吉野友崇、江副祐一郎、山崎典子、満田和久 (ISAS/JAXA)、藤本龍一 (金沢大学)、前田龍太郎、高野貴之 (産総研): in-house 製作による TES 型 X 線マイクロカロリメータの性能評価

窪田 廉、鈴木 真樹、大澤 武幸、林 多佳由、白田 渉雪 (首都大)、石田 學、前田 良知、井上 裕彦、岡田 俊策 (ISAS/JAXA)、國枝 秀世 (名古屋大)、ISAS XRT チーム: 高精度アライメントによる X 線望遠鏡の結像性能向上の研究

輿石 真樹、江副 祐一郎、三田 信、満田 和久 (宇宙研)、石崎 欣尚、星野 晶夫 (首都大)、高野 貴之、前田 龍太郎 (産総研): 将来衛星に向けた MEMS X 線光学系の開発 (3)

日本応用物理学会 2007 年春季大会 2007 年 3 月 27 日 ~ 30 日 (青山学院大学淵野辺キャンパス)

江副祐一郎、輿石真樹、三田信、満田和久 (ISAS/JAXA)、星野晶夫、石崎欣尚 (首都大)、高野貴之、前田龍太郎 (AIST): MEMS 技術を用いた超軽量 X 線光学系の開発 (2)

日本物理学会 2007 年秋季大会 2007 年 9 月 21 日 ~ 24 日 (北海道大学札幌キャンパス)

篠崎慶亮、満田和久、山崎典子 (ISAS/JAXA)、大橋隆哉、石崎欣尚、星野晶夫 (首都大): TES 型マイクロカロリメータ開発用の 2 段式 ADR の開発

床井和世、星野晶夫、石崎欣尚、大橋隆哉 (首都大)、篠崎慶亮 (ISAS/JAXA)、大島泰 (国立天文台)、D. McCammon (ウィスコンシン大): カロリメータ実験に向けた断熱消磁冷凍機の CPA ソルトピル作製と性能評価

日本天文学会 2007 年秋季年会 2007 年 9 月 26 日 ~ 28 日 (岐阜大学)

赤松弘規、石崎欣尚、大橋隆哉 (首都大理工)、向井一馬、木村俊介、吉野友崇、山崎典子、満田和久 (ISAS/JAXA)、江副祐一郎 (理研)、竹井洋 (SRON): TES 型 X 線マイクロカロリメータのインピーダンス測定による特性評価

木村俊介 (ISAS/JAXA)、益居健介 (ISAS/JAXA)、竹井洋 (SRON)、満田和久 (ISAS/JAXA)、山崎典子 (ISAS/JAXA)、藤本龍一 (金沢大)、師岡利光 (SII)、中山哲 (SIL-NT): 8 入力 SQUID による TES 型 X 線マイクロカロリメータの 2 素子読み出し

## 国内研究会

第 8 回宇宙科学シンポジウム、宇宙科学研究本部/JAXA、2008 年 1 月 8-9 日

大橋隆哉 (首都大理工)、田原譲 (名大エコトピア)、満田和久、山崎典子 (ISAS/JAXA): ダークバリオン探査ミッション DIOS の開発の現状 [S2-12]

大橋隆哉 (首都大理工)、NeXT チーム: NeXT で目指すサイエンス (その 1) [P2-25]

大橋隆哉 (首都大理工)、NeXT チーム: NeXT で目指すサイエンス (その 2) [P2-26]

輿石真樹、三石郁之、三田信、満田和久 (ISAS/JAXA)、江副祐一郎、石崎欣尚 (首都大理)、高野貴之、前田龍太郎 (産総研)、加藤史樹、杉山進 (立命大理工): 宇宙 X 線望遠鏡における軽量かつ高性能化への挑戦 [P5-17]

山崎典子、満田和久、篠崎慶亮 (ISAS/JAXA)、大橋隆哉、石崎欣尚、江副祐一郎 (首都大学東京)、藤本龍一 (金沢大): 宇宙観測へむけた TES 型マイクロカロリメータの開発の現状 [P5-27]

## 国際会議

Transducers '07 & Eurosensors XXI Lyon, June 10–14, 2007

Y. Ezoe, M. Koshiishi, M. Mita, Y. Maeda, K. Mitsuda, T. Osawa, M. Suzuki, A. Hoshino, Y. Ishisaki, T. Takano, R. Maeda: A Micromachined X-ray Collector for Space Astronomy (Late News paper)

12th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD-12), Paris, July 22–27, 2007

Y. Ishisaki, H. Kurabayashi, A. Hoshino, T. Ohashi, T. Yoshino, T. Hagihara, K. Mitsuda, K. Tanaka: Effect of On-Chip Magnetic Shielding for TES Microcalorimeters

T. Yoshino, K. Mukai, Y. Ezoe, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda, H. Kurabayashi, Y. Ishisaki, T. Takano, R. Maeda: The Noise and Energy Resolution of the Ti/Au Bilayer X-ray TES Calorimeter with an Au Absorber

T. Oshima, Y. Yamakawa, H. Kurabayashi, A. Hoshino, Y. Ishisaki, T. Ohashi, K. Mitsuda, K. Tanaka: A High Energy Resolution Gamma-Ray TES Microcalorimeter with Fast Response Time

A. Hoshino, K. Tokoi, Y. Ishisaki, K. Shinozaki, D. McCammon: Fabrication of CPA Salt Pill with Circulating Solution Method

K. Mitsuda, R. Kelley, D. McCammon, J.W. den Herder, T. Ohashi: Microcalorimeter Instruments for the Spectrum-R(X)G and NeXT Missions

P.A.J. de Korte, J.V. Anquita, X. Barcons, P. Bastia, J. Beyer, F. Briones, Brockley C. Blatt, M. Bruijn, J. Bussons, A. Camon, M.T. Ceballos, D. Drung, C. Enns, L. Fabrega, G. Fraser, F. Gatti, L. Gottardi, W. Hajdas, Helistö, Panu; I. Hepburn, J. den Herder, H. Hoovers, Y. Ishisaki, M. Kiviranta, J. van der Kuur, A. Mchedlishvili, K. Mitsuda, L. Piro, J. Sese, N. Yamasaki, C. Whitford: EURECA: a European-Japanese micro-calorimeter array

SPIE Optics for EUV, X-ray, and Gamma-Ray Astronomy III San Diego, Aug 26–30, 2007

M. Koshiishi, Y. Ezoe, M. Mita, Y. Maeda, K. Mitsuda, T. Osawa, M. Suzuki, A. Hoshino, Y. Ishisaki, T. Takano, R. Maeda: The first light of a single-stage MEMS x-ray optic

S. Okada, M. Ebara, H. Mori, R. Iizuka, H. Inoue, M. Ishida, Y. Maeda, R. Nakamura, K. Suzuki, K. Someya, Y. Ishisaki, T. Hayashi, T. Shirata: Establishing the response function of the x-ray telescopes onboard the Suzaku satellite

J.W. den Herder, L. Piro, T. Ohashi, L. Amati, J. Atteia, S. Barthelmy, M. Barbera, D. Barret, S. Basso, M. Boer, S. Borgani, O. Boyarskiy, E. Branchini, G. Branduardi-Raymont, M. Briggs, G. Brunetti, C. Budtz-Jorgensen, D. Burrows, S. Campana, E. Caroli, G. Chincarini, F. Christensen, M. Cocchi, A. Comastri, A. Corsi, V. Cotroneo, P. Conconi, L. Colasanti, G. Cusamano, A. de Rosa, M. Del Santo, S. Etori, Y. Ezoe, L. Ferrari, M. Feroci, M. Finger, G. Fishman, R. Fujimoto, M. Galeazzi, A. Galli, F. Gatti, N. Gehrels, B. Gendre, G. Ghirlanda, G. Ghisellini, P. Giommi, M. Girardi, L. Guzzo, F. Haardt, I. Hepburn, W. Hermsen, H. Hoevers, A. Holland, J. In't Zand, Y. Ishisaki, H. Kawahara, N. Kawai, J. Kaastra, M. Kippen, P. A. J. de Korte, C. Kouveliotou, A. Kusenko, C. Labanti, R. Lieu, C. Macculi, K. Makishima, G. Matt, P. Mazotta, D. McCammon, M. Méndez, T. Mineo, S. Mitchell, K. Mitsuda, S. Molendi, L. Moscardini, R. Mushotzky, L. Natalucci, F. Nicastro, P. O'Brien, J. Osborne, F. Paerels, M. Page, S. Paltani, G. Pareschi, E. Perinati, C. Perola, T. Ponman, A. Rasmussen, M. Roncarelli, P. Rosati, O. Ruchayskiy, E. Quadrini, I. Sakurai, R. Salvaterra, S. Sasaki, G. Sato, J. Schaye, J. Schmidt, S. Scioritino, M. Shaposhnikov, K. Shinozaki, D. Spiga, Y. Suto, G. Tagliaferri, T. Takahashi, Y. Takei, Y. Tawara, P. Tozzi, H. Tsunemi, T. Tsuru, P. Ubertini, E. Ursino, M. Viel, J. Vink, N. White, R. Willingale, R. Wijers, K. Yoshikawa, N. Yamasaki: EDGE: explorer of diffuse emission and gamma-ray burst explosions

The Suzaku X-ray Universe, San Diego, Dec 10–12, 2007

T. Ohashi: Search for Missing Baryons (invited)

M. Tsujimoto, K. Hamaguchi, S. Yamauchi, Y. Ezoe, Y. Hyodo: Suzaku Studies of Stellar X-ray Emission

G.V. Brown, P. Beiersdorfer, D. Bodewitz, Y. Ezoe, K. Hamaguchi, M. Hanya, M. Itoh, A. Kikutani, C.A. Kilbourne, T. Kohmura, Y. Maeda, H. Negoro, F.S. Porter, Y. Tsuboi, H. Tsunemi, Y. Urata: Suzaku Observation of the X-ray Emission from Comets

Y. Ezoe, K. Futamoto, K. Masui, T. Hagihara, K. Ebisawa, K. Mitsuda, N. Terada: Suzaku Detection of the OVII emission line induced by charge exchange between solar wind and neutral gas in the Earth's exosphere near the celestial equator

Y. Takei, E.D. Miller, J.N. Bregman, S. Kimura, K. Mitsuda, N.Y. Yamasaki, T. Tamura, R. Fujimoto, T. Ohashi: No Presence of Strong O-line Excess in Coma Outskirts

A. Hoshino, J.P. Henry, T. Tawa, K. Sato, K. Tokoi, Y. Ishisaki, T. Ohashi, M. Bautz, Y. Fukazawa, N. Kawano, A. Furusawa, K. Hayashida, J. Hughes, M. Kokubun, T. Kitaguchi: X-ray Temperature and Mass Measurements to the Virial Radius of A 1413

K. Tokoi, K. Sato, Y. Ishisaki, T. Ohashi, N.Y. Yamasaki, K. Nakazawa, K. Matsushita, Y. Fukazawa, A. Hoshino, T. Tamura, C. Egawa, N. Kawano, N. Ota, N. Isobe, M. Kawaharada, H. Awaki, J.P. Huges: Suzaku Observation of HCG 62: Temperature, Abundance, and Extended Hard X-ray Emission Profiles

T. Miyaji, K. Shinozaki, Y. Ishisaki, G.C. Dewangan, Y. Ueda: Suzaku and XMM-Newton Observations of Kaz 102: A Radio Quiet QSO with Occasional Spectral Hardening

#### 4) 記者発表

佐藤浩介、床井和世、松下恭子、石崎欣尚、山崎典子、石田 学、大橋隆哉: 「元素が示す宇宙誕生以来の銀河団中の超新星爆発の数」 2007年9月25日、岐阜大学

<http://www.rs.kagu.tus.ac.jp/~ksato/gingadan.html>

寺田幸功、石田学、向井浩二、牧島一夫、堂谷忠靖、馬場彩、Sachindra Naik、林多佳由、岡田俊策、中村良子、榎戸輝揚、守上浩市: 「すざく」、白色矮星パルサーを発見! 2008年1月17日、埼玉大学

[http://www.heal.phy.saitama-u.ac.jp/~terada/01work/press\\_release2008/index\\_j.html](http://www.heal.phy.saitama-u.ac.jp/~terada/01work/press_release2008/index_j.html)

NASA Press Release No. 08-02: “White Dwarf Pulses Like a Pulsar”, 2008-01-02

[http://www.nasa.gov/centers/goddard/news/topstory/2007/whitedwarf\\_pulsar.html](http://www.nasa.gov/centers/goddard/news/topstory/2007/whitedwarf_pulsar.html)

# 光物性サブグループ

## 1. 研究活動の概要

### 1) カゴ的環境にある希土類原子のMCDによる電子状態の研究

SmFe<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub>は45 K以下で強磁性転移するので、それより低温でMCDを測定したところ、SmとFeの磁気モーメントは平行であるが、Smについては $\langle L_z \rangle$ と $\langle S_z \rangle$ がほぼ大きさが等しく逆向きであった。このことはバルク帯磁率測定で示唆される $4f^5$ ではなくて、 $4f^6$ という配置がかなり混じっていることを意味する。後者はHund基底状態で $J=0$ であるから、有限温度でインコヒーレントに $J=1$ の状態（しかし $MJ$ は同じ）が混ざるといことが考えられる。一方、結晶間の影響が大きいと、異なる $J$ だけでなく異なる $MJ$ の状態がコヒーレントに混ざるとの可能性を考慮する必要がある。このような混じり合いにおけるインコヒーレンスとコヒーレンスの競合は、実は希土類原子のラットリング運動にも関係している。一方、希土類原子をC<sub>60</sub>などのフラーレンに内包したのも、「ラットリング」運動が知られている。たとえばCe<sub>2</sub>@C<sub>80</sub>では、別の測定から2個のCe原子が互いに相手を避けながらラットリング運動していると推定されている。今年度は、単層カーボン・ナノチューブ（SWCNT）をベースにしてC<sub>60</sub>@SWCNT、C<sub>70</sub>@SWCNT、Dy@C<sub>82</sub>@SWCNTなどについて、C 1s吸収スペクトルを測定したところ $\sigma^*$ バンドの空席に明瞭な差が観測され、それぞれ内包フラーレンの $\pi$ 状態との混成の度合いを反映していると解釈される。

### 2) 金属内包フラーレンピーポッドの光電子分光

カーボンナノチューブの関連物質である金属内包フラーレンピーポッドM@C<sub>82</sub> ピーポッド（M=La、Gd、Dy）の光電子分光を、高エネルギー加速器研究機構光子ファクトリーのBL-11Dで行った。その結果、La@C<sub>82</sub> ピーポッドでは内包によって電荷移動が起こり、SOMO（singly occupied molecular orbital）レベルがフェルミ準位近くに観測された。このことは、もしホールドーピングがなされれば容易にマルチキャリア導体になることを示唆している。また、Dy@C<sub>82</sub> ピーポッドでは、SWCNTへの内包過程においてC<sub>82</sub> ケージからDyに0.1個の電子移動が観測された。このように、M@C<sub>82</sub> ピーポッドの実験では、新規ナノデバイスへの応用研究へつながる結果が得られた。

### 3) 半導体量子ドット増感太陽電池電極の硬 X 線光電子分光

CdSe量子ドットを吸着させたナノ構造TiO<sub>2</sub>電極を用いた半導体量子ドット増感太陽電池電極の光電変換効率の向上を目指すためには、電極の電子構造を知る必要がある。そこで、SPring-8の放射光（光子エネルギーは約6 keV）を利用し、硬 X 線光電子分光によって調べた。ナノ構造TiO<sub>2</sub>電極は、平均粒径27 nmのTiO<sub>2</sub>ナノ粒子にCdSe量子ドットを18、30、48時間成長させて準備した。30時間と48時間の試料では、結合エネルギー1.3 eVから状態密度の立ち上がり、可視光のエネルギー領域に対応する1.6 eVから3.2 eVまでの状態密度が増大していることが分かった。

### 4) 軟 X 線パルスの短縮化の試み

19年度は、18年度に行われたアンジュレータにテーパーを付加する技術の確立を基礎にして、2光子相関の本格的測定を行った。まず、測定はアナログ相関をとる方式を採用し、相関計としては3 GHz帯域のダブル・バランスト・ミキサーを用いた。測定では、圧倒的に多数を占める偽の相関出力を差し引くために、遅延時間変調方式を採用した。すなわち、プリアンプにて増幅された2つの信号の一方は、2 nsecの遅延と無遅延の回路の間を約11 Hzでスイッチする。他方の信号は無遅延であるので、この変調は、物理的に真の相関を含む状況と全く含まない状況をスイッチすることを意味する。この変調周波数

を参照周波数として、ロックイン・アンプで真の相関を抽出するという方式が本測定の見目である。測定は、アンジュレータにテーパーを付加しない場合と付加した場合を比較することで行われた。その結果、テーパー無しに比較して、テーパーを付加した場合は、相関率が 36 %まで減少した。このことは、チャープされたパルスをも 2 重回折格子を通すことにより光子波束長が 36 %まで短くなったことを意味する。これを光子波束長に換算すると 0.8 フェムト秒であり、レーザーの短パルスより遙かに短いパルス長を実現出来たことを意味する。また、従来の 2 光子相関測定とは異なり、分光器などで波束長を増大させることなく、あるがままの短い波束長で 2 光子相関を測定出来たことも、特筆に値する。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

N. Sasaki, Y. Takayama, S. Nakamura, H. Ishii, T. Miyahara and H. Sugawara: Resonant-Inverse Photoemission Study of Pr Compounds in  $4d-4f$  Excitation Region, J. Phys. Soc. Jpn. Vol. 76, No. 5 (2007) 057703.

### 2) 学会講演

物理学会 2007 年春季大会（鹿児島大学郡元キャンパス，2007 年 3 月 18 日－21 日）

中山裕二、藤木伸一郎、佐々木直也、木原英夫、塩澤秀次、高山泰弘、石井廣義、宮原恒昱、児玉健、鈴木信三、阿知波洋次、片浦弘道、仲武昌史、齋藤智彦：フラーレンピーポッドの光電子分光

藤木伸一郎、中山裕二、大熊隼人、平戸康晴、宮原恒昱、石井廣義、高山泰弘：角度分解共鳴逆光電子分光装置の開発

大熊隼人、宮原恒昱、石井廣義、高山泰弘、上窪雅清、佐々木直也、中山裕二、藤木伸一郎、小出常晴、朝倉大輔：PrFe<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> および SmFe<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> における内殻吸収磁気円二色性

物理学会第 62 回年次大会（北海道大学札幌キャンパス，2007 年 9 月 21 日－24 日）

石井廣義、島田賢也、沈青、豊田太郎、宮原恒昱、有田将司、生天目博文、谷口雅樹、齋藤祐児、武田幸治、大和田謙二、稲見俊哉、池永英司、小林啓介：CdSe 量子ドットを吸着したナノ構造 TiO<sub>2</sub> 電極の硬 X 線光電子分光

中山裕二、藤木伸一郎、佐々木直也、木原英夫、塩澤秀次、高山泰弘、石井廣義、宮原恒昱、児玉健、鈴木信三、阿知波洋次、片浦弘道、仲武昌史、齋藤智彦：フラーレンピーポッドの光電子分光 II

藤木伸一郎、土屋公央、佐々木洋征、大熊隼人、中山裕二、石川淳、塩屋達郎、帯名崇、山本樹、高山泰弘、宮原恒昱：軟 X 線放射光のパルス長短縮化の研究

ナノ学会第 5 回大会（つくば国際会議場，2007 年 5 月 21 日－23 日）

石井廣義、島田賢也、沈青、豊田太郎、宮原恒昱、有田将司、生天目博文、谷口雅樹、齋藤祐児、武田幸治、大和田謙二、稲見俊哉、池永英司、小林啓介：CdSe 量子ドットを吸着したナノ構造 TiO<sub>2</sub> 電極の硬 X 線光電子分光

第 21 回放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム（立命館大学草津キャンパス，2008 年 1 月 12 日－14 日）

平戸康晴、石井廣義、島田賢也、沈青、豊田太郎、宮原恒昱、有田将司、生天目博文、谷口雅樹、齋藤祐児、武田幸治、大和田謙二、稲見俊哉、池永英司、小林啓介：CdSe 量子ドットを吸着したナノ構造 TiO<sub>2</sub> 電極の硬 X 線光電子分光

中山裕二、藤木伸一郎、佐々木直也、木原英夫、塩澤秀次、高山泰弘、石井廣義、宮原恒昱、児玉健、鈴木信三、阿知波洋次、片浦弘道、仲武昌史、齋藤智彦：フラーレンピーポッドの光電子分光 II

石川淳、藤木伸一郎、土屋公央、佐々木洋征、大熊隼人、中山裕二、塩屋達郎、帯名崇、山本樹、高山泰弘、宮原恒昱：軟 X 線放射光のパルス長短縮化の研究

#### 第 25 回 PF シンポジウム (フォトンファクトリー, 2008 年 3 月 18 - 19 日)

中山裕二、藤木伸一郎、平戸康晴、塩澤秀次、高山泰弘、石井廣義、宮原恒昱、真庭豊、児玉健、鈴木信三、阿知波洋次、片浦弘道、仲武昌史、齋藤智彦、小澤健一、吉田鉄平、鎌倉望：金属内包フラーレンを内包した単層カーボンナノチューブの光電子分光

藤木伸一郎、土屋公央、石川淳、大熊隼人、宮原恒昱、佐々木洋征、帯名崇、塩屋達郎、山本樹：軟 X 線放射光のパルス長短縮化の基礎研究

#### 国際会議

The 15th International Conference on Vacuum Ultraviolet Radiation Physics,  
Berlin, Germany, July 29-August 3, 2007.

T. Miyahara, K. Tsuchiya, H. Sasaki, S. Yamamoto, S. Shioya, S. Fujiki, Y. Nakayama, H. Okuma, Y. Takayama: A proposal and a preliminary experiment for shortening soft-x-ray pulses

International Winterschool on Electronic properties of Novel Materials,  
Kirchberg/Tirol, Austria, March 01-08, 2008.

Y. Nakayama, S. Fujiki, Y. Hirado, H. Shiozawa, H. Ishii, T. Miyahara, Y. Maniwa, T. Kodama, Y. Achiba, H. Kataura, M. Nakatake and T. Saitoh: Photoemission Study of Electronic Structures of Fullerene and Metallofullerene Peapods

The 12th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation,  
Hiroshima, Japan, March 13-14, 2008

Y. Hirado, H. Ishii, K. Shimada, Q. Shen, T. Toyoda, K. Tanaka, K. Jiang, T. Miyahara, H. Namatame, M. Taniguchi, S. Ueda, R. Yamashita, H. Yoshikawa, and K. Kobayashi: Hard X-ray Photoemission Spectroscopy of Nanostructured TiO<sub>2</sub> Electrodes Adsorbed with CdSe Quantum Dots

#### **3) 学会誌等**

石井廣義：「単層 CNT の特異な電子状態の観測」、ナノカーボンハンドブック、遠藤守信、飯島澄男監修、エヌ・ティー・エス (2007) p. 149-154.

# 電子物性研究サブグループ

## 1. 研究活動の概要

本サブグループが研究対象としている物質系は希土類などの f-電子を含む強相関電子系物質、及びナノ構造を持つ磁性体/非磁性体複合系との二つに大きく分類される前者についてはフラックス法引き上げ法超高真空帯熔融法高圧結晶育成法などを用いて自ら純良単結晶を育成し磁気特性電子輸送測定熱測定などの基本特性を測定するとともに多くの研究者との共同研究を行っている後者については企業等の先端技術で作製されたサンプルを時間依存伝導現象に着目した特殊な測定技術を用いて研究している

### 1) f-電子系強相関伝導物質

本研究室ではこれまで f-電子と伝導電子の強い相関効果に起因する新奇現象を探索しその機構を解明することを目的として希土類やアクチナイド元素を含む、興味深い物性が報告されている典型的化合物及び新奇特性が期待される新化合物の純良単結晶を育成し研究を進めてきた最近は特に充填スクッテルダイト構造を持つ化合物  $RT_4X_{12}$  (R:希土類、T:遷移金属、X:P、As、Sb) を主要な研究対象としている。充填スクッテルダイト化合物はその構成要素 (R、T、X) の組み合わせにより純良結晶の育成条件が大きく異なる当初は、興味深い物性が期待される軽希土類に重点を絞り、常圧フラックス法により、(T=Fe、Ru、X=P) 及び (T=Ru、Os、X=Sb) の組み合わせで純良単結晶を育成し新奇物性の発見と、その機構の解明を中心に研究を進めた。これらの系の示す多様な振る舞いについての理解は、多くの研究者との共同研究により、かなり深化したといえるが、常圧下での合成が困難な As や Sb 系充填スクッテルダイトについては、いまだ物性の評価自体が不十分な状況のままである。また、高圧下で合成された試料で測定された場合、どうしても得られた結果における試料の不完全性の影響が避けられない。従って、平成 19 年度は特に、常圧フラックス法では合成が困難な、As-系、Sb-系充填スクッテルダイト化合物を高温高圧下で合成することに重点を置いた。

同時に、解決すべき課題が残されている Pr-系、Sm-系の重点物質については、常圧フラックス法により純良単結晶し、多種の手法による共同研究を進めた。ここでは以上の幾つかを選んで説明を行う。

#### 1-1) 高圧下での As 系、Sb 系充填スクッテルダイト化合物の純良結晶合成と物性評価

蒸気圧が高く合成が困難な As 系のうち、d バンドの大きな影響が予想される、 $RFe_4As_{12}$  (R:La、Ce、Pr) に高圧下長時間合成法 ( 4 GPa、1,100 K ) を適用したところ、純良な多結晶試料の合成に成功した。 $LaFe_4As_{12}$  の残留抵抗比 (RRR) は 64 であり、これまでの高圧合成法により得られた試料に比較して格段に純良性が改善している。磁気、及び比熱測定の結果、転移温度 5.2 K において弱い遍歴電子強磁性転移を示すことが分かった。これは、バンド計算の予測から、フェルミ順位における Fe の 3d バンド由来の高い電子状態密度  $\{D(E_F)\}$  によるとして説明できるようにも見えるが、X サイトを系統的に P As Sb と置き換えた場合の状態密度の変化と矛盾する。状態密度は、P As Sb と系統的に増加するのに対し、実験的には  $LaFe_4P_{12}$  も  $LaFe_4Sb_{12}$  も最低温まで強磁性を示さないのである。更に輸送測定を行い、 $LaFe_4Sb_{12}$  では大きな磁気揺らぎが低温まで残っていることから、この揺らぎが強磁性転移を抑制している可能性を提案した。

更に、高温高圧下でのフラックス法を試みたところ、RRR が 250 という極めて純良性の高い、寸法 1mm 程度の  $LaFe_4Sb_{12}$  単結晶育成に成功した。これは、de Haas-van Alphen 効果の測定に適う条件を満たしており、フェルミ面、及び有効質量の直接測定を計画している。

また、Ce Pr 系の単結晶の育成にも成功しており、特に、Ce の欠損も僅かで、焼結体で危惧される粒子散乱も無視できる、Ce 充填スクッテルダイトの本質的な振る舞いを明らかにできる条件が揃ったといえる。

#### 1-2) SmOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> の価数揺動と重い電子状態

我々は、SmOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> が Sm 系としては最も重い電子系であり、しかも重い電子状態がそれまでの Ce や U 系の重い電子状態と異なり、磁場に極めて鈍感なことを見出し報告した (2005)。その特殊性から、この物質は充填スクッテルダイトの中でも、重要な位置を占めており、重い電子の起源として、Sb<sub>12</sub> カゴ中の Sm イオンの非調和振動などが考えられているが、未だ明らかにされていない。最近、共同研究を進めている二つのグループ {水牧、筒井氏 (JASRI) による L 端 XAS 測定及び山崎、今田、菅氏 (阪大基礎工) による硬 X 線分光} により、Sm の平均価数が室温で既に 3 価から大きくずれており、約 150 K 以下で更に減少し 2.76 程度となることを見出した。この重い電子状態と共存する価数揺動状態は、この物質の特異な重い電子状態を理解する重要な結果である。

#### 1-3) 重い電子強磁性体 SmFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub> のフェルミ面・電子輸送特性

SmFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub> は重い電子的振舞いを示しながら弱い強磁性を示すなどの興味深い物質であるが、de Haas-van Alphen (dHvA) 効果の測定によるフェルミ面の評価や質量増強の直接観測も行われておらず、基本的な理解が得られたとはいえない。丹念に最適育成条件を絞り込み、SmFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub> 単結晶としては最も純良 (RRR= 410) な試料を育成し、dHvA 測定と高精度の輸送測定が可能な大きさを持つ試料の育成に成功した。これを用い、小さな球状フェルミ面から生じる、ただ一つの dHvA 振動ブランチの観測に初めて成功した。結果を、参照物質となる LaFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub> 及び NdFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub> の dHvA 実験に関する報告と比較し、これまで他の手法で確かめられている Sm 価数 (= 3) を考慮に入れて、以下のような結論に整理できる。(a) 信号は LaFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub> の 47 バンドホールフェルミ面に起因するものであり、球状フェルミ面としては異例に大きな異方性を持つ。(b) 参照物質 LaFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub> に比較し最高 4 倍もの質量増強がある。(c) 未観測のもう 1 枚のフェルミ面が存在する。(d) 質量増強が磁場変化に極めて鈍感であり、上記の SmOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> の質量増強機構を考える上でも、重要な結果である。

#### 1-4) CeOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> の低温秩序相

CeOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> が約 1K 以下の低温で示す秩序相の磁気異方性を比熱測定を中心に調べた。相境界の異方性が、(Ce,La)B<sub>6</sub> 系で観測されているものと定性的に同じであることを明らかにした。このことは、CeOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> の低温秩序相において、Ce イオンの持つ多極子が重要な役割を果たしている (多極子秩序の可能性を持つ) ことを示している。

#### 1-5) 中性子散乱実験

強相関 f 電子系におけるいわゆる「隠れた秩序」の典型例として知られていた (Ce,La)B<sub>6</sub> で現れる IV 相において、単結晶中性子弾性散乱実験を行ったところ、極めて微弱な超格子反射の信号を検出することに初めて成功し、IV 相の秩序が Ce 4f 電子の磁気八極子による新奇な秩序であることを微視的に確認した。本研究の意義は、IV 相の秩序を中性子散乱実験により初めて直接微視的に観測したこと、かつ、今回行ったような短波長中性子を用いた中性子散乱実験が磁気多極子秩序の微視的状态を明らかにする上で他の物質へも適用可能な一般的な手法になりうることを実証したことにある (J. Phys. Soc. Jpn. 注目論文、2007 年 9 月 21 日付の科学新聞に関連記事掲載)。

前年度から引き続き、充填スクッテルダイト超伝導体 PrOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> の非弾性中性子散乱を継続して行い、特にその低エネルギー磁気励起の磁場依存性を詳しく調べた。

高圧合成により作成された高充填スクッテルダイト PrFe<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> のパルス中性子を用いた多結晶非弾性散乱実験を行った結果、この系の 4f 電子結晶場基底状態は非磁性一重項であり、その励起状態は超伝導体 PrOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> と同様に Th 対称性の効果が強くはたらいっていることが微視的に明らかになった。

(以上のテーマに加え多くの充填スクッテルダイトに関する研究が、本学:神木正史客員教授、徳島大学:菅原仁准教授、東北大学:岩佐和晃准教授ほか特定領域研究「充填スクッテルダイト構造に創出する新しい量子多電子状態の展開」のメンバーの方々、更には国内外の多くの方々との共同研究として進め

られた)

## 2) ナノ磁性体の電気伝導

電子は電荷とスピン磁気モーメントの二つの特性を持つが、通常物質中では、電荷は伝導現象にのみ、スピンは磁性にのみ現れ、伝導にスピンが直接顔を出すことはなかった。近年の微細加工技術を利用すると、電子がスピンの記憶を保持する長さに比較して微細な磁性体と非磁性体を組み合わせたナノ構造の作製が可能になり、スピンと電荷が共に主役を務める舞台が用意された。最近、特に、スピンの方向を揃えた電流をナノ強磁性体に流すことにより、その磁気モーメントの向きを変える“スピントランスファー効果”が、注目されている。これは、電流を運ぶ電子が同時に磁気モーメントを運び、その量が大きくなるとナノ磁性体全体の磁化を反転することによる。これにより、外か磁場を加えなくとも、ハードディスクの記録領域の磁気モーメントの向きを制御できることから、応用の観点からの研究が進められている。これを実現するには、微細なナノ強磁性体と、それと磁気的には独立したスピン分極電流源からなるナノ回路が必要になるが、これは基礎物理学的観点からも興味深い対象である。本年度は、二つの強磁性体と絶縁層で構成される TMR ( Tunnel magnetoresistance ) 素子  $\sim 100\text{nm} \times 100\text{nm}$  のサンプルを用いて、磁気抵抗および時間依存伝導現象に着目して研究を進めた。静電破壊を克服する技術探索に多くの時間を必要としたが、顕著な  $1/f$  型ノイズが、磁氣的起源 ( 微細強磁性層の磁気揺らぎ ) および電氣的起源 ( トンネル電子の絶縁層内での不規則トラッピング ) の両方の起源を持つ状況にあることがわかってきた ( このテーマは、SRC からの試料提供と支援を受けて研究が進められた )。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

Observation of Symmetry Lowering Associated with the Metal-insulator transition in  $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$  by  $^{101}\text{Ru}$ -NQR: S. Masaki, T. Mito, M. Takemura, S. Wada, H. Harima, D. Kikuchi, H. Sato, H. Sugawara, N. Takeda, G.-q. Zheng, J. Phys. Soc. Jpn., **76** (2007) 043714 (4 pages).

On the Symmetry of Low-Field Ordered Phase of  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ :  $^{31}\text{P}$  NMR, J. Kikuchi, M. Takigawa, H. Sugawara, and H. Sato, J. Phys. Soc. Jpn., **76** (2007) 043705 (4 pages).

AF-like Ground State of Mn-DNA and Charge Transfer from Fe to Base- $\pi$ -Band in Fe-DNA: K. Mizoguchi, S. Tanaka, M. Ojima, S. Sano, M. Nagatori, H. Sakamoto, Y. Yonezawa, Y. Aoki, H. Sato, K. Furukawa, and T. Nakamura, J. Phys. Soc. Jpn. **76** (2007) 043801 (4 pages).

Elastic properties of the non-Fermi-liquid metal  $\text{CeRu}_4\text{Sb}_{12}$  and dense Kondo semiconductor  $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$ : Y. Nakanishi, T. Kumagai, M. Oikawa, T. Tanizawa, M. Yoshizawa, H. Sugawara and H. Sato, Phys. Rev., B **75** (2007) 134411.

Coexistence of Strongly Mixed Valence and Heavy-Fermion Character in  $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$  Studied by Soft and Hard X-Ray Spectroscopy: A. Yamasaki, S. Imada, H. Higashimichi, H. Fujiwara, T. Saita, T. Miyamachi, A. Sekiyama, H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato, A. Higashiya, M. Yabashi, K. Tamasaku, D. Miwa, T. Ishikawa and S. Suga, Phys. Rev. Lett., **98** (2007) 156402.

The Unconventional Superconductivity of Skutterudite  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ : Time-Reversal Symmetry Breaking and Adjacent Field-Induced Quadrupole Ordering: Y. Aoki, T. Tayama, T. Sakakibara, K. Kuwahara, K. Iwasa, M. Kohgi, W. Higemoto, D.E. Maclaughlin, H. Sugawara and H. Sato, J. Phys. Soc. Jpn., **76** (2007) 051006 (13 pages).

The Mixed Valence States in the Unconventional Heavy Fermion Compound  $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ : M. Mizumaki, S. Tsutsui, H. Tanida, T. Uruga, D. Kikuchi, H. Sugawara and H. Sato, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **76** (2007) 053706 (4 pages).

Evolution of local magnetic state in  $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$  probed by muon spin relaxation: T.U. Ito, W. Higemoto, K. Ohishi, T. Fujimoto, R.H. Heffner, N. Nishida, K. Satoh, H. Sugawara, Y. Aoki, D. Kikuchi and H. Sato, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **76** (2007) 053707 (4 pages).

Unusual Electronic State of the Low-Carrier System  $\text{CeSb}$  under High Pressure Studied by Simultaneous Measurement of Electrical Resistivity and Lattice Parameter, A. Hannan, Y. Okayama, T. Osakabe, K. Kuwahara, and M. Kohgi, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **76** (2007) 054706 (6 pages)

Anomalous Behaviors in the Transport Properties of  $\text{CeCu}_6$  and  $\text{CeCu}_{5.9}\text{Au}_{0.1}$ : T. Namiki, H. Sato, H. Sugawara, Y. Aoki, R. Settai and Y. Onuki, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **76** (2007) 054708 (8 pages).

Angle-Resolved Magnetization Study of the Multipole Ordering in  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ : Hidekazu Sato, Toshiro Sakakibara, Takashi Tayama, Takahiro Onimaru, Hitoshi Sugawara, and Hideyuki Sato, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **76** (2007) 064701.

Phonon dispersion curves in  $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$ : C.P. Yang, H. Wang, K. Iwasa, M. Kohgi, H. Sugawara and H. Sato, *J. Phys.: Condens. Matter* **19** (2007) 226214 (5 pages).

Muon spin relaxation and hyperfine-enhanced  $^{141}\text{Pr}$  nuclear spin dynamics in  $\text{Pr}(\text{Os,Ru})_4\text{Sb}_{12}$  and  $(\text{Pr,Lu})\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$ : L. Shu, D.E. MacLaughlin, Y. Aoki, Y. Tunashima, Y. Yonezawa, S. Sanada, D. Kikuchi, H. Sato, R.H. Heffner, W. Higemoto, K. Ohishi, T.U. Ito, O.O. Bernal, A.D. Hillier, R. Kadono, A. Koda, K. Ishida, H. Sugawara, N.A. Frederick, W.M. Yuhasz, T.A. Sayles, T. Yanagisawa and M.B. Maple, *Phys. Rev. B* **76** (2007) 014527.

Synthesis, crystal structure, and physical properties of  $\text{YbTZn}$  (T=Pd, Pt, and Au) and  $\text{LuPtZn}$ : S. K. Dhar, R. Kulkarni, P. Manfrinetti, M. Pani, Y. Yonezawa, and Y. Aoki, *Phys. Rev. B* **76** (2007) 054411 (8 pages).

Effect of La Impurities on the Phase Transitions in  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ , T. Tayama, Y. Isobe, T. Sakakibara, H. Sugawara, Y. Aoki and H. Sato, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **76** (2007) 083702 (4 pages).

Detection of Neutron Scattering from Phase IV of  $\text{Ce}_{0.7}\text{La}_{0.3}\text{B}_6$ : A Confirmation of the Octupole Order, K. Kuwahara, K. Iwasa, M. Kohgi, N. Aso, M. Sera, and F. Iga, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **76** (2007) 093702 (4 pages).

Lattice dynamics of the filled skutterudite  $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$ : C. P. Yang, H. Wang, K. Iwasa, M. Kohgi, H. Sugawara, and H. Sato, *Appl. Phys. Lett.*, **90** (2007) 102503.

Superconducting Properties of Pr-Based Filled Skutterudite  $\text{PrRu}_4\text{As}_{12}$ : T. Namiki, Y. Aoki, H. Sato, C. Sekine, I. Shirogami, T. D. Matsuda, Y. Haga, and T. Yagi, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **76** (2007) 093704 (4 pages).

Nonmagnetic Ground State in Fully Filled  $\text{Pr}_x\text{Fe}_4\text{Sb}_{12}$  ( $x=1.0$ ) Synthesized under High Pressure: K. Tanaka, Y. Kawahito, Y. Yonezawa, D. Kikuchi, H. Aoki, K. Kuwahara, M. Ichihara, H. Sugawara, Y. Aoki, and H. Sato, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **76** (2007) 103704 (4 pages).

Specific-Heat Evidence for Octupolar Ordering in  $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$ : Y. Aoki, S. Sanada, D.Kikuchi, H. Sugawara, and H. Sato, J. Phys. Soc. Jpn., **76** (2007) 113703 (4 pages).

Elastic properties of the filled and unfilled skutterudite compounds: Y. Nakanishi, T. Fujino, T. Tanizawa, P. Sun, M. Nakamura, G. Yoshino, A. Ochiai, H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato and M. Yoshizawa, J. Phys.: Conference Series 92 (2007) 012072 (4 pages).

Low-lying optical modes in filled skutterudites using inelastic x-ray scattering techniques: S. Tsutsui, H. Kobayashi, J.P. Sutter, A.R. Baron, T. Hasegawa, N. Ogita, M. Udagawa, Y. Yoda, C. Sekine, I. Shirovani, D. Kikuchi, H. Sugawara and H. Sato, J. Phys.: Conference Series 92 (2007) 012171 (4 pages).

Raman scattering study of filled skutterudite compounds: N. Ogita, R. Kojima, T. Hasegawa, Y. Takasu, M. Udagawa, T. Kondo, N. Takeda, T. Ikeno, K. Ishikawa, H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato, C. Sekine and I. Shirovani, J. Phys.: Conference Series 92 (2007) 012123 (4 pages).

Softening phonon and relaxation mode in the filled skutterudite  $\text{PrT}_4\text{Sb}_{12}$  (T=Ru and Os): K. Iwasa, Y. Mori, L. Hao, Y. Murakami, M. Kohgi, H. Sugawara and H. Sato, J. Phys.: Conference Series, 92 (2007) 012122 (4 pages).

Magnetic properties of  $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$  probed by mSR: T.U. Ito, W. Higemoto, R.H. Heffner, N. Nishida, K. Satoh, H. Sugawara, Y. Aoki, D. Kikuchi, and H. Sato, J. Phys. Chem. Solids Vol. **68** (2007) 2072-2075.

Low-lying excitations at the rare-earth site due to rattling motion in the filled skutterudite  $\text{LaOs}_4\text{Sb}_{12}$  revealed by  $^{139}\text{La}$  NMR and  $^{121/123}\text{Sb}$  NQR: Y. Nakai, K. Ishida, H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato Phys. Rev. B **77**, (2008) 041101(R).

Direct Observation of Low-Energy Sm Phonon in  $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$ : S. Tsutsui, H. Kobayashi, D. Ishikawa, J. P. Sutter, A. Q. R. Baron, T. Hasegawa, N. Ogita, M. Udagawa, Y. Yoda, H. Onodera, D. Kikuchi, H. Sugawara, C. Sekine, I. Shirovani, and H. Sato, J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) 033601.

Weakly itinerant ferromagnetism in the filled skutterudite  $\text{LaFe}_4\text{As}_{12}$  : S. Tatsuoka, H. Sato, D. Kikuchi, K. Tanaka, M. Ueda, H. Aoki, T. Ikeno, K. Kuwahara, Y. Aoki, H. Sugawara, and H. Harima, J. Phys. Soc. Jpn., **77** (2008) 033701.

## 2) 学会講演

日本物理学会第 62 回年次大会 2007 年 3 月 18 日 ~ 3 月 21 日 (鹿児島大学郡元キャンパス)

與儀護, 二木治雄, 椋田秀和, 北岡良雄, 菅原仁, 佐藤英行, 武田直也:  $\text{CeTx}_4\text{Sb}_{12}$  の Sb-NMR/NQR による研究.

髭本亘, 大石一城, 幸田章宏, S.R.Saha, 門野良典, 青木勇二, 菅原仁, 佐藤英行:  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  におけるミュオンを用いたナイトシフト測定.

藤野拓也, 中西良樹, 孫培傑, 菊池文武, 中村光輝, 吉澤正人, 菊地大輔, 佐藤英行, 菅原仁: 充填型スクッテルダイト化合物  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  の圧力下における超音波測定.

田中謙弥, 菊地大輔, 川人祐介, 上田真, 青木英和, 桑原慶太郎, 菅原仁, 青木勇二, 佐藤英行: 高圧合成された  $\text{PrFe}_4\text{Sb}_{12}$  における電子輸送特性 II.

荻田典男, 小島隆介, 長谷川巧, 高須雄一, 宇田川眞行, ならず翔太, 高畠敏郎, 池生剛, 石川義和, 菅原仁, 佐藤英行:  $\text{RFe}_4\text{Sb}_{12}$ 、 $\text{RRu}_4\text{Sb}_{12}$  ( $\text{R}=\text{La}$ 、 $\text{Ce}$ 、 $\text{Pr}$ 、 $\text{Nd}$ ) のラマン散乱.

小島隆介, 荻田典男, 長谷川巧, 高須雄一, 宇田川眞行, 菅原仁, 佐藤英行: Pr 系充填スクッテルダイトのラマン散乱.

三宅厚志, A. T. Holmes, 加賀山朋子, 清水克哉, 関根ちひろ, 城谷一民, 菊池大輔, 菅原仁, 佐藤英行:  $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$  の高圧下電気抵抗、交流比熱測定 II.

山田敦司, 榊原俊郎, 菊地大輔, 佐藤英行:  $\text{PrRu}_4\text{Sb}_{12}$  の超伝導混合状態における比熱測定.

戸田静香, 米澤祐樹, 桑原慶太郎, 青木勇二, 菊地大輔, 菅原仁, 佐藤英行:  $\text{ROs}_4\text{Sb}_{12}$  ( $\text{R}=\text{La}$ 、 $\text{Ce}$ 、 $\text{Pr}$ 、 $\text{Nd}$ ) の高温比熱.

片山功多, 川崎慎司, 西山昌秀, 鄭国慶, 菅原仁, 菊地大輔, 佐藤英行:  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  の圧力下 Sb-NQR による研究 II.

森育子, 菅原仁, 真岸孝一, 齊藤隆仁, 小山晋之, 菊地大輔, 田中謙弥, 佐藤英行:  $\text{RFe}_4\text{Sb}_{12}$  ( $\text{R}=\text{Pr}$ 、 $\text{Sm}$ ) の単結晶育成と低温物性.

正木了, 竹村雅之, 水戸毅, 和田信二, 菅原仁, 菊地大輔, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト化合物  $\text{NdRu}_4\text{P}_{12}$  の NMR による研究.

菊地大輔, 田中謙弥, 川人祐介, 上田真, 龍岡翔, 篠沢明宏, 青木英和, 桑原慶太郎, 青木勇二, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト化合物  $\text{RT}_4\text{As}_{12}$  の純良結晶育成と物性 II.

渡邊彦睦, 安本百合, 上野高文, 根本祐一, 武田直也, 柳沢達也, 後藤輝孝, 落合明, 菅原仁, 佐藤英行: 超音波による充填スクッテルダイト  $\text{Pr}(\text{Os}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sb}_{12}$ 、 $\text{ROs}_4\text{Sb}_{12}$  のラットリングの研究.

米澤祐樹, 青木勇二, 桑原慶太郎, 佐藤英行, 谷田博司, 中丸仁雄, 鈴木博之, 高木滋:  $\text{SmAg}_2\text{In}$  の秩序相における低温比熱.

根本祐一, 渡邊彦睦, 安本百合, 後藤輝孝, 柳沢達也, 武田直也, 落合明, 菅原仁, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト  $\text{ROs}_4\text{Sb}_{12}$  の超音波分散とラットリング.

中井祐介, 石田憲二, 真岸孝一, 菅原仁, 菊地大輔, 佐藤英行: NMR/NQR からみた充填スクッテルダイトにおける希土類イオンのダイナミクス.

岩佐和晃, 森嘉昭, 八才麗傑, 村上洋一, 神木正史, 菅原仁, 佐藤英行:  $\text{PrT}_4\text{Sb}_{12}$  ( $\text{T} = \text{Ru}$ 、 $\text{Os}$ ) のフォノンスペクトルから見た電子-格子相互作用.

稲岡慶彦, 藤秀樹, 世良正文, 菅原仁, 佐藤英行:  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  における NMR 緩和率の磁場依存性.

永井孝幸, 八島光晴, 與儀護, 椋田秀和, 北岡良雄, 菊池大輔, 佐藤英行: Sb-NQR を用いたスクッテルダイト超伝導体  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  における La 希釈と圧力効果の研究.

磯部雄太, 田山孝, 榊原俊郎, 菅原仁, 青木勇二, 佐藤英行: 低温熱膨張、磁歪による  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  の B-T 相図の研究.

佐藤英行: 充填スクッテルダイト構造が可能にした多彩な特性.

筒井智嗣, John P. Sutter, Alfred Q.R. Baron, 長谷川巧, 荻田典男, 宇田川眞行, 菊地大輔, 菅原仁, 吉野玄人, 落合明, 佐藤英行:  $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$  のフォノン・スペクトルの温度依存性.

小手川恒, 日高宏之, 入江祐太, 小林達生, 菊地大輔, 菅原仁, 佐藤英行: 重い電子系  $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$  における  $^{121,123}\text{Sb}$ -NQR による研究.

正木了, 竹村雅之, 水戸毅, 和田信二, 菊地大輔, 佐藤英行, 武田直也, 鄭国慶: 充填スクッテルダイト化合物  $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$  の NMR/NQR.

伊藤孝, 髭本亘, 大石一城, 藤本達也, Robert H. Heffner, 西田信彦, 佐藤一彦, 菅原仁, 青木勇二, 菊池大輔, 佐藤英行:  $\mu$  SR で見た  $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$  の低温・低磁場における磁性.

青木勇二, 真田祥太郎, 菊地大輔, 菅原仁, 佐藤英行:  $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$  の秩序相における核比熱.

糸部将平, 岩佐和晃, 楊昌平, 神木正史, 桑原慶太郎, 菅原仁, 佐藤英行, 阿曾尚文: 磁場下で半導体 - 金属変化を示す  $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$  における磁気相関.

日本物理学会第 62 回年次大会 2007 年 9 月 21 日 ~ 9 月 24 日 (北海道大学札幌キャンパス)

日高宏之, 戸田洋平, 小手川恒, 小林達生, 本村瑤子, 青木勇二, 菊地大輔, 佐藤英行:  $\text{Pr}(\text{Fe}_{0.95}\text{Ru}_{0.05})_4\text{P}_{12}$  の高圧下電気抵抗及び交流帯磁率測定.

青木勇二, 並木孝洋, S.R. Saha, 菅原仁, 佐藤英行:  $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$  の比熱から見た Pr イオン局所対称性.

小山幸紀, 瀧川仁, 佐藤英行, 菅原仁:  $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$  における NMR 測定.

山崎篤志, 今田真, 関山明, 藤原秀紀, 矢野正雄, 山口淳一, 舟橋元, 菅原仁, 菊地大輔, 佐藤英行, 東谷篤志, 矢橋牧名, 玉作賢治, 石川哲也, 菅滋正:  $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$  の硬 X 線光電子分光.

金子真一, 高野浩史, 菅原仁, 青木勇二, 佐藤英行, 西田信彦: 走査トンネル分光法による  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  の研究 II.

荻田典男, 小島隆介, 長谷川巧, 高須雄一, 宇田川眞行, なら津翔太, 高畠敏郎, 石川義和, 菅原仁, 池生剛, 佐藤英行: Sb 系スクッテルダイトのラマン散乱.

根本祐一, 安本百合, 山口高央, 柳澤達也, 後藤輝孝, 武田直也, 落合明, 菅原仁, 佐藤英行: 充填スクッテルダイトのラットリングとトンネリング.

片山功多, 川崎慎司, 鄭国慶, 小手川恒, 小林達生, 菅原仁, 菊地大輔, 佐藤英行:  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  の圧力下 Sb-NQR による研究 III.

稲岡慶彦, 藤秀樹, 世良正文, 菅原仁, 佐藤英行: スクッテルダイト超伝導体  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  の Sb-NMR による研究.

入江祐太, 小手川恒, 日高宏之, 小林達生, 菊地大輔, 菅原仁, 佐藤英行: スクッテルダイト化合物における NQR による電荷揺らぎの観測.

矢野和弘, 田山孝, 榊原俊郎, 佐藤英行, 青木勇二, 菅原仁:  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  常伝導相における比熱の磁場方向依存性.

磯部雄太, 田山孝, 榊原俊郎, 矢野和弘, 菅原仁, 青木勇二, 佐藤英行: 高感度熱膨張測定による  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  の秩序状態の研究.

小島隆介, 荻田典男, 長谷川巧, 高須雄一, 宇田川眞行, 菅原仁, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  のラマン散乱 II.

田平景輔, 小手川恒, 日高宏之, 小林達生, 菊池大輔, 菅原仁, 佐藤英行:  $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$  における高圧下磁化、比熱測定.

菊池大輔, 田中謙弥, 青木英和, 桑原慶太郎, 青木勇二, 菅原仁, 佐藤英行: 強磁性近藤格子  $\text{SmFe}_4\text{P}_{12}$  のフェルミ面と電子輸送特性.

戸田静香, 菊池大輔, 桑原慶太郎, 青木勇二, 佐藤英行:  $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$  単結晶における低温秩序相の磁気異方性.

岩佐和晃, 糸部将平, 楊昌平, 村上洋一, 神木正史, 菅原仁, 佐藤英行:  $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$  における低エネルギーソフトフォノン.

池生剛, 田中謙弥, 菊池大輔, 桑原慶太郎, 青木勇二, 佐藤英行, 石川義和:  $\text{NdFe}_4\text{Sb}_{12}$  における強磁性転移の充填率効果と比熱の挙動.

與儀護, 二木治雄, 棕田秀和, 北岡良雄, 菅原仁, 佐藤英行:  $\text{NdFe}_4\text{P}_{12}$  の P-NMR による研究.

岩橋由典, 菅原仁, 真岸孝一, 斉藤隆仁, 小山晋之, 菊池大輔, 佐藤英行, 摂待力生, 大貫惇睦:  $\text{LaOs}_4\text{P}_{12}$  の単結晶育成と低温物性.

真岸孝一, 岩橋由典, 菅原仁, 斉藤隆仁, 小山晋之, 田中謙弥, 菊池大輔, 佐藤英行:  $\text{ROs}_4\text{P}_{12}$  ( $\text{R} = \text{La, Ce, Pr}$ ) の NMR.

龍岡翔, 菊池大輔, 田中謙弥, 上田真, 池生剛, 桑原慶太郎, 青木勇二, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト  $\text{LaFe}_4\text{As}_{12}$  の遍歴電子強磁性.

中井祐介, 林優二郎, 石田憲二, 菅原仁, 菊池大輔, 佐藤英行: s 波超伝導体の渦糸状態における局所電子状態の NMR による研究.

正木了, 水戸毅, 和田信二, 菊池大輔, 佐藤英行, 菅原仁, 瀧川仁, 武田直也, 鄭国慶: 充填スクッテルダイト化合物  $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$  の NMR/NQR II.

吉澤正人, 中嶋健二, 中村光輝, 中西良樹, 菊池大輔, 菅原仁, 佐藤英行:  $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$  の弾性定数の不思議な磁場角度依存性.

伊藤孝, 髭本亘, 大石一城, Robert H. Heffner, 西田信彦, 佐藤一彦, 菅原仁, 青木勇二, 菊池大輔, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト化合物  $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$  の磁場中  $\mu$  SR.

第 24 回 SRC 技術報告会 2007 年 11 月 27 日 (湯河原)

Y. Aoki, S. Tamura, K. Takeda, H. Sato: Noise and transport properties of TMR read heads

「ラットリング振動が誘起する新物性」研究会 2008 年 3 月 27-29 日 (広島大学)

青木勇二、戸田静香、米澤佑樹、桑原慶太郎、菊地大輔、菅原仁、佐藤英行: 比熱から見た充填スクッテルダイトのラットリング

### 国際会議

the International Conference on Strongly Correlated Electron Systems SCES'07,  
May 14-18, 2007, Huston, USA

H. Okamura, T. Watanabe, M. Matsunami, T. Nishihara, N. Tsujii, T. Ebihara, H. Sugawara, H. Sato, Y. Onuki, Y. Isikawa, M.S. Kim, T. Takabatake, T. Nanba: Universal scaling in the optical conductivity of heavy fermion compounds

H. Kotegawa, Y. Irie, H. Hidaka, T.C. Kobayashi, D. Kikuchi, H. Sugawara, H. Sato: Observation of charge fluctuations in skutterudite compounds through an Sb-NQR measurement

Y. Nakanishi, T. Fujino, T. Tanizawaa, M. Nakamura, H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato, M. Yoshizawa: Elastic property of a high-field ordered state observed in  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$

K. Kuwahara, M. Takagi, K. Iwasa, S. Itobe, D. Kikuchi, Y. Aoki, M. Kohgi, H. Sato, H. Sugawara: Crystal field excitations in the filled skutterudite  $\text{NdOs}_4\text{Sb}_{12}$

H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato, T. Endo, R. Settai, Y. Onuki: de Haas-van Alphen effect in  $\text{PrOs}_4\text{P}_{12}$

T. Sakakibara, J. Custers, K. Yano, A. Yamada, T. Tayama, Y. Aoki, H. Sato, H. Sugawara, H. Amitsuka, M. Yokoyama: Probing the nodal structures of heavy electron superconductors by means of specific heat measurements in magnetic fields

Y. Nakai, Y. Hayashi, K. Ishida, H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato: Site-selective NMR study of the vortex state in an *s*-wave superconductor

A. Miyake, A.T. Holmes, T. Kagayama, K. Shimizu, C. Sekine, I. Shirotni, D. Kikuchi, H. Sugawara, H. Sato: Electrical resistivity and AC-calorimetric measurements of  $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$  under pressure

Y. Aoki, S. Sanada, D. Kikuchi, H. Sugawara, H. Sato: Octupole ordering in filled-skutterudite  $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$

S. Masaki, T. Mito, M. Takemura, S. Wada, H. Harima, D. Kikuchi, H. Sato, H. Sugawara, N. Takeda, G.-q. Zheng: Ru-NQR studies on filled skutterudite compounds

T. Mito, S. Tomisawa, S. Masaki, M. Takemura, S. Wada, H. Harima, Y. Kato, M. Kosaka, D. Kikuchi, H. Sato, H. Sugawara, N. Takeda, G.-q. Zheng: NQR investigation on multipolar ordering systems

T.U. Ito, W. Higemoto, K. Ohishi, R.H. Heffner, N. Nishida, K. Satoh, H. Sugawara, Y. Aoki, D. Kikuchi, H. Sato: Muon Knight shift measurements in possible octupole ordering system  $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$

International Conference on "New Quantum Phenomena in Skutterudite and Related Systems",  
September 27-30, 2007, Kobe, Japan

Hideyuki Sato, Daisuke Kikuchi, Kenya Tanaka, Makoto Ueda, Hidekazu Aoki, Tsuyoshi Ikeno, Sho Tatsuoka, Keitaro Kuwahara, Yuji Aoki, Masafumi Kohgi, Hitoshi Sugawara, Kazuaki Iwasa, and Hisatomo Harima (Invited): Novel Features Realized in the Filled Skutterudite Structure

S. Raymond, K. Kuwahara, K. Kaneko, K. Iwasa, M. Kohgi, A. Hiess, M.-A. Méasson, J. Flouquet, N. Metoki, H. Sugawara, Y. Aoki, and H. Sato: Inelastic Neutron Scattering Study of the Heavy Fermion Superconductor  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$

Mamoru Yogi, Takayuki Nagai, Yoju Imamura, Hidekazu Mukuda, Yoshio Kitaoka, Daisuke Kikuchi, Hitoshi Sugawara, Yuji Aoki, Hideyuki Sato, and Hisatomo Harima: Sb-NQR Probe for Multiband Superconductivity in Filled-Skutterudite Compounds  $(\text{Pr}_{1-x}\text{La}_x)\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$

Kazuaki Iwasa, Lijie Hao, Youichi Murakami, Masahumi Kohgi, Keitaro Kuwahara, Hitoshi Sugawara, Tatsuma D. Matsuda, Yuji Aoki, Hideyuki Sato, Jean-Michel Mignot, and Arsen Gukasov: Field Induced Magnetic Moment Distribution in the Ordered Phase of  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$

Takashi Tayama, Yuta Isobe, Toshiro Sakakibara, Hitoshi Sugawara, Yuji Aoki, and Hideyuki Sato: Magnetic Phase Diagram of  $\text{Pr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_4\text{P}_{12}$  ( $0 \leq x \leq 0.15$ )

Masahito Yoshizawa, Peijie Sun, Mitsuteru Nakamura, Yoshiki Nakanishi, Chihiro Sekine, Ichimin Shirotani, Daisuke Kikuchi, Hitoshi Sugawara, and Hideyuki Sato: Exploring Characteristic Electronic States in Filled Skutterudites by Ultrasonic Measurements —Multipole Ordered State in  $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$ —

Hisashi Kotegawa, Keisuke Tabira, Yuta Irie, Hiroyuki Hidaka, Tatsu C Kobayashi, Daisuke Kikuchi, Kenya Tanaka, Sho Tatsuoka, Hitoshi Sugawara, and Hideyuki Sato: Anomalous Kondo Effect and Ordered State in Heavy Fermion System  $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ : Resistivity, Sb-NQR, and Magnetization Measurements under High Pressure

A. Pourret, K. Behnia, D. Kikuchi, Y. Aoki, H. Sugawara, and H. Sato: The Ground State of  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  Probed by Thermal and Thermoelectric Transport

Hitoshi Sugawara, Yoshinori Iwahashi, Ko-ichi Magishi, Takahito Saito, Kuniyuki Koyama, Hisatomo Harima, Daisuke Kikuchi, Hideyuki Sato, Toyoaki Endo, Rikio Settai, Yoshichika Onuki, Naoki Wada, Hisashi Kotegawa, and Tatsu C. Kobayashi: de Haas–van Alphen Study of the Pr-based Filled Skutterudite  $\text{PrOs}_4\text{P}_{12}$

Masayuki Udagawa, Takumi Hasegawa, Yuichi Takasu, Norio Ogita, Koichiro Suekuni, Marcos A. Avila, Toshiro Takabatake, Yoshikazu Ishikawa, Naoya Takeda, Yuichi Nemoto, Terutaka Goto, Hitoshi Sugawara, Daisuke Kikuchi, Hideyuki Sato, Chihiro Sekine, Ichimin Shirotani, Jun-Ichi Yamaura, Yohei Nagao, and Zenji Hiroi: Guest Ion Motion in Cage Structure Crystals Investigated by Raman Scattering

Yuichi Nemoto, Tatsuya Yanagisawa, Yuri Yasumoto, Haruki Kobayashi, Akio Yamaguchi, Seiji Tsuduku, Terutaka Goto, Naoya Takeda, Akira Ochiai, Hitoshi Sugawara, Hideyuki Sato, and Hideaki Kitazawa: Rattling in Clathrate Compounds of  $\text{ROs}_4\text{Sb}_{12}$  and  $\text{R}_3\text{Pd}_{20}\text{Ge}_6$

Toshiro Sakakibara, Kazuhiro Yano, Hidekazu Sato, Takashi Tayama, Jeroen Custers, Hitoshi Sugawara, Yuji Aoki, and Hideyuki Sato: Multipole Phenomena and Superconductivity in Pr-based Filled Skutterudites

Satoru Masaki, Takeshi Mito, Shinji Wada, Hitoshi Sugawara, Daisuke Kikuchi, Hideyuki Sato, Masashi Takigawa, Naoya Takeda, and Guo-qing Zheng:  $^{31}\text{P}$ -NMR Study in Single Crystal  $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$

Yoshiki Nakanishi, Takuya Fujino, Fumitake Kikuchi, Peijie Sun, Mitsuteru Nakamura, Masashi Ohashi, Gendo Ohmi, Hitoshi Sugawara, Daisuke Kikuchi, Hideyuki Sato, and Masahito Yoshizawa: Elastic Property of  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  under Hydrostatic Pressures

Ko-ichi Magishi, Yoshinori Iwahashi, Hitoshi Sugawara, Takahito Saito, Kuniyuki Koyama, Kenya Tanaka, Daisuke Kikuchi, and Hideyuki Sato:  $^{31}\text{P}$  NMR Study of Filled Skutterudite  $\text{ROs}_4\text{P}_{12}$  ( $R = \text{La}$  and  $\text{Pr}$ )

Y. Nakai, K. Ishida, H. Sugawara, D. Kikuchi, and H. Sato: Different Spin-Echo Decay Rate Behavior of  $\text{LaT}_4\text{P}_{12}$  and  $\text{LaT}_4\text{Sb}_{12}$  ( $T = \text{Fe}, \text{Ru}, \text{Os}$ ) Probed by La-NMR

Norio Ogita, Ryusuke Kojima, Takumi Hasegawa, Yuichi Takasu, Masayuki Udagawa, Toshihisa Kondo, Shouta Narazu, Toshiro Takabatake, Naoya Takeda, Yoshikazu Ishikawa, Hitoshi Sugawara, Tsuyoshi Ikeno, Daisuke Kikuchi, Hideyuki Sato, Chihiro Sekine, and Ichimin Shirotani: Raman Scattering Study of Filled Skutterudite Compounds

Satoshi Tsutsui, Hisao Kobayashi, John P. Sutter, Hiroshi Uchiyama, Alfred Q. R. Baron, Yoshitaka Yoda, Daisuke Kikuchi, Hitoshi Sugawara, Chihiro Sekine, Ichimin Shirotani, Akira Ochiai, and Hideyuki Sato: Investigation of the Anharmonic Guest Modes in Filled Skutterudites Using Inelastic X-ray Scattering Techniques

Tsuyoshi Ikeno, Kenya Tanaka, Daisuke Kikuchi, Keitaro Kuwahara, Yuji Aoki, Hideyuki Sato, and Yosikazu Isikawa: Magnetic and Specific Heat Properties of  $\text{Nd}_x\text{Fe}_4\text{Sb}_{12}$

Masaharu Matsunami, Hidekazu Okamura, Kazuyoshi Senoo, Shuhei Nagano, Chihiro Sekine, Ichimin Shirotani, Hitoshi Sugawara, Hideyuki Sato, and Takao Nanba: Optical Conductivity and Electronic Structures in Ce-Filled Skutterudites

Kazuaki Iwasa, Shouhei Itobe, Changping Yang, Youichi Murakami, Masahumi Kohgi, Keitaro Kuwahara, Hitoshi Sugawara, Hideyuki Sato, Naofumi Aso, Takashi Tayama, and Toshiro Sakakibara: Magnetic Correlation in the Ordered Phase of  $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$

Mamoru Yogi, Haruo Niki, Hidekazu Mukuda, Yoshio Kitaoka, Hitoshi Sugawara, Hideyuki Sato, and Naoya Takeda: NQR Study of Filled Skutterudite  $\text{CeT}_4\text{Sb}_{12}$  ( $T = \text{Ru}$  and  $\text{Os}$ )

Shigeru Kasahara, Kazuto Hirata, Hiroyuki Takeya, Tsuyoshi Tamegai, Hitoshi Sugawara, Daisuke Kikuchi, and Hideyuki Sato: Superconducting Double Transition in  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  Probed by Local Magnetization Measurements and Magneto-Optical Imaging

Shinji Kawasaki, Kouta Katayama, Masahide Nishiyama, Hisashi Kotegawa, Tatsuo C. Kobayashi, Hitoshi Sugawara, Daisuke Kikuchi, Hideyuki Sato, and Guo-qing Zheng: Sb-NQR Study of  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  under High Pressure

Y. Nakai, Y. Hayashi, K. Kitagawa, K. Ishida, H. Sugawara, D. Kikuchi, and H. Sato: Evidence of the Bound States of the Vortex State in an *s*-Wave Superconductor Proved by NMR Measurements

Y. Aoki, T. Namiki, S. Sanada, D. Kikuchi, S.R. Saha, H. Sugawara and H. Sato: Specific-Heat Evidence for Ordered Multipoles in  $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$  and  $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$

S. Toda, D. Kikuchi, K. Kuwahara, Y. Aoki, H. Sato: Magnetic anisotropy in the low-temperature ordered phase of  $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$

The 20th International Symposium on Superconductivity 2007, (ISS2007) Nov. 5-7, 2007, Tsukuba

H. Sato, D. Kikuchi, K. Tanaka, K. Kuwahara, Y. Aoki, M. Kohgi, H. Sugawara, K. Iwasa: Unconventional Heavy Fermion Superconductivity in  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ , (Invited)

TMU SNU Joint Seminar on Nano-Science and Related Topics, February 4-5, 2008, Tokyo, Japan

Y. Aoki: Exotic 4f-electron states realized in the nano-scale cage of filled skutterudites, (Invited)

### 3) 学会誌等

青木勇二：スクッテルダイト化合物の  $\mu$  SR、「めそん」強相関電子系の  $\mu$  SR - 重い電子系を中心として - 27 (2008) 22-26.

佐藤英行：充填スクッテルダイト構造に創出する新しい量子多電子状態、未来材料 8 (2008) 68-71.

# ナノ物性サブグループ

## 1. 研究活動の概要

本グループは、カーボンナノチューブ (CNT) などのナノ構造物質系の基礎物性を、核磁気共鳴 (NMR)、磁化測定、電気伝導度測定、X 線回折等の手法を用いて研究している。また、ナノ領域の微細試料を研究する新しい方法としての NMR の研究を行っている。2007 年度 (平成 19 年度) における研究・教育活動の概要は次のとおりである。

### 1) 単層カーボンナノチューブ (SWCNT) 内の水

SWCNT は、サブナノメートルの直径を持った疎水性の均一円筒空洞をもつ。このような空洞内の物質の構造と相転移挙動はバルク物質と異なり興味深い。図 1 に SWCNT 内部の水の相図を示した。これまでの研究により、開口処理を施した平均直径 1.17~1.44 nm の SWCNT 試料において、水は室温・飽和蒸気圧以下で SWCNT 内部に容易に吸着されること、こ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新しい構造の氷になることなどが明らかにされている。また、アイスナノチューブの融点の空洞径依存性は、よく知られたバルク領域における融点の空洞径依存性 (ケルビン式の変形) と逆の振る舞いを示す、すなわち、直径が小さくなるほど融点が上昇することが実験的に見出されている。この融点異常は、最近、アイスナノチューブの古典分子動力学計算が独立の 2 グループにより報告され実験とよい一致を得ることに成功した。本グループは、本年度、水-SWCNT 系に残された次の重要課題に取り組んだ。(1) 疎水性の SWCNT 内部に何故水が吸着されるか、(2) アイスナノチューブからバルク水へはどのように移行 (クロスオーバー) するか。本研究では、新たに e-DIPS 法により生成された平均直径が 1.7 および 2.0 nm の 2 種類の高純度 SWCNT 試料を用意し、これまでの試料と合わせて平均直径 (1.17~2.0 nm) が異なる 4 種類の試料について X 線回折実験、NMR 測定、電気抵抗測定による系統的研究を行った。その結果、SWCNT 内部への水の吸着等温線、とくにその SWCNT 直径依存性の決定に始めて成功し、疎水性の SWCNT 内部への水の吸着機構について重要な新たな知見を得た。また、融点の SWCNT 直径依存性から SWCNT 内部におけるミクロ水からマクロ水へのクロスオーバー現象の概要が明らかになった。(客野修士論文、今泉卒業研究) また、水を吸着した SWCNT のプロトン伝導特性の SWCNT 直径依存性を調べた。(尾坂卒業研究)

### 2) フラーレン 1 次元結晶の異常分子回転

単層カーボンナノチューブ (SWCNT) 内部に 1 次元配列したフラーレン  $C_{60}$  分子の回転挙動を NMR 法により調べた。実験は、平均直径 1.38 nm の SWCNT 試料を用いて気相法により作製された  $C_{60}$  ピーポッドにおいて、 $^{13}C$ -NMR スペクトルとスピン格子緩和時間を室温から 4.2 K の温度範囲、磁場 9.4 T (および 4 T) において測定した。ピーポッドの原料として、 $^{13}C$  同位体エンリッチを行ったフラーレン分子を使うことにより、SWCNT 内部の  $C_{60}$  分子の動的挙動の選択的観察を可能にした。バルク  $C_{60}$  結晶は 260 K で分子配向に関する 1 次相転移を示すことが知られているが、本研究の結果、平均直径 1.38 nm の SWCNT 内部の 1 次元  $C_{60}$  結晶は相転移を示さず、低温 (~30 K) まで高速かつ大振幅の回転運動をしていることが明らかになった。(図 2) また、この  $C_{60}$  分子回転異常の起源を明らかにするために古典分子動力学計算を行った。(花見卒業研究) 見出された大振幅の分子回転運動は、フラーレン・ピーポッドによる電子デバイス特性に重大な影響を及ぼすものと考えられる。また、本結果は、温度に依存した大振幅の回転運動を利用した、CNT 内包系の新たな応用を示唆するものである。

### 3) セメント超伝導体 C12A7 の核磁気共鳴

$12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$  (C12A7) は内径 0.4 nm 程度のケージが積み重なった結晶構造をとり、ケージ 6 個に 1 個の割合で酸素イオン ( $\text{O}^{2-}$ ) が内包されている ( $\text{C12A7}:\text{O}^{2-}$ )。C12A7: $\text{O}^{2-}$  は絶縁体であるが、内包酸素イオンを電子で置換することにより金属 ( $\text{C12A7}:2e^-$ ) となり、低温で超伝導が出現する。この金属化および超伝導の機構を解明するために  $^{27}\text{Al}$ -NMR 実験を行った。C12A7 には結晶学的に非等価な 2 つの Al サイト (site I, II) が存在するため、その各々のサイトに対応した 2 種類の共鳴線が観測された。また、C12A7 の site I からの NMR 共鳴線が金属化により高周波数側にシフト (Knight シフト) することが確認された。

### 4) SWCNT 内部のメタンおよび酸素の構造と相転移

直径 1.35 nm の SWCNT 内部のメタンの相転移挙動を NMR および計算機実験の手法により研究している。本年度は、SWCNT 内部へのメタンの充填率が 100 % 以下 (希薄吸着) の場合について、室温から 4.2 K の温度領域において調べ、気体-液体様相転移とメタンの回転に関する相転移挙動を実験的にはじめて見出した。(広津修士論文) また、2 原子分子気体である酸素が SWCNT 内部に閉じ込められた時、どのような構造と相転移挙動を示すかを計算機実験と X 線回折実験により研究した。(梅崎修士論文) SWCNT 直径に依存して、1 次元 lying、1 次元 standing、1 次元ジグザク、2 重らせん、3 重らせん、、、等の構造が現れることが明らかになった。また、X 線回折実験により、細い SWCNT 内部に実際酸素が吸着されうることを確認した。酸素は磁性分子であるから、現在、SWCNT 内部に生成される新規酸素磁性体の性質の解明を行っている。

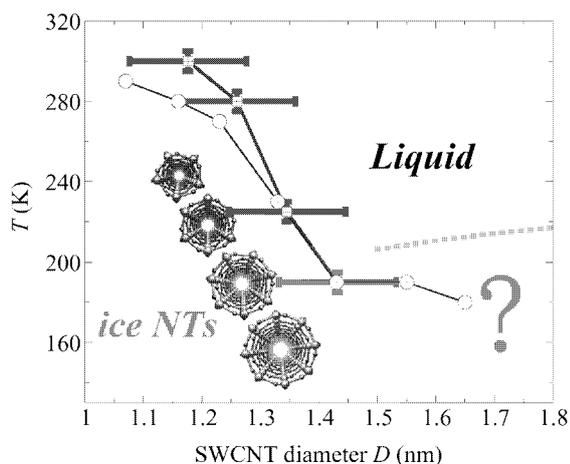


図 1: SWCNT 内部の水の相図。横軸は SWCNT の直径。○: 分子動力学計算によるアイスナノチューブ (ice NT) の融点。点線: マクロのキャピラリー内の水の融点。挿入図は 5 ~ 8 員環 ice NT の構造模式図。本年度、 $D > 1.5$  nm の領域について研究した。

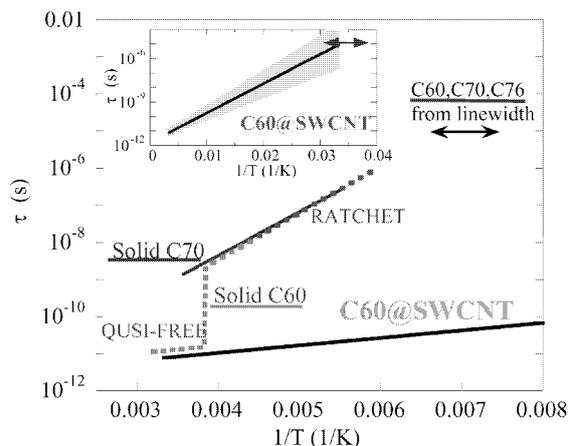


図 2: フラーレン分子の回転運動相関時間の温度依存性。C<sub>60</sub> ピーパード (C<sub>60</sub>@SWCNT) と固体 C<sub>60</sub>, C<sub>70</sub>, C<sub>76</sub> との比較。矢印: NMR スペクトルの先鋭化現象から見積もられた相関時間。他はスピン格子緩和時間  $T_1$  から求められた。低温において C<sub>60</sub> ピーパードの相関時間が極端に短いことがわかる。

### 5) 学外共同利用施設による研究、その他

高エネルギー加速器研究機構 (KEK PF) において放射光実験を行った。課題名 (課題番号): ナノカーボンの構造研究 (2006G258)、アルカリ吸蔵ゼオライトの着色現象と構造 (2006G259)。宮田耕充 (博士課程 2 年) および伊奈真吾 (修士課程 2 年生) は連携大学院・独立行政法人産業技術総合研究所ナノテクノロジー研究部門自己組織エレクトロニクスグループ (片浦グループ) において、それぞれ 金属型・半導体型カーボンナノチューブの分離法と光物性、2 層カーボンナノチューブの分離法に関する研究を行った。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

K. Matsuda, Y. Maniwa, and H. Kataura: Highly rotational C<sub>60</sub> dynamics inside single-walled carbon nanotubes: NMR observations, *Phys. Rev. B* **77** (2008) 075421 1-6.

Y. Miyata, K. Yanagi, Y. Maniwa, and H. Kataura: Highly stabilized conductivity of metallic single wall carbon nanotube thin films, *J. Phys. Chem. C* **112** (2008) 3591-3596.

H. Tou, M. Sera, Y. Maniwa, and S. Yamanaka: NMR studies of layered nitride superconductors, *International Journal of Modern Physics B* **21** (2007) 3340-3342.

Y. Miyata, T. Kawai, Y. Miyamoto, K. Yanagi, Y. Maniwa, and H. Kataura : Bond-curvature effect on burning of single-wall carbon nanotubes, *Phys. Stat. Sol. (b)* **244** (2007) 4035-4039.

Y. Miyata, T. Kawai, Y. Miyamoto, K. Yanagi, Y. Maniwa, and H. Kataura : Chirality-dependent combustion of single-walled carbon nanotubes, *J. Phys. Chem. C* **111** (2007) 9671-9677.

K. Yanagi, K. Iakoubovskii, H. Matsui, H. Matsuzaki, H. Okamoto, Y. Miyata, Y. Maniwa, S. Kazaoui, N. Minami, and H. Kataura: Photosensitive function of encapsulated dye in carbon nanotubes, *J. Am. Chem. Soc.* **129** (2007) 4992-4997.

### 2) 学会講演

日本物理学会春季大会 2007年3月18日～21日 (鹿児島大)

廣津智之, 谷津祥明, 松田和之, 門脇広明, 真庭豊, 片浦弘道 : 単層カーボン単層カーボンナノチューブに吸着したメタンの NMR.

松田和之, 真庭豊, 片浦弘道, 鈴木信三, 阿知波洋次 : C<sub>60</sub> ピーパーポッドの NMR.

久保寺利光, 門脇広明, M.A. AdamsA, 柴田薫, 佐藤卓, 松田雅昌, 真庭豊, 松田和之, 片浦弘道 : カーボンナノチューブに吸着された水分子の状態.

客野遥, 小笠原俊介, 日比寿栄, 松田和之, 門脇広明, 鈴木信三, 阿知波洋次, 真庭豊, 片浦弘道 : 水吸蔵単層カーボンナノチューブのガス吸着.

柳和宏, Konstantin Iakoubovskii, 松井弘之, 松崎弘幸, 岡本博, 宮田耕充, 真庭豊, 南信次, 片浦弘道 : 単層カーボンナノチューブに内包された色素からの光励起エネルギー移動.

中山裕二, 藤木伸一郎, 塩澤秀次, 石井廣義, 高山泰弘, 宮原恒昱, 真庭豊, 兒玉健, 鈴木信三, 阿知波洋次, 片浦弘道, 仲武昌史, 齋藤智彦 : フラーレンーパーポッドの光電子分光.

宮田耕充, 河合孝純, 宮本良之, 柳和宏, 真庭豊, 片浦弘道 : カーボンナノチューブの酸化における結合曲率の効果.

日本物理学会第 62 回年次大会 2007年9月21日～24日 (北海道大学)

客野遥, 宮田耕充, 鷹子貴之, 梅崎智之, 廣津智之, 松田和之, 門脇広明, 片浦弘道, 齋藤毅, 大嶋哲, 湯村守雄, 飯島澄男, 真庭豊 : 直径 2nm-SWCNT への水分子吸着.

廣津智之, 松田和之, 門脇広明, 真庭豊, 片浦弘道: 単層カーボンナノチューブに吸着したメタン分子の NMR.

真庭豊: カーボンナノチューブにおける内包分子交換転移 (招待講演).

梅崎智之, 廣津智之, 客野遥, 宮田耕充, 松田和之, 片浦弘道, 門脇広明, 真庭豊: 単層カーボンナノチューブへ吸着した酸素分子の研究.

宮田耕充, 柳和宏, 真庭豊, 片浦弘道: 金属型・半導体型カーボンナノチューブの光物性.

### 第 33 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム 2007 年 7 月 11 日~13 日 (九州大学)

客野遥, 小笠原俊介, 日比寿栄, 宮田耕充, 松田和之, 門脇広明, 鈴木信三, 阿知波洋次, 片浦弘道, 齋藤毅, 大嶋哲, 湯村守雄, 飯島澄男, 真庭豊: 水吸蔵単層カーボンナノチューブのガス吸着.

廣津智之, 松田和之, 鷹子貴之, 門脇広明, 真庭豊, 片浦弘道: 単層カーボンナノチューブに吸着したメタンの NMR.

宮田耕充, 柳和宏, 真庭豊, 片浦弘道: 孤立単層カーボンナノチューブのバンドル再構成.

片浦弘道, 宮田耕充, 真庭豊, 柳和宏: 紫外ラマン分光による単層カーボンナノチューブの評価.

宮田耕充, 柳和宏, 真庭豊, 片浦弘道: 高純度単層カーボンナノチューブの光物性.

### 第 34 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム 2008 年 3 月 3 日~5 日 (名城大学)

宮田耕充, 柳和宏, 真庭豊, 片浦弘道: 金属および半導体単層カーボンナノチューブの共鳴ラマン分光.

伊奈真吾, 柳和宏, 宮田耕充, 真庭豊, 片浦弘道: 密度勾配超遠心法による二層カーボンナノチューブの分離.

### 3) 学会誌等

松田和之, 真庭豊: ナノチューブ内に束縛された水分子の構造: 真空 **50** (2007) 264-269.

真庭豊, 松田和之, 客野遥, 門脇広明, 片浦弘道: 水内包カーボンナノチューブ: アイスナノチューブと交換転移, 固体物理 **42** (2007) 457-468.

真庭豊, 片浦弘道: 有機・無機・金属ナノチューブ (清水敏美/木島剛編, フロンティア出版, 2007) 第 11 章 水のナノチューブの合成と応用 265-271.

真庭豊: 有機貯蔵材料とナノ技術 (市川勝監修, シーエムシー出版, 2007) 3.2 ナノ細孔炭素材料の分子選択的吸着特性 100-112.

# 粒子ビーム物性サブグループ

## 1. 研究活動の概要

量子相転移、フラストレートした磁性体、カーボンナノチューブの3テーマについて研究している。本年度のハイライトは、d-電子系の遍歴電子反強磁性体における量子相転移のユニバーサリティクラスは何か？という物性研究の基本問題について実験的な解答を与えたことである。このタイプの典型的な物質と考えられている  $(V_{1-x}Ti_x)_2O_3$  を用いて中性子散乱実験を行い、それが spin density wave (SDW) 型の量子相転移 (QPT, Quantum Phase Transition) として非常に良く理解できることを示した。

### 1) 遍歴電子反強磁性体の量子臨界現象

最近の物性物理における中心的トピックスの一つに量子相転移がある。量子相転移は、 $T_c = 0$  K で起こる相転移であり、有限温度 ( $T_c > 0$ ) で起こる2次相転移を、圧力、原子濃度等のコントロールパラメータを変化させることにより、転移温度をゼロに調整したものとみなすことができる。有限温度の2次相転移点の近傍においては、熱的な揺らぎにより長距離秩序が壊される。これにたいして、量子相転移点 (QPT) の近傍の低温において長距離秩序を壊すのは、量子力学の法則 (不確定性原理) に従う量子揺らぎである。このため、QPT の近傍は、有限温度の相転移と質的に異なり、量子揺らぎと熱揺らぎを同時に取り入れる枠組が必要である。この10年くらい間に、QPT を取り扱う理論には著しい進歩があり、QPT には様々なユニバーサリティクラスがあることが示されている。QPT は実験的にも、圧力下の低温実験技術等の進歩に伴って、多数の系で多様に現れることが明らかにされて来た。

遍歴電子系における反強磁性磁気秩序相と常磁性フェルミ液体相の間の量子相転移の理論的研究は、1970年代にその原型が作られた。しかしこの量子相転移の実験的研究が、多くの研究者の興味の対象となり、同時に理論的な研究も進んだのは、1990年以降である。重い電子系や高温超伝導関連の酸化物等の強相関係において共通に観測される非フェルミ液体の振舞を、量子臨界現象として理解する考え方が提示された。その後、多くの研究がなされたが、この問題は未だ定説化されず hot topic として残されている。

量子相転移としては、弱相関の極限で正しいと考えられている SDW QPT と、強相関の極限から出発する locally critical QPT のどちらかであろうという説が有力視され、現在様々に議論されている。我々最近行なった f-電子系の  $Ce(Ru_{1-x}Rh_x)_2Si_2$  の中性子散乱実験は、SDW QPT を支持するかなり強力な証拠だと考えている [H. Kadowaki et al., Phys. Rev. Lett. 96, 016401 (2006)]。しかし、公平に見ると、 $x = 0.03$  の一つのサンプルで実験を行っただけなので、やや説得力に欠ける部分も残されている。そこで、同様の QPT によって支配されていると考えられる、d-電子系の強相関酸化物  $(V_{1-x}Ti_x)_2O_3$  ( $x = 0.1$ ) の中性子散乱実験を昨年度からスタートさせ、f-電子系と同じユニバーサリティクラスに属するのか、それとも違うのかについての研究を進めた。本年度はこの d-電子系の詳細な中性子非弾性散乱実験を行ない、その結果 SDW QPT を支持する実験結果を得た (図1)。これは、1970年代に我が国で開発された SCR 理論から発展した、SDW QPT を初めて d-電子系で実験的にはっきり示したという学問上たいへん意義深い研究である。詳細は、"Quantum phase transition in the itinerant antiferromagnet  $(V_{0.9}Ti_{0.1})_2O_3$ " H. Kadowaki K. Motoya, T. J. Sato, J. W. Lynn, J. A. Fernandez-Baca, J. Kikuchi, preprint <http://arxiv.org/abs/0805.1363> を参考にしてほしい。

### 2) 幾何学的フラストレーションを示す磁性体の研究

結晶格子の幾何学的な形によりフラストレーションを示す磁性体は、正三角形や正四面体を基本単位となる結晶格子を持つ物質に見られる。磁気的な相互作用の条件により、通常の長距離秩序を示すもの、

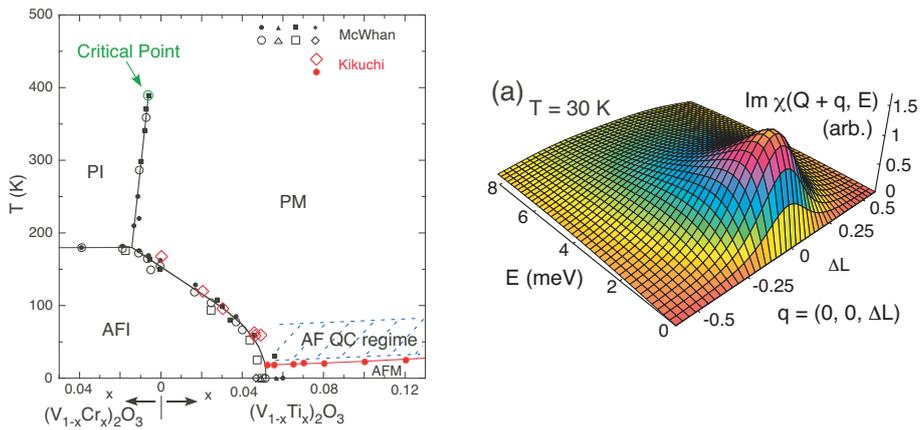


図 1:  $(V_{1-x}Ti_x)_2O_3$  の相図 (左側のパネル) と、SDW QPT の近傍に位置する  $(V_{0.9}Ti_{0.1})_2O_3$  が示す発散的な動的帯磁率のイラストレーション (右側のパネル)

磁気的相転移を絶対零度まで起こさないもの、有限温度でスピン凍結を起こすもの、スピン液体状態などの量子的基底状態を持つものなどがある。本年度はスピンアイス系  $Dy_2Ti_2O_7$  に、 $[111]$  方向の磁場をかけて、それを少しだけ傾けると出現するといわれていた、カステレイン転移の研究を、モンテカルロシミュレーションと磁化測定により行なった。カステレイン転移は、理論的には知られていたが、実験的にはほとんど研究されたことない相転移である。これはトポロジカルな性質を持つ、1次と2次相転移の中間型の性質を持つなど非常に興味深い転移である。本年度はカステレイン転移研究の準備的な段階で終わったので、今後発展を期待している。

### 3) 単層カーボンナノチューブに吸蔵された水分子の状態

単層カーボンナノチューブ内の水分子は自己組織化されて低温領域でチューブ構造 (アイスナノチューブ) を持つことに興味を持たれている。しかし現在実験に用いられる直径分布のあるカーボンナノチューブにおいて、実際に何が起きているのかという問題に関しては、はっきりしない点も多い。そこで、中性子非弾性散乱実験により観測した水の運動状態に関する非弾性スペクトルを、分子動力学を用いて定量的に解析することを目指して研究を進めた。この解析法は、計算機資源を大量に使うため今まではあまり一般には使われていなかったという事情があり、これを進めるには困難を極めたが、問題点はほぼ解決したので現在まとめている段階である (図 2)。

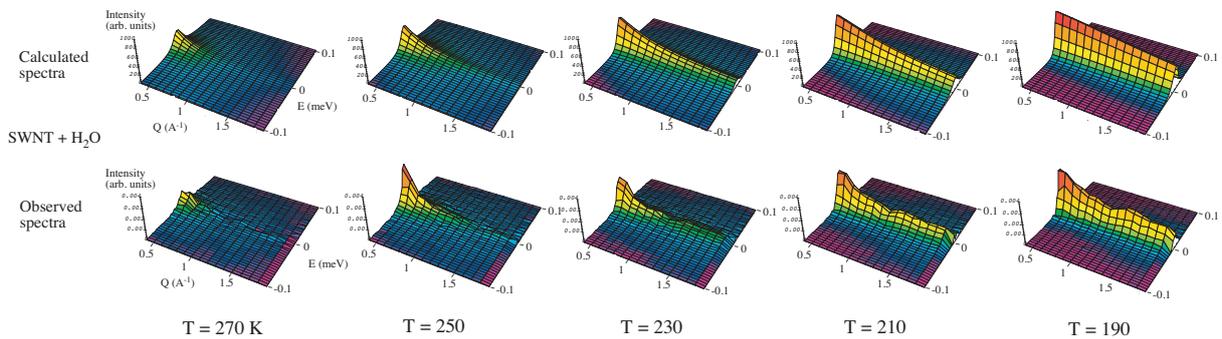


図 2: 単層カーボンナノチューブ内の水分子による中性子非弾性スペクトルの実験値 (下側) と分子動力学を用いた計算値 (上側)。

## 2. 研究業績

### 1) 学会講演

日本物理学会 2007 年春季大会 2007 年 3 月 18-21 日 (鹿児島大学)

廣津智之, 谷津祥明, 松田和之, 門脇広明, 真庭豊, 片浦弘道: 単層カーボンナノチューブに吸着したメタンの NMR

久保寺利光, 門脇広明, M.A. Adams, 柴田薫, 佐藤卓, 松田雅昌, 真庭豊, 松田和之, 片浦弘道: カーボンナノチューブに吸着された水分子の状態

客野遥, 小笠原俊介, 日比寿栄, 松田和之, 門脇広明, 鈴木信三, 阿知波洋次, 真庭豊, 片浦弘道: 水吸蔵単層カーボンナノチューブのガス吸着

日本物理学会 第 62 回年次大会 2007 年 9 月 21-24 日 (北海道大学)

門脇広明, 佐藤卓, J.W. Lynn, 菊地淳, 元屋清一郎: 遍歴電子反強磁性体  $(V_{1-x}Ti_x)_2O_3$  の量子相転移

客野遥, 宮田耕充, 鷹子貴之, 梅崎智之, 廣津智之, 松田和之, 門脇広明, 片浦弘道, 斎藤毅, 大嶋哲, 湯村守雄, 飯島澄男, 真庭豊: 直径 2nm-SWCNT への水分子吸着

廣津智之, 松田和之, 門脇広明, 真庭豊, 片浦弘道: 単層カーボンナノチューブに吸着したメタン分子の NMR

梅崎智之, 廣津智之, 客野遥, 宮田耕充, 松田和之, 片浦弘道, 門脇広明, 真庭豊: 単層カーボンナノチューブへ吸着した酸素分子の研究

# ESR 物性サブグループ

## 1. 研究活動の概要

電子スピン共鳴 (ESR) 法を中心手段にして興味ある物質について研究を進めている。ESR というと、通常は市販の X-バンド (10 GHz) や Q-バンド (36 GHz) ESR スペクトロメーター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、本研究室では測定周波数を 10 ~ 24,000 MHz にわたって可変のスペクトロメーターに加え、分子科学研究所との共同研究による 94,000 MHz までの ESR 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いる。

この様に広範な周波数にわたる ESR の研究が可能なグループは世界的に見ても例は多くない。本研究手段の特徴を幾つかあげてみよう。一つは、低次元電子系であれば、たとえ多結晶試料であってもスピンの微視的なダイナミクスの異方性を定量的に見積れる点。また、SQUID 磁束計は常磁性磁化 + 反磁性磁化の合計しか測定できないが、同一試料内の核スピンと電子スピンの磁気共鳴を同一周波数で観測すれば、反磁性に影響されない電子スピン磁化率のみを測定できる。更に、静水圧下或いは一軸変位下での ESR 実験も可能で、任意の軸のみ、或いは一様に格子定数を変えて、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を調べることができる。物構研の松本先生のご協力により、CrNiAl 材を内筒に用いた高圧用セルを用いると 3 GPa までかけることが出来るが、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 を開発している。

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デオキシリボ核酸 (DNA) は、燐酸、糖に加えて 4 種のアミノ基、グアニン (G)、シトシン (C)、アデニン (A)、チミン (T) の組合せによって構成される有機高分子であり、G-C と A-T の組み合わせにより 2 本の DNA が 2 重螺旋構造を構成する。これらのアミノ基の配列は任意に設計して合成できるフレキシビリティと、高い自己組織化能を示すことから任意の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。これらの性質に加えて電気伝導度が付与されれば、ナノエレクトロニクスの材料として有望であることから、最近、物性面からのアプローチも盛んになってきている。

一方で、人類の DNA は 2 m にも及ぶことが知られているが、放射線照射により作られた欠陥から、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、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、この未知の物質について報告される新規な現象を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、ナノエレクトロニクスの素材としての可能性を調べることを目的として研究を進めている。

DNA の電子状態を変えるには幾つかの方法が考えられる。一つは、導電性高分子へのドーピングと同じように、電子を DNA から引き抜く電子アクセプターを入れることが考えられる。例えば、ヨウ素を導入すると電気伝導度の上昇や、電荷移動の証拠が報告されている。ヨウ素をドーブした DNA の電子状態を調べるために、その ESR にも興味を持たれる。そこで、DNA フィルムにヨウ素をドーブしながらその四端子電気伝導度を調べた。実際に、電気伝導度が一桁以上にわたり上昇することが確かめられた。今後、その ESR を調べ、電子状態の変化を調べていく。

もう一つの方法は、2 価の金属イオンが DNA の塩基対の間の水素結合と入れ替わる事を利用する。多くの 2 価の金属イオンが実際に入ることを確かめてきた。典型的には、Mn を入れた Mn-DNA の電子ス

ピンを通してその電子状態の情報を得てきた。よく知られるように、DNA は湿度に依存した構造変化をするので、Mn-DNA における湿度の影響も興味深い。湿度を変えながら、Mn の ESR を追っていくと、合成直後は生体内で取ることが知られている B-form と呼ばれる、よく知られた縄ばしごをねじったような 2 重らせん構造を取る。水分を除去すると、その構造はなわばしごでコイルを巻いたような A-form に変わる。Mn-DNA でも同様な変化をする事が確かめられた。その後、もう一度、高湿度下に戻すと、天然の DNA は、再度 B-form に変わるが、Mn-DNA の場合は、Mn 間の距離が広がりはするが、B-form には戻らないことが分かった。これは、塩基対間に入ることにより、DNA 高分子骨格のリン酸アニオンとのクーロン引力による A-form と B-form 間の構造変化に伴うポテンシャルバリアの増大に起因していると結論された。東北大学の松井先生との共同研究により、2 価金属イオンの導入により、リン酸基に配位していた  $\text{Na}^+$  カチオンが抜けるためと考えられるリン酸基に関連する振動モードに顕著な変化が出ていることも、赤外吸収スペクトルから示唆されている。今後、詳しく調べていく予定である。(東北大との共同研究)

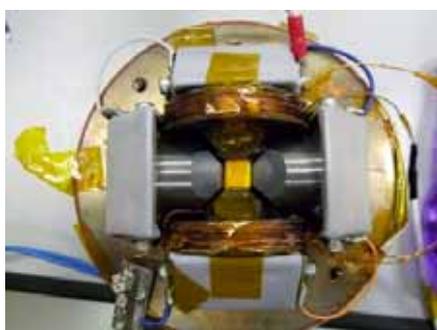


図 1: 産総研・竹下グループの cubic anvil セルを上から見た写真。2つの対向するアンビルに磁場コイルを装着している。中央の白い部分がセラミックガスケットで、その中に直径約 1 mm のコイルと試料が入っている。この上に上アンビルのついたスライドガイドが載る。上アンビルを押し下げると合計 6 つのアンビルが 6 方からガスケットを押し。

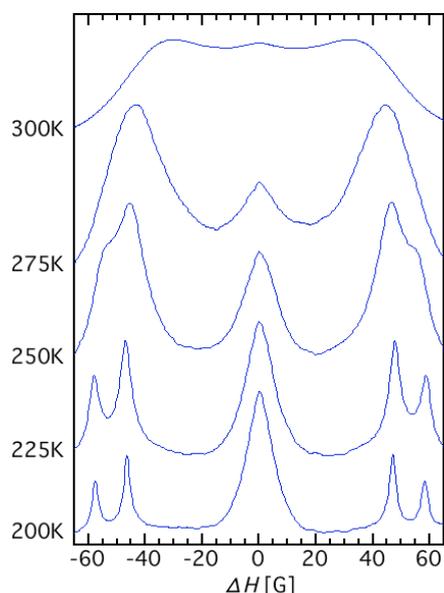


図 2: アルカリ TCNQ 錯体の X-バンド ESR スペクトル。200K では 2 対の Pake doublet と不純物に由来するキュリーの信号が観測されるが、温度上昇に伴い、Pake doublet の線幅が広がりながら間隔も狭まる様子が見える。

## 2) $(\text{BEDT-TTF})_2\text{ICl}_2$

有機電荷移動錯体  $(\text{BEDT-TTF})_2\text{ICl}_2$  は常圧、22K で反強磁性転移を起こす Mott 絶縁体であるが、8.2GPa 以上の圧力下で有機導体として最高の転移温度 14.2K で超伝導転移を示すことから注目されている。常圧での電子状態がどのように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。高圧 (3GPa ~ 10GPa) での測定のために、キュービックアンビルセルを利用した ESR 装置の開発を進めている。2mm の圧力セル内に直径 1mm 程度のコイルを巻き、粉末試料を約 1.3 mg 入れて、磁場を三角波掃引して、約 10 秒間の積算により、きれいな信号が得られた。当初は、ハム雑音に信号が覆われていたが、最終的に、ほぼハム雑音の影響のない信号を取ることが出来た。今後、実際に加圧下で温度を変えながら測定を進めていく予定である。(埼玉大、産総研との共同研究)

### 3) $\beta'$ - & $\beta''$ - ET-TCNQ

有機の電荷移動錯体の1種である、(BEDT-TTF)TCNQは、数種の異なる構造を持つ。 $\beta'$ -相は、BEDT-TTF (ET と略称) の構成する2次元シートとTCNQ鎖のシートからなるが、互いの分子面がほぼ直交している。一方、 $\beta''$ -相は、構成要素は全く同じだが、互いの分子面はほぼ平行であり、両者の構造の違いが電子状態や物性に与える影響が興味深い。どちらの構造でも、ET分子からTCNQ分子にはほぼ $\frac{1}{2}$ 個の電子が移っており、 $\beta'$ はユニットセルにそれぞれ2分子含む $\frac{1}{2}$ -充填バンドを、 $\beta''$ は $\frac{1}{4}$ -充填バンドを持つ。これまでに、 $\beta'$ -相は、常圧、330 K以下ではダイマー型モット絶縁相と考えられ、分子面の直交性のため相互作用は極端に弱く、それぞれ20 K、3.5 Kで独立に反強磁性秩序を起こすことをg値とスピン磁化率から明らかにしてきた。一方、 $\beta''$ -相は、低温で金属的なET相とDimer-Mott状態のTCNQ鎖が20K以下でスピンパイエルズ転移を起こす事、また、スピンパイエルズ相内に生成したスピンソリトンとETの伝導電子間の交換相互作用による近藤効果が起こっていることが示唆された。これらの系の常圧の電子状態が分かってきたので、クランプセルによる圧力下の電子状態の変化を調べた。圧力に対する応答は、それぞれの電子状態の特徴を良く反映していることが明らかになりつつある。(埼玉大、分子研との共同研究)

### 4) アルカリ金属-TCNQ錯体

アルカリ金属からTCNQに1つの電子が移動した錯体は、約400Kでスピンパイエルズ転移をする事が知られている。スピンパイエルズ転移温度近辺における電子、格子のダイナミクスを調べるのに適した系と考えられる。アルカリ金属はスピンを持たず、TCNQ鎖も転移温度以下ではスピンが消失する。しかし、転移温度に近づくにつれスピン磁化率が熱励起されてくる。具体的には、TCNQ分子がシングレット2量体からトリプレットに熱励起される。十分低温では、励起されたトリプレットはほとんど動かさず、乖離もしないため、所謂、Pake doubletのESR信号を与える。上図に示すように、温度上昇に伴い、線幅の増大-減少を示し、Pake doubletの間隔は急激に減少する。これらの解析から、熱励起されたトリプレットのダイナミクスの詳細が明らかになった。(産総研との共同研究)

### 5) ラジカル導電性高分子

TEMPOL (Hydroxy-tetramethylpiperidinoxyl-radical) は、>N-O・型のフリーラジカルとして、ESRの標準試料にも使われる、安定な不対電子スピンを持つ分子である。TEMPOLを構成要素とした分子結晶が、0.1K近辺で強磁性を示すことも知られている。このフリーラジカルを種々の $\pi$ -共役高分子に組み込むと、秒のオーダーで充放電が可能なラジカル2次電池の材料として有効である。京大・高分子専攻の増田研究室で合成された種々のTEMPO-高分子についてその2次電池としての性能をNECの佐藤氏が検証してきた。DNAにTEMPOラジカルをつけたTEMPO-DNAも2次電池としての性能を示すことが分かった。また、通常の2次電池とは異なり、2段階放電することも明らかにされた。この機構を検討するためにMOPAC 6を使用し、MP3/UHFで構造最適化して、TEMPO分子の分子軌道計算を行った。その結果、充電状態ではTEMPOカチオンが作られ、ラジカルに戻る過程が第一段階で、第二段階では、TEMPOアニオンが生成される事を示唆する結果が得られた。(京大、日本化成との共同研究)

### 6) Au-TTFCl錯体

TTF-Clを含むTTFハライド塩は、ハライドが混合原子価状態の時は金属的であることが知られており、ナノデバイスの要素として期待されている。最近Auを含む一次元的有機金属ハイブリッドナノワイヤー、(TTF-Cl)<sub>n</sub>Auが合成された。SQUID、Q及びWバンドESRの結果、Auは微粒子として混

じているのではなく、TTF カラム間の電荷移動に本質的に関わっている可能性が示唆された。(京都工繊大との共同研究)

## 2. 研究業績

### 1) 論文

J. Qu, F. Z. Khan, M. Satoh, J. Wada, H. Hayashi, K. Mizoguchi, and T. Masuda: Synthesis and charge/discharge properties of cellulose derivatives carrying free radicals, *Polymer* **49**, 1490-1496 (2008).

Y. Shinohara, S. Kazama, K. Mizoguchi, M. Hiraoka, H. Sakamoto, S. Masubuchi, R. Kato, K. Hiraki, and T. Takahashi : Spin Density Distribution and Electronic States in (DME-DCNQI)<sub>2</sub>M (M=Li, Ag, Cu) from High-Resolution Solid-State NMR, *Phys. Rev. B* **76**, 035128 (035121-035129) (2007).

J. Qu, T. Katsumata, M. Satoh, J. Wada, J. Igarashi, K. Mizoguchi, and T. Masuda: Synthesis and charge/discharge properties of polyacetylenes carrying 2,2,6,6-tetramethyl-1-piperidinoxy radicals, *Chemistry - A European Journal* **13**, 7965-7973 (2007).

### 2) 学会講演

日本物理学会 2007年春季大会 2007年3月18日－3月21日(鹿児島大学)

遠藤航, 坂本浩一, 溝口憲治, 谷口弘三, 竹下直, 寺倉千恵子, 高木英典, 十倉好紀:  $\text{[}^-\text{(BEDT-TTF)}_2\text{ICl}_2$  の圧力下 ESR V

加藤朝飛, 木原工, 坂本浩一, 溝口憲治, 今野信一, 風間重雄, 谷口弘三, 中村敏和, 古川貢:  $\text{[}^-\text{(BEDT-TTF)(TCNQ)}$  の ESR

木原工, 加藤朝飛, 坂本浩一, 溝口憲治, 今野信一, 風間重雄, 谷口弘三, 中村敏和, 古川貢: 周波数を変えた ESR で見る  $\text{[}^-\text{(BEDT-TTF)(TCNQ)}$  の電子物性

五十嵐潤, 坂本浩一, 溝口憲治, 勝又徹, Jinqing Qu, 増田俊夫: TEMPOL を含むポリマーの電子状態

尾島雅也, 溝口憲治, 坂本浩一, 田中俊輔, 永鳥舞, 寺倉史晃: 金属をドーブした DNA の電子状態 II

藤田義人, 風間重雄, 溝口憲治, 坂本浩一, 木原工, 加藤朝飛, 中村敏和, 古川貢, 長谷川達生: ESR による、Alkali-TCNQ の電子状態の研究

日本物理学会 第62回年次大会 2007年9月21日－9月24日(北海道大学)

藤田義人, 風間重雄, 溝口憲治, 坂本浩一, 中村敏和, 古川貢, 長谷川達生: ESR による Alkali-TCNQ の電子状態の研究 II

林泰之, 溝口憲治, 坂本浩一, 古川泰至: 活性酸素発生材料ポリアニリンの研究

永鳥舞, 溝口憲治, 坂本浩一, 田中俊輔, 尾島雅也, 寺倉史晃, 風間重雄: 金属をドーブした DNA の電子状態の湿度依存性 1

国際会議

K. Mizoguchi, T. Kihara, A. Kato, H. Sakamoto, H. Taniguchi, H. Taniguchi, T. Nakamura, H. M. Yamamoto, R. Kato : Peculiar Ground State of  $\pi$ -(BEDT-TTF)-TCNQ revealed by ESR

A. Kato, T. Kihara, K. Mizoguchi, H. Sakamoto, H. Taniguchi, S. Konno, K. Furukawa, T. Nakamura : Electronic States in  $\pi$ -(BEDT-TTF)(TCNQ)

Hirokazu Sakamoto, Wataru Endo, Kenji Mizoguchi, Hiromi Taniguchi : Magnetic Properties of  $\pi$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>ICl<sub>2</sub> Studied by ESR under Pressure

Ojima Masaya, Mai Nagatori, Shunsuke Tanaka, Hirokazu Sakamoto, Kenji Mizoguchi : Electronic states of DNA with divalent metal ions

Wataru Endo, Hirokazu Sakamoto, Kenji Mizoguchi, Hiromi Taniguchi, Nao Takeshita, Chieko Terakura, Hidenori Takagi, Yoshinori Tokura : Electronic states of  $\pi$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>ICl<sub>2</sub> and development of ESR equipment under high pressure

### 3) 学会誌等

物性の観点から見た DNA : 溝口憲治共同利用研究ハイライト 1、分子研レターズ 56、2007 年 8 月、p.52-53

導電性高分子の磁性・電子状態・ダイナミクス : 溝口憲治導電性材料技術大全集 (技術情報協会、東京、2007)、上巻、p.455-86

## 編集後記

漫才の基本は、ネタフリ、ボケ、ツッコミである。ネタフリというのは話の端緒にあたる部分だが、この段階ですでに、相手に対するボケへの期待が込められている。ボケは、ネタフリに込められた期待に応えつつ、わざとポイントを外すようなことを言って笑いを取る段階であるが、これはなかなか難しい。本当に脈絡のないことを言うと、単にわけがわからないだけだし、くだらない駄洒落ではせっかくのネタフリが台無しになる。ちょっと人には思いつかないような視点でボケてこそ、「うまいことを言うなあ」と、人は感心も込めて大笑いするのである。

ボケに対してツッコミを入れるわけであるが、これがないとまったく締まらない。ツッコミにはいろいろなパターンがあるが、一番シンプルで有名なものが、相手のボケに対して「何でやねん」と言うものである。これ自体は面白いフレーズではないが、相手のボケに対してタイミング良く決まると、なかなか小気味よく感じる。また、相手のボケにいったん乗ったふりをして、それからツッコミを入れる、いわゆるノリツッコミという技もある。最近では、「欧米か」に典型的に見られるように、固定化されたワンフレーズのツッコミに向かってボケを繰り返し連発するというパターンも流行っている。

なぜこのような話をはじめたかという、ネタフリ、ボケ、ツッコミというのが、実は大学教員に必要な「能力」を端的に表しているのではないかと感じるからである。またおかしなことを、と思われるかもしれないが、ネタフリとは、学生に適切な研究テーマを与え、教育・指導すること、ボケとは、独創性に溢れた研究をすること、そしてツッコミとは、評価者としての視点を持つこと、と解釈すると、あながち的外れではないように思う。教育、研究、評価の三つの能力を兼ね備えることが、大学教員に求められているのではないだろうか。

とはいえ、それら三つを兼ね備えるというのはなかなか難しい。また、仮に三つの能力を兼備していても、全てがそこそこであるくらいなら、どれか一つが傑出している方がよいのかもしれない。実際、漫才でも、コンビやトリオで、ボケ役、ツッコミ役が決まっていることが多い。それは、個人の能力で自然に決まることもあれば、与えられた役割として遂行することが求められる場合もあるだろう。大学においても、ネタフリが上手な人、ひたすらボケに徹する人、そして的確なツッコミのできる人、さまざまだと思う。その見極めが、個人の能力や個性をうまく活かす組織運営につながるのだろう。

さて、物理学専攻における昨年度の「ネタフリ」「ボケ」「ツッコミ」はいかがだっただろうか。良いネタフリ、見事なボケ、切れ味鋭いツッコミはあっただろうか。原稿を書いた側も読む側も、そういう目でこの平成19年度年次報告を眺め直してみると、案外面白い発見があるかもしれない。

(堀田 貴嗣 記)

平成19年度年次報告編集委員

宮原恒昱 (2007年度教室主任)

鈴木 徹

堀田貴嗣

坂本浩一