

## サブグループ活動状況 平成 17 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

以下に素粒子理論サブグループの研究活動を (1-3):ニュートリノ物理の現象論、(4-6):それ以外の研究項目の順序で記述する。

ニュートリノ質量とレプトンフレーバー混合の存在の確立を受け、ニュートリノ物理のフロンティアは未知の (1-3) 角の決定、CP 非保存の探索、ニュートリノ質量パターンの決定とその意味するものの解明、さらには、未発見の新しい相互作用の探索に向かう。

### 1) ニュートリノ振動による新しい物理の探求

標準模型を超える物理が存在する場合、その兆候は標準模型のエネルギースケールでは標準模型と高いエネルギースケールの比により抑制されるが、量子力学的干渉を使うニュートリノ振動では、その微小な効果が観測できる可能性がある。ここでは現象論的にフェルミオンの4次の有効相互作用を仮定し、その係数に関する他の実験からの制約を課してニュートリノ振動に与える新しい物理の影響を考察した。新しい物理の効果は、この設定のもとでは、ニュートリノの生成点と検出点におけるものとニュートリノの伝播中におけるものが考えられるが、とりあえず伝播中の効果を議論した。その結果、質量による標準的なニュートリノ振動では説明できないほど大きな振動確率が観測される可能性があることを、現在進行中のアメリカの MINOS 実験 ( $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ ) や、将来計画されているニュートリノファクトリー ( $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ 、 $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$ ) 等の基線の長いニュートリノ振動実験に対して示した。又、一定密度の物質中でのニュートリノ振動確率の解析的表式に対して知られていた木村-高村-横枕の方法を拡張し、新しい物理の効果が伝播中にある場合に、振動確率の解析的表式を与えた。さらに、その表式と、低エネルギー・高エネルギー極限での振る舞いから、上記の結果が得られる理由について直感的な説明を試みた。

### 2) 神岡・韓国2検出器系によるニュートリノ質量パターンとCP位相の同時決定

東海村に建設中の Japan Accelerator Research Complex (J-PARC) からニュートリノビームを神岡に向けて発射し、これをスーパーカミオカンデで検出する Tokai-to-Kamioka (T2K) 実験が2009年度に稼働予定である。この実験はレプトンフレーバー混合で唯一残された未知の混合角 (1-3) 角を測定することを主目的としている。(1-3) 角がこの実験で測定可能なほど大きかった場合には小林・益川型のレプトン CP 位相の測定に進むことが可能で、このため陽子ビーム強度を4MWに増強し、検出器として1メガトンの体積を持つハイパーカミオカンデの建設を伴う T2K の第2期実験が計画されている。ところが、T2Kは基線長が約300kmと短いために現在まで未決定のニュートリノ質量パターンを分解できず、このため、質量パターンの不定性がCP位相の効果とからんでCP対称性が破れているのかが曖昧になってしまっていることが知られている。

今年度の研究において、1メガトンの体積を持つハイパーカミオカンデを二分割し、一つを神岡に、他の一つを J-PARC から約1000km離れた韓国内の適当な場所に設置するという新しい可能性を提起した。両検出器をビーム軸から2.5度の同一角度に設置することによって、(ニュートリノ振動がなければ) 全く同一のエネルギー分布をもつビームを受けることが可能になる。神岡検出器が第1振動極大に、韓国検出器が第2振動極大に近い距離に設置されていることにより、両検出器におけるニュートリノ振動によりエネルギースペクトルの変形の度合いが大きく異なる。(図1参照) この性質を使って両検出器のデータを比較することによりCP位相の効果と質量パターンの不定性に関係した物質効果を高感度で分解できることを示した。この韓国に設置する第2検出器のアイデアは国際的な注目を集めることになり、提案から半年を経た時点(2005年11月18-19日)でソウルのコリア高等研究所(KIAS)において国

際ワークショップが開催されるに到った。(上記課題は東大宇宙線研 梶田隆章氏、米国・インディアナ大学 石塚正基氏、およびブラジル・リオデジャネイロカトリック大学 布川弘志氏との共同研究)

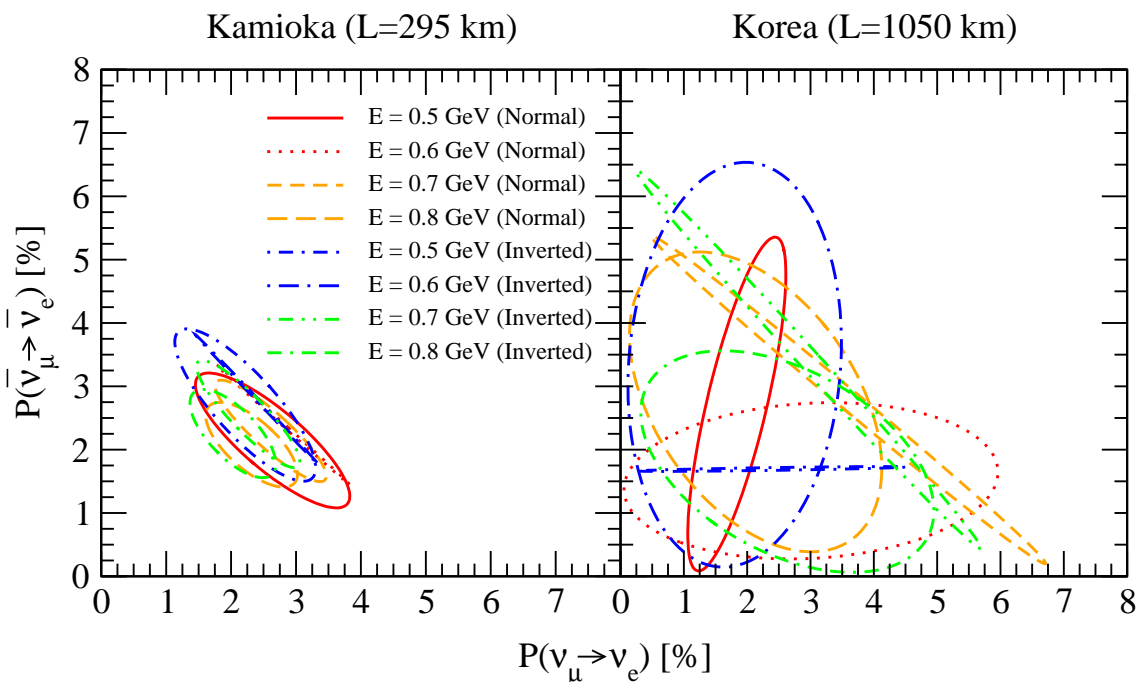


図 1: ニュートリノ振動によるエネルギースペクトルの変形が神岡・韓国両検出器によって大きく異なる様子が双確率空間の CP 位相の変化による楕円の振る舞いによって示されている。

### 3) 超新星ニュートリノを使う CPT 非保存の探索

超新星からのニュートリノはニュートリノ・反ニュートリノの混成ビームであり、このため、電子型、反電子型、ミュー・タウ型の 3 種類のニュートリノのエネルギースペクトルの分解・決定によって CPT 非保存の探索が可能になる。今年度の研究では初めて 32 種類の CPT 保存・非保存パターンの分類を行い、この方法を実行する場合に必要な各ニュートリノスペクトルの基本的公式を導いた。この結果を使いどのスペクトルのどの性質の決定が CPT 非保存の発見にとって最も重要であるか、さらには、(1-3) 角の測定が行われた場合にどれだけニュートリノスペクトルのパターンの絞り込みが可能であるかを明らかにした。

### 4) 弦模型における電弱対称性の自発的破れ

素粒子の質量は「電弱対称性の自発的破れ」に伴って「湯川相互作用」を通じて生成されるため、「湯川相互作用の結合定数の大きさ」が素粒子の質量を決める。「湯川相互作用の結合定数の大きさ」を量子場の理論の枠組みで説明することは長きにわたって試みられてきたが、まだ成功していない。一方、最近の弦理論の理解の進展により弦理論の枠組みでそれを説明する新たな可能性が見出された。私(北澤)自身も含めて内外の多くの研究者がこの問題に挑戦してある程度の成功を収めたが、量子場の理論に基づく試みの成果を越えるものは得られていない。弦理論に基づく上記の試みの中でひとつ大きく欠如している要素が「電弱対称性の自発的破れ」である。すべての弦理論に基づく試みには「電弱対称性の自発的破れ」の機構が含まれておらず、この意味でまったく現実的でない。弦理論における「電弱対称性の自発的破れ」の可能性を論じた論文は極めて少なく、私の知る限りでは一つしかない。しかも、その論文には「湯川相互作用の結合定数の大きさ」についての論述がない。そこで、弦理論の枠組み

で「電弱対称性の自発的破れ」と「湯川相互作用の結合定数の大きさ」を同時に論じるべく、「超対称性のない特異点上のDブレーン」という系について調べた。具体的に非自明な「湯川相互作用」を実現している現実に近いモデルを構成し、ヒッグス粒子の質量に対する量子補正の計算を試みた。量子補正を無視すれば質量はゼロであるので、弦の張力のスケールを小さく取れば、プランクスケールに比べて小さな質量が得られるはずである。興味があるのはヒッグス粒子の質量の2乗が正になるか負になるかである。負になれば「電弱対称性の自発的破れ」が起き得る。計算技術が新しいものであるために、それを開発しながら進まなければならない、最終結果はまだ出ていない。(私が欧州原子核研究機構(CERN)にピサ高等師範学校の A.Sagnotti 氏を訪ねた際に、この問題についてアドバイスを受けた。)

#### 5) 余剰次元モデルにおける強結合ゲージ相互作用

我々の認識している3次元空間に加えて、現在の実験では認識できないほど小さい閉じた空間(余剰次元)が存在すると仮定して、素粒子物理学の諸問題を解決しようとする試みがある。特に、電弱対称性の自発的破れに関する「自然さの問題」を、それを引き起こすヒッグス粒子が余剰次元を含む空間におけるゲージ粒子のうちの、余剰次元方向に方向に偏極した成分であるとするにより理解しようとする試みがある。ヒッグス粒子の質量の大きさが電弱対称性の破れのスケールを決めるのであるが、それが非常に大きなプランクスケールに比べて自然に小さくなることがわかれば、問題は解決する。ヒッグス粒子の起源がゲージ粒子であれば、ゲージ粒子の質量はゼロであるから、量子補正を考慮する前には質量はゼロということになり、従ってその小ささが保証できるというアイデアである(実際には大きな量子補正がある)。次の段階として、量子効果によって適当な大きさの質量を生成する機構が必要である。そこで、強結合ゲージ相互作用の非摂動論的效果により、自然にヒッグス粒子の質量を生成する機構を提案した。(これは、北澤とKEKの岡田宣親氏と徳島大学の波場直之氏との共同研究である。)

#### 6) フラックス中のDブレーンの安定性

弦理論においてDブレーンというものを使って素粒子モデルを作る際、Dブレーンの余剰次元方向の運動を不可能にしておかないと、その自由度が我々の世界における非物理的な場として現れてしまう。その自由度をなくす方法のひとつとして、余剰次元内にフラックス(量子化されたテンソル場の期待値)を仮定する方法がある。フラックスを入れると余剰次元方向の平行移動の自由度がなくなることは例解できるのだが、Dブレーンが存在できる余剰次元内の位置がひとつに決まるのか、それともひとつたび設定したら動かないということであるのかが明確でない。特に、余剰次元内に2つのDブレーンを「平行に離して」設定できるかどうかは明確でない(いくつかのDブレーンを「平行に離して」設定することは具体的なモデルの構成で多用される状況である)。そこで、フラックス内の2つのDブレーンに働く力を、弦理論の低エネルギー有効理論である超重力理論を用いて調べた。(これは、北澤と高エネルギー理論サブグループのD3の学生の佐々木伸氏との共同研究である。)

## 2. 研究業績

### 1) 論文

T. Higaki, N. Kitazawa, T. Kobayashi and K. Takahashi: Flavor Structure and Coupling Selection Rule from Intersecting D-branes, *Physical Review D* **72** (2005) 086003-1-14.

M. Ishitsuka, T. Kajita, H. Minakata, and H. Nunokawa: Resolving Neutrino Mass Hierarchy and CP Degeneracy by Two Identical Detectors with Different Baselines, *Physical Review D* **72** (2005) 033003-1-14

N. Kitazawa, T. Kobayashi, N. Maru and N. Okada: Yukawa Coupling Structure in Intersecting D-brane Models, *The European Physical Journal C* **40** (2005) 579-587.

H. Minakata and S. Uchinami: Testing CPT Symmetry with Supernova Neutrinos, *Physical Review D* **72** (2005) 105007-1-14.

H. Sugiyama, O. Yasuda, F. Suekane, G.A. Horton-Smith: Systematic limits on  $\sin^2 2\theta_{13}$  in neutrino oscillation experiments with multi-reactors, *Physical Review D* **73** (2006) 053008-1 – 053008-13.

T. Hatanaka, S. V. Ketov, Y. Kobayashi and S. Sasaki:  $N = 1/2$  supersymmetric four-dimensional non-linear sigma-models from non-anti-commutative superspace, *Nuclear Physics B* **726** (2005) 481-493.

Y. Kobayashi and S. Sasaki: Non-local Wess-Zumino model on nilpotent noncommutative superspace, *Physical Review D* **72** (2005) 065015-1-10.

T. Hatanaka, S. V. Ketov, Y. Kobayashi and S. Sasaki: Non-anti-commutative deformation of effective potentials in supersymmetric gauge theories, *Nuclear Physics B* **716** (2005) 88-104.

Y. Kobayashi and S. Sasaki: Lorentz invariant and supersymmetric interpretation of noncommutative quantum field theory, *International Journal of Modern Physics A* **20** (2005) 7175-7188.

## 2) 国際会議報告

M. Ishitsuka, T. Kajita, H. Minakata, and H. Nunokawa: Establishing Neutrino Mass Hierarchy and CP Violation by Two Identical Detectors with Different Baselines Using the J-PARC Neutrino Beam, *Nuclear Physics Proceedings Supplement* **155** (2006) 168-169.

K. Long, M.D. Messier, O. Yasuda: Summary of the neutrino oscillations working group at NuFact05, *Nuclear Physics Proceedings Supplement* **155** (2006) 102–110.

H. Minakata: Quark-Lepton Complementarity; a Review, *Venice 2005, Neutrino telescopes*, pp 83-97.

H. Minakata, H. Nunokawa, W. J. C. Teves and R. Zukanovich Funchal: Reactor Measurement of  $\theta_{12}$ ; Secret of the Power, *Nuclear Physics Proceedings Supplement* **145** (2005) 45-48.

T. Ota, O. Yasuda: Solving the degeneracy by a neutrino factory with polarized muon beam, *Nuclear Physics Proceedings Supplement* **155** (2006) 174–175.

## 3) 学会講演

日本物理学会第 60 回年次大会 2004 年 3 月 24 日～ 3 月 27 日 (東京理科大学野田キャンパス)

北澤敬章、小林達夫、高橋圭次郎、桧垣徹太郎：Yukawa matrices in intersecting D-brane

桧垣徹太郎、北澤敬章、小林達夫：Model building in Type IIB flux compactifications

日本物理学会 2005 年秋季大会 2004 年 9 月 12 日～ 9 月 15 日 (大阪市立大学杉本キャンパス)

内波生一：超新星ニュートリノによる CPT 定理の検証

## 国内研究会

2005 年度第 18 回理論懇シンポジウム :  
2005 年 12 月 25 日-27 日 ( 京都大学基礎物理学研究所 )

安田修 : ニュートリノ振動研究の現在と未来 (Invited talk).

## 国際会議

20th International Workshop on Weak Interactions and Neutrinos (WIN05),  
Delphi, Greece, June 6-11, 2005

H. Minakata: LBL Oscillation Physics

7th International Workshop on Neutrino Factories and Superbeams (NuFact 05),  
Laboratori Nazionali di Frascati, Italy, June 21–26, 2005

O. Yasuda: Summary of WG1 –Phenomenological issues– (Invited talk).

M. Ishitsuka, T. Kajita, H. Minakata, and H. Nunokawa: Establishing Neutrino Mass Hierarchy and CP Violation by Two Identical Detectors with Different Baselines Using the J-PARC Neutrino Beam  
Supersymmetries and Quantum Symmetries, Dubna, Russia, July 27-31, 2005

Y. Kobayashi: Various Noncommutativities from Twisted Hopf algebra

YITP workshop, String Theory and Quantum Field Theory, Kyoto, Japan, August 19-23, 2005

Y. Kobayashi: Deformed Wess-Zumino Model on the Noncommutative Space with Grassmann Number Parameters

Japan-US Seminar on Double Beta Decay and Neutrino Mass, Maui, Hawaii,  
September 16-20, 2005

H. Minakata: Neutrino Masses and Mixing Constrained by Double Beta Decay (Invited Talk)

1st International Scoping Study Meeting of Neutrino Factory and Super-beam Facility,  
CERN, Geneva, September 22–24, 2005

O. Yasuda: Introduction to sub-groups –Personal view on phenomenology– (Invited talk).

International workshop on Noncommutative Geometry and Physics  
Sendai, Japan, November 1-4, 2005

Y. Kobayashi: Noncommutative Deformation and Drinfel'd Twisted Symmetry

An International Workshop on a Far Detector in Korea for the J-PARC Neutrino Beam,  
Seoul, Korea 18-19 November, 2005

H. Minakata: Kamioka-Korea Two-Detector Complex; Its Power and Ideas Behind (Invited Talk)

A topical conference on elementary particle physics and cosmology,  
Sonesta Beach Resort Key Biscayne, Florida, USA, December 14 – 18, 2005

O. Yasuda: Exact formula of three flavor neutrino oscillation probability and its application to high energy astrophysical neutrinos (Invited talk).

Second Cairo International Conference on High Energy Physics (CICHEP II),  
Cairo, Egypt, 14-17 January 2006

N. Kitazawa: Electroweak Symmetry Breaking in TeV-scale String Models

The 2nd International Scoping Study Meeting of Neutrino Factory and Super-beam Facility,  
KEK, Japan, 23-25, January 2006

H. Minakata: Quark-Lepton Complementarity; a review (Invited Talk)

Second International Workshop on Neutrino Oscillations in Vanice,  
Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Venice, Italy, February 7-10, 2006

H. Minakata: Do Neutrinos Violate CP? (Invited Talk)

#### 4) 学会誌等

南方久和：ニュートリノ振動とニュートリノ質量  
パリティ 特集「物理科学、この20年」20 (2005) 24-25.



# 高エネルギー理論サブグループ

## 1. 研究活動の概要

Our research in 2005 was concentrated on one scientific project supported in part by the JSPS grant (Kiban C) # 15540282 during the year.

We studied a nilpotent non-anti-commutative deformation of the effective superpotentials in supersymmetric gauge theories, caused by a constant self-dual graviphoton background. We derived the simple non-perturbative formula applicable to any (star) deformed chiral superpotential. It is remarkable that the deformed superpotential is always ‘Lorentz’-invariant. As an application, we considered the deformation of the pure super-Yang-Mills theory whose infra-red physics is known to be described by the Veneziano-Yankielowicz superpotential (in the undeformed case). The unbroken gauge invariance of the deformed effective action gives rise to severe restrictions on its form. We found a non-vanishing gluino condensate in vacuum but no further dynamical supersymmetry breaking in the deformed theory.

We found a simple non-perturbative formula for the component action of a generic  $N=1/2$  supersymmetric chiral (sigma) model in terms of an arbitrary number of chiral superfields in four dimensions, which is obtained by the non-anti-commutative deformation of a generic four-dimensional  $N=1$  supersymmetric non-linear sigma-model described by arbitrary Kaehler superpotential and scalar superpotential. The auxiliary integrations responsible for fuzziness were explicitly done in the case of a single chiral superfield. The scalar potential in components was derived by eliminating the auxiliary fields. The deformation of the  $CP(1)$  Kaehler non-linear sigma-model with an arbitrary scalar superpotential was calculated as an example.

Then we investigated in detail the component structure of the most general  $N=1/2$  supersymmetric non-linear sigma-model defined in the four-dimensional (Euclidean) non-anti-commutative superspace. The most general sigma-model is described in terms of arbitrary Kahler potential, and chiral and anti-chiral superpotentials. The case of a single chiral superfield gives rise to splitting of the sigma-model potentials, whereas the case of several chiral superfields results in smearing (or fuzziness) of the sigma-model potentials, while both effects are controlled by the auxiliary fields. We eliminated the auxiliary fields by solving their algebraic equations of motion, and demonstrated that the results are dependent upon whether the auxiliary integrations responsible for the fuzziness are performed before or after the elimination of the auxiliary fields. There is no ambiguity in the case of splitting, i.e. for a single chiral superfield. Fully explicit results were derived in the case of the  $N=1/2$  supersymmetric deformed  $CP(n)$  non-linear sigma model in four dimensions. There we found another surprise that our results differ from the  $N=1/2$  supersymmetric  $CP(n)$  sigma-model to be derived by the quotient construction from the  $N=1/2$  supersymmetric deformed gauge theory. We concluded that the  $N=1/2$  supersymmetric non-anti-commutative deformation of a generic non-linear sigma model is not unique.

We also derived the master function governing the component action of the four-dimensional non-anticommutative and fully  $N=2$  supersymmetric gauge field theory with a non-simple gauge group  $U(2)=SU(2)\times U(1)$ . We chosen the ‘Lorentz’ singlet deformation parameter and the  $N=2$  supersymmetric star (Moyal) product, which do not break any of the fundamental symmetries of the undeformed  $N=2$  gauge theory. The scalar potential in the deformed theory was also calculated. We proposed

the non-abelian BPS-type equations in the case of the deformed  $N=2$  gauge theory with the  $SU(2)$  gauge group, and obtained partial results in the  $SU(3)$  case too. The deformed field theories can be thought of as the effective (non-perturbative)  $N=2$  gauge field theories in a certain (scalar only)  $N=2$  supergravity background.

## 2. 研究業績

### 1) 論文

T. Hatanaka, S.V. Ketov, S. Sasaki, Summing up non-anti-commutative Kaehler potential, *Phys.Lett. B* **619** (2005) 352–358

T. Hatanaka, S.V. Ketov, Y. Kobayashi, S. Sasaki, Non-anti-commutative deformation of effective potentials in supersymmetric gauge theories, *Nucl. Phys. B* **716** (2005) 88–104

T. Hatanaka, S.V. Ketov, Y. Kobayashi, S. Sasaki,  $N=1/2$  supersymmetric four-dimensional non-linear sigma-models from non-anti-commutative superspace, *Nucl. Phys. B* **726** [FS] (2005) 481–493

S.V. Ketov, S. Sasaki,  $SU(2)\times U(1)$  non-anti-commutative  $N=2$  supersymmetric gauge theory, *Intern. Journ. Mod. Phys. A* **20** (2005) 4021–4034.

Y. Kobayashi and S. Sasaki: Non-local Wess-Zumino model on nilpotent noncommutative superspace, *Physical Review D* **72** (2005) 065015-1-10.

Y. Kobayashi and S. Sasaki: Lorentz invariant and supersymmetric interpretation of noncommutative quantum field theory, *International Journal of Modern Physics A* **20** (2005) 7175-7188.

### 2) 学会講演

#### 国際会議

International Workshop on Non-commutative Geometry and Physics,  
1–4 November, 2005, Sendai, Japan

S.V. Ketov: Non-anti-commutative deformation of complex geometry (invited talk).

# 原子核理論サブグループ

## 1. 研究活動の概要

本研究室では、強い相互作用をする多体系である原子核・ハドロンや、近年盛んに研究されているトラップされた量子縮退原子気体を対象として、有限量子多体系の静的・動的性質の研究を進めている。

### 1) ダイクォーク・ボース・アインシュタイン凝縮

高温高密度核物質では核子を構成しているクォークが自由にふるまうクォーク物質の存在が予想される。クォーク物質ではクォーク間の引力によりクォーク対(ダイクォーク)が形成される可能性があり、カラー超伝導相と呼ばれている。低密度ではクォーク間引力が強いため、ダイクォークは粒子性が強く、カラー超伝導はボース粒子のボース・アインシュタイン状態(BEC)として記述される。我々は、BEC理論の相対論的定式化を行い、それを用いたカラー超伝導の解析を行ってきた。解析を進めた結果として粒子・反粒子が存在する場合のBECに関する一般的な性質を解明し、これまでに得られた結果とともに論文にまとめた。

### 2) 原子核の巨大共鳴領域における応答関数のゆらぎの分析

原子核の高励起領域は、準位密度間隔分布や一粒子強度関数などの情報から、非可積分量子ビリヤードなどの量子カオス系と同様、ランダム行列でよく記述される状態群が存在する。一方、低励起状態は量子数が明確な殻模型状態や集団振動状態で特徴づけられる。この両者の移行は、理論的には殻模型の状態間の複雑な配位混合として考えられるが、実験的にその特徴を明らかにすることは、高い順位密度のために困難を極める。本研究では、巨大共鳴領域における励起断面積の揺らぎを、フラクタル次元のスケール依存性を通して調べている。本年は励起の集団性が強いと期待される重い原子核に対して、拡張タム・ダンコフ近似によって計算を行い、揺らぎの特徴を調べた。その結果は、軽い原子核と同様、あるエネルギースケールでランダム行列からのずれがあらわれることが示された。これは、混合する配位の状態の複雑さに階層性があるためであると解釈される。

### 3) 非可積分系における波動関数の結節領域分布

二次元非調和振動子模型におけるエネルギー固有波動関数の結節領域(NodalDomain)分布の検討を通して、可積分系から完全非可積分(カオス)系への転移の特徴を調べている。この結節領域を特徴づけるため、結節線の示す図形のグラフ理論的分類を行なった。とくに、エネルギーによって決められる半古典的境界に交差する領域とそれ以外では、結節領域分布のエネルギーに対する依存性が明確に異なることが示された。非可積分性をあらかずパラメタ依存性も、両者で異なり、グラフ理論による分類の特徴を反映することが示された。この結果をまとめて論文を発表した。

### 4) 極低温原子気体の静的・動的性質の研究

ポテンシャルにトラップされた極低温原子気体は、有限量子多体系の様々な性質を研究するための理想的な系を与えている。本研究室では、ボース・フェルミ混合原子気体を中心とした系の示す性質を、原子核物理学から熱・統計物理学に至る様々な分野の手法を用いて調べている。

#### a) ボース・フェルミ(BF)混合系におけるBF対の形成

トラップされたボース原子気体は、引力系であっても零点振動のために準安定状態で存在することがあるが、相互作用の効果が充分大きくなれば、系が不安定となりつぶれてしまうことが知られている。しかしフェルミ系で引力がはたらけば、それ以前にクーパ対形成による不安定性が存在し、BCS転移が

起こる。本研究では、引力相互作用する BF 系において、BF の複合対が形成される可能性を検討した。まず、一様系で BF 二体散乱を解くことにより、引力相互作用によってクーパー対型の非束縛 BF 状態が形成され得ることを示し、論文として出版した。この二体系はフェルミ粒子であるため、凝縮を起こさない。このため相互作用の強度が増すとともに、次々と異なる量子数（重心運動量）をもつ対が形成されていくクロスオーバー過程が予想される。これを、BF 対相関を含み正確に解き得る Richardson 型のモデルを設定し、これを解いてこの予想を確かめた。

#### b) 有限ボース・フェルミ混合原子気体系の不安定性に対する複合フェルミオンの効果

我々は調和振動子型ポテンシャルに閉じ込められたボース・フェルミ混合原子気体系において、ボゾン ( $B$ ) とフェルミオン ( $F$ ) から成る分子（複合フェルミオン： $BF$ ）の形成が、ボゾン・フェルミオン間の強い引力相互作用によって引き起こされる系の崩壊現象に与える影響を調べた。原子・分子間では  $B + F \leftrightarrow BF$  の化学平衡状態が成り立っているとし、ボゾン・フェルミオン間の引力の強さと分子の束縛エネルギーはパラメータとして与えた。系が不安定性を引き起こす臨界状態近傍の相構造を調べることで、束縛状態としてのフェルミオン分子が崩壊に対する強い抑制効果を持つことがわかった。また、系が崩壊する臨界結合定数を調べることで、分子が高い共鳴状態にある場合、系の臨界条件は純粋なボース・フェルミ混合系の結果と完全に一致することがわかった。

#### c) 異なるポテンシャルに捕獲された 2 成分極低温原子気体における対・分子形成の理論的研究

異なるポテンシャルに捕獲された 2 成分極低温フェルミ原子気体における対・分子形成を対相関を含む平均場理論を用いて理論的に研究した。まずは系の定常的な振る舞いを解析し、異なるフェルミ面による対凝縮生成の阻害効果によって、通常気体と対凝縮気体とが空間的に分離して分布する様子を記述した。次に外場を断熱的に変化させた時の系の動的な振る舞いを考察し、系の断熱的な振る舞いが対・分子形成の微細な構造をよく反映する場合があることを理論的に明らかにした。

#### d) ボゾン・フェルミオン混在原子気体におけるフェシュバツハ共鳴点周辺の物理の理論的研究

ボゾン・フェルミオン混在原子気体におけるフェシュバツハ共鳴点周辺の物理をボゾン・フェルミオン間の対相関と複合フェルミオン形成の 2 つの観点から理論的に研究した。まずは対演算子の運動方程式の解析に基づく摂動的な計算を行うことで系の相構造の理論的な推測を行い、次に補助的な手動の対演算子を導入した自己無矛盾な方法を開発して、ボゾンの量子統計増幅効果を始めとする系の大局的な静的振る舞いを記述した。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

A.Storozhenko, P.Schuck, T.Suzuki, H.Yabu and J.Dukelsky: Boson-Fermion Cooper Pairing in a Boson-Fermion Environment *Phys. Rev. A* **71** (2005) 063617.

T.Maruyama, H.Yabu and T.Suzuki: Monopole Oscillations and Dampings in Boson and Fermion Mixed Condensed System in the Time-Dependent Approach *Phys.Rev.* **A72** (2005) 013609.

E. Nakano and H. Yabu: Density waves in quasi-one-dimensional atomic gas mixture of boson and two-component fermion *Phy. Rev.* **A72** (2005) 034602.

H.Aiba and T.Suzuki: Nodal Domain Distribution for a Nonintegrable Two-Dimensional Anharmonic Oscillator *Phys. Rev.* **E72** (2005) 066214.

## 2) 学会講演

日本物理学会「第 58 回年次大会」 2004 年 3 月 24-27 日 (東京理科大学野田キャンパス)

鈴木和典、鈴木徹、藪博之：ボース・フェルミ混合原子気体における 2 体-4 体クラスター形成と化学平衡

仲野英司、藪博之：擬一次元ボソン・フェルミオン混合系における密度波

相場浩和、鈴木徹：波動関数の結節領域に見るレギュラー・カオス転移

日本物理学会「2005 年秋季大会」 2005 年 9 月 19-22 日 (同志社大学京田辺キャンパス)

西村拓史、藪博之、鈴木徹、P.Schuck：Boson-Fermion 混在原子気体における Feshbach 共鳴点周辺の物理

鈴木和典、鈴木徹、藪博之：トラップされたボース・フェルミ混合原子気体における複合フェルミオン形成と化学平衡

基研研究会「熱場の量子論とその応用」 2005 年 8 月 24-26 日 (京都大学基礎物理学研究所)

鈴木和典、藪博之、鈴木徹：ボース・フェルミ混合原子気体系中の複合フェルミオン形成に対する閉じ込めポテンシャルの効果

R C N P ワークショップ「原子核・ハドロン物理におけるスピンの魅力」

2006 年 2 月 2-3 日 (大阪大学核物理研究センター)

鈴木徹：核子移行反応と偏極移行量

COE ワークショップ「量子物理学の最前線」 2006 年 3 月 15-16 日 (東京大学理学部)

鈴木徹：ボース・フェルミ混合原子気体の諸相

## 国際会議

14th International Laser Physics Workshop(LPhys705)

July 4-8, 2005 (Kyoto, Japan)

鈴木徹：Boson-Fermion Pairing and Formation of a Fermi Sea of Composite Fermions

藪博之：Atom-Molecule Equilibrium in Atomic Gas and Quantum Law of Mass Action

Recent challenges in novel quantum systems (NQS2005)

July 6-8, 2005 (University of Camerino, Italy)

西村拓史：Quantum Correlations and Atom-Molecular Transition in Boson-Fermion Mixed Gases around a Feshbach Resonance

# 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、高エネルギー天体现象、銀河・銀河団の形成と進化、宇宙プラズマの基礎的物理過程の3つを大きなテーマとして、様々な天体を対象に理論的研究を進めている。以下は、2005年度に行った主な研究の概要である。

### 1) Kerr ホールからの回転エネルギーの抽出

回転するブラックホールからスピンエネルギーを引き出すメカニズムについて研究を行った。エルゴ領域に降着物質による磁場があると考えて、回転エネルギーを磁氣的に抽出するメカニズムが Blandford と Znajek によって提案されている。この Blandford-Znajek メカニズムでは数学的簡単さのため、いくつかの仮定が導入されている。活動的ブラックホールの現実的な降着条件の下で、これらの仮定について実現可能性を議論するとともに、隠れた仮定がないか調べた。大きな仮定の一つは Force-Free 条件で、降着プラズマの慣性を無視することに対応し、理想電磁流体近似における電気伝導度が十分大きいという条件とともに、磁場の強さや降着物質の密度にも条件が付くことになる。しかしながら、標準的な Ohm の法則が成立すると考えるなら、有限の質量を持った粒子の流れが無視できない場合でも回転エネルギーの抽出は可能であることが分かった。ただし、標準的な Ohm の法則を仮定したパルサー研究では、理想電磁流体近似が破綻することも報告されており、Fokker-Planck 方程式のより高次の項を取り入れて得られる、一般化された Ohm の法則を用いた議論が必要である。

### 2) 銀河団ガスの進化とコア半径分布

銀河団ガスのコア半径分布には2つのピークが見られる。大きい方のコア半径はビリアル半径と比例関係にあり、銀河団形成時(コラプス)の自己相似的な分布を残しているものと考えられる。一方、小さい方のコア半径にはビリアル半径との相関が見られない。そこで、小さなコアの起源を探ることを目的として、121個の銀河団について、中心部の cD 銀河/巨大楕円銀河の有無との関係、放射冷却時間との相関などを調べた。結果、最も明確な関係が見られたのは放射冷却時間である。コラプス直後に自己相似的な構造をしている銀河団が、ガスの放射冷却に伴って、観測されているようなコア半径の銀河団へと進化するのかを確かめるべく、3次元流体コードによるシミュレーションを行った。その結果、観測されているコア半径分布の2つのピークを再現することができ、小さなコアの起源として放射冷却が有力であることを示した。また、観測されているコア半径分布は、比較的緩やかな放射冷却段階にある銀河団で説明されること、つまり、小さなコア半径の銀河団では放射冷却が効いているものの準静水圧平衡の下で冷却している銀河団であることも明らかにした。

### 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上でしかない。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。その検出可能性に関して議論をした。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

T. Akahori and K. Masai: Core structure of Intracluster Gas: Isothermal Hydrostatic Equilibrium, *Publ. Astron. Soc. Japan* **57** (2005) 419-427.

K. Masai: Radiation Properties of High-Energy Astrophysical Plasmas, *Astrophys. Space Sci.* **299** (2005) 155-162.

### 2) 学会講演

日本天文学会 2005 年春季年会, 2005 年 3 月 28 日-30 日 (明星大学)

赤堀卓也, 政井邦昭: 銀河団ガスのコア構造: 準静水圧平衡での放射冷却

#### 国際会議

East Asian Young Astronomers Meeting 2006, Kiyosato, February 13-18, 2006

T. Akahori: The Track of Thermal Evolution in Galaxy Clusters

#### ワークショップ・研究会

第 18 回理論懇シンポジウム, 2005 年 12 月 25-27 日 (京都大学)

赤堀卓也: 銀河団ガス冷却の SPH シミュレーション: 実行条件による冷却過程の再現性について

岡崎淳一郎: Blandford-Znajek Mechanism と近似

AGN ジェットと粒子加速, 2005 年 9 月 26-28 日 (大阪大学)

政井邦昭: 粒子加速の諸問題

高エネルギーガンマ線天文学の展望, 2006 年 3 月 16 日 (東京大学宇宙線研究所)

政井邦昭: 超新星残骸の高エネルギー現象

# 非線形物理サブグループ

## 1. 研究活動の概要

### 1) カオスのトンネル効果と動的局在

カオス系におけるトンネル過程は、実カオス領域に存在するサドル型周期点から伸びる安定多様体に沿って、トンネル確率を担う複素軌道が実面に引き込まれることによって起こる。一般に実カオス領域上には、指数関数的に多くのサドル型周期点が存在し、それに伴ってトンネル確率を担う複素軌道も指数関数的に存在する。カオスのトンネル効果を担う複素軌道のいまひとつの特徴として、一本一本のトンネル軌道が、規則領域（トーラス）とカオス領域の両方の性質を併せもつことが挙げられる。このことから、規則領域をトンネル効果によって通過する過程と、実カオス領域を運動するプロセスとが独立ではなく、カオス領域で起こる現象、とくに、動的局在現象と、トーラス中をトンネル過程で抜ける過程とが互いに相関をもって現れることが予想される。実際、カオス領域で起こっている動的局在を雑音印加などの方法で無効化すると、古典カオス領域で（準実）トンネル軌道間がもつ干渉が破壊され、トンネル確率が大幅に増大することが数値計算により確かめられた。通常、雑音などの外部環境と接触させると、系が古典化によりトンネル確率が減少することが知られているが、カオスのトンネル過程では全く逆のことが起こることになる。

### 2) 強レーザー場における分子のイオン化過程の半古典的機構

強レーザー場における原子のイオン化の機構を半古典論的立場から解明することを目的として研究を進め、本年は特に以下の課題に取り組んだ。(1) いかなる実験的設定のもとで、トンネルイオン化とカオスのイオン化のクロスオーバーが観察できるか。(2) 各々のイオン化を担う複素古典軌道はいかに特徴づけられるか。(1)については、(1a) どちらのイオン化が優勢であるかは断熱パラメタ、強度パラメタ、有効プランク定数の値により決定される。(1b) トンネルイオン化とカオスのイオン化は競合する。という結果を得た。また、(2)については、非線形物理の立場から進展があった。すなわち、いずれのイオン化においても、電子が束縛状態から連続状態へ励起する場合を考えると、対応する電子の複素古典軌道は、位相空間において、規則的運動の領域とカオス領域とをむすぶ必要がある。我々のエネルギー領域からのアプローチにおいては、この軌道は以下の性質をもつことがわかった。とくに、原子から放出される電子に対応する複素古典軌道は、位相空間における規則的運動の領域とカオス領域との間の自然境界を乗り越えることで束縛状態と連続状態との間を結ぶことが明らかになった。

### 3) 高次元ストークス現象における仮想的変わり点と新しいストークス線の役割

複素 WKB 法の利点は、トンネル効果や非断熱遷移など指数関数的に小さい現象を取り扱うことができることである。しかしながら、もともと WKB 近似自身が漸近展開でしなかないため、近似から得られる解が複数存在する場合、それらの寄与が実際に現れるか否かの判定は自明ではない。従来、WKB 近似を適用する微分方程式が 2 階の場合、簡単な場合については、寄与する 2 つの解の間でおこる接続（ストークス現象）を扱う現象論的な方法が知られていたが、微分方程式が非線形、あるいは高階の場合については、扱う対象が漸近展開であることが障害となりほとんど手がつけられることがなかった。完全 WKB 解析は、漸近展開を Borel 総和法を通して解析的な意味付けを与え、解の接続の問題を Borel 変換のリーマン面の構造からとらえるものであり、ストークス現象に対する厳密な意味づけを与えることができる。さらに、Borel 面の特異点の伝搬に関する一般論を援用することにより、これまで扱うことができなかった高階の微分方程式に対するストークス現象を定式化することが可能となる。その結果、高階の場合については、2 階の場合には現れない仮想的変わり点（virtual turning points）と新しいス



トークス線 (new Stokes curves) とが現れることがわかる。多準位間で起こる非断熱遷移・カオスのトンネル効果と、従来の 2 準位問題・1 次元のトンネル問題との違いは、仮想的変わり点、新しいストークス線の有無にあることから、仮想的変わり点、新しいストークス線が実際に接続として観測されることが、本質的に多体の効果の証拠となる。今年度は、カオスを発生する最も単純なモデルであるエノン写像において、新しいストークス線上で接続が起こる状況があることを見つけ、さらに、変わり点とストークス線とから成るグラフ (ストークスグラフ) に対して、古典系の pruning 理論と類似のグラフの分岐理論が有効であることを示した。

#### 4) ガラスに見られる遅い緩和過程と大自由度ハミルトン系の動力学

ガラス性物質の遅い緩和を理解するため、二成分 Lennard Jones 系を用いて動力学的考察を行った。特に、通常のホッピング描像には取り込まれていない、サドル近傍におけるタイムスケールの分離を起源とするボルツマン・ジーンズ機構を調べた。具体的には、数値的にサドルを探索するアルゴリズムを構成し、その近傍でのハミルトンダイナミクスを調べた。その結果、格子振動子系で発見された淀み運動に類似のサドル近傍で長時間トラップされるという特異な現象が観察された。この現象と分子配置のランダム性からくるサドル近傍の振動モードの局在との関連を指摘した。

#### 5) 箱の中の 2 剛体粒子系における緩和過程

液体を融点以下に急冷するとアモルファス状態のまま固化してガラスとなる。ガラス転移近傍では、アルファ緩和と呼ばれる遅い運動が発生することがよく知られているが、その動力学的な機構の十分な理解はない。近年、レナードジョーンズ相互作用をする 2 成分系、剛体球系といった比較的単純な系の計算機シミュレーションにおいて、ガラス状態が実現することが指摘され、従来のモード結合理論の検証にとどまらず、ガラスの動力学に関わるさまざまな観点からの研究が進んでいる。ここでは、力学系理論の観点からガラスにおける遅い緩和過程を理解するための足がかりをつくるために、箱の中を運動する 2 つの剛体球系を調べた。2 つの剛体球系は、適当な条件下での系のエルゴード性が厳密に証明され、多体ハミルトン系として最も単純な力学系である。この系の緩和過程に影響を及ぼすことが期待される不変構造の候補として、系に存在する 2 種類の周期軌道、すなわち、(1) 平行な辺で反射を繰り返す、いわゆる bouncing ball mode (2) 2 つの球がすれ違うボトルネックに存在する周期軌道、が緩和過程にいかなる影響を及ぼすかについて検討した。前者は、1 体のビリヤード系において代数的な緩和を発生させる原因となるものであり、後者は、高次元の遷移状態として最近研究の進んでいる「法双曲多様体」に対応するものである。その結果、前者については、位相空間に占める bouncing ball mode の次元が剛体球の数が増大すると共に相対的に低くなることからその影響力が小さくなることがわかり、後者については、緩和の速度を遅らせる効果はあるものの、緩和の関数型を指数関数的なものからずらす効果はないことが明らかになった。以上の考察をもとに、配置に関する相関関数を計算し、ガラスと類似の 2 段階緩和を見出す一方、遅い運動に対応する緩和も指数関数的なものでしかないことを確認した。

#### 6) 放物型の傘をもつマッシュルームビリヤード系の再帰時間分布

完全可積分系、一様双曲系のいずれでもない、一般のハミルトン系の位相空間は、カオス的な運動と準周期運動 (KAM トーラス) とが混在し複雑な構造をもつ。そのような混合位相空間上の軌道は、たとえカオス軌道であっても、準周期領域の近傍の淀み運動を行うため長時間の相関をもつ。そのような長時間相関を特徴づける方法として、再帰時間分布が有効であることが知られているが、最近、カオス領域と準周期領域との境界に階層的な島構造の存在しない、単純な混合系が発見され、その再帰時間分布の普遍則の有無が議論されている。ここでは、そのような混合系のひとつである、「放物型の傘をもつマッシュルームビリヤード系」の再帰時間分布を調べた。放物型の傘をもつマッシュルームビリヤード系で

は、スタジアムビリヤード系と同様、1-パラメータの周期軌道族をもつことから、その再帰時間分布に代数的なものになることが予想されるが、1-パラメータの周期軌道族の近傍での長時間滞在の機構が異なるため、スタジアムビリヤードなどで予想される普遍則 —再帰時間分布のベキの指数が2になる— が成り立つか否かは自明ではない。数値計算の結果、比較的短い時間領域では、ベキが2からずれることが見出されたが、理論的な解析の結果、長時間領域では、ベキが2に漸近することが導かれた。

#### 7) Rzążewski-Mostowski 写像の異常長寿命状態の spectrum からの解析

原子・分子中に束縛された電子の、時間変化する外場の下での挙動を単純化した記述として、外力の撃力近似が知られている。この近似の下では、系の時間発展写像を厳密に求めることが容易なため、数値実験上便利である。また、理論な興味のみならず、近年では量子写像系が実験的にも実現されている。

束縛状態から連続状態への解離を記述するモデルの数値計算では、量子写像系においても、一般には、連続状態に関する truncation の問題から逃れることはできない。これに対して、Rzążewski と Mostowski は、この問題を克服する量子写像を導入した。この系（以下 RM 写像と呼ぶ）では、特定の条件下での解離の抑制（population trapping）が報告されている。我々はこれまでに、RM 写像の時間領域の解析を行ない、非摂動的な状況下で、束縛状態が異常に長寿命となる場合を見だし、これが完全な束縛状態である予想を立てた。しかしながら、この真偽を明らかにするために必要な、スペクトル領域での解析が未解決の課題であった。

本年度は、この課題に取り組んだ。具体的には、RM 写像の長時間挙動を支配する、縮約された resolvent の極の配置を数値計算、および、厳密な解析から調べた。数値計算からは異常に長寿命な場合に対応する極の寿命が、確かに数値計算の精度の限界（ $10^{15}$  ステップ）を越えて長いことを確認した。さらに、特別な対称性下で、結合定数と極の寿命の間に漸近的な scaling 則が成立することを数値的に見出した。一方、厳密な解析から、異常に寿命の長い極が真の（つまり、寿命無限大の）束縛状態では無いことを証明した。今後の課題は、この異常に長い寿命の物理的な説明を与え、漸近的な scaling 則の起源を解明することである。

（宮本学氏（早大理工）との共同研究）

#### 8) Herman-Kluk 法の artifact としての“深い” tunnel と“浅い” tunnel

近年、量子力学の効率的な数値手法を標榜する、実古典軌道の sampling を用いた Herman-Kluk 法（HK 法）が多くの現実的な系の研究で適用されている。近似手法としての HK 法の利用の正当化は、Kay による、HK 法と量子論の漸近等価性、つまり、二つの理論の半古典極限の leading term が合致する、との主張に由来する。実の古典軌道の寄与のみを考える場合、漸近等価性は確かに成立するが、tunnel 過程を記述する複素古典軌道の寄与に対する考察は不完全であり、HK 法が tunnel 過程をどの程度記述し得るかは不明であった。

これに対し、本研究では、非線形力学の効果を伴うトンネル現象の解析において、HK 法が量子論との漸近等価性を破る例を提出した。さらに、HK 法の artifact として現れる非物理的な定常位相解（“古典軌道”）の寄与と、それが定める波動関数の tunnel 裾の構造を解明した。HK 法と量子論の漸近等価性は、tunnel 裾の浅い部分で成立する一方で、tunnel 裾の深い部分で破れることを示し、浅い部分と深い部分の境界を同定した。つまり、HK 法が tunnel 過程を記述し得る領域を明らかにした。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

Y. Okada, A. Shudo, T. Harayama and S. Tasaki: On the boundary element method for billiards with corners, *J. Phys. A*. **38** (2005) 6657–6688.

A. Shudo and S. Saito: Origin of slow relaxation in liquid water dynamics: A possible scenario for the presence of bottleneck in phase space, *Europhys. Lett.* **73** (2006) 826–832.

Atushi Tanaka: Determination of the border between “shallow” and “deep” tunneling regions for the Herman-Kluk method by the asymptotic approach, *Phys. Rev. A* **73** (2006) 024101-1–4.

### 2) 学会講演

日本物理学会 2005 年秋季大会 2005 年 9 月 19 日–9 月 22 日 (同志社大学京田辺キャンパス)

赤石暁, 奥島輝昭, 首藤啓: 2 剛体円板系における遅い緩和の起源

奥島輝昭, 赤石暁, 斉藤真司, 首藤啓: 2 成分 Lennard-Jones 系における遅い緩和

石川明幸, 田中篤司, 首藤啓: 混合位相空間と両生固有状態

田中篤司, 宮本学, 酒井道宏: Rzażewski-Mostowski 写像の spectrum 解析 (1)

### 国内研究会

RIMS Workshop: “Toward the complete and algorithmic description of the Stokes geometry”, 2005 年 12 月 21 日–22 日, 京都大学数理解析研究所

首藤啓: 非断熱遷移過程における Virtual Turning Points と New Stokes Curve の役割について

研究会「力学系と微分幾何学」, 2006 年 3 月 8 日–11 日, 京都大学数理解析研究所

首藤啓, 岡田雄一郎: Equivalence between isospectrality and iso-length spectrality for a certain planer billiard domains

### 国際会議

Workshop on “New Trends and Applications of Complex Asymptotic Analysis— around dynamical systems, summability, continued fractions —”, May 30–June 3, 2005, RIMS, Kyoto University

A. Shudo: Complex dynamics and quantum tunneling in the presence of chaos (2 Lectures) (invited)

Summer School/Conference “Let’s face chaos through nonlinear dynamics”, June 26–July 10, 2005, University of Maribor, Slovenia

A. Shudo: Stokes geometry in chaotic systems (2 Lectures) (invited)

“Algebraic analysis of differential equations – from microlocal analysis to exponential asymptotics ” in honor of Prof.Takahiro KAWAI on the occasion of his sixtieth birthday, July 7–July 14, 2005, RIMS, Kyoto University

A. Shudo: A role of new Stokes curves in quantized Henon map (invited)

“Complexified Dynamics and Quantum Chaos, Tunnelling and chaos”, Aug.25–Sep. 1, 2005,  
Ritsumeikan University

A. Shudo: Complex semiclassical analysis for chaotic tunneling (invited)

A. Shudo: Stokes phenomena in chaotic tunneling problems (invited)

Atushi Tanaka: A semiclassical analysis of tunneling tail that is described by Herman-Kluk method:  
border between “shallow” and “deep” tunneling regions

T. Onishi: Complex semiclassical description of ionization processes in strong laser fields

### 3) 学会誌等

A. Shudo: Stokes geometry for the quantized Hénon map, 数理解析研究所講究録 **1424** (2005) 184-199.

T. Aoki, T. Kawai, T. Koike, S. Sasaki, A. Shudo and Y. Takei: A background story and some know-how of virtual turning points, 数理解析研究所講究録 **1424** (2005) 53-63.

A. Shudo: Stokes geometry for the quantized Hénon map in the horseshoe regime, 数理解析研究所講究録 **1431** (2005) 107-115.

A. Shudo: A recipe for finding Stokes geometry in the quantized Henon map, 数理解析研究所講究録 **1433** (2005) 110-119.

A. Shudo: Julia set describes quantum tunneling in the presence of chaos, 数理解析研究所講究録 **1447** (2005) 187-197.

首藤啓: 「物理学大事典」(鈴木増雄・荒船次郎・和達三樹編, 2005, 朝倉書店), [カオス]の項分担執筆

# 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。2005年度より、多々良源がグループに加わった。2005年度における研究活動の概要は次の通りである。

### 1) 非平衡 reweighting 法の応用

新しいモンテカルロアルゴリズムの提案の多くは平衡系を対象とするものであり、非平衡系を扱う効果的なアルゴリズムの開発が望まれている。我々は、平衡モンテカルロ法に用いられる reweighting 法を非平衡系に拡張することを昨年度に提案した。この非平衡 reweighting は、イジングモデルの非平衡緩和の解析で成功を収めたが、さらに本質的に非平衡の転移である diffusive lattice gas モデルに応用した。ある温度で秩序パラメータの時間発展をモンテカルロ法で調べ、非平衡 reweighting を用いて他の温度における時間発展も計算する。その結果から、動的有限サイズスケーリングを用いて転移温度を決定すると共に、動的臨界指数  $\nu$  を効率よく求めた。また、multispin coding の手法を用いて計算の高速化をはかることができることを示した。

### 2) 磁化反転の長い時間スケールの計算

準安定状態を取り扱う際には、安定状態への遷移の時間スケールが長く、数値的に調べようとすると多くの困難に遭遇する。磁化をそろえた強磁性体に急激に反対方向の磁場をかけたときの磁化反転の問題が例であり、これは磁気記憶デバイスの設計とも関連する。磁化反転の問題をミクロに取り扱うためにはスピンの時間発展の方程式を用いるが、それをマクロな磁化の分布関数に関する時間発展の方程式で近似して、その近似方程式を厳密に扱った。厳密というのは、温度に依存する磁化の分布関数をモンテカルロ法により求め、時間発展方程式を Mathematica を用いた数式処理により解いた。2次元イジング系の場合に磁化反転の時間発展を計算し、他の手法を用いて得られたものとよく一致する結果を得た。

### 3) ナノ磁性体のダイナミクス

ナノ磁性体を念頭において、磁性体のダイナミクスを記述する Langevin タイプの方程式 (Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式) とモンテカルロ法との関係を議論した。Langevin タイプの取り扱いには長時間の緩和ダイナミクスを記述することが難しいが、一方、単純なモンテカルロ法には時間スケールが実時間と対応していないという問題がある。本研究では両者の欠点を補い合う、一般的な手法を議論した。ドリフト項と拡散項をマッチさせることにより、モンテカルロ法に現れる時間と実時間との関係付ける因子と際差運動のステップを求めた。実際に、単粒子の場合と磁性体の集合体の場合にこの方法の有効性を示した。

### 4) 交換バイアスの平均場理論

強磁性/反強磁性積層膜では、反強磁性スピンの影響で強磁性体のスピンの固定され、ヒステリシスループのシフトが見られる。この現象を交換バイアスとよぶが、磁化ドメインのサイズ、磁場などのパラメータに対する依存性など、わかっていないことが多い。ここでは、相互作用する反強磁性粒と強磁性膜からなる簡単なモデル系を考え、平均場理論でヒステリシスループのシフトを計算した。磁場やドメインサイズ依存性など、実験で観測されている結果を再現することができた。

## 5) 電流誘起磁壁移動の理論と磁気メモリへの応用

ナノサイズの磁石を用いた省電力不揮発性の新型高集積磁気抵抗メモリ (MRAM) の開発に向けた基礎研究を行っている。特に、電流誘起磁壁移動という新原理を利用した書込み技術を開発し、高集積・高速化と書込み電力の画期的な低減を目指す。解析は量子多体問題の厳格な手法を用い微視的立場からの定式化を行い、これにより新奇なスピン依存伝導現象の発見と解析、またデバイスとしての性能評価を行った。われわれの解析により、磁化の境界である磁壁を電流で駆動することで磁化反転を行う際の臨界電流の理論式の導出などいくつかの応用に向けて重要な事実を見いだした。たとえば、従来はサンプルの非均一性などからくるピン止め効果が低電流動作に大きなネックとなると推測されていたが、我々の理論計算によりそうした効果はスピントルクによる磁壁移動の場合はデバイス性能をほとんど影響がないことが明らかになった。このことは実用において非常に重要な事実である。最近の成果としてはスピン流は磁壁駆動だけではなく磁壁生成をおこすことを理論的に示した。電流による磁壁生成はMRAMの新しい書込メカニズムとなる発見である。また、スピン流による運動の証拠となる現象として、熱活性型運動領域で磁壁移動速度がかけた電流に対してユニバーサルな依存性を持つことを理論的に見出した。また磁壁以外の磁化構造に対するスピントルク効果の解析も行った。磁気渦は磁壁と異なり電流による内的な臨界電流を持たず、これをうまく使うことが低電力動作に有効であることも明らかになった。

## 6) 2次元古典スピン系に対するレベルスペクトロスコピー法を用いた研究

三角格子上反強磁性イジング模型の基底状態の持つガウシアン臨界性に対して一様磁場は Berezinskii-Kosterlitz-Thouless (BKT) 転移をもたらす  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  構造へ転移させる。この秩序相はストリング表示におけるストリング密度が  $\frac{2}{3}$  の密度波状態になっている為、密度をコントロールする化学ポテンシャルの変化に対し非圧縮となっている。我々は BKT 転移点およびストリングの非圧縮領域をレベルスペクトロスコピー法および密度行列くりこみ群法を用い決定した。一方、正方格子上反強磁性3状態ポッツ模型も基底状態においてガウシアン臨界性を持つことが知られている。この模型に次近接強磁性カップリングを加えた模型は、所謂6状態クロック模型と同じユニバーサリティークラスに属すると考えられる。我々はレベルスペクトロスコピー法を用いることで、BKT 転移点を正確に求め相境界を精密に決定し、さらに相境界上での理論的予想を数値的に検証した。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

H. K. Lee and Y. Okabe: Reweighting for Nonequilibrium Markov Processes Using Sequential Importance Sampling Methods, *Phys. Rev. E* **71** (2005) 015102(R)-(1-4).

Y. Okabe and T. Surungan: Phase transition of two-dimensional diluted XY and clock models, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **399** (2005) 132-135.

H. K. Lee and Y. Okabe: Nonequilibrium reweighting on the driven diffusive lattice gas, *J. Phys. A* **38** (2005) L241-L248.

T. Surungan and Y. Okabe: Kosterlitz-Thouless transition in planar spin models with bond dilution, *Phys. Rev. B* **71** (2005) 184438-(1-7).

H. K. Lee, Y. Okabe, X. Cheng and M. B. A. Jalil: Solving the Master Equation for Extremely Long Time Scale Calculations, *Comp. Phys. Commun.* **168** (2005) 159-164.

X. Cheng, M. B. A. Jalil, H. K. Lee and Y. Okabe: Time-quantifiable Monte Carlo method in simulating magnetization-reversal process, Phys. Rev. B **72** (2005) 094420-(1-8).

X. Cheng, M. B. A. Jalil, H. K. Lee and Y. Okabe: Mapping the Monte Carlo Scheme to Langevin Dynamics: A Fokker-Planck Approach, Phys. Rev. Lett. **96** (2006) 067208-(1-4).

H. K. Lee and Y. Okabe: Multispin coding technique for nonequilibrium reweighting, Int. J. Mod. Phys. C **17** (2006) 157-165.

Gen Tatara and Hiroshi Kohno: Microscopic Theory of Current-Driven Domain Wall Motion, Journal of Electron Microscopy 54(suppl 1), i69-i74 (2005).

Junya Shibata, Gen Tatara and Hiroshi Kohno: Effect of Spin Current on Uniform Ferromagnetism: Domain Nucleation, Phys. Rev. Lett. **94**, 076601-1-076601-4 (2005).

Gen Tatara, Nicolas Vernier and Jacques Ferrè: Universality of thermally assisted domain wall motion under spin torque, Appl. Phys. Lett. **86**, 252509-1-252509-3 (2005)

Gen Tatara, Eiji Saitoh, Masahiko Ichimura and Hiroshi Kohno: Domain wall displacement triggered by an AC current below threshold, Appl. Phys. Lett. **86**, 232504-1-232504-2 (2005).

Junya Shibata, Yoshinobu Nakatani, Gen Tatara, Hiroshi Kohno, Yoshichika Otani: Current-induced magnetic vortex motion by spin-transfer torque, Phys. Rev. **B73**, 020403-1-020403-4(R) (2006).

Hiromi Otsuka, Yutaka Okabe, and Kouichi Okunishi: Field-induced Berezinskii-Kosterlitz-Thouless Transition and String-Density Plateau in Anisotropic Triangular Antiferromagnetic Ising Model, Phys. Rev. E **73** (2006) 035105(R)-(1-4).

Hiromi Otsuka, Koutaro Mori, Yutaka Okabe, and Kiyohide Nomura: Level-Spectroscopy of the Square-Lattice Three-State Potts Model with Ferromagnetic Next-Nearest-Neighbor Coupling, Phys. Rev. E **72** (2005) 046103-(1-4).

Hiromi Otsuka and Masaaki Nakamura: Ground-state Phase Diagram of the One-Dimensional Hubbard Model with Alternating Potential, Phys. Rev. B **71** (2005) 155105-(1-7).

## 2) 国際会議報告

Hiromi Otsuka and Masaaki Nakamura: Two-Dimensional Ising Criticality in Interacting Electron Systems, Physica B: Condensed Matter, **359-361** (2005) 1430-1432.

## 3) 学会講演

日本物理学会第60回年次大会 2005年3月24日~3月27日(東京理科大学)

岡部豊, R.G. Ghulghazaryan: ペンローズ格子上的スピン系の状態和の零点

Hwee Kuan Lee, Yutaka Okabe: Reweighting for Nonequilibrium Systems

岩松雅夫, 岡部豊: ときおりジャンプするベイズンホッピング・アルゴリズムによるクラスター構造最適化

道村真司, 重川祥, 伊賀文俊, 岡部豊, 大山研司, 世良正文, 高畠敏郎: Shastry Sutherland 格子系  $\text{ErB}_4$  の新奇な物性と磁気相図

多々良源, 高山利彦, 河野浩, 柴田絢也, 福山秀敏: 電流駆動磁壁移動における臨界電流: 内的, 外的ピン止めおよび  $\beta$  項の役割

柴田絢也, 多々良源, 河野浩, 大谷義近: 電流駆動磁壁運動に対するスピン波の効果

河野浩, 多々良源, 柴田絢也: LLG 方程式におけるスピントルクの微視的計算 II

大塚博巳, 森康太郎, 岡部豊, 野村清英: 次近接強磁性カップリングをもつ正方格子上 3 状態ポッツ模型の相構造

日本物理学会 2005 年秋季大会 2005 年 9 月 19 日 - 9 月 22 日 (同志社大学)

岡部豊, Hwee Kuan Lee: 非平衡 reweighting とその応用

柴田絢也, 多々良源, 河野浩, 仲谷栄伸, 大谷義近: スピン流による磁気渦の運動

河野浩, 多々良源, 柴田絢也: LLG 方程式におけるスピントルクの微視的計算

大塚博巳, 岡部豊, 野村清英: Kitatani-Oguchi 模型の相構造と空間的異方性の効果について

大塚博巳, 岡部豊, 奥西巧一: 三角格子上反強磁性 Ising 模型の基底状態に見られる磁場誘起相転移と string-density プラトールについて

## 国際会議

StatPhys-Taiwan-2005, Academia Sinica, Taipei, July 31-August 6, 2005

Y. Okabe and Hwee Kuan Lee: Monte Carlo dynamics and reweighting (invited)

Workshop on classical and quantum nanomagnetism, Physics Centre of Les Houches School, France (25-28 April 2005)

Gen Tatara, Microscopic theory of Current-driven Domain wall in nano-magnets (invited)

Moscow International Symposium on Magnetism (MISM-2005, June 25-30, 2005, Moscow)

Gen Tatara, Theory of Current-driven Domain wall in nano-magnets (invited)

The 8th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology (ISQM-Tokyo'05), Advanced Research Laboratory, Hitachi, Ltd., Hatoyama (22-25 August, 2005)

G. Tatara, H. Kohno, J. Shibata, E. Saitoh, Microscopic Theory of Current-Driven Domain Wall Motion (invited)

International Workshop on Spins and Quantum Transport, International Frontier Center for Advanced Materials (IFCAM) Institute for Material Research, Tohoku University (2005.10.12-14)



Gen Tatara, Theory of Current-driven Domain wall (invited)

The 1st RIEC International Workshop on Spintronics -Spin Transfer Phenomena-  
東北大学電気通信研究所 (2006/2/8-9)

Gen Tatara, Threshold of Current-driven Domain Wall Motion (invited)

SpinAps International workshop on spin currents in magnetic nano-structures,  
IBM Almaden, March 17-19 (2006)

Gen Tatara, Threshold of current-driven domain wall motion (invited)

#### 4) 学会誌等

多々良 源、河野浩、柴田絢也、齊藤 英治:

電流による磁壁駆動の物理, 固体物理 **40**, 545-558 (2005).

多々良源、河野浩、柴田絢也、仲谷栄伸、山口明啓、小野輝男:

電流による磁壁駆動, 応用物理、**74**, 1598-1602 (2005).

柴田絢也、多々良 源、河野浩:

スピン流による磁壁生成, 固体物理 **41**, 109-117 (2006).

多々良源、河野浩、柴田絢也、仲谷栄伸、山口明啓、小野輝男:

電流による磁壁駆動, 応用物理、**74**, 1598-1602 (2005).

#### 5) 著書等

岡部豊:「物理学事典」(鈴木増雄、荒船次郎、和達三樹編, 2005, 朝倉書店)

[熱・統計力学] の項分担執筆

# 固体理論サブグループ

## 1. 研究活動の概要

本研究室は、固体の示す磁気や、電気、光学的等、様々な物性の起源や機構をミクロスコピックな立場から解明することを目的としている。特にこれらの物性のうち、多数の電子や分子が相互に働きかけあって現われる新しい状態の発現や、その特徴を捉える上で重要と思われる現象の解明を目指している。現在は多重極転移、一次元ボーズ・フェルミ混在系の相転移、強相関係のバンド理論等をテーマとしている。

### 1) 多重極秩序の理論

希土類やアクチナイドイオンを含む物質、いわゆる  $f$  電子系では、しばしば複雑かつ謎めいた秩序状態が現れることが知られている。最近の研究から、「多重極モーメント」と呼ばれる隠れた  $f$  電子自由度が、こうした現象において重要な役割を演じていることが分かってきた。当グループは、これまで多重極転移を示すいくつかの典型物質に着目し、その磁気相図と異常物性の起源の解明を進めてきた。現在、 $Ce_{1-x}La_xB_6$ 、Pr スクッテルダイト、 $NpO_2$  などにおける秩序状態の理論研究を行っている。

A) 1 重項・3 重項モデルと  $PrOs_4Sb_{12}$  における磁場誘起秩序： Pr スクッテルダイト化合物では  $f^2$  配置が安定であり、結晶場 1 重項基底が共通の性質であることが実験的に明らかになってきた。我々は、 $PrOs_4Sb_{12}$  や  $PrFe_4P_{12}$  で有力視されている 1 重項-3 重項モデルにおける多重極相互作用について調べている。これまでに、スピンドイマー系との類似性に着目した多重極相互作用の擬スピン表示が、 $PrOs_4Sb_{12}$  の磁場誘起秩序の特性を調べる上で非常に有用であることを示してきた。本年度は、ゼロ磁場での四重極秩序の可能性とその性質へと解析を進めている。これは最近の圧力実験において 1 重項-3 重項ギャップの減少が観測されたことを念頭に置いている。擬スピンのユニタリー変換によって、ゼロ磁場の四重極相互作用がある条件のもとで量子反強 Potts モデルにマップ出来ることを示した。Potts モデルの縮退や相の競合に関する知見に基づき、ゼロ磁場四重極相の可能な性質について調べている。[椎名]

B)  $PrOs_4Sb_{12}$  における中性子散乱スペクトル：  $PrOs_4Sb_{12}$  における中性子散乱スペクトル： 1 重項-3 重項モデルに対して多重極モーメントのボソン化の方法を用いて、励起エネルギーの分散関係や中性子散乱強度の変化を、相互作用の特性と関連付けて調べてきた。パラ相では、反強相互作用を反映して  $k$  空間ゾーン境界で励起エネルギーのソフト化が現れるが、磁性の場合と異なり、散乱強度がゾーン境界で減少することを指摘した。このような四重極特有の励起はごく最近桑原らにより観測され、四重極励起子の初めての観測例として確立された。磁場中での励起三重項の分裂や秩序相内での複雑なスペクトルの形状について実験グループとの連携のもとで解析を進めている。[椎名]

C) 八重極秩序の理論 (中性子回折)：  $Ce_{1-x}La_xB_6$  と  $NpO_2$  の秩序状態について八重極秩序が実現している可能性が指摘されている。ごく最近、 $Ce_{1-x}La_xB_6$  の IV 相で共鳴 X 線実験により超格子反射が初めて観測されるなど進展が見られたが、NMR や中性子散乱との整合性は未だ不明で問題点も多い。中性子散乱では、通常、磁気二重極との結合が主要な寄与を与えるが、実験結果には補正として必ず高次の多重極の寄与が含まれている。八重極秩序相に対して、この補正項を考慮すれば超格子反射を同定できる可能性がある。こうしたことから、中性子散乱の磁気形状因子をダイポール近似を超えて計算している。対称性が低くかつ大きな波数の超格子点において、実験的に有意な大きさの散乱強度が得

られることが分かった。[椎名、酒井]

D) 多重極-核スピン相互作用の一般型の理論 (NMR): 核スピン共鳴 (NMR) は物質の構成原子の核上の磁場や電気 4 重極場を謂わば直接的に見ることの出来る手段であり、有効に使うことが出来れば多重極秩序状態の観測に有力な方法である。本研究では、どのような多重極が核スピンにどのような微細分裂を与えるかを不変式で群論的に整理した。これにより、簡便な式で微細分裂と多重極秩序を結びつけることを可能にした。PrFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub> の実験により、モノポール型の秩序の誘起されている可能性のあること、NpO<sub>2</sub> の O 核の信号の奇妙な分裂は、3-k 型 8 重極秩序に付随する 3-k 型反強 4 重極秩序を証明するものであることを理論的に解明した。また、PrFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub> の実験解析より、モノポール型の秩序の誘起されている可能性のあること等を提唱している。[酒井、椎名、斯波 (IPAP)]

## 2) 1次元ボーズ・フェルミ系の相転移

A) 1次元ボーズ・フェルミ混在系における混合分離転移: 1次元方向に動きを制限されたボーズ・フェルミ混在系について数値解析を行った。このようなシステムは、レーザー光と磁場を用いて捕獲・冷却された原子系で実現可能と考えられているものの、その物理的性質については未解明の部分が多い。今回はボーズ粒子とフェルミ粒子との間に働く斥力相互作用に注目した。この斥力相互作用が引き起こす現象として、混合・分離転移が考えられる。これは、両粒子の運動エネルギーと粒子間の斥力相互作用の競合関係によって引き起こされる転移であるが、特定のパラメータ領域については厳密解があるものの、相図の全体像についてはほとんどわからない状況にあった。そこでボゾン間相互作用とボゾン・フェルミオン間相互作用に加え、ボゾンとフェルミオンの粒子数差をパラメータに選び、混合相と分離相の特定をモンテカルロシミュレーションを用いて行った。この問題におけるモンテカルロシミュレーションは初めての試みである。その結果、ボゾン・フェルミオン間の相互作用を強めることで、いかなる粒子数差、いかなるボゾン間相互作用に対しても、混合・分離転移が見られることが明らかになった。[森、竹内 (広大)]

B) 1次元ボーズ・フェルミ混在系におけるモット転移: ボーズ粒子とフェルミ粒子が混在するシステムにおいては、両者の間に斥力相互作用が働いている場合に混合・分離転移が見られる。この状況下で、粒子数が背景にある格子点に対してコメンシュレートな場合には、混合・分離転移に加えてモット転移の発生が予想される。この点について、モンテカルロシミュレーションを用いて詳しく数値解析を行った。その結果、図のように混合・分離転移に加えてモット転移が観測され、混合状態におけるモット絶縁体相、分離状態におけるモット絶縁体相がそれぞれ確認された。[森、竹内]

## 3) 強相関物質のバンド構造の理論

A) 希土類やウラン化合物のf電子間の相互作用が強いため、電子が相互に避け合いながら物質中を遍歴していると考えられ、磁性や超伝導など、様々な物性にその効果が現われている。電子間相互作用の動的な効果をバンド計算に取り入れることは従来からの課題であった。これを取り入れる1つの方法として、動的平均場法 (DMFT) が提唱され、様々なモデル計算で成功をおさめている。本研究はこの方法を、実際の物質のバンド計算に取り入れ、汎用のプログラムを作ろうとするものである。この方向の研究は世界各地で競争的に進められているが、本研究は、補助的 1 不純物問題の解法に NCAf<sub>2v</sub>' 法という新しい手法を発展させ、実際の f 電子系への適用に必須であるスピン軌道相互作用や結晶場分裂を高い精度で取り入れる計算を初めて可能にしている点に特徴がある。典型的な 4f 物質である Ce 金

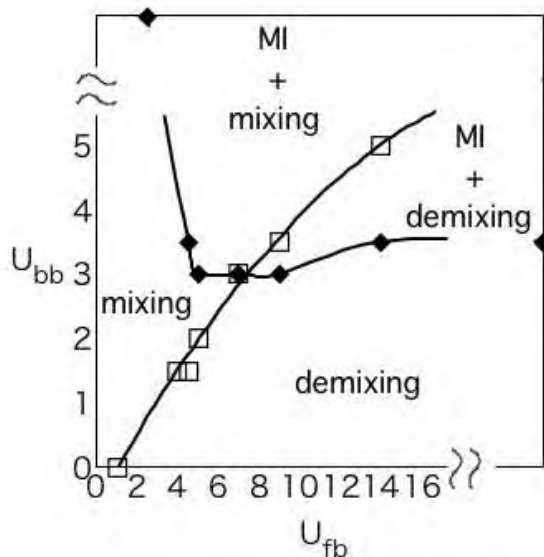


図 1: ボゾン間相互作用 ( $U_{bb}$ ) およびボゾン・フェルミオン間相互作用 ( $U_{fb}$ ) をパラメータとする相図。MI はモット絶縁体を表す。

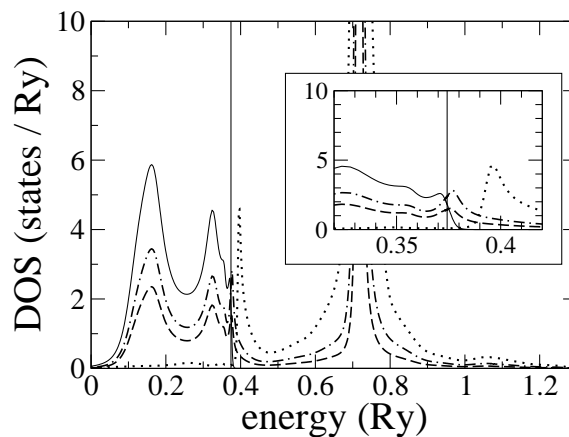


図 2: DMFT 第一原理バンド計算による CeSb の  $f$  成分状態密度 (温度は  $T=300\text{K}$ )。挿入図はフェルミエネルギー (縦実線  $0.375\text{Ry}$ ) 近傍の拡大図。一点鎖線、破線、点線は対称性により成分を分類したもの。実線は光電子スペクトル。実験に対応する 2 ピーク構造が第一原理計算で再現される。

属、CeSb への適用により、第一原理計算と光電効果の実験などとの直接比較により、有効性を検証した。[酒井、清水 (東北大)、金田 (東大)]

その他に、DMFT-法計算で使われている 1 不純物近藤問題の解法のパッケージ RSLV による光電子効果の解析などを進めた。[菅 (大阪大)、酒井]

B)  $f^2$  格子系における価数揺動と局在非局在転移: Pr や U 化合物で実現する  $f^2$  系の電子状態は多くの異常物性の起源と考えられているが、原子内相互作用や混成効果の複雑さのため、理解が遅れている。 $f^2$  格子系における価数揺動の重要な一例として、Pr スクッテルダイトの重い電子状態がある。これを念頭に置き、1 重項基底を局在極限にもつ多軌道周期アンダーソンモデルを導入し、混成効果を調べた。Gutzwiller 変分法による解析を行い、 $f$  電子の局在化が結晶場分裂に対して不連続転移として生じうることを示した。また、フェルミ流体論におけるランダウ係数の計算を通じて、局在に伴い帯磁率の大幅な減少がもたらされること、混成の小さいときには局在転移が磁気転移と同時に起こり得ることなどを示した。現在、より現実的な  $f^2$  モデルに対する Gutzwiller 法の定式化にも取り組んでいる。[椎名、酒井]

## 2. 研究業績

### 1) 論文

H. Tou, M. Doi, M. Sera, M. Yogi, H. Sugawara, R. Shiina and H. Sato: Sb-NQR Probe for Multipole Degree of Freedom in the First Pr-based Heavy-Fermion Superconductor  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ , J. Phys. Soc. Jpn. **74** (2005) 2695-2698.

R. Shiina: Valence Fluctuation from  $f^2$  Singlet Crystal-Field Ground State in Generalized Periodic Anderson Model, J. Phys. Soc. Jpn. **74** (2005) 3267-3275.

Y. Takeuchi and H. Mori: Mixing-demixing transition in one-dimensional boson-fermion mixtures,

Phys. Rev. A, **72** (2005) 063617.

Y. Takeuchi and H. Mori: Mixing-demixing transition in 1D boson-fermion mixtures at low fermion densities, J. Phys. Soc. Jpn. **74**(2005) 3391.

Y. Takeuchi and H. Mori: Mott transition in one-dimensional boson-fermion mixtures, Int. J. Mod. Phys. **B20** (2006) 617.

O. Sakai, Y. Shimizu and Y. Kaneta: Band Calculation for Ce-Compounds on the basis of Dynamical Mean Field Theory, J. Phys. Soc. Jpn. **74** (2005) 2517-2529.

S. Suga, A. Sekimoto, S. Imada, A. Shigemoto, A. Yamasaki, M. Tsunekawa, C. Dallera, L. Braicovich, T-L. Lee, O. Sakai, T. Ebihara and Y. Onuki: Kondo Lattice Effects of YbAl<sub>3</sub> Suggested by Temperature Dependence of High-Accuracy High-Energy Photoelectron Spectroscopy, J. Phys. Soc. Jpn. **74** (2005) 2880-2884.

## 2) 学会講演

日本物理学会 2005 年秋期大会 2005 年 9 月 19 日~ 9 月 22 日 (同志社大学)

椎名亮輔:  $f^2$  格子系における価数揺動と局在非局在転移

竹内陽介, 森弘之: 一次元 Bose-Fermi 混在系の混合分離転移

清水幸弘、酒井治: Pr スクッテルダイトの pf 混成のバンド計算による評価

酒井治、清水幸弘、金田保則: DMFT 法による Ce 化合物のバンド計算

日本物理学会 2006 年年次大会 2006 年 3 月 27 日~ 3 月 30 日 (愛媛大学・松山大学)

竹内陽介, 森弘之: 1 次元ボーズ・フェルミ混合系における demixing およびモット転移

清水幸弘、酒井治: PrOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> の重い電子状態における多重極近藤効果の役割

特定領域研究「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」研究会  
2005 年 6 月 16 日~ 6 月 18 日 (神戸セミナーハウス)

椎名亮輔: Quadrupolar Phase Transition in  $f$ -Electron Systems

酒井治: 八極子秩序は NMR でどう見えるか

特定領域研究「次世代量子シミュレータ・量子デザイン手法の開発」研究会  
2005 年 9 月 30 日~ 10 月 1 日 (国際高等研)

酒井治:  $f$ -電子系にたいする動的平均場近似による第一原理計算

特定領域研究「次世代量子シミュレータ・量子デザイン手法の開発」ミニワークショップ  
2006 年 2 月 22 日 (東京大学)

酒井治: DMFT 法による 4f 電子系のバンド計算

国際会議

Joint Workshop on NQP-skutterudites and NPM in Multi-Approach, 21-24, Nov. 2005,  
(Tokyo Metropolitan University)

R. Shiina: Valence Fluctuation from  $f^2$  Singlet Crystal-Field Ground State in Generalized Periodic Anderson Model

O. Sakai: Notes on the Hyperfine Interaction in Rare-earth Skutterudites

The 5th NAREGI International Nano-Science Symposium Theories and Simulation Methods  
for Soft X-ray Solid State Spectroscopy, Tsukuba, 7-9, Nov. 2005.

O. Sakai: Band Calculation for 4f-Electron Systems on the Basis of Dynamical Mean Field Theory

### 3) 学会誌等

椎名亮輔:  $f$  電子系における多重極秩序と中性子散乱, 中性子学会誌「波紋」 16 (2006) 12.

# 高エネルギー実験サブグループ

## 1. 研究活動の概要

本研究室では、日本が世界をリードしている  $B$  ファクトリーにおける、粒子・反粒子対称性の破れの研究を始めとする高エネルギー衝突型加速器実験の他、将来計画のための加速器研究や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。2005 年度末で、長年に渡って当サブグループをご指導して下さい、浜津良補助教授が定年退職された。

### 1) 衝突型加速器実験

粒子加速器によって、電子・陽電子・陽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。陽子の構造の探求や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 加速器は順調に稼働し、今年度のルミノシティは  $15 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$  から  $16 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$  に向上した。積分ルミノシティも  $350 \text{ fb}^{-1}$  から  $570 \text{ fb}^{-1}$  へと増加し、Belle と Babar のデータ量の差は広がり、Belle が約 1.5 倍のデータを所有している。今年度の物理解析で得られた成果として、第 3 世代の  $b$  クォークが第 1 世代の  $d$  クォークに遷移する新しいタイプの素粒子反応を世界で初めて確認することに成功した。具体的には、このデータの中に、 $B$  中間子が 2 個の  $K$  中間子に崩壊する事象 30 例と、 $\gamma$  線を放出して  $\rho$  (ロー) や  $\omega$  (オメガ) などの軽い中間子に壊れる事象 35 例を確認した。これらの崩壊は  $b$  クォークから  $d$  クォークへの遷移によって引き起こされるものである。また  $B \rightarrow c\bar{c}$  崩壊過程の解析では、昨年度に引き続き、これまでには見つかっていなかった新しい共鳴状態が発見された。これはエキゾチックなクォークの組み合わせとも考えられ注目を浴びている。Belle 実験では、今年度、45 編の欧文雑誌への投稿論文、90 編以上の国際会議への contribution 論文が出版された。

一方、将来の 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を KEK、名古屋大、千葉大、リュブリアナ大学などと協力して開発している。この検出器に使用される新型光センサーとして、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、高性能光検出器とその読み出し電子回路の開発も進めている。

#### 電子-陽子衝突型加速器 HERA による ZEUS 国際共同研究

ドイツ・シンクロトロン研究所 (DESY) の電子-陽子衝突加速器 HERA は 2000 年から 2001 年にかけて高輝度化のための改造を行い、HERA-II として運転を再開した。HERA-II に向けた改造の、もう一つのポイントは、縦偏極した電子と陽子の衝突実験を可能としたことである。HERA の縦偏極した電子ビームと高い 4 元運動量移行の特徴を生かして、電子と陽子による深非弾性散乱の測定により、標準模型の 1 つの柱である電弱相互作用の検証を行なった。

電子-陽子の散乱は、交換されるゲージボソンの電荷により、中性流深非弾性散乱 (Neutral Current DIS: NC-DIS と略称) と荷電流深非弾性散乱 (Charged Current DIS: CC-DIS と略称) とに分類される。本研究では、後者の CC-DIS による反応、 $ep \rightarrow \nu X$  の断面積を電子ビームの縦偏極度をパラメータとして測定した。実験データは、電子ビームの偏極を右巻き、左巻きと交互に切り替えて取得した。蓄積されたデータは、平均偏極度 +33% および -26% に対して、それぞれ積分ルミノシティ  $42.1 \text{ pb}^{-1}$  および  $55.6 \text{ pb}^{-1}$  であった。データの中からバックグラウンドを排除して、CC-DIS を高いシグナル/バックグラウンド比で選択し、各種物理量に対する分布をモンテカルロ・シミュレーション (MC と略称) に

よる分布と比較した。縦偏極度が正と負のサンプルそれぞれに対して、データと MC は非常に良く一致することが確認された。全散乱断面積を電子ビームの縦偏極度の関数として、今回新しく得た平均偏極度 +33% および -26% の測定値を、2000 年以前のデータによりすでに論文発表されている、偏極度ゼロの測定値と共にプロットしたところ、明確に線形の依存性を示した。これらのデータを直線でフィットし、偏極度 +100% での全断面積の値として、 $0.7 \pm 3.2(stat.) \pm 1.7(syst.) pb$  が得られた。これは誤差の範囲でゼロと矛盾せず、標準模型が前提とする弱い相互作用における左右非対称性を示している。また右巻き荷電流が存在したと仮定した場合、それによる断面積の上限値が 95% の信頼度で 7.9pb 以下であること、およびそれに対応する右巻き荷電流を担うゲージ粒子の質量が 197GeV 以上 (信頼度 95%) であるという結果を得た。

## 2) 将来加速器の研究

2010 年代の実験開始を目標としている電子-陽電子リニアークライダー・ILC (International Linear Collider) をはじめとする将来の加速器に用いられる加速器技術に関する様々な研究を行っている。

### レーザーコンプトン散乱による高輝度 X 線の生成

ブルックヘブン国立研究所 (BNL) において、炭酸ガス・レーザー (波長  $10.6\mu m$ ) と 60MeV の電子ビームのコンプトン散乱を利用した高輝度 X 線生成実験を行っている。この手法は、放射光 X 線に代わる次世代の高輝度 X 線源として、広範な研究領域への応用が期待されている。2004 年度には、レーザーのパルス幅を、今までの 200psec から、20- 40psec に短パルス化することに成功したが、2005 年度には、約 5psec (FWHM) と、さらなる短パルス化を行なった。このため、レーザーのピーク・パワーは 200GW 以上に達していると推測される。

このレーザー・パワー領域では、高次 QED 過程 (多光子吸収 1 光子放出) である非線形コンプトン散乱の確率が大きくなる。2004 年度には、2 次の非線形散乱 (2 光子吸収 1 光子放出) の観測に成功したが、今後の実験で、3 次以上の高次過程の観測も期待できる。

### 単結晶を用いた陽電子源の開発

ILC や次世代 KEK-B のような、高ルミノシティ  $e^+e^-$  加速器を実現させるためには、ルミノシティを増大させるために、大強度の陽電子源を開発することが重要な課題である。単結晶標的による陽電子生成率の増大は、これまで KEK との共同開発研究として行ってきた、Linac からの 8GeV 電子ビームを、タングステン、シリコンおよびダイヤモンド単結晶に照射する実験により確かめられている。実験の結果によると、結晶標的の結晶軸がビーム軸に一致した場合に陽電子の生成が最大となり、結晶軸を大きく外した場合 (非晶質とみなす) と比較してその生成比が増大した。今年度は、KEK-B Linac 陽電子ステーションにタングステン単結晶を標的として使用して陽電子の生成効率を向上させ、ひいては KEK-B 加速器の陽電子数を増大することを目的とした。この目的を達成するために、以下の 2 つの項目について研究を行った。

1) 10mm 以上の厚さのタングステン単結晶による標的厚さの最適化

2) 陽電子ステーションへの結晶標的の組込み方法の開発

従来行ってきたタングステン単結晶による陽電子生成実験では単結晶の厚さが、2.2, 5.3, 9.0mm であった。今回はさらに、12mm と 14mm のタングステン単結晶による実験を行った。陽電子ステーションに標的を設置することを前提として電子ビームエネルギーは 4GeV で入射した。陽電子増大率 (Enhancement Factor) を、結晶軸が中心から充分はなれた角度の生成量に対する比として定義すると、12mm の場合は約 1.2 であった。

陽電子ステーションへ単結晶標的を組み込むには、ビーム照射による発熱を放出するために、タングステンの回りに HIP 加工により銅を巻き付けた構造にしなければならない。この加工によって結晶の性



質が劣化しないことを確認するための測定を行った結果、HIP 加工したタングステン単結晶標的でも陽電子の生成が増大する事が確認できた。その他、ロシアの共同研究者が開発を行って作成した人工ダイヤモンド（断面： $2.5 \times 2.5 \text{mm}^2$ 、厚さ：7.5mm）による陽電子生成の測定も行った。

### 3) ニュートリノ観測実験

#### KASKA 実験

世界最大の出力を誇る柏崎・刈羽原子力発電所からのニュートリノを用いた、最後のニュートリノ振動実験パラメーター  $\theta_{13}$  角を測定する実験・KASKA を、新潟大学・東北大学・東京工業大学などと協力して進めている。ニュートリノ観測は検出効率が非常に低く、常にバックグラウンドとの競争となる。そのためバックグラウンドの大きな要因となる宇宙線の頻度を GEANT4 を用いたシミュレーションにより見積もった。また、ニュートリノ観測に使用する光電子増倍管のガラスに含まれる放射性同位元素の定量を、化学専攻科の放射化学研究室で行っていただいた。その結果、新しいタイプのガラスでは、これまでのものに比べて約 1/10 の量であることが判明し、KASKA 実験で十分に使用できることが判った。

#### 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

宇宙から降り注ぐ超高エネルギーニュートリノ ( $> 10^{15} \text{eV}$ ) は、活動銀河核などの高エネルギー現象からの直接的な高エネルギー信号として情報をもたらしてくれる可能性がある。一方、存在が確実である GZK ニュートリノは非常に稀なため、検出するには 50Gton の巨大質量の検出器が必要となる。天然巨大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）を捉える方法の基礎研究を行なった。岩塩中での電波の減衰長の測定と電磁シャワー中の電波発生のもととなる過剰電子のシミュレーションを Geant4 で行ない、超高エネルギーにも対応可能なように構造関数を決定した。それを利用して、実際の巨大岩塩検出器でのシミュレーションにより、GZK ニュートリノは 1 年間に、8 から 62 事象が検出可能であることが判明した。

### 4) 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研究を行っている。大立体角化した検出器の Geant4 によるシミュレーションを行なった。以前に行なった、EGS4 によるシミュレーション結果と比較して、検出効率は概ね一致していることを確かめた。さらに、シミュレーションで求めたエネルギー、運動量分布等を取付したデータと比較して、消滅過程速度を求める予定である。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

Study of  $B^\pm \rightarrow D_{CP}K^\pm$  and  $D_{CP}^*K^\pm$  decays

K.Abe *et al.*, (The Belle Collaboration), Phys. Rev. D 73, 051106(R) (2006)

Search for the decay  $B^0 \rightarrow \gamma\gamma$

S.Villa *et al.*, (The Belle Collaboration), Phys. Rev. D 73, 051107(R) (2006)

Observation of a  $\chi'_{c2}$  candidate in  $\gamma\gamma \rightarrow D\bar{D}$  production at Belle

S. Uehara *et al.*, (The Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 96, 082003 (2006)

Search for Lepton and Baryon Number Violating  $\tau^-$  Decays into  $\bar{\Lambda}\pi^-$  and  $\Lambda\pi^-$

Y. Miyazaki, S. Eidelman *et al.*, (The Belle Collaboration), Phys. Lett. B 632, 51, (2006)

- Measurement of the branching fractions for  $B^- \rightarrow D^{(*)+} + \pi^- l^- \bar{\nu}_l$  and  $\bar{B}^0 \rightarrow D^{(*)0} \pi^+ l^- \bar{\nu}_l$   
D. Liventsev, T. Matsumoto *et al.*, (The Belle Collaboration), Phys. Rev. D 72, 051109(R) (2005)
- Measurement of Branching Fractions for  $B \rightarrow \chi_{c1(2)} K(K^*)$  at Belle  
N. Soni *et al.*, (The Belle Collaboration), Phys. Lett. B 634, 155 (2006)
- Search for  $D^0$ - $\bar{D}^0$  mixing using semileptonic decays at Belle  
U. Bitenc *et al.*, (The Belle Collaboration), Phys. Rev. D(RC) 72, 071101(R) (2005)
- Measurements of B decays to two kaons  
K. Abe *et al.*, (The Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 95, 231802 (2005)
- Search for the  $\theta(1540)^+$  pentaquark using kaon secondary interactions at Belle  
R. Mizuk, M. Danilov *et al.*, (The Belle Collaboration), published in Phys. Lett. B 632, 173 (2006)
- Observation of  $B^- \rightarrow J/\psi \Lambda \bar{p}$  and searches for  $B^- \rightarrow J/\psi \Sigma^0 \bar{p}$  and  $B^0 \rightarrow J/\psi p \bar{p}$  Decays  
Q. L. Xie *et al.*, (The Belle Collaboration), Phys. Rev. D 72, 051105(R) (2005)
- Measurement of the wrong-sign decays  $D^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^0$  and  $D^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$  and search for  $CP$  violation  
X. C. Tian *et al.*, (The Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 95, 231801 (2005)
- Charm Hadrons from Fragmentation and B decays in  $e^+e^-$  Annihilation at  $\sqrt{s}=10.6$  GeV  
R. Seuster *et al.*, (The Belle Collaboration), Phys. Rev. D 73, 032002 (2006)
- Search for the  $b \rightarrow d\gamma$  process  
D. Mohapatra *et al.*, (The Belle Collaboration), Phys. Rev. D 72, 011101(R) (2005)
- Determination of  $|V_{ub}|$  from Measurements of the Inclusive Charmless Semileptonic Partial Rates of B Mesons using Full Reconstruction Tags  
I. Bizjak *et al.*, (The Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 95, 241801 (2005)
- Measurements of branching fraction and polarization in  $B^+ \rightarrow \rho^+ K^{*0}$  decay  
J. Zhang *et al.*, (The Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 95, 141801 (2005)
- Improved Evidence for Direct  $CP$  Violation in  $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$  Decays and Model-Independent Constraints on  $\phi_2$   
H.Ishino, A.Kusaka, H.Kakuno and A.Kibayashi,*et al.*, (The Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 95, 101801 (2005)
- Measurement of  $|V_{ub}|$  near the endpoint of the electron momentum spectrum from semileptonic B-meson decays  
A. Limosani *et al.*, (Belle Collaboration), Phys. Lett. B 621, 28 (2005)
- Studies of  $CP$  violation in  $B \rightarrow J/\psi K^*$  decays  
R.Itoh, Y.Onuki *et al.*, (The Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 95, 091601 (2005)

Time-Dependent  $CP$ -Violating Asymmetries in  $b \rightarrow s\bar{q}q$  Transitions

K.-F.Chen, F.Fang, A.Garmash, K.Hara, M.Hazumi, T.Higuchi, H.Kakuno, A.Kusaka, T.Shibata, O.Tajima, K.Trabelsi and T.Ziegler *et al*, (The Belle Collaboration), Phys. Rev. D 72, 012004 (2005)

Study of the Baryon-Antibaryon Low-Mass Enhancements in Charmless Three-body Baryonic B Decays

M.-Z.Wang *et al*, (The Belle Collaboration), Phys. Lett. B 617, 141 (2005)

Observation of  $B^+ \rightarrow p\bar{\Lambda}\gamma$

Y.-J.Lee, M.-Z.Wang *et al*, (The Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 95, 061802 (2005)

Improved Measurement of the Electroweak Penguin Process  $B^- \rightarrow X_s l^+ l^-$

M. Iwasaki *et al*, (The Belle Collaboration), Phys. Rev. D 72, 092005 (2005)

Search for lepton flavor violating decays  $\tau u^- \rightarrow l^- \pi^0, l^- \eta, l^- \eta'$

Y. Enari *et al*, (The Belle Collaboration), Phys. Lett. B 622, 218 (2005)

Search for  $B^0 \rightarrow J/\psi \bar{D}^0$  and  $B^+ \rightarrow J/\psi \bar{D}^0 \pi^+$  decays

L. M. Zhang *et al*, (The Belle Collaboration), Phys. Rev. D 71, 091107(R) (2005)

Measurement of Time-Dependent  $CP$ -Violating Asymmetries in  $B^0 \rightarrow K_s^0 K_s^0 K_s^0$  Decay

K. Sumisawa *et al*, (The Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 95, 061801 (2005)

Measurement of Polarization and Triple-product Correlations in  $B \rightarrow \phi K^*$  decays

K.-F. Chen *et al*, (The Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 94, 221804 (2005)

Time-Dependent  $CP$  Violation Effects in Partially Reconstructed  $B^0 \rightarrow D^* \pi$  Decays

T.Gershon *et al*, (The Belle Collaboration), Phys. Lett. B 624, 11 (2005)

Search for  $B^0 \rightarrow p\bar{p}, \Lambda\bar{\Lambda}$  and  $B^+ \rightarrow p\bar{\Lambda}$  at Belle

M. C. Chang *et al*, (The Belle Collaboration), Phys. Rev. D 71, 072007 (2005)

Measurement of the Time-Dependent  $CP$ -Violating Asymmetry in  $B^0 \rightarrow K_s^0 \pi^0 \gamma$  Decay

Y.Ushiroda *et al*, (The Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 94, 231601 (2005)

Measurement of  $\gamma\gamma \rightarrow p\bar{p}$  production at Belle

C. C. Kuo *et al*, (The Belle Collaboration), Phys. Lett. B 621, 41 (2005)

Evidence for  $B^0 \rightarrow D^+ D^-$  and Observation of  $B^- \rightarrow D^0 D^-$  and  $B^- \rightarrow D^0 D^{*-}$  Decays

G. Majumder *et al*, (The Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 95, 041803 (2005)

Search for  $\tau \rightarrow e\gamma$  decay at Belle

K.Hayasaka *et al*, (Belle Collaboration), Phys. Lett. B 613, 20 (2005)

Branching Fraction, Polarization and  $CP$ -Violating Asymmetries in  $B^0 \rightarrow D^{*+} D^{*-}$  Decays

H. Miyake, M. Hazumi *et al*, (Belle Collaboration), Phys. Lett. B 618, 34 (2005)

Observation of  $B \rightarrow D^0 \eta'$  and  $B \rightarrow D^{*0} \eta'$

J. Schuemann *et al*, (Belle Collaboration), Phys. Rev. D 72, 011103(R) (2005)

Observation of an isotriplet of charmed baryons

R. Mizuk, *et al*, (Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 94, 122002 (2005)

Observation of a near-threshold  $\omega$ - $J/\psi$  mass enhancement in exclusive  $B^- \rightarrow K\omega J/\psi$  decays

S.-K. Choi, S.L. Olsen, *et al*, (Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 94, 182002 (2005)

Dalitz analysis of the three-body charmless decays  $B^+ \rightarrow K^+\pi^+\pi^-$  and  $B^+ \rightarrow K^+K^+K^-$

A.Garmash, *et al*, (Belle Collaboration), Phys. Rev. D 71, 092003 (2005)

Observation of  $B \rightarrow \pi^0\pi^0$

K. Abe, *et al*, (Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 94, 181803(2005)

Measurement of the  $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-$  and  $\gamma\gamma \rightarrow K^+K^-$  processes at energies of 2.4-4.1 GeV

H. Nakazawa, *et al*, (Belle Collaboration), Phys. Lett. B 615, 39 (2005)

Measurement of branching fraction and  $CP$  asymmetry in  $B \rightarrow \eta h$  decays

Paoti Chang, *et al*, (Belle Collaboration), Phys. Rev. D 71, 091106(R) (2005)

Observation of  $B^+ \rightarrow K_1(1270)\gamma$

Heyoung Yang, *et al*, (Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 94, 091601(2005)

Study of the Suppressed Decays  $B^- \rightarrow [K^+\pi^-]_D K^-$  and  $B^- \rightarrow [K^+\pi^-]_D \pi^-$

M.Saigo, *et al*, (Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 94, 091601(2005)

Spectra of prompt electrons from decays of  $B^+$  and  $B^0$  mesons and ratio of inclusive semielectronic branching fractions

T.Okabe, *et al*, (Belle Collaboration), Phys. Lett. B 614, 27 (2005)

Improved measurement of  $CP$  violation parameters  $\sin 2\phi_1$  and  $|\lambda|$ ,  $B$  meson lifetimes, and  $B^0$ - $\bar{B}^0$  mixing parameter  $\Delta m_d$

K. Abe, *et al*, (Belle Collaboration), Phys. Rev. D 71, 072003 (2005)

Observation of the  $D_1(2420) \rightarrow D\pi^+\pi^-$  decays

K. Abe, *et al*, (Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 94, 221805 (2005)

Measurement of Charm Fragmentation Ratios and Fractions in Photoproduction at HERA

ZEUS Collaboration; S. Chekanov *et al*, Euro. Phys. J. C44 (2005) 351-366

Inclusive Jet Cross Sections and Dijet Correlations in  $D^*$  Photoproduction at HERA

ZEUS Collaboration; S. Chekanov *et al*, Nucl. Phys. B 729 (2005) 492-525

Measurement of Inelastic  $J/\psi$  Production in Deep Inelastic Scattering at HERA

ZEUS Collaboration; S. Chekanov *et al*, Euro. Phys. J. C44 (2005) 13-25

An NLO QCD Analysis of Inclusive Cross-Section and Jet-Production Data from the ZEUS Experiment

ZEUS Collaboration; S. Chekanov *et al*, Euro. Phys. J. C42 (2005) 1-16

Exclusive Electroproduction of  $\phi$  Mesons at HERA

ZEUS Collaboration; S. Chekanov *et al*, Nucl. Phys. B718 (2005) 3-31

Multijet Production in Neutral Current Deep Inelastic Scattering at HERA and Determination of  $\alpha_s$   
ZEUS Collaboration; S. Chekanov *et al*, Euro. Phys. J. C44 (2005) 183-193

Search for Pentaquarks Decaying to  $\Xi-\pi$  in Deep Inelastic Scattering at HERA  
ZEUS Collaboration; S. Chekanov *et al*, Phys. Lett. B 610 (2005) 212-224

Forward Jet Production in Deep Inelastic ep Scattering and low-x Parton Dynamics at HERA  
ZEUS Collaboration; S. Chekanov *et al*, Phys. Lett. B 632 (2006) 13-26

Search for Lepton-Flavor Violation at HERA  
ZEUS Collaboration; S. Chekanov *et al*, Euro. Phys. J. C44 (2005) 463-479

Study of Deep Inelastic Inclusive and Diffractive Scattering with the ZEUS Forward Plug Calorimeter  
ZEUS Collaboration; S. Chekanov *et al*, Nucl. Phys. B713 (2005) 3-80

First measurement of the  $\pi^+\pi^-$  atom lifetime  
B. Adeva, M. Chiba *et al*, Phys. Lett. B 619 (2005) pp50-60.

Observation of the Second Harmonic in Thomson Scattering from Relativistic Electrons  
M. Babzien, Y.Kamiya, T.Kumita *et al*, Phy. Rev. Lett. 96 (2006) 054802

Observation of the Nonlinear Effect in Relativistic Thomson Scattering of Electron and Laser Beams  
T.Kumita, Y.Kamiya *et al*, Laser Physics 16 (2006) pp267-271

## 2) 国際会議報告

Masami Chiba, Yusuke Watanabe, Osamu Yasuda, Toshio Kamijo, Yuichi Chikashige, Tadashi Kon, Akio Amano, Yosito Takeoka, Yutaka Shimizu, Satoshi Mori, Sosuke Ninomiya:

Measurement of Attenuation Length for Radio Wave in Natural Rock Salt Samples Concerning Ultra High Energy Neutrino Detection

Proc. of the International Workshop (ARENA2005), DESY, Zeuthen, Germany, World Scientific Publishing Co. Ltd. pp.25-29 (2006), ISBN 981-256-755-0

Yusuke Watanabe, Masami Chiba, Osamu Yasuda, Toshio Kamijo, Yuichi Chikashige, Tadashi Kon, Akio Amano, Yosito Takeoka, Yutaka Shimizu, Satoshi Mori, Sosuke Ninomiya:

Structure Function of Excess Charge in Rock Salt

Proc. of the international workshop(ARENA2005), DESY, Zeuthen, Germany, World Scientific Publishing Co. Ltd. pp.50-54 (2006), ISBN 981-256-755-0

## 3) 学会講演

日本物理学会 2005 年秋季大会 2005 年 9 月 12 日~ 9 月 15 日 (大阪市立大学杉本キャンパス)

中川尊、関貴之、住吉孝行、他：マルチアノード型光検出器 (HAPD) 読み出しのための ASIC 性能評価

渡邊勇介、千葉雅美、上條敏生、安田修、近重悠一、近匡、清水裕、竹岡義人、天野晶夫、二宮壮介、森聡史：超高エネルギーニュートリノ検出のための電磁シャワーからの電波発生

梶裕志、伊賀昌久、太田理、喜多村章一、久世正弘、清水志真、俵寿成、鶴貝達政、鶴崎一磨、徳宿克夫、長野邦浩、浜津良輔、堀龍馬、松本崇博、山崎祐司、山田作衛、李栄篤、他 ZEUS Collaboration : HERA 偏極電子・陽子衝突における深非弾性散乱荷電流反応の研究

李栄篤、伊賀昌久、太田理、梶裕志、喜多村章一、久世正弘、清水志真、俵寿成、鶴貝達政、鶴崎一磨、徳宿克夫、長野邦浩、浜津良輔、堀龍馬、松本崇博、山崎祐司、山田作衛、他 ZEUS Collaboration : HERA・電子陽子衝突型加速器における中性流深非弾性散乱の研究

日本物理学会 第 61 回年次大会 2006 年 3 月 27 日 - 3 月 30 日 (愛媛大学・松山大学)

太田理、伊賀昌久、岡崎奈緒、梶裕志、喜多村章一、久世正弘、桑原秀典、清水志真、俵寿成、鶴貝達政、鶴崎一磨、徳宿克夫、長野邦浩、浜津良輔、堀龍馬、松本崇博、山崎祐司、山田作衛、李栄篤、他 ZEUS Collaboration : HERA・電子陽子衝突型加速器におけるレプトン対生成事象の研究

中川尊、関貴之、住吉孝行、足立一郎、西田昌平、海野祐士、池田博一、飯島徹、小酒井良延、馬塚優里、河合秀幸、福島知一、田端誠、小川了、岩淵真也、Peter Krizan、Samo Korpar : 144 チャンネル HAPD 読み出し用 ASIC の性能評価

柴崎祐治、高山泰弘、千葉雅美、藤井政俊、安田修、矢吹文昭、上條敏生、渡邊勇介、森聡史、天野晶夫、近匡、清水裕、竹岡義人、近重悠一、二宮壮介、内海倫明 : 超高エネルギーニュートリノ検出のための、電磁シャワー構造関数を用いた電波発生と検出

渡邊勇介、千葉雅美、高山泰弘、藤井政俊、安田修、矢吹文昭、柴崎祐治、上條敏生、近重悠一、近匡、清水裕、天野晶夫、竹岡義人、森聡史、二宮壮介、内海倫明 : 超高エネルギーニュートリノ検出のための、電磁シャワー構造関数を用いた電波発生と検出

神谷好郎、汲田哲郎、石水昭夫、広瀬立成、鷲尾方一、浦川順治、大森恒彦、奥木敏行、栗原良将、横谷馨、D.P. Siddons、C. Liu、A.T. Macrander、I. Ben-zvi、I.V. Pogorelsky、V. Yakimenko : Si/Mo 多層膜ミラーを用いた X 線スペクトログラフの開発とその評価

春名毅、梅森健成、奥野英城、金丸雄亮、紙谷琢哉、佐藤政則、杉村高志、諏訪田剛、浜津良輔、古川和朗、吉田勝英、A.P.Potylitsin、I.S.Tropin、R.Chehab : KEK-B Linac 陽電子生成用単結晶標的の開発

#### 国際会議

International Workshop (ARENA2005), May 17-19, 2005, DESY, Zeuthen, Germany

Masami Chiba: Measurement of Attenuation Length for Radio Wave in Natural Rock Salt Samples Concerning Ultra High Energy Neutrino Detection

Yusuke Watanabe: Structure Function of Excess Charge in Rock Salt

International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG05)

-New Horizon of Nuclear Astrophysics and Cosmology, November 8-11, 2005, Tokyo, Japan

Y.Watanabe: Electric Field Strength of Coherent Radio Emission in Rock Salt Concerning Ultra High-Energy Neutrino Detection

International Workshop on Energy Budget in the High Energy Universe, February 22-24, 2006 Kashiwa, Japan

Masami Chiba: Measurement of Attenuation Length for UHF Radio Wave in Natural Rock Salt Samples Concerning Ultra High Energy Neutrino Detection

Yusuke Watanabe: Simulation of Salt Neutrino Detector Performance for Ultra High-Energy Neutrino Detection

14th International Laser Physics Workshop (LPHYS05), July 4-8, 2005, Kyoto, Japan

Tetsuro Kumita: Observation of the nonlinear effect in relativistic Thomson scattering of electron and laser beams

ICFA 38th Advanced Beam Dynamics and 9th Advanced & Novel Accelerators Joint Workshop on Laser-Beam Interactions and Laser and Plasma Accelerators, December 12-16, 2005, Taipei, Taiwan

Tetsuro Kumita: Observation of Nonlinear Thomson Scattering at BNL-ATF

# 原子物理実験サブグループ

## 1. 研究活動の概要

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（仮想光子）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。昨年度は、1 μm 厚の極薄 Si 結晶を標的として採用し、3次元 RCE (3D-RCE) すなわち、イオンが3次元空間内における特定の”原子面”を次々に周期的に通過することに起因する共鳴励起の観測に初めて成功した。今年度は、脱励起 X 線による 3D-RCE の観測やこの手法を使った 2重共鳴に成功した。

### 3D-RCE における脱励起 X 線放射異方性の観測: 423 MeV/u He-like Ar<sup>16+</sup> 1s<sup>2</sup> 1<sup>1</sup>S 1s2p 2<sup>1</sup>P

3D-RCE では共鳴に利用される振動電場は平面波であり、偏光方向は対応する原子面の法線方向に平行であるような偏光電場である。従って、原子面の方向によって共鳴励起される磁気副準位を選択することが可能であり、この様子は、双極子遷移によって放出される脱励起 X 線強度の角度分布を測定することで観測される。我々は、3D-RCE によって 423 MeV/u He-like Ar<sup>16+</sup> の 1s<sup>2</sup> 1<sup>1</sup>S 基底状態を 1s2p 2<sup>1</sup>P 励起状態へ共鳴励起させた。実験では脱励起する際に放出される X 線強度の異方性が理論値に非常に良く一致する異方性が明確に観測され、特定の磁気副準位に対する選択的な励起、すなわち原子のアライメントが 3D-RCE で可能であることを実証した。

### 3D-RCE における Λ 型 2重共鳴の観測: 416 MeV/u He-like Ar<sup>16+</sup> 1s<sup>2</sup> 1<sup>1</sup>S 1s2p 2<sup>1</sup>P, 1s2p 2<sup>1</sup>S 2s2p 2<sup>1</sup>S

同一のイオン入射条件の下でも、通過イオンが感じる異なる振動電場に対応する複数の共鳴励起が原理的に可能である。すなわち、2種類のエネルギーの光子を同時照射してイオンを励起する「2重共鳴」と同様の実験が、RCE では結晶電場によって X 線領域で可能であることを意味している。3D-RCE 共鳴条件は入射ビームに対する 2方向への結晶回転の自由度が利用できるため、2重共鳴条件を入射イオン速度を調節せずに満足することができる。我々は、この 2つの角度を独立に操作することで (1<sup>1</sup>S 2<sup>1</sup>P, 2<sup>1</sup>S 2<sup>1</sup>S) の Λ 型 2重共鳴を観測した。

(1) 出射イオンの電荷分布測定: 実験では、ミラー指数  $(k, l, m) = (1, -1, -2)$  と  $(0, 0, 2)$  で指定される 2つの振動電場を、それぞれプローブ電場およびカップリング電場として採用した。カップリング電場を 2<sup>1</sup>S-2<sup>1</sup>P 間の遷移エネルギー（約 15eV）に相当する周波数に固定し、プローブ電場としては、結晶回転角度を変化させることで、1<sup>1</sup>S-2<sup>1</sup>P 遷移エネルギー（約 3keV）付近を走査し、それぞれの場合の結晶通過後の Ar<sup>16+</sup> 入射イオン生き残り割合を観測した。その結果、ピークが 2つに分裂した特徴的な共鳴スペクトルが得られた。これは 2つの励起準位間が強く結合していることに起因する Autler-Townes 2重項に相当する。このような現象は、光と原子・分子の相互作用においてしばしば観測されるが、今回我々は、周期電場と原子の相互作用においても同様な現象が起こっていることを発見した。また、Al 薄膜を



標的の 30 cm 後方に設置するというイオンビームフォイル分光的な手法を用いて、準安定状態の  $2^1S$  成分をイオン化することにより共鳴を強調して観測することにも成功した。

(2) 脱励起 X 線収量測定：さらに上述のような脱励起 X 線放射強度の異方性の観測を、この 2 重共鳴においても観測した。今回の実験条件では、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、カップリング電場は  $x$  方向に偏光しているので、 $2^1P_x$  成分のみが  $2^1S$  準位と結合する。従って、 $y$  方向に設置した X 線検出器で測定した共鳴プロファイルのみに、はっきりと Autler-Townes 2 重項が観測された。このように、我々は振動電場の周波数のみならず偏光方向も制御選択することで、随意にイオンの励起準位を操作することが可能であることを実証した。

## 2) 静電型イオン蓄積リングによる原子分子衝突の研究

我々が、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) はビーム軌道が静電場で制御されたため従来不可能であった重い多原子分子イオン、クラスターイオン、さらに生体分子イオンまでもが蓄積可能である。平成 17 年度は、様々な蓄積運転モードの開発改良とともに、準安定イオンである  $CO^{2+}$  とポルフィリン負イオンの寿命測定実験を行った。さらに、波長可変レーザーを直線部に導入し、ポルフィリン負イオンの励起および電子脱離実験を行った。このように数秒にまで及ぶ長い時間スケールでの準安定分子の寿命測定や、その光子との相互作用の研究が本格的に開始された。

(1) ビーム制御：まず、RF システムによるビーム制御を高度化させた。RF 印加により DC ビームをバンチ化することが可能である。多種類のイオンが同時蓄積されている場合には、特定の不要なイオン種のみをバンチ化後に RF 周波数を掃引し RF 加速によって周回軌道から逸脱させ、選択的にイオンを排除することができることを実証するとともに、また特定の不要なイオン種を加速するのではなく、偏向電極を用いて周回軌道から逸脱させて排除する手法にも成功した。

(2) 多価分子イオン寿命測定実験： $CO^{2+}$  イオンの寿命を中性粒子収量の減衰の観測から精密測定した。その結果、0.76 ms, 8.1 ms, 3.6 s という複数の寿命成分からなる減衰スペクトルが得られた。最も長い成分は残留ガスとの衝突で決定されており、イオン本来の寿命はさらに長いと考えられる。観測された多成分スペクトルは、 $CO^{2+}$  では、その束縛ポテンシャルと解離ポテンシャルとが交わっており、複数の電子励起および振動励起状態からトンネル解離をしていることに起因すると考えられる。このようにリングを用いて数百  $\mu$  秒から数秒の寿命を精密に測定できることが示された。

(3) 負イオン-レーザー合流実験：ポルフィリン負イオン-レーザー合流実験を行った。レーザー脱着型イオン源で生成されたポルフィリン負イオン (電子脱離エネルギー 1.7 eV) をリング内にパルス入射 (パルス幅  $8\mu$  s), 蓄積した (周回周期  $113\mu$  s)。その結果、数 ms, および 1.7 s という 2 つの寿命成分からなる減衰スペクトルが得られた。寿命の短い成分は、イオン生成時のレーザー脱着に起因する高温状態の大型負イオンが自動電子脱離によって中性化するものであり、寿命の長い成分は残留ガスとの衝突に起因する。また、直線部に Nd-YAG レーザーを導入することで光誘起電子脱離により生成した中性粒子を計測する合流実験を行った。蓄積開始から時間を変化させて波長 532 nm (2.3 eV) のパルスレーザーを合流させるとイオンが再度温められ、中性化する過程が確認された。なお、この減衰スペクトルは、より詳細には指数関数的ではなく時間に反比例した特徴的な時間依存性を示す。これは、大型負イオンが高温状態にあるために、単一の励起準位からではなく広範なエネルギー領域に存在する励起準位から崩壊しているためであると考えられる。

## 3) 低温ヘリウム気体中のイオン移動度

液体窒素あるいは液体ヘリウムによって 77 K あるいは 4.2 K に冷却したヘリウム気体中におけるイオンの移動度を測定している。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

鋭敏であるため、測定値と理論計算値を比較することでポテンシャルを高精度で決定することができる。また、弱い電場を感じながら低温気体中を漂うイオンの運動エネルギーは meV 領域であることから、波動性の目安である de Broglie 波長は数Å にもなり、重粒子であるイオンの波動性が巨視的な物理量である移動度に現れることが期待される。このような巨視的な量子効果は基礎物理学的にも興味深い現象であるが、明確な観測例は  $^4\text{He}^+$  に関するものしかなかった。そこで 2004 年度に最も軽く波動性が顕著であると期待される  $\text{H}^+$  の測定を行った。しかし、三体結合反応によって  $\text{HeH}^+$  あるいは更に大きなヘリウムクラスターイオンに変化してしまい、量子効果が現れると予想されている弱電場領域では  $\text{H}^+$  の移動度が測定できなかった。そこで、従来の電子衝撃型イオン源より大強度  $\text{H}^+$  ビームの生成が望める低電圧アーク放電型イオン源を用いたイオン入射系の開発を行った。

装置改造と平行して、アルカリイオンに関する移動度測定も行った。2004 年度に  $^6\text{Li}^+$  および  $^7\text{Li}^+$  の測定を行ったので、今年度は  $\text{Cs}^+$  および  $\text{Rb}^+$  に移行した。アルカリイオンの電子構造は閉殻であるため、同じく閉殻構造の He と作る分子状態は核間距離に亘って単一の  $^1\Sigma^+$  である。従って、ポテンシャルからイオン移動度を決定する上で複数の電子状態が関与しないため、我々が開発したポテンシャルから衝突断面積を經由して移動度を計算するコードの信頼性を検証する目的に最も適している。 $\text{Cs}^+$  のような重原子は分極率が大きいので、粒子間ポテンシャルにおいて距離の 6 乗に反比例する引力項の寄与が重要と考えられる。移動度にはこの項の影響と考えられる構造が観測され、非相対論的な非経験的量子化学計算によるポテンシャルでも定性的には理解できたが、重粒子で顕著となるスピン-軌道相互作用などの相対論効果まで考慮する必要性が出てきた。これからも理論計算との詳細な対比を行いながら、ポテンシャルを高精度で決定する手法としてのイオン移動度測定の限界に挑戦する。

#### 4) 多価イオンの電荷交換分光

次世代半導体製造技術開発の要として、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いる。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と放電プラズマが研究されているが、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ないのが実情である。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。

ECR (電子サイクロトロン共鳴) 型イオン源によって生成した多価イオンをビームとして取り出し、磁場によって価数を選別した後に標的気体と衝突させ、電荷移行反応によって生成した励起状態からの発光を斜入射型軟 X 線分光器を用いて観測した。Xe については 2004 年度に 7 価から 18 価の価数範囲について、He から Xe までの 5 種類の希ガスを標的として用いることで、13.5 nm が 10 価イオンの発光である事実を検証し、プラズマ研究者からも高い評価が得られた。原子分光学的立場でも、4d-4f 遷移とされる 11 nm 近傍の UTA (unresolved transition array) が 10 価から 17 価までの広い範囲で殆ど価数に依存しないなど、電子状態理論的に興味深い事実が実験的に初めて検証された。今年度は同様の手法を Sn イオンに適用したが、まずは Sn イオン生成技術の開発から着手しなければならなかった。焼結した  $\text{SnO}_2$  のペレットをイオン源のプラズマ生成部に挿入する手法を採用して、不安定ながらも  $1 \mu\text{A}$  程度のイオンビーム生成に成功し、これを用いて 5 価から 15 価までの多価 Sn イオンについて 5-38 nm の波長範囲で電荷交換分光の測定を行った。10 価以上において 13.5 nm に UTA が観測される以外に、低価数でも同じ波長領域に発光が見られるなど、これまで知られていなかった事実を数多く発見した。また、分光学を離れて原子衝突としても、電荷移行反応断面積の価数依存性・標的依存性に関してデータが得られたので、その解釈について検討を行っている。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

T. Kaneyasu, T. Azuma, and K. Okuno, "Collision dynamics of the  $\text{Kr}^{8+} + \text{N}_2$  system studied by a multi-coincidence technique", *J. Phys. B* **38** (2005) 1341–1361.

H. Tanuma, H. Ohashi, E. Shibuya, N. Kobayashi, T. Okuno, S. Fujioka, H. Nishimura, and K. Nishihara, "EUV emission spectra from excited multiply charged xenon ions produced in charge-transfer collisions", *Nucl. Instrum. & Methods B* **235** (2005) 331–336.

T. Kaneyasu, T. Azuma, and K. Okuno, "Collision dynamics of MCI-molecule systems studied by multi-coincidence technique", *Nucl. Instrum. & Methods B* **235** (2005) 352–357.

### 2) 学会講演

文部科学省リーディングプロジェクト"極端紫外 (EUV) 光源開発等の先進半導体製造技術の実用化"  
平成 16 年度成果報告会 2005 年 6 月 8 日 (学士会館・神田)

田沼肇：価数分離したキセノンイオンの EUV 分光

第 2 回 AMO 討論会, 2005 年 6 月 18 日~ 19 日 (理化学研究所・和光)

東俊行：周期場と粒子ビーム

近藤力, 中野祐司, 畠山温, 中井陽一, 東俊行, 小牧研一郎, 山崎泰規, 高田栄一, 村上健：高エネルギー多価イオンの三次元コヒーレント共鳴励起

大橋隼人, 田沼肇, 奥野智晴, 藤岡慎介, 西村博明, 佐々木明, 西原功修：EUV 領域における多価 Xe イオンの電荷交換分光

中野祐司, 東俊行, 近藤力, 畠山温, 小牧研一郎, 山崎泰規, 高田栄一, 村上健：多価重イオンのコヒーレント共鳴励起：2 重共鳴の試み

神野智史, 高雄智治, 安田有里, 花田勝彦, 後藤基, 清宮明, 石川佳宏, 田沼肇, 東俊行, 城丸春夫, 奥野和彦：TMU E-Ring におけるイオンビームの精密制御と寿命測定

的場史朗, 田沼肇, 大槻一雅：極低温ヘリウム気体中における準安定原子イオンの移動度

科学研究費補助金基盤 (C) 企画調査, "粒子相関と配向・偏極で探る有限量子系のダイナミクス"  
第 1 回研究会 2005 年 6 月 27 日~ 28 日 (高エネルギー加速器研究機構・つくば)

城丸春夫, 東俊行, 田沼肇：TMU E-ring の現状

東俊行：低速多価イオン・原子分子衝突の反応マイクロスコープによる観測

EUV 理論モデリングワークショップ 2005 年 8 月 4 日~ 6 日 (コマツゼノア伊東保養所・伊東)

田沼肇：首都大での Xe に関する実験のまとめと Sn への挑戦

原子衝突研究協会第 30 回研究会 2005 年 8 月 23 日~ 25 日 (理化学研究所・和光)

神野智史, 高雄智治, 安田有里, 花田勝彦, 後藤基, 清宮明, 石川佳宏, 田沼肇, 東俊行, 城丸春夫, 奥野和彦: TMU E-ring における 2 価分子イオンの寿命測定

後藤基, 安田有里, 石川佳宏, 佐藤絢子, 神野智史, 高雄智治, 花田勝彦, 田沼肇, 東俊行, 奥野和彦, 児玉健, 城丸春夫, 阿知波洋次: TMU E-ring に蓄積したフラーレンアニオンの電子脱離

花田勝彦, 渡辺裕文, 田沼肇, 東俊行, 城丸春夫, 奥野和彦: TMU E-ring のためのエレクトロスプレーイオン源の開発

大橋隼人, 田沼肇, 奥野智晴, 藤岡慎介, 西村博明, 佐々木明, 西原功修: EUV 領域における多価 Xe イオンの電荷交換分光

中野祐司, 東俊行, 近藤力, 畠山温, 小牧研一郎, 山崎泰規, 高田栄一, 村上健: 多価重イオンのコヒーレント共鳴励起: 2 重共鳴励起

高雄智治, 神野智史, 安田有里, 花田勝彦, 後藤基, 清宮明, 石川佳宏, 田沼肇, 東俊行, 城丸春夫, 奥野和彦: TMU E-ring における周回ビームの精密制御

安田有里, 後藤基, 石川佳宏, 神野智史, 高雄智治, 花田勝彦, 田沼肇, 東俊行, 奥野和彦, 城丸春夫, 阿知波洋次: TMU E-ring に蓄積したポルフィリンアニオンの電子脱離

的場史朗, 田沼肇, 大槻一雅: 気相中の原子イオン輸送特性における電子状態依存性

近藤力, 中野祐司, 東俊行, 畠山温, 中井陽一, 小牧研一郎, 山崎泰規, 高田栄一, 村上健: 高速多価イオンの三次元共鳴励起

科学研究費補助金基盤 (C) 企画調査, ”粒子相関と配向・偏極で探る有限量子系のダイナミクス”  
第 2 回研究会 2005 年 9 月 18 日 (ホテルサンルート京都)

田沼肇: 静電型イオン蓄積リングによる超低速多原子分子イオン衝突反応における共鳴過程の探索

日本物理学会 2005 年秋季大会 2005 年 9 月 19 日 - 22 日 (同志社大学京田辺キャンパス)

田沼肇: 低温ヘリウム気体中のイオン移動度と共鳴形成

花田勝彦, 神野智史, 高雄智治, 清宮明, 安田有里, 後藤基, 石川佳宏, 田沼肇, 東俊行, 城丸春夫, 奥野和彦: TMU E-ring を用いた 2 価分子イオンの寿命測定

的場史朗, 小高裕一, 田沼肇, 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 I

大橋隼人, 田沼肇, 奥野智晴, 藤岡慎介, 西村博明, 佐々木明, 西原功修: 多価 Xe イオンの電荷移行衝突 III: 高価数イオンの EUV 発光

佐々木明, 西原功修, 前原宏昭, 西川亘, 砂原淳, 小池文博, 田沼肇: EUV 光源プラズマの原子モデルの特性

中野祐司, 東俊行, 近藤力, 畠山温, 小牧研一郎, 山崎泰規, 高田栄一, 村上健: 結晶場による 3 次元コヒーレント共鳴励起の観測

理化学研究所, Atomic Physics Lab Seminar, 2005 年 11 月 25 日 (理化学研究所・和光)

東俊行：都立大静電型イオン蓄積リング (TMU E-ring) による原子分子衝突の研究

第 22 回 EUV 理論モデリングワークショップ 2006 年 3 月 13 日~ 14 日

(大阪大学レーザーエネルギー学研究センター)

田沼肇：EUV spectra of multiply charged Sn ions in charge exchange spectroscopy

科学研究費補助金基盤 (C) 企画調査, ”粒子相関と配向・偏極で探る有限量子系のダイナミクス”

第 3 回研究会 2006 年 3 月 23 日~ 24 日 (KKR ホテル熱海)

東俊行：TMU E-ring による低速分子衝突反応における共鳴過程の探索

日本物理学会第 61 回年次大会 2006 年 3 月 27 日~ 30 日 (松山大学・愛媛大学)

渡部力, 高雄智治, 田沼肇, 東俊行：振動励起した分子ビームの冷却過程についての解析的考察

高雄智治, 神野智史, 安田有里, 花田勝彦, 後藤基, 清宮明, 石川佳宏, 田沼肇, 東俊行, 城丸春夫, 奥野和彦：TMU E-ring におけるイオン-レーザー合流及び RF 印加

中野祐司, 恵比寿和也, 東俊行, 近藤力, 畠山温, 小牧研一郎, 山崎泰規, 中井陽一, 高田栄一, 村上健：結晶場による 3 次元コヒーレント共鳴励起 I

中井陽一, 中野祐司, 恵比寿和也, 東俊行, 近藤力, 畠山温, 小牧研一郎, 山崎泰規, 高田栄一, 村上健：結晶場による 3 次元コヒーレント共鳴励起 II

的場史朗, 清水良浩, 藤原賢二, 田沼肇, 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 II

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

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

香川貴司, 田沼肇, 西原功修, 佐々木明, 小池文博：Sn イオンおよび Xe イオンの EUV スペクトルシミュレーション III

Mi-Young Song, 加藤隆子, 田沼肇, 山本則正：EUV spectrum of Xe+10 ions

東俊行, 中野祐司, 近藤力, 畠山温, 小牧研一郎, 中井陽一, 山崎泰規, 高田栄一, 村上健：結晶場による高エネルギー重イオンの 3 次元コヒーレント共鳴励起

## 国際会議

1st Workshop on Electrostatic Storage Devices, Eilat, Israel, May 29 - June 2, 2005

T.Azuma : Diagnosis and Manipulation of the Heavy Ions Stored in a Liquid Nitrogen-Cooled TMU E-ring.

24th International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC), Rosario, Argentina, July 20-26, 2005

Y. Nakano, S. Masugi, T. Azuma, C. Kondo, A. Hatakeyama, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada, and T. Murakami : Doubly-resonant coherent excitation of relativistic heavy ions

C. Kondo, S. Masugi, Y. Nakano, T. Azuma, A. Hatakeyama, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada, and T. Murakami : Three dimensional resonant coherent excitation in a thin Si crystal

T. Takao, S. Jinno, Y. Omata, K. Hanada, A. Sato, H. Tanuma, K. Okuno, T. Azuma, and H. Shiromaru : Diagnosis and control of the ion beam stored in TMU E-ring

S. Jinno, T. Takao, Y. Omata, K. Hanada, H. Tanuma, K. Okuno, T. Azuma, and H. Shiromaru : TMU E-ring operated at liquid nitrogen temperature

T. Kaneyasu, T. Azuma, and K. Okuno : Slow multiply charged ion-molecule collision dynamics studied through a multi-coincidence technique

A. Sato, Y. Yasuda, H. Shiromaru, Y. Achiba, S. Jinno, T. Takao, Y. Omata, K. Hanada, H. Tanuma, K. Okuno, and T. Azuma : Storage of fullerene ions in TMU E-ring

K. Ohtsuki, M. Hananoe, H. Hidaka, S. Jinno, S. Matoba, and H. Tanuma : Anomalous behavior of molecular ion mobility in cooled helium gas

H. Tanuma, H. Ohashi, S. Fujioka, H. Nishimura, and K. Nishihara : Charge exchange spectroscopy of multiply charged xenon ions for development of EUV lithography

S, Matoba, H. Tanuma, and K. Ohtsuki : Mobilities of metastable atomic ions in cooled helium gas

19th International Seminar on Ion-Atom Collisions (ISIAC), Rio de-Janeiro, Brazil,  
July 28–29, 2005

T. Azuma : New Aspects of Resonant Coherent Excitation of Relativistic Heavy Ions

14th International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarms, Campinas, SP, Brazil,  
July 27–30, 2005

H. Tanuma, H. Hidaka, S. Jinno, S. Matoba, M. Hananoe, and K. Ohtsuki : Anomalous mobilities of molecular ions in cooled helium gas

S, Matoba, H. Tanuma, and K. Ohtsuki : Mobilities of atomic ions in cooled helium gas

International Workshop on beam cooling and related topics (COOL05), Chicago, US,  
September 18-23, 2005

T. Azuma : A LN<sub>2</sub>-cooled electrostatic ring

4th International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography (EUVL), San Diego, CA, USA,  
November 7–9, 2005

H. Tanuma, H. Ohashi, S. Fujioka, H. Nishimura, A. Sasaki, and K. Nishihara : Charge exchange spectroscopy of ions composing EUV light source plasmas

### 3) 学会誌等

金安達夫, 東俊行 : 低速多価イオンと原子分子の相互作用, 真空 48 (2005) 471–477.

東俊行 : 静電型イオン蓄積リング, 加速器学会誌 56 (2005) 932–940.

# 宇宙物理実験サブグループ

## 1. 研究活動の概要

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。米国のChandra衛星、欧州のXMM-Newton衛星に加え、2005年7月10日には我が国5番目のX線天文衛星「すざく」(Astro-E2)が軌道に投入された。不幸にしてX線カロリメータは不慮の事故によって天体を観測する前に失われたが、過去最高のエネルギー分解能を誇るCCDと、10keV以上のエネルギー帯で過去最高の感度を誇る硬X線検出器は健在である。当研究室では「すざく」搭載機器の軌道上較正試験で主要な役割を果たすとともに、これら3衛星のデータを用いて銀河系内外のさまざまな天体の研究を進めている。一方で、「すざく」以降を目指した観測機器の開発も引き続き進めている。

### 1) 銀河・銀河団の観測

多くの銀河団の中心領域にはcD銀河と呼ばれる巨大な楕円銀河が存在する。この銀河は、銀河団を構成する他の銀河に比べて飛び抜けて大きいだけでなく、可視光で半径数万光年に広がったハローを持ち、X線でも大きく広がったガス分布を示す。一方、全体の質量はcD銀河団とそれほど変わらないのに、cD銀河を持たないnon-cD銀河団も多く存在している。そこでcD銀河団とnon-cD銀河団の違いを生む原因の解明をめざし、XMM-Newton衛星の20個の銀河団のアーカイブデータを用いて両銀河団の重力質量分布を系統的に比較する研究を行った。その結果、両銀河団の重力質量分布はいずれも半径に対して $r^{-1.5}$ に比例していて差はないが、cD銀河団の方が質量がより中心に集中していることがわかった。この領域では高温プラズマの冷却時間が宇宙年齢よりも短くなっており、X線を放出する高温ガスの冷却がcD銀河の形成に重要な役割を果たしていることを示唆している。

「すざく」は酸素の輝線に対して他の衛星よりも優れたエネルギー分解能を持つため、宇宙を満たす約100万度の銀河間ガス(WHIM)の探索に適している。赤方偏移0.2にある銀河団A2218を観測し、その周辺に存在するWHIMの出す酸素輝線を調べた。しかし不純物のために低エネルギー領域の感度が低下したことや、銀河系内の高温ガスからの酸素輝線との分離が困難なため、WHIMの放射については上限値を得るにとどまった。一方、ろ座銀河団の高温ガス中では、酸素が鉄や珪素にくらべて広がって分布していることが確認された。

### 2) 強磁場激変星AE Aqrにおける磁気プロペラ効果の検証

AE Aqrの白色矮星は自転周期が33.08 sと、ほぼ白色矮星のbreak-up speedで自転しているため、降着物質は白色矮星に落ち込まず、白色矮星からの磁気トルクのために、連星系の外へ吹き飛ばされているのではないかと考えられてきた。我々はXMM-Newtonの回折格子のデータを用いてヘリウム様に電離した窒素や酸素からの特性 $K\alpha$ 線を観測し、禁制線とintercombination線の強度比からプラズマの電子密度を測定することに初めて成功した。この結果、プラズマは $2-3 \times 10^{10}$  cmと連星軌道程度のスケールに広がっていることがわかった。これは磁気プロペラ効果によるプラズマの吹き飛ばしが実際に起きていることを強く示唆している。

### 3) 「すざく」による激変星の観測

矮新星SS Cyg: 打ち上げられたばかりの「すざく」衛星を用いて、矮新星SS Cygのquiescence期とoutburst期の観測を行った。矮新星からのX線放射は、降着円盤内縁と白色矮星表面の境界層に形成される温度数十keVの光学的に薄いプラズマから発生している。過去最高のエネルギー分解能を持つCCD

カメラにより、このプラズマ放射を吸収・再放出したと考えられる鉄の蛍光 6.4keV 輝線がエネルギー幅の細い成分と広がった成分に分けられることを発見した。前者は白色矮星表面からの反射、後者は降着円盤内縁からの放射と考えられる。また硬 X 線検出器のデータからも、白色矮星や降着円盤からのコンプトン反射と考えられる連続 X 線が観測されている。これらを定量的に評価することにより、矮新星境界層の理解が格段に進むと期待される。

強磁場激変星 AE Aqr: 磁場を持ち高速で自転する白色矮星は、中性子星なみのローレンツ電位差をうむことができるので、高エネルギー宇宙線加速の現場として期待されている。「すざく」による観測の結果、10keV よりも高いエネルギー帯で、白色矮星の自転に同期した X 線の強度変動を捉えることに成功した。放射強度は 10keV 以下の CCD による観測でわかっている熱的な成分を上回っている可能性が高いが、バックグラウンドや検出器の特性に伴う不定性をより詳細に評価するとともに、統計の向上のため、追加の観測時間を要求中である。

#### 4) TES 型カロリメータの開発

2010 年頃の打ち上げを想定して日本の X 線グループで検討が進んでいる NeXT 衛星や DIOS 衛星への搭載を目指し、宇宙研、早稲田大学、SII ナノテクノロジーとの共同で TES (Transition Edge Sensor) 型カロリメータの開発を精力的に進めている。目標性能としては、 $\sim 2$  eV の超高エネルギー分解能と  $\sim 1000$  個の多ピクセルアレイを目指しており、実現すればすざく衛星に搭載された XRS 検出器をさらに大きく上回る性能を持つこととなる。今年度は、研究室のスパッタ装置で成膜した Ti/Au の超伝導 2 層薄膜を用いた TES カロリメータを in-house で製作することに成功し、今後の性能向上および開発サイクル短縮への道筋をつけた。さらに、オランダの SRON 研究所ともカロリメータを相互に交換し性能評価を行なった。また、スズ箔を接着することで  $\sim 100$  keV までの硬 X 線に感度を持たせたカロリメータを製作し、60 keV においてエネルギー分解能 38 eV と世界最高レベルの性能を出すことに成功した(図 2)。2006 年 3 月にはこれを高エネルギー加速器研究機構のフォトンファクトリーに断熱消磁冷凍機とともに持ち込んで、エネルギー分散 X 線回折システムの検出器として動作させることに成功した。

#### 5) マグネティックカロリメータの開発

Er をドーブした素材は、X 線や  $\gamma$  線入射による磁化変化を SQUID で検出するマグネティックカロリメータとして応用できる。世界的には、ブラウン大+ハイデルベルグ大のグループが、5.9 keV の X 線に対し 3.3 eV というエネルギー分解能を達成しており、高分解能の検出器として注目を集めている。今年度は特に、ハイデルベルグ大で製作した Au:Er 片を、独自に設計・製作したグラディオメータタイプの SQUID 素子と組み合わせて、宇宙研に設置されている断熱消磁冷凍機に組み込み、日本で初めて 6 keV の X 線を検出することに成功した。

#### 6) 逆磁場ピンチプラズマ装置の X 線計測実験

TES カロリメータの動作試験および地上核融合研究への応用を目的として、産業技術総合研究所のエネルギー技術研究部門との共同研究を行なっている。核融合研究において、加熱機構での不純物混入問題は現在のところ最も重要な研究課題の一つである。この不純物混入の実態を高感度で調べるため、我々が開発している TES カロリメータおよび断熱消磁冷凍機を用いた逆磁場ピンチプラズマ装置の高精度 X 線分光計測を産業技術総合研究所にて行なった。この研究成果は篠崎の博士論文としてまとめられた。

#### 7) 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。反射鏡の上下段を一体にして加工したアライメントプレートに 10 セットの反射鏡を詰め、更に 13 枚のプレートの面に垂直方向の回



転を補正した。この状態でX線測定を行なったところ、角分解能 1.0 分角を達成した。これは Astro-E1 衛星の 2.1 分角、Astro-E2 衛星（「すざく」）の 1.9 分角を凌ぐ値である。また、反射鏡支持機構の 15 ミクロンの隙間に弾性体を詰めることで反射鏡の遊びを埋めてみたが、遊びは埋められたが逆に反射鏡の形状をゆがめてしまい、結果として得られた角分解能はやはり 1.0 分角であった。今後は反射鏡の形状を歪めない位置決定方法を検討するとともに、個々の反射鏡の鏡面精度の向上を目指す。

#### 8) 「すざく」衛星搭載機器の軌道上較正試験への貢献

Astro-E2 は 2005 年 7 月 10 日に衛星軌道に投入され、「すざく」と命名された。首都大グループはX線望遠鏡 (XRT) の較正、観測機器間のアラインメント検証、打ち上げ後の観測プラン検討、およびデータ解析用ソフトウェアの開発を担当している。望遠鏡を用いた観測機器間のアラインメントは石田が責任担当した。4 台の XIS 用の望遠鏡の光軸はすべて半径 1.0 分角以内に収まっていて、観測効率 98% 以上を保証することに成功した。試験観測期間中の軌道上キャリブレーション観測計画、銀河団観測計画は、それぞれ石田、大橋がまとめ役となっており、ほぼすべての観測が滞りなく行われた。標準光源の「かに星雲」で絶対フラックスの較正を行ったところ、過去の気球・ロケットの観測結果と 10% 以内の精度で一致する結果が得られている。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/GSFC と連絡を取りつつプログラム開発を行なった。XRS については軌道上で液体ヘリウムが 1 か月で完全に消失してしまったためにソフト開発も 8 月の時点で停止した状態であるが、衛星の軌道/姿勢/時刻ファイルの作成や、観測データを FITS 形式に変換する部分で主として貢献を行なった。また、XRT のレイトレーシングプログラム用いて検出器の応答関数を作成する部分に関しても、中心となってプログラム開発を行なっているところである。

#### 9) DIOS 衛星の提案

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。これを酸素の輝線 (OVII, OVIII) を使ってサーベイするための専用小型衛星 DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) を、宇宙研、名大、東大グループとの共同で提案している。2005 年 10 月には、各国の研究者を招聘して、国際ワークショップを実施した。



図 1: 2005 年 7 月 10 日、我が国 5 番目の X 線天文衛星「すざく」(Astro-E2) 打ち上げに成功!!

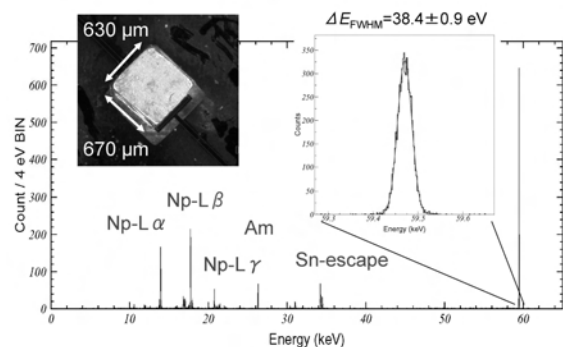


図 2: スズ箔を接着して製作した硬 X 線用のカロリメータの写真と、 $^{241}\text{Am}$  の線源を照射して得られたエネルギースペクトル。60 keV において 38 eV という世界最高レベルの分解能が得られており、Np-L 蛍光輝線の微細構造なども分離されている。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

T. Kodama, M. Tanaka, T. Tamura, H. Yahagi, M. Nagashima, I. Tanaka, N. Arimoto, T. Futamase, M. Iye, Y. Karasawa, N. Kashikawa, W. Kawasaki, T. Kitayama, H. Matsuhara, F. Nakata, T. Ohashi, K. Ohta, T. Okamoto, S. Okamura, K. Shimasaku, Y. Suto, N. Tamura, K. Umetsu, T. Yamada: Panoramic Views of Cluster-Scale Assemblies Explored by Subaru Wide-Field Imaging, *Publ. Astron. Soc. Japan* **57** (2005) 309–323

K. Sato, T. Furusho, N. Y. Yamasaki, M. Ishida, K. Matsushita, T. Ohashi: XMM-Newton Observation of IC 310 in the Outer Region of the Perseus Cluster of Galaxies, *Publ. Astron. Soc. Japan* **57** (2005) 743–749

Y. Ueda, Y. Ishisaki, T. Takahashi, K. Makishima, T. Ohashi: The ASCA Medium Sensitivity Survey (The GIS Catalog Project): Source Catalog II., *Astrophys. J. Suppl.* **161** (2005) 185–223

K. Itoh, S. Okada, M. Ishida, H. Kunieda: Density Diagnostics of the Hot Plasma in AE Aquarii with XMM-Newton, *Astrophys. J.* **639** (2006) 397–404

A. Hoshino, K. Shinozaki, Y. Ishisaki, T. Mihara: Improved PID method of temperature control for adiabatic demagnetization refrigerators, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **558** (2006), 536–541

### 2) 国際会議報告

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

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

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

T. Ohashi, M. Ishida, S. Sasaki, Y. Ishisaki, K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, R. Fujimoto, Y. Takei, Y. Tawara, A. Furuzawa, Y. Suto, K. Yoshikawa, T. Kitayama, N. Kawai, T. Tsuru, K. Matsushita: DIOS: Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor, Proceedings of *Workshop on Measuring the Diffuse Intergalactic Medium*, ed. J. W. den Herder and N. Yamasaki (2006) 5–10

Y. Ezoe, M. Koshiishi, M. Mita, K. Mitsuda, A. Hoshino, Y. Ishisaki, Z. Yang, T. Takano, R. Maeda: MEMS X-ray Mirrors, Proceedings of *Workshop on Measuring the Diffuse Intergalactic Medium*, ed. J. W. den Herder and N. Yamasaki (2006) 77–80

Y. Ishisaki: Microcalorimeter Development in Japan, Proceedings of *Workshop on Measuring the Diffuse Intergalactic Medium*, ed. J. W. den Herder and N. Yamasaki (2006) 85–88

### 3) 学会講演

日本天文学会 2005 年春季年会、2005 年 3 月 28 日・ 3 月 30 日 (明星大学日野キャンパス)

伊藤 啓 (宇宙研)、石田 學 (都立大)、國枝 秀世 (宇宙研): XMM-Newton を用いた AE Aqr での Magnetic Propeller Effect の検証 (H56a)

森田うめ代、石崎欣尚、大橋隆哉 (都立大)、山崎典子 (ISAS/JAXA)、太田直美 (理研)、深沢 泰司、川 埜 直美 (広島大): HCG 62 銀河群中心部の温度とアバングスの分布 (T11a)

星野晶夫、篠崎慶亮、石崎欣尚、森田うめ代、佐藤浩介、山川善之、藤森玉行、大島泰、大橋隆哉 (都立大)、満田和久、山崎典子、藤本龍一 (ISAS/JAXA)、三原健弘 (理研)、田中啓一 (SIINT): TES 型マイクロカロリメータの軟 X 線測定および DIOS 衛星へ向けた冷凍機入射窓の検討 (W39b)

飯塚 亮、横山 裕士、森 英之、伊藤 啓、伊藤 昭治、井上 裕彦、岡田 俊策、前田 良知、國枝 秀世 (ISAS/JAXA)、早川 彰、石田 学 (都立大)、内藤 聖貴 (名大)、見崎 一民 (GSFC/NASA)、他 Astro-E2 XRT team: Astro-E2 搭載 X 線望遠鏡の性能決定要因の評価と応答関数の構築 (W50a)

古庄多恵、藤本龍一、満田和久、竹井洋 (JAXA 宇宙研)、石崎欣尚、森田うめ代 (都立大)、山本幹生 (宮崎大)、太田直美 (理研)、Kevin R. Boyce, Greg V. Brown, Jean Cottam, Richard L. Kelley, Caroline A. Kilbourne, F. Scott Porter (NASA/GSFC), Dan McCammon (Wisconsin Univ.): Astro-E2 衛星搭載カロリメータ検出器 XRS の最終性能報告 (W57a)

井上裕彦、前田良知、國枝秀世 (宇宙航空研究開発機構)、早川彰、大熊哲、石田学 (東京都立大学): 高精度アラインメントによる X 線望遠鏡の結像性能向上の研究 (W57a)

日本物理学会第 60 回年次大会、2005 年 3 月 24 日・ 3 月 27 日 (東京理科大野田キャンパス)

渡辺伸, 長瀬文昭, 高橋忠幸 (宇宙研), 石田学, 石崎欣尚 (都立大/首都大), 迫昌男, S. M. Kahn (Stanford University), 幸村孝由 (工学院大学): モンテカルロシミュレータによる大質量 X 線連星中の光電離プラズマの研究 (24pXA-3)

篠崎慶亮, 星野晶夫, 石崎欣尚, 山川善之, 大橋隆哉 (都立大/首都大), 三原建弘 (理研), 満田和久 (宇宙研), 八木康之, 平野洋一, 島田壽男, 小口治久 (産業技術総合研究所), 田中啓一 (SIINT): TES 型マイクロカロリメータを用いた逆磁場ピンチプラズマ装置の軟 X 線観測 (24pXA-5)

山川善之, 石崎欣尚, 森田うめ代, 大島泰, 藤森玉行, 大橋隆哉 (都立大/首都大), 田中啓一 (SIINT): スズ箔接着 TES カロリメータの硬 X 線に対する応答の評価 (24pXK-2)

藤本龍一, 古庄多恵, 竹井洋, 山崎典子, 満田和久 (宇宙研), 石崎欣尚, 森田うめ代 (都立大), 山本幹生 (宮崎大), 太田直美 (理研), K. R. Boyce, G. Brown, J. Cottam, R. L. Kelley, C. A. Kilbourne, F. S. Porter, (NASA/GSFC), D. McCammon (Wisconsin Univ), and XRS team: Astro-E2 衛星搭載 精密 X 線分光装置 XRS の現状 (24pXK-11)

石崎欣尚, 大橋隆哉, 大島泰, 森田うめ代, 篠崎慶亮, 佐藤浩介, 星野晶夫, 山川善之, 藤森玉行 (都立大/首都大), 満田和久, 山崎典子, 藤本龍一, 江副祐一郎, 竹井洋, 吉田清典, 吉野友崇, 益居健介, 土屋彰広 (宇宙研): 宇宙を酸素輝線でマッピングする DIOS 計画へ向けた TES 型マイクロカロリメータアレイの開発 (25aXA-3)

古庄多恵, 藤本龍一, 満田和久, 田村隆幸 (宇宙研), 石崎欣尚, 大橋隆哉 (都立大/首都大), Richard L. Kelley (NASA/GSFC), XRS team: Astro-E2 搭載 X 線カロリメータ XRS による天体プラズマの精密分光観測 (25aXA-9)

日本物理学会 2005 年秋季大会、2004 年 9 月 12 日・ 9 月 15 日 (大阪市立大学杉本キャンパス)

吉野友崇, 吉田清典, 萩原利土成, 満田和久, 山崎典子, 藤本龍一 (宇宙研), 石崎欣尚, 佐藤浩介, 森田うめ代 (都立大/首都大), 田中啓一 (SIINT): TES 型マイクロカロリメータの開発と現状

日本天文学会 2005 年秋季年会、2005 年 10 月 6 日・ 10 月 8 日 (札幌コンベンションセンター)

岡田俊策 (東工大)、石田学 (首都大/都立大): Chandra 衛星の高精度 X 線分光装置を用いた Boundary layer の研究 (H03a)

早川 彰 (都立大)、古庄多恵 (宇宙研)、山崎典子 (宇宙研)、石田学 (都立大)、大橋隆哉 (都立大): XMM-Newton 衛星による Abell 1060 銀河団の観測 (T10b)

窪田 廉 (首都大)、大熊 哲、早川 彰、鈴木 真樹、大熊 隼人 (都立大)、石田 學 (首都大/都立大)、井上 裕彦、岡田 俊策、前田 良知 (ISAS/JAXA)、國枝 秀世 (名古屋大): ピーニング加工による X 線望遠鏡用反射鏡の製作 (W19b)

藤本龍一、古庄多恵、竹井洋、満田和久、山崎典子 (ISAS/JAXA)、石崎欣尚、森田うめ代、大橋隆哉 (都立大理)、太田直美 (理研)、山本幹生 (宮崎大)、Kevin R. Boyce, Greg V. Brown, Jean Cottam, Richard L. Kelley, Caroline A. Kilbourne, F. Scott Porter (NASA/GSFC)、Dan McCammon (Wisconsin 大)、他 XRS チーム Astro-E2 衛星の現状: 精密 X 線分光装置 XRS (W34a)

古庄多恵、藤本龍一、満田和久、竹井洋 (JAXA 宇宙研)、石崎欣尚、森田うめ代 (都立大理)、太田直美 (理研)、山本幹生 (宮崎大)、Kevin R. Boyce, Greg V. Brown, Jean Cottam, Enectali Figueroa, Ann Hornschemeier, Richard L. Kelley, Caroline A. Kilbourne, F. Scott Porter (NASA/GSFC), Dan McCammon (Wisconsin Univ.): Astro-E2 衛星搭載 X 線カロリメータ検出器 XRS のデータ処理と応答関数 (W35b)

太田直美 (理研)、藤本龍一、古庄多恵、満田和久、竹井洋 (ISAS/JAXA)、石崎欣尚、森田うめ代 (都立大理)、山本幹生 (宮崎大)、Kevin R. Boyce, Greg V. Brown, Jean Cottam, Richard L. Kelley, Caroline A. Kilbourne, F. Scott Porter (NASA/GSFC), Dan McCammon (Wisconsin Univ.): Astro-E2 衛星搭載 X 線カロリメータ検出器 XRS のゲイン較正 (W36b)

大熊 哲、早川 彰、窪田 廉 (都立大)、井上 裕彦 (ISAS/JAXA)、石田 學 (首都大/都立大)、前田 良知 (ISAS/JAXA)、國枝 秀世 (名古屋大): 高精度アラインメントによる X 線望遠鏡の高解像度化の研究 II (W63a)

篠崎慶亮、星野晶夫、石崎欣尚、大橋隆哉 (首大理)、三原建弘 (理研)、満田和久 (ISAS/JAXA)、八木康之、平野洋一、島田壽男、小口治久 (産総研)、田中啓一 (SIINT): TES 型マイクロカロリメータを用いた地上核融合プラズマ計測 (W64a)

山川善之、倉林元、藤森玉行、森田うめ代、石崎欣尚、大橋隆哉 (首都大理工) 満田和久、山崎典子、藤本龍一 (宇宙研)、Henk Hoovers (SRON)、田中啓一 (SIINT): SRON 製、SII 製 TES 型マイクロカロリメータの構造と性能の比較 (W65a)

## 国内研究会

第2回 AMO 討論会、理化学研究所、2005年6月18日

大橋隆哉: Astro-E2 で探る銀河団のダイナミクス (口頭)

「Astro-E2 講習会」、京都大学理学部物理学教室 (理学部5号館) 1階第4講義室、2005年7月10日

石崎欣尚: マイクロカロリメータ検出器 XRS (口頭)

第6回高宇連研究会「宇宙線加速と非熱的宇宙の解明」

東京大学大学院理学系研究科 小柴ホール、2005年9月21-22日

大橋隆哉: 非熱的宇宙観測計画3—X線分光と広帯域スペクトルの物理— (口頭)

石田 學: 高分解能X線分光による熱的プラズマの観測 (口頭)

第6回宇宙科学シンポジウム、宇宙科学研究本部/JAXA、2006年1月5-6日

小賀坂康志、田村啓輔、柴田 亮、古澤彰浩、國枝秀世 (名大)、前田良知 (ISAS/JAXA)、石田 学 (首都大): P1-32 NeXT/XRT の開発 (ポスター)

大橋隆哉、石田 学、石崎欣隆 (首都大)、満田和久、山崎典子、藤本龍一 (ISAS/JAXA)、田原 讓 (名大)、須藤 靖 (東大)、他 DIOS チーム: P1-63 DIOS 計画 (ポスター)

山崎典子、満田和久、池田博一、藤本龍一、竹井 洋、益居健介、木村俊介、萩原利士成 (ISAS/JAXA)、大橋隆哉、石崎欣尚 (首都大)、Jan-Willem den Herder、Piet de Korte、Henk HOevers (SRON): P1-66 EURECA Project (ポスター)

尾崎正伸、海老沢 研、田村隆幸、山崎典子、Chris Baluta、藤本龍一 (ISAS/JAXA)、石崎欣尚 (首都大)、寺田幸功 (理研)、松本浩典、上田佳宏 (京大)、他「すざく」検出器チーム: P2-06 「すざく」科学データの一般配布メカニズム (ポスター)

山崎典子、Chris Baluta、堂谷忠靖、藤本龍一、平賀純子、前田良知、寺島雄一 (ISAS/JAXA)、石崎欣尚 (首都大)、宇野伸一郎 (日本福祉大): P2-07 「すざく」衛星の運用システム-提案から観測まで- (ポスター)

江副祐一郎、輿石真樹、三田 信、満田和久 (ISAS/JAXA)、石崎欣尚、星野晶夫 (首都大)、前田龍太郎、高野貴之、銘苅春隆 (産総研)、楊振 (都立産技研): P2-09 次世代X線衛星に向けた軽量 MEMS X線鏡の開発 (ポスター)

満田和久、山崎典子、藤本龍一、三田 信、江副祐一郎、竹井 洋、吉田清典、益居健介、吉野友崇、萩原利士成、輿石真樹、木村俊介 (ISAS/JAXA)、大橋隆哉、石崎欣尚、大島 泰、藤森玉行、山川善之 (首都大): P2-14 次世代X線天文衛星を目指した TES 型X線マイクロカロリメータの開発 (ポスター)

森 英之、榎原匡俊、前田良知、飯塚 亮、伊藤昭治、井上裕彦、岡田俊策、伊藤由美、中村良子 (ISAS/JAXA)、石田 学、早川 彰、大熊 哲、窪田 廉 (首都大)、國枝秀世、小賀坂康志、古澤彰浩 (名大)、他「すざく」XRT チーム: P5-28 「すざく」衛星搭載X線望遠鏡の機上性能 (ポスター)

藤本龍一、満田和久、山崎典子、古庄多恵 (ISAS/JAXA)、石崎欣尚、大橋隆哉 (首都大)、太田直美 (理研)、K. R. Boyce, J. Cottam, R. L. Kelley, C. A. Kilbourne, F. S. Porter (NASA/GSFC) P5-32 「すざく」XRS (X線マイクロカロリメータ)の軌道上性能 (ポスター)

石田 学 (首都大)、寺田幸功 (理研)、向井浩二 (NASA/GSFC): 「すざく」による白色矮星を含む近接連星系の観測 (ポスター)

松下恭子 (東京理科大)、深沢泰司、戸塚 都 (広島大)、太田直美 (理研)、中澤知洋、山崎典子 (ISAS/JAXA)、大橋隆哉 (首都大)、北口貴雄、佐藤光浩 (東大): P5-51 「すざく」による Fornax 銀河団の観測 (ポスター)

## 国際会議

Optics & Photonics 2005, Conference 5900 – Optics for EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Astronomy II  
San Diego, California, USA, July 31 – August 4, 2005

Y. Ezoe, K. Mitsuda, M. Mita, M. Koshiishi, Y. Ishisaki, K. Shinozaki, A. Hoshino: Research and development of MEMS x-ray optics

11th International Workshop on Low Temperature Detectors - LTD-11  
Takeda Hall, University of Tokyo, Tokyo, Japan, July 31 – August 5, 2005

K. Shinozaki, A. Hoshino, Y. Ishisaki, U. Morita, T. Ohashi, T. Mihara, K. Mitsuda, K. Tanaka, Y. Yagi, H. Koguchi, Y. Hirano, H. Sakakita: First application of a TES microcalorimeter to a thermonuclear fusion plasma experiment

K. Shinozaki, A. Hoshino, Y. Ishisaki, T. Mihara: Demonstration of the improved PID method for the accurate temperature control of ADRs

C. A. Kilbourne, K. R. Boyce, G. V. Brown, J. Cottam, E. Figueroa-Feliciano, R. Fujimoto, T. Furusho, Y. Ishisaki, R. L. Kelley, D. McCammon, K. Mitsuda, U. Morita, F. S. Porter, N. Ota, T. Saab, Y. Takei, M. Yamamoto: Analysis of the Suzaku/XRS background

J. Cottam, K. R. Boyce, G. V. Brown, R. Fujimoto, T. Furusho, Y. Ishisaki, R. L. Kelley, C. A. Kilbourne, D. McCammon, K. Mitsuda, U. Morita, N. Ota, F. S. Porter, T. Saab, Y. Takei, M. Yamamoto: Ground calibration of the XRS microcalorimeter onboard Suzaku

N. Ota, K. R. Boyce, G. V. Brown, J. Cottam, R. Fujimoto, T. Furusho, Y. Ishisaki, R. L. Kelley, C. A. Kilbourne, D. McCammon, K. Mitsuda, U. Morita, F. S. Porter, Y. Takei, M. Yamamoto: Performance verification of the Suzaku X-ray Spectrometer in the flight configuration

U. Morita, Y. Yamakawa, T. Fujimori, Y. Ishisaki, T. Ohashi, Y. Takei, K. Yoshida, T. Yoshino, K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, R. Fujimoto, H. Sato, Y. Minoura, N. Takahashi, T. Homma, S. Shoji, Y. Kuroda, M. Onishi: Evaluation of 256-pixel TES microcalorimeter arrays with electrodeposited Bi absorbers

A. Hoshino, K. Shinozaki, Y. Ishisaki, T. Ohashi, K. Tanaka, T. Mihara, Y. Tawara: Evaluation of the IR UV blocking filters for ADR with a TES microcalorimeter

T. Yoshino, K. Yoshida, T. Hagihara, K. Sato, U. Morita, Y. Ishisaki, R. Fujimoto, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda: Properties of vacuum-evaporated bismuth absorber

T. Oshima, A. Tsuchiya, K. Sato, N. Y. Yamasaki, T. Morooka: Development of a low temperature SQUID gradiometer for magnetic microcalorimeters

The X-ray Universe 2005, El Escorial, Madrid, Spain, September 26–30, 2005

M. Ishida: Density Diagnostics of the Hot Plasma in AE Aquarii with XMM-Newton

Workshop on Measuring the Diffuse Intergalactic Medium

Shonan Village Center, Kanagawa, Japan, October 10-12, 2005

T. Ohashi: Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor – DIOS –

Y. Ishisaki: Development TES calorimeters in Japan

Japanese-German Colloquium: “Relativistic Universe”

Wildbad Kreuth, Germany, February 27–March 1, 2006

M. Ishida: Suzaku Observations of Cataclysmic Variables

# 光物性サブグループ

## 1. 研究活動の概要

### 1) 内殻励起磁気円二色性 (MCD) を用いた局所帯磁率の温度依存性

PrFe<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> を試料として、Pr の 3d-4f 励起、および Fe の 2p-3d 励起にともなう MCD から磁気モーメントを見積もり、その温度変化を SQUID の結果と比較した。「局所帯磁率」の逆数を Curie-Weiss プロットすると、それはほぼ原点をよぎる直線に乗るから、それぞれ局在常磁性的振る舞いに近いと言える。ところがわれわれの結果では、Pr と Fe の磁気モーメントの向きは逆であることが見いだされ、従来のバルク帯磁率から予想される、両者とも外部磁場方向に分極するという描像が成立しないことが明らかになった。スクッテルダイトでは通常希土類金属の 4f 電子状態と遷移金属の d 状態はほぼ独立に振る舞いとされているが、今回の結果はそのような描像が成立しない例があることを示している。なお、SQUID の結果から Fe が磁気モーメントを持つという主張は、実験的にはこれまで憶測に過ぎなかったが、元素選択的な MCD 測定によって初めて、スクッテルダイト中の遷移金属の磁気モーメントが測定されたといえる。

### 2) C<sub>60</sub> ピーポッドおよび C<sub>60</sub> 薄膜の光電子分光

C<sub>60</sub> を内包した単層カーボンナノチューブ (SWNT) は C<sub>60</sub> フラーレンピーポッド (PPD) と呼ばれ、特異な物性が期待される。昨年、内包された C<sub>60</sub> の電子状態は、報告されている固体の C<sub>60</sub> のそれとほとんど変わらないという報告をした。しかし、参照物質である C<sub>60</sub> 薄膜の光電子スペクトルは、実験者によって異なっているため、C<sub>60</sub> 薄膜の光電子スペクトルの実験条件依存性を調べた。その結果、C<sub>60</sub> 薄膜の最高占有状態 (HOMO) ピーク位置は、蒸着基板の種類によって著しく異なることが分かった。SWNT 内包 C<sub>60</sub> の参照物質として SWNT 上に蒸着された C<sub>60</sub> 薄膜を採用すると、内包 C<sub>60</sub> スペクトルは理論予想と同様に構造の沈み込みがあることから、SWNT の自由電子的状態・C<sub>60</sub> の  $\pi$  状態間混成は極端に弱いとはいえないことが分かった。

### 3) 軟 X 線領域での二次高調波発生

自由電子レーザー (FEL) やエネルギー回収型ライナック (ERL) 等の高輝度 X 線光源の出現により、これまでは実験が困難であった X 線領域での非線形光学研究が可能になると期待されている。将来の非線形光学研究の予備的実験として、放射光のみによる二次高調波発生を検出する装置を開発した。微弱な信号を検出するために、集光用のトロイダル鏡をピエゾ素子で微小振動することで二次高調波信号強度を変調し、これをデジタルロックインアンプで検出する方法を採用した。この装置を用いて、GaAs 薄膜試料に約 140 eV の軟 X 線 (As の 3p 吸収端付近) を入射し二次高調波の検出を試みた。今年度は、ミラーからのノイズ除去、検出器位置の微調整などの改良を行ったところ、二次高調波が生成されていることと、無矛盾な実験結果が得られた。

### 4) Pr 化合物の共鳴逆光電子分光

共鳴逆光電子分光法は、化合物中の特定元素・特定軌道の非占有状態密度を直接観測できる実験手法であり、主に Ce 化合物中の Ce 4f 電子が研究対象とされてきた。我々は、これまで実験が殆んど行われてこなかった Pr 化合物の Pr 4d-4f 共鳴逆光電子分光測定を行い、PrCo<sub>2</sub>, PrAg, PrSn<sub>3</sub> の各化合物で Pr 4f スペクトルがどのように異なるのかを調べた。Pr 4f 電子と価電子間の混成が比較的強いと考えられている PrCo<sub>2</sub> については、フェルミエネルギー近傍に明瞭な肩構造が観測された。Ce 4f スペクトルからの類推により、これは Pr の 4f<sup>1</sup> 始状態から 4f<sup>2</sup> 終状態への遷移によるピークであると考えられ



る。また、不純物アンダーソン模型 (SIAM) による解析を行ったところ、バルクおよび表面成分の寄与の割合の違いが、スペクトル形状に多大な影響を与えることを見出した。また、スペクトル形状の入射電子エネルギー依存性についても、SIAM による計算で説明できることが分かった。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

H. Shiozawa, H. Ishii, H. Kihara, N. Sasaki, S. Nakamura, T. Yoshida, Y. Takayama, T. Miyahara, S. Suzuki, Y. Achiba, T. Kodama, M. Higashiguchi, X. Y. Chi, M. Nakatake, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi and H. Kataura: Photoemission and inverse photoemission study of the electronic structure of C<sub>60</sub> fullerenes encapsulated in single-wall carbon nanotubes, *Phys. Rev. B* **73** (2006) 075406.

H. Ishii, T. Miyahara, Y. Takayama, H. Shiozawa, K. Obu, T. D. Matsuda, Y. Aoki, H. Sugawara and H. Sato: Resonant photoemission study of CeRu<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub>, *J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena* **144-147** (2005) 643-645.

Y. Takayama, H. Ohtsubo, N. Sasaki, T. Okamura, H. Shiozawa, H. Ishii, T. Miyahara, H. Sugawara and H. Sato: Resonant inverse photoemission of Pr compounds, *J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena* **144-147** (2005) 647-650.

Y. Takayama, T. Yoshida, S. Nakamura, N. Sasaki, H. Ohtsubo, H. Shiozawa, H. Ishii, T. Miyahara and H. Sugawara: Temperature dependence of magnetic circular dichroism of X-ray emission for rare-earth compounds, *J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena* **144-147** (2005) 731-735.

### 2) 学会講演

日本物理学会第 60 回年次大会 2005 年 3 月 24 日~ 3 月 27 日 (東京理科大野田キャンパス)

木原英夫、塩澤秀次、高山泰弘、石井廣義、宮原恒昱、兒玉健、鈴木信三、阿知波洋次、片浦弘道、吉岡英生、東口光晴、崔小宇、有田将司、仲武昌史、島田賢也、生天目博文、谷口雅樹：単層カーボンナノチューブとフラーレンピーポッドの高分解能光電子分光 II

佐々木直也、高山泰弘、中村聡、山之井崇二、吉田徹夫、石井廣義、宮原恒昱：共鳴逆光電子分光法による Pr 化合物の電子状態の研究

上野太郎、大窪清吾、鈴木信三、阿知波洋次、宮原恒昱、塚越一仁、片浦弘道：孤立単層ナノチューブ集合体の共鳴ラマン散乱-III

宮原恒昱：On the breakdown of time-reversal symmetry in a superconductor: Impossibility of the detection of the phase by a single SQUID measurement

日本物理学会 2005 年秋季大会 2005 年 9 月 19 日~ 9 月 22 日 (同志社大学)

佐々木直也、高山泰弘、吉田徹夫、中村聡、宮原恒あき、岡林潤、金井謙、尾嶋正治、山本樹：GaAs 薄膜を用いた軟 X 線領域の放射光による非線形効果の観測

第 19 回 日本放射光学会年会放射光科学合同シンポジウム, 2006 年 1 月 7 日~ 9 日 (名古屋大学)

高山泰弘、佐々木直也、吉田徹夫、中村聡、木原英夫、石井廣義、宮原恒昱：汎用スペクトル計算プログラムの開発 II

芝崎公達、高山泰弘、佐々木直也、宮原恒あき：軟 X 線領域における GaAs 薄膜による二次高調波生成  
上窪雅清、高山泰弘、佐々木直也、宮原恒昱、石井廣義、竹田幸治、藤森伸一、岡根哲夫、斎藤祐児、小林啓介、菅原仁、佐藤英行：PrFe<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> の Fe L<sub>2,3</sub> および Pr M<sub>4,5</sub> 吸収端領域における内殻吸収磁気円二色性

KEK-PF 研究会「アンジュレータ放射光による固体物性研究の展望」2005 年 4 月 12-13 日  
(高エネルギー加速器研究機構フォトンファクトリー)

石井廣義：カーボンナノ材料の光電子分光

第 29 回 フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム, 2005 年 7 月 25 日 - 27 日 (京都大学)

T. Ueno, S. Okubo, T. Miyahara, S. Suzuki, Y. Achiba, T. Tsukagoshi and H. Kataura: Raman spectra evolution of CVD-grown double-walled carbon nanotubes by heating treatment

第 30 回 フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム, 2006 年 1 月 7 日 - 9 日 (名城大学)

T. Ueno, S. Okubo, T. Miyahara, S. Suzuki, Y. Achiba, T. Okazaki, K. Tsukagoshi and H. Kataura: Resonance Raman and photoluminescence spectra of suspended single-walled carbon nanotubes grown in ceramics

#### 国際会議

NT05: Sixth International Conference on the Science and Application of Nanotubes,  
Chalmers Univ. Gothenburg, Sweden, June 26 - July 1, 2005

T. Ueno, S. Okubo, T. Miyahara, S. Suzuki, Y. Achiba, T. Tsukagoshi and H. Kataura: Suspended single-walled carbon nanotubes grown in ceramics

International Workshop on Energy Budget in the High Energy Universe,  
Kashiwa, Japan February 22-24, 2006

M. Chiba, Y. Watanabe, Y. Takayama, M. Fujii, O. Yasuda, F. Yabuki, Y. Shibasaki, T. Kamijo, Y. Chikashige, T. Kon, A. Amano, Y. Takeoka, U. Shimizu, S. Mori, S. Ninomiya and M. Utsumi: Measurement of attenuation length for UHF radio wave in natural rock salt samples concerning ultra high energy neutrino detection

Y. Watanabe, M. Chiba, Y. Takayama, M. Fujii, O. Yasuda, F. Yabuki, Y. Shibasaki, T. Kamijo, Y. Chikashige, T. Kon, A. Amano, Y. Takeoka, U. Shimizu, S. Mori, S. Ninomiya and M. Utsumi: Simulation of salt neutrino detector performance for Ultra High-Energy Neutrino Detection

# 電子物性サブグループ

## 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と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、超高真空ゾーンメルト法、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典型的化合物や新化合物の純良単結晶を育成し研究を進めてきた。最近では、特に充填スクッテルダイト構造を持つ化合物  $RE_TX_{12}$  (RE:希土類、T:遷移金属、X:P、As、Sb) に注目して純良単結晶の育成を行い、研究を進めている。平成 17 年度には、多くの充填スクッテルダイト化合物の育成と物性探索を進めたが、ここでは成果のうち、幾つかの例を取り上げて説明する。注目物質である Pr 系 (重い電子超伝導体  $PrOs_4Sb_{12}$ 、非磁性秩序と磁場誘起重い電子状態を示す  $PrFe_4P_{12}$ 、金属・非金属相転移を示す  $PrRu_4P_{12}$ ) の興味深い特性の更なる解明を進めながら、特に Sm 系スクッテルダイト ( $SmOs_4Sb_{12}$ 、 $SmRu_4P_{12}$ 、 $SmFe_4P_{12}$ ) の良質単結晶の育成とその基礎物性の評価に重点をおいた。

#### a) 高圧下での充填スクッテルダイト化合物の良質結晶育成。

充填スクッテルダイト化合物は、その構成要素 (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。興味深い物性が期待される軽希土類に限れば、(T=Fe、Ru、X=P) (T=Ru、Os、X=Sb) の組み合わせでは、フラックス法で純良単結晶の育成が可能であるのに対し、その他の組み合わせでは育成が困難であるため、高圧合成法により新しい組み合わせでの試料育成が進められている。しかし、高圧合成された焼結体試料では、育成時間の制限があることから純良性に問題が残されている。我々は、この二つの手法の利点を組み合わせ、高圧合成法による長時間合成に挑んできた。ようやく、特定領域研究費で導入した高圧炉による合成が軌道にのり、これまで希土類サイトの完全充填が不可能であった  $PrFe_4Sb_{12}$  の純良試料の育成に初めて成功した。この物質は、これまで 3 つのグループが、単結晶または多結晶を育成し、全て、低温で磁気秩序することを報告しているが、磁気構造がグループにより異なっている。また、これらの試料では希土類サイトの充填率が 80% であり、そのことを反映して試料の純良性を表す RRR も最高でも 4 と小さい。注目物質を多く含む Pr 系スクッテルダイトを統一的に理解するためにも、良質結晶での物性測定が不可欠であった。我々は、EPMA 測定・中性子散乱実験により充填率の評価を行い、実験誤差内で Pr サイトの完全充填を確認し、基礎物性測定を行った。純良性は、抵抗測定評価から RRR が 4 倍以上に向上した。純良試料で得られた重要な情報は、基底状態が“非磁性”という、これまでとは全く異なる結果を得たことである。この結果は、これまでの Pr スクッテルダイトに共通する性質であり、統一的理解という観点からも重要である。希土類サイトの非充填により、磁気秩序状態を安定化することは、Fe の 3d バンドがフェルミエネルギー近傍に大きな状態密度を持つというバンド計算に基づいて理解された。また、単結晶化の試みを行い、微細ながらも物性測定が可能な単結晶の育成にも成功し、詳細な実験と解析が行われている。更に、この実績をもとに、期待されている As 系スクッテルダイトの純良結晶育成の計画が進行している。(徳島大:菅原氏との共同研究)

## b) 「磁場に鈍感な重い電子」SmOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub>の機構の探索

昨年報告した SmOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> は多くの研究者の興味を集めている。この物質の特徴をまとめると、比熱測定から見積もられた電子質量は、(1)真空中での値の千倍に近く、しかも、(2)これまでの重い電子は磁場を加えると軽くなるのが常識とされてきたのに対し、8テスラの磁場を加えてもほとんど変わらない。それにも関わらず、(3)低温で強磁性を示す。これまでの Ce 系“重い電子系”と異なる質量増強機構が期待されることから、多くの共同研究が進められている。NMR の実験から、低温の強磁性状態がバルクのものである確認が補強され、緩和時間の温度依存性は通常の近藤格子系と変わらないことが分かった。更に、近藤温度は圧力の増加とともに増加するという、Ce 系の重い電子系と逆の振舞いを示すことを見出した(岡山大:小林グループとの共同研究)。また、X線吸収(XAS)測定により、Sm の価数は、他の Sm 系充填スクッテルダイトが 3 価であるのに対し、室温で約 2.83 と、2 価成分が存在すること、さらに NMR の測定等で異常な振舞いが見出されている ~150K 以下で、急激な減少が見出される。同じ重い電子的振舞いを示す SmFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub> ではこのような振舞いは観測されず、SmOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> の不思議な振舞いを理解する上で重要な情報である。(JASRI 水牧仁一郎・筒井智嗣氏との共同研究)

## c) Pr(Fe<sub>x</sub>Ru<sub>1-x</sub>)<sub>4</sub>P<sub>12</sub>における二つの相転移の行方

PrFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub> が約 6.5K で AFQ 転移と示唆される相転移を示すのに対して、PrRu<sub>4</sub>P<sub>12</sub> は 63K に金属-非金属転移を示す。転移温度は一桁違うものの、バンド計算の結果から、主要フェルミ面はともに体積がブリルアンゾーンの半分の立方体に近いいため、[100]-ネスティング不安定性による相転移が予測されていた。実際、両物質共に、相転移に伴いフェルミ面の多くが消滅し、大きな抵抗変化が生じることが確認されている。両物質の示す相転移の本質を理解するためには、Fe と Ru を連続的に置換し、各々の相がどのような関係にあるかを知ることは有効である。元素置換により両方の秩序相共に転移温度は急激に減少し、低濃度の置換で相転移は消失することが確認された。中間濃度領域に、4f 電子の揺らぎが低温領域まで存在する重い電子状態の振る舞いを見出した。

## d) PrOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> の四極子励起子と超伝導機構

PrOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> は Pr 化合物としては初めての重い電子系超伝導体 ( $T_c = 1.85$  K) である。この系は従来の重い電子系超伝導体で議論されている磁気揺らぎを媒介とした超伝導ではなく非磁性の四極子揺らぎを媒介としたものである可能性があり、その超伝導発現機構に興味を持たれている。この物質の単結晶試料による非弾性中性子散乱実験を ILL の冷中性子 3 軸分光器を用いて行い、その低エネルギー磁気励起の波数依存性、温度依存性を詳しく調べた。その結果、この系の低エネルギーの揺らぎが主に非磁性四極子相互作用によるものであることを示す直接的な証拠を得た。更に、磁気励起の幅の温度依存性から、この“四極子”励起は超伝導と密接な関係があることがわかった。

(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:菅原仁助教授、東北大学:岩佐和晃助教授ほか、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、通常の物質中では、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(スピン拡散長)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、スピンの向きを揃えた電流(スピン分極電流)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

が同時にスピン磁気モーメントを運び、その量が大きくなると磁石同士の相互作用でナノ磁性体全体の磁化をも反転することによる。これが可能になると、外から磁場を加えなくとも、近年の微細化が著しい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、スピン拡散長より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振舞いを可能にする舞台ともいえる。本年度は、ナノサイズの二つの強磁性体でスピン拡散長より薄い通常金属を挟んだ、スピバルブ型 CPP (Current Perpendicular to Plane) 素子を用いて、磁気抵抗の磁場の角度と強度依存性、および時間依存伝導現象に着目して研究を進めた。二つの強磁性層の一方は隣に置かれた反強磁性層との磁気結合で磁化の向きを固定され(ピンド層と呼ばれ、スピン分極電流源となる) 他方は磁化は自由に向きを変えられる(フリー層)。また、この素子は磁化の向きで電気抵抗が大きく変わる素子であるため、磁化の向きの相互変化を極めて敏感に検出できる都合のよい特性を持っている。我々は、その断面寸法が  $\sim 100\text{nm} \times 100\text{nm}$  のサンプルで、電気抵抗の電流密度と磁場への依存性を詳しく測定したところ、電流の増加に伴い抵抗が大きく変化するスピントランスファーによる磁化反転の観測に成功した。また、反転する電流値近傍で、抵抗値が時間的に二つの値を飛び移る 2 値間ノイズを観測し、解析を進めている。ハードディスクの磁気記録の高密度化進み、これ以上は現在の読み取りヘッドでは対応が困難であり、CPP スピバルブ素子は次世代素子としても期待されている。従って、スピントランスファー効果の理解に挑むことは、物理的な興味だけではなく、応用の観点からも必要であろう。(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)

### 3) 国際会議の開催

このサブグループの本年特有の活動として、国際会議'Joint Workshop on NQP-skutterudites and NPM in multi-approach'を開催した。これは、佐藤が領域代表者を務める特定領域研究「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」として、2005 年度がちょうど中間評価の年にあたり、申請の当初より計画されていたものである。より有効な会議とするため、阪大・北岡教授が代表の学術創成研究「多元融合領域の新物質相」との合同会議として、2005.11.21~24 に本学小講堂にて開催した。参加者の合計は、未登録の本学学生を除いて 143 名(うち国外からの参加者は 22 名、他に国内滞在者 5 名)と、予想を超える参加者をえて成功裏に終えることができた。会場の不備に対する対応、国際交流会館利用への便宜など、事務方を含む学内外の多くの方にご協力をいただいたことに感謝したい。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

Multiband Superconductivity in the Heavy Fermion Compound  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ , G. Seyfarth, J. P. Brison, M.-A. Measson, J. Flouquet, K. Izawa, Y. Matsuda, H. Sugawara, H. Sato, Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 107004 (4pages).

Direct Observation of Quadrupolar Excitons in the Heavy-Fermion Superconductor  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ , K. Kuwahara, K. Iwasa, M. Kohgi, K. Kaneko, N. Metoki, S. Raymond, M.-A. Measson, J. Flouquet, H. Sugawara, Y. Aoki, H. Sato, Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 107003 (4pages).

Transport properties of the heavy-fermion superconductor  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ , H. Sugawara, M. Kobayashi, S. Osaki, S. R. Saha, T. Namiki, Y. Aoki, and H. Sato, Phys. Rev. **B 72** (2005) 014519.

Evolution of 4f electron states in the metal-insulator transition of  $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ , K. Iwasa, L. Hao, K.

- Kuwahara, M. Kohgi, S.R. Saha, H. Sugawara, Y. Aoki, H. Sato, T. Tayama and T. Sakakibara, Phys. Rev. **B 72** (2005) 024414 (5 pages).
- Fermi surface of  $\text{LaRu}_4\text{P}_{12}$ : A clue to the origin of the metal-insulator transition in  $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ , S. R. Saha, H. Sugawara, Y. Aoki, H. Sato, Y. Inada, H. Shishido, R. Settai, Y. Onuki, and H. Harima, Phys. Rev. **B 71** (2005) 132502 1-4.
- High-Field Magnetization in Pr-based Filled Skutterudite Compounds  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  and  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ , K. Sugiyama, N. Nakamura, T. Yamamoto, D. Honda, Y. Aoki, H. Sugawara, H. Sato, T. Takeuchi, R. Settai, K. Kindo and Y. Onuki, J. Phys. Soc. Jpn. **74** (2005) 1557-1560.
- Novel Features in the Flux-Flow Resistivity of the Heavy Fermion Superconductor  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ , M. Kobayashi, H. Sato, H. Sugawara, H. Fujiwara and Y. Aoki J. Phys. Soc. Jpn. **74** (2005) 1690-1693.
- Role of  $p - f$  Hybridization in the Metal-Nonmetal Transition of  $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ , K. Iwasa, L. Hao, T. Hasegawa, T. Takagi, K. Horiuchi, Y. Mori, Y. Murakami, K. Kuwahara, M. Kohgi, H. Sugawara, S.R. Saha, Y. Aoki and H. Sato, J. Phys. Soc. Jpn. **74** (2005) 1930-1933.
- Impurity Effect as a Probe for the Gap Function in the Filled Skutterudite Compound Superconductor  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ : Sb-NQR Study, M. Nishiyama, T. Kato, H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato, H. Harima and G-q. Zheng, J. Phys. Soc. Jpn. **74** (2005) 1938-1941.
- Novel Phase Transition Near the Quantum Critical Point in the Filled-Skutterudite Compound  $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$ : An Sb-NQR Study, M. Yogi, H. Kotegawa, G-q. Zheng, Y. Kitaoka, S. Ohsaki, H. Sugawara and H. Sato, J. Phys. Soc. Jpn. **74** (2005) 1950-1953.
- Bulk-Sensitive Photoemission Spectroscopy for Heavy-Fermion Pr Compounds Using Hard X-Ray, A. Yamasaki, S. Imada, A. Sekiyama, M. Tsunekawa, C. Dallera, L. Braicovich, T-L. Lee, H. Sugawara, H. Sato, R. Settai, Y. Onuki and S. Suga, J. Phys. Soc. Jpn. **74** (2005) 2045-2051.
- Possible Octupole Ordering in Phase II of  $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$  Suggested from Elastic Constants, M. Yoshizawa, Y. Nakanishi, M. Oikawa, C. Sekine, I. Shirotni, S.R. Saha, H. Sugawara and H. Sato, J. Phys. Soc. Jpn. **74** (2005) 2141-2144.
- Heavy Fermion Compound  $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$  in Vicinity of Ferromagnetic Critical Point, H. Kotegawa, H. Hidaka, Y. Shimaoka, T. Miki, T.C. Kobayashi, D. Kikuchi, H. Sugawara and H. Sato J. Phys. Soc. Jpn. **74** (2005) 2173-2176.
- Inelastic Neutron Scattering from  $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$ , C. Yang, M. Kohgi, K. Iwasa, H. Sugawara and H. Sato, J. Phys. Soc. Jpn. **74** (2005) 2862-2863.
- Sb-NQR Probe for Multipole Degree of Freedom in the First Pr-Based Heavy-Fermion Superconductor  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ , H. Tou, M. Doi, M. Sera, M. Yogi, H. Sugawara, R. Shiina and H. Sato, J. Phys. Soc. Jpn. **74** (2005) 2695-2698.
- The magnetic instability of  $\text{Yb}_2\text{Pd}_2(\text{In}, \text{Sn})$  in a non-Fermi liquid environment, E Bauer, G. Hilscher, H. Michor, Ch. Paul, Y. Aoki, H Sato, D. T. Adroja, J-G.Park, P. Bonville, C. Godart, J. Sereni, M. Giovannini and A. Saccone, J. Phys.: Condens. Matter **17** (2005) S999-S1009.

Evolution of superconducting order in  $\text{Pr}(\text{Os}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sb}_{12}$ , E.E.M. Chia, D. Vandervelde, M.B. Salamon, D. Kikuchi, H. Sugawara and H. Sato, *J. Phys.: Condens. Matter* **17** (2005) L303-L310.

Bulk-sensitive photoemission spectroscopy of Pr-based filled skutterudites, A. Yamasaki, S. Imada, A. Sekiyama, M. Tsunekawa, T. Nanba, C. Dallera, L. Braicovich, T.-L. Lee, H. Sugawara, H. Sato, C. Sekine, I. Shirotnani, R. Settai, Y. Onuki, H. Harima and S. Suga, *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.***144-147** (2005) 621-623.

Resonant photoemission study of  $\text{CeRu}_4\text{Sb}_{12}$ , H. Ishii, T. Miyahara, Y. Takayama, H. Shiozawa, K. Obu, T.D. Matsuda, Y. Aoki, H. Sugawara and H. Sato, *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.***144-147** (2005) 643-645.

Resonant inverse photoemission of Pr compounds, Y. Takayama, H. Ohtsubo, N. Sasaki, T. Okamura, H. Shiozawa, H. Ishii, T. Miyahara, H. Sugawara and H. Sato, *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.***144-147** (2005) 647-650.

Photoemission of heavy fermion superconductor  $\text{PrOs}_2\text{Sb}_2$  and other Pr compounds, S. Imada, Y. Fukuda, A. Yamasaki, A. Sekiyama, H. Sugawara, H. Sato, A. Ochiai and S. Suga, *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.***144-147** (2005) 651-653.

Temperature dependence of magnetic circular dichroism of X-ray emission for rare-earth compounds, Y. Takayama, T. Yoshida, S. Nakamura, N. Sasaki, H. Ohtsubo, H. Shiozawa, H. Ishii, T. Miyahara and H. Sugawara, *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.***144-147** (2005) 731-735.

Anomalous phase transitions in the heavy fermion compound  $\text{Ce}_3\text{Ir}_4\text{Sn}_{13}$ , C. Nagoshi, H. Sugawara, Y. Aoki, S. Sakai, M. Kohgi, H. Sato, T. Onimaru and T. Sakakibara, *Physica B* **359-361** (2005) 248-250.

Quadrupole fluctuation and off-center rattling motion in heavy fermion superconductor  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ , T. Goto, Y. Nemoto, K. Sakai, K. Onuki, T. Yamaguchi, M. Akatsu, T. Yanagisawa, H. Sugawara and H. Sato, *Physica B* **359-361** (2005) 822-826.

Superconductivity of the filled skutterudite  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ : Phase diagram and characterizations, M.-A. Measson, J.P. Brison, G. Seyfarth, D. Braithwaite, G. Lapertot, B. Salce, J. Flouquet, E. Lhotel, C. Paulsen, H. Sugawara, H. Sato, P.C. Canfield, K. Izawa and Y. Matsuda, *Physica B* **359-361** (2005) 827-829.

Drastic evolution of 4f-electron states in the metal-insulator transition of  $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ , K. Iwasa, L. Hao, K. Kuwahara, M. Kohgi, S.R. Saha, H. Sugawara, Y. Aoki and H. Sato, *Physica B* **359-361** (2005) 833-835.

Phase diagrams and ground-state magnetic properties of Pr-based filled skutterudites, T. Sakakibara, T. Tayama, J. Custers, H. Sato, T. Onimaru, H. Sugawara, Y. Aoki, H. Sato and S.R. Saha, *Physica B* **359-361** (2005) 836-843.

Raman scattering study of filled skutterudite  $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ , N. Ogita, K. Yamamoto, S.R. Saha, H. Sugawara, H. Sato, C. Sekine, I. Shirotnani and M. Udagawa, *Physica B* **359-361** (2005) 847-849.

$\mu$ SR study on filled skutterudite  $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ , S.R. Saha, W. Higemoto, A. Koda, K. Ohishi, R. Kadono, Y. Aoki, H. Sugawara and H. Sato, *Physica B* **359-361** (2005) 850-852.

Elastic anomalies of single crystalline  $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$  near metal-insulator transition, Masahito Yoshizawa, Yoshiki Nakanishi, Tomoyuki Kumagai, Masafumi Oikawa, Shanta R. Saha, Hitoshi Sugawara and Hideyuki Sato, *Physica B* **359-361** (2005) 862-864.

Neutron scattering studies of order parameters and excitations in antiferro-quadrupolar phase of  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ , L. Hao, K. Iwasa, K. Kuwahara, M. Kohgi, H. Sugawara, Y. Aoki, H. Sato, T.D. Matsuda, J.-M. Mignot, A. Gukasov and M. Nishi, *Physica B* **359-361** (2005) 871-873.

De Haas-van Alphen effect in the filled skutterudite  $\text{SmFe}_4\text{P}_{12}$ , D. Kikuchi, M. Kobayashi, H. Sugawara, Y. Aoki, H. Sato, H. Shishido, R. Settai and Y. Onuki, *Physica B* **359-361** (2005) 874-876.

Quadrupole order and field-induced heavy-fermion state in the filled skutterudite  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  via  $^{31}\text{P}$  NMR J. Kikuchi, M. Takigawa, H. Sugawara and H. Sato, *Physica B* **359-361** (2005) 877-879.

De Haas-van Alphen effect in  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  under high pressure, H Sugawara, D. Kikuchi, M. Kobayashi, Y. Aoki, H. Sato, H. Shishido, R. Settai and Y. Onuki, *Physica B* **359-361** (2005) 880-882.

Metal-insulator transition under high pressure in  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ , H. Hidaka, I. Ando, H. Kotegawa, T.C. Kobayashi, H. Harima, M. Kobayashi, H. Sugawara and H. Sato, *Physica B* **359-361** (2005) 886-888.

$^{121}\text{Sb}$ -NMR studies of single-crystal  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ , H. Tou, M. Doi, M. Sera, M. Yogi, Y. Kitaoka, H. Kotegawa, G.-q. Zheng, H. Harima, H. Sugawara and H. Sato, *Physica B* **359-361** (2005) 892-894.

$\mu$ SR studies on  $\text{LaOs}_4\text{Sb}_{12}$  in comparison with the time-reversal-symmetry-broken superconductor  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ , Y. Aoki, W. Higemoto, S. Sanada, K. Ohishi, S.R. Saha, A. Koda, K. Nishiyama, R. Kadono, H. Sugawara and H. Sato, *Physica B* **359-361** (2005) 895-897.

Magnetic excitations in the heavy-fermion superconductor  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ , S. Raymond, J. Flouquet, K. Kuwahara, K. Iwasa, M. Kohgi, K. Kaneko, N. Metoki, H. Sugawara, Y. Aoki and H. Sato, *Physica B* **359-361** (2005) 898-900.

Phonon Raman scattering of  $\text{RFe}_4\text{P}_{12}$  and  $\text{ROs}_4\text{Sb}_{12}$ , T. Kondo, K. Yamamoto, N. Ogita, M. Udagawa, H. Sugawara and H. Sato, *Physica B* **359-361** (2005) 904-906.

Elastic property of Kondo semiconductor  $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$ , Y. Nakanishi, M. Oikawa, T. Kumagai, M. Yoshizawa, T. Namiki, H. Sugawara and H. Sato, *Physica B* **359-361** (2005) 907-909.

Coupling between conduction electrons and elastic waves in  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ , Y. Nakanishi, M. Oikawa, T. Kumagai, H. Sugawara, H. Sato and M. Yoshizawa, *Physica B* **359-361** (2005) 910-912.

Multiple Superconducting Phases in Heavy Fermion Superconductors, Y. Matsuda, K. Izawa, T. Watanabe, Y. Kasahara, Y. Nakajima, T. Sakakibara, C.J. van der Beek, M. Nohara, T. Hanaguri, H. Takagi, J. Goryo, K. Maki, P. Thalmeier, S. Osaki, H. Sugawara, H. Sato, H. Shishido, R. Settai, Y. Onuki, *J. Phys. Chem. Solids* **66** (2005) 1365-1369.



Heavy fermion behaviors in the Pr-based filled skutterudites, Y. Aoki, H. Sugawara, H. Sato, Journal of Alloys and Compounds 408–412 (2006) 21–26

Elastic behaviour around metal-insulator transition in  $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ , Y. Nakanishi, T. Kumagai, S.R. Saha, H. Sugawara, H. Sato and M. Yoshizawa, J. Magn. Mater. **298** (2006) 132–134.

## 2) 学会講演

日本物理学会第 60 回年次大会 2005 年 3 月 19 日 - 3 月 22 日 (東京理科大野田キャンパス)

坂井正樹, 水口拓也, 西山迪孝, 青木勇二, 佐藤英行: CPP-GMR 素子の電子輸送特性とノイズ測定.

青木英和, 菊地大輔, 菅原仁, 佐藤英行:  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  おける電子輸送特性の磁場方向依存性.

日高宏之, 堀彰宏, 小手川恒, 小林達生, 播磨尚朝, 菊地大輔, 菅原仁, 佐藤英行 :  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  の圧力誘起絶縁体状態におけるホール効果.

川名大地, 佐賀山基, 佐藤匡史, 桑原慶太郎, 青木勇二, 神木正史, 佐藤英行, 岩佐和晃, 菅原仁, 若林裕助, 澤博:  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  の格子異常の圧力効果.

谷澤知章, 中西良樹, 菅原仁, 佐藤英行, 吉澤正人:  $\text{Pr}_x\text{La}_{1-x}\text{Fe}_4\text{P}_{12}$  ( $x=0.85, 0.95$ ) の弾性特性と Pr の基底状態.

中西良樹, 及川雅史, 谷澤知章, 吉澤正人, S.R.Saha, 菅原仁, 青木勇二, 佐藤英行:  $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$  の弾性異常と Pr の基底状態.

中井祐介, 石田憲二, 真岸孝一, 菅原仁, 菊地大輔, 佐藤英行:  $\text{LaOs}_4\text{Sb}_{12}$ ,  $\text{LaFe}_4\text{Sb}_{12}$  の La-NMR, Sb-NQR によるラトリングの研究.

菊地大輔, 青木英和, 真田祥太郎, 田中謙弥, 綱島慶乃, 米澤佑樹, 土屋明久, 青木勇二, 菅原仁, 佐藤英行:  $\text{SmT}_4\text{P}_{12}$  ( $T=\text{Fe}, \text{Ru}$ ) の電子輸送特性.

田中謙弥, 青木英和, 菊地大輔, 川人佑介, 菅原仁, 佐藤英行: 高圧合成法を用いた充填スクッテルダイト化合物の単結晶育成 II.

綱島慶乃, 青木勇二, 髭本亘, 真田祥太郎, S.R. Saha, 菅原仁, 佐藤英行, 幸田章宏, 大石一城, 西山樟生, 門野良典:  $\mu\text{SR}$  による  $\text{Pr}_x\text{La}_{1-x}\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$  の超伝導状態の観測 II.

荻田典男, 宇田川眞行, 近藤歳久, S.R. Saha, 青木勇二, 佐藤英行, 菅原仁, 関根ちひろ, 城谷一民, 石川義和: スクッテルダイト化合物  $\text{ROs}_4\text{Sb}_{12}$  のラマン散乱.

真田祥太郎, 青木勇二, 菊地大輔, 土屋明久, 青木英和, 菅原仁, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト  $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$  の電子輸送効果 II.

上野高文, 山口隆, 根本祐一, 後藤輝孝, 武田直也, 菅原仁, 佐藤英行: 超音波による充填スクッテルダイト  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  の四極子効果とラトリングの研究.

名越千代子, Yang. Changping, 神木正史, 真田祥太郎, 青木勇二, 菅原仁, 佐藤英行, 目時直人, 長壁豊隆, 本多史憲, 金子耕士, Shintaro Jonen, 伊藤晋一, 大山研司, 岩佐和晃:  $\text{Ce}_3\text{Ir}_4\text{Sn}_{13}$  の磁気構造と結晶場の研究.

西山昌秀, 加藤喬之, 鄭国慶, 播磨尚朝, 菅原仁, 佐藤英行:  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  の超伝導に対する Os サイト置換効果の NQR による研究.

今村洋寿, 與儀護, 小手川恒, 鄭国慶, 北岡良雄, 菊地大輔, 菅原仁, 佐藤英行: 重い電子系超伝導体  $\text{Pr}_x\text{La}_{1-x}\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$  の Sb-NQR による研究 II.

土居昌弘, 藤秀樹, 世良正文, 與儀護, 北岡良雄, 小手川恒, 鄭国慶, 播磨尚朝, 菅原仁, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト超伝導体  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  の超伝導状態における角度分解 NMR.

笠原成, 徳永祐介, 徳永将史, 為ヶ井強, 菅原仁, 佐藤英行: 局所磁場測定による  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  におけるカイラル超伝導の検証.

柄木良友, 久保田実, 石本英彦, 菅原仁, 佐藤英行:  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  の磁束ダイナミクス.

Jeroen Custers, 生井由紀恵, 田山孝, 榊原俊郎, 菅原仁, 青木勇二, 佐藤英行: Angle-resolved specific heat measurements on  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ .

根本祐一, 上野高文, 山口隆, 柳澤達也, 後藤輝孝, 武田直也, 菅原仁, 佐藤英行: 重い電子超伝導体  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  の超音波吸収とラットリング.

中井祐介, 石田憲二, 菅原仁, 菊池大輔, 佐藤英行: 超伝導体  $\text{LaFe}_4\text{P}_{12}$ ,  $\text{LaOs}_4\text{Sb}_{12}$  の NMR.

田山孝, Jeroen Custers, 佐藤英和, 榊原俊郎, 菅原仁, 佐藤英行:  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  の新しい高磁場秩序状態.

小手川恒, 島岡良之, 三木猛, 日高宏之, 小林達生, 藤原賢二, 菅原仁, 菊地大輔, 佐藤英行:  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  の圧力誘起絶縁体状態における  $^{31}\text{P}$ -NMR.

筒井智嗣, 石川大介, John P. Sutter, Alfred Q. R. Baron, 菊地大輔, 菅原仁, 佐藤英行:  $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$  の X 線非弾性散乱.

今田真, 福田泰洋, 山崎篤志, 関山明, 菅原仁, 佐藤英行, 菅滋正: バルク敏感光電子分光による  $\text{SmFe}_4\text{P}_{12}$  の Sm 4f 電子状態の研究.

青木勇二, 真田祥太郎, 市井宏輝, 青木英和, 土屋明久, 菊地大輔, 菅原仁, 佐藤英行: スクッテルダイト  $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$  と  $\text{NdOs}_4\text{Sb}_{12}$  の特異な重い電子状態.

松波雅治, 堀場弘司, 山本和矢, 田口宗孝, A. Chainani, 高田恭孝, 辛埴, 池永英司, 三輪大五, 西野吉則, 玉作賢治, 菅原仁, 佐藤英行, 生天目博文, 谷口雅樹, 石川哲也, 小林啓介: 光電子分光から見た Ce 系充填スクッテルダイト化合物の混成効果と電子状態.

金子耕士, 目時直人, 桑原慶太郎, 神木正史, 椎名亮輔, J.-M. Mignot, A. Gukasov, N. Bernhoeft: 中性子散乱による  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  の磁場誘起反強四極子秩序の研究.

桑原慶太郎, 神木正史, 岩佐和晃, 西正和, 中島健次, 横山淳, 網塚浩:  $\text{URu}_2\text{Si}_2$  の磁気形状因子.

A. Hannan, 川名大地, 桑原慶太郎, 神木正史, 鳴海康雄, 田畑吉計, 下村晋, 田中良和, 勝又紘一:  $\text{CeP}$  の高磁場下の磁気構造- 放射光 X 線回折.

日本物理学会秋季大会 2005 年 24 日~ 27 日 (同志社大)

広岡慎司, 西山昌秀, 鄭国慶, 播磨尚朝, 菅原仁, 菊地大輔, 佐藤英行:  $\text{Pr}(\text{Nd})\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$  の NQR による研究.

真岸孝一, 尾崎拓雄, 菅原仁, 斎藤隆仁, 小山晋之, 佐藤英行:  $\text{CeFe}_4\text{X}_{12}$  ( $\text{X} = \text{P}, \text{Sb}$ ) の核磁気共鳴.

田中謙弥, 川人祐介, 菊地大輔, 青木英和, 青木勇二, 佐藤英行: 高压合成法による  $\text{PrFe}_4\text{Sb}_{12}$  の純良試料育成とその物性.

妹尾和宜, 村上朋子, 松波雅治, 岡村英一, 難波孝夫, 関根ちひろ, 城谷一民, 菅原仁, 佐藤英行: スクッテルダイト化合物の光学伝導度と電子状態.

菊地大輔, 青木英和, 菅原仁, 青木勇二, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト化合物  $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$  の電子輸送特性.

李哲虎, 長谷泉, 松田雅昌, 菅原仁, 佐藤英行: 中性子散乱による  $\text{CeRu}_4\text{Sb}_{12}$  のフォノンの研究.

正木了, 沖直美, 水戸毅, 和田信二, 菊池大輔, 佐藤英行, 菅原仁, 武田直也, 鄭国慶: Sm 系充填スクッテルダイト化合物の NMR.

本村瑤子, 川名大地, 菊地大輔, 青木勇二, 佐藤英行:  $\text{Pr}(\text{Fe}_x\text{Ru}_{1-x})_4\text{P}_{12}$  の電氣的, 磁氣的特性.

杉山清寛, 中島弘, 萩原政幸, 金道浩一, 菊池大輔, 青木勇二, 菅原仁, 佐藤英行, 摂待力生, 大貫惇睦, 播磨尚朝: Sm スクッテルダイト化合物の強磁場磁性.

青木英和, 菊地大輔, 菅原仁, 宇治進也, 寺嶋太一, 青木勇二, 佐藤英行:  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  の高磁場秩序状態における電子輸送特性.

森育子, 菅原仁, 真岸孝一, 斎藤隆仁, 小山晋之, 菊地大輔, 佐藤英行:  $\text{CeFe}_4\text{Sb}_{12}$  の単結晶育成と電氣的磁氣的特性.

土居昌弘, 藤秀樹, 世良正文, 菅原仁, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト超伝導体  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  の超伝導状態における角度分解 NMR II.

東道啓聡, 山崎篤志, 今田真, 関山明, 菊地大輔, 菅原仁, 佐藤英行, 菅滋正: 充填スクッテルダイト化合物  $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$  の軟 X 線光電子分光.

根本祐一, 上野高文, 柳澤達也, 後藤輝孝, 菅原仁, 佐藤英行, 武田直也: 重い電子超伝導体  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  と混晶系  $\text{Pr}(\text{Os}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sb}_{12}$  における超音波分散とラットリング.

宮腰有人, 菊地淳, 瀧川仁, 佐藤英行, 菅原仁:  $\text{PrR}_4\text{P}_{12}$  ( $\text{R}=\text{Ru}, \text{Fe}$ ) における  $^{31}\text{P}$ -NMR 測定.

入澤明典, 小林昌代, 佐藤和幸, 松波雅治, 岡村英一, 難波孝夫, 菅原仁, 佐藤英行:  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  における光学応答の圧力変化.

笠原成, 平田和人, 為ヶ井強, 菅原仁, 菊地大輔, 佐藤英行:  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  における局所磁化異常とその空間分布.

桑原慶太郎, 岩佐和晃, 神木正史, 金子耕士, 目時直人, S. Raymond, M.-A. Measson, J. Flouquet, 菅原仁, 青木勇二, 佐藤英行:  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  の 4 重極励起子の直接観測.

髭本亘, 青木勇二, 大石一城, 伊藤孝, B, R. H. Heffner, 幸田章宏, 門野良典, 菊池大輔, 菅原仁, 佐藤英行: ミュオンナイトシフト測定による  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  の La 置換効果の研究.

綱島慶乃, 青木勇二, 真田祥太郎, 田中謙弥, 土屋明久, 菊池大輔, 青木英和, 菅原仁, 佐藤英行: 電子輸送特性から見た  $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$  の異常な重い電子状態.

藤秀樹, 土居昌弘, 中井祐輝, 世良正文, 菅原仁, 佐藤英行: RF 表面インピーダンス法から見た  $\text{PrT}_4\text{Sb}_{12}$  ( $T=\text{Os}, \text{Ru}$ ) の超伝導相図.

筒井智嗣, 梅村純平, 小林寿夫, 依田芳卓, 菊池大輔, 菅原仁, 佐藤英行:  $\text{RFe}_4\text{P}_{12}$  ( $R=\text{La}, \text{Ce}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}$ ) の核共鳴非弾性散乱.

岩佐和晃, 楊昌平, 神木正史, 菅原仁, 佐藤英行, 阿曾尚文: 中性子回折による  $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$  の反強磁性転移の観測.

西山迪孝, 水口拓也, 坂井正樹, 青木勇二, 佐藤英行, 高下雅弘, 高岸雅幸, 岩崎仁志: スピンバルブ型 CPP-GMR 素子における輸送特性および低周波電圧ノイズ特性.

ハオリジェ, 長谷川朋生, 堀内研治, 岩佐和晃, 村上洋一, 桑原慶太郎, 神木正史, 菅原仁, 青木勇二, 佐藤英行:  $\text{Pr}_{0.85}\text{La}_{0.15}\text{Fe}_4\text{P}_{12}$  の重い電子状態における磁気励起.

中井祐介, 石田憲二, 菅原仁, 菊池大輔, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト超伝導体  $\text{LaOs}_4\text{Sb}_{12}$  の La-NMR.

中西良樹, 谷澤知章, 藤野拓也, 吉澤正人, 菅原仁, 菊池大輔, 佐藤英行:  $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$  の超音波を用いた弾性特性の研究.

小枝真仁, 栗田伸之, 辺土正人, 上床美也, 菅原仁, 小林未希, 佐藤英行: Ce 系スクッテルダイト化合物の超高压下輸送特性.

日高宏之, 福島賢, 堀彰宏, 小手川恒, 小林達生, 藤原賢二, 菊池大輔, 菅原仁, 佐藤英行:  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  における圧力誘起絶縁相の研究.

上野高文, 根本祐一, 後藤輝孝, 菅原仁, 佐藤英行, 武田直也: 超音波による充填スクッテルダイト  $\text{Pr}(\text{Os}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sb}_{12}$  の四極子効果とラットリングの研究.

川名大地, 佐賀山基, 佐藤匡史, 桑原慶太郎, 青木勇二, 神木正史, 佐藤英行, 岩佐和晃, 菅原仁:  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  の秩序状態における低温高压下 X 線回折.

佐藤匡史, 川名大地, 桑原慶太郎, 神木正史, 佐藤英行, 横尾哲也, 新井正敏, 國井暁:  $\text{GdB}_6$  の磁場下中性子・X 線回折.

永井孝幸, 與儀護, 今村洋寿, 椋田秀和, 北岡良雄, 菊池大輔, 佐藤英行:  $\text{Pr}_{1-x}\text{La}_x\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$  ( $x=0.8$ ) の Sb-NQR による超伝導状態の研究.

米澤佑樹, 青木勇二, 綱島慶乃, 真田祥太郎, 菊池大輔, 菅原仁, 佐藤英行:  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  における La 置換効果.

孫培傑, 中西良樹, 吉澤正人, 河野猛, 中尾公一, 腰塚直己, 菊池大輔, S.R.Saha, 菅原仁, 佐藤英行: パルス強磁場下での  $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$  の超音波を用いた弾性特性の研究.

近藤歳久, 長谷川巧, 高須雄一, 荻田典男, 宇田川眞, 武田直也, 菊池大輔, 菅原仁, 佐藤英行: 充填スクッテルダイト  $\text{SmT}_4\text{X}_{12}$  のラマン散乱.

柄木良友, 高明淑, 久保田実, 石本英彦, 菅原仁, 佐藤英行:  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  のマイスナー状態での磁化探索および磁束ダイナミクス.

佐賀山基, 若林裕助, 澤博, 川名大地, 桑原慶太郎, 神木正史, 青木勇二, 佐藤英行, 菅原仁, 岩佐和晃: 高圧下放射光 X 線回折による充填スクッテルダイト化合物  $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$  の M-I 転移機構の研究.

松波雅治, 木須孝幸, A. Chainani, 江口律子, 富樫格, C.Zhang, C.T.Chen, 渡部俊太郎, 堀場弘司, 山本和矢, 田口宗孝, 高田恭孝, 仙波泰徳, 大橋治彦, 菅原仁, 佐藤英行, 播磨尚朝, 辛埴:  $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$  におけるフェルミ準位近傍の電子状態: レーザー及び軟 X 線放射光を用いた光電子分光

川人祐介, 田中謙弥, 菊地大輔, 青木英和, 青木勇二, 佐藤英行: 高圧下でのフラックス法による充填スクッテルダイト化合物の単結晶育成.

藤野拓也, 中西良樹, 谷澤知章, 吉澤正人, 菅原仁, 菊池大輔, 佐藤英行:  $\text{SmFe}_4\text{P}_{12}$  の超音波を用いた弾性特性の研究.

浜崎達一, 横尾哲也, 新井正敏, 桑原慶太郎, 大原繁男, 坂本功: 単結晶  $\text{GdGaAl}$  の中性子回折.

#### 第 20 回 SRC 技術報告会 2005 年 12 月 1 日 - 2 日 (湯河原)

Y. Aoki, T. Mizuguchi, M. Nishiyama, M. Sakai, H. Sato: Analyses of noise and transport properties of high sensitivity MR elements

#### 国際会議

the 16th American Conference on Crystal Growth and Epitaxy,  
July 13-17, 2005, Big Sky Montana, USA,

H. Sato: Novel features in the filled skutterudites associated with the unique crystal structure, (Invited)

the International Conference on Strongly Correlated Electron Systems SCES'05,  
July 26-August, 2005, Wien, Austria

H. Sato: Novelty and variety of the characteristics found in the filled skutterudites, (Invited)

Y. Aoki, S. Sanada, H. Aoki, D. Kikuchi, Y. Tsunashima, H. Sugawara and H. Sato: Anomalous Field-insensitive Heavy-fermion State in  $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$  (Oral)

N. Ogita, T. Kondo, T. Hasegawa, Y. Takasu, M. Udagawa, N. Takeda, K. Ishikawa, H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato *et al.*: Raman scattering investigation of skutterudite compounds

M. Mizumaki, S. Tsutsui, H. Tanida, T. Uruga, D. Kikuchi, H. Sugawara and H. Sato: Determination of the valence in Sm-based filled skutterudite compounds

S. Tsutsui, J. Umemura, H. Kobayashi, Y. Yoda, H. Onodera, H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato, C. Sekine and I. Shirovani:  $^{149}\text{Sm}$  nuclear resonant inelastic scattering of Sm-based filled-skutterudite compounds

M.-A. Méasson, D. Braithwaite, B. Salce, J. Flouquet, G. Lapertot, J. Pécaut, G. Seyfarth, J.-P. Brison, H. Sugawara and H. Sato: Nature of the double superconducting transition in  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ ?

D. Kawana, H. Sagayama, M. Sato, K. Kuwahara, Y. Aoki, M. Kohgi, H. Sato, K. Iwasa and H. Sugawara: High-pressure X-ray diffraction study of  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$

L. Hao, K. Iwasa, T. Hasegawa, T. Takagi, K. Horiuchi, Y. Mori, Y. Murakami, K. Kuwahara, M. Kohgi, H. Sugawara *et al.*: p-f hybridization effect on the metal-nonmetal phase transition in  $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$

N. Ogita, M. Udagawa, S.R. Saha, H. Sato and H. Sugawara: Raman scattering investigation of filled skutterudite  $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$

T. Mito, S. Masaki, N. Oki, S. Noguchi, S. Wada, N. Takeda, D. Kikuchi, H. Sato, H. Sugawara and G.-q. Zheng: NMR study of unique properties in  $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$

M. Matsunami, K. Horiba, M. Taguchi, K. Yamamoto, A. Chainani, Y. Takata, Y. Senba, H. Ohashi, H. Sugawara, H. Sato *et al.*: Photoemission spectroscopy of Ce-filled skutterudites

D. Kikuchi, H. Sugawara, H. Aoki, K. Tanaka, S. Sanada, Y. Aoki and H. Sato: Magnetoresistance in the filled skutterudite  $\text{SmFe}_4\text{P}_{12}$

H. Tou, Y. Nakai, M. Doi, M. Sera, H. Sugawara and H. Sato: Surface impedance studies of  $\text{PrT}_4\text{Sb}_{12}$  (T=Os, Ru)

H. Sugawara, S. Yuasa, A. Tsuchiya, Y. Aoki, H. Sato, T. Sasakawa and T. Takabatake: Thermoelectric properties in  $\text{Ce}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_4\text{P}_{12}$

Jeroen Custers, Yukie Namai, Takashi Tayama, Toshiro Sakakibara, Hitoshi Sugawara, Yuji Aoki and Hideyuki Sato: Field-orientation dependence of the specific heat of  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$

M. Nishiyama, T. Kato, H. Sugawara, D. Kikuchi, H. Sato, H. Harima and G.-Q. Zheng: Evidence for nodes in the superconducting energy gap of the skutterudite compound  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$

Hidekazu Aoki, Daisuke Kikuchi, Hitoshi Sugawara, Yuji Aoki and Hideyuki Sato: Anisotropy in the electrical transport properties of the high-field heavy-fermion state in  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$

M. Yoshizawa, Y. Nakanishi, T. Tanizawa, A. Sugihara, M. Oikawa, P. Sun, H. Sugawara, S.R. Saha, D. Kikuchi and H. Sato: On the puzzling low-temperature phenomena in  $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$

K. Iwasa, M. Kohgi, H. Sugawara and H. Sato: Large softening of acoustic phonons in  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$

Koji Kaneko, Naoto Metoki, Tatsuma D. Matsuda, Keitaro Kuwahara, Masahumi Kohgi, Ryosuke Shiina, Jean-Michel Mignot, Arsen Gukasov, Nicholas Bernhoeft: Field-induced antiferroquadrupolar order in the heavy fermion superconductor  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$

K. Kuwahara, M. Kohgi, K. Iwasa, M. Nishi, K. Nakajima, Y. Yokoyama, H. Amitsuka: Magnetic form factor of  $\text{URu}_2\text{Si}_2$

Joint Workshop on NQP-skutterudites and NPM in multi-approach  
November 21-24, 2005, Tokyo

Y. Aoki, Y. Tsunashima, S. Sanada, H. Aoki, D. Kikuchi, H. Sugawara and H. Sato: Anomalous Field-insensitive Heavy-fermion State in  $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ , (Oral)

# ナノ物性サブグループ

## 1. 研究活動の概要

### 1) 遍歴電子反強磁性体の量子臨界現象

反強磁性-非磁性境界の近傍に位置する遍歴電子反強磁性体の量子臨界点 ( $T_N=0$ ) はどの臨界固定点により支配されているのか？ という問題提起がされてから約 10 年が経った。この量子臨界点の前後で、従来いわれているようにフェルミ面が連続的に変わる SDW type の QCP なのか？、それともいくつかの実験が示すようにフェルミ面が不連続に変化するのか？ ということに論点がある。前者は nearly antiferromagnetic SCR 理論 (renormalization theory も上部臨界次元  $d=2$  以上の場合は同じ結論を得る) の考え方と一致する。我々はこの問題を実験的に解明するために、重い電子  $\text{Ce}(\text{Ru}_{1-x}\text{Rh}_x)_2\text{Si}_2$  ( $x_c \sim 0.04$ ) におけるスピン揺動の詳細な中性子非弾性散乱実験を行った。その結果、相関時間の臨界指数が、 $d=3$  の SDW type の QCP の理論値  $3/2$  と一致したので、SDW QCP を明確に結論することができた。

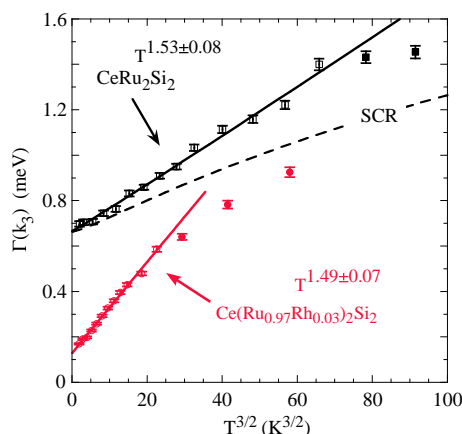


図 1:  $\text{Ce}(\text{Ru}_{1-x}\text{Rh}_x)_2\text{Si}_2$   $x = 0, 0.03$  の相関時間の臨界指数は SDW QCP の理論値  $3/2$  とよく一致する。

### 2) 幾何学的フラストレーションを示す磁性体の磁気揺動

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、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。本年度はパイロクロア型酸化物  $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$  に  $[111]$  方向の磁場をかけた場合に出現する、カゴメアイス状態のスピン相関を詳しく研究した。スピン相関に関する中性子回折実験結果を、モンテカルロシミュレーションを用いて解析し、最近接相互作用に基づくカゴメアイスモデルが、双極子相互作用が大きい  $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$  でも実現していることを明らかにした。

### 3) 単層カーボンナノチューブに吸蔵された水の運動 (中性子非弾性散乱実験)

$\text{SWNT} + [\text{H}_2\text{O}]$  は、水分子が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。SWNT +  $[\text{H}_2\text{O}]$  にはもう一つの別の興味深い点があり、それは SWNT 内の水はかなりの低温 ( $T=150\text{K}$  程度) まで、通常の氷よりもはるかによく動く状態を保ったままであるという性質である。この水の運動状態を調べるために、中性子非弾性散乱実験をラザフォード・アプレトン研究所で行った。水素の大きな非干渉性散乱断面積を利用して、水素の運動状態を調べ、確かに水が



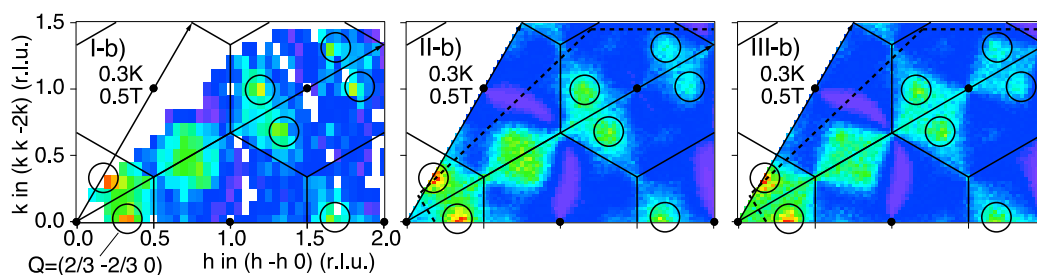


図 2:  $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$  のカゴメアイス状態のスピン相関の測定とモンテカルロシミュレーションの結果。

アイスナノチューブを形成し始めると思われる温度  $T=230\text{K}$  以下でも水素の運動は部分的にしか止まらず、完全に運動が止まるのは  $T=150\text{K}$  付近であることを明らかにした。

#### 4) 単層カーボンナノチューブに吸蔵された水の運動 (NMR 実験)

核磁気共鳴法は、中性子非弾性散乱実験同様に SWNT 内の水の運動状態を調べる有効な方法である。本年度は、軽水 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) と重水 ( $\text{D}_2\text{O}$ ) について  $^1\text{H}$  と  $^2\text{H}$ ・NMR を行って、直径  $13.5\text{\AA}$  の SWNT においてアイスナノチューブの形成に伴い水素の運動が凍結すること、アイスナノチューブの形成温度以上の高温では、水分子は  $10^{-5}$  秒の時間スケールで回転と並進運動を行い、液体的でありことを明らかにした。さらに、SWNT 内部の液体状態では、水の回転運動は僅かに等方的回転からずれていることも明らかになった。今後、中性子非弾性散乱と NMR を相補的に用いて、SWNT 内の水の動的挙動の全体像を明らかにしたい。

#### 5) ナノ分子バルブ

水を吸蔵したカーボンナノチューブのガス吸蔵実験を行い、ガス貯蔵およびナノ分子バルブ機構について重要な結果が得られ、2 件の特許出願を行った。

#### 6) ゼオライトの空隙内に形成された電子系の研究

ゼオライト結晶ではナノメートルサイズの空隙が周期的に配列している。これらの空隙内に、原子・分子を挿入すると周期的に配列したクラスター凝縮体を作ることができる。本グループは中央大学風間研究室、東京医科大学増淵氏らとの共同研究により、ナトリウムを吸着した FAU 型ゼオライトにおいてサーモクロミズム現象を見出しているが、本年度はその起源がヘテロクラスター系特有の新しいタイプのサーモクロミズムであることを明らかにした。

#### 7) 学外共同利用施設による研究

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 (2004G232/PF)。

#### 8) その他

カーボンナノチューブ内の水の挙動について雑誌「ニュートン」の 5 月号から 8 月号に紹介された。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

H. Kadowaki, Y. Tabata, M. Sato, N. Aso, S. Raymond, S. Kawarazaki: Quantum Critical Point of an Itinerant Antiferromagnet in a Heavy Fermion, *Phys. Rev. Lett.* **96** (2006) 016401-(1-4).

K. Umeo, K. Motoya, H. Kadowaki, N. Aso, T. Tayama, T. Sakakibara, N. Kurita, M. Hedo, Y. Uwatoko, T. Takeuchi, and T. Takabatake: Pressure- and Field-Induced Magnetic Instabilities in a Heavy-Fermion Antiferromagnet  $Ce_7Ni_3$ , *Journal of Alloys and Compounds* **408-412** (2006) 43-46.

H. Kadowaki, A. Nishiyama, K. Matsuda, Y. Maniwa, S. Suzuki, Y. Achiba, H. Kataura: Rietveld analysis and maximum entropy method of powder diffraction for bundles of single-walled carbon nanotubes, *J. Phys. Soc. Jpn.* **74** (2005) 2990-2995.

K. Kakurai, K. Nukui, N. Aso, M. Nishi, H. Kadowaki, H. Kageyama, Y. Ueda, L.-P. Regnault, O. Cepas: Neutron Scattering Investigation on Quantum Spin System  $SrCu_2(BO_3)_2$ , *Progress of Theoretical Physics Supplement* **159** (2005) 22-32.

N. Aso, H. Kageyama, K. Nukui, M. Nishi, H. Kadowaki, Y. Ueda, K. Kakurai: High Energy-Resolution Inelastic Neutron Scattering Experiments on Triplet Bound State Excitations in  $SrCu_2(BO_3)_2$ , *J. Phys. Soc. Jpn.* **74** (2005) 2189-2192.

H. Miyata, Y. Maniwa, H. Kataura: Selective oxidation of semiconducting single-wall carbon nanotubes by hydrogen peroxide, *J. Phys. Chem. B*, **110**(2006) 25-29.

## 2) 学会講演

日本物理学会第 60 回年次大会 2005 年 3 月 24 日・27 日 (東京理科大学野田キャンパス)

真庭豊: XRD, NMR から見たカーボンナノチューブ試料の実際 (シンポジウム講演)

増淵伸一, 澤田健吾, 大岩潔, 風間重雄, 真庭豊, 松田和之, 吉良弘, 清水文比古: Na を吸蔵した FAU の ESR

宮田耕充, 片浦弘道, 榊原陽一, 松崎瞬, 徳本圓, 真庭豊: HiPco ナノチューブの直径制御と可飽和吸収

松田和之, 日比寿栄, 真庭豊, 鈴木信三, 阿知波洋次, 片浦弘道: 単層カーボンナノチューブバンドルに吸着した水の NMR

日本物理学会秋季大会 2005 年 9 月 19 日・22 日 (同志社大学京田辺キャンパス)

門脇広明, 田畑吉計, 佐藤真直, 阿曾尚文, S. Raymond, 河原崎修三: 重い電子系  $Ce(Ru_{1-x}Rh_x)_2Si_2$  における反強磁性量子相転移

田畑吉計, 門脇広明, 松平和之, 廣井善二, 阿曾尚文, B. Fak: カゴメアイスにおけるスピン相関

福原忠, 前澤邦彦, 桑井智彦, 水島俊雄, 増淵伸一, 門脇広明:  $Ce(Ni_{1-x}Pd_x)_2Ge_2(0 \leq x \leq 1)$  の磁性と伝導

松田和之, 日比寿栄, 谷津祥明, 真庭豊, 鈴木信三, 阿知波洋次, 片浦弘道: 単層カーボンナノチューブに吸着した水の NMR

榊原陽一, 宮田耕充, 松崎瞬, 徳本圓, 石田興太郎, 真庭豊, 片浦弘道: ポリマー中に分散した単層カーボンナノチューブの吸収飽和の時間応答

小山岳秀, 本山岳, 小山岳秀, 中村裕之, 小原孝夫, 小田祺景松, 松田和之, 小堀洋, 伊藤公平:  $URu_2Si_2$  の圧力下  $^{29}Si$ -NMR

第 66 回応用物理学会学術講演会 2005 年 9 月 7 日 - 11 日 (徳島大学)

真庭豊: カーボンナノチューブの内部空間に形成される室温氷 (シンポジウム講演)

第 29 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム 2005 年 7 月 25 日 - 27 日 (京都大学)

真庭豊: ナノチューブ内の水の構造と相転移 (招待講演)

宮田耕充、片浦弘道、真庭豊: 過酸化水素を使った金属カーボンナノチューブの濃縮

#### 国際会議

The 2005 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem 2005), Honolulu, Hawaii, USA, December 15-20, 2005

K. Matsuda, T. Hibi, H. Kadowaki, Y. Maniwa, H. Kataura, S. Suzuki, Y. Achiba: NMR study of gas-hydrate inside carbon nanotubes

2006 APS March Meeting, Baltimore, Maryland, USA, March 13-17, 2006

Y. Tabata, H. Kadowaki, K. Matsuhira, Z. Hiroi, N. Aso, B. Fak: Spin dynamics in the kagome ice state

24th International Conference on Low Temperature Physics, Orlando, Florida, USA, August 10-17, 2005

H. Kadowaki, Y. Tabata, M. Sato, N. Aso, S. Raymond, S. Kawarazaki: Quantum Critical Point of Itinerant Antiferromagnet in the Heavy Fermion  $\text{Ce}(\text{Ru}_{1-x}\text{Rh}_x)_2\text{Si}_2$  (invited paper)

#### 3) 学会誌等

真庭豊、片浦弘道: 単層カーボンナノチューブに閉じ込められた水の構造、日本物理学会誌 60 (2005) 736-740

#### 4) その他

特許出願: 特願 2006-062752、特願 2005-346031

# 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幾つかの興味ある物質について研究を進めている。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 にわたって変えられる手製のスペクトロメーターを用い、温度、周波数、圧力をパラメーターとして、電子状態のユニークな情報を得ることを目的としている。

この種の研究が可能なグループは、単一の研究室としては世界的に見ても殆ど例がない。本研究手段の特徴を幾つかあげてみよう。低次元電子系では、スピン担体の微視的なダイナミクスの異方性を定量的に見積れ、多結晶試料にも適用できる非常にユニークな特徴がある。また、同一試料内の核スピンと電子スピンを同一周波数で観測すれば、試料内の反磁性に影響されない電子スピン磁化率を測定できる。静水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、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 までかけることができる。また、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

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、放射線などで作られた欠陥から、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。つい最近でも、DNA に関しては、興味深い俄には信じ難い実験結果や解釈が PRL などに報告されている。物理学に携わる以上は、これらの報告がどこまで多面的に支持される結果、解釈であるのかを確認していくことも務めであると考えている。

最近、ファージから取り出した  $\lambda$ -DNA の磁化率が、数十 K 以下で異常な常磁性を示すことが報告された。著者らの主張は、ミクロンサイズの DNA が偶然リングを構成し、そこに流れるコヒーレントな電流が軌道常磁性を作り出す、という内容である。天然の DNA は、複雑な塩基配列を持つことから、コヒーレントな波動関数が出来るという仮説はとても興味深い物がある。そのような乱雑系であっても、コヒーレントな伝導が起こりうるという理論的なモデルも提唱されていることが、著者らの主張の背景にある。

そこで、日本で手に入れやすいサーモンの DNA を対象に、同様の追試実験を試みた。スクイッド磁化は、報告と定性的に、また、半定量的にも一致した。約 20 K 以下から約 6 K のキュリーワイス的な

温度依存性を示し、2 K における磁化曲線もほぼ一致した。しかし、50 K 近辺にハンプが見られ、著者らが重要な因子と主張する水分量が変化しなくても常磁性磁化が変わるなど、酸素分子の寄与を疑わせる点も見られた。そこで、酸素のみの磁化を調べたところ、図 1 に示すように報告結果を良く再現することが確認された。しかし、DNA に吸着した酸素が DNA の電子状態に無視できない寄与するという計算結果も報告されているので、更に検討を続けている。

## 2) TDAE-C<sub>60</sub>

純粋な有機系としては最も高い転移温度 16 K を示す C<sub>60</sub> を構成要素とする強磁性体、TDAE-C<sub>60</sub> の単結晶の一軸変位 ESR により、我々が提案してきたモデルの検証実験を進めている。転移温度の静水圧依存性とコンシステントで、かつ、定量的にも合理的な転移温度を与えるモデルを産総研の川本徹氏、徳本圓氏との共同研究により提案してきた：協力的ヤーン・テラー相互作用で歪んだ C<sub>60</sub> ボールの反強磁性的な軌道秩序が強磁性の起源。今年度は、静水圧、b 軸変位 ESR に続き、c 軸変位のデータが得られた。その結果は、0.5 kbar という低圧領域で、T<sub>C</sub> が 4 K 前後急減することを見出した。また、更に加圧すると、徐々に T<sub>C</sub> が回復することが分かった。これらの結果は、川本等の協力的ヤーン・テラーモデルで良く再現できることを示した。(産総研との共同研究)

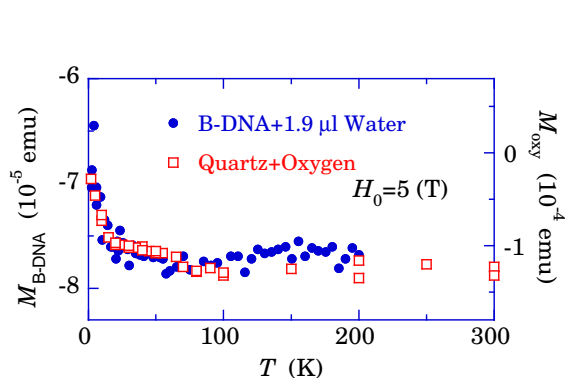


図 1:  $\lambda$ -DNA 及び石英綿と酸素ガスを共に封じた試料の磁化の温度依存性。誤差の範囲で両者は良く一致する。ミクロンサイズの DNA リングを流れるコヒーレント電流の作る軌道常磁性という文献の解釈も慎重に検討する必要がある。

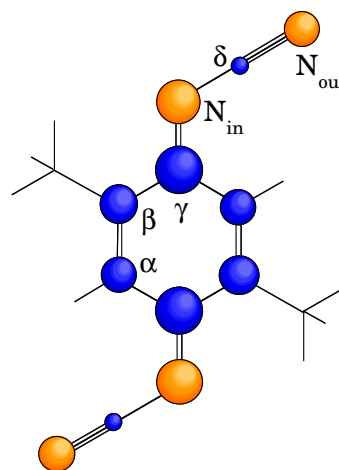


図 2: <sup>1</sup>H、<sup>13</sup>C、および <sup>15</sup>N (Phys. Rev. B 60, 14847 (1999) より引用) NMR を用いて決定した、(DMe-DCNQI)<sub>2</sub>Li の、DMe-DCNQI 分子上の電荷密度分布 (円の面積に比例)。

## 3) (DMe-DCNQI)<sub>2</sub>M

一次元的な DMe-DCNQI スタックと Li や Ag イオンのスタックから成る  $\frac{1}{4}$ -filled の一次元電子系、(DMe-DCNQI)<sub>2</sub>M (M=Li, Ag or Li<sub>1-x</sub>Cu<sub>x</sub>) は転移温度 65-80 K のスピンパイエルス (SP) 基底状態を持つ。これらの系は、 $\frac{1}{4}$ -filled であるにも係わらず、狭い 1 次元バンドのために Lower Hubbard band からなる一次元 half-filled バンドになっており、2 量体化して室温では  $4k_F$  電荷密度波 ( $4k_F$ -CDW) 状態が実現している。今年度も、中央大学との共同研究として、<sup>1</sup>H NMR、<sup>13</sup>C と文献の <sup>15</sup>N NMR により DMe-DCNQI 分子上の電荷密度分布の決定をした (図 2)。その結果、分子内の電子スピン密度分布は、第一原理計算の結果とコンシステントであった。一方、Ag 塩は、Li 塩と同様に、Ag イオンが +1 価だと考えられてきたが、そう単純ではないことが示唆された。ところが、+1 価以上では  $4k_F$ -CDW 状態のネスティング条件と相容れないことから、金属イオンと DCNQI 分子の間に局在した  $\pi$ -d 混成軌道にホールが存在

し、DCNQI 分子への正味の電荷移動量は+1 であると考えらるべきである。(中大、理研、学習院大、分子研との共同研究)

#### 4) (BEDT-TTF)<sub>2</sub>ICl<sub>2</sub>

有機電荷移動錯体 (BEDT-TTF)<sub>2</sub>ICl<sub>2</sub> 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状態に変化するかを圧力下 ESR を用いて調べている。2GPa 以下では圧力とともに反強磁性転移温度が増加することがわかった。現在使用しているピストンシリンダー式の圧力セルは 3GPa 以下の圧力しかかけられないので、さらに高圧 (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。(産総研との共同研究)

#### 5) β'- & β''- 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。β'-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が、β''-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 分子にほぼ  $\frac{1}{2}$  個の電子が移っており、それぞれが  $\frac{1}{4}$ -充填バンドを持つ。これまでに、β''-相の温度を上げていくと、390 K 辺りで相転移を起こし、β'-相に変わることがわかった。この結果は、β''-相が準安定状態であることを示唆している。β'-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が g 値とスピン磁化率から明らかになった。β''-相は、300 K 以下の抵抗の温度変化は金属的であるが 180、80、20、10 K で異常が見られる。両分子のスピン磁化率の分離から、180 K は、ET 分子面で電荷秩序が融け、金属へ転移が考えられるが、80 K 以下の異常の原因は不明である。g 値の強い周波数依存性から、何らかの磁気秩序が係わっていると考えられる。現在、水素を重水素化した試料の NMR による解析を準備中である。(埼玉大、中大、分子研との共同研究)

#### 6) 交互積層型電荷移動錯体

ドナー分子、アクセプター分子が交互に並んだ柱から成っており、中性相、イオン性相の二種の相が存在する特徴を持つ。中性-イオン性転移は 1 次転移であるが、(BEDT-TTF)(ClMeTCNQ) においては、両相の間のエネルギー障壁の大きさが転移温度程度であるために短時間で熱平衡になり、クロスオーバー的な転移になること等を明らかにしてきた。今年度は常温・常圧でイオン性相にある (BEDO-TTF)(Cl<sub>2</sub>TCNQ) が示す 120K での分子変位を伴う転移の圧力依存性を調べた。0.1GPa の圧力で転移温度が大きく減少し、高温相が安定化されることが示された。また、常温・常圧で中性相にある BO(EtO)<sub>2</sub>TCNQ の常温での常磁性磁化率の圧力依存性を調べた結果、(BEDT-TTF)(ClMeTCNQ) がイオン性相に転移し磁化率が飽和する 1.5GPa でも、中性のままであることがわかった。これは、この系の電荷移動バンドエネルギーが若干大きく、中性・イオン性両相の境界からより離れていることに対応する。(産総研、京大との共同研究)

#### 7) 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導電性高分子のポリアセチレンに枝として付けたポリ TEMPOL プロピオレートは、フリーラジカルと伝導鎖の組み合わせを目指した系であ

る。この組み合わせが効果的に働くと、秒のオーダーで充電が可能なラジカル 2 次電池の材料として有効である。しかし、この系の高分子骨格は、エネルギーギャップの大きなシス型ポリアセチレン構造を持つため、骨格の電気伝導度は高くない。そこで、熱によるトランス型への異性化の可否の確認と、これらの系の基礎物性を調べた。その結果、TEMPOL プロピオレートが容易に高分子骨格から外れること、即ち、熱異性化の前に側鎖の脱離が起こることが分かった。また、TEMPOL の分子性結晶は、6 K のキュリーワイス温度を持つ反強磁性体で、分子間の異方的な相互作用から予測された通り、ESR の周波数依存性から交換相互作用は、2 桁程度の準一次元的な異方性を持つことが分かった。(京大、日本化成との共同研究)

## 2. 研究業績

### 1) 論文

K. Mizoguchi, S. Tanaka, and H. Sakamoto: Comment on "Intrinsic Low Temperature Paramagnetism in B-DNA", Phys. Rev. Lett. **96**, 089801 (2006).

K. Mizoguchi, M. Takei, H. Sakamoto, T. Kawamoto, M. Tokumoto, A. Omerzu, and D. Mihailovic: Uniaxial Strain Study in Purely Organic Ferromagnet  $\alpha$ -TDAE-C<sub>60</sub> - Mechanism and Structure -, Polyhedron **24**, 2373-5 (2005).

K. Mizoguchi, S. Tanaka, T. Ogawa, N. Shiobara, and H. Sakamoto: Magnetic study of the electronic states in B-DNA and M-DNA doped with metal ions, Phys. Rev. B **72**, 033106, (1-4) (2005).

V. Sitaram, A. Sharma, S. V. Bhat, K. Mizoguchi, and R. Menon: Electron spin resonance studies in the doped polyaniline PANI-AMPSA: Evidence for local ordering from linewidth features, Phys. Rev. B **72**, 035209 (1-7) (2005).

### 2) 学会講演

日本物理学会 第 60 回年次大会 2005 年 3 月 24 日~ 3 月 27 日 (理科大学野田キャンパス)

平岡牧、坂本浩一、溝口憲治、加藤礼三、開康一、高橋利宏：低次元 DMe-DCNQI 系の圧力下 ESR

篠原幸恵、増淵伸一、風間重雄、平岡牧、坂本浩一、溝口憲治、加藤礼三、開康一、高橋利宏、山本貢、田島裕之：擬一次元  $\pi$  電子系 DCNQI 塩の固体高分解能 NMR

井上政信、溝口憲治、坂本浩一、徳本圓、川本徹、A. Omerzu, D. Mihailovic：有機強磁性体 TDAE-C<sub>60</sub> の一軸加圧 ESR

溝口憲治、井上政信、坂本浩一、和田潤：ポリ TEMPO プロピオレートの ESR

田中俊輔、溝口憲治、坂本浩一、木村仁士：金属をドーブした DNA の ESR による電子状態解析 II

今野信一、風間重雄、平岡牧、坂本浩一、溝口憲治、谷口弘三、中村敏和、古川貢：(BEDT-TTF)(TCNQ) の ESR II

坂本浩一、溝口憲治、谷口弘三： $\beta'$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>ICl<sub>2</sub> の圧力下 ESR

日本物理学会 2005 年秋季大会 2005 年 9 月 19 日~ 9 月 22 日 (同志社大学)

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、平岡牧： $\beta''$ -ET(TCNQ)の電子状態

林篤志、井上政信、坂本浩一、溝口憲治、和田潤：ポリ TEMPO プロピオレートの ESR II

井上政信、溝口憲治、坂本浩一、徳本圓、川本徹、A. Omerzu, D. Mihailovic：有機強磁性体 TDAE-C<sub>60</sub>の一軸歪み ESR

田中俊輔、溝口憲治、坂本浩一：金属をドーピングした DNA の ESR による電子状態解析 III

坂本浩一、溝口憲治、谷口弘三： $\beta'$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>ICl<sub>2</sub> の圧力下 ESR II

今野信一、風間重雄、平岡牧、坂本浩一、溝口憲治、谷口弘三、中村敏和、古川貢：(BEDT-TTF)(TCNQ)の ESR III

### 国際会議

The International Symposium on Molecular Conductors (ISMC2005), Hayama, Japan, July 17 - July 21, 2005

K. Mizoguchi, Y. Shinohara, S. Kazama, M. Hiraoka, H. Sakamoto, R. Kato, K. Hiraki and T. Takahashi: Spin Distribution in (DMe-DCNQI)<sub>2</sub>M, M=Li, Ag, or Cu, examined by High resolution NMR.

H. Sakamoto, K. Mizoguchi, and H. Taniguchi: A Pressure-Temperature Phase Diagram of  $\beta'$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>ICl<sub>2</sub> by ESR under Pressure.

S. Konno, S. Kazama, M. Hiraoka, H. Sakamoto, K. Mizoguchi, H. Taniguchi, T. Nakamura, K. Furukawa: ESR study on the electronic states of  $\beta'$ -(BEDT-TTF)(TCNQ).

International Symposium on Crystalline Organic Solid (ISCOM 2005), Keywest, USA, September 11-16, 2005

K. Mizoguchi, S. Tanaka, and H. Sakamoto: Electronic States of natural and metal-ion doped DNAs.

K. Mizoguchi, Y. Shinohara, S. Kazama, M. Hiraoka, H. Sakamoto, R. Kato, K. Hiraki, and T. Takahashi: Determination of the  $\pi$ -charge distribution of DMe-DCNQI molecule in (DMe-DCNQI)<sub>2</sub>M, M=Li, Ag, and Cu.

H. Sakamoto, K. Mizoguchi, and T. Hasegawa: Neutral-Ionic transition of (BEDT-TTF)(ClMeTCNQ) studied by ESR under pressure.

M. Hiraoka, H. Sakamoto, K. Mizoguchi, R. Kato, T. Kato, T. Nakamura, K. Furukawa, K. Hiraki, T. Takahashi, T. Yamamoto, and H. Tajima: Electron spin dynamics in (DMe-DCNQI)<sub>2</sub>M (M = Li<sub>1-x</sub>Cu<sub>x</sub> (x  $\leq$  0.14), Ag).

S. Konno, S. Kazama, M. Hiraoka, H. Sakamoto, K. Mizoguchi, H. Taniguchi, T. Nakamura, and K. Furukawa: EPR study on the electronic states of  $\beta'$ -(BEDT-TTF)(TCNQ).



Pacificchem 2005, Honolulu, USA, December 15-20, 2005

A. Hayashi, M. Inoue, S. Tanaka, H. Sakamoto, K. Mizoguchi, J. Wada, and T. Masuda: ESR study of polyTEMPOlpropyolate.

M. Inoue, K. Mizoguchi, H. Sakamoto, M. Tokumoto, T. Kawamoto, A. Omerzu and D. Mihailovic: Uniaxial strain effect in organic-ferromagnet TDAE-C<sub>60</sub>.

S. Tanaka, K. Mizoguchi and H. Sakamoto: Electronic states of metal-doped DNA studied by ESR.

K. Mizoguchi, Y. Shinohara, S. Kazama, M. Hiraoka, H. Sakamoto, R. Kato, K. Hiraki and T. Takahashi: NMR study on charge distribution in (DMe-DCNQI)<sub>2</sub>M, M=Li, Ag, or Cu.

H. Sakamoto, K. Mizoguchi, and T. Hasegawa: Magnetic properties of mixed-stack charge-transfer salt with BEDT-TTF analogues.

### 3) 学会誌等

溝口憲治：有機物質系における ESR：温度・周波数・圧力、電子スピンサイエンス **3**, 114-123 (2005).

激動の平成 17 年度が終わりました。この年、従来の都立の 4 大学から新たに 1 つの大学「首都大学東京」が誕生し、これまでの物理教室は、首都大学東京・都市教養学部・理工学系・物理学コースという長い名前になって平成 17 年度を迎えることとなりましたが、今となればあつという間の 1 年でした。

大規模な大学の組織再編にもかかわらず、物理教室自体は、その研究、教育の内容に大きな変動はありません。外部からは「あの物理学科はどこへ行った?」「もう物理学科はなくなったの?」という声も聞かれますが、それは組織のわかりにくい階層構造に物理学コースが埋もれてしまっているせいであり、物理教室は従来どおり、あるいは従来以上のエネルギーで、活動を続けています。その 1 年間の活動報告がこの平成 17 年度年次報告にまとめられています。

今ほどこの年次報告を外部の方々に読んでいただきたいときはないかもしれません。とくに高校生や大学生が手に取る機会が増えることを望みます。全国の研究者仲間には、この変革を通じて物理学コースがこれまで同様の活動を行ってきたことはある程度周知のことでしょう。むしろそのことを知らない可能性のある高校生、大学生に読んでもらい、都立大学の物理学科は首都大学東京の物理学コースとして、現在も活発に活動を続けていることを知ってもらいたいと思います。

昨今、大学の広報活動がますます活発になってきています。どの大学も学部生、大学院生の確保に並々ならぬ熱意で取り組んでいます。大学を紹介するパンフレットはどの大学にも用意され、およその研究分野や教育内容はそれを読めばわかる仕組みになっています。それに対し年次報告は、過去一年間に物理学コースが実際に行った活動の生の報告書です。表面的な紹介になることが多い大学のパンフレットに比べれば、年次報告ははるかに情報量が多く、貴重でリアルな資料となっています。首都大学東京の学部、大学院を受験する人たちにも年次報告を読んでもらいたい理由はそこにもあるのです。

年次報告は高校生には難しすぎる? いえいえ、専門的な研究内容などはどうでもいいのです。なんだかよくわからないけど、いっぱい研究して成果を上げ、教育にも情熱を込めて取り組んでいるんだな、と感じ取ってもらえればいいのです。この冊子を手にした方の中で大学受験を控えた高校生の知り合いがいらっしゃる方は、ぜひ手渡していただきたいと思います。

せっかくの報告書も読まれなければ何の役にも立ちません。読んでいただいた方にとっての情報提供の媒体としての役割、そして作成した私たちにとっては「読まれる」「知られる」ことを意識させて今後一年間の研究・教育活動を刺激する役割など、さまざまな役割を背負った年次報告がこれから多くの人の手に渡ることを望みます。

(森弘之 記)

平成 17 年度年次報告編集委員

大橋隆哉 (2005 年度教室主任)

鈴木徹

森弘之

佐々木伸