

## サブグループ活動状況 平成 16 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 (1-6):ニュートリノ物理の現象論、(7):それ以外の研究項目の順序で記述する。

2004年、日本の三つのニュートリノ振動実験が長く待ち望まれていた「振動的振舞い」の実験的証拠を見いだした。これはスーパーカミオカンデによって大気ニュートリノを使って、カムランドによって原子炉ニュートリノを使って、また、K2K (KEK To Kamioka 実験) によって加速器ニュートリノを使って得られたものである。この結果、ニュートリノ振動現象の存在は最早疑う余地のないものとなり、ニュートリノ質量とレプトンフレーバー混合の物理は確固たる土台を得て新しい段階に突入した。

### 1) クォーク・レプトン相補性

素粒子の標準模型において、クォークとレプトンは互いに互いを支え合う構成要素として存在する(アノマリー相殺機構)。また、大統一理論は強い力、弱い力、電磁気力の3力の統一されるエネルギースケールでクォークとレプトンが区別できず、互いに移り変わる世界が出現すると教えている。最近、このクォークとレプトン間の関係を新たな角度から捉え直そうという試み、「クォーク・レプトン相補性」が提唱され注目を集めている(Minakata-Smirnov, Raidal)。これはクォークセクターの1-2角(カビボ角)とレプトンセクターの1-2角(太陽角)との間に存在するカビボ角+太陽角=45度という近似的な経験的關係式を大統一の立場から解釈を与えようというアプローチである。これはクォーク・レプトンの1-2セクター間に非自明な関係が存在し、ここに最大角が潜んでいることを意味しており、大気2-3セクターにある最大角と合わせて、新しい双極大角仮説を強く示唆している。この仮説の意味するものやこのクォーク・レプトン相補性が埋め込まれた統一模型の構築などの様々の方向に向かって活発な研究が始まっている。

### 2) 原子炉ニュートリノ実験による1-2角の精密測定法

2003年に原子炉ニュートリノ実験による1-3角の測定についての新しいアイデアとその意義についての指摘がなされ(南方・杉山・安田・井上・末包)、世界的な原子炉ニュートリノ実験計画ブームの発端となった。今年度はこれに引き続き、原子炉ニュートリノ実験による1-2角の精密測定法に関する研究を行った。例えば、上記のクォーク・レプトン相補性仮説の検証はこのような1-2角の精密測定を必要とする。クォークセクターのカビボ角( $\sin^2 \theta_C$ )が約1%の精度で測定されているのに対して、レプトンセクターの1-2角の測定精度はこの10-20倍程度の大きな誤差をもっている。将来構築されるであろうクォーク・レプトンの統一理論の検証にもこの両セクターの1-2角の同程度の測定精度が必要である。この研究ではニュートリノ振動の第1振動極大を与える距離である柏崎刈羽原発から約60kmの地点にカムランド級の測定器(この設定をSADOと略称)を置いて6年間測定すれば、( $\sin^2 \theta_{12}$ )を約2%の精度で測定可能であることを見いだした。これは図に示されているように、世界最高の感度を達成すると思われていた低エネルギー太陽ニュートリノ測定による方法を凌駕するものである。

(上記課題はブラジル・リオデジャネイロカトリック大学 布川弘志、およびサンパウロ大学 R. Zukanovich-Funchal, W. J. C. Teves 両氏との共同研究)

### 3) 原子炉ニュートリノ振動実験における現象論

原子炉ニュートリノによる $\theta_{13}$ の測定実験は、加速器以外による $\theta_{13}$ の決定方法として注目を集めており、その測定精度がどれだけ良いかは加速器実験と原子炉実験を組み合わせる振動パラメーターの縮退問題を解決する際に重要な要素となる。昨年度の研究ではレート解析による測定精度の限界値を導いた

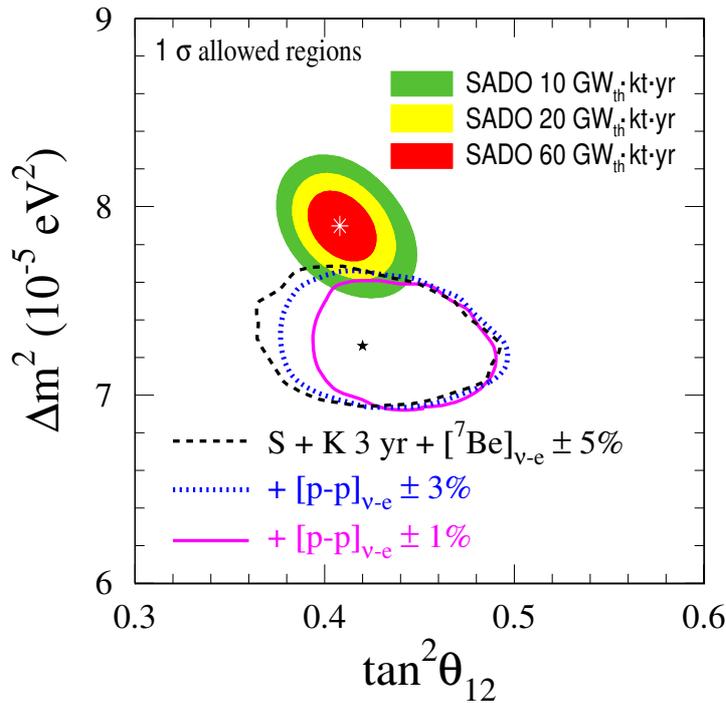


図 1: 原子炉ニュートリノ実験による 1-2 角測定 (SADO: 我々の結果) と低エネルギー太陽ニュートリノ測定による方法 (J. N. Bahcall-C. Peña-Garay 氏による) の感度比較。縦軸はニュートリノの質量二乗差。

が本年度はこの結果をエネルギースペクトルによる解析に拡張した。その結果、 $\sin^2 2\theta_{13}$  の測定精度は測定器固有の系統誤差のうち、エネルギーに依存するものとエネルギーに依存しないものの両方に依存し、エネルギーに依存する系統誤差が非常に小さくならないとレート解析による限界値を大幅に改善することが難しいことがわかった。

#### 4) 長基線加速器実験による (2-3) 角測定

レプトンフレーバー混合行列の (2-3) 角、特にその最大角からのずれは (1-3) 角の小ささと関連して対称性の存在を暗示していて興味もたれている。これを視野において長基線加速器実験による (2-3) 角決定の問題に関する研究を行った。JPARC-SK 長基線加速器実験においてミューニュートリノの消失モードの測定実験によって  $\sin^2 2\theta_{23}$  は 1% の精度で決定可能であると信じられている。にもかかわらず、 $\sin^2 \theta_{23}$  の決定精度は 10-20% 程度にとどまる。この理由を分析し、二つの主要原因を特定した。(1)  $\sin^2 2\theta_{23}$  から  $\sin^2 \theta_{23}$  への変換における Jacobian が最大角付近で大きな値をとること、(2) (2-3) 角にまつわるパラメータ縮退が最大角付近で両 octants の解を混同させ、精度悪化を招く。現在この問題を解決する方法について研究を進めている。

#### 5) ニュートリノ振動における CP・T 非保存の統一像

2 年前の研究で「双確率空間における統一 CP・T ダイアグラム」を導入した。同時にこのダイアグラムのベースボールダイヤモンド型構造を説明する関係式として CP-CP、および T-CP 関係式を導いた。今年度の研究ではこの CP-CP、および T-CP 関係式が等価であることを証明し、ニュートリノ振動における CP・T 非保存の統一的記述を打ち立てた。CP-CP、および T-CP 関係式からの高次補正によるずれの計算も行われた。(上記課題はスエーデンの AlbaNova University Center, Royal Institute of Technology (KTH), Department of Physics, Division of Mathematical Physics から派遣されてきた留学生 Martin Blom 氏との共同研究)

## 6) 高エネルギー宇宙ニュートリノ振動の現象論

活動銀河核等からの高エネルギーニュートリノのフレーバーの比は、新しい物理を探る可能性として近年注目されている。ほとんどの場合、地球で観測される  $\nu_e$ 、 $\nu_\mu$ 、 $\nu_\tau$  のフラックスは等しくなることが知られているが、強い磁場がニュートリノ源付近に存在してかつニュートリノに比較的大きな磁気モーメントがある場合には、 $\nu_e$  とそれ以外のフラックスに有意な差が出る状況が存在することが断熱近似の範囲内で示された。しかし、その議論には断熱近似が正当化できること、特定の磁場のプロフィールを用いていること等々、色々な仮定があり、それらの吟味についての研究を継続中である。

## 7) 超弦理論に基づいた素粒子模型

タイプ II 型の超弦理論において D ブレーンという多次元を占める物体を導入することができる。そして、D ブレーンの占める空間にはゲージ対称性、すなわち力を媒介するゲージ粒子が局在することが知られている。さらに、2 つの D ブレーンの共有する空間（これを我々の 3 次元空間に同定する）に、カイラルフェルミオンが局在することが知られている。

一方、現在の素粒子についての実験事実をよく説明する標準模型は、いくつかのゲージ対称性とカイラルフェルミオンからなっている。しかし、標準模型には、いくつかの問題点があり、特に素粒子の質量やフレーバー混合の起源の問題は最も大きな問題のひとつである。標準模型では、素粒子の質量やフレーバー混合は湯川結合を通じて生成される。したがって、この湯川結合を導くことが今日の素粒子対理学における最も重要な課題の一つである。超弦理論における上記の状況により、タイプ II 型の超弦理論に D ブレーンを導入することによって、標準模型、そして湯川結合を導くことができる可能性がある。このアイデアに基づく素粒子模型を交差 D ブレーン模型という。

前年度に具体的に構成した模型を改良し、より現実的なものにした。この模型は、現在素粒子とされているものを、ほかの新たな素粒子、プレオン、によって構成される複合粒子としたものである。プレオンを束縛して我々の知る素粒子を構成するには強い力を必要とするが、これについては交差 D ブレーン模型の特徴である強い相互作用の導入が可能であることを利用している。素粒子の複合性の導入により、この模型は素粒子の質量を導く非自明な湯川結合を導く可能性を持つものになっている。

交差 D ブレーン模型において非自明な湯川結合を導くことは困難なことである。構成した模型はこの困難を解決したものであるが、素粒子の複合性の導入は大胆すぎる面がある。そこで、どうして普通に素直に模型を構成するとうまくいかないかということについて詳しく調べ、複合性の導入等の工夫を何もしないと現実的な湯川結合を導くことはできないことを証明した。

交差 D ブレーン模型には他にもいくつかの問題点があり、それらをひとつひとつ解決してより現実的な模型の構成を目指すことが今後の課題である。この目標に向けて、各国の研究者がそれぞれ様々な方向から研究を行っている。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

M. Blom and H. Minakata: Unity of CP and T Violation in Neutrino Oscillations, *New Journal of Physics* **6** (2004) 130-1 – 130-2 ("Focus Issue on Neutrino Physics").

N. Kitazawa: Dynamical Generation of Yukawa couplings in Intersecting D-brane Models, *Journal of High Energy Physics* **11** (2004) 044.

N. Kitazawa: Supersymmetric Composite Models on Intersecting D-branes, *Nuclear Physics* **B699** (2004) 124-134.

H. Minakata and A. Yu Smirnov: Neutrino Mixing and Quark-Lepton Complementarity, Physical Review D70 (2004) 073009-1-12.

H. Minakata, M. Sonoyama, and H. Sugiyama: Determination of  $\theta_{23}$  in Long-Baseline Neutrino Oscillation Experiments with Three-Flavor Mixing Effects, Physical Review D70 (2004) 113012-1-13.

H. Minakata, H. Nunokawa, W. J. C. Teves and R. Zukanovich Funchal: Reactor Measurement of  $\theta_{12}$ ; Principles, Accuracies and Physics Potentials, Physical Review D71 (2005) 013005-1-17.

O. Yasuda: New plots and parameter degeneracies in neutrino oscillations, New Journal of Physics **6** (2004) 83-1 – 83-27 ("Focus Issue on Neutrino Physics").

T.Kamijo, O.Yasuda, Y.Chikashige, T.Kon, Y.Takeoka, R.Yoshida: Salt neutrino detector for ultrahigh-energy neutrinos, Physics of Atomic Nuclei **67** (2004) 2050 – 2053.

## 2) 国際会議報告

N. Kitazawa: Dynamical Generation of Yukawa Couplings in Intersecting D-brane Models, Talk given at 12th International Conference on Supersymmetry and Unification of Fundamental Interactions (SUSY 04), Tsukuba, Japan, 17-23 Jun 2004, KEK-Proceedings 2004-02, 861-864.

H. Minakata, Toward exploring unknowns in the lepton flavor mixing, Talk given at Hujihara Seminar; Neutrino Mass and Seesaw Mechanism, KEK, Japan, February 23-25, 2004., published in Nuclear Physics Proceedings Supplement **137** (2004) 74.

H. Minakata: Overview of degeneracies, Talk at Fifth International Workshop on Neutrino Factories and Superbeams, Columbia University, New York, June 5-11, 2003, published in AIP Conference Proceedings **721** (2004) 206-210.

H. Minakata: New views on the problem of CP violation, Talk given at Second International Workshop on Neutrino Oscillations in Vanice, Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Venice, Italy, December 3-5, 2003, published in *Venice 2003, Neutrino oscillations* pp. 303-320.

H. Minakata, H. Nunokawa and S. J. Parke: Long baseline neutrino oscillations: Parameter degeneracies and JHF / NUMI complementarity, Proceedings of 4th Workshop on Neutrino Oscillations And Their Origin (World Scientific, Singapore, 2004, eds Y Suzuki, M Nakahata, Y Itow, M Shiozawa and Y Obayashi) pp.196-201.

O. Yasuda: Parameter degeneracy and reactor experiments, Proceedings of 4th Workshop on Neutrino Oscillations And Their Origin (World Scientific, Singapore, 2004, eds Y Suzuki, M Nakahata, Y Itow, M Shiozawa and Y Obayashi) p 208 – 215.

O. Yasuda: Measurement of  $\theta_{13}$  by reactor experiments, AIP Conference Proceedings **721** (2004) 190 – 193.

O. Yasuda: Measurement of  $\sin^2 2\theta_{13}$  by reactor experiments and its sensitivity, Proceedings of the 32nd Coral Gables Conference (World Scientific, Singapore, 2005, eds T. Curtright, A. Perlmutter and S. Mintz) (2005) p 273 – 280.

O. Yasuda: Parameter degeneracies and new plots in neutrino oscillations, presented at 21st International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2004), Paris, France, 14-19 Jun 2004, published in Nuclear Physics Proceedings Supplement **143** (2005) 528.

### 3) 学会講演

日本物理学会第 59 回年次大会 2004 年 3 月 27 日～3 月 30 日 (九州大学)

南方久和：ダブル  $\beta$  崩壊とニュートリノ (実験・理論核物理合同シンポジウム講演)

杉山弘晃, 安田修, 末包文彦, G.A. Horton-Smith: 原子炉ニュートリノを用いた 1-3 角測定精度の評価および複数の原子炉を用いた場合の影響

日本物理学会秋季大会 2004 年 9 月 27 日～9 月 30 日 (高知大学)

安田修：新しいプロットによるニュートリノ振動におけるパラメーター縮退の議論

### 国内研究会

第 4 回研究会理化学研究所集中セミナー「String Phenomenology」：2004 年 5 月 17 日 (理化学研究所)

北澤敬章：Dynamical Generation of Yukawa Couplings in Intersecting D-brane Models

三重冬の学校：2005 年 3 月 12 日～3 月 14 日

北澤敬章：Intersecting D-brane について—D-brane 入門から最近の話題まで—

基礎物理学研究所研究会 2004 「素粒子物理学の進展」:

2004 年 6 月 29 日～7 月 2 日 (基礎物理学研究所)

北澤敬章：Intersecting D-brane Models – review –

KEK 理論研究会 2005 「素粒子物理の現状と展望」 2005 年 3 月 3 日～3 月 5 日:

(高エネルギー加速器研究機構)

北澤敬章：Introduction to Intersecting D-brane Models

### 国際会議

21st International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino2004),  
College de France, Paris, June 13 – 19, 2004

O. Yasuda: Parameter degeneracies and new plots in neutrino oscillations (Poster).

Third International School on the Neutrino Factories and Superbeams,

Tokyo Metropolitan University, Japan, July 16-24, 2004

H. Minakata: Phenomenology of Long Baseline Experiments (Invited lecture).

6th International Workshop on Neutrino Factories and Superbeams(NuFact 04),

Osaka University, Osaka, July 26 – August 1, 2004

O. Yasuda: Degeneracy and strategies of long baseline and reactor experiments (Invited talk).

Neutrino Oscillation Workshop (NOW2004), Conca Specchiulla, Otranto, Italy,

September 11-17, 2004

H. Minakata, H. Nunokawa, W. J. C. Teves and R. Zukanovich Funchal:  
Reactor Measurement of  $\theta_{12}$ ; Secret of the Power.

A Topical Conference on Elementary Particle Physics and Cosmology,  
Sonesta Beach Resort Key Biscayne, Florida, USA, December 15 – 19, 2004

O. Yasuda: Parameter degeneracy and strategies of future long baseline neutrino experiments (Invited talk).

XI International Workshop on Neutrino Telescopes, Istituto Veneto di Scienze,  
Lettere ed Arti, Venice, Italy, February 22-25, 2005

H. Minakata: Neutrino Mixing and Quark-Lepton Complementarity (Invited talk).

# 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 2004 was concentrated on two scientific projects.

(a) The first project is an investigation and derivation of the D-instanton corrections to the quantum moduli space metric of several matter hypermultiplets, in the type-IIA superstring compactification on Calabi-Yau threefolds. This is a highly advanced area of modern research in superstring theory that uses contemporary mathematical tools of topology and complex differential geometry. This part of our research was supported by the JSPS grant # 15540282 during the year 2004.

We calculated some non-perturbative (D-instanton) quantum corrections to the moduli space metric of several identical matter hypermultiplets for the type-IIA superstrings compactified on a Calabi-Yau threefold, near conifold singularities. We find a non-trivial deformation of the (real)  $4n$ -dimensional hypermultiplet moduli space metric due to the infinite number of D-instantons, under the assumption of  $n$  tri-holomorphic commuting isometries of the metric, in the hyper-Kähler limit (i.e. in the absence of gravitational corrections).

(b) Our second research project deals with the non-anticommutative supersymmetric field theory. We studied the equations of motion in the four-dimensional non-anticommutative  $N=2$  supersymmetric abelian  $U(1)$  gauge field theory, in the search for BPS configurations. We found the BPS-like equations generalizing the abelian (anti)self-duality conditions. We proved full solvability of our BPS-like equations, as well their consistency with the equations of motion. Certain restrictions on the allowed scalar field values were also found. We also derived the component Lagrangian of the non-abelian four-dimensional non-anticommutative (with a singlet deformation parameter) and fully  $N=2$  supersymmetric gauge field theory with the simple gauge group  $SU(2)$ . The deformed (classical) scalar potential was found to be unbounded from below, in contrast to the undeformed case. Next, we 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-abelian and non-simple gauge group  $U(2)=SU(2)\times U(1)$ . We used a Lorentz-singlet deformation parameter and an  $N=2$  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 calculated. We also proposed the non-abelian BPS-type equations in the case of the deformed  $N=2$  gauge theory with the  $SU(2)$  gauge group. 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

S.V. Ketov, O.P. Santillan and A.G. Zorin, D-instanton sums for matter hypermultiplets, *Mod.Phys.Lett. A19* (2004) 2645–2653

S.V. Ketov and S. Sasaki, BPS-type equations in the non-anticommutative  $N=2$  supersymmetric  $U(1)$  gauge theory, *Phys.Lett. B595* (2004) 530-536

S.V. Ketov and S. Sasaki, Non-anticommutative N=2 supersymmetric SU(2) gauge theory, Phys.Lett. B597 (2004) 105–111

## 2) 国際会議報告

S. V. Ketov: More on Goldstino action, 12th International Conference on Supersymmetry and Unification of Fundamental Interactions, 17–23 June, 2004, Tsukuba, Japan; appeared in the KEK Proceedings; p. 883–886 (December 2004).

## 3) 学会講演

### 国際会議

12th International Conference on Supersymmetry and Unification of Fundamental Interactions, 17–23 June, 2004, Tsukuba, Japan

S. V. Ketov: More on Goldstino action (invited)

# 原子核理論サブグループ

## 1. 研究活動の概要

本サブグループでは、強い相互作用をする多体系である原子核・ハドロンや、現在急速に研究が発展しているポテンシャルに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(中性子星中心部などが候補である)。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る。これがカラー超伝導と呼ばれている物質相である。比較的低密度のクォーク物質ではクォーク間の引力が強く、ダイクォークは粒子性を強く持ちボース粒子としてふるまう。BEC-BCS crossover 理論によれば、ここではカラー超伝導相はダイクォークのボース・アインシュタイン凝縮相(BEC)として記述される。我々は、BEC理論の相対論的定式化・解析をおこない、非相対論BECにはない新しい性質を証明した。クォーク・ダイクォーク系を準化学平衡理論により扱うことにより、ダイクォーク・ボース・アインシュタイン凝縮の理論を発展させた。結果を発表する準備中である。

### 2) 非可積分系における波動関数の結節領域分布

原子核など多体系のスペクトルでは低励起から高励起状態へ移行するに伴い、エネルギー準位統計が可積分的なポアソン分布からカオス的なウィグナー分布へと変化する。一方、対応する波動関数の変化に関してはまだ十分には知られていない。しかし最近の研究で、波動関数の結節領域(Nodal Domain)分布が可積分系とカオス系では異なるユニバーサリティクラスに属することが示唆された。そこで我々は、両極限間の移行を記述できる二次元非調和振動子模型を用い、一般の非可積分的条件における結節領域(Nodal Domain)分布を調べた。その結果、当初の予想に反して可積分からカオス系への変化は単調ではなく、非可積分性が加わった段階で極端な変化が発生すること、古典的な運動が許される波動関数の中心部分と、非古典的領域に接続する周辺部分では結節領域が異なるふるまいをすること、前者の領域面積の分布はパーコレーション模型によるスケールリング則に従うこと、などが示された。

### 3) 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実験系を提供しており、とくに Feshbach 共鳴を利用して粒子間相互作用を調節できるなど、操作性にも優れている。本研究室では、とりわけ異種の統計性をもつ粒子の混合系(ボース・フェルミ混合系)の種々の性質を、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散乱と対形成

昨年に引き続き、一様BF混合系におけるBF二体散乱方程式の解とそれに基づくBF対の形成過程を調べた。フェルミ系と同様、BF二体系が束縛しない場合でも、「クーパー対」を形成した方がエネルギー利得が生じるが、この対が複合フェルミ粒子であるため、BCSの場合と異なり対凝縮は起こらない。二体グリーン関数のスペクトル表示を利用して得られた一粒子状態の占有確率は、新たなフェルミ面形成を示唆することが示された。以上の結果を論文にまとめ投稿した。

#### b) 極低温原子気体における分子形成と量子質量作用則

極低温原子気体における分子形成の問題を量子効果を含む化学平衡理論により扱うことは、我々が最初

に議論し量子質量作用則と呼んだ。最近になって分子形成の実験的研究が盛んに行われるようになり、この研究の意義は非常に大きなものとなっている。我々は量子質量作用則の発展として、原子間相互作用・有限閉じこめポテンシャルの効果を数値的・解析的に研究した。結果は部分的に国際会議等で発表した。

#### c) 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

ボース・フェルミ混合系において、ボゾンとフェルミオンから形成される 2 体クラスター（複合フェルミオン）と 2 体クラスター 2 個による 4 体クラスター（複合ボゾン）形成の温度依存性を、化学平衡の条件により調べた。束縛エネルギーをパラメタとして与え、特に低温領域で様々な相の発現を見た。

#### d) フェルミオンを含む 2 成分原子気体の回転現象の理論的研究

極低温原子気体系において、ボゾン-フェルミオン混在系と 2 成分フェルミオン系の回転現象を理論的に研究した。回転したボース凝縮体は量子渦を形成し、密度分布の急激な変化を引き起こすことにより、フェルミオンに影響を与え（量子竜巻効果）、新たな形式の相分離を引き起こす。また回転による球対称性の破れは、斥力においては相分離の構造を変化させ（原子泡崩壊）、引力においては準安定状態や崩壊現象に影響を与える（回転したスーパー・ボースノヴァ）。さらに対状態においては、その秩序変数が量子渦を有することにより、密度分布等が著しく変化する。

#### e) 擬一次元ボース・フェルミ混合系の不安定性と相構造

擬一次元ボース・フェルミ混合系の研究を進展させ、フェルミ原子が 2 成分存在する場合の密度波状態を理論的に研究した。2 成分の密度波がある場合に対する consistent な平均場近似の方法を開発・提唱した。この方法を用いて、荷電密度波およびスピン密度波状態の解析をおこない、相構造を決定した。

#### f) ボース・フェルミ混合気体の単極子振動の時間発展

原子気体の観測される振動運動は大振幅の振動運動であり、RPA 理論の妥当性は必ずしも保証されない。昨年引き続き、ボース・フェルミ混合気体の単極子振動を例にとって、時間依存 Gross-Pitaevskii・Vlasov 方程式を連立させて解き、その振動の非調和性や減衰効果の分析を整理し、論文にまとめて投稿した。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

T.Maruyama, H.Yabu and T.Suzuki: Resonant Monopole Oscillations in the Bose-Fermi Mixed System, *Laser Physics* **15** (2005) 656.

H. Yabu, Y.Takayama, T.Suzuki and P.Schuck: Atomic Bose-Fermi mixed condensates with Boson-Fermion quasi-bound cluster states, *Nucl. Phys.* **A738** (2004) 273-277.

T.Miyakawa, H.Yabu and T.Suzuki: Peierls instability, periodic Bose-Einstein condensates and density waves in quasi-one-dimensional Bboson-fermion mixtures of atomic gases, *Phys. Rev.* **A70** (2004) 013612.

H.Yabu: Many Positron and Positronium Interactions, *Nucl. Inst. Meth. Phys. Res.* **A221** (2004) 144-148.

T. Tatsumi, T. Maruyama and E. Nakano: Coexistence of ferromagnetism and color superconductivity -Color Magnetic Superconductivity-, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **153** (2004) 198-203.

## 2) 学会講演

日本物理学会第 58 回年次大会 2004 年 3 月 27-30 日 (九州大学箱崎キャンパス)

相場浩和、鈴木徹：Nodal Domain Statistics for a Quantum Irregular Oscillator

仲野英司、巽敏隆：カイラル密度波とカレント質量の効果

日本物理学会 2004 年秋季大会 2004 年 9 月 27-30 日 (高知大学朝倉キャンパス)

A.Strozhenko,P.Schuck、鈴木徹、藪博之、J.Dukelsky：Boson-Fermion Cooper Pairing in a Boson-Fermion Environment

基研研究会「熱場の量子論とその応用」 2004 年 8 月 9 日-11 日 (京都大学基礎物理学研究所)

西村拓史、藪博之：閉じ込められた 2 成分 Fermi 原子気体の渦励起

藪 博之：有限温度における量子質量作用則と原子気体における分子原子平衡状態

基研研究会「場の量子論の基礎的諸問題と応用」

2004 年 12 月 16 日-18 日 (京都大学基礎物理学研究所)

藪博之：原子気体における分子原子平衡状態と量子質量作用則

鈴木徹：ボース・フェルミ縮退系の可解なモデルと複合フェルミ系へのクロスオーバー転移

仲野 英司、藪 博之：擬一次元ボース・フェルミ (2 成分) 混合系における密度波

IPNO セミナー 2005 年 3 月 2 日 (Institut de Physique Nucleaire Orsay, France)

西村拓史:Rotational phenomena of Bose-Fermi mixed gases and two-component Fermi gases of trapped atoms

## 国際会議

RIKEN Int. Workshop on Physics at RHIC and Related Topics,

Riken, Saitama, Japan, Dec.6-7, 2004

H. Yabu: Topics on Boson-Fermion mixture in ultra-cold atomic gas (Invited)

CNS Int. Workshop on Interdisciplinary development of Shell Model,

Riken(CNS), Saitama, Japan, Mar. 3-5, 2005

H. Yabu: Topics of boson-fermion mixed atomic gas as finite quantum many-body system (Invited)

# 宇宙理論サブグループ

## 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、2004年度に行った主な研究の概要である。

### 1) ブラックホール降着ガスの安定性と輻射輸送

グレーティングを用いた観測によって、コンパクト天体の連星系からディスク起源と考えられる Fe や Ni の吸収線が多数見つかるようになってきた。それらが軌道運動面を edge-on で見る連星系であることから、disk-fed システムに共通する降着ガスの構造を反映しているものと考えられ、吸収スペクトルを形成する領域は降着ディスクの不安定性やディスクからの質量放出にも関係していることが期待される。降着ガスの熱的不安定の解析とともに、non-LTE 輻射輸送など、吸収線を定量的に解析するための基礎となるスペクトル形成の物理過程について研究を行った。

### 2) 線バースト/アフターグローの重元素スペクトル

ホスト銀河の星生成活動や、未だ3例ではあるが超新星との直接的な相関などから、線バーストは大質量星の爆発に関係した現象であると考えられている。その場合の関心の一つは重元素スペクトルの検出であり、例えば鉄の検出は線バーストと爆発の時間差や超新星とコラプサの差異を探る手がかりとなることが期待される。Si から Ni に至る重元素のスペクトルは、これまでにアフターグローから 7-10 例、プロンプトから 2 例が報告されているが何れも不確定性が大きい。また、SN1998bw をテンプレートにした超新星成分の超過が見られるイベントは 10 例あまりあるが、その何れも重元素スペクトルは報告されていない。これまでの報告を見直すとともに、Si あるいは Fe のスペクトルが観測される可能性について爆発モデルの検討を行った。

### 3) 銀河団の進化とガスの熱的進化

銀河団ガスの分布は、 $r < 0.1r_{vir}$  ( $r_{vir}$  はビリアル半径) では放射冷却の影響を受けて銀河団形成時(コラプサ)の自己相似的な分布からずれ、力学平衡に向かってコア半径が小さくなると考えられる。これを確かめるため、銀河団の観測的研究で標準的に用いられてきた  $\beta$ -モデルを再考察するとともに、ROSAT, ASCA で観測された銀河団について、構造の自己相似性、cD 銀河や放射冷却の影響など、観測結果をさまざまな観点から系統的に分析し直して、コアの構造と進化、とくに小さなコアの起源について議論した。また、3次元流体計算で  $\beta$ -モデルをシミュレートすることにより、われわれの考察が理論的にも裏付けられることを示した。

一方で、標準的クーリングフローモデルの予想に反し、ガス温度は放射冷却の効く中心部でも冷却が効いていない周囲の領域の  $\sim 1/3$  程度までしか下がっていないことが観測的に指摘されている。この結果を ROSAT, ASCA で観測された銀河団の系統的な解析から確認するとともに、 $L_X - T$  関係 ( $L_X, T$  は各々、X線光度、ガス温度) について、ガスの冷却、merger など、銀河団の進化との関連を議論した。また、標準的クーリングフローモデルに代わるモデルとして、ガスは準静水圧平衡を保ちながら放射冷却するという解析的なモデルを提案した。

### 4) 中高温銀河間ガスの検出可能性

宇宙に存在するバリオンの総量は宇宙背景放射の非等方性の観測や、ビッグバン元素合成の理論などにより精度よく評価することができる。しかし、現在、それらのバリオンの全てが観測されているわけで

はなく、星や銀河団中の高温ガスとして観測されているバリオンの量は、推定されている総量の半分以下でしかない。残りのバリオンの多くは中高温のガスとして銀河間に存在していると考えられている。その検出可能性に関して議論をした。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

K. Masai and M. Ishida: Non-LTE Curves of Growth of X-Ray Absorption Lines, *Astrophys. J.* **607** (2004) 76-83.

K. Masai and T. Kitayama: Quasi-Hydrostatic Intracluster Gas under Radiative Cooling, *Astron. Astrophys.* **421** (2004) 815-819.

K. Yoshikawa, D. Klaus, Y. Suto, S. Sasaki, N. Yamasaki, T. Ohashi, K. Mitsuda, Y. Tawara, R. Fujimoto, T. Furusho, A. Furuzawa, M. Ishida, Y. Ishisaki, Y. Takei: Locating The Warm-Hot Intergalactic Medium in The Simulated Local Universe, *Publ. Astron. Soc. Japan* **56** (2004) 939-957.

### 2) 学会講演

日本天文学会 2004 年秋季年会, 2004 年 9 月 21 日-23 日 (岩手大学)

政井邦昭: 銀河団ガスの放射冷却と温度プロファイル (企画セッション講演)

赤堀卓也, 政井邦昭: 銀河団ガスのコア構造: 等温力学平衡解

太田直美, 政井邦昭, 北山哲: Relaxed cluster の  $L_X - T$  関係と  $\beta$  モデル

### 国際会議

The Future of Cosmology with Clusters of Galaxies, Hawaii (USA), February 26 - March 2, 2005

S. Sasaki: Searching for missing baryons with DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor)

### ワークショップ・研究会

21COE Workshop: Inside Compact Objects, Waseda University, November 25, 2004

K. Masai: Strongly Magnetized Compact Objects and QED Processes (invited talk)

ガンマ線バースト 2004, 2004 年 12 月 10 日-11 日 (京都大学)

政井邦昭: GRB afterglow 中の輝線

Astro-E2 でひらく X 線分光天文学, 2005 年 3 月 18 日-19 日 (京都テルサ)

政井邦昭: diffuse X 線源の超熱的電子分布

# 流体物理サブグループ

## 1. 研究活動の概要

本サブグループは、均質な Newton 流体、サスペンションなどの多相系流体、血液などの生物流体の運動を理解すると同時に、これら複雑な流体の力学物性を理論的に調べ、力学物性とその流動特性の関係を明らかにすることに興味を持って研究を行っている。本年度は固体粒子が均質な液体中に分散してできるサスペンションの流動特性に焦点をあてた。

### 1) ソフトパーティクル希薄サスペンションの粘性率

赤血球など生体中で見られる種々の細胞や生体膜で覆われた微粒子、高分子鎖を吸着した微粒子、マイクロゲル粒子、ゲル状物質で表面をコーティングした微粒子は剛体粒子に対比してソフトパーティクルと総称される。これら微粒子は自然界に多く存在するばかりでなく、工業材や食品・薬品材として使用され、加工工程においてはサスペンションの状態で行われている。剛体球粒子に吸着した高分子鎖を球粒子の周囲に均一に分布する多数のセグメントで置き換えたモデルを用い、この粒子が一定のずり速度場におかれた場合に生ずる速度場の変化を Darcy-Stokes 方程式を解くことによって求めた。Darcy-Stokes 方程式の一般解は Lamb の方法を拡張して球体調和関数を用いて初めて導かれた。見かけの粘性率は歪み速度テンソルの体積平均に対する応力テンソルの体積平均の比として求められる。計算の結果この見かけの粘性率に及ぼす二つのパラメータ、すなわち吸着高分子の平均的長さ $l$ と高分子鎖の密度 $\rho$ の効果が定量的に求められた。この研究では希薄なサスペンションを取り扱ったが、現実の系の結果と比較するためにはより濃厚な系へと理論の拡張が必要とされる。

### 2) サスペンションの粘性率に及ぼす Reynolds 数の効果

サスペンションの見かけの粘性率は一定ずり流動場におかれた分散粒子による流れの乱れを求めることによって得られるが、Einstein の粘度式をはじめとしてこれまでに理論的に考慮されたサスペンションの粘性率は Reynolds 数が 0 の Stokes 方程式を基に得られたものである。しかし、現実の粘性率測定においては、特に非 Newton 流体に対しては高ずり速度が採用され、有限の Reynolds 数の効果を考慮する必要がある。しかしこれまでにサスペンションの見かけの粘性率に及ぼす慣性の効果を考慮した研究の報告はない。本研究では特異漸近摂動法を採用して Reynolds 数の効果を取り入れることを目指した。そのためには無限遠で一定のずり速度場を与える Oseen 方程式を解く必要がある。本年度はこの偏微分方程式を解く方法の模索に終わり、結果は次年度に持ち越された。

## 2. 研究業績

### 1) 学会講演

第 27 回日本バイオレオロジー学会年会 2004 年 6 月 10 日-6 月 11 日 (東京医科歯科大学)

村田忠義：毛細血管内血流におよぼす赤血球表面および管壁内面上の負電荷の影響

# 非線形物理サブグループ

## 1. 研究活動の概要

### 1) 馬蹄極限における量子エノン写像のストークス幾何学

対応する写像が馬蹄極限 (horseshoe limit) にある量子エノン写像のストークス幾何学を考察した。馬蹄極限にある場合、実軸上に存在する通常の転回点 (写像の Lagrangian 多様体の折れ曲がり点に対応する) は、比較的単純な構造ルールにしたがって現れ、このことを利用して一般のステップ数におけるストークスグラフの振る舞いの一般側を導いた。また、対応する古典写像は、馬蹄条件を満足する領域では構造安定性をもつが、対応するストークスグラフにおいても、同じ領域においてグラフの分岐が起こらないことから、ストークス幾何学に関しても類似の構造安定性が成立している可能性が示された。また、ストークスグラフの分岐のパターンについての分類を行った。

### 2) 強レーザー場中の原子のイオン化過程の半古典解析

研究目的は強レーザー場中の原子の2つのイオン化過程、トンネルイオン化とカオスのイオン化、のクロスオーバーの機構を半古典論の立場から説明することである。前者の過程はケルディッシュ型理論により説明されるが、この理論は電子の古典力学がカオスであることを明示的に取り込むことができない。そこでカオスとイオン化機構とが本質的に結びついているカオスのイオン化をも記述できる理論を得ることを目指した。成果は以下である (1) 上記2種類のイオン化を実現するモデルを構築し、散乱行列を複素古典軌道の寄与の和で表す半古典表式を得た。これにより古典力学のカオスが散乱行列に明示的に関係付けられた。(2) ケルディッシュ型理論における散乱行列への主要な寄与をもたらすファインマン経路 (量子軌道) は、我々のモデルにおける特別な複素古典軌道と解釈される。このことにより、2種類のイオン化過程を明確に区別でき、量子軌道の振舞いを非線形力学の立場から議論できるようになった。以上により、我々は2種類のイオン化のクロスオーバーを解析するための半古典論的手段を得た。

### 3) 多角形撞球問題における境界要素法の開発

量子撞球系のエネルギースペクトルを数値的に求める手法のひとつとして、ヘルムホルツ方程式の固有値問題を積分方程式に書き換え、これを離散化して解く境界要素法がある。撞球台が滑らかな境界を持つ場合、境界要素法はフレドホルム理論により厳密に正当化されるが、撞球台が角を持つとき、対応する積分方程式は特異となり、境界要素法はその基礎付けを失う。この問題に対し、我々は、通常境界要素法を角のある撞球系に適用する場合の問題点を詳らかにした上で、角がある撞球台に対しても特異とならない積分方程式を導出し、これを離散化して解く、改良された境界要素法を提案した。

### 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力学

過冷却状態、ガラス転移の問題は統計力学の古くからの難問のひとつであり、これまでに実験、理論ともに多くの蓄積があるにもかかわらず、基本的問題のいくつかは未だ解決されないままにある。とくに、力学系の問題としてガラス転移をどう捉えるべきか? という問いに関して十分な答えが得られているとは言い難い。本年度は、ガラス転移的な振る舞いを示す剛体球モデルについてその詳しい解析を開始した。剛体球モデルは、双曲構造をもちベルヌーイ性をもつにも関わらず、ガラス転移的な振る舞いを示す。さらに、引力をもつ toy model として最近注目されている、2成分レナード・ジョーンズモデルの数値シミュレーションの準備を進めた。

## 5) 区分線形写像の pruning front

2次元の区分線形写像 (saw tooth map) の pruning front についての考察を行った。saw tooth map における記号力学系は、摂動の強さに応じた  $\lambda$ -進数によって表現され、それをもとに形式的に pruning の条件を書き下すことができる。数値計算により、条件式から得られる pruning front を描き、その境界がフラクタルになることを確かめた。

## 6) コヒーレント状態経路積分法による、量子摂動猫写像の半古典解析

本課題で目指すところは、報告者によって以前提案された、カオス的な量子力学の誘発する絡み合いと干渉破壊に関して、複素半古典論の言葉で表現された、Stokes 現象を利用した、新しいシナリオの検証である。これまでの研究から、強いカオス系での焦点配置がカオス系の引き伸ばし力学に、弱い非線型性が加わることで理解できることが示唆されていた。このことを、より一般の場合で確認するため、摂動を受けた Arnold 猫写像の数値実験で焦点の配置を観察した。実の古典論において摂動が小さい場合、既存の強カオス系でのシナリオ、すなわち、Gauss 波束近似的な描像で理解できる、確率振幅の不安定方向への”へばり付き”と、それに直交した方向から、焦点が刺さる様子を確認した。また、焦点の配列が秩序的であることを見いだした。

## 7) 連続スペクトルを持つ量子写像系での、束縛状態からの解離の非摂動論的抑制

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、一般に連続状態に関する truncation の問題がつかまとう。Rzasweski and Mostowski はこの問題を克服する量子写像系を提案した。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が報告されている。我々の、RM 写像での解離の抑制機構を明らかにするための数値実験から以下が示唆される: (1) 束縛-連続状態間の結合について、線形応答的な、低次の摂動論の破綻と、解離抑制の発現が相関する; (2) 特定の条件下で、完全かつ非自明な束縛状態が実現することを数値的に見いだした。これらの結果に対する理論構築は今後の課題である。特に、時間発展の議論と相補的なスペクトルの解析が進行中である。(酒井道宏氏の卒業研究課題、および、宮本学氏 (早大理工) との共同研究)

## 2. 研究業績

### 1) 論文

R. Hagiwara and A. Shudo: An algorithm to prune the area-preserving Hénon map, *J. Phys. A* **37** (2004) 10521-10543.

R. Hagiwara and A. Shudo: Grammatical complexity for two-dimensional maps, *J. Phys. A* **37** (2004) 10545-10559.

Y. Okada, A. Shudo, S. Tasaki and T. Harayama: 'Can one hear the shape of a drum?': revisited, *J. Phys. A* **38** (2005) L163-L170.

A. Shudo and S. Saito: Slow relaxation in Hamiltonian systems with internal degrees of freedom, *Adv. Chem. Phys.* **130** (2005) 375-421.

T. Aoki, T. Kawai, S. Sasaki, A. Shudo and Y. Takei: Virtual turning points and bifurcation of Stokes curves for higher order ordinary differential equations, *J. Phys. A* **38** (2005) 3317-3336.

## 2) 学会講演

日本物理学会第 59 回年次大会 2004 年 3 月 27 日–30 日 (九州大学箱崎キャンパス)

城本 理恵, 首藤 啓, 池田 研介: エノン写像系における不変集合と複素半古典論

### 国内研究会

早稲田コンファレンス「カオスとその周辺」2004 年 11 月 11–12 日 (早稲田大学理工学部)

首藤 啓: 量子カオスとストークス幾何学

数理解析研究所研究会「線型微分方程式の変形と仮想的変わり点」2005 年 3 月 6–9 日  
(京都大学数理解析研究所)

首藤 啓: Roles of new Stokes curves in chaotic systems

### 国際会議

The 5th APCTP focus program “Quantum Chaos and its Application to Mesoscopic Physics”,  
POSTECH, Korea, June 14–26, 2004

A. Shudo: Julia set and chaotic tunneling (invited)

RIMS workshop: “Recent Trends in Exponential Asymptotics”, RIMS, Kyoto University,  
June 28–July 2, 2004

A. Shudo: Stokes geometry for the quantized Hénon map (invited)

New Frontiers in Quantum Mechanics — PT-symmetry, Exact WKB and Quasi-Exact Solvability —,  
Shizuoka, July 5–8, 2004

A. Shudo : Stokes geometry for the quantized Hénon map (invited)

RIMS workshop “Microlocal Analysis and Related Topics”, RIMS, Kyoto University, Oct. 25–29, 2004

A. Shudo: Stokes geometry and connection formula in anti-integrable Henon map (invited)

ATR workshop on Quantum Chaos, ATR, Kyoto, Dec. 6–7, 2004

A. Shudo: Amphibious invariant measure in complex phase space (invited)

Atushi Tanaka: Weak values and quantum-classical correspondence (invited)

Workshop on “Chaos and Nonlinear Dynamics in Quantum-Mechanical and Macroscopic Systems”,  
YITP, Kyoto University, Dec. 8–10, 2004

A. Shudo: Stokes geometry for chaotic systems (invited)

Atushi Tanaka: Weak values and quantum-classical correspondence

International Symposium on Atoms, Molecules, and Clusters in Intense Laser Fields 2,  
Tokyo University, Jan 24–25, 2005

T. Onishi: Semiclassical Study on Tunneling processes via Complex-Domain Chaos

# 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、計算物理的な手法に重点を置いて、凝縮系物理の理論的研究を行っている。2004年度における研究活動の概要は次の通りである。

### 1) 非平衡マルコフ過程に対する reweighting 法の提案

モンテカルロ法は統計物理学における多体問題を取り扱う標準的な手法として確立している。しかし、臨界点近傍において平衡化するのに時間がかかる問題等において困難点があり、それを克服する方法論的な開発が重要である。最近、新しいアルゴリズムの提案がなされて成功を収めているが、その多くは平衡系を対象とするモンテカルロアルゴリズムであり、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おいて用いられる reweighting 法を非平衡系に拡張することを提案した。reweighting 法のアイデアは、1つの温度によるシミュレーションの結果を用いてボルツマン重みを付け替えることにより、他の温度の情報を得ることにある。それを統計学で用いられる Sequential Importance Sampling 法の考え方を用いて、非平衡系に reweighting を拡張した。まず、2次元イジングモデルの転移点近傍における非平衡緩和の問題にこの新しい方法を適用した。サイズが  $64 \times 64$  の系を秩序状態からスタートして、転移点近傍の温度  $T/J = 2.270$  に急冷したときの磁化の緩和のふるまいを図1に示す。ここで  $J$  は交換相互作用の大きさである。実際のシミュレーションは  $T/J = 2.270$  で行っているが、上から  $T/J = 2.268, 2.269, 2.270, 2.271, 2.272$  における緩和のふるまいを計算してある。それぞれの温度における直接的な計算結果と統計誤差範囲で一致している。多くの温度における情報が一度に得られることになり、計算の効率が格段に向上する。この方法を平衡相転移を示す系への非平衡緩和だけでなく、さらに本質的に非平衡である driven diffusive lattice 系の相転移にも適用した。有限サイズスケーリングと組み合わせることにより、臨界点、臨界指数の評価ができる。

### 2) 磁化反転の長い時間スケールの計算

準安定状態は興味ある研究対象であるが、安定状態への遷移は時間のスケールが長く、数値的に調べようとすると、多くの困難に遭遇する。非常に長い時間の後に自由エネルギー障壁を越すことができる。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その例であり、これは磁気記憶装置の設計とも関連する問題である。このようなスピン系の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で記述されるが、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。厳密にという意味は、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、近似的な時間発展方程式を Mathematica を用いた数式処理により解いた。2次元イジングモデル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。我々の方法は数式処理を用いているので、任意の時間まで同じ精度の時間発展方程式の解が得られることが利点である。

### 3) 次近接相互作用により連続スピンモデルに誘起されるイジング的相転移

2つ以上の相互作用が競合する系は、新しい秩序の出現の可能性があるが、その相転移が興味をもたれている。ここでは、強磁性的最近接相互作用 ( $J_1$ ) と反強磁性的次近接相互作用 ( $J_2$ ) をもつ正方格子上的 XY モデルを扱う。このモデルは、 $J_2/J_1 < 0.5$  では、基底状態は単純に全てのスピンの強磁性的にそろえる。一方  $J_2/J_1 > 0.5$  では次近接相互作用の動きが強く、基底状態は2つの副格子に分けて考えられる。それぞれの副格子内ではスピンの反強磁性的に並び、一方の副格子内のスピンをグローバルに回転させても全系のエネルギーは変化しない。しかし、熱揺らぎなどによる素励起も考慮すると2つの相対角度

が優先的に実現することが指摘されている。x 軸または y 軸方向に交互にそろった collinear 相が実現するが、その相への Ising 的な転移が起こる。通常は無秩序性を増加させるゆらぎの効果が逆に秩序化を誘起する。XY モデルの場合にはトポロジカルな Kosterlitz-Thouless (KT) 転移が起こるので、Ising 的な転移と KT 転移の関係、転移温度やユニバーサリティクラスの決定など、未だ解決していない点が多い。この系のような競合系をシミュレーションで調べる際には、通常のモンテカルロ法を用いると、平衡化時間が非常に遅くなる問題に直面する。本研究ではこの問題を回避するために、レプリカ交換モンテカルロ法を用いた計算を行い、2つの転移を詳細に調べた。磁化およびカイラリティの相関関数の比を計算することにより、KT 転移および Ising 的な転移の転移温度、臨界指数を論じた。

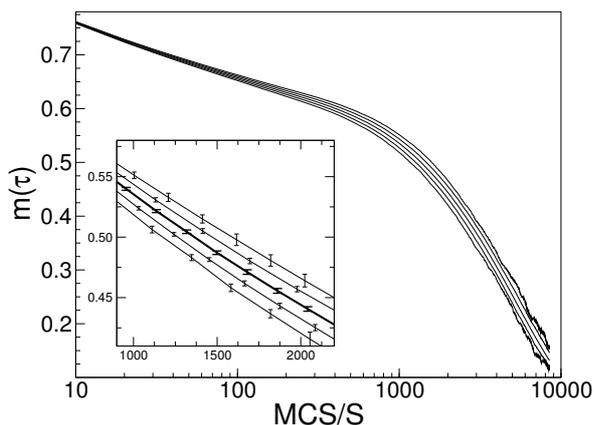


図 1: 2次元イジングモデルの転移点近傍における磁化の非平衡緩和. 非平衡 reweighting を用いて多くの温度における緩和を示す。

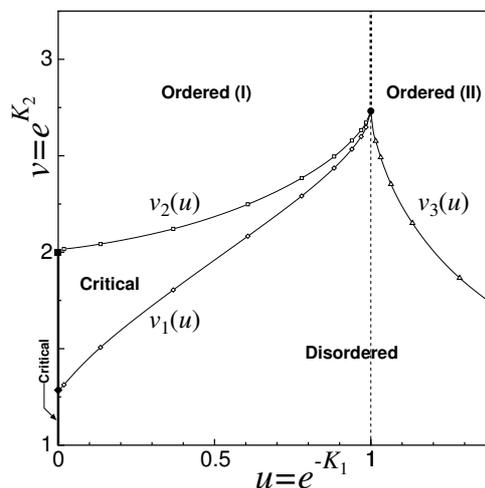


図 2: 次近接強磁性カップリングをもつ正方形格子 3 状態ポッツ模型の相図. 但  $(u, v) = (e^{-K_1}, e^{-K_2})$

#### 4) 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

正方格子上反強磁性 3 状態ポッツ模型は、その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。これに次近接強磁性カップリングを加えた模型、 $\mathcal{H}(K_1, K_2)$  は、所謂 6 状態クロック模型と同じユニバーサリティクラスに属すると考えられており、その相構造に関する研究がこれまでなされてきた ( $K_1, K_2$  はそれぞれ近接、次近接サイト間のカップリング)。この系の有効理論が、所謂 dual sine-Gordon 場の理論で与えられる事より、ガウシアン固定点に対する 2 つの非線型項によりそれぞれ引き起こされる 2 種類の Berezinskii-Kosterlitz-Thouless (BKT) 転移線により囲まれた臨界的領域が反強磁性領域 ( $K_1 > 0$ ) にて安定化されることが予想されるが、精密な相図は得られていなかった。我々は所謂レベルスペクトロスコピー法を用いることで、これら 2 種類の BKT-型の相転移点を正確に求め、パラメタ空間内での相構造を精密に決定した (図 2 参照)。図中の相境界  $v_1(u), v_2(u)$  はそれぞれ高温の無秩序相、低温の 6 重縮退したオーダー相 (I) と臨界的な中間相とを分ける BKT 転移線であるが、それらは合流すること無く  $Z_3 \times Z_3$  臨界点  $(u, v) = (1, 1 + \sqrt{3})$  まで続いており、従って系の相図は対称性の高い臨界固定点 ( $c = 8/5$ ) に対する摂動により引き起こされた臨界性のクロスオーバー現象により形成されていることが明らかになると同時にこれまでの有限サイズスケールリングの方法と異なる見方をあたえることが分かった。また強磁性領域 ( $K_1 < 0$ ) での  $Z_3$  臨界性をもつ  $v_3(u)$  と合わせると、相境界がこの点にてカスプを持つことを確認でき、さらに相転移のユニバーサリティのチェック、3 つの相境界線の特徴などを含めたより詳しい計算結果が場の理論による記述と一致することを確認した。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

C. Yamaguchi, N. Kawashima and Y. Okabe: Transition-Matrix Monte Carlo Method for Quantum Systems, J. Phys. Soc. Jpn. **73** (2004) 1728-1733.

M. Iwamatsu and Y. Okabe: Basin hopping with occasional jumping, Chem. Phys. Lett. **399** (2004) 396-400.

Y. Maniwa, H. Kataura, M. Abe, A. Udaka, S. Suzuki, Y. Achiba, H. Kira, K. Matsuda, H. Kadowaki and Y. Okabe, Ordered water inside carbon nanotubes: formation of pentagonal to octagonal ice-nanotubes, Chem. Phys. Lett. **401** (2004) 534-538.

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).

H. Otsuka and Y. Okabe: Phase Diagram of the Square-Lattice Three-State Potts Antiferromagnet with a Staggered Polarization Field, Phys. Rev. Lett. **93** (2004) 120601-(1-4).

H. Otsuka and M. Nakamura: Quarter-Filled Extended Hubbard Model with Alternating Transfer Integral: Global Structure of Ground-State Phase Diagram, Phys. Rev. B **70** (2004) 073105.

### 2) 国際会議報告

H. Otsuka: Crossover behavior of the frustrated quantum spin chain in a staggered magnetic field, J. Mag. Mag. Matt. **272-276P2** (2004) 931-932.

### 3) 学会講演

日本物理学会第59回年次大会 2004年3月27日～3月30日(九州大学)

高野智和, 岡部豊: 異方的臨界現象における有限サイズスケーリング

大塚博巳, 中村正明: 遷移積分交替をもつ1次元拡張 Hubbard 模型の Ising 転移

H. K. Lee, T. C. Schulthess, D. P. Landau: Monte Carlo Simulations on Magnetic Nano-particles

日本物理学会2004年秋季大会 2004年9月12日～9月15日(青森大学)

H.K. Lee, Y. Okabe, X. Cheng, M.B.A. Jalil: Solving the Master Equation for the Magnetic Reversal Process

大塚博巳, 岡部豊: 反強磁性3状態ポッツ模型にみられる臨界性のクロスオーバー現象

京大基研研究会「モンテカル口法の新展開3」 2005年2月28日～3月2日  
(京都大学基礎物理学研究所)

岡部豊: 状態密度を計算するモンテカル口法を用いた Fisher 零点の研究

H. K. Lee, 岡部豊: Using Sequential Importance Sampling for Nonequilibrium Reweighting

国際会議

Statistical Physics of Disordered Systems and Its Applications: Satellite Meeting of  
STATPHYS 22, Shonan, July 12-15, 2004

Y. Okabe and T. Surungan: Phase transition of two-dimensional diluted XY and clock models

The 2004 Taipei Summer Workshop on Statistical and Nonlinear Physics, Taipei,  
August 2-6, 2004

Y. Okabe: New Monte Carlo Algorithms and Applications to Various Spin Models (invited)

Y. Okabe and H. Otsuka: Antiferromagnetic Potts Model with Polarized Field (invited)

The 1st International Workshop Hangzhou 2004 on Simulational Physics,  
Zhejiang University, Hangzhou, November 5-8, 2004

Y. Okabe: Study of antiferromagnetic Potts model with polarized field (invited)

International Conference on Statistical Physics of Quantum Systems  
– novel orders and dynamics – July 17–20, 2004, Sendai, Japan

H. Otsuka and M. Nakamura: Two-Dimensional Ising Transition in Interacting Electrons

THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRONGLY CORRELATED ELECTRON  
SYSTEMS SCES '04 July 26 - 30, 2004 Karlsruhe, Germany

H. Otsuka and M. Nakamura: Two-Dimensional Ising Criticality in Interacting Electron Systems

# 固体理論サブグループ

## 1. 研究活動の概要

本サブグループは、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、量子ドットにおけるトンネル効果、光誘起磁気相転移等をテーマとしている。

### 1) 多重極秩序の理論

希土類・アクチナイド化合物では、しばしば複雑かつ謎めいた秩序相が見出される。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、これまで四重極相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。本年度は Pr スクッテルダイト系や  $\text{NpO}_2$  などの新物質における秩序状態の研究を開始した。

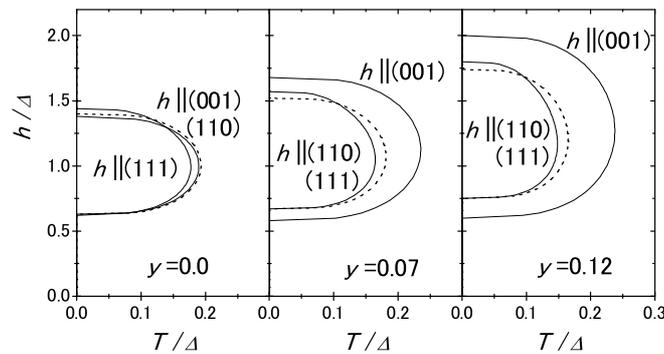


図 1: 1 重項 - 3 重項模型の磁場・温度相図 ( $y$  は  $T_h$  結晶場パラメータ): 磁場方向 (001) では、 $T_h$  項により四重極秩序変数の縮退が解けるため、秩序領域の顕著な膨張が見られる。この特徴は、 $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  の磁場異方性をよく説明すると同時に、スクッテルダイト系における  $T_h$  項の重要性を示している。

A) 1 重項 - 3 重項模型と  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  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最近の実験で明らかになってきた。

そこで、本年度は  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  や  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  で有力視されている 1 重項-3 重項模型における多重極相互作用について調べた。  $\text{CeB}_6$  との類推からこの系を擬 4 重項とみなし、15 種類の多重極モーメントについて群論による分類を行った。  $\text{CeB}_6$  との相違点や 4 回対称軸のない点群  $T_h$  の影響を明らかにした。続いて、スピンドイマー系との類似性に着目し、多重極相互作用を擬スピン相互作用へ変換した。その結果、現実のスピン系にはない際立った特徴が明らかになり、また磁場に対する異方性の起源を明らかにすることができた。  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  の磁場誘起秩序については、当初から神木らによって四重極秩序との提案がなされていたが、本研究により、さらに一般的な立場から四重極の重要性を証明することができた。 [椎名、青木 (電子相関 G)]

B)  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  における中性子散乱スペクトル: 結晶場状態と四重極相互作用の確立をうけて、中性子散乱スペクトルの計算を行った。多重極モーメントのボソン化の方法を用いて、ゼロ磁場のパラ

相から 5 T 以上で現れる磁場誘起秩序相まで、励起エネルギーの分散や散乱強度の変化を相互作用の特性と関連付けて調べた。パラ相では、反強的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。この四重極励起子の特徴はごく最近桑原らにより観測された。磁場中では励起三重項の分裂が生じる。磁場とともに低エネルギーモードのソフト化が進行し、ギャップレスとなる磁場で秩序相に入る。その際 Th 対称性により、動的臨界指数が異方的となることを示した。また、秩序相内での複雑なスペクトルの形状について詳しい解析を行った。[椎名、松本(静岡大)、古賀(静岡大)]

C) 多重極-核スピン相互作用の一般型の理論 -  $\text{NpO}_2$  の 8 重極秩序を例に - : 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。しかしながら、どのような多重極秩序が核スピン共鳴にどのようにあらわれるかは複雑な要因があり、明解な解析が難しい状況であった。本研究では、どのような多重極が核スピん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。 $\text{NpO}_2$  が低温で示す奇妙な性質を説明するためには  $3-k$  型 8 重極秩序を隠れた秩序変数とするのがひとつの可能性であることが提唱されている。しかし、8 重極の観測は至難であるため、決着はついていない。最近、原子力研究所の徳永・神戸らによりこの物質の多結晶 NMR が測定された。本研究により 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。併せて、単結晶試料による NMR により、8 重極秩序の直接同定が可能であることを示した。[酒井、椎名、斯波 (IPAP)]

## 2) 強相関物質のバンド構造の理論

A) 強相関電子系のバンド計算による研究 : 希土類やウラン化合物の中では  $f$ -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  $\text{NCAf}2v'$  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で特徴がある。[酒井、金田(東大)、清水(東北大)]

その他に、バンド計算に基づいた  $\text{CeSb}$  の磁気光効果の理論計算 [石山 (NTT)、木村 (分子研)、酒井]、軌道磁気モーメント効果まで含めた磁気構造因子を理論的に計算することを行っている [酒井、金田]。

また、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 [三村 (大阪府立大)、酒井]、結晶場と近藤効果の競合系での電子比熱計算プログラムの開発 [森田、酒井] などを進めた。

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。当グループでは、本年度より  $f^2$  格子における価数揺動の機構解明に向けた研究をスタートしている。現在、Pr スクッテルダイトを念頭におき、1 重項基底を局在極限にもつ周期アンダーソン模型を導入し、混成効果を調べている。Gutzwiller タイプの変分計算を行い、 $f$  電子の局在化が不連続転

移として生じうることを示した。[椎名、酒井]

### 3) 量子ドット系のトンネル現象における近藤効果の理論

近年の技術的進歩により、半導体表面の微少領域に電子を閉じ込め、いわゆる量子ドットを作成し、これを通り抜けるトンネル効果の実験的研究が可能になった。量子ドットは人工の磁性イオンと見做すこともでき、従来の研究では見いだされていなかった様々な効果の生じることが実験的に示されつつある。占有電子が奇数の場合、不対電子によるスピンも現れる。磁性スピンと伝導電子の相互作用による現象は、近藤効果と呼ばれ、興味を持たれて来た。近藤効果のあらわれて来る低温で、トンネル効果がどのような振舞いを示すか計算により調べるため、われわれは、数値繰り込み群や量子モンテカルロ法など、計算物理学的方法に基づく計算手法を開発してきた。最近、偶数電子系でも低温増大の起きることが、予想外に実験で見出され話題となった。偶数系では原子のシェル構造等とも関連した、電子スピン状態の高スピン状態と低スピン状態の偽縮退による近藤効果が生じることがある。これに伴う電子の軌道占有状態の急激な再配列の自由度を考慮した我々の計算により、低温成長がふたつのクーロンブロードピークの間で著しいという著しい特徴の起源が解明された。[泉田(東北大)、酒井]

### 4) 磁性半導体の磁気転移および伝導の理論

磁性を持ったイオンが半導体中に存在する系が、注目されている。GaAsにMnをドーブした系等である。このような系ではスピン系短距離相関によるクラスターに電子が局在したり、それが逆にクラスター形成を強めたりする、磁気ポーラロン効果が重要と予想されていた。しかし、信頼に足る理論的結果は導かれていなかった。電子系にたいする数値的対角化を行い、その自由エネルギーをスピン系の系エネルギーとしてモンテカルロシミュレーションを実行するを試みた。従来の平均場的方法での結論と違い、電子の強い局在は、強磁性発現に不利であることなど、電子状態のミクロな計算とともに示した。[酒井、牧野、大河内]

### 5) 光誘起磁気相転移と緩和の理論

ある種の有機化合物では、光の照射下で磁性的性質が急激に変化するものがある。光の照射量に臨界値が見られたり、光子一個にたいして、変化するイオンの数が数十から数百個になることが知られ、一種の相転移が発生している。このような系の代表物質のひとつである鉄ピコリルアミン錯体の低スピン高スピン転移を、モンテカルロ法を発展させた方法により調べた。体積歪を介して保存系の1次相転移と似た振舞に至ること等を明かにした。[酒井、小川(大阪大)]

## 2. 研究業績

### 1) 論文

R. Shiina: Multipolar Moments in Pr-based Filled-Skutterudite Compounds with Singlet-Triplet Crystal-Field Levels, *J. Phys. Soc. Jpn.* **73** (2004) 2257-2265.

R. Shiina, M. Matsumoto and M. Koga: Crystal-Field Excitations, Magnetic-Field-Induced Phase Transition and Neutron-Scattering Spectra in  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ , *J. Phys. Soc. Jpn.* **73** (2004) 3453-3461.

P. Thalmeier, R. Shiina, H. Shiba, A. Takahashi, and O. Sakai: Multipolar excitations in the antiferroquadrupolar phase of  $\text{CeB}_6$ , P. Thalmeier, R. Shiina, H. Shiba, A. Takahashi, and O. Sakai *Physica B* **350** (2004) e35-e38.

O. Sakai, R. Shiina and H. Shiba: Invariant Form of Hyperfine Interaction with Multipolar Moments - Observation of Octupolar Moments in  $\text{NpO}_2$  and  $\text{Ce}_{1-x}\text{La}_x\text{B}_6$  by NMR - J. Phys. Soc. Jpn. **74** (2005) 457-4

S. Kimura, M. Okuno, H. Kitazawa, F. Ishiyama and O. Sakai: Change of Electronic Structure Induced by Magnetic Transition in CeBi, J. Phys. Soc. Jpn. **73** (2004) 2041-2044.

K. Mimura, Y. Watanabe, H. Mizohata, K. Ichikawa, Y. Taguchi, O. Aita, A. Yamasaki, A. Sekiyama, S. Suga, T. Oguchi, S. Noguchi, O. Sakai and T. Muro: High-resolution resonant photoemission study of CeSi, Physica B **351** (2004) 295-297.

Y. Shimizu and O. Sakai: Kondo Effect in Systems with Two-Electron Occupancy, J. Phys. Soc. Jpn. **74** (2005) 27-33.

W. Izumida and O. Sakai: Kondo Effect in Quantum Dot Systems -Numerical Renormalization Group Study-, J. Phys. Soc. Jpn. **74** (2005) 103-109.

O. Sakai and W. Izumida: Kondo effect in Quantum Dots, *Proceedings of the 3rd International Conference "Computational Modeling and Simulation of Materials" Special Symposium "Modeling and Simulating Materials Nanoworld" Part C, Acireale (Catania) Sicily, Italy, May 30 -June 4 2004* p.269-p276.

O. Sakai and T. Ogawa: Study on the Cooperative Photo-induced Low-spin to High-spin State Conversion Processes, *Photoinduced Phase Transitions* ed. by K. Nasu World Scientific 2004) p.117-160.

## 2) 学会講演

日本物理学会 2004 年秋期大会 2003 年 9 月 12 日 ~ 9 月 15 日 (青森大学)

椎名亮輔、松本正茂、古賀幹人:  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  における結晶場励起、磁場誘起秩序、中性子散乱スペクトル

酒井 治: 希薄磁性半導体の電子構造についてのシミュレーション (シンポジウム: スピン制御半導体の電子構造)

酒井 治、金田保則、清水幸弘: DMF-LMTO 法による Ce 化合物のバンド計算 II

松本正茂、古賀幹人、斯波弘行、酒井治: Pr スクッテルダイトにおける sf 有効交換相互作用と  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  の超伝導

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

金子耕土、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 4 極子秩序の研究

森下明、酒井治: Ce イオンにおける結晶場-近藤効果競合の総合的解析

酒井 治、清水幸弘、金田保則: DMFT-LMTO 法による Ce 化合物のバンド計算 III

清水幸弘、酒井治: Pr 不純物系の非フェルミ流体異常の理論

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」第 2 回研究会  
2004 年 6 月 28 日 ~ 6 月 30 日 (東京大学物性研究所)

椎名亮輔： Pr スクッテルダイトにおける結晶場状態と多重極相互作用

酒井治: 動的平均場法による f-電子化合物のバンド計算

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」第3回研究会  
2005年1月6日～1月8日（神戸大学）

椎名亮輔：  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  の磁場誘起秩序相について 秩序変数とダイナミクス

森下明： Ce イオンにおける結晶場状態と近藤効果の理論

酒井 治： 動的平均場法による Ce 化合物のバンド計算

Basic Science Seminar “Physics of Multipoles” Advance Science Reseach Center,  
JAERI, Nov. 25 2004

O. Sakai: Invariant Form of the Multipolar Interaction -Application to  $\text{NpO}_2$ -

国際会議

Yukawa International Seminer 2004, “Physics of Strongly Correlated Electron Systems”,  
November 2004

R. Shiina: Multipolar Interactions in Pr-based Filled-Skutterudite Compounds

3rd International Conference “Computational Modeling and Simulation of Materials”  
& Special Symposium “Modeling and Simulating Materials Nanoworld” Acireale (Catania),  
Scicily, Italy, May 30 - June 4, 2004

O. Sakai and W. Izumida: Kondo effect in qunatum dots

NAREGI Workshop on Electronic Transport, Excitation and Correlation in Nanoscience,  
Sapporo, October 4-8, 2004

O. Sakai: Band calculation for 4f compounds

# 高エネルギー実験サブグループ

## 1. 研究活動の概要

本サブグループでは、日本が世界をリードしている  $B$  ファクトリーにおける、粒子・反粒子対称性の破れの研究を始めとする高エネルギー衝突型加速器実験の他、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。

### 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 加速器は順調に稼動し、今年度のルミノシティは  $11 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$  から  $15 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$  に向上した。積分ルミノシティも  $175 \text{fb}^{-1}$  から  $350 \text{fb}^{-1}$  へと倍増し、競争相手の SLAC の加速器が事故によって約半年停止したため、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は、昨年度標準モデルからの大きなずれが発見された  $B \rightarrow \phi K_s$  崩壊に関して、データ量の増加とともに significance は若干低下したものの、様々な崩壊過程を総括的に解析した結果、依然約  $2.5\sigma$  のずれがあることが判明した。Babar でも同様の結果が得られており、今後のデータ量の増加で標準モデルを超える物理の最初の証左として大きな成果が期待される。また  $B \rightarrow c\bar{c} + X$  崩壊過程の解析で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。

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の開発を KEK、名古屋大、千葉大などと協力して進めている。特に新型の光センサーとして HPD (ハイブリッド・フォト・ダイオード) と呼ばれる、高性能の光検出器およびその読み出し電子回路の開発を行っている。今年度は約 40 編の欧文雑誌への投稿論文、100 編以上の国際会議への contribution 論文が出版された。

#### 電子-陽子衝突型加速器 HERA による ZEUS 国際共同研究

ドイツ電子シンクロトロン研究所 (DESY) の電子-陽子衝突型加速器 (HERA) は 2000~2001 年にかけて次のような大幅な性能向上を行った ; (1) 衝突点を改造して輝度を現在の 5~7 倍に上げる、(2) 電子または陽電子ビームを縦偏極させる。HERA の性能向上によって、5 年間で電子/陽電子と、平均の偏極度 50% で右巻きと左巻きの全ての組み合わせで、それぞれ約  $100 \text{pb}^{-1}$  の積算ルミノシティに相当する衝突データの集積が期待される。これにより、電弱相互作用の精密測定を行うことができる。

このような研究のためには電子ビームの偏極度を 2% 以下の精度で決定しなければならない。そこで、偏極度測定装置の光子カロリメータの前面に高い放射線耐性をもつシリコンマイクロストリップ検出器を設置した。検出器が設置される場所が HERA の周回リング・トンネルの内部であるため強いシンクロトロン放射を浴びることから、放射線損傷によりシリコンマイクロストリップ検出器の位置情報に歪みが生じたとしても、それを検知するための手段として、シンチレーションファイバーを用いたトリガーシステムを設置した。電子ビームの偏極度は、電子ビームに右巻きまたは左巻きに円偏光したレーザー光をコンプトン散乱させ、後方に散乱した  $\gamma$  線の上下方向の位置分布の非対称度を測定することにより求められる。 $\gamma$  線の位置はカロリメータの上下信号の非対称度  $\eta$  に対して、 $\eta - y$  変換曲線により上下位

置  $y$  に変換することにより求められる。その際、 $\eta - y$  変換曲線の時間的な変動が偏極度の精度を決定する要因となるため、定期的にシリコンマイクロストリップ検出器で直接  $y$  を同時測定することで、 $\eta - y$  変換曲線を更新することにした。

こうして、 $\eta - y$  変換曲線の変動による偏極度測定精度への影響を解消することができた。更新された  $\eta - y$  変換曲線のパラメータを用いて横偏極度を求めたところ、独立に測定されている縦偏極度の測定値との差が 1% 以内に納まっていることが分かった。この結果 HERA の電子ビームの偏極度を 2% 以下の精度で決定するという当初の目標を達成することができるという見通しがついた。

## 2) 将来加速器の研究

2012 年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: JLC から改称) 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

日米科学技術協力事業として、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  $10.6\mu\text{m}$ ) 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 に短パルス化して実験を行なった。パルス・エネルギー約 4J ~ 8J で、ピーク・パワーは 100 ~ 200GW に達する。

このレーザー・パワー領域では、高次 QED 過程 (2 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。非線形散乱によって生成する X 線は、線形過程の 2 倍 (最高 13keV) のエネルギーを持ち、レーザーの偏光方向に対して特長な角度分布を示す。我々は、銀箔フィルターによって線形過程からの X 線との分離を行ない、蛍光フィルムと CCD による角度分布の測定により、非線形コンプトン散乱の観測に成功した。

### 単結晶を用いた陽電子源の開発

本研究は、単結晶を標的に使用して陽電子の生成効率をあげることによって、従来用いられている非結晶標的より高い強度の陽電子源を開発することを目的としている。このとき入射電子ビームバンチの粒子数、すなわちビームバンチの電荷量を増大することに対して、結晶標的が結晶としての性質をどこまで保つのかを解明する必要がある。一方、電荷量を増大するのみではなく、バンチの空間的広がりを極端に狭く、すなわちビームバンチが結晶を通過する時の電流密度を極端に高くしたとき、結晶が示すチャネルリング現象がどのような振る舞いを示すかということに関心が高まっている。ビームのエネルギー損失が増大する結果結晶格子に乱れが生じ、チャネルリングは抑制され、それによって生じる  $\gamma$  線の放射が減少するかあるいは消滅することが予想される。そこで、チャネルリング放射あるいはコヒーレント制動放射による陽電子生成量の増大をビームバンチの電荷量すなわちビームの電流密度の関数として測定する実験を行った。

ビーム条件を以下に示す。ビームエネルギー: 8GeV、ビームバンチの電荷量: 0.1~3 nC/bunch、ビームのエミッタンスは、各バンチ電荷量ごとにワイヤースキャナーで測定、ビームの進行方向のサイズは、各バンチ電荷量ごとにストリーク・カメラで計測、標的位置でのビームのサイズは、蛍光板のビームイメージを CCD カメラで計測。結晶軸がビーム軸にそろった時に陽電子生成量は最大となる。このときの陽電子生成量を On-axis とする。結晶軸をビーム軸から大きく外した場合は非晶質の標的の場合と同じ陽電子生成量となり、これを Off-axis とする。ロッキングカーブの観測により、電子ビームが結晶標的中でチャネルリング放射を起こしていることを確認した。次に、On-axis と Off-axis の陽電子生成量の差をビーム電荷量の関数として見たところ、結晶標的からの陽電子生成量の増大はビーム電荷とともにリニアに増大していることがわかった。この結果、本実験のビーム電荷量の範囲 (0.1~3 nC) で

は電荷量の増大に伴ったチャンネリングの抑制などの異常は観測されなかった。

### 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立ち上げた。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。このシミュレーションを実際のデータと比較するために、柏崎・刈羽原子力発電所の敷地内に直径 6cm、深さ 70m の穴をあけ、そこに宇宙線観測用の検出器を挿入して観測を行った。観測の結果はシミュレーションによりほぼ再現できることがわかった。また、ニュートリノ観測に使用する光電子増倍管の基本的な性能の評価を青色レーザーを光源とするシステムを用いて行った。実際に使用する予定の浜松ホトニクス社製の R5912 や R7081 は、共に単光子事象が十分認識でき、TTS も 1.5 ナノ秒以下であることがわかった。これらの性能の入射位置依存性も 10%以下であり、実際の実験で十分使用できる性能を有していることが判った。

#### 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は活動銀河核、ブラック・ホールなどの高エネルギー現象からの直接的な信号として貴重な情報を有している。しかし、その事象は非常に稀なためそれを捉えるためには巨大質量の検出器が必要となる。岩塩中で起こした電磁シャワーによって発生したチェレンコフ電波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や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行なった。

### 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。ポジトロニウムの 4 光子、5 光子崩壊過程を高統計且つ高 S/N で測定を行う為の実験装置とデータ取得プログラムでデータの取得を行い、データのチェックを行った。これからシミュレーションとの比較を行なう必要がある。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

Search for  $\tau \rightarrow e\gamma$  decay at Belle: K.Hayasaka *et al.* (Belle Collaboration), Phys. Lett. **B 613**, 22 (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)

Observation of  $\bar{B}^0 \rightarrow D_s J^*(2317) + K^-$  decay: A. Drutskoy *et al.* (Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. **94**, 061802(2005)

Observation of  $B^+ \rightarrow K^+ \eta \gamma$ : S. Nishida *et al.* (Belle Collaboration), Phys. Lett. **B 610**, 23 (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)

Search for  $D^0 - \bar{D}^0$  mixing in  $D^0 \rightarrow K^+ \pi^-$  decays and measurement of the doubly-Cabibbo-suppressed decay rate: J. Li *et al.* (Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. **94**, 071801(2005)

Measurements of masses and branching ratios of  $\Xi_c^+$  and  $\Xi_c^0$  baryons: T.Lesiak *et al.* (Belle Collaboration), Phys. Lett. **B 605**, 237 (2004)

Observation of  $B^0 \rightarrow D^{*-}(5\pi)^+$ ,  $B^+ \rightarrow D^{*-}(4\pi)^{++}$  and  $B^+ \rightarrow \bar{D}^{*0}(5\pi)^+$ : G. Majumder *et al.* (Belle Collaboration), Phys. Rev. **D 70**, 111103(R) (2004)

Search for CP violation in the decay  $B^0 \rightarrow D^{*\pm} D^{\mp}$ : T. Aushev *et al.* (Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. **93**, 201802 (2004)

Study of time-dependent CP violation in  $B^0 \rightarrow J/\psi \pi^0$  Decays: S.U.Kataoka, K.Miyabayashi *et al.* (Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. **93**, 261801(2004)

Evidence for Direct CP Violation in  $B^0 \rightarrow K^{\pm} \pi^{\mp}$  Decays: Y. Chao *et al.* (Belle Collaboration) , Phys. Rev. Lett. **93**, 191802(2004)

Study of  $B^0 \rightarrow \rho \pi$  Time-dependent CP Violation at Belle: C.C. Wang *et al.* (Belle Collaboration) , Phys. Rev. Lett. **94**, 121801 (2005)

Improved Measurements of Partial Rate Asymmetry in  $B \rightarrow hh$  Decays: Y. Chao, P. Chang *et al.* (Belle Collaboration) , Phys. Rev. **D 71**, 031502(R) (2005)

Study of double charmonium production in  $e^+e^-$  annihilation at  $\sqrt{s} \sim 10.6\text{GeV}$ : K.Abe *et al.* (Belle Collaboration), Phys. Rev. **D 70**, 071102(R) (2004)

Observation of the Decays  $B^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^0$  and  $B^0 \rightarrow \rho^- K^+$ : P. Chan *et al.* (Belle Collaboration), Phys. Lett. **B 599**, 148 (2004)

Measurement of  $\phi_3$  with Dalitz Plot Analysis of  $B \rightarrow D^{(*)}K$  Decay: A.Poluektov *et al.* (Belle Collaboration), Phys. Rev. **D 70**, 072003 (2004)

Observation of  $B^+ \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda} K^+$ : Y.-J. Lee, M.-Z. Wang *et al.* (Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. **93**, 211801 (2004)

Measurement of Branching Fraction and CP Asymmetry in  $B^+ \rightarrow \rho^+ \pi^0$ : J. Zhang *et al.* (Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. **94**, 031801 (2005)

Evidence of  $B^0 \rightarrow \rho^0 \pi^0$ : J. Dragic, T. Gershon *et al.* (Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. **93**, 131802 (2004)

Search for the Lepton-Flavor-Violating Decay  $\tau^- \rightarrow \mu^- \eta$  at Belle: Y. Enari *et al.* (Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. **93**, 081803 (2004)

Measurement of the CP Asymmetry in  $B \rightarrow X_s \gamma$ : S. Nishida *et al.* (Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. **93**, 0318038 (2004)

Search for neutrinoless decays  $\tau \rightarrow 3\ell$ : Y. Yusa *et al.* (Belle Collaboration), Phys. Lett. **B 598**, 103 (2004)

Measurement of the Branching Fractions for  $B \rightarrow \omega K$  and  $B \rightarrow \omega \pi$ : C.H. Wang *et al.* (Belle Collaboration), Phys. Rev. **D 70**, 012001 (2004)

Study of CP Violating Effects in Time Dependent  $B^0(\bar{B}^0) \rightarrow D^{(*)\mp} + \pi^\pm$  Decays: T.R.Sarangi, K.Abe *et al.* (Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. **93**, 031802 (2004)

An inclusive measurement of the photon energy spectrum in  $b \rightarrow s \gamma$  decays: P.Koppenburg *et al.* (Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. **93**, 061803 (2004)

Measurement of the  $B \rightarrow K^* \gamma$  Branching Fractions and Asymmetries: M.Nakao *et al.*, (Belle Collaboration), Phys. Rev. **D 69**, 112001 (2004)

Evidence for  $B^+ \rightarrow \omega l^+ \nu$ : C.Schwanda *et al.* (Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. **93**, 131803 (2004)

Measurement of the  $e^+e^- \rightarrow D^{(*)+}D^{(*)-}$  cross-section: T.Uglov *et al.* (Belle Collaboration), Phys. Rev. **D 70**, 071101(R) (2004)

Observation of  $B^+ \rightarrow \psi(3770)K^+$ : R.Chistov *et al.* (Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. **93**, 051803 (2004)

Observation of Large CP Violation and Evidence for Direct CP Violation in  $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$  Decays: K.Abe *et al.* (Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. **93**, 021601 (2004)

Improved Measurements of Branching Fractions for  $B \rightarrow K\pi$ ,  $\pi\pi$  and  $K\bar{K}$  Decays: Y.Chao, K.Suzuki, Y.Unno *et al.* (Belle Collaboration), Phys. Rev. **D 69**, 111102(R) (2004)

Beam-size measurement with optical diffraction radiation at KEK accelerator test facility: Pavel Karataev, Sakae Araki, Ryosuke Hamatsu, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **93** 244802 (2004)

Experimental study of positron production from silicon and diamond crystals by 8-GeV channeling electrons: M. Satoh, R. Hamatsu *et al.*, Nucl. Instr. Meth. **B 227** (2005) 3-10

Search for a narrow charmed baryonic state decaying to  $D^{*\pm}p^\mp$  in  $ep$  collisions at HERA: S.Chekanov *et al.* (ZEUS Collaboration), Euro. Phys. J. **C 38** (2004) 29-41

Dissociation of virtual photons in events with a leading proton at HERA: S.Chekanov *et al.* (ZEUS Collaboration), Euro. Phys. J. **C 38** (2004) 43-67

Substructure dependence of jet cross sections at HERA and determination of  $\alpha_s$ : S.Chekanov *et al.* (ZEUS Collaboration), Nucl. Phys. **B 700** (2004) 3-50

Measurement of beauty production in deep inelastic scattering at HERA: S.Chekanov *et al.* (ZEUS Collaboration), Phys. Lett. **B 599** (2004) 173-189

Evidence for a narrow baryonic state decaying to  $K_s^0 p$  and  $K_s^0 \bar{p}$  in deep inelastic scattering at HERA: S.Chekanov *et al.* (ZEUS Collaboration), Phys. Lett. **B 591** (2004) 7-22

The dependence of dijet production on photon virtuality in  $ep$  collisions at HERA: S.Chekanov *et al.* (ZEUS Collaboration), Euro. Phys. J. **C 35** (2004) 487-500

Exclusive electroproduction of  $J/\psi$  mesons at HERA: S.Chekanov *et al.* (ZEUS Collaboration), Nucl. Phys. **B 695** (2004) 3-37

Study of the pion trajectory in the photoproduction of leading neutrons at HERA: S.Chekanov *et al.* (ZEUS Collaboration), Phys. Lett. **B 610** (2005) 199-211

Observation of isolated high- $E_T$  photons in deep inelastic scattering: S.Chekanov *et al.* (ZEUS Collaboration), Phys. Lett. **B 595** (2004) 86-100

Photoproduction of  $D^{*\pm}$  Mesons Associated with a Leading Neutron: S.Chekanov *et al.* (ZEUS Collaboration), Phys. Lett. **B 590** (2004) 143-160

Search for contact interaction, large extra dimensions and finite quark radius in  $ep$  collisions at HERA: S.Chekanov *et al.* (ZEUS Collaboration), Phys. Lett. **B 591** (2004) 23-41

High- $Q^2$  neutral current cross section in  $e^+p$  deep inelastic scattering at  $\sqrt{s}=318$  GeV: S.Chekanov *et al.* (ZEUS Collaboration), Phys. Rev. **D 70** (2004) 052001

Bottom photoproduction measured using decays into muons in dijet events in  $ep$  collisions at  $\sqrt{s}=318$  GeV: S.Chekanov *et al.* (ZEUS Collaboration), Phys. Rev. **D 70** (2004) 012008

Search for QCD-instanton induced events in deep inelastic  $ep$  scattering at HERA: S.Chekanov *et al.* (ZEUS Collaboration), Euro. Phys. J. **C 34** (2004) 255-265

Salt Neutrino Detector for Ultrahigh-Energy Neutrinos: M.Chiba, T.Kamijo, O.Yasuda, Y.Chikashige, T.Kon, Y.Takeoka and R.Yoshida, Phys. of Atomic Nuclei **67** (2004) 2050-2053

Detection of  $\pi^+\pi^-$  atoms with the DIRAC spectrometer at CERN: B.Adeva, M.Chiba, *et al.*, J. Phys. **G 30** (2004) 1929-1946

## 2) 学会講演

日本物理学会 2004 年秋季大会 2004 年 9 月 27 日 ~ 9 月 30 日 (高知大学朝倉キャンパス)

佐久間清美、中川尊、松本崇博、住吉孝行、他 KASKA 実験メンバー : KASKA 実験におけるバックグラウンドの考察

太田理、梶裕志、浜津良輔、李栄篤、他 ZEUS Collaboration : HERA における偏極陽電子ビーム偏極度測定

李栄篤、太田理、梶裕志、浜津良輔、他 ZEUS Collaboration : HERA 電子ビーム偏極度測定装置における Si マイクロストリップ検出器の放射線劣化モニター

渡邊勇介、千葉雅美、安田修、上條敏生、近重悠一、近 匡、竹岡義人、天野晶夫 : 電波によるニュートリノ検出のための岩塩中電子シャワーの過剰電子シミュレーション

天野晶夫、近重悠一、近 匡、竹岡義人、千葉雅美、安田修、渡邊勇介、上條敏生：電波によるニュートリノ検出のための天然岩塩中電波減衰長の測定

石水昭夫、汲田哲郎、神谷好郎、他：BNLにおける60MeV電子ビームのプラズマ航跡場加速のシミュレーション

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

佐久間清美、中川尊、松本崇博、住吉孝行、他 KASKA 実験メンバー：KASKA 実験における宇宙線バックグラウンドの研究

中川尊、住吉孝行、藤田良雄、大石保生：Micromegas-PMT の開発

浜津良輔、藤本紘行、他：単結晶標的を利用した陽電子生成における衝突電子ビーム電荷量の影響

千葉雅美、渡邊勇介、安田修、上條敏生、近重悠一、近 匡、竹岡義人、天野晶夫：超高エネルギーニュートリノ検出のための天然岩塩試料の電波減衰長の測定

渡邊勇介、千葉雅美、安田修、上條敏生、近重悠一、近 匡、竹岡義人、天野晶夫：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内の過剰電子の構造関数

汲田哲郎、石水昭夫、神谷好郎、他：BNLにおける60MeV電子ビームのプラズマ航跡場加速のシミュレーション2

神谷好郎、石水昭夫、汲田哲郎、他：BNL-ATFにおける非線形コンプトン散乱実験とX線スペクトログラフの開発

藤本紘行、住吉孝行、他：FEATHER (FEadback AT High Energy Requirements)

#### 国際会議

5th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detector, Playa del Camen, Mexico, Nov.30～ Dec.5, 2004

T. Sumiyoshi: Development of HPD and HAPD

# 原子物理実験サブグループ

## 1. 研究活動の概要

本グループの研究課題は、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ことである。

### 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。昨年度までは、イオンを面チャネリング条件下で入射し、結晶を回転させることによって、2次元 RCE (2D-RCE) の詳細な共鳴スペクトルを測定してきた。今年度は、2重共鳴励起を観測するとともに、オーフス大学（デンマーク）で制作された 1  $\mu\text{m}$  厚の極薄 Si 結晶を新たに採用し、3次元 RCE (3D-RCE) の観測に初めて成功した。

SSD 結晶エネルギー検出器を使った He-like イオンの 2重共鳴励起: 383 MeV/u He-like Ar<sup>16+</sup> イオンの (1s)<sup>2</sup> (1s2p) と (1s2p) (2p)<sup>2</sup> の同時 RCE

単結晶の原子列による周期ポテンシャルを利用した 2D-RCE において、遷移エネルギー ( $E$ ) に対する共鳴励起条件すなわちイオンビームの速度 ( $v$ ) と結晶軸に対する入射方向 ( $\theta$ ) は、Si(220) 面内の場合  $E = \gamma\beta c/a(\sqrt{2k\sin\theta + l\cos\theta})$  ( $\beta = v/c$ ,  $a$ :格子定数,  $\theta$ : [110] 軸からの角度,  $k, l$ : 整数) のように表される。従って、入射イオンの速度 ( $v$ ) を 5桁程度の高精度で制御し、 $k, l$  を適切に選ぶと、異なる振動結晶電場に対応する複数の共鳴励起が同一の入射角度  $\theta$  に対して得られる。つまり、2種類のエネルギーの光子を同時照射し、2つの異なる共鳴を利用してイオンを2段階に励起する、“2重共鳴励起”と同様の実験が X 線領域で可能になることを意味している。20  $\mu\text{m}$  厚の SSD (Silicon Surface barrier Detector) 検出器を結晶試料とした実験の結果、2重励起条件下での Ar<sup>16+</sup> イオン生き残り割合の減少が、単励起条件下に比べてより顕著になることを確認した。

極薄結晶を使ったランダム入射条件下での 3次元共鳴励起: 390 MeV/u H-like Ar<sup>17+</sup> 1s 2s/2p

1  $\mu\text{m}$  厚の極薄 Si 結晶を試料として用いると、ランダム条件下（つまり非チャネリング条件下）で軌道電子をもった H-like の高速重イオンを入射しても、結晶を通過後、約 7割がイオン化されずに生き残る。このため、出射イオン荷電分布の測定によって、厚い結晶では不可能であった原子面の近くやランダム条件下における共鳴励起を観測できるようになった。まず、(220) 面チャネリング条件下におけるイオンの出射角と荷電状態の同時測定を行うことによって、イオン軌道を選別した 2D-RCE の様子を観測した。これは、結晶厚が薄いためにイオン軌道が蛇行せず、イオン軌道と出射角が一対一対応することを利用したものである。その結果、共鳴励起やイオン化の確率の大きい原子面に近い領域における共鳴が強調されて観測されていることが明らかになった。この共鳴プロファイルはイオンの励起準位が強い結晶静電場によってシュタルクシフトを起こしているために幅広であり、厚い結晶で観測される共鳴構造とは大きく異なっている。次に、入射イオンに対する結晶方位角度を変化させて、ランダム条件下における RCE を観測することを試みた。今まで結晶面という 2次元空間内で“原子列”を周期的に通過することによる 2D-RCE を観測してきたが、今度は、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よる“3次元コヒーレント共鳴励起 (3D-RCE)”が起こることを、実際に観測するこ

とに初めて成功した。得られた 3D-RCE 共鳴プロファイルは、先鋭化した 2 本のピークを形成し、それぞれの中心はイオンの真空中における  $ls$  分裂した遷移エネルギーに一致した。これは、イオンが原子面を周期的に乗り越えるために結晶静電場も周期的に時間変動し、結果的にシュタルクシフトを引き起こさなくなるためであると理解される。

## 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を推進している静電型イオン蓄積リングは、平成 16 年度、周回ビームの精密制御、イオン蓄積の長時間化を達成し、ほぼ設計通りの性能で運転される状況にまで到達した。この静電型イオン蓄積リングでは、イオン軌道は電場とイオンの価数に支配され、一定の入射エネルギーの場合イオンの質量に関係しない。そのため重い多原子分子イオンやクラスターイオンを蓄積可能である。また、分子イオンの場合には、イオン源で生成された振動励起状態が赤外光放射によって脱励起され周囲の環境温度にまで安定化する。よってリングを液体窒素温度まで冷却することにより分子イオンをさらに冷却化することが可能であるなどの様々な特徴を備えている。平成 16 年度は、 $Ne^+$ 、 $Ar^+$ 、 $Xe^+$  の様々な希ガスイオンに始まって、多価分子イオン、正負フラレーンイオンまでの蓄積に成功した。

イオンビーム入射系: 従来、希ガスイオン生成のみに使用していたディオプラズマトロンイオン源を、電子衝突型イオン源としても同時利用できるよう改良し、 $CO^{2+}$  等の多価分子ビームの生成が可能になった。また、レーザー脱離型クラスターイオン源を設置し、 $C_{60}^{+/-}$ 、 $C_{70}^{+/-}$  等の正負クラスターイオンビームの生成に成功した。後者のイオン源ではパルスレーザー照射のタイミングと同期して 20 kV 程度の高圧を印加し、蓄積リングに入射している。

周回ビーム観測: 中性粒子検出器、及び非破壊型ビーム位置検出器の 2 種類の検出器を用いている。蓄積リング直線部後方で、周回イオンから生成する中性粒子を検出する中性粒子検出器を使って、多種の希ガスイオンビームの寿命(蓄積時間)を測定した。その結果、これが残留ガスとの弾性散乱による周回軌道からの逸脱に起因していることや、高強度ビームにおける空間電荷効果の影響を確認した。一方、電極における誘導電荷を検出する非破壊型ビーム位置検出器を、リング中 4 箇所に設置することにより、ビーム形状や時間構造の詳細な計測が可能となった。同位体を含む希ガスイオンや多種フラレーンイオンのパルスビーム同時周回信号スペクトルを、フーリエ変換することで質量分析が可能であることを実証した。

周回ビーム制御: 蓄積リング内の円筒電極に RF を印加し、RF ノックアウト法を用いて、特定の高周波電場を与えることでベータトロン振動に起因する共鳴が起こり周回ビームが失われる現象を観測した。一方、RF を調整することにより逆に、DC ビームのバンチ化やエネルギー分布の単色化にも成功した。これにより、時間経過とともに入射パルス化ビームが空間的に前後に広がる現象の回避が可能であり、直接質量分析が行えることや、レーザーなどの他のビームと衝突させる場合に相対的信号強度を増大させることができるなど多岐にわたる応用が期待される。

現在は、 $CO^{2+}$  などの不安定な多価分子イオンの蓄積を行い、寿命精密測定実験を行っている。また、フラレーン負イオンを蓄積した上で、波長可変レーザーをリング直線部に入射させ、多光子吸収によるイオン化を測定する振動構造分光測定を開始している。このような長い時間スケールでの不安定分子の寿命測定や、巨大イオンと電子、中性原子、光子との相互作用の研究は、今後新しい原子分子衝突物理・化学を切り開くと期待され、現在、生体分子イオンを生成する ESI 型イオン源 (electro-spray ion source) を製作試験中である。

### 3) 低温ヘリウム気体中のイオン移動度

液体窒素および液体ヘリウムによって冷却したヘリウム気体中における様々なイオンの移動度を測定してきた。イオン移動度はイオンと気体分子の間の相互作用ポテンシャルに鋭敏であるため、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、弱電場を感じながら低温気体中をドリフトするイオンの運動エネルギーは meV 領域であるから de Broglie 波長が数 Å にもなり、イオンの波動性が巨視的物理量である移動度に現れることが期待される。しかし、これまでに波動性が観測されたのは質量数 4 の  $\text{He}^+$  だけである。そこで、より軽いイオンである  $\text{H}^+$  および  $\text{H}_3^+$  について測定を行った。 $\text{H}^+$  の移動度は古典論および量子論による計算値と良い一致を示したが波動性は観測されなかった。但し、極端に電場が弱くなるとクラスター生成が顕著になるため移動度の測定が不可能であった。これについては強力なイオン源を用いて再度挑戦する予定である。一方、分子イオンである  $\text{H}_3^+$  については理論計算が困難であるため実験値との比較はできていないが、低電場での古典的な極限值である分極極限と一致した値が得られており、量子効果は現れないことが判った。その理由に関する考察は今後の課題である。

また、 $\text{He}^+$  に次いで軽いイオンである  $^6\text{Li}^+$  と  $^7\text{Li}^+$  は粒子間ポテンシャルは全く同じであるが、質量の違いが波動性に直接影響して移動度にも現れる可能性が考えられる。量子論による計算では実効温度 10 K 以下において僅かながら質量の違いが現ると期待されたが、測定精度の問題で同位体効果は確認できなかった。しかしながら、これまでに測定した原子イオンとは異なり、低電場領域での移動度が分極極限より小さくなるという特徴が観測された。これまでのイオンが開殻系であるのに対し、 $\text{Li}^+$  は閉殻系であることから、電子構造の違いが移動度に現れた可能性が考えられる。この仮説を検証するため、他のアルカリイオンについても測定を行う予定である。

### 4) 多価 Xe イオンの電荷交換分光

次世代半導体製造技術とされる波長 13.5 nm の極端紫外光 (EUV) を用いたリソグラフィーには、この波長に特化した新しい光源が必要であり、その開発が急務とされている。光源の候補としては Xe(あるいは Sn) のレーザー励起プラズマ(あるいは放電プラズマ)が考えられており、実用化に向けた装置開発をサポートするものとして、プラズマ研究者による基礎的な物理研究も行われている。しかしながら、プラズマを構成している多価イオンに関する原子分光学的データ(エネルギー準位、遷移波長、遷移確率など)は十分とは言えず、特に 11 価以上の Xe イオンについては近似的な理論計算があるだけで、実験的なデータは全く報告されていない。そこで、電荷交換分光法による多価 Xe イオンの遷移エネルギー計測を行った。

ECR(電子サイクロトロン共鳴)イオン源によって生成した多価 Xe イオンをビームとして取り出し、価数を選別した後に標的気体と衝突させた。電荷移行反応によって生成した多価 Xe イオンの励起状態から発光を 6 nm から 24 nm の極端紫外領域において観測した。Xe イオンの価数として 7 価から 18 価まで、標的気体として He などの 5 種類の希ガスを用いて測定を行った。理論計算によって 4d-4f, 4d-5p, および 4d-5f 遷移の平均的な波長が求められていたが、今回の測定ではそれらに該当する波長に非常に幅の広い発光が観測された。計算値と実測値は最大で 0.6 nm ほど離れており、この結果から従来の理論計算の精度は定量的な議論には不十分であることが明らかになった。10 価より価数の低いイオンについては乏しいながらも実験的に決定された遷移波長やエネルギー準位のデータが報告されているので、本研究で観測された発光波長との比較を行った。その結果、幾つかの遷移波長は報告値と一致したが、多くが未知の新しい遷移であることが分かった。また、遷移波長としては報告がなかったラインの中には、エネルギー準位の報告値から計算した遷移波長と一致するものが多数あった。これらについては遷移の始状態および終状態を決定することができ、原子分光学的に重要な成果が得られた。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

S. Jinno, T. Takao, Y. Omata, A. Satou, H. Tanuma, T. Azuma, H. Shiromaru, K. Okunio, N. Kobayashi, I. Watanabe : TMU electrostatic ion storage ring designed for operation at liquid nitrogen temperature, *Nucl. Instrum. Meth. A* **532** (2004) 477–482.

C. Kondo, Y. Takabayashi, A. Hatakeyama, T. Muranaka, T. Azuma, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada, T. Murakami : X-ray yields from high-energy heavy ions channeled through a crystal: their crystal thickness and projectile dependence, *Nucl. Instrum. Meth. B* **230** (2005) 85–89.

Y. Nakai, T. Ikeda, Y. Kanai, T. Kambara, N. Fukunishi, K. Komaki, C. Kondo, T. Azuma, Y. Yamazaki : Resonant coherent excitation of 2s electron of Li-like Fe ions to the  $n=3$  states, *Nucl. Instrum. Meth. B* **230** (2005) 90–95.

T. Kaneyasu, T. Azuma, 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.

### 2) 国際会議報告

T. Azuma, H. Tanuma, H. Shiromaru : Present and future projects of TMU atomic physics group, *J. Phys. Conf. Series* **2** (2004) 143–151.

N. Kobayashi : Experimental studies with HCI by CORONA group at TMU, *J. Phys. Conf. Series* **2** (2004) 209–212.

K. Okuno : Collision dynamics in low energy collisions of multiply charged ions with molecules, *J. Phys. Conf. Series* **2** (2004) 220–229.

### 3) 学会講演

第6回 EUV 光源開発技術委員会 2004年4月20日(八重洲ダイビル)

田沼肇：価数選別 Xe イオンの分光スペクトル計測

原子分子過程理論セミナー 2004年5月22日(上智大学)

田沼肇：低温 He 気体中のイオン移動度：古典芸能からモダンアートまで

分子科学研究所研究会「原子・分子反応素過程における粒子相関」 2004年6月1日～2日  
(岡崎コンファレンスセンター)

金安達夫；多重同時計測法を用いた多価イオン・分子衝突ダイナミクスの研究

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 15 年度成果報告会 2004年6月9日(日本科学未来館)

田沼肇，大橋隼人，渋谷えみ，小林信夫，奥野智晴，藤岡慎介，西村博明，西原功修：励起多価キセノンイオンの EUV 発光スペクトルの価数依存性

大阪大学レーザー研シンポジウム 2004 2004年6月10日(大阪大学コンベンションセンター)

田沼肇：レーザープラズマ放射における原子素過程の研究

第1回 AMO 討論会 2004年7月8日～10日（東京大学・本郷キャンパス）

東俊行，田沼肇，神野智史，高雄智治，的場史朗，村中友子，小俣有紀子，真杉三郎，中野祐司：Expanding field of ion collision - meV から GeV まで/多価イオンから巨大イオンまで/電子標的から結晶標的まで

原子衝突研究協会第29回研究会 2004年8月4日～5日（東北大学・金属材料研究所）

的場史朗，小高裕一，坂田博和，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

小俣有紀子，神野智史，高雄智治，佐藤絢子，安田有里，花田勝彦，田沼肇，東俊行，城丸春夫，奥野和彦，小林信夫：静電型イオン蓄積リングの開発 V -ビーム時間構造観測用検出器-

高雄智治，神野智史，小俣有紀子，佐藤絢子，安田有里，花田勝彦，田沼肇，東俊行，城丸春夫，奥野和彦，小林信夫：静電型イオン蓄積リングの開発 VI -超高真空下における重イオン蓄積-

田沼肇，大橋隼人，渋谷えみ，小林信夫，奥野智晴，藤岡慎介，西村博明，西原功修：励起多価 Xe イオンからの極端紫外発光

真杉三郎，中野祐司，石川明幸，村中友子，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：極薄結晶を用いた相対論的多価イオンのチャネリング

中野祐司，真杉三郎，村中友子，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：相対論的多価イオンの干渉性共鳴励起 - 2重共鳴励起の試み-

村中友子，中野祐司，真杉三郎，東俊行，近藤力，高林雄一，畠山温，小牧研一郎，山崎泰規，高田栄一，村上健：He-like 重イオンのコヒーレント共鳴励起の観測

日本物理学会秋季大会 2004年9月12日～15日（青森大学）

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 IV

的場史朗，坂田博和，小高裕一，田沼肇：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 V

神野智史，高雄智治，小俣有紀子，佐藤絢子，安田有里，花田勝彦，田沼肇，東俊行，城丸春夫，奥野和彦，小林信夫：静電型イオン蓄積リングの開発 IV -重イオン蓄積テスト-

真杉三郎，中野祐司，石川明幸，村中友子，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：極薄結晶を用いた相対論的多価イオンのチャネリング

近藤力，真杉三郎，中野祐司，村中友子，東俊行，畠山温，小牧研一郎，山崎泰規，高田栄一，村上健：極薄結晶を用いた相対論的多価イオンの干渉性共鳴励起

東俊行，村中友子，真杉三郎，中野祐司，近藤力，畠山温，小牧研一郎，山崎泰規，高田栄一，村上健：相対論的多価イオンの干渉性共鳴励起 XII：2重共鳴励起の試み，

田沼肇：孤立多価原子イオンからの放射スペクトル測定

第8回 AMO 懇談会 2004年11月20日（東京大学・本郷キャンパス）

東俊行：結晶光子場による多価重イオンのコヒーレント共鳴励起

COE コヒーレント光科学セミナー 2004 年 12 月 16 日 (電通通信大学)

東俊行：結晶光子場による多価重イオンのコヒーレント共鳴励起

2004 年度宇宙空間原子分子過程研究会 2005 年 1 月 6 日～7 日 (JAXA 宇宙科学研究本部)

田沼肇：重粒子衝突における形状共鳴

日本物理学会年次大会 2005 年 3 月 27 日～29 日 (東京理科大学・野田キャンパス)

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  $H^+$  および  $H_3^+$  の移動度

小俣有紀子，神野智史，高雄智治，佐藤絢子，安田有里，花田勝彦，田沼肇，東俊行，城丸春夫，奥野和彦，小林信夫：静電型イオン蓄積リングの開発 V 周回ビームの精密制御

中野祐司，真杉三郎，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：非チャネルリング条件下での 3 次元コヒーレント共鳴励起 I

近藤力，真杉三郎，中野祐司，東俊行，畠山温，小牧研一郎，山崎泰規，高田栄一，村上健：非チャネルリング条件下での 3 次元コヒーレント共鳴励起 II

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 I：EUV 発光の価数依存性

田沼肇，大橋隼人，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 II：EUV 発光の標的依存性

高雄智治，神野智史，小俣有紀子，佐藤絢子，安田有里，花田勝彦，田沼肇，東俊行，城丸春夫，奥野和彦，小林信夫：原子分子衝突のための静電型イオン蓄積リングの開発

## 国際会議

9th International Symposium on Electron Beam Ion Sources and Traps and Their Applications, Tokyo Metropolitan University, Japan, April 15-17, 2004

T. Azuma, H. Tanuma, H. Shiromaru : Present and future projects of TMU Atomic Physics Group

6th International Conference on Dissociative Recombination, Mosbach, Germany, July 12-16, 2004

T. Azuma : Development of a liquid-nitrogen-cooled electrostatic ion storage ring

21th International Conference of Atomic Collisions in Solids, Genova, Italy, July 4-9, 2004

T. Azuma, S. Masugi, T. Muranaka, C. Kondo, A. Hatakeyama, Y. Yamazaki, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada, T. Murakami : Stark effect in helium-like heavy ions channeling in a crystal observed through resonant coherent excitation

T. Azuma, S. Masugi, T. Muranaka, C. Kondo, A. Hatakeyama, Y. Yamazaki, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada, T. Murakami : Angular distribution of high energy Ions transmitted through a thin crystal in the planar channeling condition

C. Kondo, Y. Takabayashi, A. Hatakeyama, T. Muranaka, T. Azuma, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada, T. Murakami : X-ray yields from high-energy heavy ions channeled through a crystal: their crystal thickness and projectile dependence

12th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions, Vilnius, Lithuania, 6–11 September, 2004

T. Kaneyasu, T. Azuma, K. Okuno : Collision dynamics of MCI-molecule systems studied by multi-coincidence technique

H. Tanuma, H. Ohashi, E. Shibuya, N. Kobayashi, T. Okuno, S. Fujioka, H. Nishimura, K. Nishihara : EUV emission spectra from excited multiply charged xenon ions produced in charge-transfer collisions

8th International Workshop on Fast Ion-Atom Collisions, Debrecen, Hungary, September 1–3, 2004

T. Azuma : Relativistic channeling of highly energetic ions through crystals

Joint Meeting of 14th International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion & 4th International Conference on Atomic and Molecular Data and Their Applications, Toki, Japan, 5–8 October, 2004

H. Tanuma, H. Ohashi, E. Shibuya, N. Kobayashi, T. Okuno, S. Fujioka, H. Nishimura, K. Nishihara : Observation of EUV emission from multiply charged xenon ions in charge exchange collisions with rare gas atoms

15th International Workshop on Inelastic Ion-surface Collisions, Ise-Shima, Japan, October 17–22, 2004

T. Azuma : Development of a liquid-nitrogen-cooled electrostatic ion storage ring at TMU

3rd International EUVL Symposium, Miyazaki, Japan, 1–4 November, 2004

H. Tanuma, H. Ohashi, E. Shibuya, T. Okuno, S. Fujioka, H. Nishimura, K. Nishihara : Charge-state dependence of EUV emission spectra from multiply charged xenon ions

EUV Source Modeling Workshop, Miyazaki, Japan, 4 November, 2004

H. Tanuma : EUV emissions from charge-selected Xe ions using charge-transfer collisions in the ion-beam experiments (Which charge-states of Xe ions do contribute to the emission around 13.5 nm?)

#### 4) 学会誌等

田沼 肇 : 低温ヘリウム気体中のイオン移動度, 日本物理学会誌 **59** (2004) 883–887.

# 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衛星などを用いて、銀河系内外のさまざまな天体の研究を進める一方で、2005年夏に打ち上げが迫ったAstro-E2衛星の開発では、本研究室はマイクロカロリメータ(XRS)、フィルターホイール(FW)、X線望遠鏡(XRT)の地上キャリブレーションにおいて主要な役割を果たした。Astro-E2以降を目指した観測機器の開発も引き続き進めており、特にX線望遠鏡の開発では、Astro-E2のX線望遠鏡の2倍の空間分解能をもつモデルの開発に成功した。

### 1) 銀河・銀河団の観測

等温性のよい銀河団A1060のChandraによる観測データの解析を行い、高温ガスの密度分布をモデルによらない独自の方法で導出した。この結果から、銀河団中の高温ガスの全質量を求めることに成功した。この手法は、等温性の高い他の銀河団にも適用できる方法として注目される。また、より高い統計精度をもつXMM-Newton衛星のデータを用いて、さらに詳細なデータ解析を進めている。

ペルセウス座銀河団周辺部にある電波銀河IC310の周囲をXMM-Newton衛星で観測し、IC310のエネルギースペクトルを導出するとともに、この領域でガスの温度が約1/2に低下していることを明確に示した。IC310を含む直径200 kpcほどの領域がサブ銀河団を形成し、ペルセウス本体に落ち込んでいると考えられる。

またChandraにより4つの渦巻き銀河からなる銀河群HCG80を観測し、1つの銀河ではスターバースト活動に伴うと思われるガスの流れ出しが10 kpc以上にも及ぶことを発見した他、銀河群内の高温ガスの量に厳しい制限を与えた。

### 2) 強磁場激変星の質量降着領域における共鳴散乱の効果

強磁場激変星のX線放射領域のプラズマには動径方向に速度勾配があるため、プラズマからの特性X線は動径方向には共鳴散乱されず、磁極に沿った方向から白色矮星を眺めた場合には輝線強度が強められることが期待される。実際に「あすか」衛星で観測した7個のPolar、12個のIntermediate polar(IP)を調べたところ、Polarにはそのような傾向が見られることがわかった。一方でIPにはこの傾向が見られない。このことはpolarとIPでX線放射領域の幾何学的構造がかなり異なっていることを示唆している。

### 3) 強磁場激変星AE Aqrの観測

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、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 $2-5 \times 10^{10}$  cmと連星軌道程度のスケールに広がっており、少なくとも白色矮星に降着していないことだけは明らかにすることができた。

### 4) TES型カロリメータの開発

2010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) 型力

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  $\sim 1000$  素子の多ピクセルアレイを目指しており、実現すれば Astro-E2 衛星に搭載される 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、世界にさきがけて 256 ピクセルのマッシュルーム形状のビスマス吸収体をつけた素子の試作を行ない、X 線検出を行なうことに成功した。また、オランダの SRON 研究所とも TES 型カロリメータの開発に関して研究協力を開始し、宇宙研、SII、VTT を交えた研究会を開催した。

#### 5) マグネティックカロリメータの開発

Er をドーピングした素材は、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、磁化変化を読み出すためのグラディオメータタイプの SQUID 素子の設計/製作などを行なったほか、宇宙研に設置されている断熱消磁冷凍機での測定環境の整備などを行なった。

#### 6) 断熱消磁冷凍器の開発

TES カロリメータの動作環境として、理研の三原が設計したものを都立大で組み上げた、コンパクトな断熱消磁冷凍器の開発を行なっている。TES カロリメータを SQUID を組み込んで 100 mK 以下まで冷却、外部から薄い X 線透過窓を通して X 線発生装置からの 2 次蛍光 X 線を照射して、4–10 keV の X 線に対してエネルギー分解能 10–15 eV を得た。また、磁気冷凍特有の緩やかな時間変動を補正する新しい温度制御システムを導入し、 $\sim 4$   $\mu$ K rms という高い温度安定性を実現した。断熱消磁を行なうための磁性体製作についても、クロムカリウムミョウバンを用いたものの試作を行なった。

#### 7) 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、今年度から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開始した。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。実験は 2004 年 8 月と 2005 年 3 月の 2 回に分けて行なわれ、X 線スペクトルの取得に成功した。観測されたスペクトルを説明するには 4 温度以上の成分が必要であり、実験装置内で中心にいくほど温度が高くなる電子温度勾配として解釈される。また、電離した鉄が存在しており、プラズマが真空槽をスパッタしていることが定量的に示された。この研究成果は論文としてまとめられ、詳細なプラズマ診断結果についても論文を準備中である。

#### 8) 高い空間分解能を有する X 線望遠鏡の開発

前年度に引続き「薄板多重積層型 X 線望遠鏡」の高解像度化に取り組んだ。反射鏡の上下段を一体にして加工したアラインメントプレートに 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 衛星の 1.9 分角を凌ぐ値である。今後は反射鏡の位置精度を更に高めるとともに、個々の反射鏡の鏡面精度の向上を目指す。

#### 9) Astro-E2 衛星の打ち上げへ向けて

Astro-E2 衛星は 2005 年夏の打ち上げへ向けて試験が進められた。都立大グループはエネルギー分解能 6 eV を実現する主検出器マイクロカロリメータ (XRS) とフィルタ・ホイール (FW) の開発、X 線望遠鏡 (XRT) の地上較正試験、観測機器間のアラインメント調整、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。望遠鏡の光軸は XRS と 4 台の XIS の間で、最大でも 1.1 分角のずれにとどまっている。これは観測効率 95% 以上を保障するものであり、すべての観測機器の観測効率を同時に最適化することに成功した。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、計画が最終的にまとめられた。ソフトウェア開発については石崎が中心となって、主に XRS 用の衛星から送信されるデータパケットを天文観測で用いる FITS 形式に変換する部分と、キャリブレーション情報を付加する部分に関して、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。

## 10) 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 1 月に宇宙研へ提案書を出した他、観測可能性を検討する論文を PASJ へ発表し、小規模なワークショップも実施した。

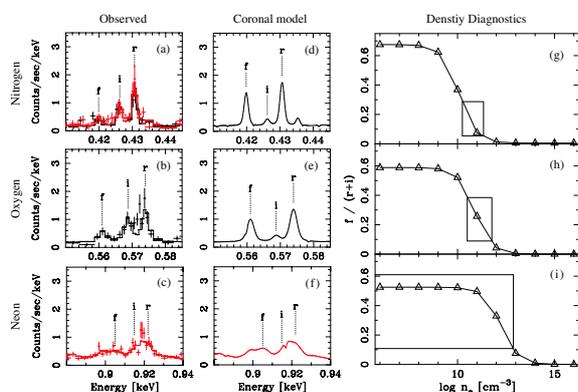


図 1: XMM-Newton による AE Aqr の N, O, Ne の輝線スペクトル (a-c)、低密度極限での光学的に薄い熱的プラズマからのモデルスペクトル (d-f)、以上の比較によるプラズマ密度の許容範囲 (g-i)。

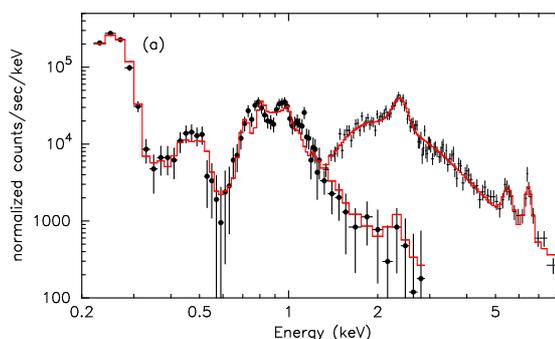


図 2: TES カロリメータ (0.2–3.0 keV) および SiLi 検出器 (1.3–8 keV) で得られた X 線スペクトル。0.3 keV および 0.6 keV 付近に見えている構造は、ADR の入射窓による C および O の K 殻吸収端によるものである。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

K. Misaki, Y. Hidaka, M. Ishida, R. Shibata, A. Furuzawa, Y. Haba, K. Itoh, H. Mori, H. Kunieda: X-ray telescope onboard Astro-E. III. Guidelines to performance improvements and optimization of the ray-tracing simulator, *Applied Optics* **44** (2005) 916–940

H. Mori, R. Iizuka, R. Shibata, Y. Haba, A. Hayakawa, A. Hayashi, C. Inoue, H. Inoue, M. Ishida, A. Itoh, K. Itoh, H. Kunieda, Y. Maeda, K. Misaki, M. Naitou, S. Okada, T. Shimizu, and Y. Yokoyama: Pre-Collimator of the Astro-E2 X-Ray Telescopes for Stray-Light Reduction, *Publ. Astron. Soc. Japan* **57** (2005) 245–257

Y. Fukazawa, K. Makishima, and T. Ohashi: ASCA Compilation of X-Ray Properties of Hot Gas in Elliptical Galaxies and Galaxy Clusters: Two Breaks in the Temperature Dependences, *Publ. Astron. Soc. Japan* **56** (2004) 965–1009

- K. Yoshikawa, K. Dolag, Y. Suto, S. Sasaki, N. Y. Yamasaki, T. Ohashi, K. Mitsuda, Y. Tawara, R. Fujimoto, T. Furusho, A. Furuzawa, M. Ishida, Y. Ishisaki, and Y. Takei: Locating the Warm–Hot Intergalactic Medium in the Simulated Local Universe, *Publ. Astron. Soc. Japan* **56** (2004) 939–957
- Y. Suto, K. Yoshikawa, K. Dolag, S. Sasaki, N. Y. Yamasaki, T. Ohashi, K. Mitsuda, Y. Tawara, R. Fujimoto, T. Furusho, A. Furuzawa, M. Ishida, Y. Ishisaki, and Y. Takei: Tracing Bright and Dark Sides of the Universe with X-ray Observations, *J. Korean Astron. Soc.* **37** (2004) 387–392
- R. Fujimoto, Y. Takei, T. Tamura, K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, R. Shibata, T. Ohashi, N. Ota, M. D. Audley, R. Kelley, and C. A. Kilbourne: Probing Warm-Hot Intergalactic Medium Associated with the Virgo Cluster Using an Oxygen Absorption Line, *Publ. Astron. Soc. Japan* **56** (2004) L29–L34
- N. Ota, U. Morita, T. Kitayama, T. Ohashi: Chandra Observation of a Group of Galaxies HCG 80: Does the Spiral-Only Group Have Hot Intragroup Gas?, *Publ. Astron. Soc. Japan* **56** (2004) 753–764
- A. Hayakawa, T. Furusho, N. Y. Yamasaki, M. Ishida, T. Ohashi: Inhomogeneity in the Hot Intracluster Medium of Abell 1060 Observed with Chandra, *Publ. Astron. Soc. Japan* **56** (2004) 743–752
- Y. Terada, M. Ishida, and K. Makishima: The Anisotropic Transfer of Resonance Photons in Hot Plasmas on Magnetized White Dwarfs, *Publ. Astron. Soc. Japan* **56** (2004) 533–564
- T. Ishikawa, M. Ishida, Y. Ishisaki, T. Ohashi, N. Y. Yamasaki: ASCA Observations of the Two Nearest Globular Clusters, M 4 and NGC 6397, *Publ. Astron. Soc. Japan* **56** (2004) 453–464
- K. Masai and M. Ishida: Non-LTE Curves of Growth of X-Ray Absorption Lines, *Astrophys. J.* **607** (2004) 76–83
- Y. Takei, K. Tanaka, R. Fujimoto, Y. Ishisaki, U. Morita, T. Morooka, T. Oshima, K. Futamoto, T. Hiroike, T. Koga, K. Mitsuda, T. Ohashi, N. Y. Yamasaki, N. Iyomoto, T. Ichitsubo, K. Sato, T. Fujimori, K. Shinozaki, S. Nakayama, K. Chinone: Performance of a bridge-type TES microcalorimeter, excess noise characteristics and dependence of sensitivity on current, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **523**, Issue 1-2 (2004) 136–146
- 2) 国際会議報告**
- Y. Ishisaki, T. Ohashi, T. Oshima, U. Morita, K. Shinozaki, K. Sato, K. Mitsuda, N. Yamasaki, R. Fujimoto, Y. Takei, H. Sato, N. Takahashi, T. Homma, T. Osaka: Development of a microcalorimeter array for the Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor (DIOS) mission, *SPIE* **5501** (2004) 123–134
- A. Itoh, Y. Haba, A. Hayakawa, R. Iizuka, C. Inoue, H. Inoue, M. Ishida, K. Itoh, H. Kunieda, Y. Maeda, K. Misaki, H. Mori, M. Naitou, S. Okada, R. Shibata, T. Shimizu, and Y. Yokoyama: Ground-based x-ray calibration of the Astro-E2 x-ray telescope: I. With pencil beam, *SPIE* **5488** (2004) 93–102
- K. Itoh, H. Kunieda, Y. Maeda, K. Misaki, P. J. Serlemitsos, R. Shibata, B. Budau, W. Burkert, M. J. Freyberg, G. Hartner, K. -W. Chan, Y. Haba, A. Hayakawa, R. Iizuka, C. Inoue, H. Inoue, M. Ishida, A. Itoh, J. P. Lehan, H. Mori, M. Naitou, S. Okada, T. Okajima, T. Shimizu, Y. Soong, and Y. Yokoyama: Ground-based x-ray calibration of the Astro-E2 x-ray telescope: II. With diverging beam at PANTER *SPIE* **5488** (2004) 85–92

M. Ishida, K. Morio, Y. Ueda: Possibility of a White Dwarf as the Accreting Compact Star in CI Cam (XTE J0421+560), Compact Binaries in the Galaxy and Beyond, IAU Colloquium 194 (2004) 104-105

### 3) 学会講演

日本天文学会 2004 年春季年会 2004 年 3 月 21 日 ~ 3 月 24 日 (名古屋大学東山キャンパス)

大橋隆哉 (東京都立大): Astro-E2 特別セッション「X 線天文衛星 Astro-E2 の拓く宇宙物理学」サイエンス 1

須藤靖、吉川耕司 (東大理)、大橋隆哉、石田學、佐々木伸、石崎欣尚 (都立大理)、山崎典子、満田和久、藤本龍一、古庄多恵 (宇宙研)、田原讓、古澤彰浩 (名大理) 他 DIOS グループ: DIOS で探る宇宙の大構造とダークバリオン (T11a)

吉川耕司、須藤靖 (東大理)、大橋隆哉、石田學、佐々木伸、石崎欣尚 (都立大理)、満田和久、山崎典子、藤本龍一、古庄多恵 (JAXA 宇宙研)、田原讓、古澤彰浩 (名大理)、他 DIOS グループ: 近傍宇宙におけるダークバリオン分布とその観測可能性 (T12a)

森田うめ代、太田直美、大橋隆哉 (都立大理)、北山哲 (東邦大学): Chandra 衛星による Spiral-only group HCG80 の観測 (T14a)

尾崎正伸、渡辺伸、佐藤悟朗、大貫宏祐、狐塚正樹 (宇宙研)、寺田幸功 (理研)、石崎欣尚 (都立大理)、国分紀秀、高橋弘充、村島未生 (東大理)、田代信、鈴木雅也 (埼玉大理): Astro-E2 用放射線環境モンテカルロシミュレータの枠組

大橋隆哉、石田學、佐々木伸、石崎欣尚 (都立大理)、山崎典子、満田和久、藤本龍一、古庄多恵 (JAXA 宇宙研)、田原讓、古澤彰浩 (名大理)、須藤靖、吉川耕司 (東大理) 他 DIOS グループ: DIOS 衛星計画

石崎欣尚、森田うめ代、篠崎慶亮、佐藤浩介、大橋隆哉 (都立大理)、満田和久、山崎典子、藤本龍一、古庄多恵、大島泰、竹井洋 (ISAS/JAXA) 他 DIOS グループ: DIOS 衛星計画 XSA (X-ray Spectrometer Array) 検出器の開発

井上智暁、早川彰、清水智央、林篤志、石田学 (東京都立大)、伊藤啓、前田良知、國枝秀世 (宇宙科学研究所): 高角分解能多重薄板積層型 X 線望遠鏡の研究・開発 III

内藤聖貴、田原讓、山下廣順 (名古屋大学 理)、伊藤昭治、前田良知、伊藤啓、森英之、飯塚亮、井上裕彦、岡田俊策、横山裕士、幅良統、國枝秀世 (JAXA/ISAS)、早川彰、井上智暁、林篤志、清水智央、石田學 (東京都立大学)、見崎一民 (GSFC/NASA): ASTRO-E2 搭載 X 線望遠鏡の特性測定と高性能化への展望

伊藤昭治、幅良統、伊藤啓、森英之、飯塚亮、井上裕彦、岡田俊策、横山裕士、前田良知、國枝秀世 (宇宙航空研究開発機構)、早川彰、井上智暁、林篤志、清水智央、石田學 (東京都立大学)、見崎一民 (NASA/GSFC)、内藤聖貴 (名古屋大) 他 Astro-E2 XRT team: Astro-E2 搭載 X 線望遠鏡の性能評価と期待される性能

横山裕士、森英之、前田良知、伊藤啓、飯塚亮、伊藤昭治、井上裕彦、岡田俊策、國枝秀世 (ISAS/JAXA)、石田学、早川彰、井上智暁、林篤志、清水智央 (都立大学)、内藤聖貴 (名古屋大学)、見崎一民 (GSFC/NASA): Astro-E2 搭載用 X 線望遠鏡の反射鏡単体での光学特性

古庄多恵 (ISAS/JAXA)、石崎欣尚、森田うめ代 (都立大理)、竹井洋 (ISAS/JAXA)、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)、満田和久、藤本龍一 (ISAS/JAXA): Astro-E2 衛星搭載カロリメータ検出器 XRS の地上較正実験

佐藤浩介、石川輝、石崎欣尚、大橋隆哉 (都立大理)、大島泰、山崎典子 (宇宙機構/宇宙研): 宇宙 X 線観測を目指したマグネティックカロリメータの研究

日本天文学会 2004 年秋季年会 2004 年 9 月 20 日 ~ 9 月 23 日 (岩手大学上田キャンパス)

佐藤 浩介、大橋 隆哉 (都立大理)、古庄 多恵、山崎 典子 (JAXA 宇宙研)、松下 恭子 (東京理科大): ペルセウス座銀河団南西領域の高温ガスの構造

古庄多恵 (ISAS/JAXA)、Alexis Finoguenov (MPE)、佐藤浩介、大橋隆哉 (都立大理): XMM-Newton 衛星によるペルセウス座銀河団の広域観測

早川 彰 (都立大理)、山崎 典子、古庄 多恵 (JAXA/ISAS)、石田 学、大橋 隆哉 (都立大理): A1060 銀河団の高温ガスと重力質量の分布

石崎欣尚、森田うめ代、大橋隆哉 (都立大)、満田和久、山崎典子、藤本龍一、古庄多恵、竹井洋 (ISAS/JAXA)、山本幹生 (宮崎大)、Richard L. Kelley, Kevin R. Boyce, Greg V. Brown, Jean Cottam, Caroline A. Kilbourne, F. Scott. Porter (NASA/GSFC), and XRS team: Astro-E2 衛星搭載 X 線マイクロカロリメータ XRS の衛星搭載状況の報告

古庄多恵、竹井洋、藤本龍一、満田和久 (ISAS/JAXA)、石崎欣尚、森田うめ代 (都立大理)、山本幹生 (宮崎大)、Richard L. Kelley, Kevin R. Boyce, Greg V. Brown, Jean Cottam, Caroline A. Kilbourne, F. Scott Porter (NASA/GSFC), and XRS team: Astro-E2 衛星搭載カロリメータ検出器 XRS の地上較正実験 II

森田うめ代、石崎欣尚、藤森玉行、山川善之、大橋隆哉 (都立大)、竹井洋、吉田清典、満田和久、山崎典子、藤本龍一 (宇宙研)、美濃浦優一、佐藤裕崇、本間敬之、逢坂哲彌、高橋徳行、庄子習一 (早稲田大)、黒田能克、大西光延 (三菱重工業): TES 型 X 線マイクロカロリメータの開発 VIII—256 ピクセルアレイの製作と性能評価—

吉田 清典、吉野友崇、竹井洋、満田和久、山崎典子、藤本龍一 (宇宙研)、佐藤浩介、山川善之、大島泰、石崎欣尚、大橋隆哉 (都立大)、庄子習一、美濃浦優一、佐藤裕崇、本間敬之、逢坂哲彌 (早稲田大): 抵抗加熱蒸着による X 線マイクロカロリメータ用ピスマス吸収体の製作

篠崎慶亮、星野晶夫、石崎欣尚、大橋隆哉 (都立大)、三原建弘 (理化学研究所)、満田和久 (宇宙航空研究開発機構)、八木康之 (産総研): 断熱消磁冷凍機を用いた TES 型マイクロカロリメータの X 線測定試験

## 国内研究会

第 5 回高宇連研究会「高エネルギー天体物理学の新展開」、  
東京都立大学 国際交流会館 大会議室、2004 年 10 月 1-2 日

石崎欣尚 (都立大): TES 型マイクロカロリメータを用いた核融合プラズマ装置の軟 X 線観測 (口頭)

篠崎慶亮 (都立大): TES 型マイクロカロリメータを用いた核融合プラズマ装置の軟 X 線観測 (ポスター)

第 5 回宇宙科学シンポジウム、宇宙科学研究本部/JAXA、2005 年 1 月 6-7 日

大橋隆哉 (都立大理): NeXT による銀河団観測 (口頭)

須藤靖 (東大理)、DIOS チーム (都立大理、名大、東邦大理、京大理、東工大理、ISAS/JAXA): 広視野 X 線分光小型衛星計画 DIOS – Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor – (口頭)

大橋隆哉 (都立大理)、DIOS チーム (名大、東大理、東邦大理、京大理、東工大理、ISAS/JAXA): 広視野 X 線分光小型衛星計画 DIOS – Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor – (ポスター)

古庄多恵、藤本龍一、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)、太田直美 (理研)、Kevin R.Boyce, Greg V.Brown(NASA/GSFC): Astro-E2 衛星搭載 X 線カロリメータ分光装置 XRS の状況報告 (ポスター)

NeXT SXS チーム (ISAS/JAXA、都立大・理、早稲田大・理工、SRON(オランダ)): NeXT 衛星搭載高エネルギー分解能軟 X 線撮像システム SXS (ポスター)

前田良知、國枝秀世 (ISAS/JAXA)、阿部和弘、金子齊 (日飛)、石田学 (都立大理): NeXT 搭載用伸展式光学台 (EOB) の開発 I I.

平成 16 年度 逆磁場ピンチ研究会、産業技術総合研究所 つくば中央第 2 事業所、2005 年 2 月 28 日

篠崎慶亮、星野晶夫、石崎欣尚、森田うめ代、大橋隆哉 (都立大理)、三原建弘 (RIKEN)、満田和久 (JAXA/ISAS)、八木康之、平野洋一、島田壽男、小口治久 (産総研)、田中啓一 (SIINT): TPE-RX における TES 型マイクロカロリメータによる軟 X 線観測

## 国際会議

Japanese-German Ringberg Workshop on “X-ray Studies of Galaxy Clusters and Deep X-ray Surveys”  
Ringberg, Germany, May 2-5, 2004

F. Furusho, T. Ohashi, A. Hayakawa, and N. Yamasaki: XMM and Chandra observations of nearby poor clusters

T. Ohashi: Cluster science from Astro-E2

SPIE Europe International Symposium, Astronomical Telescopes,  
UV-GAMMA RAY SPACE TELESCOPE SYSTEMS, Glasgow, Scotland, UK, 21-25 June 2004

K. Mitsuda (ISAS/JAXA) T. Ohashi, M. Ishida, Y. Ishisaki (Tokyo Metropolitan University), Y. Tawara, A. Furuzawa (Nagoya Univ.), Y. Suto, K. Yoshikawa, (Univ. of Tokyo), N. Y. Yamasaki, R. Fujimoto, T. Furusho (ISAS/JAXA) S. Sasaki (Tokyo Metropolitan University): The small x-ray mission (DIOS) to investigate the warm-hot intergalactic medium [5488-54]

K. Itoh (ISAS), K. Misaki (NASA/GSFC), R. Shibata, (Nagoya Univ.), Y. Maeda, H. Kunieda (ISAS/JAXA) P. J. Serlemitsos (NASA/GSFC), W. Burkert, G. Hartner, B. Budau, M. J. Freyberg (MPI), Y. Haba, H. Mori, R. Iizuka (ISAS/JAXA), A. Hayakawa (Tokyo Metropolitan Univ.),

A. Itoh (ISAS/JAXA), C. Inoue (Tokyo Metropolitan Univ.), H. Inoue, S. Okada, Y. Yokoyama (ISAS/JAXA), A. Hayashi, T. Shimizu, M. Ishida (Tokyo Metropolitan Univ.), M. Naitou (Nagoya Univ.), Chan, Y. Soong (NASA/GSFC): Ground-based x-ray calibration of the Astro-E2 X-ray telescope: II. with diverging beam [5488-68]

A. Itoh, Y. Maeda, Y. Haba, K. Itoh, H. Mori, R. Iizuka, H. Inoue, S. Okada, Y. Yokoyama, H. Kunieda (ISAS/JAXA), A. Hayakawa, C. Inoue, A. Hayashi, T. Shimizu, M. Ishida (Tokyo Metropolitan Univ.), M. Naitou (Nagoya Univ.), K. Misaki (NASA/GSFC): Ground-based x-ray calibration of the Astro-E2 X-ray telescope: I. with pencil beam [5488-69]

SPIE Europe International Symposium, Astronomical Telescopes,  
HIGH-ENERGY DETECTORS IN ASTRONOMY, Glasgow, Scotland, UK, 21–25 June 2004

Y. Ishisaki, T. Ohashi, U. Morita, K. Shinozaki, K. Sato (Tokyo Metropolitan Univ.), K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, R. Fujimoto, T. Oshima, Y. Takei (ISAS/JAXA): Development of a microcalorimeter array for the diffuse intergalactic oxygen surveyor (DIOS) mission [5501-18]

35th COSPAR Scientific Assembly, Paris, France, July 18-25, 2004

T. Ohashi, M. Ishida, Y. Ishisaki, S. Sasaki, K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, R. Fujimoto, T. Furusho, Y. Tawara, A. Furuzawa, Y. Suto, and K. Yoshikawa: DIOS: Diffuse intergalactic oxygen surveyor

Joint Meeting of “14th International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion”  
and “4th International Conference on Atomic and Molecular Data and Their Applications”,  
Toki, Japan, October 5–8 2004

K. Shinozaki, A. Hoshino, Y. Ishisaki, U. Morita, T. Ohashi (Tokyo Metropolitan Univ.), T. Mihara (RIKEN), K. Mitsuda (JAXA/ISAS), K. Tanaka (SIINT), Y. Yagi, H. Koguchi, Y. Hirano, H. Sakakita (AIST): Soft X-ray Measurement of the TPE-RX Reversed Field Pinch Plasma using High Spectral Resolution TES Microcalorimeter

SRON-ISAS/JAXA/Seiko/VTT meeting, SRON, Utrecht, The Netherlands, January 14–15 2005

Y. Ishisaki and Y. Takei: Properties of electro-deposited and vapor-deposited Bi absorbers

Y. Ishisaki: First results of a hard X-ray microcalorimeter with a Tin absorber

Y. Ishisaki: Diagnostics of the TPE-RX Reversed Field Pinch Plasma with TES microcalorimeters

International Workshop on Cosmology with SZ and X-Ray Observatories, Sophia University, Tokyo,  
Japan, March 5–6 2005

T. Ohashi: Future Japanese X-ray missions and the prospect of cluster studies

#### 4) 学会誌等

大橋隆哉：2005 世界物理年によせて—物理学の魅力を伝える—、日本物理学会誌 **59** (2004) 590

大橋隆哉、久保謙一：2005 世界物理年によせて—「日本の物理学 100 年とこれから」連載開始にあたって日本物理学会誌 **60** (2005) 2

# 計算システムサブグループ

## 1. 研究活動の概要

計算機中央処理装置 (CPU) 構造のデザイン、その FPGA (変更可能なプログラムゲートアレイ) への構築を中心に研究活動を行っている。CPU としては、とくに 1) 並列処理用プロセッサあるいは 2) FPGA を用いたリコンフィギュラブル CPU に対して具体的なデザインあるいは基礎研究を行ってきた。並列処理理論にはさまざまなものがあるが単純でハードウェア実現に比較的オーバーヘッドの少ない C.A.R.Hoare の Communication Sequential Process (CSP) 理論にもとづき CPU デザインを行っている。今までにそのさきがけとして商用のトランスピュータが世に出ているが、我々はこの CPU と同じアセンブリ言語を持つが我々独自のデザインによる構造をもつ CPU を作成し公表した。CSP は Hoare が発表して以来 25 年経過し理論そのものも大きく変貌している。さらに発展した CSP 理論をもとにした新しい CPU デザインを行っていこうと考えている。

高エネルギー物理学実験での計算機応用の支援的研究も行っている。高エネルギー実験は規模が拡大し実験装置、参加メンバーなども他の実験、あるいは他の科学研究とは大いに形態を異にしている。複雑なシステム、装置の設計・製作はもはや物理学者のみでは扱いきれなくなっている。我々もそこである特定の実験の測定器、測定システムの構築に名を連ねさまざまな開発研究を行ってきた。我々はとくにハードウェアトリガー回路で使用される特定用途向 VLSI (ASIC) の開発、読み出し回路で使用される実時間処理システムの開発などを行っている。今後はデータ処理、シミュレーションなどで利用されるグリッド構築の研究にも力をいれていきたいと考えている。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

A. Aloisio et al., The Trigger Chambers of the ATLAS Muon Spectrometer: Production and Tests  
Nuclear Instruments and Methods A535 pp.265-271, 2004

### 2) 国際会議報告

Proceedings of 27th Technical Meeting on Communicating Process Architecture (CPA2004), Oxford, UK, 5-8 September, Concurrent Systems Engineering Series Vol. 62, 2004, IOS Press, pp.361-372

M. Tanaka, N. Fukuchi, Y. Ooki and C. Fukunaga,

Design of a Transputer Core and its Implementation in an FPGA

Proceedings of 10th Workshop on electronics for LHC and future experiments, Boston, MA, USA, 13-17 September, 2004, pp.117-121,

R. Ichimiya et al.,

Irradiation tests of ROHM 0.35um ASIC and Actel Anti-fuse FPGA for the ATLAS muon endcap level-1 trigger system

Proceedings of 10th Workshop on electronics for LHC and future experiments, Boston, MA, USA, 13-17 September, 2004, pp.389-393,

R. Ichimiya et al.,

Radiation qualification of Commercial-Off-The-Shelf LVDS and G-link serializers and deserializers for the ATLAS endcap muon level-1 trigger system

### 3) 学会講演

日本物理学会 第59回年次大会 (2004年春 九州大学箱崎地区)

高田徳之他：ATLAS 実験用 TGC エレクトロニクス開発の現状とビームテストの概要

藤井祐介他：ATLAS 実験用 TGC エレクトロニクスのビームテスト～解析及び性能評価

片岡洋介他：ATLAS 実験用 TGC エレクトロニクスのビームテスト～解析及び TGC ソフトウェア

一宮亮他：ATLAS 実験 TGC エレクトロニクスで使用する半導体の耐放射線試験と評価

### 国際会議

27th Technical Meeting on Communicating Process Architecture CPA2004, Oxford, UK  
5-8 September 2004,

Y. Ooki,

Design of a Transputer Core and its Implementation in an FPGA

10th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Boston, MA, USA,  
13-17 September 2004

C.Fukunaga,

Irradiation tests of ROHM 0.35um ASIC and Actel Anti-fuse FPGA for the ATLAS muon endcap level-1 trigger system,

C. Fukunaga,

Radiation Qualification of Commercial-Off-The-Shelf LVDS and G-link serializers and deserializers for the ATLAS endcap muon level-1 trigger system

IEEE 2004 Nuclear Science Symposium (NSS) and Medical Imaging Conference (MIC)  
and Symposium on Nuclear Power Systems, Rome, Italy, 19-22 October 2003

C.Fukunaga,

Radiation qualification of Electronics Components used for the ATLAS Level 1 Muon Endcap Trigger System

# 光物性サブグループ

## 1. 研究活動の概要

### 1) 局所帯磁率の温度依存性を利用した、高密度近藤効果の研究

「高密度近藤効果」を示すと言われる物質の研究が開始されてから、すでに 20 年以上が経過しているが、未だにその満足な描像は得られていない。本研究では  $Ce_xLa_{1-x}Ni$  ( $x = 1.0, 0.9, 0.8, 0.7, 0.4$ ) を試料とし、内殻励起磁気円二色性による  $4f$  磁気モーメント・帯磁率の評価と SQUID による帯磁率を比較した。バルク近藤温度より高温では両者の振る舞いはほぼ一致しているが、低温では  $4f$  局所帯磁率は Curie-Weiss 的振る舞いを示した。Weiss 温度を見積もると、近藤効果を示さない  $x = 0.4$  の場合は正の値を示し一見「強磁性」的であった。しかし濃度が大きくなるに従い、負の Weiss 温度の絶対値は増大していくが、いずれもバルク近藤温度よりはるかに低温である。このことから「高密度近藤効果」とは、希薄近藤効果で期待される局所的な近藤温度を上昇させる効果であると解釈することもできるが、そうなるためには隣接する  $4f$  電子間の反強磁性的相互作用が必要である。

### 2) フラーレンピーポッドの高分解能光電子分光

$C_{60}$  を内包した単層カーボンナノチューブ (SWNT) は  $C_{60}$  フラーレンピーポッド (PPD) と呼ばれ、特異な性質が理論的に予想されている。そこで、PPD と SWNT の高分解能光電子分光を、高エネルギー加速器研究機構フォトンファクトリーと広島大学放射光科学研究センターで行った。その結果、内包された  $C_{60}$  の電子状態は固体の  $C_{60}$  のそれとほとんど変わらず、理論的に指摘されていた LUMO バンドのフェルミ準位直下への沈み込みは観測されなかった。また、分解能 3.6 meV で測定されたフェルミ準位付近のスペクトル関数は、PPD と SWNT とともにエネルギー ( $\omega$ ) に対して  $\omega^{0.4}$  のべき乗則に従い、内包系でも SWNT の朝永・ラッティンジャー液体的な性質は保持されることが分かった。

### 3) 軟 X 線放射光のみによる 2 次高調波発生を試み

As の  $3p$  内殻吸収端 (約 142 eV) における分散効果を利用して、位相整合条件を満足させ、2 光子ビームによる第 2 高調波発生テスト実験を行った。軟 X 線放射光をビームスプリッターで 2 つに分割し、それらを GaAs 薄膜にたいして適当な角度  $2\theta$  をなして照射する。このとき、2 つのビームが重なりかつ  $n \cos \theta = 1$  ( $n$  は屈折率) を満足するときのみ第二高調波が発生する。しかしこの効果は非常に微弱であるので、2 つのビーム位置をピエゾ素子で変調し特殊な変調法を用いて微小な 2 次高調波の検出を試みた。実験結果は明瞭な波長依存性とビーム位置依存性を示しており、2 次高調波の発生を強く示唆するが、現在、再現性についてチェックしている。なお、このエネルギー領域にはレーザーが存在しないので、この 2 次高調波発生は世界記録への挑戦である。

### 4) Gd 薄膜の発光磁気円二色性測定

Si 基板上に蒸着した Gd 薄膜を試料に用いて、Gd  $4d$ - $4f$  共鳴励起発光磁気円二色性 (MCD) 測定を行った。発光 MCD スペクトルの温度依存性、入射光角度依存性を測定することによって、スペクトルから磁化を定量的に評価する方法を初めて確立した。発光 MCD の温度および入射光角度依存性は、入射光の飽和効果および発光の自己吸収効果を考慮することで見事に説明することができる。発光 MCD 測定は、これまで広く行われてきた吸収 MCD 測定よりもはるかにバルク敏感であるため、放射光を用いた磁化測定の有力な手段となることが期待される。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

T. Miyahara and H. Shiozawa: Interpretation of difference between bulk magnetic susceptibility and "local magnetic susceptibility" detected by core excitation magnetic circular dichroism, J. Elec. Spectr. & Related Phenom. **136** (2004) 117-123.

H. Shiozawa, H. Ishii, H. Kataura, H. Yoshioka, H. Kihara, Y. Takayama, T. Miyahara, S. Suzuki, Y. Achiba, T. Kodama, M. Nakatake, T. Narimura, M. Higashiguchi, K. Shimada, H. Namatame and M. Taniguchi: Photoemission spectroscopy on single-wall carbon nanotubes, Physica **B 351** (2004) 259-261.

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

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

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

### 2) 学会講演

日本物理学会第 59 回年次大会 2004 年 3 月 27 日～3 月 30 日 (九州大学箱崎キャンパス)

木原英夫、塩澤秀次、石井廣義、片浦弘道、高山泰弘、宮原恒昱、兒玉健、鈴木信三、阿知波洋次、吉岡英生、東口光晴、仲武昌史、島田賢也、生天目博文、谷口雅樹：フラーレンピーポッドの光電子分光

塩澤秀次、木原英夫、石井廣義、片浦弘道、高山泰弘、宮原恒昱、兒玉健、鈴木信三、阿知波洋次、吉岡英生、東口光晴、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及びフラーレンピーポッドの光電子分光 II

片浦弘道、大窪清吾、上野太郎、宮田耕充、鈴木信三、阿知波洋次、塚越一仁：孤立単層カーボンナノチューブ集合体の共鳴ラマン散乱

第 51 回応用物理学関連連合講演会 2004 年 3 月 28 日～3 月 31 日 (東京工科大)

石井廣義 (招待講演): カーボンナノチューブの 1 次元伝導について

日本物理学会 2004 年秋季大会 2004 年 9 月 12 日～9 月 15 日 (青森大学)

中村聡、宮原恒昱、石井廣義、高山泰弘、吉田徹夫、佐々木直也、佐藤英行、菊池大輔、塩澤秀次、中村哲也、室隆桂之：内殻励起磁気円二色性による Ce 化合物の磁性研究

木原英夫、塩澤秀次、高山泰弘、石井廣義、宮原恒昱、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

吉田徹夫、佐々木直也、中村聡、高山泰弘、石井廣義、宮原恒昱、塩沢秀次：Gd 薄膜の 4d-4f 共鳴発光 MCD スペクトルの入射光角度および温度依存性

片浦弘道、宮田耕充、上野太郎、大窪清吾、鈴木信三、阿知波洋次、塚越一仁：孤立単層カーボンナノチューブ集合体の共鳴ラマン散乱-II

第 18 回 日本放射光学会年会放射光科学合同シンポジウム, 2005 年 1 月 7 日~9 日 (サンメッセ鳥栖)

吉田徹夫、佐々木直也、中村聡、高山泰弘、石井廣義、宮原恒昱、塩沢秀次：Gd 薄膜の軟 X 線発光磁気円二色性の角度依存性

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

中村聡、宮原恒昱、石井廣義、高山泰弘、吉田徹夫、佐々木直也、佐藤英行、菊池大輔、塩澤秀次、中村哲也、室隆桂之、村松康司、岡根哲夫、齊藤裕児：Ce 化合物の軟 X 線吸収磁気円二色性測定

木原英夫、塩澤秀次、佐々木直也、高山泰弘、石井廣義、宮原恒昱、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レンピーポッドの高分解能光電子分光

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

学術振興会第 133 委員会第 181 回研究会, 2004 年 4 月 23 日 (東京理科大)

石井廣義：カーボンナノチューブの 1 次元電気伝導性

ナノ学会第 2 回大会, 2004 年 5 月 9 日~11 日 (一橋記念講堂)

石井廣義、片浦弘道、塩澤秀次、木原英夫、高山泰弘、宮原恒昱、鈴木信三、阿知波洋次、吉岡英生、東口光晴、仲武昌史、島田賢也、生天目博文、谷口雅樹：カーボンナノチューブにおける朝永-ラッティンジャー液体状態の直接観測

東大物性研短期研究会「高輝度放射光を用いた先端科学研究と新たな展開」

2004 年 12 月 9 - 11 日 (東大物性研究所)

石井廣義：カーボンナノチューブの光電子分光

第 22 回 PF シンポジウム, 2005 年 3 月 17 日-18 日 (高エネルギー加速器研究機構)

木原英夫、塩澤秀次、佐々木直也、中村聡、吉田徹夫、高山泰弘、石井廣義、宮原恒昱、鈴木信三、阿知波洋次、兒玉健、片浦弘道、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レンピーポッドの高分解能光電子分光

第 27 回フラレン・ナノチューブ総合シンポジウム

2004 年 7 月 28 日~30 日 (東京大学武田先端知ビル内武田ホール)

宮田耕充、上野太郎、片浦弘道、宮原恒昱、真庭豊、鈴木信三、阿知波洋次：アルコール CVD 法による合成と共鳴ラマン散乱による孤立ナノチューブの同定

第 28 回 フラレン・ナノチューブ総合シンポジウム, 2005 年 1 月 7 日~9 日 (名城大学)

上野太郎、大窪清吾、宮原恒豊、鈴木信三、阿知波洋次、塚越一仁、片浦弘道：異なった構造を持ったカーボンナノチューブのラマンスペクトル

応用物理学会東海支部講演会、2004年12月21日（名古屋工業大学）

石井廣義：カーボンナノチューブと1次元朝永-ラッティンジャー液体の実現

### 国際会議

The Fourteenth International Conference on Vacuum Ultraviolet Radiation Physics (VUV-XIV)  
Cairns, Australia, 19-23, 2004

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>

Y. Takayama, T. Yoshida, S. Nakamura, H. Ootsubo, N. Sasaki, H. Shiozawa, H. Ishii, T. Miyahara and H. Sugawara: Temperature dependence of Magnetic Circular Dichroism of X-Ray Emission for Rare-earth Compounds

Y. Takayama, H. Ootsubo, K. Okamura, H. Shiozawa, H. Ishii, T. Miyahara and H. Sugawara: Resonant Inverse Photoemission of Pr Compounds

The 9th Hiroshima international symposium on synchrotron radiation,  
Hiroshima Synchrotron Radiation Center, Hiroshima, Japan, March 10-11, 2005

H. Ishii: Electronic States of Carbon Nanotubes Studied by High-Resolution Photoemission Spectroscopy using Synchrotron Radiation

H. Kihara, H. Shiozawa, N. Sasaki, S. Nakamura, T. Yoshida, Y. Takayama, H. Ishii, T. Miyahara, T. Kodama, S. Suzuki, Y. Achiba, H. Kataura, H. Yoshioka, M. Higashiguchi, X. Y. Cui, M. Arita, M. Nakatake, K. Shimada, H. Namatame and M. Taniguchi: High-Resolution Photoemission Spectroscopy of Single-Wall Carbon Nanotubes and Fullerene-Peapod

### 3) 学会誌等

石井廣義: 「放射光高分解能光電子分光によるカーボンナノチューブの電子状態」、放射光 17 (2004) 194-200.

石井廣義、片浦弘道: 「カーボンナノチューブにおける1次元電子状態の直接観測」、物理学会誌 59 (2004)703-707.

H. Ishii, H. Kataura, H. Shiozawa, H. Yoshioka, H. Ootsubo, Y. Takayama, T. Miyahara, S. Suzuki, Y. Achiba, M. Nakatake, T. Narimura, M. Higashiguchi, K. Shimada, H. Namatame and M. Taniguchi: Direct Observation of One-dimensional Electronic States in Single-wall Carbon Nanotubes, Photon Factory Activity Report 2003 #21 (2003) Highlights 4-1.

# 電子相関研究サブグループ

## 1. 研究活動の概要

本サブグループが研究対象としている物質系は、希土類などの f-電子を含む強相関電子系物質と微細な構造を持つ磁性体 / 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。さらに、中性子散乱・X線回折の手法を駆使しミクロスコピックな観点から強相関電子現象の研究を行っている。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の探索とその理解をテーマとして、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物性探索を行ってきた。最近では、それらの内、特に充填スクッテルダイト構造を持つ化合物  $RE_4X_{12}$  (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、変化に富んだ興味深い振舞いを見出ししている。平成 16 年度に探索した充填スクッテルダイト化合物のうち、典型的なもの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  $PrOs_4Sb_{12}$ 、四極子相互作用が重要な役割を果たす非磁性秩序と近藤効果を示す  $PrFe_4P_{12}$ 、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の良質単結晶の育成とその基礎物性の評価を重点的に進めた。

Pr-系に関する本年の研究は、各々についてより本質的な情報を得るために、多くの共同研究者との連携により進められた。

#### a) $PrOs_4Sb_{12}$

超伝導機構の解明 –クーパー対の引力の起源– : 超伝導相に隣接する反強四重極秩序相 (AFQ) の存在から期待される四重極揺らぎが引力の起源として類推される。そのため、非弾性中性子散乱実験から低エネルギー磁気励起の観測を行い、励起が波数ベクトル  $= [100] \{ \text{AFQ 相の変調ベクトルと同じ} \}$  の近傍でソフト化することを見出した。更に、そのエネルギーと幅の超伝導転移温度近傍の振舞いを調べることで、四重極揺らぎと超伝導状態の強い相関が示唆された。

#### b) $PrRu_4P_{12}$

この物質の相転移機構の理解にとどまらず、Pr-系スクッテルダイトの示す特異な振舞いを総合的に理解するためにも、c-f 混成効果の寄与、結晶場スキームの知見を得ることが望まれている。そのために有効な中性子非弾性散乱の温度依存性が測定された。結果として、「転移温度以下では格子歪みに伴う二つの非等価な Pr サイトに対応する明白な結晶場励起が見えること」、「そのエネルギーが大きく温度依存すること」、「転移温度以上で線幅が急増すること」、など極めて重要な知見が得られた。

また、この物質の振舞いを理解するうえで重要な参照物質である  $LaRu_4P_{12}$  の de Haas-van Alphen 効果の測定に初めて成功した。結果として、主要なフェルミ面はバンド計算と良く合うことから、 $PrRu_4P_{12}$  のフェルミ面とも類似していることが示唆された。一方、バンド計算から予想され、 $LaRu_4P_{12}$  における相転移を抑制する原因として考えられていた小さなポケットフェルミ面が存在しないことがほぼ確かめられた。このことは、中性子散乱の結果を合わせて考えれば、 $PrRu_4P_{12}$  の相転移の起源として、フェルミ面のネスティング条件に加え c-f 混成効果が欠かせないことを示唆している。

#### c) $PrFe_4P_{12}$

この物質は 6.5K 以下で AFQ 相を持つが、数テスラの磁場により秩序相は抑制され、重い電子状態が実現されることが、これまでの比熱、磁化、電子輸送測定、中性子散乱実験などにより明らかにされてきた。しかし、磁場  $H$  が [111] 方位の近傍に加えられた場合には、AFQ 相境界以上の高磁場でも電子比熱係数に非フェルミ液体的な振舞いが見られること、高磁場磁気抵抗の角度依存性にシャープなピークが観測されるなどの特異な振舞いが観測され、その起源は不明であった。最近、共同研究者の田山、榊原等（物性研）の磁場中比熱測定により、我々の磁気抵抗の角度依存性と良く対応した新しい秩序相の存在が確認された。我々は、更にこの相の特性を調べるために磁気抵抗、ホール効果の詳細な角度依存測定を行い、比熱測定で決められた相境界に対応した構造を見出した。

また、この物質は、共同研究者の日高、小手川、小林（岡山大）等により、約 2.4GPa 以上の圧力を加えることにより、圧力誘起金属-絶縁体転移を引き起こすことが見出された。

d)  $\text{Pr}(\text{Fe}_x\text{Ru}_{1-x})_4\text{P}_{12}$

$\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  の約 6.5K に AFQ 転移と対比して、 $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$  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。本年度の実験の範囲で、元素置換により両方の秩序相共に急激に転移温度は減少し、低濃度で相転移は消失することが確認された。

e)  $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$  で見出された強い磁場をかけても軽くない「重い電子」:

既に昨年度に予備的な報告をした、 $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$  の比熱測定で見出された重い電子状態（電子比熱係数  $\sim 800\text{mJ}/\text{K}^2\text{mol}$ ）について、磁場中比熱と磁場下での電気抵抗測定を行った。これまで、電子比熱係数から見積られる電子の有効的な質量が、真空中での電子質量に比較して 100 倍以上に達する「重い電子状態」が、ある種の Ce や U を含む化合物において見出されているが、磁場を加えると軽くなることが常識とされてきた。しかし、 $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$  の場合、8 テスラの磁場を加えても電子質量がほとんど変わらないという、極めて異常な振舞いが見出された。また、フェルミ液体に期待される、電気抵抗率 ( $\rho$ ) の絶対温度 ( $T$ ) 依存性 ( $\rho = \rho_0 + AT^2$ ) が満たされることを確認し、電子質量を反映する係数  $A$  が、電子比熱係数と矛盾しない大きさを持つことを確認した。更に、14 テスラの磁場を加えても  $A$  はほとんど変化せず、電子質量が軽ならないことを確認した。これは、これまでの「重い電子」物質とは大きく異なる特性であり、「重くなる」機構が本質的に異なる新しいものであることを示唆している。

他に、 $\text{SmFe}_4\text{P}_{12}$ 、 $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$  の純単結晶の育成にも成功して基礎物性の測定を行い、後者について、高温合成焼結体とことなる振舞いを見出した。

（以上のテーマは、徳島大学：菅原助教、本学：光物性研究室、阪大：大貫研究室、菅研究室、北岡研究室、那須研究室、播磨助教、物性研：榊原研究室、松田研究室、上床研究室、辛研究室、岩手大：吉澤研究室、新潟大学：後藤研究室、神戸大：難波研究室、高エネ研：門野グループ、広島大：宇田川研究室、高島研究室、世良研究室、東北大：村上岩佐グループ、岡山大：小林研、イリノイ大：E.E.M. Chia、M.B. Salamon、フロリダ大：B. Andraka との共同研究である。）

さらに以下のような研究を行った。

f) 少数キャリア - 系 Ce モノプニクタイトの電子状態

Ce モノプニクタイト、 $\text{CeX}$  ( $X=\text{P,As,Sb,Bi}$ ) は、複雑な磁氣的現象・伝導現象を示す。これまでの研究により、この系の特異な物性が、そのキャリアー数を基本的なパラメーターとして、p-f 混成効果と磁気ポーラロン効果により統一的に説明できる可能性を明らかにしてきた。その際、特に  $\text{CeP}$  の磁場下・圧力下における磁気相図の中性子散乱および X 線回折による解明が、この系の物理を理解するキー

となったが、磁場下に関しては、これまで磁場の大きさが最大で約 6 T にとどまり情報が不十分であった、そこで、最大で 14T の高磁場下の X 線回折の実験を SPring8 の放射光を用いて行い、磁気構造に伴う特徴的な超格子反射の磁場・温度変化を測定した。その結果、磁場下において、圧力下とほぼ同様な磁気相図が得られることを確認した。このことは、この系における p-f 混成効果と磁気ポーラロン効果の重要性をより強く支持するものである（理研播磨研：勝又紘一，田中良和，阪大：鳴海康雄，田畑吉計，慶応大：下村晋，以上の各氏との共同研究）。

## 2) 微細磁性体の電気伝導

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や超伝導体の組み合わせた複合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特性を創出できるようになった。最近、スピンの方向を揃えた電流（スピン分極電流）を微細な強磁性体に流すことにより、その磁気モーメントの方向を変える“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、工業的観点からの研究が進められているが、基礎物理的観点からも興味深い。これを可能にするには、第一にスピン拡散長より微細な強磁性体と、それと磁気的には独立したスピン分極電流源（である強磁性金属）からなる微細回路が必要になる。本年度は、解析の上で望ましい、構成が単純なスピンバルブ型 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。この素子は、反強磁性層との磁気結合で磁化の向きを固定された強磁性層（ピンド層と呼ばれ、スピン分極電流源となる）と、スピン拡散長より薄い非磁性金属層を介して隣り合わせた、磁化方向が固定されていない強磁性薄膜（フリー層）から構成されている。今回は、その断面寸法が  $0.3\mu\text{m} \times 0.3\mu\text{m}$  の正方形のサンプルを主として測定を行った。CPP 素子は、ハードディスクの磁気記録の高密度化にともない、現在の磁気記録読み取りヘッドでは困難になっている問題を克服する次世代素子としても期待され、精力的に研究が進められている。この場合、スピントランスファー効果は、記録磁化の不安定化をもたらし、ノイズ源となる。本年度の予備的実験の過程で、大きな素子では生じない種々の現象を観測したが、現素子では 30mA までの電流ではスピントランスファー効果に起因する顕著な現象が生じないことを確認した。更に、微小なサイズでより大きな電流密度での新現象の探索を進める。（このテーマは、SRC からの試料提供と支援を受けて研究が進められた）。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

Y. Nakanishi, T. Kumagai, M. Yoshizawa, H. Sugawara and H. Sato: Elastic properties of the filled skutterudite compound  $\text{NdFe}_4\text{P}_{12}$ , Phys. Rev. B **69** (2004) 064409 1-5.

T. Ueda, H. Shishido, S. Hashimoto, T. Okubo, M. Yamada, Y. Inada, R. Settati, H. Harima, A. Galatanu, E. Yamamoto, N. Nakamura, K. Sugiyama, T. Takeuchi, K. Kindo, T. Namiki, Y. Aoki, H. Sato and Y. Onuki: Electronic, Magnetic and Superconducting Properties of Quasi-two Dimensional Compounds  $\text{Ce}_2\text{RhIn}_8$  and  $\text{La}_2\text{RhIn}_8$ , J. Phys. Soc. Jpn. **73** (2004) 649-655.

H. Shishido, N. Nakamura, T. Ueda, R. Asai, A. Galatanu, E. Yamamoto, Y. Haga, T. Takeuchi, Y. Narumi, T. C. Kobayashi, K. Kindo, K. Sugiyama, T. Namiki, Y. Aoki, H. Sato and Y. Onuki:

- Electrical, Thermal and Magnetic Properties of CeNiIn<sub>4</sub>, *J. Phys. Soc. Jpn.* **73** (2004) 664-668.
- G. Oomi, T. Kagayama, Y. Aoki, H. Sato, Y. Onuki, H. Takahashi and N. Mori: High pressure study of anomalous electronic states of Y<sub>1-x</sub>U<sub>x</sub>Pd<sub>3</sub>, *J. Phys.: Condens. Matter* **16** (2004) 3385-3400.
- E. E. M. Chia, M. B. Salamon, H. Sugawara and H. Sato: Probing the superconducting gap symmetry of PrRu<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub>: A comparison with PrOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub>, *Phys. Rev. B* **69** (2004) 180509(R).
- T. Goto, Y. Nemoto, K. Sakai, T. Yamaguchi, M. Akatsu, T. Yanagisawa, H. Hazama, and K. Onuki, H. Sugawara and H. Sato: Quadrupolar effect and rattling motion in the heavy-fermion superconductor PrOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub>, *Phys. Rev. B* **69** (2004) 18180511(R).
- K. Kuwahara, K. Iwasa, M. Kohgi, K. Kaneko, S. Araki, N. Metoki, H. Sugawara, Y. Aoki and H. Sato: Magnetic Excitations in Heavy-Fermion Superconductor PrOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub>, *J. Phys. Soc. Jpn.* **73** (2004) 1438-1441.
- T. Takeuchi, S. Hashimoto, T. Yasuda, H. Shishido, T. Ueda, M. Yamada, Y. Obiraki, M. Shiimoto, H. Kohara, T. Yamamoto, K. Sugiyama, K. Kindo, T. D. Matsuda, Y. Haga, Y. Aoki, H. Sato, R. Settai and Y. Onuki: Magnetism and superconductivity in a heavy-fermion superconductor, CePt<sub>3</sub>Si, *J. Phys.: Condens. Matter* **16** (2004) L333-L342.
- M.-A. Measson, D. Braithwaite, J. Flouquet, G. Seyfarth, J. P. Brison, E. Lhotel, C. Paulsen, H. Sugawara and H. Sato Superconducting phase diagram of the filled skutterudite PrOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub>, *Phys. Rev. B* **70** (2004) 064516 1-8.
- A. Yamasaki, S. Imada, T. Nanba, A. Sekiyama, H. Sugawara, H. Sato, C. Sekine, I. Shirotnani, H. Harima and S. Suga Possible Kondo resonance in PrFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub> studied by bulk-sensitive photoemission, *Phys. Rev. B* **70** (2004) 113103 1-4.
- A.D. Huxley, M.-A. Measson, K. Izawa, C.D. Dewhurst, R. Cubitt, B. Grenier, H. Sugawara, J. Flouquet, Y. Matsuda and H. Sato: Flux-Line Lattice Distortion in PrOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub>, *Phys. Rev. Lett.* **93** (2004) 187005.
- T. Tayama, J. Custers, H. Sato, T. Sakakibara, H. Sugawara and H. Sato New High-Field Ordered State in PrFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub>, *J. Phys. Soc. Jpn.* **73** (2004) 3258-3261.
- Y. Nakanishi, T. Kumagai, M. Oikawa, T. Kanayama, Y. Aoki, H. Sugawara, H. Sato, M. Yoshizawa: Elastic behavior and 4f ground state of Pr ions in Pr<sub>x</sub>La<sub>1-x</sub>Fe<sub>4</sub>P<sub>12</sub>, *J. Magn. Magn. Mat.* **272-276** (2004) 70-71.
- K. Izawa, Y. Nakajima, J. Goryo, Y. Matsuda, S. Osaki, H. Sugawara, H. Sato, P. Thalmeier, K. Maki Observation of a symmetry change in the gap function in heavy-fermion superconductor PrOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub>, *J. Magn. Magn. Mat.* **272-276** (2004) 144-145.
- H. Tsujii, C. R. Rotundu, Y. Takano, B. Andraka, Y. Aoki, H. Sugawara, H. Sato: Specific heat of PrOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> in magnetic fields, *J. Magn. Magn. Mat.* **272-276** (2004) 173-174.
- E. Bauer, G. Hilscher, H. Michor, Ch. Paul, Y. Aoki, H. Sato, M. Giovannini, A. Saccone, Evolution of ground state properties in novel Yb<sub>2</sub>Pd<sub>2</sub>In<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>, *J. Magn. Magn. Mat.* **272-276** (2004) 237-238.

- M. Matsunami, H. Okamura, T. Nanba, H. Sugawara, H. Sato: Optical properties of the filled skutterudites  $CeT_4Sb_{12}$  ( $T=Fe, Ru, Os$ ), *J. Magn. Magn. Mat.* **272-276** (2004) e41-e42.
- M. Yogi, H. Kotegawa, G.-q. Zheng, Y. Kitaoka, S. Osaki, H. Sugawara, H. Sato: Sb-NQR study of the "Kondo semiconductor"  $CeOs_4Sb_{12}$ , *J. Magn. Magn. Mat.* **272-276** (2004) e45-e46.
- K. Iwasa, M. Kohgi, M. Braden, J.-M. Mignot, H. Kitazawa and T. Suzuki: Anomalous phonon excitations associated with strong p-f mixing effect of CeSb and CeBi *J. Magn. Magn. Mat.* **272-276** (2004) e65-e66.
- N. Kurita, M. Hedo, Y. Uwatoko, M. Kobayashi, H. Sugawara, H. Sato, N. Mori: Pressure-dependent electrical resistivity of the filled skutterudite compound  $CeRu_4Sb_{12}$ , *J. Magn. Magn. Mat.* **272-276** (2004) e81-e82.
- N. Metoki, K. Kaneko, S. Arakia, M. Kohgi, K. Iwasa, K. Kuwahara, N. Bernhoeft, J.M. Mignot, A. Gukasov, H. Sato, Y. Aoki, H. Sugawara: Neutron scattering study on the field-induced antiferro-quadrupolar ordering in the heavy fermion superconductor  $PrOs_4Sb_{12}$ , *J. Magn. Magn. Mat.* **272-276** (2004) e91-e92.
- H. Sugawara, M. Kobayashi, E. Kuramochi, S. Osaki, S. R. Saha, T. Namiki, Y. Aoki and H. Sato: High field magnetoresistance in  $CeOs_4Sb_{12}$ , *J. Magn. Magn. Mat.* **272-276** (2004) e115-e116.
- M. Kobayashi, H. Sugawara, S.R. Saha, T. Namiki, H. Fujiwara, Y. Aoki, H. Sato: Flux-flow resistivity in the heavy fermion superconductor  $PrOs_4Sb_{12}$ , *J. Magn. Magn. Mat.* **272-276** (2004) e165-e166.
- T. Tayama, T. Sakakibara, H. Sugawara, Y. Aoki, H. Sato: Magnetization study of the heavy fermion superconductor  $PrOs_4Sb_{12}$ , *J. Magn. Magn. Mat.* **272-276** (2004) e183-e185.
- L. Hao, K. Iwasa, K. Kuwahara, M. Kohgi, S.R. Saha, H. Sugawara, Y. Aoki, H. Sato, C. Sekine, C.H. Lee, H. Harima: Crystal-lattice modulation of the metal-insulator transition system  $PrRu_4P_{12}$  studied by X-ray diffraction, *J. Magn. Magn. Mat.* **272-276** (2004) e271-e272.
- S.R. Saha, H. Sugawara, T. Namiki, M. Kobayashi, Y. Aoki, H. Sato: Anomalous transport properties in  $PrRu_4P_{12}$  single crystal, *J. Magn. Magn. Mat.* **272-276** (2004) e317-e318.
- A. Hannan, K. Kuwahara, D. Kawana, M. Kohgi, Y. Narumi, Y. Tabata, K. Katsumata: High field magnetic phase diagram of CeP studied by synchrotron radiation X-ray diffraction, *J. Magn. Magn. Mat.* **272-276** (2004) e427-e428.
- T. Osakabe, M. Kohgi, D. Kawana, A. Hannan, K. Soyama, H. Kitazawa: High pressure apparatus for magnetic neutron diffraction beyond 3 GPa at low temperature *J. Magn. Magn. Mat.* **272-276** (2004) 2157-2158.
- A. Hannan, K. Iwasa, M. Kohgi, T. Osakabe, H. Kitazawa and T. Suzuki: Exotic Properties of CeSb Studied by X-ray Diffraction, *J. Phys. Soc. Jpn.* **74** (2004) 1881-1887.
- M. Kohgi, K. Iwasa, K. Kuwahara, A. Hannan, D. Kawana, Y. Noda, T. Shobu, K. Katsumata, Y. Narumi, Y. Tabata: Studies of unusual magnetic and electronic properties of the low-carrier system CeP by synchrotron X-rays, *Physica B* **345** (2004) 55-58.

K. Ishida, H. Murakawa, K. Kitagawa, Y. Ihara, H. Kotegawa, M. Yogi, Y. Kitaoka, Ben-Li Young, M. S. Rose, D. E. MacLaughlin, H. Sugawara, T. D. Matsuda, Y. Aoki, H. Sato and H. Harima: Static and dynamical properties in the Pr-based filled skutterudite compound  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  revealed by a  $^{31}\text{P}$ -NMR study, *Phys. Rev. B* **71** (2005) 024424 1-9.

Y. Aoki, H. Sugawara, H. Harima and H. Sato: Novel Kondo Behaviors Realized in the Filled Skutterudite Structure, *J. Phys. Soc. Jpn.* **74** (2005) 209-221.

S. Sanada, Y. Aoki, H. Aoki, A. Tsuchiya, D. Kikuchi, H. Sugawara and H. Sato: Exotic Heavy-Fermion State in Filled Skutterudite  $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ , *J. Phys. Soc. Jpn.* **74** (2005) 246-249.

T. Goto, Y. Nemoto, K. Onuki, K. Sakai, T. Yamaguchi, M. Akatsu, T. Yanagisawa, H. Sugawara and H. Sato, Elastic Constant in Magnetic Fields and Singlet-Triplet State of Heavy Fermion Superconductor  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ , *J. Phys. Soc. Jpn.* **74** (2005) 263-266.

H. Hidaka, I. Ando, H. Kotegawa, T. C. Kobayashi, M. Kobayashi, H. Sugawara, and H. Sato: Pressure-induced metal-insulator transition in the filled skutterudite, *Phys. Rev. B* **71** (2005) 073102 1-4.

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: The magnetic instability of  $\text{Yb}_2\text{Pd}_2(\text{In}, \text{Sn})$  in a non-Fermi liquid environment, *J. Phys.: Condens. Matter* **17** (2005) S999-S1009.

H. Sugawara, S. Osaki, M. Kobayashi, T. Namiki, S. R. Saha, Y. Aoki, and H. Sato: Transport properties in  $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$ : Possibility of the ground state being semiconducting, *Phys. Rev. B* **71** (2005) 125127 1-6.

T.D. Matsuda, Y. Haga, S. Ikeda, A. Galatanu, E. Yamamoto, H. Shishido, M. Yamada, J. Yamaura, M. Hedo, Y. Uwatoko, T. Matsumoto, T. Tada, S. Noguchi, T. Sugimoto, K. Kuwahara, K. Iwasa, M. Kohgi, R. Settai and Y. Ōnuki: Electrical and Magnetic Properties of a Single Crystal  $\text{UCu}_2\text{Si}_2$ , *J. Phys. Soc. Jpn.* **74** (2005) 1552-1556 .

## 2) 学会講演

日本物理学会第 59 回年次大会 2004 年 3 月 27 日 ~ 30 日 (九州大学箱崎キャンパス)

坂井正樹、横田真太郎、青木勇二、菅原仁、佐藤英行、松田和博、上条敦、柘植久尚: 強磁場下におけるトンネル接合素子のノイズ強度.

横田真太郎、水口拓也、坂井正樹、永井肇、青木勇二、菅原仁、佐藤英行、長坂恵一、瀬山喜彦、田中厚志: スピンバルブ膜を用いた CPP 素子におけるノイズ強度の磁場角度依存性.

名越千代子、菅原仁、山本龍之介、酒井慎一郎、桑原慶太郎、神木正史、鬼丸孝博、榊原敏郎、佐藤英行: 重い電子系を含む立方晶  $\text{R}_3\text{Ir}_4\text{Sn}_{13}$  ( $\text{R}=\text{La}, \text{Ce}, \text{Eu}, \text{Gd}$ ) の輸送現象と磁気特性.

宮田栄作、今田真、鴻池光一郎、澤井佑介、関山明、菅原仁、佐藤英行、竹ヶ原克彦、菅滋正:  $\text{CeRh}_3\text{B}_2$  の光電子分光と、 $\text{Ce}3d\text{XAS}$ 、磁気円・線二色性.

松波雅治、滝元樹雄、入澤明典、岡村英一、難波孝夫、菅原仁、佐藤英行、関根ちひろ、城谷一民、播磨尚朝: Ce 系充填スクッテルダイト化合物の光学伝導度 II.

日高宏之、小手川恒、小林達生、安東郁真、播磨尚朝、小林美希、菅原仁、佐藤英行: 充填スクッテルダイト  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  の圧力誘起金属絶縁体転移.

及川雅史、中西良樹、熊谷智之、吉澤正人、菅原仁、青木勇二、佐藤英行:  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  の弾性特性 II.

後藤輝孝、大貫佳、坂井浩一、根本祐一、山口隆、赤津光洋、柳澤達也、菅原仁、佐藤英行: 重い電子超伝導体  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  における  $(C_{11} - C_{12})/2$  の磁場依存性と結晶場.

土屋明久、真田祥太郎、並木孝洋、青木勇二、菅原仁、佐藤英行:  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  の超伝導転移近傍の比熱異常.

真田祥太郎、土屋明久、青木勇二、菊地大輔、菅原仁、佐藤英行: 充填スクッテルダイト  $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$  の熱物性.

中西良樹、熊谷智之、及川雅史、吉澤正人、松田達磨、菅原仁、佐藤英行:  $\text{LaFe}_4\text{P}_{12}$  及び  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  の低温における弾性特性.

福田泰洋、山崎篤志、今田真、菅滋正、大崎舟司、菅原仁、佐藤英行、播磨尚朝: 充填スクッテルダイト  $\text{PrT}_4\text{Sb}_{12}$  ( $T=\text{Ru}, \text{Os}$ ) のバルク敏感光電子分光.

桑原慶太郎、岩佐和晃、神木正史、金子耕土、目時直人、菅原仁、青木勇二、佐藤英行、S. Raymond、J. Flouquet:  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  の磁気励起異常.

藤秀樹、土居昌弘、世良正文、與儀護、小手川恒、鄭国慶、北岡良雄、播磨尚朝、菅原仁、佐藤英行: 単結晶  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  の Sb-NMR による研究.

根本祐一、坂井一浩、大貫佳、山口隆、後藤輝孝、菅原仁、佐藤英行:  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  の弾性定数の磁場依存性とラットリング.

青木勇二、髭本亘、土屋明久、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: 重い電子超伝導体  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  の  $\mu$  SR による観測 II.

住谷秀俊、菊地大輔、菅原仁、青木勇二、佐藤英行:  $\text{Pr}_x\text{La}_{1-x}\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$  の電気的、磁気的特性.

近藤歳久、青木勇二、宇田川眞行、荻田典男、佐藤英行、S.R. Saha、菅原仁、山本一成: 充填スクッテルダイト  $\text{ROs}_4\text{Sb}_{12}$  のラマン散乱.

神木正史、楊昌平、岩佐和晃、桑原慶太郎、菅原仁、佐藤英行:  $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$  の磁気励起.

菅原仁、菊池大輔、土屋明久、真田祥太郎、吉澤謙治、青木勇二、佐藤英行:  $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$  の単結晶育成と物性.

石田憲二、村川寛、北川健太郎、小手川恒、北岡良雄、青木勇二、菅原仁、佐藤英行、Ben-Li Young、D. E. MacLaughlin、播磨尚朝: スクッテルダイト化合物  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  の磁気励起 (P-NMR).

菊地淳、瀧川仁、菅原仁、佐藤英行:  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  における  $^{31}\text{P}$  NMR II.

岩佐和晃、八才麗傑、桑原慶太郎、神木正史、菅原仁、青木勇二、佐藤英行、松田達磨、J.-M. Mignot、A. Gukasov、西正和:  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  の偏極中性子回折による反強四重極秩序の観測と中性子非弾性散乱による磁気励起の研究.

辺土正人、上床美也、菅原仁、佐藤英行:  $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$  の高圧下物性.

熊谷智之、中西良樹、及川雅史、吉澤正人、R.S. Saha、菅原仁、佐藤英行: 単結晶  $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$  の超音波測定.

菊地大輔、小林未希、菅原仁、青木勇二、佐藤英行、宍戸寛明、撰待力生、大貫惇睦:  $\text{SmFe}_4\text{P}_{12}$  のドハース・ファンアルフェン効果 II.

浜崎達一、横尾哲也、新井正敏、山本竜之介、桑原慶太郎、神木正史、大原繁男、坂本功: 磁場中での  $\text{GdGa}_2$  単結晶の中性子回折

田畑吉計、谷口年史、河原崎修三、鳴海康雄、田中良和、勝又紘一、U. Staub、石川哲也、神木正史、岩佐和晃: 近藤格子系  $\text{Ce}(\text{Ru}_{1-x}\text{Rh}_x)_2\text{Si}_2$  における SDW と CDW の共存 II

川名大地、長壁豊隆、A. Hannan、神木正史:  $\text{CeP}$  の高圧下における強磁性発現の中性子散乱による研究

松田達磨、芳賀芳範、池田修悟、Andrei Galatanu、桑原慶太郎、岩佐和晃、神木正史、山浦淳一、宍戸寛明、山田美音子、撰待力生、松本拓也、野口悟、大貫惇睦:  $\text{UCu}_2\text{Si}_2$  の単結晶育成と磁気特性

日本物理学会秋季大会 2004年9月12日~15日 (青森大学)

酒井崇史、桑原慶太郎、神木正史、芳賀芳範、大貫惇睦:  $\text{UGe}_2$  の弾性異常.

菊地大輔、菅原仁、青木勇二、佐藤英行:  $\text{SmFe}_4\text{P}_{12}$  の電子輸送特性.

真田祥太郎、青木勇二、土屋明久、菊地大輔、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.

網島慶乃、青木勇二、髭本亘、真田祥太郎、土屋明久、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.

名越千代子、山本竜之介、桑原慶太郎、岩佐和晃、神木正史、菅原仁、青木勇二、佐藤英行、横尾哲也、新井正敏:  $\text{Eu}_3\text{Ir}_4\text{Sn}_{13}$  と  $\text{Gd}_3\text{Ir}_4\text{Sn}_{13}$  の磁気構造と変調構造.

青木英和、菊地大輔、田中謙弥、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.

桑原慶太郎、岩佐和晃、神木正史、金子耕士、目時直人、菅原仁、青木勇二、佐藤英行、S. Raymond、J. Flouquet: 中性子散乱による  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  の低エネルギー磁気励起の研究.

楊昌平、神木正史、岩佐和晃、桑原慶太郎、菅原仁、佐藤英行:  $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$  の中性子散乱.

髭本亘、青木勇二、S.R.Saha、大石一城、幸田章宏、門野良典、菅原仁、佐藤英行:  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  の磁場中のミュオンスピン回転測定.

藤秀樹、土居昌弘、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: 単結晶  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$  の角度分解 Sb-NMR 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:  $\text{Pr}_x\text{La}_{1-x}\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$  の Sb-NQR による超伝導の研究.

笠原成、徳永祐介、徳永将史、為ヶ井強、菅原仁、佐藤英行: PrRu<sub>4</sub>P<sub>12</sub> のラマン散乱.

中西良樹、及川雅史、谷澤知章、菅原仁、S.R. Saha、佐藤英行: 充填スクッテルダイト化合物 SmRu<sub>4</sub>P<sub>12</sub> の極低温弾性特性.

中村聡、宮原恒あき、石井広義、高山泰弘、吉田徹夫、佐々木直也、佐藤英行、菊池大輔、塩澤秀次、中村哲也、室隆桂之: 内殻励起磁気円二色性による Ce 化合物の磁性研究.

岩佐和晃、神木正史、菅原仁、佐藤英行: PrOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> における格子振動異常の研究.

及川雅史、中西良樹、谷澤知章、菅原仁、佐藤英行、吉澤正人: PrOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> の弾性定数と超音波吸収.

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 CeRu<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub>、PrOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> の四極子効果.

杉山清寛、本田大輔、竹内徹也、金道浩一、摺待力生、菅原仁、青木勇二、佐藤英行、大貫惇睦: 充填スクッテルダイト化合物の強磁場磁化.

佐藤英和、鬼丸孝博、田山孝、榊原俊郎、菅原仁、佐藤英行: PrFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub> の四重極転移温度の角度依存性.

菅原仁、菊地大輔、小林未希、青木勇二、佐藤英行、宍戸寛明、摺待力生、大貫惇睦: PrFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub> の高圧下 dHvA 効果.

日高宏之、堀彰宏、小手川恒、小林達生、播磨尚朝、小林美希、菅原仁、佐藤英行: 充填スクッテルダイト PrFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub> の圧力誘起金属絶縁体転移 II.

Hao Lijie、長谷川朋生、高木俊彰、岩佐和晃、桑原慶太郎、神木正史、S.R. Saha、菅原仁、青木勇二、佐藤英行: 中性子散乱による PrRu<sub>4</sub>P<sub>12</sub> の 4f 電子状態の研究.

並木孝洋、清水克哉、菅原仁、S.R. Saha、佐藤英行: 充填スクッテルダイト化合物 PrRu<sub>4</sub>P<sub>12</sub> の圧力下交流比熱測定.

S.R. Saha、髭本亘、青木勇二、幸田章宏、大石一城、門野良典、菅原仁、佐藤英行:  $\mu$ SR study of filled skutterudite PrRu<sub>4</sub>P<sub>12</sub> and CeOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub>.

谷澤知章、中西良樹、及川雅史、並木孝洋、菅原仁、佐藤英行: 近藤半導体 CeOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> の転移点近傍における弾性定数および超音波吸収の測定.

小手川恒、三木猛、日高宏之、小林達生、菊地大輔、菅原仁、佐藤英行: SmOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> の圧力効果.

金子耕士、目時直人、松田達磨、神木正史: カゴ状物質の中性子散乱による研究

第 28 回日本応用磁気学会学術講演会 2004 年 9 月 21 日~24 日 (沖縄コンベンションセンター)

青木勇二、真田祥太郎、菊地大輔、菅原仁、佐藤英行: Sm 充填スクッテルダイトの異常低温物性

第 18 回 SRC 技術報告会 2004 年 12 月 2 日~3 日 (湯河原)

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

2005年3月11日（早稲田大理工）

青木勇二、真田祥太郎、青木英和、土屋明久、菊地大輔、菅原仁、佐藤英行: 充填スクッテルダイト  $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$  の異常な重い電子状態

国際会議

The 20th General Conference of the Condensed Matter Division European Physical Society (CMD20), Prague, Czech Republic, July 19-23, 2004

Y. Aoki, S. Sanada, A. Tsuchiya, T. Kanayama, H. Sugawara, H. Sato, W. Higemoto, S.R. Saha, A. Koda, K. Ohishi, K. Nishiyama and R. Kadono: Time-reversal-symmetry-broken superconductivity in the filled skutterudite  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ . (Invited)

International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2004), Kalsrule, Germany, July 26-30, 2004

M. Kohgi, K. Iwasa, J.-M. Mignot, A. Hiess, A. Ochiai, H. Aoki: Quantum spin excitations in  $\text{Yb}_4\text{As}_3$  under magnetic field

Y. Aoki, S. Sanada, A. Tsuchiya, T. Kanayama, H. Sugawara, H. Sato, W. Higemoto, S.R. Saha, A. Koda, K. Ohishi, K. Nishiyama, and R. Kadono:  $\mu\text{SR}$  studies on  $\text{LaOs}_4\text{Sb}_{12}$  in comparison with the time-reversal-symmetry-broken superconductor  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$

H. Sugawara, D. Kikuchi, M. Kobayashi, Y. Aoki, H. Sato, H. Shishido, R. Settai, Y. Onuki: De Haas-van Alphen effect in  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  under high pressure

D. Kikuchi, M. Kobayashi, H. Sugawara, Y. Aoki, H. Sato, H. Shishido, R. Settai, Y. Onuki: De Haas-van Alphen effect in the filled skutterudite  $\text{SmFe}_4\text{P}_{12}$

L. Hao, K. Iwasa, K. Kuwahara, M. Kohgi, H. Sugawara, Y. Aoki, H. Sato, T. D. Matsuda, J.-M. Mignot, A. Gukasov, M. Nishi: Neutron Scattering Studies of Order Parameters and Excitations in Antiferro-Quadrupolar Phase of  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$

K. Iwasa, L. Hao, K. Kuwahara, M. Kohgi, S. R. Saha, H. Sugawara, Y. Aoki, H. Sato: Drastic Evolution of 4f-electron States in the Metal-Insulator Transition of  $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$

S. Raymond, J. Flouquet, K. Kuwahara, K. Iwasa, M. Kohgi, K. Kaneko, N. Metoki, H. Sugawara, Y. Aoki, H. Sato: Magnetic excitations in the heavy fermion superconductor  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$

K. Kuwahara, R. Yamamoto, M. Kohgi, H. Nakao, K. Ishii, K. Iwasa, Y. Murakami, S. Kunii, H. Sagayama, Y. Wakabayashi, H. Sawa: Resonant and non-resonant x-ray scattering from  $\text{GdB}_6$

Japanese-German Symposium "Competing Phases in Novel Condensed-Matter Systems", Freudenstadt, Germany, August 1-5, 2004

H. Sato: Exotic Features Realized in Pr-based Filled Skutterudite Compounds (Invited)

Yukawa International Seminar 2004 (YKIS2004) "Physics of Strongly Correlated Electron Systems",  
Kyoto, Japan, November 1-19, 2004

H. Sato: Exotic phases in the filled skutterudite compounds :Experiments (Invited).

Rare Earths'04, Nara, Japan, November 7-12, 2004

Y. Aoki, H. Sugawara, H. Sato: Exotic electronic states in filled skutterudites. (Invited)

### 3) 学会誌等

青木勇二、髭本亘、門野良典、佐藤英行 : PrOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> における重い電子超伝導の時間反転対称性の破れ—  
μ SR 実験から—、固体物理 **39** (2004) 279–287.

青木勇二、髭本亘、門野良典、佐藤英行 : 充填スクッテルダイトにおける時間反転対称性を破った超伝  
導、日本物理学会誌 **59** (2004) 467–471.

佐藤英行 : 充填スクッテルダイト構造が可能にした新しい量子多電子状態、パリティ **20** (2005) 27–29.

# ナノ物性研究サブグループ

## 1. 研究活動の概要

本グループは、遍歴電子反強磁性体やナノ構造物質系について、核磁気共鳴 (NMR)、磁化測定、電気伝導度測定、中性子散乱、X線回折実験、示差走査熱量測定 (DSC) 等の方法を用いた基礎物性の研究、およびナノ領域の微細試料を研究する新しい手法としての NMR 法などの研究を行っている。2004 年度 (平成 16 年度) における研究活動の概要は次のとおりである。

ア) 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? という問題が最近多くの研究者の興味を集めている。この問題に対する解答は、nearly antiferromagnetic SCR 理論 (renormalization theory を使っても上部臨界次元  $d=2$  以上の場合と同じ結論を得る) により 1970 年代に解決済みであると思われていた。しかし最近の多くの実験は、反強磁性 SCR 理論と矛盾するように解釈可能 (精度等に問題もあるが) なため、量子臨界点においてフェルミ面の性質が大きく変化するのではないかというような新しい仮説も提案されている。我々はこの問題を実験的に解明するために、Ce-系の重い電子化合物  $\text{Ce}(\text{Ru}_{1-x}\text{Rh}_x)_2\text{Si}_2$  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い、 $x_c = 0.04$  and  $T_N = 0$  における量子臨界点の性質を明らかにした。測定で得られた臨界指数は反強磁性 SCR 理論の予言とよく一致するため、少なくとも f 電子系においては、SCR 理論の予言によるガウス型臨界固定点が量子臨界点を支配しているという結論に達した (H. Kadowaki et al. cond-mat/0504386)。

イ) 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が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。この研究はパイロクロア型酸化物  $\text{R}_2\text{M}_2\text{O}_7$  ( $\text{R}=\text{Ho}, \text{Dy}, \text{Tb}, \text{Pr}, \text{Nd}$ ;  $\text{M}=\text{Ti}, \text{Sn}$ ) のスピン相関、磁気構造の測定によりフラストレーションの起源解明が目的である。本年度はカゴメアイス状態に特有のスピン相関を調べた。(図 1 参照)

ウ) 光照射 NMR 実験: NMR 法は物質のミクロの構造、電子状態、運動状態を調べる有力な手段であり、物理学、化学、生物学などの広い領域で利用されている。また、医療分野では非破壊的な断層撮像法 (MRI) として広く一般に知られている。しかし、感度が他の方法と比較して格段と低いため、界面、薄膜、微細試料などの研究には不向きであるとされてきた。我々は、このような NMR の低感度を克服して、微細領域の NMR を可能にする方法を開発し、特に薄膜・界面における種々の物性の発現機構を研究する強力なプローブとして確立することを試みている。

エ) 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、多数の原子・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。良く乾燥させたゼオライトにアルカリ金属を吸蔵させると、その最外殻 s 電子は空隙内に広がり、“空隙原子 (超原子)” の結晶ができることが示唆されている。本年度は中央大学風間研究室、東京医科大增淵氏らとの共同研究により、アルカリ金属を吸着したゼオライトの固体 NMR 実験を行った。

オ) カーボンナノチューブに吸蔵された物質系の構造と相転移: 単層カーボンナノチューブ (SWNT) の 1 次元ナノ空洞内に閉じ込められた水がその低次元性にも拘らず比較的明確な相転移挙動を示し、低温長距離秩序相が多員環アイスナノチューブ (ice-NT) であることを産総研片浦弘道氏との共同研究により明らかにした。最も細いチューブ (平均直径 11.7 Å) 内には常圧下 300 K の融点の氷が発見され、世界初の室温氷として注目された。

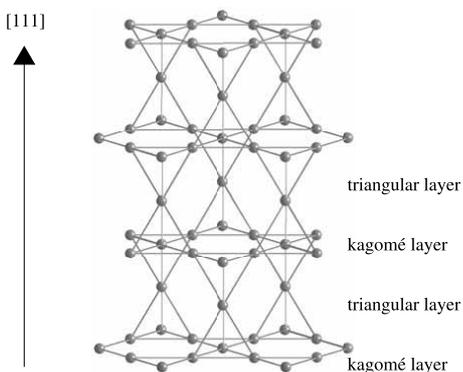


図 1: パイロクロア格子内のカゴメ格子

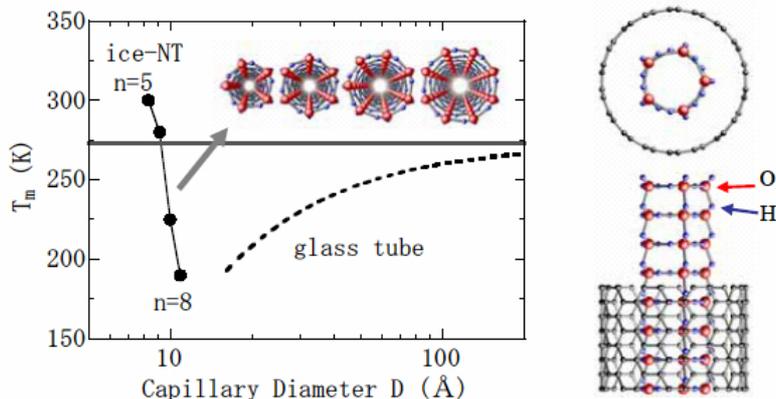


図 2: SWNT 内の氷の融点の空洞直径依存性。右図は室温氷、5 員環 ice-NT のモデル図

カ) 分子を吸蔵した単層カーボンナノチューブの精密構造解析: カーボンナノチューブは、炭素が筒状に連なった分子である。炭素一層で出来た単層カーボンナノチューブ [single-walled carbon nanotube (SWNT)] はチューブと垂直方向に三角形配置を持つ 3 次元的な結晶構造をとるが、それぞれのカーボンナノチューブ内部に様々な分子 ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2O$  等) を吸蔵することが可能である。この SWNT に吸蔵された分子 (SWNT+[X]) の構造を研究する手段としては、X 線および中性子回折実験が有力だと考えられている。しかしその回折パターンの解析は、SWNT サンプルに特有の事情を取り入れる必要があるために、通常行なわれている 3 次元結晶のリートベルト解析をかなり変更して使う必要がある。我々は SWNT+[X] の構造解析用のリートベルト解析と MEM (最大エントロピー法) の方法論に基礎づけをし、解析ソフトを開発した。SWNT のみの場合には構造解析の計算が正しく実行可能であることを示すことに成功した (H. Kadowaki *etal.* cond-mat/0409603) ので、現在は SWNT+[X] の構造解析に挑戦している。

キ) 単層カーボンナノチューブに吸蔵された水の運動: SWNT+[ $H_2O$ ] 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+[ $H_2O$ ] 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 ( $T=150K$  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不思議な性質である。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 (陽子の中性子に対する大きな非干渉性散乱断面積を利用すると、水素の運動状態を詳しく調べることが可能) を行なっている。

ク) ice-NT へのガス吸蔵実験を行い、興味深い結果が得られ、詳細な解析が進行している。

ケ) 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) と高輝度光科学研究セン

ター (SPring-8) の放射光施設において共同利用実験を行った。以下に課題名 (課題番号) を示す。(1) 配向カーボンナノチューブの構造と相転移 (2004A0236-ND1d-np-Na/SPring-8)、(1) 配向カーボンナノチューブによる内包物質系の研究 (2004B0758-ND1b-np/SPring-8)、(4) ナノカーボンの構造研究 (2004G232/PF)。また、東北大学金属材料研究所において、(8) ナノクラスター薄膜の作製と微小領域 NMR に関する共同利用研究を行った。

コ) 特許出願その他: アイスナノチューブの生成と利用に関する 4 件の特許出願を行った。室温アイスナノチューブの発見について、朝日、毎日、読売など新聞各紙に報道された。インクジェット応用については、日経マイクロデバイス (MICRODEVICES) 誌 2005 年 2 月号 (No236) に革新技術として紹介された。また、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 月号に紹介されている。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

Yutaka Maniwa, Hiromichi Kataura, Masatoshi Abe, Akiko Udaka, Shinzo Suzuki, Yohji Achiba, Hiroshi Kira, Kazuyuki Matsuda, Hiroaki Kadowaki and Yutaka Okabe: Ordered water inside carbon nanotubes: Formation of pentagonal to octagonal ice-nanotubes: *Chem. Phys. Lett.* **401** (2005) pp. 534-538

M. Sato, Y. Koike, S. Katano, N. Metoki, H. Kadowaki and S. Kawarazaki: Field-induced Ferromagnetic Correlation in the Metamagnetic Crossover in  $\text{CeRu}_2\text{Si}_2$  as Studied by Neutron Scattering, *J. Phys. Soc. Jpn.* **73** (2004) 3418-3421.

T. Nagata, M. Urata, H. Kawano-Furukawa, H. Yoshizawa, H. Kadowaki, P. Dai: Anisotropy in the incommensurate spin fluctuations of  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ , *Phys. Rev. B* **69** (2004) 174501-(1-6).

### 2) 学会講演

日本物理学会 2004 年春 第 59 回年次大会 (九州大学箱崎キャンパス)

小笠原俊介, 宇高彰子, 吉良弘, 松田和之, 片浦弘道, 鈴木信三, 阿知波洋次, 真庭豊: 水を吸蔵した SWNT の電気特性

宇高彰子, 阿部真利, 吉良弘, 松田和之, 片浦弘道, 鈴木信三, 阿知波洋次, 真庭豊: アルカリ金属をドーピングした SWNT の構造研究

松田和之, 坪根徳明, 宇高彰子, 真庭豊, 藤原明比古, 片浦弘道, 鈴木信三, 阿知波洋次: 酸素を吸着した SWNT バンドルの磁性と構造

門脇広明, 西山彰人, 松田和之, 真庭豊, 片浦弘道, 鈴木信三, 阿知波洋次: 水を吸蔵した単層カーボンナノチューブの中性子回折

梅尾和則, 元屋清一郎, 門脇広明, 阿曾尚文, 竹内徹也, 高畠敏郎: 重い電子系反強磁性体  $\text{Ce}_7\text{Ni}_3$  の磁場誘起磁気秩序相の磁気構造

日本物理学会 2004 年秋季大会、青森大学、2004 年 9 月 12 日-15 日

小笠原俊介, 坪根徳明, 日比寿栄, 宇高彰子, 吉良弘, 松田和之, 片浦弘道, 鈴木信三, 阿知波洋次, 真庭豊: 水を吸蔵した SWNT の電気特性 II

松田和之, 坪根徳明, 宇高彰子, 真庭豊, 藤原明比古, 片浦弘道, 鈴木信三, 阿知波洋次: 酸素を吸着した SWNT バンドルの磁性と構造

田畑吉計, 大阪昇, 吉田光毅, 谷口年史, 河原崎修三, 門脇広明, 阿曾尚文: 重い電子化合物  $Ce(Ru_{0.5}Rh_{0.5})_2Si_2$  における非フェルミ液体現象 - 中性子非弾性散乱実験

第 28 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム、名城大学、愛知県、2005 年 1 月

宮田耕充, 片浦弘道, 榊原陽一, 松崎瞬, 徳本圓, 真庭豊: HiPco 法で作られたカーボンナノチューブの可飽和吸収

国際会議

205th Meeting of The Electrochemical Society, San Antonio, USA, May 9-May 14, 2004,

Y. Maniwa: Structure and Molecular Dynamics of Fullerene Molecules Inside SWNTs (Invited talk)

XIXth International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials, Kirchberg, Tirol, Austria, March, 2005,

Y. Miyata, Y. Maniwa, H. Kataura: Enrichment of Metallic Single-Wall Carbon Nanotubes by Using Hydrogen Peroxide

Sixth International Conference on the Science and Application of Nanotubes, Gothenburg, Sweden, Jun, 2005,

H. Kataura, Y. Maniwa, Y. Miyata: Selective Oxidation of Semiconducting Single-Wall Carbon Nanotubes in Hydrogen Peroxide

2005 APS March Meeting, Los Angeles, USA, March 21-25, 2005

H. Kadowaki, Y. Tabata, S. Kawarazaki, M. Sato, N. Aso, S. Raymond: Quantum critical behavior of heavy fermion  $Ce(Ru_{1-x}Rh_x)_2Si_2$  ( $x = 0, 0.03$ ), (<http://meetings.aps.org/Meeting/MAR05/Event/22320>)

### 3) 学会誌等

片浦弘道、真庭豊、「世界で初めて室温のアイスナノチューブを発見」、AIST Today 2005 年 3 月号 (AIST Today 5 (2005) pp18-21)

真庭豊、片浦弘道、「ナノサイズインクジェットにつながる室温アイスナノチューブ」OHM、2005 年 3 月号 pp10-11

# ESR 物性解明サブグループ

## 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) 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、パラメーターとして温度、周波数、圧力を変え、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。静水或いは一軸加圧下での 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られる。物構研の松本先生のご協力により、CrNiAl 材を内筒に用いた超高压用セルや、クランプ型ではないその場加圧用のプローブも作成し調整中である。今後、Cubic anvil セルを用いた更に高压領域の ESR 開発も視野に入れている。以下に今年度行われた研究の概要を整理する。

ア) 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、2 本が G-C と A-T の組み合わせで梯子構造を作る 2 重螺旋構造を持つ。これらのアミノ基の配列は任意に設計して合成することもできるフレキシビリティを持つ。最近の、ナノマニピュレーション技術の発展に伴い、単一の、或いはバンドルの DNA の電気輸送特性の報告が色々となされてきた。それらによると、絶縁体、金属、超伝導の近接効果を示す等の種々の結果が報告されており、統一の理解には遠いのが現状である。一方、積極的に、 $ZnCl_2$  を用いて  $Zn^{2+}$  をドーピングすることにより、ナノサイズの分子の電線として機能することが報告されてきた。昨年度に引き続き、2 価の金属イオンをサケの DNA にドーピングし、ESR や SQUID、TEM (透過型電顕)、比熱、X 線蛍光分析等により電子状態を調べた。イオン種として、昨年度調べた Zn, Ca, Mg, Mn に加え、他の 3-d 遷移元素も調べた。今年度は、特に Mn をドーピングした Mn-DNA について詳しく解析を行った。X 線蛍光分析から、DNA 骨格の燐酸の数と Mn イオン数の比がほぼ 2 対 1 であることから、天然のサケ DNA に含まれていた Na イオン 2 つの代わりに Mn イオンが 1 つ入っていること、ESR や SQUID の解析から、 $S = \frac{5}{2}$  のスピンの AT 或いは GC あたり 1 つ存在すること、ESR 線形の解析から、Mn イオンが図 1 (b) のように 1 次元的に配列していることが確認された。また、DNA は湿度に依存して図 1 (a) に示した B-DNA から A-DNA への構造変化が起こることが知られている。Mn-DNA 内の水分量を調整すると ESR 線形が大きく変化することから、加湿下では B-DNA 構造をとるが、乾燥下では、2 重螺旋がコイル上に巻いた A-DNA 構造に変わると理解できる事などが明らかになった。

イ)  $C_{60}$  を構成要素とする強磁性体、TDAE- $C_{60}$  の単結晶の一軸変位下の 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。従来、この系は純粋な有機系の強磁性体としては最も高い転移温度 16 K を示すことから活発な研究が行われてきた。我々は、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電総研の川本徹氏、徳本圓氏との共同研究

により提案してきた。それは、協力的ヤン・テラー相互作用で歪んだ  $C_{60}$  ボールの反強磁性的な軌道秩序が、この有機強磁性の起源とする機構を考える。一軸変位下の ESR による強磁性磁化の温度依存性から、一軸変位を起こすことに起因する、電子間相互作用の起源を検証している。昨年度の試みでは、圧力セル外で、方位を決めた単結晶試料をエポキシ樹脂で円筒に固めていたが、今年度は、圧力セルと試料を含むエポキシ円筒との間の隙間が歪み量の位置毎の分布を生み出すことを避けるために、圧力セル内で試料をエポキシで固めた。その効果は顕著に現れ、非常に綺麗な変位依存性が観測されており、明解な結論が下せると期待できる。(産総研との共同研究)

ウ) 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 の一次元電子系結晶、 $(DMe-DCNQI)_2M$  ( $M=Li, Ag$  or  $Li_{1-x}Cu_x$ ) 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 バンドになっている。そのために、2 量体化して室温では  $4k_F$  電荷密度波 (CDW) 状態が実現している。すなわち、パイエルスギャップを持ち、2 量体あたり 1 つの電子が存在する Mott-insulator になっている。しかし、65 K のスピンパイエルス転移温度以上の電気伝導度は、10~150 S/cm 程度とかなり高いことが知られている。分子研の W-band ESR によるこの絶縁相の解析の結果、スピンのスタック間ホッピングが電気伝導度と同じ 250 K 程度の熱励起温度を持つことから、分数電荷を持つホールソリトンとスピンソリトンの伝導がこの絶縁相の電気伝導を担うことを示した。更に、この解釈が、 $4k_F$  超格子線の温度依存性や、ESR 線幅ともコンシステントであることを示した。(理研、分子研との共同研究) 今年度は、中央大学との共同研究により、これらの系の  $^1H$  NMR と  $^{13}C$  NMR とを用い、DMe-DCNQI 分子上の電荷密度分布の決定をした。その結果、Li 塩は Li から 1 つの電子が DMe-DCNQI 分子上に移動していると考えられるが、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。他の塩でも、分子内分布には大きな違いは見られなかった。しかし、従来、Ag 塩においても、Li 塩の場合と同様に、Ag は + 1 価だと信じられてきたが、そうではないことが強く示唆される結果が得られた。物性は、Li 塩に近いが、最近は色々な面で違いも見出されているが、その原因の一端が、フェルミ面に掛かった、Ag の 3-d 軌道にある可能性が出てきた。第一原理計算により既に指摘されてはいたが、信じられていなかった。ここに、実験的に確認されたことになり、今後の発展が興味深い。(中大、理研、学習院大、分子研との共同研究)

エ) 交互積層型電荷移動錯体はドナー分子、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という特徴を持つ。(BEDT-TTF)(ClMeTCNQ) 及び (BEDO-TTF)(Cl<sub>2</sub>TCNQ) は、二次元的相互作用の強い BEDT-TTF 分子及び BEDO-TTF 分子のために低温でのスピン-パイエルス転移が押さえられると予想される。実際に、常圧でイオン性相にいる (BEDO-TTF)(Cl<sub>2</sub>TCNQ) は、キュリーワイス的な磁化率の温度依存性を示し、分子当たり 1 スピンが存在する。一方、(BEDT-TTF)(ClMeTCNQ) では圧力と共に中性-イオン性転移温度が上昇するが、転移温度以下ではやはりドナー分子とアクセプター分子が対になりシングレットを形成する事や、イオン相の温度発展の様子を詳しく解析した。中性-イオン性転移は 1 次転移と考えられるが、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が分かった。また、転移温度以上では中性相になるが、一定の割合の中性相が高温まで熱誘起相として残ることが分かった。これも、両相の間の自由エネルギーの差が転移温度と同程度であることが原因として理解できた。(産総研、分子研との共同研究)

オ) 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ことが知ら

れている。 $\beta'$ -体は、BEDT-TTF の構成する 2 次元シートと、これらのシートに挟まれるように並んだ TCNQ 鎖のシートからなっている。BEDT-TTF 分子から TCNQ 分子にはほぼ  $\frac{1}{2}$  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。常圧では、半導体であるが、330K 以上では金属的な電気伝導度の温度依存性を示す。この系の電子状態を調べる目的で、低周波から 100GHz 近くまでの広い周波数範囲に渡る ESR の解析を進めている。35GHz と 94GHz における線幅と共鳴位置 ( $g$ -因子) について、単結晶軸と磁場の角度依存性を解析することにより、BEDT-TTF シートと TCNQ 鎖の間の電子のホッピング確率の温度依存性を求めた。その結果、300K で  $3 \times 10^9$  ( $s^{-1}$ ) と非常に遅いことが明らかになった。しかも、その温度依存性は、通常の熱励起型で期待される温度上昇に伴う増大ではなく、 $\exp(T_0/T)$  と減少することが見出された。この結果は、BEDT-TTF 分子と TCNQ 分子のそれぞれの  $\pi$  軌道が互いに直交していることを反映していると理解できる。逆熱励起的な温度変化は、熱運動が両分子間のトランスファー積分を減少させているためであると考えられる。これらの結果から、電気伝導は、両分子間は経由せず、BEDT-TTF シート内、或いは TCNQ 鎖内を經由していると考えられる。330K 以上では、BEDT-TTF シートが伝導層になり、それ以下では、Mott 絶縁体とも考えられるが、まだ、明確になっていない。一方、磁気的には、3K 以下で TCNQ 鎖が反強磁性的な秩序を起こす。一方、BEDT-TTF シートの ESR 信号が 20K で消失することから、やはり反強磁性的な秩序を TCNQ 鎖とは独立に起こしている可能性が見出された。大変興味深い系であり、今後更に調べていく予定である。また、 $\beta''$ -体も、大まかには金属的な電気抵抗の傾向があるが、いくつかの異常がみられる変わった系であり、測定を始めている (埼玉大、分子研との共同研究)

カ) TEMPOL (Hydroxy-tetramethylpiperidinoxyl-radical) は、 $>N-O\cdot$  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に枝として付けた系についてその磁性に注目して調べている。(日本化成との共同研究)

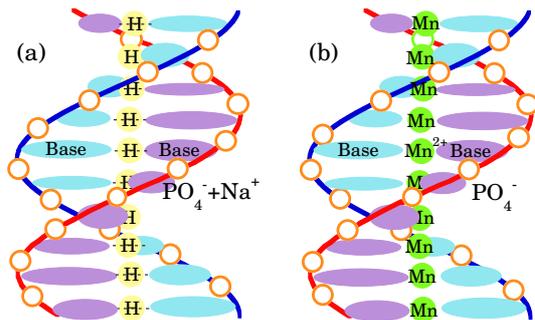


図 1: DNA の模式図。(a) は A-T, G-C の対が水素結合で構成された通常の DNA。(b) は、2 価の Mn イオンを対間に挿入した Mn-DNA。

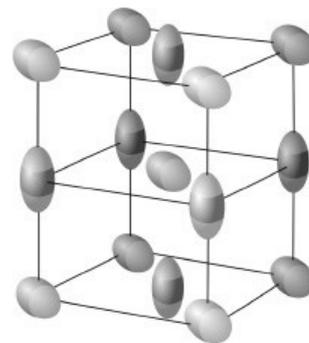


図 2: 静水圧および一軸変位実験を説明可能な TDAE-C<sub>60</sub> の Jahn-Teller 軌道の秩序モデル。隣接分子毎に、Jahn-Teller 歪み軸 (長軸) が直交する事により、強磁性的な交換相互作用が生まれる。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

H. Sakamoto, K. Mizoguchi, and T. Hasegawa: Magnetic Properties of (BEDT-TTF)(ClMeTCNQ) Studied by ESR under Pressure: a neutral-ionic crossover and thermoinduced mesophase, Phys. Rev. Lett., **93**, , 186401(1-4), (2004).

K. Mizoguchi, M. Takei, M. Machino, H. Sakamoto, M. Tokumoto, T. Kawamoto, A. Omerzu, and D. Mihailovic, Magnetism of  $\alpha$ - and  $\beta$ -TDAE- $C_{60}$ , J. Mag. and Mag. Mat. 272, E215 (2004).

M. Hiraoka, H. Sakamoto, K. Mizoguchi, T. Kato, K. Furukawa, R. Kato, K. Hiraki, and T. Takahashi, Spin soliton dynamics and pressure effects in the spin-Peierls system (DMe-DCNQI) $_2$ M, (M=Li,Ag), J. Mag. and Mag. Mat. 272, 1077 (2004).

### 2) 学会講演

日本物理学会 第59回年次大会 2004年3月27日~3月30日 (九州大学)

溝口憲治、平岡牧：1/4-filled 電子系絶縁相における電荷輸送：ESR study (招待講演)。

小川将、溝口憲治、坂本浩一：DNA のキャリアドーピングと ESR による電子状態解析。

竹井正人、溝口憲治、坂本浩一、徳本圓、川本徹、A.Omerzu、D. Mihailovic、加藤立久、古川貢：TDAE- $C_{60}$  の強磁性に対する一軸性ひずみ効果 IV。

平岡牧、坂本浩一、溝口憲治、加藤立久、古川貢、開康一、高橋利宏、加藤礼三、松本武彦：(DMe-DCNQI) $_2$ M (M=Li, Ag) の EPR。

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：(DMe-DCNQI) $_2$ Li の  $^1\text{H}$  NMR。

坂本浩一、溝口憲治、長谷川達生、古川貢、加藤立久：(BEDO-TTF)(Cl $_2$ TCNQ) の ESR III。

日本物理学会 2004年秋季大会 2004年9月12日~9月15日 (青森大学)

平岡牧、坂本浩一、溝口憲治、中村敏和、古川貢、開康一、高橋利宏、山本貢、田島裕之、加藤礼三：DMe-DCNQI 低次元系の EPR。

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、谷口弘三、山本貢、田島裕之：DMe-DCNQI 系などの  $4k_F$ -CDW 状態の高分解能 NMR。

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。

坂本浩一、溝口憲治、長谷川達生：ESR で見た (BEDT-TTF)(ClMeTCNQ) の N-I 転移。

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。

国際会議

The International Conference on Synthetic Metals (ICSM2004), Wollongong, Australia,  
June 28 - July 2, 2004

M. Hiraoka, H. Sakamoto, K. Mizoguchi, T. Kato, K. Furukawa, R. Kato, K. Hiraki, T. Takahashi, T. Matsumoto: Fractional Charge Transport in the Insulating State and Magnetic Property of (DMe-DCNQI)<sub>2</sub>M, (M=Li or Ag).

K. Mizoguchi, T. Ogawa, and H. Sakamoto: EPR Study on Electronic States of DNA: Natural and Doping. (Oral presentation)

H. Sakamoto, K. Mizoguchi, and T. Hasegawa: ESR Studies on Magnetic Properties of Mixed Stack Charge-transfer Compounds.

International Conference on Molecule-based Magnets (ICMM 2004), Tsukuba, Japan,  
October 4-8, 2004

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-.

International Conference on Electroactive Polymers: Materials & Devices (ICEP 2004), Dalhousie,  
India, November 1-5, 2004

K. Mizoguchi: ESR Study of the Electronic States in Natural and Doped DNA. (Invited Talk)

S. Tanaka, and K. Mizoguchi: Electronic States of Metal-doped DNA.

## 編集後記

大学の教員が行っている活動といえはいうもでもなく、研究と教育活動、しかもこれらを一体的に行っているということになるのでしょう。また大学の外に向かった様々な活動も求められています。最近は何でも評価をしてもらうべきとされ、これら活動全体が評価の対象とされます。さらに都民、国民に対する説明責任を果たすべき、したがって評価結果を公表するべし、また評価は公正であるべきだから評価する人たちに外部の学者や有識者を入れるべし、とやたらに「べき、べし」がつづく文になってしまいます。

物理教室の活動については各研究グループがそれぞれ行った教育と研究活動のレポートをまとめて、毎年の「年次報告」として発行しています。これは大学の自己点検・評価の一環ということになるのですが、今のように評価についてやかましくいわれるよりも以前、約20年前に始まりました。その記念すべき初版のはしがきには「年次報告」の目的の第一は物理教室の生きた姿を記録すること、第二に物理教室の活動を外部の人々に知ってもらう資料とすること、第三は我々自身の励みのためであること、と記されています。特に第二の目的については「東京都の大学で、都民の税金で運営されている以上このようなことは本来もっと早くなされるべきであった」と述べられていることから、まさに、教室が1年間に行った研究と教育活動について都民、国民に対する説明責任を果たすべきという考えがあったのです。年次報告を執筆している皆さんは当然このような目的を考えていると思いますが、はたしてこれを読む人あるいは人たちについてどのようなイメージを描きながら書いているのでしょうか。報告を読む限りは、やはり大学関係者向け、それも他大学の理学系の同業者達、そして大学院を志望している学生達でしょう。物理教室の生きた姿を記録して発行を続けていくことによって、同業者やこれから物理学の研究をしようとしている若い世代による厳しい目がふりそそがれている。このような自覚が「自身の励みのため」になっているのではないのでしょうか。

約20年前と違う点は、年次報告は出すだけではなく、外部の学者や有識者による評価を受けるべしという要請に応えなければなりません。これについてはどうしたら良いのでしょうか。評価機関を作るべしという議論があります。全国の大学の各学科、学部、大学院、全学から出される報告を親切にも評価してくれるような機関ができて、「今年の物理教室の評価順位の発表！」などというようなことが起きそうです。

ユメをもう一つ。この年次報告がどこかの公立図書館に置いてあって、たまたま手に取った人がパラパラとページをめくって、「うん、そうか、都立大学はこんなに活発に教育と研究をやっているのか」とあらためて都立大学を見直すという、ユメみたいなことは起こらないでしょうね。

(浜津良輔 記)

平成 16 年度年次報告編集委員  
岡部豊 (2004 年度教室主任)  
大橋隆哉  
浜津良輔  
松田和之