

研究室活動状況 平成 15 年度

各研究室の活動状況を、以下順を追って報告する。記載されている項目は、次の通りである。

1. 研究活動の概要

2. 研究業績

- 1) 論文 (国内外の専門学術雑誌記載のオリジナルな研究論文)
- 2) 国際会議報告集 (国際会議、国際ワークショップ等のプロシーディング)
- 3) 学会講演 (日本物理学会等の学会や、国際会議での講演。招待講演の場合はそのことが明記されている。上の 1) 2) と重複するものもある。国際会議での講演は、まとめて後に置かれている)
- 4) 科学研究費等報告書 (代表者が本教室の教員である課題のみ記載されている。) 学会誌等 (商業誌等を含む) に発表された論文、解説等。(研究所レポートや研究会報告は含んでいない。) 著書、訳書、編集等 (著、訳、編の別が氏名の後に示されている。訳書は邦訳の後に () 内に原著者名、原著名が示されている)

素粒子理論研究室

1. 研究活動の概要

以下に研究室の活動を (1-6):ニュートリノ物理の現象論、(7-8):それ以外の研究項目の順序で記述する。

スーパーカミオカンデによる大気ニュートリノ実験によって発見され、SNO その他の太陽ニュートリノ実験、およびカムランド原子炉実験によって確認されたニュートリノ振動現象はニュートリノ質量とレプトンフレーバー混合の物理という新しい研究領域を創成した。これらの実験によって我々は牧・中川・坂田行列の(1-2)(太陽)および(2-3)(大気)セクターの構造をほぼ把握することができた。残るのは(1-3)セクターである。この中には世界のコミュニティーの一致した次の目標である(1-3)角、さらにはレプトン小林・益川位相が含まれる。この探索方法を見出すべく、我が都立大計画班は文科省科研費特定領域研究「ニュートリノ振動とその起源の解明」(今年度最終)において理論系計画班の中核を形成し、国際共同研究を含む活発な研究活動を行った。

1) (1-3)角の測定のための原子炉実験実現に向けた国際的リーダーシップ

次の目標である(1-3)角の決定に関して、我々のグループは東北大の実験グループと協力して原子炉実験による測定法を提案した。この提案は世界的な大きな反響に迎えられ、世界的規模の国際的実験グループ形成への潮流が形成された。この努力は125名の当該分野の実験・理論研究者が署名するWhite Paperとして結実し、欧州ではDouble Choozグループの実験計画が承認されるに至った。我が研究室の理論的活動がこの国際的実験グループ形成とWhite Paper執筆の原動力の一助となったことは言うまでもない。

日本においても24.3 GWという世界最大の熱出力(したがって最大の反電子ニュートリノフラックス)をもつ柏崎刈羽原子炉発電所における実験を想定した具体的計画が立案され、KAShiwazaki-KAriwaにちなんで、KASKAグループと銘打たれた。16年5月8,9日の2日間にわたって、第1回KASKA共同実験グループミーティングが都立大学国際交流会館において開催された。

2) 原子炉ニュートリノによる θ_{13} 測定の現象論

原子炉からの反電子ニュートリノ欠損測定実験は、三世代のニュートリノ振動の枠組における第三の混合角 θ_{13} の決定のための有力候補として最近注目を集めている。日本で想定されている柏崎刈羽原発での実験は、そのニュートリノフラックスが世界最大である一方、原子炉が複数個(7基)存在することによる付加的な不定性の存在が懸念されるが、この不定性は測定器を複数箇所(近距離に2個、遠距離に1個)に設置することにより問題とはならないことを示した。又、 θ_{13} の測定精度は、測定器の非相関系統誤差が主に寄与することから、現実的な測定器の系統誤差を仮定することにより測定精度の限界値を導いた。さらにその限界値を超えるためのアイデアとして、同一の測定器を一箇所に複数個設置することを提案した。

(この課題は東北大学ニュートリノセンター・末包文彦、カリフォルニア州立大学・Horton-Smith両氏との共同研究)

3) 原子炉実験と長基線加速器実験の組み合わせによるCP非保存測定

原子炉実験による(1-3)角の測定と長基線ニュートリノ振動実験の組み合わせによってCP非保存位相の測定が可能であることを初めて指摘した。JPARC-Hyper-Kamiokande実験におけるCP非保存位相の測定は反ニュートリノモードでの電子型ニュートリノ出現実験の運転を必要とするが、これはニュートリノモードに比して同数の事象数を得るのに約3倍もの時間を要する。(JPARCはJapan Proton Accelerator Research Complexの略称)そこで当該実験では最初にニュートリノモードを2年、後に反ニュートリノ

モードを6年運転する予定である。しかし、もしニュートリノモード稼働時に原子炉ニュートリノ実験が稼働していれば、これと同期した2年間でCP非保存位相の測定が可能であることを示した。この方法によるレプトンCP非保存の測定方法は現行のSuper-Kamiokande (SK) 実験での10年間のニュートリノモード測定と組み合わせることによっても(少し感度が落ちるものの)実行可能で、Hyper-Kamiokande 検出器なしでCP非保存の測定を可能にする現在知られている唯一の方法である。

4) 長基線加速器実験による(2-3)角測定

(2-3)角は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1%の精度で決定可能であると信じられている。このような高精度の決定が課題となるとき、通常は小さいので無視されている3世代の効果を問題にする必要がある。当該実験グループと密接なコンタクトをとり、現実的な実験条件でカットされた後でのバックグラウンドの形状を考慮してこの(2-3)角の測定精度の評価を3世代混合の枠組みで行った。この結果、(2-3)角の測定精度は(1-3)角の不定性や(2-3)角の最大角からのずれによって大きな影響を受け、4-5%まで低下する領域があることが明らかにされた。

5) ニュートリノ振動における質量二乗差の符号の決定

ニュートリノの質量パターンを知るために欠くことができない測定量として大気ニュートリノ振動質量二乗差の符号がある。これは、原理的には、2000 km 程度の長基線加速器実験において物質効果との干渉効果を測定することによって決定可能である。しかしながらこのような長基線実験は巨大な検出器を必要とし、振動質量二乗差の符号決定への現実的な実験的戦略は未だ打ち立てられていない。日米の長基線加速器実験計画を組み合わせることによって、この符号の決定が可能になる可能性を議論した。その結果、(i) 米国のNO ν A (日本のJPARC-SK)を振動極大より大きな(小さな)エネルギーで運転することは感度を極端に減少させるので避けるべきであること、(ii) 通常言われる一方が反ニュートリノモードではなく、双方がニュートリノモードで運転することによってより高い精度で符号の決定が可能である、という二つの新しい知見を得た。これらの結果に到達する上で、以前に開発した関係した諸量をコンパクトに図示することのできる双確率空間のCPダイアグラムが大きな役割を果たした。

(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、および米国フェルミ国立加速器研・Stephen Parke 両氏との共同研究)

6) 加速器長基線実験によるパラメーター縮退の現象論

近未来に東海村 神岡で行われるJPARC実験でニュートリノと反ニュートリノの測定が振動最大のエネルギーで行われた場合、さらにどのような実験を行えばパラメーター縮退の問題を解決できるかを、($\sin^2 2\theta_{13}, 1/s_{23}^2$) 平面内の新しいプロットを導入することによって議論した。その結果、JPARCや米国のNO ν A (NuMI Off-axis Neutrino Appearance Experiment、ノバと読む) 実験で振動最大よりも低エネルギーで実験することが現実的に可能であれば、種々の不定性を解決する可能性があることを示した。それ以外に $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$ の測定が有効であることも示した。

7) 超弦理論と重力の量子効果

昨年に引き続き、超弦理論におけるフェルミ粒子の凝縮について研究した。

ヘテロ超弦理論において、fivebrane という非自明な背景場がある場合に、ゲージ微子の伝播関数を計算した。計算は弦理論の共形場の理論を用いて、D-brane boundary state を変型した boundary state を使って行った。有効理論からの示唆として、fivebrane 背景においては、その非自明な4次元空間のフェルミ粒子の伝播はないことが知られているが、この計算の結果はこれを支持するものとなった。さらに、求めた伝播関数(2点相関関数)からゲージ微子の対凝縮を計算した。計算は厳密なものではなく、得られた結果は示唆に過ぎないが、有効理論から予想されている結果を支持するものとなった。

8) 超弦理論に基づいた素粒子模型

超弦理論における多次元を占める物体であるDブレーンの交差点にカイラルフェルミオンが局在する事実から、カイラルフェルミオンで構成されている我々の世界をDブレーンの交差する系として表現することができる可能性がある。このアイデアに基づく模型を交差Dブレーン模型という。多くの交差Dブレーン模型がすでに構成されてきたが、共通の問題として、必要でないゲージ相互作用が含まれてしまうこと、必要でない物質場が含まれてしまうことがあった。これは、超弦理論として無矛盾であるための条件を満たすために、必要以上のDブレーンを導入せざるを得ないことに原因がある。

余計なゲージ相互作用を適当に処理するのではなく、それを意味あるものとして解釈するアイデアを提案した。それは、余計な相互作用をクォークやレプトンの構成要素としてのプレオンの間に働く力として解釈するというものである。(ただし、クォークやレプトンの構成要素の存在は仮定に過ぎない。)具体的に構成した模型は非常に単純で、必要でない物質場の数も少ないものとなった。

課題として、クォークやレプトンの質量生成にかかわる湯川結合をどのように生成するか、低エネルギーで存在する超対称性をどのように破るか、などの問題が残っている。

2. 研究業績

1) 論文

M. Asakawa, H. Minakata and B. Muller: Negative Elliptic Flow from Anomaly Induced DCC Formation, Nuclear Physics **A721** (2003) 305-308.

N. Kitazawa, Gaugino Condensation in Heterotic Fivebrane Background, Modern Physics Letters **A19** (2004) 681-692.

N. Kitazawa, Fermion Propagators in type II Fivebrane Backgrounds, Physical Review **D68** (2003) 026005.

Y. Katagiri and N. Kitazawa, Fermionic Zeromodes in Heterotic Fivebrane Backgrounds, Progress of Theoretical Physics **110** (2003) 1211-1217.

H. Minakata and H. Sugiyama: Exploring Leptonic CP Violation by Reactor and Neutrino Superbeam Experiments, Physics Letters **B580** (2004) 216-228.

H. Minakata, H. Nunokawa and S. J. Parke: The Complementarity of Eastern and Western Hemisphere Long-Baseline Neutrino Oscillation Experiments, Physical Review **D68** (2003) 013010.

H. Minakata and H. Sugiyama: Double Beta Decay Constraints on Neutrino Masses and Mixing; Reanalysis with KamLAND Data, Physics Letters **B567** (2003) 305-314.

H. Minakata, H. Sugiyama, O. Yasuda, K. Inoue and F. Suekane: Reactor Measurement of θ_{13} and Its Complementarity to Long-Baseline Experiments, Physical Review **D68** (2003) 033017-1-12.

H. Sugiyama: Constraints on Neutrino Mixing Parameters by Neutrinoless Double Beta Decay Experiments, Nuclear Physics **A721** (2003) 521-524.

O. Yasuda: Summary of Working Group 1 at Nufact'01: Theory Part, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **503** (2003) 104 - 109.

B. Autin, D. A. Harris, S. F. King, K. S. McFarland and O. Yasuda: Summary of Working Group 2, Nufact02, Journal of Physics G **29** (2003) 1743 – 1755.

2) 国際会議報告

H. Minakata, H. Nunokawa, and S. Parke: CP and T Violation in Neutrino Oscillations, (Lecture presented at 10th Mexican School of Particles and Fields, Playa del Carmen, Mexico, 30 October-6 November, 2002,) AIP Conf. Proc. 670 (2003) 132-139.

O. Yasuda: Physics potential and present status of neutrino factories, Proceedings of the 3rd International Workshop on Neutrino Oscillations and their Origin (World Scientific, Singapore, 2003, eds Y. Suzuki, M. Nakahata, Y. Fukuda, Y. Takeuchi, T. Mori, T. Yoshida) p 259 – 268.

O. Yasuda: Neutrino factories: Physics potential and present status, Proceedings of 3rd International Conference on Particle Physics Beyond the Standard Model, (IOP Bristol, 2003, eds. Klapdor-Kleingrothaus), p 419 – 434.

3) 将来計画の実験計画書

Y. Kuno, Y. Mori, S. Machida, T. Yokoi, Y. Iwashita, J. Sato and O. Yasuda
A feasibility study of a neutrino factory in Japan, KEK Report 2003-5, September 2003.

K. Anderson et. al. (125 authors including H. Minakata and O. Yasuda)
White Paper Report on Using Nuclear Reactors to Search for a Value of θ_{13} , hep-ex/0402041, January 2004.

4) 学会講演

日本物理学会秋季大会 2003年9月9日～9月12日(宮崎ワールドコンベンションセンター)

南方久和, 杉山弘晃, 安田修: JHF-Kamioka 実験におけるパラメーター縮退問題の定量的解析

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)

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

国内研究会

第4回研究会「ミューオン蓄積リングを使ったニュートリノ源とそれが拓く物理」:

2003年5月16日-17日(東京都立大学)

杉山弘晃: Quantitative treatment of the parameter degeneracies at the JPARC experiment.

安田修: WG1 overview; Status of neutrino oscillation phenomenology—after SNO—

高エネルギーニュートリノ・宇宙線・線研究会—Ashra 計画を巡って—:

2003年7月24日(東京大学宇宙線研究所)

安田修: Neutrino oscillations in high energy cosmic neutrino flux

国際会議

XII International School “Particles and Cosmology”

Baksan Valley, Kabardino-Balkaria, Russia, April 21-26, 2003

H. Minakata: “Status of Neutrino Oscillations”, and “Parameter Degeneracy in Neutrino Oscillations”
(Invited lectures)

Workshop on Future Low-Energy Neutrino Experiments

University of Alabama, Tuscaloosa, USA, April 30 – May 2, 2003

O. Yasuda: Parameter degeneracy and reactor neutrino experiments.

Second International School on the Neutrino Factory

Shelter Island, New York, May 27-June 4, 2003

H. Minakata: Superbeams, Neutrino Factories and Beta Beams (Invited lecture)

5th International Workshop on Neutrino Factories and Superbeams

(NuFact 03), Columbia University, New York, USA, June 5 – 11, 2003

H. Minakata: Overview of Degeneracies (Invited talk).

H. Sugiyama: Resolving JHF Degeneracies.

O. Yasuda: Reactor measurements of θ_{13} (Invited talk).

19th International Workshop on Weak Interactions and Neutrinos (WIN03)

Lake Geneva, Wisconsin, October 6-11, 2003

H. Minakata: Neutrino Physics: Theoretical Status (Invited plenary talk)

2nd Workshop on Future Low-Energy Neutrino Experiments

Technische Universität München, Munich, Germany, October 9 – 11, 2003

H. Minakata: Comments on reactor-LBL complementarity (Invited talk).

O. Yasuda: Sensitivity of experiments with multi reactors and multi detectors.

Second International Workshop on Neutrino Oscillations in Vanice

Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Venice, Italy, December 3-5, 2003

H. Minakata: New Views on the Problem of CP Violation (Invited talk)

Coral Gables Conference 2003

Lago Mar Resort Hotel, Fort Lauderdale, USA, December 17 – 21, 2003

O. Yasuda: Reactor Measurement of θ_{13} and Its Complementarity to Long-Baseline Experiments.

The 5th Workshop on Neutrino Oscillations and their Origin

(NOON2004), Odaiba, Tokyo, Japan, February 11-15, 2004

O. Yasuda: Toward exploring U_{e3} (Invited talk).

Hujihara Seminar; Neutrino Mass and Seesaw Mechanism, KEK, Japan, February 23-25, 2004

H. Minakata: Toward Exploring (1-3) Sector of the MNS Matrix (Invited talk)

3rd Workshop on Future Low-Energy Neutrino Experiments

Toki messe, Niigata, Japan, March 20 – 22, 2004

H. Minakata: Reactor Measurement of Lepton Mixing Parameters

O. Yasuda: Sensitivity to $\sin^2 2\theta_{13}$ at KASKA.

5) 科学研究費等報告

安田修：平成 13 年度～16 年度科学研究費補助金（基盤研究 C）研究成果報告書
「長基線実験に関連したニュートリノ物理学」

6) 学会誌等

安田修：ニュートリノ振動の現象論
日本物理学会誌 58 (2003) 349 – 355.

安田修：ステライルニュートリノとは何か？
パリティ 19 (2004) 61 – 64.

原子核理論研究室

1. 研究活動の概要

本研究室の中心課題は、強い相互作用をする多体系である原子核・ハドロンとともに、ごく最近急速に実験的・理論的研究が進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、その静的・動的性質を明らかにすることである。

1) 強度関数のゆらぎの分析と波動関数の特徴付け

原子核の高励起状態では波動関数の多くの成分が混じり合い、種々のプローブに対する強度関数を調べると、大局的なふるまいが和則によって特徴づけられる一方で、複雑なゆらぎの構造が見える。四重極励起のゆらぎの統計的分析を行ない、論文にまとめた。強度関数のゆらぎは波動関数の特徴を反映している。後者の指標として、最近ピリアード系において「結節領域 (Nodal Domain) 分布」という指標が提案され、可積分系とカオス系での違いが示されている。この手法をそのまま複雑な多自由度系に拡張することは困難であるため、まず一般的な非可積分系への適用可能性を二次元の非調和振動子モデルで検討した。この結果、ピリアード系と同様な結節領域を結合する機構とともに、これと逆の機構も存在することが示された。

2) クォーク物質におけるスピン偏極現象とカラー超伝導

高密度星などで実現されると予想されるクォーク物質において、スピン偏極とカラー超伝導が共存して実現する可能性を、二つの秩序変数をもつ結合積分方程式を解くことによって調べた。これによって、スピン偏極が超伝導と共存する理由やエネルギーギャップの運動量空間におけるふるまいを明らかにし、この結果を論文にまとめて出版した。また、新たな可能性として、 $i\gamma_5$ 型の相関による「カイラル密度波」の存在を調べ、対応する相図を検討した。

3) 極低温ボーズ・フェルミ混在原子気体の性質

ボーズ・フェルミ混合系は異なる統計性をもつ粒子の多体系として多様な静的・動的性質を示すと予想され、原子核や凝縮系などの様々な局面であらわれ研究されている。とくに極低温原子気体は、トラップや原子の種類、さらに Feshbach 共鳴を用いた粒子間相互作用の調節など外部から多くのパラメタが操作でき、(有限)量子多体系の研究にとっての宝庫となりつつある。

a) 斥力系における相分離と単極子振動のソフト化

ボソン・フェルミオン間に斥力が働く系の基底状態および単極子振動状態を平均場近似 + RPA の範囲で計算した。斥力の強度がある値を超えると、二成分の分離が起こり、我々のパラメタの範囲ではフェルミ粒子がボーズ粒子の芯をとりまく「皮(または、泡)」状配位を示す。このとき、フェルミ粒子の一粒粒子スペクトルは調和振動子配位から、回転子型バンド構造へと変化する。後者は遠心力によるもので、半古典的描像でよく説明される。同様に、単極子強度の重みをつけた集団振動の平均エネルギーは、上記の分離点でソフト化を起こすが、これはフェルミ粒子の密度分布が一様分布に近づくためと解釈することができる。以上の結果をまとめ論文を出版した。

b) ボーズ・フェルミ混在原子気体における渦励起

閉じ込められた原子 Bose 凝縮体 (BEC) に統計性の異なる Fermi 原子が混在した極低温気体の回転現象を理論的に調べた。BEC は回転により、量子渦格子を形成する。一方、Fermi 原子は BEC の平均場

potential の影響により、BEC の密度の薄い渦糸部に局在し、図に示すような擬 1 次元的な構造を形成する。我々はこの現象を予言し、定量的に解析して、巨視的、並びに微視的な機構を明らかにした。

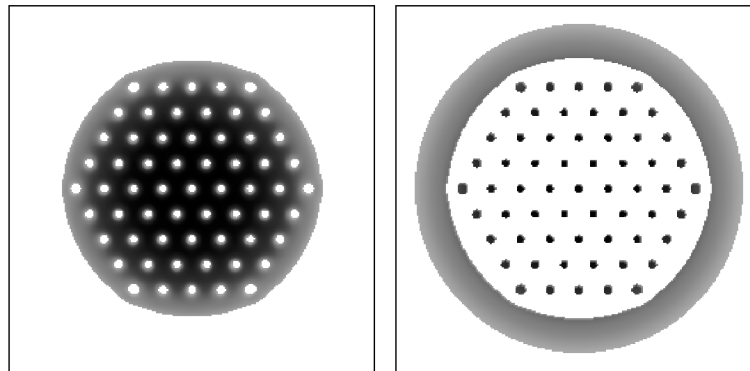


図 1: Bose 凝縮体 (左) と Fermi 縮退気体 (右) の円柱光学密度

c) 擬一次元ボーズ-フェルミ混合系の不安定性

擬一次元ボーズ・フェルミ混合系のパイエルス不安定性やそれにもなう停在波ボーズ・アインシュタイン凝縮の研究成果を論文にまとめ投稿した。

d) ボーズ・フェルミ混合気体における複合フェルミオンの生成

ボソン・フェルミオン間に引力が働く場合、両者が準束縛状態（複合フェルミオン）を形成して、新しい混合気体を形成する可能性がある。本研究では、ボーズ・フェルミ混合気体中で二粒子グリーン関数の積分方程式を解き、準束縛状態が形成される条件を調べた。これは以前に行なった二体計算を、ボーズ粒子が凝縮し、かつ二体の重心運動量が有限な場合に拡張したものである。これによって、フェルミ系におけるクーパー対形成との対応、対がフェルミオンであることによる運動学的要請を明らかにした。

e) 時間依存平均場法によるボーズ・フェルミ混合気体の単極子振動の減衰

有限量子多体系の振動運動の記述は RPA 理論などがしばしば用いられるが、振幅が大きい場合や二体散逸過程が重要になるとこの理論では扱えない。我々は、ボーズ・フェルミ混合気体の単極子振動を例にとり、時間依存 Gross-Pitaevskii・Vlasov 方程式を連立させて解き、大振幅における単極子振動の減衰と対応する強度スペクトルの変化を調べた。その結果は初期パラメタに依存するが、フェルミ粒子振動の減衰過程や、ボーズ・フェルミ相互作用によるボーズ粒子の振動、振動開始からの時間によるスペクトルの変化、などについての洞察が得られた。

4) 二成分有限縮退フェルミ原子気体の安定性

前年度の研究で、二成分有限縮退フェルミ原子気体は異なる成分に属するフェルミ原子間相互作用が斥力のときは集団強磁性状態となることを半古典近似を用いて示し、その結果を発表した。この方法を用いて、フェルミ原子間相互作用が引力の場合の密度分布を求めた。引力の場合には凝縮体の中心部から系は局所的に不安定になるが、この近似の範囲内では代数方程式を解くことによりそれを評価することができ、系の安定性条件が具体的にもとまった。

2. 研究業績

1) 論文

T. Sogo, T. Suzuki and H. Yabu: Transition in the Fermionic Spectra and Monopole Oscillation in the Trapped Bose-Fermi Atomic Mixture *Phys. Rev.* **A68** (2003) 063607.

H.Aiba, M.Matsuo, S.Nishizaki and T.Suzuki: Fluctuation Properties of Strength Functions Associated with Giant Resonances *Phys. Rev.* **C68** (2003) 054316.

E.Nakano, T.Maruyama and T.Tatsumi: Spin polarization and color superconductivity in quark matter *Phys. Rev.* **D68** (2003) 105001.

H.Yabu, Y.Takayama and T.Suzuki: Bose-Fermi mixed condensates of atomic gas with boson-fermion quasi-bound state *Physica* **B329-333** (2003) 25-27.

T.Sogo, T.Miyakawa, T.Suzuki and H.Yabu: RPA Study of Collective Excitations in the Bose-Fermi Mixed Atomic Gases with Large Excess of Bosons *Physica* **B329-333** (2003) 53-54.

T. Sogo and H. Yabu : Collective ferromagnetic states of degenerate atomic Fermi gas with two components in a trapping potential *Physica* **B329-333** (2003) 51-52.

T.Miyakawa, H.Yabu and T.Suzuki: Peierls instability of the quasi-one-dimensional Bose-Fermi mixed gas
Physica **B329-333** (2003) 28-29.

T.Sogo, T. Suzuki and H. Yabu: RPA Study of Collective Excitations in the Bose-Fermi Mixed Atomic Gases, *J. Phys. Soc. Jpn. Suppl.C* **72** (2003) 144-147

H. Yabu and T. Sogo : Collective Ferromagnetism in Two-Component Fermi-Degenerate Gas Trapped in Finite Potential, *J. Phys. Soc. Jpn. Suppl.C* **72** (2003) 148-151

2) 国際会議報告

T. Sogo, T. Miyakawa, T. Suzuki and H. Yabu : RPA study of collective oscillations in the Bose-Fermi mixed gases of trapped atoms, *Frontiers of Collective Motions* (Proc. International Symp. CM2002, Nov.6-9 2002, Aizu) eds. H. Sagawa and H. Iwasaki. (World Scientific, 2003, Singapore), 124-129.

T. Maruyama, H. Yabu and T. Suzuki : Time-dependent dynamics of the bose-fermi mixed condensed system, *Frontiers of Collective Motions* (Proc. International Symp. CM2002, Nov.6-9 2002, Aizu) eds. H. Sagawa and H. Iwasaki. (World Scientific, 2003, Singapore), 271-275.

3) 学会講演

日本物理学会「第57回年次大会」 2003年3月28-31日(東北大学・東北学院大学)

増山智大、鈴木徹：準粒子RPAによる原子フェルミ気体の超流動遷移

鈴木徹：Fermionic Molecule Formation in the Bose-Fermi mixture: Partial Fermionization Approach

丸山智幸、藪博之、鈴木徹：Landau Damping of the Collective Oscillation in the Bose-Fermi Mixed Condensed System

相場浩和、松尾正之、西崎滋、鈴木徹： ^{40}Ca の四重極巨大共鳴の強度関数のゆらぎII

日本物理学会「2003年秋季大会」 2003年9月9-12日(宮崎ワールドコンベンションセンター)

相場浩和、鈴木徹：Nodal Domains of an Irregular Oscillator

日本物理学会「2003年秋季大会」 2003年9月20-23日(岡山大学津島キャンパス)

西村拓史、藪博之: Bose-Fermi 混在原子気体における渦励起

丸山智幸、藪博之、鈴木徹: Collective Motion and Damping in the Bose-Fermi Mixed Condensed System

十河孝明、鈴木徹、藪博之: ボーズ・フェルミ混合原子気体の相分離と単極子振動のソフト化

基研研究会「熱場の量子論とその応用」 2003年8月20-22日(京都大学基礎物理学研究所)

藪 博之: Bose-Fermi-Mixed Condensates of Ultra-cold Quantum Atomic Gas with Boson-Fermion Quasi-Bound States

仲野英司: Spin Polarization in Quark Matter

基研研究会「量子力学とカオス: 基礎的問題からナノサイエンスまで」

2003年11月12日-14日(基礎物理学研究所)

相場浩和、鈴木 徹: Nodal Domains of an Irregular Oscillator

基研地域スクール「静内'03」 2004年1月9-12日(静内ふれあいセンター)

鈴木 徹: 有限量子多体系としての極低温原子気体 - 原子核物理との接点 -

国際会議

12th International Workshop on Low Energy Positron and Positronium Physics (POSITRON 03),
July 19-21, 2003, Sandbjerg Estate, Denmark

H. Yabu: Many positron and positronium interactions,

NATO Advanced Research Workshop on Superdense QCD Matter and Compact Stars,
Sep.27-Oct.4,2003, Yerevan, Armenia

E.Nakano, T.Maruyama and T.Tatsumi: Possibility of color magnetic superconductivity

The 8th International Conference on Clustering Aspects on Clustering Aspects of Nuclear
Structure and Dynamics, Nov. 24-29, 2003, Nara, Japan

H. Yabu, Y. Takayama and T. Suzuki: Atomic Bose-Fermi mixed condensates with Boson-Fermion quasi-bound cluster state,

H. Yabu, K. Oda, T. Miyakawa and T. Suzuki: Low-energy Scattering Parameters by Effective Positronium-Positronium Interaction and Positronium Bose-Einstein Condensates

Spin and Quantum Structure in Hadrons, Nuclei and Atoms (SQS04),
Feb.19-20, 2004, Tokyo Institute of Technology, Japan

H. Yabu and T. Sogo: Spin polarization and Collective ferromagnetism in trapped atomic gas of fermionic atoms,

KEK Workshop on Nuclear Chiral Dynamics, Mar.18-20, 2004, KEK

H. Yabu: Topics in ultra-cold atomic gas physics -boson condensate in fermion matter, skyrmeon and others-

宇宙物理理論研究室

1. 研究活動の概要

1) ブラックホール降着ガスの輻射輸送

ブラックホールジェット天体の高階電離した鉄の吸収スペクトルや活動的銀河核 (AGN) の酸素の吸収スペクトル (warm absorber) を定量的に解析し, 吸収に関わる降着ガスの構造を理解することを目的として, non-LTE 輻射輸送の研究を進めている. X線域のスペクトル線は Einstein の A 係数が大きいため物質との熱的カップリングが小さく, 古典的な散乱・吸収モデルによる輻射輸送や curve of growth が成り立たない. このことはまた, X線域の line driven による質量放出に関係していると考えられ, 輻射による加速の効率などを調べている.

2) 銀河団ガスの力学平衡と熱的進化

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, コラプス時の自己相似的な分布からずれることが考えられる. 一方で, ガス温度は中心部でも, 冷却が効いていない周囲の領域の $\sim 1/3$ 程度以上には下がっていないことが観測的に指摘されている. 力学平衡の下での銀河団ガスの熱的進化を整合的に理解することを目的として, 準静的モデルによる解析的なアプローチの他, 流体力学コードを用いた進化の研究を進めている. 流体力学コードによる研究ではダークマター分布との関連も調べている.

3) 銀河団の形成と進化

銀河団の X 線光度と温度の間の相関関係は, 重力のみの加熱だけを考えた理論モデルが予想する関係からずれてることが, 観測によりわかっている. この原因としては, 重力以外の加熱源, 例えば, 超新星爆発や活動銀河核によるもの, が考えられている. 準解析的手法を用いて, これらの加熱源を取り入れた銀河団の形成, 進化を調べ, 観測結果を説明するにはどのような加熱源が必要か, また, どの程度の加熱が必要であったのかを議論した.

2. 研究業績

1) 論文

V. A. Dogiel, K. Masai, H. Inoue, V. Schönfelder, and A. W. Strong: The The origin of X-ray flux from the galactic ridge, *Astron. Nach.* **324** (2003) 65

M. Shimizu, T. Kitayama, S. Sasaki and Y. Suto: Mass-temperature relation of galaxy clusters: implications from the observed luminosity-temperature relation and X-ray temperature function, *Astrophys.J.* **590** (2003) 197-206.

M. Shimizu, T. Kitayama, S. Sasaki and Y. Suto: Monte-Carlo Modeling of Non-Gravitational Heating Processes in Galaxy Clusters, *Publ. Astron. Soc. Japan* **56** (2004) 1-16.

N. Ota, E. Pointecouteau, M. Hattori, K. Mitsuda: Chandra Analysis and Mass Estimation of the Lensing Cluster of Galaxies CL0024+17, *Astrophys. J.* **601** (2004)120-132

T. Kitayama, E. Komatsu, N. Ota, T. Kuwabara, Y. Suto, K. Yoshikawa, M. Hattori, H. Matsuo: Exploring Cluster Physics with High-Resolution Sunyaev-Zel'dovich Effect Images and X-ray Data: The Case of the Most X-ray-Luminous Galaxy Cluster RX J1347-1145, *Publ. Astron. Soc. Japan* **56**(2004)17-28

2) 国際会議報告

D. Yonetoku, T. Murakami, A. Yoshida, K. Masai, N. Kawai, M. Namiki: A Radiative Recombination Edge in the X-ray Afterglow of GRB 970828 and Non-Equilibrium Ionization States, *GAMMA-RAY BURST AND AFTERGLOW ASTRONOMY 2001*, AIP Conference Proceedings, **662** (2003) 383

3) 学会講演

日本物理学会 2003 年秋季大会, 2003 年 9 月 20 日-23 日 (岡山大学)

政井邦昭: 宇宙物理における非平衡電離プラズマと放射特性 (シンポジウム)

日本天文学会 2003 年秋季年会, 2003 年 9 月 25 日-27 日 (愛媛大学)

赤堀 卓也: 銀河団二重構造の熱的進化の可能性

国内研究会

高エネルギー宇宙物理学の理論的研究, 2003 年 11 月 26 日-28 日 (大阪大学)

政井邦昭: 準静水圧平衡にある銀河団ガスのクーリングフロー

超高エネルギー 線天体研究会, 2004 年 3 月 20 日 (東京大学・宇宙線研究所)

政井邦昭: 超新星残骸における粒子加速

国際会議

Atomic Collisions of Slow/Trapped Highly-Charged Ions, Wako (Japan), February 19-21, 2004

K. Masai: Atomic Processes in High-Energy Astrophysical Plasmas (invited)

High-Energy Density Laboratory Astrophysics, Tucson (USA), March 10-13, 2004

K. Masai: Radiation Properties of High-Energy Astrophysical Plasmas (invited)

基礎物理学研究グループ

1. 研究活動の概要

当研究グループにおける本年度の研究テーマは、主に次の3つからなる。村田の下では生体レオロジーに基づく血液サスペンションの理論的な解析が、S. ケトフを中心としたグループでは量子重力及び非摂動的な超弦理論の研究がなされた。齋藤のグループでは可積分系理論とその超弦理論への応用が研究された。

1) 血液のレオロジー、サスペンションのレオロジー

本年度は血流におよぼす血管内壁および赤血球表面の電荷の効果を調べた。生理的条件下における血管内壁および血球表面は負電荷を帯びており、その生理学的な重要性についてはこれまでにたびたび指摘されている。血液中で生ずる赤血球の凝集、血栓形成、血球の血管壁への吸着、毛細血管壁を通しての物質の輸送等におよぼす表面電荷の効果については多くの報告がある。しかし血流に及ぼす影響についての研究は少ない。ガラス管を用いた *in vitro* の実験で、電荷壁を持つ管を流れる血液の流動抵抗が電荷を持たない管の場合に比べ減少するとの結果がいくつか報告されている。ここでの目的は Winlove and Parker の方法を踏襲して電荷壁を持つ毛細管中の血流の振る舞いをより詳細に調べ、赤血球表面の電荷密度に対する管壁上の電荷密度の割合が血流抵抗にどのように影響を与えるかを理論的に調べることにある。問題の単純化のため、毛細血管を細くて真っすぐな断面積一定の円筒管とし、そこを流れる血液を1価-1価の対称な電解質水溶液に赤血球が分散したサスペンションと見なす。赤血球濃度が高い場合には毛細血管中で赤血球は中心軸近傍に集まり一群となって流れる様子が見られるが、この運動を半径一定の同心円筒の運動で置き換える。管壁上と中心核上にそれぞれ一定の表面電荷密度を与え、一定の圧力勾配を加えた際の管内の電位分布、流動電位、速度分布を計算し、流量に対する圧力勾配の比で定義される見かけの粘性率を求め、見かけの粘性率におよぼすいくつかのパラメータの影響を調べた。報告されている表面電荷密度の値はかなり小さく、そのため管径に対する中心核の比が0.98以下では電荷の効果はほとんどみられなかったが、見かけの粘性率は中心核上の電荷密度に対する管壁上の電荷密度の比に依存することが示された。管壁上の電荷の存在は、 β の値によらず、見かけの粘性率の増加をもたらすことが示された。しかし、 β がある特別の値を取る場合には、表面電荷の効果が消えることも示された。

2) タイプ II 超弦理論におけるDインスタントン補正の計算

タイプ II 型超弦の Calabi-Yau 多様体上コンパクト化において、単体物質多重子の成す量子モジュライ空間測度に対するDインスタントン補正について研究した。これは超弦理論の最近の研究の中でも特に高度に進んだ、トポロジーや複素微分幾何学の最新の数学を道具として必要とする研究領域である。当研究は日本学術振興会の科学研究費 (# 15540282) 及び都立大学理学研究科数学のメンバー (M. Guest 教授、大仁田教授) との共同研究として研究奨励費 (評価配分枠) の補助も受けて行われた。具体的には、ホッジ数が $h_{1,2} = 1$ の Calabi-Yau 多様体上でコンパクト化されたタイプ IIA 型超弦に生じる有効 $N=2$ 超重力理論に於いて、トリック対称性を持った単体物質多重子に対する (すべてのインスタントン数について) Dインスタントン補正を求めた。特に、複素オービフォルド特異点の分離を行うことによって、非摂動的な多重クォータニオニック測度が得られた。これは平坦な時空に於ける (Ooguri-Vafa による) 標準的な結果を $N=2$ の超重力まで一般化するものである。その結果、Dインスタントンは特別な Calabi-Yau サイクルを包むある種のDブレーンであることが明らかになった。(論文 [1]) 別の方法として我々はDブレーンの有効作用に超空間を用いることも試み、特に $N=1$ 超空間からディラトン・アキ

シオン結合を持つゲージ固定したD 3 ブレインに対する新しい作用を書き下すことができた。この結果は、 $N=1$ 超空間に於ける所謂 Chern-Simons 結合を再発見したことも意味する。この発見に関してはマルセーユ大学(仏)のグループも興味を持ち、2004年夏にそこで招待講演を行う予定である。(論文 [2])

3) AdS/CFT 対応の研究

AdS/CFT 対応は 2000 年に Harvard 大学の Maldacena によって提唱されて以来 (Maldacena 予想とも呼ばれ、最初の論文は既に 1000 回以上論文に参照されている) 弦理論に於いて最も知られた理論である。当研究は S.Ketov が 2002 年に都立大に赴任する以前から Kaiserslautern 大学(独)の Ruehl 教授のグループと共同で研究されてきた。ここでは、10 次元超弦理論を指針に用いてボソンの弦とゲージ理論との対応をまず研究し、付加的な形状流によって変形された低エネルギー有効作用を新しく提案し、弦理論からその作用が生成される過程を示し、更に AdS/CFT スケールがある閾値を超えない範囲で我々のモデルは閉弦のタキオンが安定化することを示した。我々はまたこの理論を有限温度にまで拡張し、ディラトンの波動方程式から高次元のグーボール質量を計算した。結果は論文 [3] 参照。この研究に於いて、S.Ketov が 2003 年 12 月に科学研究費の補助で Kaiserslautern 大学に Ruel 教授を訪れ共同研究を継続できたことは大変有効であった。更に Ruel 教授は 2003 年 6 月に都立大学を 1 週間にわたって訪れ、量子場の理論や共形不変性について有用な講義を行った。

4) ゴールドスティーノ作用と超対称性の非線形実現の研究

これは本年度から開始した新しいプロジェクトで S.Ketov と大学院生 畠中との共同研究である。我々は $N=1$ の超対称 Goldstone-Maxwell 作用から導かれるゴールドスティーノ作用は、 $N=2$ 理論が $N=1$ 理論に部分的対称性の破れを起こした時に得られるものに対応することを示した。新しく得られた作用は高階微分を含むが、それらは場の適当な再定義によって除き得る事を示し、更にゴールドスティーノに対する標準的な Akulov-Volkov 作用に一致することを示した。論文 [4]

5) 可積分系による D ブレイン力学の研究

超弦理論に於ける D ブレインの力学を完全可積分系の枠組みで理解することが本研究の目的である。そのために、まず完全可積分系の理論を、特に南部方程式との関係で調べた。始めに、離散可積分系に対して対応する南部系が常に得られることを示し、それらが超楕円関数解を持つことが示された。そのような系として、よく知られた戸田系の他に、高次元コマが含まれることは興味ある結果の一つである。更に高次元 D ブレイン自身がソリトン方程式に従うことを示すため、タキオン凝縮の機構を詳細に調べ、D ブレイン上のタキオン座標が、ソリトン座標と一致することを示した。論文 [5],[6]

6) 完全可積分系から非可積分系への転移についての研究

超弦理論や D ブレインの理論が可積分系としてその枠内で記述できるとすると、それらを特徴付けるには可積分系自身が非可積分系との対比の下で特徴づけられなければならない。このことを明らかにするために、簡単な可積分写像に僅かな摂動を加えたときに、カオスはどのようにして生じるかを、特に Julia 集合の振る舞い及び KAM の定理に注目して調べた。その結果、非可積分系では代数方程式の解の独立な点であった周期点集合が、可積分写像では突然代数多様体を成すことが示された。また、場の理論の手法を KAM の定理に適用することによってカオス的な Julia 集合の振る舞いを繰り込み群的に扱えることが確かめられた。論文 [7]、物性研究及び学部卒業研究。

2. 研究業績

1) 論文

S. V. Ketov: D Instantons and Matter Hypermultiplet, *Phys. Lett.* **B558** (2003) 119-124.

S. V. Ketov: More on the Gauge-fixed D3-brane Action with Dilaton-axion Coupling from N=1 Superspace, *Mod. Phys. Lett.* **A18** (2003) 1887-1894.

S. V. Ketov: Engineering a Bosonic AdS/CFT Correspondence, *Int. J. Mod. Phys.* **A23** (2003) 4233-4249.

T. Hatanaka and S. V. Ketov: On the Universality of Goldstino Action, *Phys. Lett.* —bf B580 (2003) 265-272.

S.Saito and R.Sato: Soliton Equations Solved by the Boundary CFT, *J. High Energy Phys.JHEP* **11** (2003) 008

S.Saito, A.Shudo, J.Yamamoto and K.Yoshida: Nambu-Hamiltonian Flows Associated with Discrete Maps, *Journ. Phys. Soc. Jpn.* **73** (2004) 557-565.

S.Saito, N.Saitoh and K.Yoshida: Hyperelliptic Nambu Flow Associated with Integrable Maps, *Journ. Math. Phys.* **45** (2004) 1031-1041.

H.Furukawa: Vortex Structure and Periodicity of Disturbance in the Wake of a Rotationally Oscillating Cylinder, *Journ. Phys. Soc. Jpn.* **72** (2003) 1092-1097.

2) 国際会議報告

S.Ketov: Non-perturbative low-energy effective action of the universal hypermultiplet International Workshop in String Theory 京都大学基礎物理学研究所、2002年11月15-16日

3) 学会講演

日本物理学会 2003年秋季大会 2003年9月9日-12日
(宮崎ワールドコンベンションセンター・サミット)

齋藤暁、佐藤隆一：Solution equations solved by the boundary CFT

日本物理学会第59回年会 2004年3月27日～3月30日(九州大学)

齋藤暁、佐藤隆一：Solution equations solved by the tachyon states

第26回日本バイオレオロジー学会年会 2003年6月5日-6月6日(大阪市立大学)

村田忠義：減衰振動型レオメータにおける赤血球沈降速度

京大基研短期研究会「量子力学とカオス：基礎的問題からナノサイエンスまで」
2003年11月12日～11月14日(京都大学)

齋藤暁、入澤学、川口弘：量子KAMトーラスについて

非線形波動および非線形力学の数理とその応用 2003年11月12日～14日(九大応用力学研究所)

小野澤祥、齋藤暁、入澤学、吉田勝彦：Analytical study of integrable-nonintegrable transition of shifted KdV map

斉藤革子、齋藤暁、吉田勝彦：超楕円関数を解とする南部・ハミルトン方程式について
国際会議

International School and Workshop ‘Quantum Fields and Strings’ (invited chairman and
lecturer) Dombai, Russia, August 2- 9 2003.

S.Ketov: N=2 superstrings effective action (lecture)

International Conference ‘STRINGS’03’, (poster) 京都, July 6-11, 2003

S.Ketov: Universal hypermultiplet effective action

4) 学会誌等

村田忠義、白石敬亮、立石憲彦、鈴木洋司、前田信治：微小管内を流れる血液からの酸素輸送に及ぼす
赤血球集合体形成の効果、日本バイオロロジー学会誌 17 (2 0 0 3) 16-20

非線形物理研究室

1. 研究活動の概要

1) 複素 WKB 理論における高次元ストークス現象と多準位の非断熱遷移

分子の状態変化を扱う非断熱遷移の問題には、Landau-Zener による 2 準位モデルがよく知られる。ここでは、“完全 WKB 解析”を用いることにより、多準位の非断熱遷移の問題に取り組んだ。手始めに調べた 3 準位時間依存モデルは、自明でない多準位の非断熱遷移のもっとも簡単なモデルである。完全 WKB 解析にもとづいたストークスグラフを描くアルゴリズムを開発し、いくつかのケースについて具体的なストークス幾何の様子を考察した。時間依存の多準位の非断熱遷移の問題については、その透熱表現された準位がすべて交差するという条件のもとでは、Aoki-Kawai-Takei によって、一般の n 準位問題の S 行列の具体形が最近与えられている。Aoki-Kawai-Takei の結果は、形式的には、従来の二準位モデルの繰り返しで一般の n 準位の問題も与えられる、というものであり、表面上は、多準位特有の効果はあらわれないことになっている。われわれが調べたのは、透熱表現された準位が交差しない場合についてであり、この場合には、Aoki-Kawai-Takei の解析とは異なり、ストークス幾何の中に出てくる新しいストークス線が、最終的な S 行列の表式を導出する際に本質的な役割を果たすことが明らかになった。この結果は、非断熱遷移に関する本質的な多準位効果を指摘した最初の結果と思われる。現在、いかなる条件のもとで、新しいストークス線があらわに出てくるか？という点と、三準位モデルのストークス幾何の分類の作業を行っている。

2) 強光子場中の原子のイオン化におけるカオス的トンネリングの効果と役割

強光子場中の原子のイオン化機構解明への、原子物理、非線形物理それぞれにおける代表的な理論的アプローチ - Keldysh-Faisal-Reiss (KFR) 理論および Chaos-Assisted Tunneling 理論 - を比較し、次の結果を得た: 1. 両理論を一括して論じるために必要なパラメータの数は 3 つである。これは、イオン化理論には高々 2 つのパラメータが必要であるという KFR 理論での通常理解とは対照的である。2. それぞれの理論が最も良く機能するとされる状況は、パラメータ空間上の異なった漸近領域に対応している。3. その一方で、両理論のかかえる最も重要な問題点は共通している。それはカオス系の固有関数または定常状態 (Floque 状態) を単純で少数の基底関数を使っていかに近似するかということである。

3) 多角形撞球問題における境界要素法の開発

撞球系は、撞球台の形状次第で可積分系からカオス系までを実現できるため、量子古典対応の研究を進める上での格好のモデルとなっている。なかでも多角形撞球系は、そのエネルギー準位統計がカオス系とも可積分系とも異なる中間的な性質をもつとされ、近年、大きな注目を集めている。ところが、多角形をはじめとする角をもつ量子撞球系では、そのエネルギー準位を求めるために解くべき積分方程式が特異となり、またそれに起因してエネルギー固有値を数値的に求める上でもいくつかの困難が現れる。そこで我々は、角がある撞球系に対しても特異にならない積分方程式を導出し、それに基づく境界要素法を開発した。

4) 内部自由度をもつ大自由度ハミルトン系と過冷却液体の遅い緩和の動力学

大自由度極限での遅い緩和過程の起源をハミルトン力学系理論の立場から議論している。これまでおもに、液相にある分子の遅い緩和過程 (代数的、もしくは引き延ばされた指数的な相関を示す) に注目してきたが、われわれの考える作業仮説、すなわち、分子の内部自由度をもつことと位相空間のボトルネックの存在、という観点から、通常の液体状態からさらに温度を下げ過冷却液体になった場合にも適用でき

る可能性が出てきた。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、理論ともに膨大な蓄積がある。しかしながら、力学系理論としてこれらの問題をどのように捉えるべきかは意外に知られておらず、非線形格子の研究 (FPU モデル) と並んでエルゴード性の破れに関わる基本的な問題と思われる。ガラス転移を示す toy model として最近注目されている、2成分レナ-ド・ジョ-ンズモデルなどを調べつつ、過冷却液体、ガラスの遅い運動の問題の検討を開始した。

5) リャプノフ指数の高精度解法を用いた擬軌道追跡性の研究

昨年度の課題として、我々は大域的な計算可能性である擬軌道追跡性に関する研究を行った。擬軌道追跡性は数値シミュレーション結果の信頼性を示し、実用的に重要な概念であるばかりではなく、力学系理論にとっても不可欠な基礎概念である。しかしこれまでの所、近似解法を用いた数値解析のみが行われているに過ぎない。本研究では、我々の開発した有限時間リャプノフ指数の高精度数値解法を応用した擬軌道追跡性の新たな計算方法の開発に成功した。その結果、既存の近似解法を非双曲的なカオス系に適用すると誤差が著しく大きくなり得ることを明らかにした。

6) エノン写像における pruning front の構成と grammatical complexity

多項式自己同型写像の標準型であるエノン写像は2次元の最も単純な力学系であり、カオス発生の基本機構である Smale の馬蹄型力学系を自然に実現する。我々は、エノン写像の位相的な力学構造を支配する pruning front の決定方法を、ホモクリニック分岐の問題と結び付けることにより導いた。これにより非自明な双曲領域における力学系を、マルコフ分割の方法により系統的に記述することが可能になる。また pruning front の応用として、Wolfram が提案した grammatical complexity をパラメタの関数として計算した。双曲力学系の軌道構造は Chomsky の階層における正則言語と対応することが示され、非双曲系の場合はより高次の階層の形式言語に対応することが予想されている。

7) 相空間焦点の生成過程の解析

焦点は半古典的な描像から量子干渉現象を理解するための鍵である。特に、相空間焦点が現れる半古典論コヒ-レント状態経路積分法では、Ehrenfest 時間以前では、寄与のある古典解が唯一であり、同時に、寄与のある焦点は存在しないことが保証されているため、調べるべき焦点を最小限に絞り込むことが可能になる。本研究では、以前の線形安定性解析を通じた研究を受け、焦点の配置と寄与、特に、古典カオス系における、指数関数的な速さで焦点の寄与が強くなる予想について調べた。標準写像を用いた数値実験において、実軌道近傍の、物理的な寄与を持つ焦点に対して、その位置と作用虚部 (確率振幅の大きさを主に決定する要素) を調べた。特に、非線型性が強い領域に関して、次の結果を得た: (1) 実軌道近傍において、重要な寄与のある古典解は“不安定多様体”へ収縮する。この領域に向かい、焦点は指数関数的に速く吸いよせられる。これは、焦点の配置を、線形不安定性に起因する引き伸ばし動力学と、折畳み過程の二者に分離して了解可能であることを示唆する; (2) 実軌道近隣の焦点の作用虚部は、時間発展に対し、指数関数的に零に近づくことが示唆された。これは、半古典極限においてすら、焦点の寄与が実軌道の寄与に較べ無視し得なくなることを意味する。しかし、数値実験上の技術的な問題のため、これは限られた条件下での結論であった。これらを疑義なくする数値実験と、理論構築が今後の課題である。

2. 研究業績

1) 論文

T. Onishi, A. Shudo, K.S. Ikeda and K. Takahashi: Tunneling mechanism due to chaos in a complex phase space, Phys. Rev. E **64** (2003) 025202-1-025202-4.

A. Shudo and K.S. Ikeda : Quantum chaos in mixed phase space and the Julia set, Prog. Theor. Phys. Suppl. **150** (2003) 267-280.

Y. Okada, A. Shudo, T. Harayama and S. Tasaki: Can one determine the shape through the eigenenergies and resonances? Prog. Theor. Phys. Suppl. **150** (2003) 397-400.

S. Saito, A. Shudo, J. Yamamoto, and K. Yoshida: Nambu-Hamiltonian flows associated with discrete maps, J. Phys. Soc. Jpn. **73** (2004) 557-565.

T. Okushima: New method for computing finite-time Lyapunov exponents, Phys. Rev. Lett. **91** 2003 254101-254104.

Atushi Tanaka: Semiclassical coherent state path integral around classically realizable trajectory, Prog. Theo. Phys. **110** (2003) 407-424.

Hiroshi Fujisaki, Takayuki Miyadera, and Atushi Tanaka: Dynamical aspects of quantum entanglement for weakly coupled kicked tops, Phy. Rev. E **67** (2003) 066201-(1-11).

2) 国際会議報告

Atushi Tanaka: A bracket calculus for adiabatic descriptions of quantum composite systems, J. Phys. Soc. Jpn **72** Suppl. C (2003) (Proceedings of Waseda International Symposium on Fundamental Physics), eds I. Ohba et al., p. 54-57

Hiroshi Fujisaki, Atushi Tanaka, and Takayuki Miyadera: Dynamical aspects of quantum entanglement for coupled mapping systems, J. Phys. Soc. Jpn **72** Suppl. C (2003) (Proceedings of Waseda International Symposium on Fundamental Physics), eds I. Ohba et al., p. 111-114

3) 学会講演

日本物理学会第 58 回年次大会 2003 年 3 月 28 日-31 日 (東北大学)

市来広一郎, 首藤 啓, 斉藤真司: 内部自由度をもつ分子の等分配則とハミルトンダイナミクス

田中篤司: 複素半古典論から見た Miller の初期値表現の trick

日本物理学会 2003 年秋季大会 2003 年 9 月 20 日-23 日 (岡山大学)

奥島輝昭: 多自由度系の有限時間軌道不安定性

岡田雄一郎, 首藤啓, 原山卓久, 田崎秀一: 角のあるビリヤードにおける境界要素法に関して

京大基研短期研究会「量子力学とカオス: 基礎的問題からナノサイエンスまで」

2003 年 11 月 12 日-14 日 (京都大学)

田中篤司: A semiclassical approach to time evolutions of multicomponent systems (招待講演)

岡田雄一郎, 首藤啓, 原山卓久, 田崎秀一: On the boundary element method for billiards with corners

数理解析研究所研究会「力学系理論の展開と応用」2003 年 11 月 10-14 日 (京都大学数理解析研究所)

首藤 啓: 量子カオスと半古典論

科研費研究会「力学系理論と物質科学 II」2004年3月3日-6日（立命館大学）

大西孝明: 障壁トンネル写像の複素半古典論

奥島輝昭: 多自由度系の集団運動と軌道不安定性

萩原良一, 首藤啓: 2次元写像の文法的複雑さ

国際会議

2nd Slovenia-Japan symposium, University of Maribor, May 28-June 5, 2003

A. Shudo: Existence of unique invariant measure in complex phase space and its manifestation in quantum mechanics (invited)

A. Shudo and Y. Okada: Inside-outside duality and isospectrality of planar billiards(invited)

International Conference on “Dynamical Chaos in Classical and Quantum Physics”,
Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russia, August 4-9, 2003

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

International Symposium on Ultrafast Intense Laser Science 2, Quebec city, September 27-29, 2003

A. Shudo and K.S. Ikeda: Complex Trajectory Description for Quantum Tunneling

JSPS-NSF symposium on Geometrical Structures of Phase Space in Multi-Dimensional Chaos:
Applications to Chemical Reaction Dynamics in Complex Systems,
Kyoto University, October 26-November 1, 2003.

A. Shudo: Slow relaxation in Hamiltonian systems with internal degrees of freedom (invited)

T. Okushima: Finite-time Lyapunov exponents in many-dimensional dynamical systems

the 3rd Slovenia-Japan symposium, Tokyo, November 4-5, 2003

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

RIMS Workshop: “Complex Dynamical Systems in Multidimensions”,
Kyoto University, December 1-5, 2004

A. Shudo: Julia set describes quantum tunneling in the presence of chaos (invited)

凝縮系理論研究室

1. 研究活動の概要

本研究室は、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。2003年度における研究活動の概要は次の通りである。

1) 希釈2次元クロックモデルの相転移

相転移におけるランダム性の効果は興味ある問題で、2次元転移に関しては Harris による先駆的な研究を始めとして、多くの研究がなされている。2次元 XY スピン系は、Kosterlitz-Thouless (KT) 転移と呼ばれるトポロジカルな転移を起こすが、KT 転移に対するランダム性の効果はそれ程調べられていない。最近、希釈2次元 XY モデルに関する研究が2つのグループにより報告されたが、異なる結論が得られている。そこで、精度の高い手法を用いたモンテカルロ計算を行うと共に、効率のよい解析法を用いることにより、この問題の決着をつけることを試みた。具体的に距離の異なる相関関数の比の有限サイズスケージングの性質を利用して KT 転移を解析する。また、XY モデルの内部自由度に離散対称性を導入したクロックモデルでは2つの KT 転移が起こるが、それに対する希釈の効果を調べた。得られた結果は、希釈を進めると KT 転移温度は減少し、浸透しきい値で KT 転移温度が0にスムーズに近づく。これは、Berche et al の結果と一致する。本研究では6状態クロックモデルを扱っているので、下 KT 転移のふるまいも興味があるが、これも希釈と共に、転移温度が下がることを得た。上 KT 転移と下 KT 転移の両方で、指数 η が希釈のない純粋系の $1/4$ と $1/9$ から変化がない、すなわち、この指数が希釈の効果によらない、KT 転移に普遍的なものであることを示した。図1に希釈2次元6状態クロックモデルの相図を示す。

2) 2次元フラストレートクロックモデルの相転移

2次元フラストレート XY モデルは、磁気的自由度とカイラリティーの自由度の両方が相転移をするが、両者が同一の転移点で転移するか否か、またイジング的な対称性をもつカイラリティー転移の臨界現象がイジング普遍性からずれるか否か、という論争が続いている。昨年度には、三角格子上の反強磁性6状態クロックモデルの相転移を、精度よく状態密度を求められる Wang-Landau 法を用いて調べた。このモデルの基底状態は XY モデルの基底状態と同様の状態であり、磁気的 KT 転移点とカイラリティー転移点は異なること、クロックモデルの離散性のために低温でもう1回 KT 転移を起こすことなどを示した。本年度は、正方格子上の強磁性ボンと反強磁性ボンとの規則な混合系からなるフラストレート系の相転移を調べた。この場合は6状態クロックモデルの基底状態は XY モデルの場合と異なり、巨視的に縮退している。高温側の転移は三角格子反強磁性モデルと同じで、指数も統計精度の範囲で同じである。それに対して、低温側の KT 転移はなく、完全な長距離秩序がないことを示したが、これは巨視的縮退に関連することである。また、基底状態の残留エントロピーの値を数値的に評価した。

3) 異方的臨界現象を示す系における有限サイズスケージング

強い異方性をもつ系の相転移と臨界現象は興味のある問題である。強い異方性とは、相関距離のべき級数的な発散を記述する臨界指数 ν が方向により ν_{\perp} と ν_{\parallel} と異なる値をもつ場合である。この系の有限サイズスケージングは、一般的には L_{\perp}/ξ_{\perp} と $L_{\parallel}/\xi_{\parallel}$ と2変数に依存する関数を考える必要がある。ここで、 L_{\perp} と L_{\parallel} は、異方的な系のサイズである。しかし、 L_{\parallel} を十分に大きくとれば ($> \xi_{\parallel}$)、1変数の有限サイズスケージング解析を行うことができる。具体的に強い異方性をもつ系として、3次元 axial next-nearest neighbor Ising (ANNNI) モデルをとりあげ、その相転移を調べた。ANNNI モデルは、 z 方向のみ次近接の反強磁性相互作用をもつ系で、次近接相互作用を大きくしていくと、変調相が現れる。

変調相，強磁性相，常磁性相が交わる点を Lifshitz 点と呼び，Lifshitz 点のまわりの臨界現象は強い異方性を示す．クラスターアルゴリズムによるモンテカルロ法を用いた計算を行い，異方的有限サイズスケールリングにより解析した．その結果，Lifshitz 点を精度よく決定することができ，臨界指数を $\nu_{\perp} \simeq 0.69$ と見積もったが，これはくりこみ群による計算値 0.709 と良く一致する．

4) 高い次数の相互作用をもつ量子スピンモデルと磁気 4 重極秩序

これまでの量子スピンモデルの数値計算は主に双線形（ハミルトニアンがスピン演算子に関して 2 次式）相互作用の場合に限られていた．しかし，われわれは最近量子モンテカルロ法のためのループアルゴリズムを一般化することによって，さまざまなハミルトニアンの効率的なシミュレーションを可能にした．これを用いて，これまででは正確な数値計算が不可能であり，おぼろげな物理的理解しか得られてこなかった種々の問題に関して，明確で新しい知見が得られつつある．たとえば，我々は通常の変調相相互作用に加えて双 4 重極型の相互作用をもったモデルの性質を調べている．このモデルはハルデン問題との関連や，近年可能になったレーザー光でトラップされた原子の系におけるボーズ凝縮などとの何連で精力的に研究されているモデルである．我々はこのモデルを新しく開発したクラスターアルゴリズムを用いた量子モンテカルロ法によって調べてきた．とくに 1 次元の場合には相互作用の強さに依存して，基底状態が空間並進対称性をやぶった相（ダイマー相）や強磁性秩序相（フェロ相）などが存在することが知られているが，この両者の中間にもう一つの相が存在するか，しないかが長年議論されてきている．しかし，この点についてはいまだに明確な答えが得られていない．我々はこれまで我々自身が開発してきたアルゴリズムを更に改良することによって，従来の計算よりもさらに大きなシステムサイズの計算を行うことに成功した．その結果，中間相の不在を示唆する結果が得られた．

5) ボーズ粒子系の新しいアルゴリズム

我々は Holstein-Primakov 変換によるスピン系とボーズ系の対応に着目し，一般のスピン長さのスピン系に対して開発されたクラスターアルゴリズムがボーズ系のシミュレーションにも適用可能であることを見出した．実際自由ボーズ粒子系の場合に試してみたところ，従来知られていたアルゴリズムでは超流動転移点近傍および超流動相がわでの収束が非常に悪くなるのに対して，新しい方法ではほとんど困難なく計算ができることが分かった．また，この方法を相互作用のある，より一般的な場合へと拡張した．

6) 量子モンテカルロ法への拡張アンサンブル法の応用

臨界緩和や 1 次転移に伴う相分離がおきる場合に通常の変調相法では信頼できる結果を得られないが，これを克服するために拡張アンサンブル法とよばれる方法が広く用いられている．これは，モンテカルロ法を行う際の重みを通常のボルツマン重みから意図的にずらすことによって，マルコフ過程の収束を早めるものである．われわれは，従来量子モンテカルロ法にはあまり用いられてこなかった，拡張アンサンブル法，とくに flat histogram 法を用いることで，様々な物理量がより精度よく計算できることを見出した．

7) Gaussian universality から Z_3 臨界性へのクロスオーバー現象

正方格子上反強磁性 3 状態ポッツ模型の基底状態はいわゆる Gaussian universality に属する臨界状態にあり，その臨界性に対する様々な摂動により実現される相の性質もしくは，より低対称の臨界固定点へのクロスオーバー現象などに興味が集まっている．我々は上記の模型に対し，さらに次近接サイト間のカップリング (V) を含むよう拡張したモデルを考案しその有限温度 (逆温度 K) での性質を調べることで，この模型が Gaussian universality から Z_3 臨界性を持つ臨界固定点へのくりこみ群フローを持つことを定量的に明らかにした．図 2 に相図を示す．原点を通る境界線がフローに対応している．また

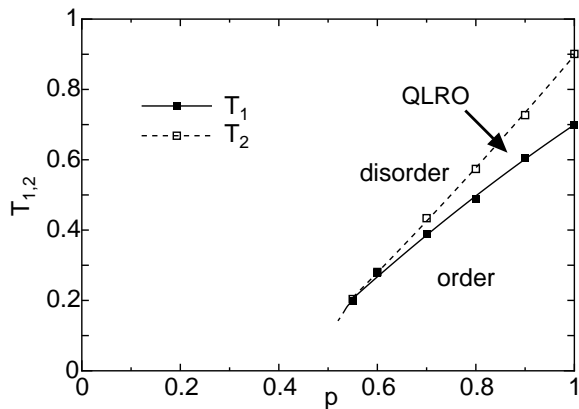


図 1: 希釈 2 次元 6 状態クロックモデルの相図 .

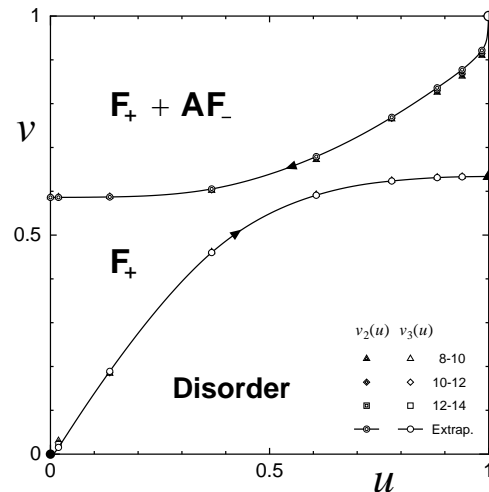


図 2: 拡張された正方格子反強磁性 3 状態ポッツモデルの相図 . 但 $(u, v) = (e^{-K}, 1 - e^{-V})$

クロスオーバー の議論を用いた相境界線の形状に対する解析からこの臨界性のクロスオーバー 現象を記述していると考えられている場の理論との対応について明らかにした。

8) 遷移積分交替をもつ 1 次元拡張 Hubbard 模型の Ising 転移

有機導体系 (TMTTF)₂X など観測されている電荷秩序相について、遷移積分交替をもつ 1/4-フィリング 1 次元拡張 Hubbard 模型を用いて議論した。ボソン化法を用いた解析より、低エネルギー領域ではスピン電荷分離が起きているがスピン部分は広いパラメタ領域内で Gaussian 的臨界性を保持している一方で、電荷部分はサイト間クーロン相互作用により $8k_F$ -ウムクラップ散乱過程のエネルギースケールが減少する為、ある点で BKT 転移を起こすが、遷移積分交替項が加わると、Ising 的臨界性にクロスオーバーしていくことが予想されている。我々は、系の低エネルギー励起レベルに着目した現象論的くりこみ群の方法を用いて基底状態の相構造を精密に決定した。 $4k_F$ -電荷密度波相とボンドオーダー波相との境界線が交替の無い場合にレベルクロスの方法により求められているの BKT 転移点を出発点としていることを確認した。またダイマー化極限では電荷部分は 1 次元量子 Ising 模型にマップされ、その転移点はクーロン相互作用 U には依らず $V = 8$ で与えられることが示されるが、その解析結果も相境界線の振る舞いから数値的に確認することが出来た。

2. 研究業績

1) 論文

Y. Okabe, Y. Tomita and C. Yamaguchi: Novel Monte Carlo algorithms and their applications, *Physica A* **321** (2003) 340-350.

J.-S. Wang and Y. Okabe: A comparison of extremal optimization with flat-histogram and equal-hit dynamics for finding spin-glass ground states, *J. Phys. Soc. Jpn.* **72** (2003) 1380-1383.

T. Shima, H. Kuni, Y. Okabe, M. Doi, X.-F. Yuan and T. Kawakatsu: Self-Consistent Field Theory to Viscoelastic Behavior of Inhomogeneous Dense Polymer Systems, *Macromolecules* **36** (2003) 9199-9204.

Y. Maniwa, H. Kataura, K. Matsuda and Y. Okabe: A one-dimensional Ising model for C₇₀ molecular ordering in C₇₀-peapods, *New J. Phys.* **5** (2003) 127.

T. Surungan, Y. Okabe and Y. Tomita: Study of the fully frustrated clock model using the Wang-Landau algorithm, *J. Phys. A* **37** (2004) 4219-4230.

Jurij Šmakov, Kenji Harada and Naoki Kawashima: A quantum Monte Carlo algorithm for softcore boson systems, *Phys. Rev. E* **68** (2003) 046708-046712.

2) 国際会議報告

Chiaki Yamaguchi, Naoki Kawashima, and Yutaka Okabe: New Cluster Algorithms Using the Broad Histogram Relation, “The Monte Carlo Method in the Physical Sciences” ed. J.E.Gubernatis (AIP, 2003) 356-363.

Naoki Kawashima: Large Spins, High Order Interaction, and Bosonic Problems, “The Monte Carlo Method in the Physical Sciences” ed. J.E.Gubernatis (AIP, 2003) 216-224.

H. Otsuka: Bond spin-density-wave phase in the staggered magnetic field, *Physica B* **329-333** (2003) 1018-1019.

3) 学会講演

日本物理学会第58回年次大会 2002年3月28日～3月31日(東北大学)

富田裕介, 岡部豊: フラストレーションと Baxter-Kelland-Wu 表現について

住友正紀, 岡部豊: 正方格子上の反強磁性3状態ポッツモデルのスケーリング補正

Tasrief Surungan, 富田裕介, 岡部豊: Study of the fully-frustrated clock model on the square lattice

山口智明, 川島直輝, 岡部豊: 量子系に対する Transition Matrix Monte Carlo 法

川島直輝: 量子モンテカルロ法における新しいクラスターアルゴリズムとその応用(招待講演)

原田健自, 川島直輝, Matthias Troyer: 二次元 SU(N) 量子反強磁性モデルのネール基底状態とスピン - パイエルス基底状態

大塚博巳, 中村正明: 交代ポテンシャル中の1次元絶縁体の相構造 II

日本物理学会2003年秋季大会 2002年9月20日～9月23日(岡山大学)

Tasrief Surungan, 岡部豊: Study of site and bond dilution of XY spin model

大野かおる, 皆川大輔, 岡部豊: 向かい合う高分子ブラシのモンテカルロシミュレーション

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

国際会議

The Monte Carlo Method in the Physical Sciences: Celebrating the 50th Anniversary of the Metropolis Algorithm, Los Alamos, USA, June 9 - 11, 2003

Chiaki Yamaguchi, Naoki Kawashima, and Yutaka Okabe: New Cluster Algorithms Using the Broad Histogram Relation (invited)

Naoki Kawashima: Large Spins, High Order Interaction, and Bosonic Problems (invited)

3rd Brazilian Meeting on Simulational Physics, Ouro Preto, Brazil, August 12-16, 2003

Y. Okabe and Y. Tomita and T. Surungan: Generalized probability-changing cluster algorithm and other new Monte Carlo algorithms (invited)

Markov Chain Monte Carlo: innovations and applications in statistics, physics, and bioinformatics, Singapore, March 1 - 28, 2004

Y. Okabe: Monte Carlo methods to calculate the density of states and their applications (invited)

The International Conference on Magnetism (ICM) 2003, Roma, Italy, July 27 - August 1, 2003

H. Otsuka: Crossover behavior of the frustrated quantum spin chain in a staggered magnetic field

固体電子理論研究室

1. 研究活動の概要

本研究室は、固体の示す磁気や、電気、光学的等、様々な物性のなかから興味深いものを取り上げ、その起源や機構を電子論の立場から解明することを目的として研究を行っている。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

近年、f 電子系化合物の複雑な秩序相に関する研究の進展にともなって、f 電子のもつ多重極自由度への関心が高まっている。我々は、これまで四重極相転移を示す典型物質 CeB_6 、 $TmTe$ に着目し、その磁気相図と異常物性の微視的起源の解明に重点的に取り組んで来た。こうしたこれまでの成果に立脚して、本年度は Pr スクッテルダイト系における秩序状態の研究もスタートしている。

A) 多重極励起と中性子散乱の理論：

多重極励起と動力学を多重極モーメントのボソン展開の方法で調べた。展開係数の対称性の解析から励起の選択則を明かにし、多くの励起モードが磁気二重極ゆらぎをともなうこと、それゆえ中性子散乱により観測可能であることを示した。現実的な多重極相互作用から中性子散乱スペクトルを計算した。通常の磁気励起に対応する低エネルギーの顕著なピークに加えて、八重極振動を伴うモードが高エネルギーに局在し、小さなピークをもたらすことが解った。これらの特徴およびその運動量依存性が、実験結果と半定量的に一致することを示した。その他、励起スペクトルの温度依存性についての詳しい解析も行い、実験との定性的な一致を得ている。(椎名、酒井、Thalmeier(MPI-PKS)、斯波(神戸大))

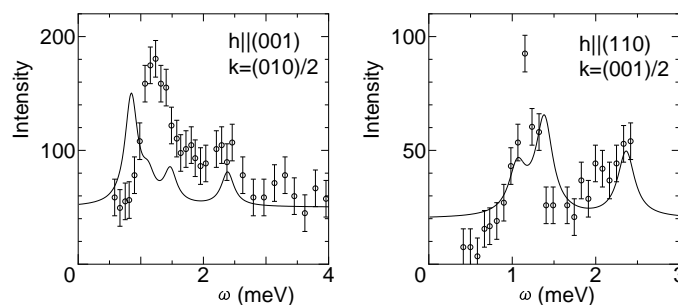


図 1: CeB_6 の非弾性中性子散乱スペクトル：白丸は Bouvet 等の実験、実線は多重極モデルに基づく計算値。静的性質ばかりでなく、動的励起まで総合的に調べることで、ミクロスコピックな観点からのモデルの正しさが詳細に判定できる。

B) 多重極ゆらぎの解析：

多重極モデルに対する d^{-1} 展開の手法を発展させ、 CeB_6 の転移点付近におけるゆらぎの影響を調べている。これまでに、多重極相互作用の競合による大きなゆらぎが存在すること、それが弱磁場領域で転移点の大幅な低下や熱力学量の異常を引き起こすことなどを示してきた。本年度は、高磁場領域の有効モデルを用いて、60T までの最新の高磁場実験に対して、相図の形状に関する比較を行った。全磁場領域について理論と実験の定量的な一致が得られ、モデルの有効パラメータをかなり絞り込むことが出来た。また、 d^{-1} の高次項の解析にも取り組んでいる。(椎名、酒井、斯波(神戸大))

C) PrOs₄Sb₁₂ における磁場誘起秩序の理論 :

PrOs₄Sb₁₂ の磁場誘起秩序相が、 f^2 系の多重極秩序としてどのように理解できるか、を調べた。結晶場状態はスクッテルライト系の場合、4 回対称軸のない点群 T_h のもとで整理される。中性子散乱や磁化測定などから有力視されている 1 重項 (Γ_1)-3 重項 (Γ_5) のみに自由度を絞り、スピンドイマー系との類似性に着目した。2 種類の $S = 1/2$ スピンを導入し、擬スピンによる多重極相互作用を求め、磁場中で安定な四重極秩序変数の成分を決定した。その際、誘起反強磁性については、2 つの擬スピン間の寄与の相殺がおこり、有限だが非常に小さな値をとることが解った。また、相図は磁場方向に関し弱く異方的となるが、それが T_h 対称性と深く関連していることを示した。これらの結果が主要な実験事実を定性的に説明することを示した。(椎名、青木 (電子相関グループ))

D) 多重項相互作用の一般形と、その反強的多重極秩序変数同定への応用:

反強的多重極秩序は、最近、隠れた秩序としての重要性が認識されてきたことから分かるように、直接的観測が難しい。一方、磁気双極子秩序である反強磁性秩序を中性子回折の方法により同定する方法は確立している。反強 4 重極秩序状態に磁場を印可すると、反強磁性磁気モーメントが誘起される。これを観測することにより、反強 4 重極秩序パラメータを同定することは、CeB₆ の研究で重要な役割を果たし、現在はひとつの標準的手段となって来ている。如何なる 4 重極に如何なる方向の磁場をかけたとき、如何なる反強磁性磁気モーメントが誘起されるか求めることは 8 重極まで含めた多重極相互作用の一般形を求めることに帰着出来ること、これを求めるにはタイトバインディング模型のバンド計算の知識を援用出来ることを示した。これにより、s.c.、f.c.c.、b.c.c. 格子の一般の波数にたいする解析を可能にした。TmTe の実験の解釈、Pr スクッテルタイトの多様な多重極秩序同定や、NpO₂ への適用を行った。[酒井、椎名、斯波]

2) 強相関物質のバンド構造の理論

A) バンド計算による磁気構造因子の計算 :

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 (DMF) 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。その他に、実際のバンド計算から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 (東大)、清水 (東北大)]

B) CeSb の磁気構造の起源と磁気光効果 :

CeSb は温度-磁場のパラメータ平面で悪魔の階段とも呼ばれる複雑な磁気相図を示す。これらは、強磁性的に秩序した格子面が 2 枚組になった強磁性磁気 2 重層が単位となり、複雑な規則で反強磁性やフェリ磁性的に積み重なった構造として整理される。このような 2 重層が何故安定になるのか、分かっていなかった。磁氣的な $4f$ 電子とリガンドである Sb の p 電子バンド、そして Ce の d 電子バンドのもつ対称性の性質から、波数空間の特定の対称軸のまわりに、ほぼ円筒状の等エネルギー面をもつバンドが形成され、このバンドへの磁氣的秩序効果が 2 重層の安定化に重要であることを示した。また、各相に特徴的な磁気光スペクトルが現われることが、実験的に見出されていたが、それらの起源が円筒状バンドの間の遷移として、同時に理解できることを示した。[石山 (NTT)、酒井]

C) 光電子分光の解析

以前にパッケージとして開発した、レゾルベント法によるプログラムにより、実験家と共同で希土類化合物の光電効果の解析を行った。[三村(大阪府立大)、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(Delft大)、酒井]

4) 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。この転移はドメイン形成を伴い、一見、温度誘起の1次相転移に似た振舞を示すが、実際は極低温でおきている現象である。温度に伴うエネルギー揺らぎと同様な効果が、光による励起と、励起状態からの緩和のくり返し過程から自動的に生じ、核形成の臨界点を乗り越える原動力となっていることを指摘した。また、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、上羽、小川(大阪大)]

5) 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。キャリア(以後、電子と呼ぶ)媒介の磁性イオン間相互作用の標準模型にRKKY相互作用があるが、これは電子系のフェルミエネルギーが電子と磁性イオンの交換相互作用に較べ充分大きいということ为前提にした摂動論に基礎を置く。しかし、半導体中の電子のフェルミエネルギーは、小さく、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、このような電子状態の大きな変化を伴って、強い揺らぎが絶えず生成と消滅を繰り返している系を取扱うのは難しく、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。従来の平均場的な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を示した。[酒井、牧野、大河内、森下]

2. 研究業績

1) 論文

R. Shiina, H. Shiba, P. Thalmeier, A. Takahashi and O. Sakai: Dynamics of Multipoles and Neutron Scattering Spectra in Quadrupolar Ordering Phase of CeB₆, J. Phys. Soc. Jpn. **72** (2003) 1216-1225.

R. Shiina, H. Shiba, P. Thalmeier, A. Takahashi and O. Sakai: Theory of Multipolar Excitations and Neutron Scattering Spectra in CeB₆, J. Phys. Condens. Matter **15** (2003) S2263-S2266.

P. Thalmeier, R. Shiina, H. Shiba, A. Takahashi and O. Sakai: Temperature and Field Dependence of Multipolar Excitations in CeB₆, J. Phys. Soc. Jpn. **72** (2003) 3219-3225.

R. Shiina and Y. Aoki: Theory of Field-Induced Phase Transition in PrOs₄Sb₁₂, J. Phys. Soc. Jpn. **73** (2004) 541-544.

Osamu Sakai, Ryouyuke Shiina and Hiroyuki Shiba: Possible Form of Multi-polar Interaction in Cubic Lattice, Physica B **329-333** (2003) 639-640.

Osamu Sakai, Ryouyuke Shiina and Hiroyuki Shiba: Invariant Form of Multipolar Interaction and Relation between Antiferro-Quadrupolar Order and Field-Induced Magnetic Moments, J. Phys. Soc. Jpn. **72**(2003) 1534-1543.

Fumihiko Ishiyama and Osamu Sakai: Theory on the Stability of the Ferromagnetic Double Layer Structure and on the Peak Structure of the Magneto-Optical Spectra of CeSb, J. Phys. Soc. Jpn. **72** (2003) 2071-2078.

K. Mimura, Y. Okabayashi, H. Muzohata, D. Sakiyama, Osamu Sakai, D. Huo, J. Sakurai, Y. Taguchi, K. Ichikawa and, O. Aita: Ce 4f States in CePd₂Si₂ and CeNi₂Si₂ Investigated by Resonant Photoemission Spectroscopy, Surface Review and Letters, **9** 1-35-1039 (2002)

Osamu Sakai and Wataru Izumida: Study on the Kondo Effect in the Tunneling Phenomena through a Quantum Dot, Physica B **328** (2003) 125-130.

Wataru Izumida, Osamu Sakai, and Seigo Tarucha: Singlet-triplet Kondo Effect in Tunneling through a Quantum Dot, *Physics of Semiconductors 2002: Proceedings of the 26th International Conference in the Physics of Semiconductors (Edinburgh, UK, 29 July - 2 August 2002)*, D183, (Edited by A. R. Long and J. H. Davies, Institute of Physics Conference Series Number 171, Institute of Physics Publishing, 2003).

2) 学会講演

日本物理学会 2003 年秋期大会 2003 年 9 月 20 日 ~ 9 月 23 日 (岡山大学)

金田保則、酒井治: Ce 化合物の磁気形状因子

大河内暁郎、森下明、牧野光彰、酒井治: モンテカルロ法による希薄磁性半導体の電子状態の研究

酒井治:(強相関電子系に対する高エネルギー光物性の理論研究シンポジウム) 不純物、周期アンダーソン模型及び動的平均場近似の光電子スペクトルへの応用

日本物理学会 2004 年年次大会 2003 年 3 月 27 日 ~ 3 月 30 日 (九州大学)

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への応用

椎名亮輔、青木勇二: PrOs₄Sb₁₂ における磁気誘起秩序の理論

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 混成と有効ハミルトニアン

大河内暁郎、森下明、牧野光彰、酒井治：モンテカルロ法による希薄磁性半導体の電子状態の研究 II

国際会議

Workshop on "Magnetism and Superconductivity in *f*-electron Systems",
February 23-24, 2004, Tokai, Japan

R. Shiina and Y. Aoki: Multipolar Interaction and Field-Induced Phase Transition in $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$

高エネルギー実験研究室

1. 研究活動の概要

本研究室では、現在日本が世界をリードしている B ファクトリーを用いた粒子・反粒子対称性の破れの研究を始め、将来、高エネルギー実験を主導する GLC プロジェクトのための加速器研究など幅広い物理実験を展開している。また、低速陽電子を用いて、ポジトロニウムの多光子稀崩壊、熱脱離ポジトロニウムの生成などのユニークな装置を用いた実験研究も進められている。

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粒子の生成や、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を行なっている。

B ファクトリー実験 (Belle)

当研究室は、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の非対称エネルギー電子・陽電子衝突型加速器 (B ファクトリー) を用いた素粒子実験グループ (Belle) に参加し、 B 中間子系における粒子・反粒子対称性 (CP 対称性) の破れの研究を行っている。

KEKB 加速器は絶好調であり、ピークルミノシティはデザイン値を上回る $1.2 \times 10^{34}/\text{cm}^2/\text{sec}$ 、積分ルミノシティは 200/fb 以上と世界記録を続出している。この世界最高の加速器を用いて生成された大量の B 中間子事象を用いて、世界をリードする研究成果を 20 編のジャーナルへの投稿論文、40 編以上の国際会議への Contribution Paper を通して発表した。

昨年度、 B 中間子での CP 破れの研究に関しては、1 億 5000 万事象の B 中間子対から観測された 68 個の $B \rightarrow \phi K_S$ 崩壊事象において、その破れの大きさが、標準理論から大きくずれていることを発見した。現在まで、標準理論で説明できない現象はほとんどなかったが、 B ファクトリー実験により、標準理論を越える未知の粒子などによる現象を考察できるようになってきた。

また、 B ファクトリー実験で得られた大量のデータを用いて、チャームとストレンジクォークを持つ中間子、 D_s に新しい励起状態の粒子を新たに 2 つ発見した。その質量は、通常のポテンシャルモデルでは説明がつかず、カイラル対称性など QCD の別の側面を考慮する必要があることがわかった。また、 $3872 \text{ MeV}/c^2$ の質量を持つ、新しい粒子 $X(3872)$ を発見した。これは、通常考えられるクォークと反クォーク対の状態として解釈することが非常に困難であることがわかった。現在、クォーク反クォークそれぞれ 2 個ずつから構成される新しいタイプの中間子の最初の例ではないか等、極めて興味深い可能性についても検討されている。

物理解析を進めると同時に Belle グループでは、将来の加速器の性能向上に呼応して測定器系の改良を計画しており、そのための検出器の開発研究を進めている。当研究室では KEK、名古屋大学などと協力して、次世代の粒子識別装置としてのシリカエアロゲルを輻射体とするリング・イメージ・チェレンコフ検出器を開発している。

電子-陽子衝突型加速器 HERA による ZEUS 国際共同研究

電子-陽子衝突加速器 HERA の電子ビームの偏極度を 2% 以下の精度で測定するために横偏極度測定装置の改造を行ってきた。本年度は、偏極度測定装置の改造後の性能を確認することを目的とした。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子をコンプトン散乱させ、後方に散乱した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。線の位置はカロリメータの上下信号の非対称度 η 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。この結果、 $\eta - y$ 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結果、独立に測定されている縦偏極度の測定値との差が3%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見通しがついた。

また、シリコン検出器は長期間の使用で放射線損傷によって暗電流が増加することが予想される。そこで、シリコン検出器で得られた信号データに対して暗電流の増加をペDESTALの分布幅を増大させることによってシミュレーションを行った。その結果、暗電流の増加に伴ってシリコン検出器からの有効な位置情報が減少すること、そして信号値が変動することを示した。これらの結果により、偏極度測定装置の長期運転中に定期的に計測すべき測定項目とその変動の特徴が明らかとなった。

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・GLC (Global 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偏極陽電子の生成

GLCにおいて、電子と共に陽電子ビームを偏極させれば、標準理論の精密検証および標準理論を超える新しい現象の探求に重要な役割を果たす。都立大学・KEK・早稲田大学の共同研究グループは、偏極陽電子の生成法として、レーザーコンプトン散乱による新しい方法を提案し、KEKの加速器試験施設(ATF)において、一連の基礎実験を進めてきた。円偏光させたYAGレーザー2倍高調波(波長532nm)をATFダンピングリングからの電子ビーム(1.28GeV)によって後方コンプトン散乱させると、散乱線はそのエネルギーに依存した偏極度をもつ。これを金属の薄膜ターゲットに当て、対生成した陽電子の高運動量側をとることにより、偏極陽電子を発生させることができる。

2002年度に行なったコンプトン散乱による生成線の偏極度測定に続いて、2003年度は、生成陽電子の偏極度測定装置を製作した。この装置では、陽電子を鉛ターゲットに入射し、制動放射によって生成した線の偏極度を測定することにより、陽電子の偏極度を求める。線の偏極度は、磁化させた鉄ターゲットに偏極線を入射し、ターゲット中の電子を線入射方向と平行・反平行にした時に、コンプトン散乱断面積の違いにより線透過率が非対称となることを利用する。鉄ターゲットを磁化する電磁石、透過線を検出する加圧炭酸ガス・チェレンコフ・カウンターを製作した。また、コンプトン散乱で生成する線の強度を2002年度の約10倍($10^7\gamma$ /パルス)に高めることに成功し、陽電子の偏極度測定実験の準備が整った。

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、レーザー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。炭酸ガス・レーザー(波長 $10.6\mu\text{m}$)と60MeVの電子ビームを用い、最高エネルギー6.5keVのX線を生成している。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。2003年度は、レーザーを短パルス化してピーク・パワーを高める調整を行なった。2002年度までは、パルス・エネルギー約3J、パルス幅約180psecで、ピーク・パワーが15GW程度であったが、パルス幅を30psecに短縮することに成功した。当面は、150GW、最終的には1TW以上のピーク・パワーを目標としている。

この改良が実現すれば、生成X線のさらなる高輝度化だけでなく、高密度電磁場による、電磁相互作用の非線形効果の観測が期待される。

単結晶を用いた陽電子源の開発

e^+e^- リニアークライダーや高ルミノシティBファクトリーなどではルミノシティを増大するために、大強

度の陽電子源を開発することが重要な課題である。従来の方式で陽電子の強度を上げるには、標的の下流での収束系の改良を図りつつ、入射電子のエネルギーや強度を上げることになるが、パルス的溫度上昇による熱応力によって標的の破壊や生成された陽電子の標的内での多重散乱が大きくなることによる陽電子捕獲率の減少などの限界がある。したがって、これからの電子陽電子衝突型加速器の陽電子源のためには高効率で耐熱性に優れた標的を開発しなければならない。

標的に単結晶を用いることで、周期的な結晶電場によるチャンネルリング放射やコヒーレント制動放射が発生する。これらの放射強度は非結晶標的からの放射を大きく上回る。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限界を超える陽電子源を開発することを目的としている。ダイヤモンドは熱伝導率が高く耐熱性に優れている。また耐放射線性も高いことが知られていることから、高エネルギー加速器研究機構との共同開発研究のもとで、ダイヤモンド標的による陽電子生成率を測定する実験を行った。

実験の結果、ダイヤモンドの結晶軸がビーム軸に一致した場合に陽電子の生成が最大となり、結晶軸を大きく外した場合（非晶質とみなす）に対してその生成比が20倍に達した。この結果は我々が各種の単結晶を用いて実験してきた中で最大の増大である。ただし、ダイヤモンドの厚さは4.6mm（0.04放射長）と薄いため、陽電子収量の絶対値は重金属単結晶に比べて小さかった。ロシアでは人工ダイヤモンドの製造法の開発により、厚いダイヤモンドの製造が可能であるとの情報がある。今後は、10mm以上の厚さの人工ダイヤモンドが入手して、ダイヤモンド標的としての耐放射線性、耐熱性などの検証をおこなって陽電子源としての実用化へ向けた開発を行う。

回折放射によるビーム診断法の開発

回折放射（以下DRと略称）による電子ビーム診断法として、金属薄板に開けたスリット孔をターゲットとして、ビーム断面のサイズ、位置や方向を計測する方法が提案されている。DRのうち可視光領域（Optical Diffraction Radiation、ODR）の計測による電子ビーム診断法は非破壊的かつ即時の電子ビーム診断法として非常に有望である。ODRによる非破壊的なビーム診断法を開発するために、高エネルギー加速器研究機構の加速器試験施設（ATF）を用いて、1) ODRの計測に重大な影響となるシンクロトロン放射（SR）によるバックグラウンドを抑制すること、2) ビームサイズを変えながらODRでビームサイズを計測し相関を調べることを重点的に行った。

シンクロトロン放射（SR）はODRの角度分布を歪めるため、ビームサイズの測定に悪影響をもたらす。そこで、スリットターゲットの上流にSRを遮断するマスクを挿入することにした。この結果、ODRの角度分布にはSRの影響が見られなくなる一方、スリットターゲットからのODR特有の干渉による強い1次ピークと弱い明瞭な2次ピークが見られた。これをODRの理論計算と比較したところ、非常に良い一致が得られた。

ODRの角度分布の最大強度に対する最小強度の比を取ると、ビームサイズに対する依存性を引き出すことができる。ATF電子ビーム取出ラインのビームパラメータの調整を行ってビームサイズを変えて、ODR強度比を計測した。実際のビームサイズはワイアースキャナーで計測した値を用いた。4つの異なるビームサイズに対して、ワイアースキャナーによる実測値とODRの強度比から求めたビームサイズと比較したところほぼ直線的な相関が見られた。ODRの計測により世界で初めて10~20 μm のビームサイズを測ることができることを実験的に示した。

3) 陽電子物理実験

放射性同位元素から発生する低エネルギーの陽電子を用いて、電子と陽電子の束縛状態であるポジトロニウムの研究を行なっている。

ポジトロニウムの4光子、5光子崩壊過程の測定

高次 QED 過程 α^7 と α^8 の高精度検証を目的としている。ポジトロニウムの 4 光子、5 光子消滅過程の我々の最初の測定結果をさらに高統計で測定する為に検出効率を増加させた。測定装置は 30 本の NaI (TI) 線検出器からなり、それらを測定装置中心からの距離を 262mm から 144mm に近づけた。検出効率は 4 光子、5 光子消滅過程においてそれぞれ 76 倍と 214 倍の増加となる。検出器外部に ^{22}Na 線源を設置し、線源自身から発生するバックグラウンドを減少させてこの大立体角化が可能となった。永久磁石を利用した高効率陽電子ビーム輸送系を利用して、陽電子を検出器外部から中心のポジトロニウム生成用シリカエアロジェルターゲットへ導く。この装置を利用して、長期データ取得を行っている。

熱脱離ポジトロニウムの生成

RI 棟に設置された陽電子ビーム照射装置を用い、熱脱離ポジトロニウムの生成実験を行っている。ポジトロニウムは放射線源 ^{22}Na の β^+ 崩壊によって生成された陽電子ビームを金属ターゲットに照射することによって得られる。金箔をターゲットとして、生成したポジトロニウムの運動エネルギーを Time-of-Flight 法によって測定した。金箔の温度を 1000K にした時、エネルギー分布が Maxwell-Boltzmann 分布に従うと仮定すると、ポジトロニウムの温度が $1049 \pm 103\text{K}$ と求まり、ターゲット温度と一致することが確認された。

4) 超高エネルギーニュートリノ検出器の基礎研究

超高エネルギー陽子が 2.7K 宇宙背景輻射と衝突する GZK (Greisen, Zatsepin, Kuz'min) 過程や活動銀河核等から発生すると予想されている超高エネルギーニュートリノ (10^{15}eV 以上) を検出可能な測定器の基礎研究を行った。超高エネルギーニュートリノは飛来数が極めて少なく検出媒質との相互作用も弱い為に、GZK ニュートリノを検出する為には巨大質量 10Gt 以上 (2kmx2kmx2km 以上の体積) の検出媒質を必要とする。超高エネルギーニュートリノが検出媒質と相互作用した時に発生する電磁シャワー中にはコンプトン効果による反跳電子等の陽電子と対を作らない過剰電子が 20% ほど発生する。それらの間の干渉性チェレンコフ効果 (アスカラヤン効果) により電波を発生することが予測される。電波は岩塩中を減衰せずに長距離を伝搬するならば比較的少数の電波検出器で巨大な質量の媒質中での反応を観察可能となる。各種岩塩鉱の岩塩試料を 1.0GHz と 9.4GHz で摂動空洞共振器法により複素誘電率の測定を行った。人造岩塩と Hockley 岩塩鉱 (USA) 試料においてはそれぞれ 1GHz で 1km と 180m の減衰長が測定された。複素部と実部の比に周波数依存性がないと仮定すると、天然岩塩では低い周波数では 1km 近い減衰長が得られることが期待され、300MHz での測定を準備している。その結果、岩塩鉱が超高エネルギーニュートリノ検出器の巨大媒質となる可能性が示された。一方、電子加速器ビームによる岩塩におけるアスカラヤン効果実験準備を進めている。

2. 研究業績

1) 論文

T. Matsumoto *et.al.*: Studies of proximity focusing RICH with an aerogel radiator using Flat-panal multi-anode PMTs (Hamamatsu H8500), Nucl. Instr. Meth. **A 531** (2004) 367-377

Y. Mikami *et.al.* (Belle Collaboration): Measurements of the D_{sJ} Resonance Properties, Phys. Rev. Lett. **92** (2004) 012002

M.-C. Chang *et.al.* (Belle Collaboration): Search for $B^0 \rightarrow l^+l^-$ at the Belle detector, Phys. Rev. D **68** 111101(R) (2003)

S. L. Zang *et.al.* (Belle Collaboration): Search for $B \rightarrow J/\psi \Lambda \bar{p}$ decay, Phys. Rev. D **69** (2004) 017101

- A. Ishikawa *et.al.* (Belle Collaboration): Observation of $B \rightarrow K^*l^+l^-$, Phys. Rev. Lett. **91** (2003) 261601
- S. -K. Choi, S. L. Olsen *et.al.* (Belle Collaboration): Observation of a Narrow Charmoniumlike State in Exclusive $B^\pm \rightarrow K^\pm\pi^+\pi^- J/\psi$ Decays, Phys. Rev. Lett. **91** (2003) 262001
- S. H. Lee, K. Suzuki *et.al.* (Belle Collaboration): Evidence for $B^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$, Phys. Rev. Lett. **91** (2003) 261801
- K. Abe *et.al.* (Belle Collaboration): Measurement of Time-Dependent CP -Violating Asymmetries in $B^0 \rightarrow \phi K_S^0$, $K^+K^-K_S^0$, and $\eta'K_S^0$ Decays, Phys. Rev. Lett. **91** (2003) 261602
- P. Krokovny, A. Bondar *et.al.* (Belle Collaboration): Observation of the $D_{sJ}(2317)$ and $D_{sJ}(2457)$ in B Decays, Phys. Rev. Lett. **91** (2003) 262002
- J. Zhang, M. Nakao *et.al.* (Belle Collaboration): Observation of $B^\mp \rightarrow \rho^\mp\rho^0$ Decays, Phys. Rev. Lett. **91** (2003) 221801
- H. -C. Huang *et.al.* (Belle Collaboration): Evidence for $B \rightarrow \phi\phi K$, Phys. Rev. Lett. **91** (2003) 241802
- S. K. Swain, T. E. Browder *et.al.* (Belle Collaboration): Measurement of branching fraction ratios and CP asymmetries in $B^\pm \rightarrow D_{CP}K^\pm$, Phys. Rev. **D 68** (2003) 051101
- Y. Unno, K. Suzuki *et.al.* (Belle Collaboration): Improved measurement of the partial-rate CP asymmetry in $B^+ \rightarrow K^0\pi^+$ and $B^- \rightarrow \bar{K}^0\pi^-$ decays, Phys. Rev. **D 68** (2003) 011103
- M. -Z. Wang, Y. -J. Lee *et.al.* (Belle Collaboration): Observation of $B^0 \rightarrow p\bar{\Lambda}\pi^-$, Phys. Rev. Lett. **90** (2003) 201802
- K. Abe *et.al.* (Belle Collaboration): Evidence for CP -violating asymmetries in $B^0 \rightarrow pi + pi-$ decays and constraints on the CKM angle ϕ_2 , Phys. Rev. **D 68** (2003) 012001
- K. Abe *et.al.* (Belle Collaboration): Study of time-dependent CP -violating asymmetries in $b \rightarrow s\bar{q}q$ decays, Phys. Rev. **D 67** (2003) 031102(R)
- P. Krokovny *et.al.* (Belle Collaboration): Observation of $\bar{B}^0 \rightarrow D^0\bar{K}^0$ and $\bar{B}^0 \rightarrow D^0\bar{K}^{*0}$ Decays, Phys. Rev. Lett. **90** (2003) 141802
- N. Gabyshev, H. Kichimi *et.al.* (Belle Collaboration): Observation of the Decay $\bar{B}^0 \rightarrow \Lambda_C^+\bar{p}$, Phys. Rev. Lett. **90** (2003) 121802
- N. C. Hastings *et.al.* (Belle Collaboration): Studies of $B^0 - \bar{B}^0$ mixing properties with inclusive dilepton events, Phys. Rev. **D 67** (2003) 052004
- Y. Zheng, T. E. Browder *et.al.* (Belle Collaboration): Measurement of the $B^0 - \bar{B}^0$ mixing rate with $B^0(\bar{B}^0) \rightarrow D^{*\mp}\pi^\pm$ partial reconstruction, Phys. Rev. **D 67** (2003) 092004
- K.Abe, *et.al.* (Belle Collaboration): Studies of the Decay $B^\pm \rightarrow D_{CP}K^\pm$, Phys. Rev. Lett. **90** (2003) 131803

S. Chekanov *et.al.*, (ZEUS Collaboration): Measurement of the open-charm contribution to the diffractive proton structure function, Nucl. Phys. **B 672** (2003) 3-35

S. Chekanov *et.al.*, (ZEUS Collaboration) : Measurement of high- Q^2 charged current cross sections in e^+p deep inelastic scattering at HERA, Euro. Phys. J. **C 32** (2003) 1-16

S. Chekanov *et.al.*, (ZEUS Collaboration) : Measurement of deeply virtual Compton scattering at HERA, Phys. Lett. **B 573** (2003) 46-62

S. Chekanov *et.al.*, (ZEUS Collaboration) : Jet production in charged current deep inelastic e+p scattering at HERA, Euro. Phys. J. **C 31** (2003) 149-164

S. Chekanov *et.al.*, (ZEUS Collaboration) : A search for resonance decays to lepton+jet at HERA and limits on leptoquarks, Phys. Rev. **D 68** (2003) 052004

ZEUS Collaboration; S. Chekanov *et.al.*, (ZEUS Collaboration) : Dijet angular distributions in photoproduction of charm at HERA, Phys. Lett. **B 565** (2003) 87-101

S. Chekanov *et.al.*, (ZEUS Collaboration) : Search for single-top production in ep collisions at HERA, Phys. Lett. **B 559** (2003) 153-170

S. Chekanov *et.al.*, (ZEUS Collaboration) : Scaling violations and determination of α_s from jet production in γp interactions at HERA, Phys. Lett. **B 560** (2003) 7-23

M. Fukuda, T. Aoki, K. Dobashi, T. Hirose, T. Iinuma, Y. Kurihara, T. Okugi, T. Omori, I. Sakai, J. Urakawa and M. Washio: Phys. Rev. Lett. **91** (2003) 164801

I.V. Pogorelsky, I.V. Pavlishin, I. Ben-Zvi, T. Hirose, T. Kumita, Y. Kamiya, A. Zigler, B. Greenberg, D. Kaganovich, N. Andreev, N. Bobrova and P. Sasorov: App. Phys. Lett. **83** (2003) 3459-3461

V. Yakimenko, I.V. Pogorelsky, I.V. Pavlishin, I. Ben-Zvi, K. Kusche, Yu. Eidelman, T. Hirose, T. Kumita, Y. Kamiya, J. Urakawa, A. Zigler, B. Greenberg: Phys. Rev. Lett. **81** (2003) 014802

2) 国際会議報告

T. Matsumoto *et.al.*: Studies of a proximity focusing RICH with an aerogel radiator, Nucl. Instr. Meth. **A 518** (2004) 582-585 (Proceeding of 9th Pisa Meeting on Advanced Detectors, May 25-31, 2003, La Biodola, Isora, d'Elba)

3) 学会講演

日本物理学会 2003 年秋季大会 2003 年 10 月 9 日 ~ 10 月 12 日 (宮崎ワールドコンベンションセンター・サミット)

加藤聡美, 太田理, 梶裕志, 浜津良輔, 松澤邦裕, 李栄篤, 他 ZEUS Collaboration: HERA における電子ビーム横偏極度測定装置の性能評価

千葉雅美, 上條敏生, 安田修, 近重悠一, 近 匡, 竹岡義人, 吉田 亮: 岩塩ニュートリノ検出器の為の 1GHz における岩塩の電波減衰長測定

日本物理学会 2004 年年次大会 2004 年 3 月 27 日 ~ 3 月 30 日 (九州大学箱崎地区)

関貴之, 足立一郎, 飯島徹, 池田博一, 住吉孝行, 須山本比呂, 西田昌平, 松本崇博: マルチチャンネル HAPD と読出し用 IC の性能試験

松本崇博 他 Belle Collaboration: Belle 実験における B 中間子全再構成手法の開発

千葉雅美, 上條敏生, 安田修, 近重悠一, 近 匡, 竹岡義人, 吉田 亮: 岩塩ニュートリノ検出器の為の摂動空洞共振器法による 300MHz 電波減衰長測定

Pavel V. Karatev, 荒木栄, 浦川順治, 照沼信浩, 浜津良輔, 早野仁司, 武藤俊哉: Measurement of Optical Diffraction Radiation from a Slit Target at KEK-ATF

諏訪田剛, 佐藤政則, 梅森健成, 古川和朗, 杉村高志, 紙谷琢哉, 奥野英城, 吉田勝英, 原順一, 藤本紘行, 浜津良輔: 単結晶標的を利用した陽電子生成実験

梶裕志, 太田理, 加藤聡美, 長野邦浩, 浜津良輔, 松澤邦裕, 李栄篤 他 ZEUS Collaboration: HERA レプトンビームの偏極度測定

李栄篤, 太田理, 梶裕志, 加藤聡美, 浜津良輔, 松澤邦裕 他 ZEUS Collaboration: ZEUS 実験における前方カロリメーターのタイミングを用いた衝突点の再構成

山崎一成, 浦川順治, 大橋歩, 大森恒彦, 奥木敏行, 栗原良将, 野村昌弘, 広瀬立成, 福田将史, 鷲尾方一: 逆コンプトン散乱による偏極陽電子生成 1 -偏極陽電子生成と測定システム-

大橋歩, 浦川順治, 大森恒彦, 奥木敏行, 栗原良将, 野村昌弘, 広瀬立成, 福田将史, 山崎一成, 鷲尾方一: 逆コンプトン散乱による偏極陽電子生成 2 -測定装置-

福田将史, 浦川順治, 大橋歩, 大森恒彦, 奥木敏行, 栗原良将, 野村昌弘, 広瀬立成, 山崎一成, 鷲尾方一: 逆コンプトン散乱による偏極陽電子生成 3 -測定結果とまとめ-

神谷好郎, 石水昭夫, 汲田哲郎, 広瀬立成, 鷲尾方一, 浦川順治, 大森恒彦, 奥木敏行, 栗原良将, 横谷馨, I.Ben-Zvi, I.V.Pogorelsky, D.P.Siddons, V.Yakimenko: BNL-ATF における非線形コンプトン散乱実験

汲田哲郎, 石水昭夫, 神谷好郎, 広瀬立成, 鷲尾方一, 浦川順治, 大森恒彦, 栗原良将, 横谷馨, I.Ben-Zvi, I.V.Pogorelsky, V.Yakimenko, Hyyong Suk, Hae June Lee, A.Zigler: プラズマ・チャンネル中での電子・レーザーの相互作用のシミュレーション

国際会議

9th Pisa Meeting on Advanced Detectors, May 25-31, 2003, La Biodola, Isora d'Elba, Italy

T.Matsumoto *et.al.*: Studies of a Proximity focusing RICH with Aerogel Radiator,

IX International Workshop on Advanced Computing and Analysis Techniques in Physics Research
Dec. 1-5, 2003, KEK, Japan

T.Matsumoto: Tagging with fully reconstructed B's in B-factory experiments,

Non accelerator new physics 2003 (NANP'03), Joint Institute for Nuclear Research, June 23-28, 2003
Dubna, Moscow region, Russia

M. Chiba, T. Kamijo¹, O. Yasuda, Y. Chikashige, T. Kon, Y. Takeoka and R. Yoshida: Detector for ultra-high-energy-neutrino.

International Workshop on Ultra High Energy Neutrino Telescope, July 29, 2003, Chiba University
Japan

Masami Chiba, Toshio Kamiyo, Osamu Yasuda, Yuichi Chikashige, Tadashi Kon, Yoshihito Takeoka
and Ryo Yoshida: Study of Salt Neutrino Detector for GZK Neutrinos

Joint 6th ICFA Advanced & Novel Accelerators and 29th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop
on Laser-Beam Interactions, July 7-11, 2003, St Catherine's College, Oxford, England

T.Kumita: X-ray Generation via Laser Electron-Beam Compton Scattering at BNL-ATF

12th International Workshop on Low Energy Positron and Positronium Physics, July 19-21, 2003
Sandbjerg Estate, Denmark

T.Kumita: Production of a Pulsed Positron Beam utilizing a Magnetic Trap,

宇宙物理実験研究室

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たほか、2005 年 2 月に打ち上げが迫った Astro-E2 衛星では、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) の開発に本研究室は主要な役割を果たしており、搭載品の試験が着々と進められた。Astro-E2 以降を目指した観測機器の開発も引き続き進め、特にマグネティックカロリメータの開発では、国内で初めて線による信号を検出することに成功した。

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、重力ポテンシャルが半径 50 kpc 内で特異な集中を示すことを明らかにした。重元素の空間分布も調べられ、特に中心銀河 NGC 3311 から出た鉄が 10 kpc ほどのブロップ状に分布していることを明らかにした。また、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。今後ペルセウス銀河団の計 5ヶ所の観測を合わせて、銀河団ガスの性質の大規模な分布を明らかにしようとしている。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) 近傍 AGN の硬 X 線完全サンプルを用いた硬 X 線光度関数の導出

活動銀河中心核 (AGN = Active Galactic Nuclei) の宇宙論的進化を調べるため、完全サンプルを用いた X 線スペクトルの統計解析を行なっている。我々はカーネギーメロン大学の宮地氏と共に、HEAO-1 衛星の全天サーベイで得られた 50 個の明るい AGN の硬 X 線完全サンプルを定義し、ASCA、XMM-Newton による個々の天体のスペクトルの精細解析、および硬 X 線光度関数の導出を行なった。我々の解析によると、近傍 AGN の典型的なスペクトルのベキ ($E^{-\Gamma}$) が $\Gamma = 1.78$ ($\sigma_{\Gamma}=0.31$) で、X 線吸収量 ($\log N_{\text{H}}$) のヒストグラムはフラットな分布となり、 $\log N_{\text{H}} > 23$ の AGN も数多く存在することを示唆した。硬 X 線輝度と吸収量の相関によると、輝度の大きな AGN に吸収量の大きなものが極端に少なくなっており、吸収の大きさによって個数密度が異なることを示している。さらに HEAO-1 観測時と ASCA、XMM-Newton 観測時の X 線輝度を比較すると暗くなっている天体の方がはるかに多く、HEAO-1 観測時にたまたま明るかった天体が観測にかかったためと解釈される。これから AGN の年スケールの変動量を逆算すると 2.6 倍となることを示した。これら重要な成果については、ブラックホール国際研究会で発表を行った。

3) 特異天体 CI Cam の正体

CI Cam は 1998 年 3 月 31 日にアウトバーストしているのが X 線で発見された。2-25 keV 帯でのピークの光度 $3 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ が、ブラックホールを中心に持つトランジェントとのピーク光度と似ていることから、当初 CI Cam の中心にはブラックホールがいるものと考えられた。しかし、アウトバースト直後に得られた「あすか」のデータは、この天体からの X 線放射がブラックホールトランジェントと違って光学的に薄い特性を持つことから、我々はブラックホール説に早くから疑問を持っていた。実際、アウトバーストから 1 年後 (1999 年 2 月 19-20 日) に「あすか」で観測してみると、そのスペクトルは、むしろ

中心に白色矮星を持つ激変星の特徴を示していた。このことから、アウトバーストが矮新星（白色矮星表面での水素の熱核融合）によるものであると仮定すると、可視光の観測から得られたのと同じ 5-9 kpc 程度の距離を求めることができた。このことから CI Cam の中心天体は白色矮星であることがわかった。

4) 大質量 X 線連星パルサー GX301-2 の観測

大質量 X 線パルサー GX301-2 は B2 型のスペクトルを持つ超巨星 (質量 = $35M_{\odot}$ 、半径 = $43R_{\odot}$ 、ただし suffix の \odot は太陽を表す) であり、10 万年で太陽一つ分を失うほどの質量放出をしている。放出された質量の一部が、すぐそばを回っている磁化した ($B = 3 \times 10^{12}$ Gauss) 中性子星の回りを取り囲み、やがてその磁極に落ち込むことで、中性子星の自転周期 (約 700 秒) で強度変動する強い連続 X 線を放出すると考えられている。GX301-2 を *Chandra* 衛星で観測したところ、図 1 に示すように、6.4 keV の中性な鉄の特性 $K\alpha$ 線スペクトルの低エネルギー側にコンプトン散乱による肩が存在することを発見した。これは中性子星を取り囲む物質の中にある鉄原子に中性子星からの X 線があたることで発生した蛍光 $K\alpha$ 線が、同じ物質中でコンプトン散乱されることで発生していると考えられる。コンプトンの肩の形状を詳しく解析することにより、これまでよくわかっていなかった中性子星を取り囲む物質の幾何学構造、温度、重元素組成など様々な物理量を得ることに成功した。

5) 球状星団の観測

球状星団は、銀河系の他の場所に比べて星密度が高いため、潮汐捕捉によって多数の連星系が形成されると考えられる。これらの連星系の形成状況を調べることにより、銀河系に 150 個ほどの存在が知られている球状星団の力学的進化を調べている。その手始めとして球状星団 NGC6397 と M4 の研究を開始した。この両者は地球からほぼ同程度の距離にあり、いずれも $10^5 M_{\odot}$ ほどの質量をもっているが、NGC6397の方が力学的な進化が進んでおり、コアに星が集中した分布を持っている。「あすか」衛星のデータを解析したところ、NGC6397の方が M4 よりも、中心の X 線光度が一桁程度高いことがわかった。この結果は、NGC6397 で力学的進化が進み、コアに星が集中したために、中性子星や白色矮星との近接連星系が多く生じたためと考えられる。

6) 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、セイコーインスツルメンツとの共同で TES (Transition Edge Sensor) 型カロリメータの開発を精力的に進めている。目標性能としては、 ~ 2 eV の超高エネルギー分解能と ~ 1000 コ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。

昨年度までに、単一ピクセルの TES (超伝導遷移端検出器) 型カロリメータを用いて世界レベルの優れたエネルギー分解能達成できたので、今年度はさらに多素子化に向けてマッシュルーム形状の吸収体をつけた素子について性能評価を行った。その結果、精密な形状の吸収体形成に成功し、カロリメータとしての性能は吸収体の材質などに大きく影響を受けることがわかった。これらの結果を 7 月にイタリアで行われた第 10 回 低温検出器国際学会 (LTD-10) で発表を行い、論文として出版した (2004 年度)。また TES 感度の磁場依存性を調べることで、カロリメータ性能が超伝導臨界電流の大きさで制限されることを明らかにし、3 月にフロリダで開催された第 2 回 TES 国際 Workshop で発表を行った。今後は 16×16 のマルチピクセルの素子の開発を進め、衛星搭載可能な検出器を数年以内に作り上げたいと考えている。

7) マグネティックカロリメータの開発

Er をドーブした素材は、X 線や 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。我々は、赤外線を真空中に導入し常磁性体である Er を金で希釈、共通実験装置の rf-SQUID で磁化を測定することで 100 ppm オーダーの精度で濃度をコントロールしたサンプルの製作を可能とした。今回、0.4 mm 角、0.08 mm 厚の微小な素子を希釈冷凍機中に組み込み、温度 ~ 80 mK で 0.1 mT の磁場を印加した状態で、5.5 MeV の 線を照射したところ、日本で初めて(世界でも 3 番目) マグネティックカロリメータの信号を取得することに成功した。この結果は佐藤の修士論文としてまとめられ、論文を投稿中である。

8) 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、4–10keV の X 線に対してエネルギー分解能 10–15eV 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、~ 4 μ K rms という Astro-E2 XRS のスペック以上の高い温度安定性を実現した。

9) 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。これは、極限まで薄くした ($t = 170 \mu\text{m}$) 共焦点の放物面鏡と双極面鏡を動径方向に多数積層 (170 層程度) し、大きな開口面積と高エネルギー側 12 keV までの広いエネルギー帯域を実現した望遠鏡であるが、反面、鏡面精度が充分保持できないことによる解像度の低下が問題になっていた。今年度は反射鏡のアラインメント部材を放電加工によって精密に加工し、金レプリカ法で自作した反射鏡を上下段に 5 セット詰めた状態で初めて X 線測定を行ない、角分解能 1.6 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。同時に、アラインメント部材の精度が上がったために、個々の反射鏡の鏡面精度の不足が顕在化してきている。来年度以降はこの点を改良し、角分解能 1 分角を切る望遠鏡の製作に意欲を燃やしている。

10) Astro-E2 衛星の打ち上げへ向けて

Astro-E2 衛星は 2005 年 2 月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、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。このうち FW については、すべての部品の設計、製作が終り、6 月下旬からフライト品の製作、引き続き打ち上げ環境試験が行なわれた。FW はこれらを無事に通過し、8 月上旬に宇宙研へ引き渡され、衛星搭載可能な状態となった。また XRS は、フライト品のセンサー部および液体ヘリウム・デューワーが NASA/Goddard Space Flight Center (GSFC) で完成し、年末から年始にかけて日本からも人員が参加して地上較正試験が行なわれた。これにより、30 コのピクセルに対して 4–10 keV のエネルギー範囲でエネルギースケールと分解能が測定され、Astro-E1 時より 2 倍近く向上した $\Delta E = 6\text{--}7 \text{ eV}$ の分解能を確認した。これらは 3 月に日本に持ち込まれてネオン・デューワーへの組付け作業が始まった。XRT は NASA/GSFC において、フライト品 5 台のうち、すでに 4 台の製作が終了し日本側で較正試験が進められている。製作行程の向上により、Astro-E1 用 XRT よりも開口面積は約 10% 増え、解像度は 2.1 分角から 1.9 分角に向上していることが確認された。初期観測プランの作成では、特に石田が中心と

なって軌道上キャリブレーション観測が取りまとめられ、銀河団関係は大橋がまとめ役となった。ソフトウェア開発については、特に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 packets を天文観測で一般に用いられる FITS 形式のフォーマットに変換する部分と、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 のソフトウェア担当者と緊密に連絡を取りつつプログラム開発を行なっている。

11) 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。4 回反射の X 線望遠鏡により焦点距離は約 70 cm で、視野角 1 度程をカバーする多素子のマイクロカロリメータを備え、1 年の間に約 10 度 \times 10 度の空のマッピングが可能である。機械式冷凍機の採用により、観測期間の長さにも制限がつかない。観測可能性を検討した論文を PASJ へ発表したほか、AAS 等の国際学会でも提案を発表、また宇宙研を中心に小型衛星計画の立ち上げへ向けて検討が進められた。

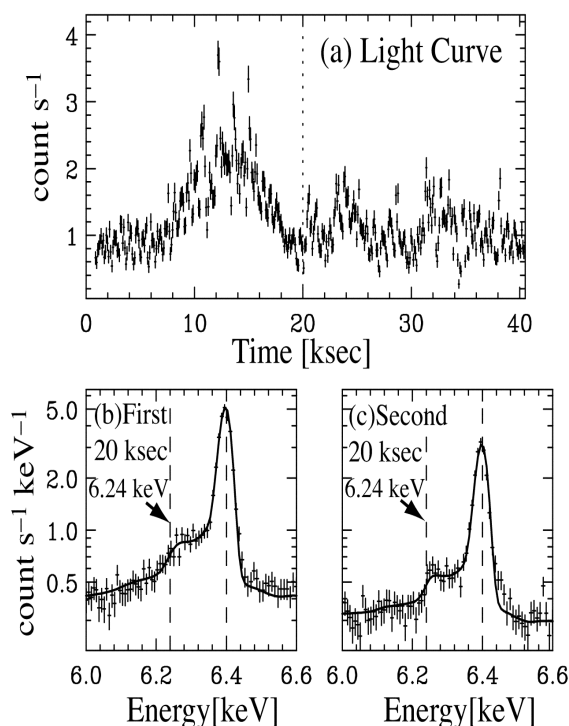


図 1: *Chandra* による X 線パルサー GX301-2 の (a) 光度曲線と (b) 観測前半、(c) 観測後半の中性鉄からの特性 $K\alpha$ 線のスペクトル。

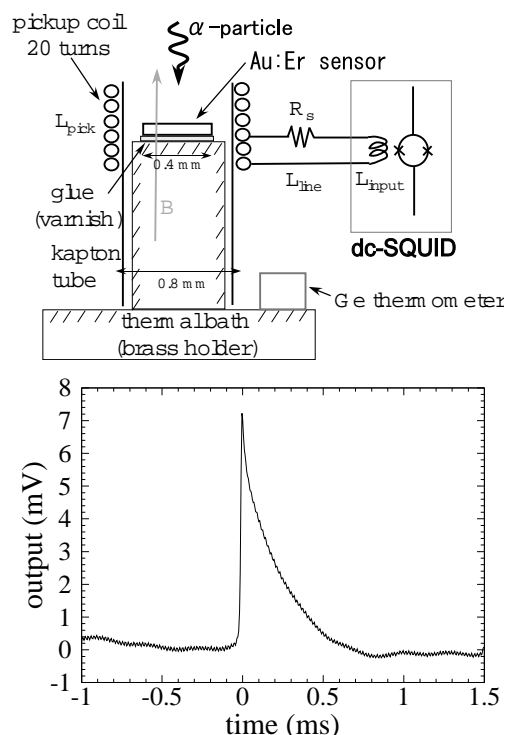


図 2: 希釈冷凍機中にマグネティックカロリメータ素子を組み込んだ様子 (上) と、実験で得られた 5.5 MeV の α 線に対するパルスの平均波形 (下)。

2. 研究業績

1) 論文

H. Kudo, T. Arakawa, S. Ohtsuka, T. Izumi, S. Shoji, H. Sato, H. Kobayashi, K. Mori, T. Homma, T. Osaka, N. Iyomoto, R. Fujimoto, K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, T. Oshima, K. Futamoto, Y. Takei, T. Ichitsubo, T. Fujimori, Y. Ishisaki, U. Morita, T. Koga, K. Shinozaki, K. Sato, T. Ohashi, Y. Kuroda, M. Onishi, K. Otake and F. Beppu: High Sensitive X-ray Microcalorimeter Using Bi-Au Microabsorber for Imaging Applications, *J. J. Appl. Phys.* **43** (2004) 1190–1195

M. Ishida, K. Morio, Y. Ueda: Possibility of a White Dwarf as the Accreting Compact Star in CI Cam (= XTE J0421+560), *Astrophys. J.* **601** (2004) 1088–1099

S. Watanabe, M. Sako, M. Ishida, Y. Ishisaki, S. M. Kahn, T. Kohmura, U. Morita, F. Nagase, F. Paerels, T. Takahashi: Detection of a Fully-Resolved Compton Shoulder of the Iron $K\alpha$ Line in the *Chandra* X-ray Spectrum of GX 301–2, *Astrophys. J. Lett.* **597** (2003) 37L–40L

K. Yoshikawa, N. Y. Yamasaki, Y. Suto, T. Ohashi, K. Mitsuda, Y. Tawara, A. Furuzawa: Detectability of the Warm/Hot Intergalactic Medium through Emission Lines of OVII and OVIII, *Publ. Astron. Soc. Japan* **55** (2003) 879–890

T. Furusho, N. Y. Yamasaki, T. Ohashi: *Chandra* Observation of the Core of the Galaxy Cluster AWM 7, *Astrophys. J.* **596** (2003) 181–189

T. Miyaji, Y. Ishisaki, Y. Ueda, Y. Ogasaka, H. Awaki, K. Hayashida: *ASCA* Observation of Unusually X-Ray-Hard Radio-Quiet QSO Kaz102, *Publ. Astron. Soc. Japan* **55** (2003) L11–L15

K. Tanaka, T. Morooka, R. Fujimoto, Y. Ishisaki, Y. Takei, U. Morita, N. Iyomoto, T. Oshima, S. Nakayama, N. Yamasaki, M. Koyanagi, K. Mitsuda, T. Ohashi, and K. Chinone: Transition edge X-ray sensors for industrial applications, *Physica B Condensed Matter* **329** (2003) 1619–1620

2) 国際会議報告

T. Ohashi: Metal distribution in clusters of galaxies and the prospect of Astro-E2, *Nuclear Phys. A* **718** (2003) 61–68

K. Misaki, H. Kunieda, Y. Maeda, Y. Haba, K. Itoh, H. Mori, R. Iizuka, A. Itoh, H. Inoue, S. Okada, Y. Yokoyama, Y. Ogasaka, K. Tamura, A. Furuzawa, R. Shibata, T. Tanaka, M. Naitou, M. Ishida, A. Hayakawa, C. Inoue, A. Hayashi, T. Shimizu, P. J. Serlemitsos, Y. Soong, K. -W. Chan, T. Okajima, J. P. Lehan: Ground-based X-ray calibration of the telescopes onboard Astro-E2 satellite, *SPIE* **5168** (2004) 294–305

H. Mori, R. Iizuka, H. Kunieda, K. Misaki, Y. Haba, K. Itoh, A. Itoh, A. Hayakawa, C. Inoue, M. Ishida, R. Shibata: Development of Astro-E2 XRT pre-collimator for stray-light protection, *SPIE* **5168** (2004) 352–363

A. Hayakawa, C. Inoue, Y. Ishisaki, M. Ishida, T. Ohashi, T. Furusho, N. Y. Yamasaki, R. Fujimoto, K. Mitsuda, K. Misaki, Y. Maeda, H. Kunieda: The filter wheel system for the x-ray spectrometer onboard Astro-E2, *SPIE* **5168** (2004) 364–375

A. Kushino, Y. Aoki, K. Sato, A. Tsuchiya, Y. Ishisaki, and T. Ohashi: Thermal and magnetic properties of $(\text{Er}_x\text{Y}_{1-x})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ for application to ADRs, *Nucl. Instr. & Meth. Phys. Res. A* **520** (2004) 634–637

N. Iyomoto, T. Ichitsubo, K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, R. Fujimoto, T. Oshima, K. Futamoto, Y. Takei, T. Fujimori, K. Yoshida, Y. Ishisaki, U. Morita, T. Koga, K. Shinozaki, K. Sato, N. Takai, T. Ohashi, T. Miyazaki, S. Nakayama, K. Tanaka, T. Morooka, and K. Chinone: Frequency-domain multiplexing of TES microcalorimeter array with CABBAGE, *Nucl. Instr. & Meth. Phys. Res. A* **520** (2004) 566–569

T. Arakawa, H. Kudo, H. Sato, H. Kobayashi, T. Izumi, S. Ohtsuka, K. Mori, S. Shoji, T. Osaka, T. Homma, K. Mitsuda, N. Yamasaki, R. Fujimoto, N. Iyomoto, T. Oshima, K. Futamoto, Y. Takei, T. Ichitsubo, T. Fujimori, K. Yoshida, Y. Ishisaki, U. Morita, T. Koga, K. Shinozaki, K. Sato, N. Takai, T. Ohashi, Y. Kuroda, M. Onishi, M. Goto, and F. Beppu: Fabrication of multi-pixel TES microcalorimeters with an electrodeposited Sn absorber and Bi absorber, *Nucl. Instr. & Meth. Phys. Res. A* **520** (2004) 456–459

Y. Ishisaki, U. Morita, T. Koga, K. Shinozaki, K. Sato, N. Takai, T. Ohashi, T. Arakawa, H. Kudo, H. Sato, H. Kobayashi, T. Izumi, S. Ohtsuka, K. Mori, S. Shoji, T. Osaka, T. Homma, K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, R. Fujimoto, N. Iyomoto, T. Oshima, K. Futamoto, Y. Takei, T. Ichitsubo, T. Fujimori, K. Yoshida, Y. Kuroda, M. Onishi, M. Goto, and F. Beppu: Performance analyses of TES microcalorimeters with mushroom shaped X-ray absorbers made of Sn or Bi, *Nucl. Instr. & Meth. Phys. Res. A* **520** (2004) 452–455

R. Fujimoto, K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, N. Iyomoto, T. Oshima, Y. Takei, K. Futamoto, T. Ichitsubo, T. Fujimori, K. Yoshida, Y. Ishisaki, U. Morita, T. Koga, K. Shinozaki, K. Sato, N. Takai, T. Ohashi, H. Kudo, H. Sato, T. Arakawa, H. Kobayashi, T. Izumi, S. Ohtsuka, K. Mori, S. Shoji, T. Osaka, T. Homma, Y. Kuroda, M. Onishi, M. Goto, F. Beppu, T. Tanaka, T. Morooka, S. Nakayama, and K. Chinone: TES microcalorimeter development for future Japanese X-ray astronomy missions, *Nucl. Instr. & Meth. Phys. Res. A* **520** (2004) 431–434

Y. Takei, R. Fujimoto, Y. Ishisaki, U. Morita, K. Tanaka, T. Koga, K. Mitsuda, T. Ohashi, N. Y. Yamasaki, N. Iyomoto, T. Ichitsubo, K. Sato, T. Fujimori, T. Oshima, K. Futamoto, K. Shinozaki, T. Morooka, S. Nakayama, K. Yoshida, N. Takai, and K. Chinone: Current dependence of performance of TES microcalorimeters and characteristics of excess noise, *Nucl. Instr. & Meth. Phys. Res. A* **520** (2004) 340–343

S. Terracol, T. Miyazaki, U. Morita, Y. Ishisaki, K. Tanaka, K. Mitsuda, and S. Friedrich: The non-equilibrium response of a high-resolution Ti/Au X-ray microcalorimeter, *Nucl. Instr. & Meth. Phys. Res. A* **520** (2004) 300–302

U. Morita, Y. Ishisaki, T. Koga, T. Ohashi, S. F. Terracol, T. Miyazaki, S. Friedrich, K. Mitsuda, and K. Tanaka: Analyses on the operating point dependence of the energy resolution with a Ti/Au TES microcalorimeter, *Nucl. Instr. & Meth. Phys. Res. A* **520** (2004) 277–280

3) 学会講演

日本天文学会 2003 年春季年会 2003 年 3 月 24 日 ~ 3 月 26 日 (東北大学)

森田うめ代、石崎欣尚、古賀丈雄、佐藤浩介、大橋隆哉、満田和久、藤本龍一、山崎典子、伊予本直子、大島泰、竹井洋、市坪太郎、藤森玉行、二元和朗、S.F. Terracol、宮崎利行、S. Friedrich、田中啓一、師岡利光、中山哲、茅根一夫: TES 型 X 線マイクロカロリメータの開発 V —高分解能素子の応答特性— (W23a)

伊予本直子、市坪太郎、満田和久、山崎典子、藤本龍一、大島泰、二元和朗、竹井洋、藤森玉行、宮崎利行、大橋隆哉、石崎欣尚、森田うめ代、佐藤浩介、古賀丈雄、田中啓一、師岡利光、中山哲、茅根一夫: 撮像型の TES 型 X 線マイクロカロリメータの読み出し系の開発 (W24a)

古賀丈雄、森田うめ代、石崎欣尚、佐藤浩介、大橋隆哉、伊予本直子、市坪太郎、満田和久、山崎典子、藤本龍一、大島泰、二元和朗、竹井洋、藤森玉行、庄子習一、工藤寛之、中村友亮、荒川貴博、泉俊光、大塚真一郎、逢坂哲彌、本間敬之、佐藤裕崇、小林秀臣、森健太郎黒田能克、大西光延、後藤雅也: TES 型 X 線マイクロカロリメータの開発 VI — マッシュルーム形状スズメッキ吸収体の製作と性能評価 — (W25b)

篠崎慶亮、降矢武志、石崎欣尚、大橋隆哉、三原建弘: 断熱消磁を用いた極低温 X 線検出器動作環境の構築 (W26b)

藤本龍一、満田和久、山崎典子、大橋隆哉、石崎欣尚、Richard Kelley、Caroline Stahle、古庄多恵、Dan McCammon、他 XRS チーム: Astro-E2 衛星搭載 X 線分光装置 XRS センサーの進捗状況 (W44a)

日本物理学会第 58 回年次大会 2003 年 3 月 28 日～3 月 31 日 (東北学院大学)

渡辺伸、長瀬文昭、高橋忠幸、迫昌男、石田學、森田うめ代、石崎欣尚、幸村孝由、S. KahnD、F. Paerels: X 線連星 GX301-2 におけるコンプトン散乱を受けた蛍光鉄輝線 (28aSL-5)

藤本龍一、満田和久、山崎典子、大橋隆哉、石崎欣尚、Richard Kelley、Caroline Stahle、古庄多恵、Dan McCammon、他 XRS チーム: Astro-E2 衛星搭載 X 線分光装置 XRS (28aSL-13)

伊予本直子、市坪太郎、満田和久、山崎典子、藤本龍一、大島泰、二元和朗、竹井洋、藤森玉行、宮崎利行、大橋隆哉、石崎欣尚、森田うめ代、佐藤浩介、古賀丈雄、田中啓一、師岡利光、中山哲、茅根一夫: 撮像型の TES 型 X 線マイクロカロリメータの読み出し系の開発 (29aSL-10)

竹井 洋、市坪太郎、伊予本直子、藤森玉行、大島泰、二元和朗、藤本龍一、山崎典子、満田和久、森田うめ代、石崎欣尚、古賀丈雄、佐藤浩介、大橋隆哉工藤寛之、佐藤裕崇、中村友亮、小林秀臣、荒川貴博、大塚真一郎、泉俊光、森健太郎、庄子習一、本間敬之、逢坂哲彌、田中啓一、師岡利光、中山哲、茅根一夫、黒田能克、大西光延: 超伝導遷移端 (TES 型) X 線マイクロカロリメータの熱的、電氣的応答とノイズ原因 (29aSL-11)

日本物理学会 2003 年秋季大会 2003 年 9 月 9 日～9 月 12 日 (宮崎ワールドコンベンションセンター)

森英之、前田良知、見崎一民、幅良統、伊藤啓、飯塚亮、伊藤昭治、井上裕彦、岡田俊策、國枝秀世、早川彰、井上智暁、林篤志、石田学、柴田亮、内藤聖貴、横山裕士、Peter J. Serlemitsos: 高効率、低バックグラウンドを実現した Astro-E2 衛星搭載用 X 線望遠鏡の性能評価 (10aSB-9)

日本天文学会 2003 年秋季年会 2003 年 9 月 25 日～9 月 27 日 (愛媛大学)

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、見崎一民、前田 良知、國枝 秀世、早川 彰、井上 智暁、林 篤志、清水 智央、石田 學、内藤 聖貴、他 Astro - E2 XRT team: Astro-E2 搭載 X 線望遠鏡の性能評価: First results of a flight telescope (W03a)

井上 智暁、早川 彰、伊藤 啓、林 篤志、石田 学、伊藤 昭治、飯塚 亮、森 英之、幅 良統、見崎一民、前田良知、國枝秀世: 高角分解能多重薄板積層型 X 線望遠鏡の研究・開発 II (W29a)

古賀丈雄、森田うめ代、石崎欣尚、佐藤浩介、大橋隆哉、伊予本直子、市坪太郎、満田和久、山崎典子、藤本龍一、大島泰、二元和朗、竹井洋、藤森玉行、庄子習一、工藤寛之、中村友亮、荒川貴博、泉俊光、大塚真一郎、逢坂哲彌、本間敬之、佐藤裕崇、小林秀臣、森健太郎、黒田能克、大西光延、後藤雅也、別

府史章: TES 型 X 線マイクロカロリメータの開発 VII —マッシュルーム形状ビスマスメッキ吸収体の製作と性能評価— (W52a)

佐藤浩介、大橋隆哉、古庄多恵、山崎典子、松下恭子: XMM-Newton によるペルセウス座銀河団周辺の電波銀河 IC310 の観測 (T18b)

篠崎慶亮、宮地崇光、上田佳宏、石崎欣尚、小賀坂康志、林田 清、栗木久光、G. Hasinger、M. Schmidt: AGN complete hard X-ray flux-limited sample のスペクトル統計解析 (S17a)

早川 彰、山崎 典子、古庄 多恵、大橋 隆哉: Chandra 衛星による A1060 銀河団ガスの温度・重元素分布の観測 (T16b)

古庄 多恵、山崎 典子、大橋 隆哉: Chandra 衛星による AWM7 銀河団中心部のガス塊とメタル分布 (T22a)

森尾 一徹、石田 学、上田佳宏: X 線連星 XTE J042+560/CI Cam のコンパクト天体は白色矮星か? (H30a)

国内研究会

第 4 回高宇連研究会「高エネルギー宇宙観測装置の現在と未来」
名古屋大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー/ベンチャーホール、2003 年 10 月 1-2 日

満田和久、山崎典子、藤本龍一、古庄多恵、大橋隆哉、石田学、石崎欣尚、佐々木伸、田原譲、古澤彰浩、須藤靖、吉川耕司: 小型衛星による高エネルギー宇宙観測と宇宙の大構造を探る広視野 X 線分光ミッション, DIOS

石崎欣尚、大橋隆哉、満田和久、山崎典子、藤本龍一、ほか DIOS 検出器チーム: 小型衛星による広視野 X 線分光ミッションのための TES 型マイクロカロリメータアレイの開発

早川 彰: 高角分解能多重薄板積層型 X 線望遠鏡の研究・開発

林忠四郎記念講演会、新潟大学理学部、2003 年 10 月 29 日

大橋隆哉: X 線天文学の新たな展開

第 4 回宇宙科学シンポジウム、宇宙科学研究本部/JAXA、2004 年 1 月 8-9 日

石田 学、大橋隆哉、石崎欣尚、國枝秀世、前田良知、満田和久、山崎典子、藤本龍一、小賀坂康志、古澤彰宏、田村啓輔、酒井知晶: NeXT 搭載用軟 X 線望遠鏡の開発 (P1-12)

大橋隆哉、石田 学、石崎欣尚、佐々木 伸、田原 譲、古澤彰浩、須藤 靖、吉川耕司、北山 哲、満田和久、山崎典子、藤本龍一、古庄多恵: 宇宙大規模構造を探る広視野 X 線分光衛星 DIOS (P1-86)

石崎欣尚、大橋隆哉、満田和久、山崎典子、藤本龍一、古庄多恵: 広視野 X 線分光衛星 DIOS 搭載マイクロカロリメータアレイの開発 (P1-87)

前田良知、國枝秀世、阿部和弘、金子 斉、石田 学: NeXT 搭載用伸展式光学台 (EOB) の開発 (P1-11)

国際会議

Japan-US Seminar “Cosmology with the Sunyaev-Zel’dovich Effect”, Kiyosato, Yamanashi, Japan, 15–20 June 2003

T. Ohashi: Dynamical features in clusters and the prospect of Astro-E2

10th International Workshop on Low Temperature Detectors, Genova, Italy, July 7–11 2003

U. Morita, Y. Ishisaki, T. Koga, T. Ohashi, S. F. Terracol, T. Miyazaki, S. Friedrich, K. Mitsuda and K. Tanaka: Analyses on the operating point dependence of the energy resolution with a Ti/Au TES microcalorimeter

Y. Takei, R. Fujimoto, Y. Ishisaki, U. Morita, K. Tanaka, T. Koga, K. Mitsuda, T. Ohashi, N. Y. Yamasaki, N. Iyomoto, T. Ichitsubo, K. Sato, T. Fujimori, T. Oshima, K. Futamoto, K. Shinozaki, T. Morooka, S. Nakayama, K. Yoshida, N. Takai and K. Chinone: Current dependence of performance of TES microcalorimeters and characteristics of excess noise

R. Fujimoto, K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, N. Iyomoto, T. Oshima, Y. Takei, K. Futamoto, T. Ichitsubo, T. Fujimori, K. Yoshida, Y. Ishisaki, U. Morita, T. Koga, K. Shinozaki, K. Sato, N. Takai, T. Ohashi, H. Kudo, H. Sato, T. Arakawa, H. Kobayashi, T. Izumi, S. Ohtsuka, K. Mori, S. Shoji, T. Osaka, T. Homma, Y. Kuroda, M. Onishi, M. Goto, F. Beppu, T. Tanaka, T. Morooka, S. Nakayama and K. Chinone: TES microcalorimeter development for future Japanese X-ray astronomy missions

Y. Ishisaki, U. Morita, T. Koga, K. Shinozaki, K. Sato, N. Takai, T. Ohashi, T. Arakawa, H. Kudo, H. Sato, H. Kobayashi, T. Izumi, S. Ohtsuka, K. Mori, S. Shoji, T. Osaka, T. Homma, K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, R. Fujimoto, N. Iyomoto, T. Oshima, K. Futamoto, Y. Takei, T. Ichitsubo, T. Fujimori, K. Yoshida, Y. Kuroda, M. Onishi, M. Goto and F. Beppu: Performance analyses of TES microcalorimeters with mushroom shaped X-ray absorbers made of Sn or Bi

T. Arakawa, H. Kudo, H. Sato, H. Kobayashi, T. Izumi, S. Ohtsuka, K. Mori, S. Shoji, T. Osaka, T. Homma, K. Mitsuda, N. Yamasaki, R. Fujimoto, N. Iyomoto, T. Oshima, K. Futamoto, Y. Takei, T. Ichitsubo, T. Fujimori, K. Yoshida, Y. Ishisaki, U. Morita, T. Koga, K. Shinozaki, K. Sato, N. Takai, T. Ohashi, Y. Kuroda, M. Onishi, M. Goto and F. Beppu: Fabrication of multi-pixel TES microcalorimeters with an electrodeposited Sn absorber and Bi absorber

N. Iyomoto, T. Ichitsubo, K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, R. Fujimoto, T. Oshima, K. Futamoto, Y. Takei, T. Fujimori, K. Yoshida, Y. Ishisaki, U. Morita, T. Koga, K. Shinozaki, K. Sato, N. Takai, T. Ohashi, T. Miyazaki, S. Nakayama, K. Tanaka, T. Morooka and K. Chinone: Frequency-domain multiplexing of TES microcalorimeter array with CABBAGE

S. Terracol, T. Miyazaki, U. Morita, Y. Ishisaki, K. Tanaka, K. Mitsuda and S. Friedrich: The non-equilibrium response of a high-resolution Ti/Au X-ray microcalorimeter

A. Kushino, Y. Aoki, K. Sato, A. Tsuchiya, Y. Ishisaki and T. Ohashi: Thermal and magnetic properties of $(Er_xY_{1-x})_3Al_5O_{12}$ for application to ADRs

The International Workshop on Optical Science and Technology (SPIE's 48th Annual Meeting).
San-Diego, USA, 3–8 August 2003

K. Misaki, H. Kunieda, Y. Maeda, Y. Haba, K. Itoh, H. Mori, R. Iizuka, A. Itoh, Y. Ogasaka, K. Tamura, A. Furuzawa, R. Shibata, M. Ishida, A. Hayakawa, C. Inoue, Serlemitsos, Y. Soong, K. Chan, T. Okajima: Ground-based x-ray calibration of the telescopes onboard Astro-E2 satellite

H. Mori, R. Iizuka, H. Kunieda, K. Misaki, Y. Haba, K. Itoh, A. Itoh, A. Hayakawa, C. Inoue, M. Ishida, R. Shibata: Development of ASTRO-E2 XRT pre-collimator for stray-light protection

A. Hayakawa, C. Inoue, Y. Ishisaki, M. Ishida, T. Ohashi, N. Y. Yamasaki, R. Fujimoto, K. Mitsuda, K. Misaki, Y. Maeda, H. Kunieda: Filter wheel system for the x-ray spectrometer onboard Astro-E2

Vulcano Workshop on “Modelling the Intergalactic and Intracluster Media”
Vulcano Island (Messina), Italy, 1–4 October 2003

T. Ohashi, K. Mitsuda, Y. Tawara, Y. Suto, K. Yoshikawa and the DIOS Working Group: Future Japanese Missions for the Study of Warm-hot Intergalactic Medium

K. Yoshikawa, N. Y. Yamasaki, Y. Suto, T. Ohashi, K. Mitsuda, Y. Tawara, A. Furusawa: Detectability of the Warm-Hot Intergalactic Medium through Emission Lines of OVII and OVIII

T. Furusho, K. Mitsuda, N. Yamasaki, R. Fujimoto, T. Ohashi: Prospects for X-ray Studies of Galaxy Clusters with Astro-E2/XRS

Stellar-Mass, Intermediate -Mass, and Supermassive Black Holes
Kyoto International Community House, Kyoto, Japan, 28–31 October 2003

K. Shinozaki, T. Miyaji, Y. Ishisaki, Y. Ueda, Y. Ogasaka, K. Hayashida, H. Awaki, G. Hasinger: Spectral Statistics and Luminosity Function of a Hard X-ray Complete Sample of Brightest AGNs

IAU Colloquium 194: Compact Binaries in the Galaxy and Beyond,
La Paz, Mexico, 17-22 November 2003

M. Ishida: Possibility of a White Dwarf as the Accreting Compact Star in CI Cam (= XTE J0421+560)

American Astronomical Society Meeting 203, Atlanta, USA, 4-8 January 2004

T. Ohashi, K. Mitsuda, Y. Tawara, Y. Suto, DIOS Team: DIOS: the Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor

2nd International Workshop on Transition Edge Sensor Device Physics,
University of Miami, USA, 18-19 March 2004

Y. Ishisaki, U. Morita, T. Ohashi, K. Tanaka, Y. Takei, R. Fujimoto, K. Mitsuda: Magnetic susceptibility of a TES micro-calorimeter

Y. Takei, R. Fujimoto, T. Oshima, K. Mitsuda, U. Morita, Y. Ishisaki, T. Ohashi: Long time scale observed with TES microcalorimeters with electrodeposited Bi absorber

原子物理学研究室

1. 研究活動の概要

原子・分子から結晶までの様々な標的の関与する meV から GeV までの非常に広いエネルギー領域に亘る原子衝突現象のダイナミクスを独自に開発した装置と測定手法を駆使して実験的に解明するのが本研究室の継続的な研究課題である。

1) 高速多価イオンのコヒーレント共鳴励起の研究

単結晶中をチャネリングするイオンは、結晶の周期ポテンシャルを振動磁場（仮想光子）として感じる。この振動数あるいはその高調波（ n 次）が入射イオンの核あるいは原子レベルの励起エネルギーと一致するとき、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。その観測は入射ビームに対して結晶を回転させながら、結晶通過後のイオンの電荷、および脱励起 x 線を測定することによって行う。

最近、日本原子力研究所の協力を得て、結晶試料として自前で 20 μ m 厚の SSD (Silicon Surface barrier Detector) 検出器が製作可能となった。これにより、試料内で付与されたエネルギーを測定することにより（この付与エネルギーと結晶内のイオンの軌道は一対一対応している）イオン軌道依存性、すなわち衝突径数依存性が測定可能になった。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 400 MeV/u の重イオンを使って、以下のような様々な RCE 実験研究が大きく進展した。

1. SSD 結晶エネルギー検出器を使った H-like イオンの高励起準位への RCE: Ar¹⁷⁺ イオンの $n = 2, 3, 4$ 準位、および He-like Fe²⁵⁺ イオンの $n = 2, 3$ 準位への RCE 同時観測による高精度分光実験

H-like Ar¹⁷⁺ イオンの $n = 3, 4$ 準位への共鳴励起では、この SSD 検出器を用いることにより、出射荷電分布と付与エネルギー同時測定が可能となり、 $n = 3, 4$ 準位への共鳴励起の場合、イオンは結晶面の中心位置では電場がないため、真空下での共鳴エネルギーと同じエネルギーで共鳴するものの、中心から離れると、シュタルク効果のため準位が複数に割れ、 $n = 2$ の時以上に大きくシフトする様子が明確に観測された。つまり、以前の実験では不可能と考えられていた、 $n = 3, 4$ 準位への正確な遷移エネルギーの決定がこれにより可能になった。このように SSD 結晶エネルギー検出器を用いた測定は、非常に強力でシュタルク効果の様子を観測できることが証明された。そこで、SSD 検出器を使って出射荷電分布と付与エネルギーを同時測定しながら、全く同条件下で、H-like Ar¹⁷⁺ イオンの基底状態から $n = 2, 3, 4$ への共鳴励起を観測した。このように複数の共鳴励起ピークを観測することから、供給されるビーム速度と遷移エネルギーのを同時に高精度で決定することができるため、基底準位のラムシフトが求められる。現在詳細な解析評価が進行中である。また同様の実験を H-like Fe²⁵⁺ イオンでも $n = 2, 3$ について行った。

2. SSD 結晶エネルギー検出器を使った He-like イオンの RCE: Ar¹⁶⁺ イオンの $n = 2, 3$ 準位、および He-like Fe²⁴⁺ イオンの $n = 2$ 準位への RCE

He-like イオンに対しても、SSD 検出器を使って同様に共鳴励起を観測した。これを SSD 検出器により軌道を区別して電場依存性を観測すると Ar¹⁶⁺ イオンの場合は高電場下でのみ、シュタルク効果の寄与があるに対して、Fe²⁴⁺ ではやはりほとんど寄与がない様子が観測された。さらに $n = 3$ 準位への励起では ¹S, ¹P 準位間のエネルギー差がむしろ小さくなり、再びシュタルク効果がはっきりと現れていることが、Ar¹⁶⁺ イオンにおいてははっきりと観測された。

3. SSD 結晶エネルギー検出器を使った 2 重 RCE 共鳴

共鳴励起条件すなわち、ビームエネルギーと結晶軸方向を適切に選ぶと、フーリエ級数次数の異なる振動結晶電場に対応する、複数の共鳴励起が得られる。従って、2 種類のエネルギーの光子を同時にイオ

ンに照射した場合と同様の実験が可能となるという興味深い現象が予想される。これを検証するために次のような予備的実験を行った。

(1) H-like Ar¹⁷⁺: $n = 1 \rightarrow n = 2$ and $n = 2 \rightarrow n = 3$

(2) He-like Ar¹⁶⁺: $1s \rightarrow 3p$ and $3p \rightarrow 2s$

2) 静電型イオン蓄積リングによる原子分子衝突の研究

平成 14 年度から静電型イオン蓄積リングを開始し、平成 15 年度末、実際のイオン蓄積に成功した。我々の開発している“静電型”イオン蓄積リングではイオン軌道は運動エネルギーと電荷の比 E/q に支配され、一定のエネルギーに対して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できる。その他にも分子イオンの場合には、イオン源で生成されたときの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。さらに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より冷却化することが可能であるなどの特徴を備えている。これらの利点を生かし、溶媒等の影響のない真空中で、しかも振動状態がほぼ基底状態にあるいわば凍りついた巨大分子イオンを試料として用意できるため、従来不可能であったクラスター分子や生体分子イオン固有の性質を調べることが初めて可能になる。これらの巨大分子イオンの寿命や、電子、中性原子、正負イオン、光子との相互作用の研究は、今後全く新しい原子分子衝突物理・化学を切り開く可能性のある大変有望なテーマである。我々の静電リングの形状はレーストラック型で周回長は 7.736 m である。入射イオン源に対して静電的に高圧を印可することによって、イオンを加速し、最大到達エネルギーは 30q keV である。従って、イオン周回時間は陽子に対して 3.23 ms であり、より重いイオンに対しては質量の平方根に比例して増大する。以下に平成 15 年度に行った様々な開発について列挙する。

1. ビームモニター系の開発： ビーム強度モニターとして利用するため、ビーム周回軌道から外れた中性粒子を MCP (Micro-Channel Plate) と蛍光板を組み合わせによって観測できるようにした。さらに、リング内を周回しているイオンビームを非破壊的にモニターするために円筒を 4 分割した電極から構成されるビーム位置モニター (Beam Position Monitor, BPM) を 4 箇所を設置した。

2. 超高真空化および真空排気系： 組み立て前の材料の段階ですべての部品を真空中、900 °C の条件の下でベーキング処理を行った。リング組立後さらに、内部のガス出しのために真空条件下でベーキングを行った結果、 10^{-9} Pa 台の超高真空を達成した。

3. 窒素温度冷却： 周回ビーム周辺の環境温度を液体窒素温度にまで冷却可能であることが、本静電リングの大きな特徴として挙げられる。2 系統に分かれてリング内に張り巡らされている液体窒素用配管が、低温冷却部と呼ばれている構造物と接合しており、配管に液体窒素を流入することで低温冷却部は冷却される。実際に、リングを冷却し、全体が液体窒素温度にまで下がることを確認するとともに、液体窒素温度熱平衡状態に至るまでの液体窒素消費量、さらに保持するための消費量を見積もった。この評価データに基づき、冷凍能力 115 W の液体窒素再凝縮循環装置を平成 15 年度末導入した。

4. ビーム入射系開発： 我々はビームライン上に最大 3 台のイオン源の設置を可能にする 4 極ディフレクターを設計設置し、取り出しイオン源を自由に選択できるようにした。また、これらのビームを、収束発散、偏向電極によって自由に整形制御することを目的として、4 極電極とアインツェルレンズで構成されている入射ビームラインレンズ系を設計開発した。最初のビーム周回テスト用としては、正負の原子イオンあるいは比較的小さな分子イオンを取り出すために、デュオプラズマトロンイオン源を採用した。これにより生成されたイオンビームはアインツェルレンズで整形された後、平行平板電極によりパルス化される。その後、ウイーンフィルターによって入射イオン種を質量選別され、静電型レンズ系で整形された後にリング内に入射される。ここでイオン源は低真空で動作するので、ビーム入射系には複数の排気装置による 4 段の作動排気を行っている。

以上のような、多岐にわたる開発テストを終えた後、平成 16 年 1 月より、実際にイオン源より取り出した 10 mA の Ar^+ イオンビームをパルス化して本リングに実際に打ち込み周回テストを開始し、すでに約 10000 万周に及ぶ蓄積に成功した。今後真空度の向上、および最適パラメータ等の調整を経て、本実験に展開予定である。

3) 低エネルギー多価イオン・分子衝突ダイナミクスの研究

低エネルギー領域の多価イオン・分子衝突における反応機構は、標的に振動・回転、そして解離の自由度があるために原子標的の場合ほど容易ではない。多価イオン・分子衝突における複雑な反応過程を解明するためには、全反応生成物を同時計測する実験技術が必要である。そこで、低速多価イオン・分子衝突ダイナミクスを解明することを目的として、同一衝突平面状の全反応性生物の識別とそれらの散乱情報を同時に測定できる多重同時計測実験法を開発してきた。平成 15 年度に行った $\text{Kr}^{8+} + \text{N}_2$ 衝突系の電子捕獲過程における全散乱粒子多重同時計測では、分離識別された各反応過程の反応エネルギーの決定と反応に寄与した電子状態の特定をなし、衝突イベント毎の散乱多価イオンと標的イオンの散乱情報の相関解析から各反応過程の衝突ダイナミクス解明に成功した。その結果、 $\text{Kr}^{8+} + \text{N}_2$ 衝突 (200 eV/u 以下) では、原子標的の場合と同様に識別分離された各電子捕獲過程は状態選別的にそれぞれ固有の衝突係数の衝突に依拠し、分子状態遷移はフランク・コンドン原理に従っていることが示された。また、数 eV/u 以下の低エネルギーでは多電子捕獲後の多価分子イオンは、ほぼ 100% 入射多価イオンに対して電荷の大きい解離イオンを外側に配置して崩壊していることを確認した。この実験事実は、低エネルギー衝突で多価イオンと分子間の多電子移行確率に強い分子配向依存性があることを示している。

4) 電荷移行反応によって生成した励起多価 Xe イオンからの極端紫外発光スペクトル

次世代半導体製造技術として開発が進んでいる極端紫外光 (Extreme Ultra Violet, EUV) を用いたりソグラフィーの重要な要素技術として EUV 光源の開発が急務とされている。候補としては Xe (あるいは Sn) のレーザー励起プラズマおよび放電プラズマが有力である。プラズマでは様々な価数のイオンが同時に生成されるため、特定の価数のイオンが放出する光の波長や強度に関する情報がないと定量的な理解は難しい。Xe や Sn は電子数が多く電子相関も強いので、電子状態が極めて複雑であり、エネルギー準位や遷移エネルギーに関するデータは未だに不足している。このような理由から阪大レーザー研・西原功修教授を中心とした理論モデリンググループが新たな実験データを求めて、電子サイクロトロン共鳴型イオン源を用いて多価イオン衝突実験を行っている当研究室に協力を要請してきた。

多価イオン源から引き出したイオンを分析用磁石によって特定の価数を選別してから衝突実験用真空槽に導き、中性の標的气体ビームと交差させ、衝突領域で電荷移行反応によって多価イオンの励起状態を生成させる。この励起状態の大部分は一電子励起状態と考えられ、直ちに光を放出して基底状態へ脱励起するので、この発光を観測すれば特定の価数のイオンからの発光スペクトルを得ることができる。以上の様な原理に基づいて測定が現実的なものであるかを検討した。そして、阪大レーザー研・西村博明教授から借用した斜入射分光器を用いて多価 Xe イオンと He ガス (および Ar ガス) との衝突による EUV 発光スペクトルの観測を行った。9 価から 13 価までの Xe イオンについて測定を行い、波長分解能などの点では不十分であるものの、価数を選別した Xe イオンからの発光を観測することに成功した。EUV リソグラフィーには波長 13.5 nm の光が用いられる計画であり、従来からこの波長は 10 価の Xe イオンによるとされてきたが、今回の測定で確かに 10 価によるものであることが確認された。

5) 低温ヘリウム気体中の分子イオンおよび準安定原子イオンの移動度

独自に開発した液体窒素および液体ヘリウムによる冷却が可能な移動管装置を用いて低温ヘリウム気体中におけるイオン移動度の測定を行ってきた。昨年度までは様々な分子イオンについて測定し、 N_2^+ 以

外については極低温・弱電場領域で古典的な極限値を下回るという結果を得てきた。この現象は衝突配向を固定して求めた断面積を平均する Monchick–Mason 近似では全く説明できないことから、衝突中に分子が回転して多重衝突が起こり大角度散乱となるのではないかと考えていた。ところが電気通信大学の大槻一雅らの計算の結果、引力によって衝突が加速されることで一時的な回転励起が起こり、相対的なエネルギーが減少するため分子イオンと He が離れられなくなるという Feshback 共鳴に似た現象が分子イオン移動度の異常な振る舞いの原因であることが明らかになった。N₂⁺ が例外である事実もポテンシャルが配向角度に殆ど依存せず球対称に近いことで説明することができた。この様に古典力学的な計算によって 10 年来の謎が解かれた。今後は量子論的な計算による解釈が進むものと期待している。

一方で種々の原子イオンについて移動度測定を行った。C⁺, N⁺, および O⁺ には全て準安定励起状態が存在する。電子状態が異なれば He との衝突断面積にも差があると考えられるので移動度の測定によって準安定状態が検出されることが期待できる。O⁺ では準安定状態は検出されなかったが、C⁺ は強電場領域で、逆に N⁺ は弱電場領域で基底状態と準安定励起状態の分離が観測された。古典的理論計算によって C⁺ に関する測定結果は理解できたが、N⁺ については説明できず、量子力学的共鳴散乱による断面積の増大が原因ではないかと考えられる。また、Kr⁺ および Xe⁺ の基底状態には微細構造が存在し、室温での移動度測定による分離が報告されている。ところが、低温における測定でも古典論による計算でも過去の報告例とは異なる結果が得られた。これについては引き続き実験と理論の両面から検討を行っている。

6) 多価イオンとの衝突による多原子分子のクーロン爆発

多価イオンとの衝突によって 10⁻¹⁵ s 程度の短い衝突時間の中に多数個の電子を奪われた分子は、中性分子の構造を保ったままで多価分子イオンとなる。この多価分子イオンは直ちにクーロン反発によって爆発的に解離するので、解離フラグメントの運動量ベクトルを位置敏感型飛行時間分析器によって測定すると解離直前の分子構造が決定できる。この原理に基づいて、ECR 多価イオン源から引き出した 100 keV 程度の Ar⁸⁺ を入射イオンとし、従来から用いてきた実験装置に加えて、これまで多重オージェ電子放出の測定のために開発してきた装置も使い、ジフルオロベンゼン F-C₆H₄-F の *o*-, *m*-, および *p*-という三種類の構造異性体を識別するなどの測定を行った。(化学専攻・城丸春夫助教授との共同研究)

2. 研究業績

1) 論文

T. Kaneyasu, T. Azuma, M. Ehrich, M. Yoshino and K. Okuno: State-selective Scattering Angular Dependent Fragmentation of N₂ by Slow Kr⁸⁺ Ion Impact, Nucl. Instr. Meth. B **205** (2003) 624-628.

A. Konnai, H. Tanuma, and N. Kobayashi: Electron transfer to individual magnetic substates of 3p ²P in collisions of helium-like ions with two-electron targets, Nucl. Instr. Meth. B **205** (2003) 586-590.

T. Azuma, Y. Takabayashi, T. Ito, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada and T. Murakami: Convoy electron emission from resonant coherently excited 390 MeV/u hydrogen-like Ar ions, Nucl. Instr. Meth. B **212** (2003) 397-401.

Y. Takabayashi, T. Ito, T. Azuma, K. Komaki, Y. Yamazaki, H. Tawara, E. Takada, T. Murakami, M. Seliger, K. Tökési, C. O. Reinhold, and J. Burdörfer: Excited-state evolution probed by convoy electron emission in relativistic heavy ion collisions, Phys. Rev. A **68** (2003) 042703.

T. Azuma, T. Muranaka, Y. Takabayashi, T. Ito, C. Kondo, K. Komaki, Y. Yamazaki, S. Datz, E. Takada, and T. Murakami: Angular distribution of X-ray emission from resonant coherently excited highly-charged heavy ions, Nucl. Instr. Meth. B **205C** (2003) 779-783.

Y. Nakai, T. Ikeda, Y. Kanai, T. Kambara, N. Fukunishi, T. Azuma, K. Komaki, Y. Takabayashi and Y. Yamazaki: Resonant coherent excitation of 94 MeV/u Ar¹⁷⁺ ions channeling through a Si crystal, Nucl. Instr. Meth. B **205C** (2003) 784-788.

J. Matsumoto, N. Kobayashi, A. Danjo, and M. Yoshino: Data analysis process of a troidal analyzer for electron-ion collision experiments, Rev. Sci. Instr. **75** (2004) 360-366.

S. Jinno, T. Takao, Y. Omata, A. Satou, H. Tanuma, T. Azuma, H. Shiromaru, K. Okuno, N. Kobayashi, and I. Watanabe: TMU electrostatic ion storage ring designed for operation at liquid nitrogen temperature, Nucl. Instr. Meth. B, *in press*.

M. Nomura, G. Veshapidze, H. Shiromaru, Y. Achiba, and N. Kobayashi: Structure-sensitive dissociation scheme for three isomers of difluorobenzene, Int. J. Mass Spectrom., *in press*.

F. A. Rajgara, M. Krishnamurty, D. Mathur, T. Nishide, H. Shiromaru, and N. Kobayashi: Coulombic and non-Coulombic fragmentation of highly charged benzene, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., *in press*.

2) 学会講演

日本物理学会第 28 回年次大会 2003 年 3 月 28 日 ~ 31 日 (東北大学川内キャンパス)

村中友子, 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: 相対論的多価イオンの干渉性共鳴励起 VIII: H-like Ar¹⁷⁺ の $n = 3$ への励起

田沼肇, 近内亜紀子, 小林信夫: 電荷移行反応における磁気副準位分布 I: 偏光度の標的依存性

近内亜紀子, 田沼肇, 小林信夫: 電荷移行反応における磁気副準位分布 II: 偏光度と微細構造分布

近藤力, 高林雄一, 村中友子, 真杉三郎, 東俊行, 畠山温, 小牧研一郎, 山崎泰規, 高田栄一, 村上健: 結晶中における数百 MeV/u 多価イオンビームの X 線放出

金安達夫, 東俊行, M. Ehrich, 吉野益弘, 奥野和彦: 低速多価イオン衝突における二原子分子の崩壊過程-状態の選別と解離ダイナミクス

日高宏, 神野智史, 的場史朗, 田沼肇, 小林信夫, 花之枝正俊, 大槻一雅, 松澤通生; 極低温ヘリウム中における分子イオンの移動度 IV

的場史朗, 日高宏, 田沼肇, 小林信夫; 極低温ヘリウム中における分子イオンの移動度 V

第 8 回 EUV モデリングワークショップ 2003 年 8 月 6 日 ~ 8 日 (大阪大学)

田沼肇: Present status of HCI collision experiments in TMU

原子衝突研究協会第 28 回研究会 2003 年 8 月 21 日 ~ 23 日 (東京都立大学)

真杉三郎, 村中友子, 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:
H-like 及び He-like Kr イオンの共鳴励起

村中友子, 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:
H-like Ar¹⁷⁺(1s) の $n = 3$ への励起によるシュタルク効果

近藤力, 高林雄一, 畠山温, 村中友子, 真杉三郎, 東俊行, 小牧研一郎, 山崎泰規, 高田栄一, 村上健:
干渉性共鳴励起された多価イオンの脱励起 X 線の異方性

的場史朗, 日高宏, 坂田博和, 田沼肇, 小林信夫: 極低温ヘリウム中における分子イオンの移動度

金安達夫, 東俊行, M. Ehrich, 吉野益弘, 奥野和彦: 低速多価イオン衝突における二原子分子の崩壊過程-解離ダイナミクスと電子状態の選別-

神野智史, 高雄智治, 小俣有紀子, 田沼肇, 東俊行, 奥野和彦, 小林信夫, 佐藤絢子, 城丸春夫, 渡辺郁男: 静電型イオン蓄積リングの開発 I -リング詳細設計-

高雄智治, 神野智史, 小俣有紀子, 田沼肇, 東俊行, 奥野和彦, 小林信夫, 佐藤絢子, 城丸春夫, 渡辺郁男: 静電型イオン蓄積リングの開発 II -加熱及び液体窒素冷却試験-

小俣有紀子, 神野智史, 高雄智治, 田沼肇, 東俊行, 奥野和彦, 小林信夫, 佐藤絢子, 城丸春夫, 渡辺郁男: 静電型イオン蓄積リングの開発 III -ビーム制御系-

佐藤絢子, 城丸春夫, 阿知場洋次, 神野智史, 高雄智治, 小俣有紀子, 田沼肇, 東俊行, 奥野和彦, 小林信夫, 渡辺郁男: 静電型イオン蓄積リングの開発 IV -イオン入射系-

野村雅人, 西出龍弘, 城丸春夫, 小林信夫: 多価イオン衝突による平面型分子の解離

日本物理学会 2003 年秋季大会 2003 年 9 月 20 日 ~ 23 日 (岡山大学)

田沼肇, 的場史朗, 坂田博和, 小林信夫: 極低温ヘリウム中における準安定原子イオンの移動度 I

的場史朗, 坂田博和, 田沼肇, 小林信夫: 極低温ヘリウム中における準安定原子イオンの移動度 II

神野智史, 高雄智治, 小俣有紀子, 佐藤絢子, 小田川大地, 児玉健, 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 I -概要-

高雄智治, 神野智史, 小俣有紀子, 佐藤絢子, 小田川大地, 児玉健, 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 II -超高真空化と窒素温度冷却-

金安達夫, 東俊行, M. Ehrich, 吉野益弘, 奥野和彦: 低速多価イオン-二原子分子衝突における解離ダイナミクスと電子状態の選別

村中友子, 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:
相対論的多価イオンの干渉性共鳴励起 IX: H-like Ar¹⁷⁺(1s) の $n = 3$ への励起によるシュタルク効果

真杉三郎, 村中友子, 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:
相対論的多価イオンの干渉性共鳴励起 X: H-like 及び He-like Kr イオンの共鳴励起

分子構造総合討論会 2003 年 9 月 24 日 ~ 27 日 (京都テルサ)

佐藤絢子, 神野智史, 高雄智治, 小俣有紀子, 東俊行, 奥野和彦, 田沼肇, 小林信夫, 児玉健, 城丸春夫, 阿知波洋次: 冷分子イオン衝突・分光実験用静電型イオン蓄積リングの製作

野村雅人, 西出 龍弘, Firoz A. Rajgara, 城丸春夫, 阿知波洋次, 小林 信夫: 多価イオン衝突による平面型分子の多重イオン化とクーロン爆発

イオンビームによる表面・界面解析第4回研究会 2003年12月19日(理化学研究所)

東俊行, 田沼肇, 奥野和彦, 小林信夫, 城丸春夫, 渡辺郁男: 液体窒素冷却型都立大静電リングの現状と実験計画

2003年度宇宙空間原子分子過程研究会 2004年1月6日~7日(JAXA宇宙科学研究本部)

田沼肇, 近内亜紀子, 小林信夫: 多価イオンの電荷移行反応における偏極励起状態の生成

東俊行, 真杉三郎, 村中友子, 近藤力, 畠山温, 山崎泰規, 小牧研一郎, 高林雄一, 高田栄一, 村上健: 結晶場を利用した多価重イオンの偏極およびその応用への可能性

研究会「放射線・粒子線と物質との相互作用の原子分子, 生体の基礎過程から医学, 産業応用まで」
2004年2月24日~25日(日本原子力研究所関西研究所光量子科学研究センター)

東俊行: 高速重イオンと固体標的との衝突により放出される高速二次電子

日本物理学会 2003年年次大会 2004年3月27日~30日(九州大学箱崎キャンパス)

近藤力, 村中友子, 真杉三郎, 石川明幸, 東俊行, 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 XI: He-like Ar, Fe イオンのシュタルク効果

真杉三郎, 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: 極薄結晶を用いた高エネルギーイオンのチャネリングおよび干渉性共鳴励起

神原正, 金井保之, 中井陽一, 池田時浩, 福西暢尚, 高林雄一, 東俊行, 近藤力, 小牧研一郎, 山崎泰規: 鉄およびニッケルの Li-like イオンで観測された 2s 電子の干渉性共鳴励起 (RCE)

金安達夫, 東俊行, M. Ehrich, 吉野益弘, 奥野和彦: 低速多価イオン衝突における分子解離過程-反応経路の選別と解離ダイナミクス-

小俣有紀子, 神野智史, 高雄智治, 佐藤絢子, 小田川大地, 田沼肇, 東俊行, 城丸春夫, 奥野和彦, 小林信夫, 渡辺郁男: 静電型イオン蓄積リングの開発 III -イオン入射系および中性粒子検出系-

的場史朗, 坂田博和, 田沼肇, 小林信夫, 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 III

国際会議

International Workshop on Beam Cooling and Related Topics, Yamanaka-ko, Japan, May 19-23, 2003

S. Jinno, T. Takao, Y. Omata, A. Satou, H. Tanuma, T. Azuma, H. Shiromaru, K. Okuno, N. Kobayashi, and I. Watanabe: TMU electrostatic ion storage ring designed for operation at liquid nitrogen temperature

23th International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (ICPEAC XXIII),
Stockholm, Sweden, July 23–29, 2003

T. Muranaka, C. Kondo, Y. Takabayashi, A. Hatakeyama, T. Azuma, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada, and T. Murakami: Trajectory-dependent resonant coherent excitation of hydrogen-like Ar¹⁷⁺ ions to the $n = 3$ states

C. Kondo, Y. Takabayashi, T. Ito, T. Muranaka, T. Azuma, A. Hatakeyama, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada, and T. Murakami: Anisotropic X-ray emission from resonant coherent excited 423 MeV/u helium-like Fe²⁴⁺ ions

T. Kaneyasu, T. Azuma, M. Ehrich, M. Yoshino, and Okuno: State-selective angle-resolved fragmentation of N₂ by slow highly charged ion impact

S. Furuya, K. Soejima, A. Danjo, K. Okuno, and A. Yagishita: Dynamical nodes in the circular dichromism

M. Nomura, F. A. Rajgara, H. Shiromaru, Y. Achiba, and N. Kobayashi: Dissociation of ethylene by collision of Ar⁸⁺

S. Jinno, H. Hidaka, H. Tanuma, and N. Kobayashi: The mobility of cluster ions NeHe⁺ in helium gas

H. Hidaka, S. Matoba, S. Jinno, H. Tanuma, N. Kobayashi, M. Hananoe, K. Ohtsuki, and M. Matsuzawa: Mobilities of diatomic molecular ions in cooled helium gas

S. Matoba, H. Hidaka, S. Jinno, H. Tanuma, and N. Kobayashi: Triatomic molecular ion mobility in cooled helium gas

A. Konnai, H. Tanuma, and N. Kobayashi: Magnetic sublevel distribution in single electron transfer to multicharged ions

18th International Seminar on Ion-Atom Collisions (ISIAC XVIII),
Ship Serenade, Baltic sea, July 30–August, 2003

T. Azuma, T. Muranaka, S. Masugi, C. Kondo, A. Hatakeyama, K. Komaki, Y. Yamazaki, Y. Takabayashi, E. Takada, and T. Murakami: Alignment and Stark effect in resonant coherent excitation of heavy ions by crystal field

K. Okuno, T. Kaneyasu, and T. Azuma: Collision dynamics in collisions of slow Kr⁸⁺ ions with N₂ molecules

13th International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarms (EMS-03),
Pruhonice, Czech Republic, July 30–August 2, 2003

S. Matoba, H. Hidaka, S. Jinno, H. Tanuma, and N. Kobayashi: Mobilities of triatomic molecular ions in cooled helium gas

H. Tanuma, H. Hidaka, S. Jinno, S. Matoba, and N. Kobayashi: Mobilities of atomic, molecular, and cluster ions in cooled helium gas

Austrian-Hungarian Workshop on Charged-Particle Transport through Nanostructures and Solids,
Debrecen, Hungary, November 14–16, 2003

T. Azuma, K. Komaki, Y. Yamazaki: Convoy electron emission from high-energetic ions channeling through crystals

International Workshop on Atomic Collision of Slow/Trapped Highly-Charged Ions,
RIKEN, Japan, February 19–21, 2004

T. Azuma: Development of an LN₂ cooled electrostatic storage ring

China–Japan Joint Symposium on Atomic and Molecular Processes in Plasmas,
Lanzhou, China, March 6–11, 2004

H. Tanuma; Spectroscopic study of charge transfer in collisions of multi-charged ions

Workshop on Relativistic Channeling and Related Coherent Phenomena,
Frascati, Italy, March 23–26, 2004

T. Azuma: Resonant coherent excitation of channeling heavy ions

3) 学会誌等

S. Matoba, H. Hidaka, S. Jinno, H. Tanuma, and N. Kobayashi: Mobilites of triatomic molecular ions in cooled helium gas, *At. Coll. Res. Jpn.* **29** (2003) 29–30.

S. Jinno, T. Takao, Y. Omata, A. Satou, H. Tanuma, T. Azuma, H. Shiromaru, K. Okuno, N. Kobayashi, and I. Watanabe: Development of electrostatic ion storage ring operated at liquid nitrogen temperature, *At. Coll. Res. Jpn.* **29** (2003) 53–54.

4) 著書

K. Okuno: Application of the Beam Guide Technique to Low Energy Collision Experiments, in “*The Physics of Multiply and Highly Charged Ions, vol. 2*”, edited by F. J. Currell (Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 2003) pp.217–234.

光物性研究室

1. 研究活動の概要

1) 電子状態を特定した「局所帯磁率」の温度依存性の評価

14年度に引き続いて、希土類元素を含む化合物・合金を試料として、内殻励起磁気円二色性(MCD)により、 $4f$ 電子などの担う「局所帯磁率」の温度依存性を測定した。試料はあらかじめ、MCD測定と同じ磁場強度のもとで、SQUIDによりバルク帯磁率の温度依存性を測定した。このバルク帯磁率は、 $4f$ 電子のみならず、希土類の $5d$ 電子、化合物中の希土類以外の価電子による磁氣的応答の総和を測定した物理量である。一方、 $3d-4f$ 励起による「 $4f$ 局所帯磁率」を温度にたいしてプロットすると、たとえば CeRh_2 では全くバルクと異なる振る舞いを示した。 CeRh_2 のバルク帯磁率はほとんど温度依存性がなくパウリ常磁性的であるが、MCDをCurie-Weissプロットすると、約20Kの正のWeiss温度をもつ直線に従い、磁気モーメントは $1.1 \mu_B$ 程度と評価された。すなわち電子の「半分」は遍歴的になっており、これが他の価電子と協力して「局所的」 $4f$ モーメントを遮蔽している可能性が示唆される。この実験手法を用いると、NMR等が困難な物質群についても、表面の清浄化に破断法や劈開法を用いることにより、局所磁気モーメントの振る舞いを系統的に評価できる可能性がある。

2) 内殻励起発光磁気円二色性によるバルク敏感な磁化評価

昨年度に引き続き、内殻励起発光磁気円二色性(MCD)から希土類磁性体の $4f$ 電子部分磁化を評価する研究を行った。内殻励起発光MCDは、プローブおよび検出にX線だけが用いられるため、内殻励起吸収MCDよりもバルク敏感な磁化測定が可能である。過去に発光MCDから評価した磁化は、単純な二次光学過程のKramers-Heisenberg式から計算される磁化よりもずっと小さく、発光MCDが自己吸収の影響を大きく受けていることを示唆していた。今回、我々は強磁性金属Gd、常磁性金属 GdPd_3 、フェリ磁性金属 DyCo_2 について、50Kから室温の間で希土類 $4d-4f$ 共鳴発光MCDの温度依存性測定を行ない、希土類 $4f$ 電子の磁化評価を行った。いずれの試料についても、自己吸収効果を完全に考慮したとしても、磁化の温度依存性は定性的にさえSQUIDの結果とは一致せず、発光MCDスペクトルを説明するには、さらに別の物理過程を考慮したモデルが必要であることが明らかになった。

3) カーボンナノチューブの高分解能光電子分光

単層カーボンナノチューブ(SWNT)は、理想的な1次元導体とみなされ、朝永-ラッティンジャー液体といわれる特殊な電子状態が実現していることが予想されている。我々は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HiSORで行った。その結果、フェルミ準位付近のスペクトル関数は、エネルギー(ω)に対して $\omega^{0.46}$ のべき乗則を示し、フェルミ準位直上強度は、温度(T)に対して $T^{0.46}$ のべき乗則を示した。これらの結果は、理論から予想された関数とよく一致しており、SWNTにおいて朝永・ラッティンジャー液体状態が実現していることを示している。

4) 単層カーボンナノチューブの合成と応用

昨年度に引き続き、レーザーアブレーション法により合成した単層カーボンナノチューブを高度に精製し、物性研究を行った。

1. 高度に生成されたナノチューブは、丈夫な紙状になることから、折り紙の鶴を折ることができる事を示した。この高純度ナノチューブによる折り鶴は、朝日新聞をはじめとするいくつかのメディアで取り上げられた。また、このナノチューブペーパーを用いて、光電子分光測定を行い、いくつかの非常に興味深い結果を得た。

2. アルコールCVD法による高純度ナノチューブの合成、直径制御、高度精製を実現した。これを用

いて、共鳴ラマン散乱の結果から、ナノチューブの指数付けを行った。

3. 理研との共同研究で、ナノチューブ薄膜による FET 構造を作製し、電界を印加することによりキャリアをドーピングして、それを共鳴ラマン散乱により検出することを試みた。薄膜の厚みがうまく制御できずに、十分なシグナルを得ることはできなかったが、たやすく FET が作製できることがわかった。

2. 研究業績

1) 論文

H. Ishii, H. Kataura, H. Shiozawa, H. Yoshioka, H. Otsubo, Y. Takayama, T. Miyahara, S. Suzuki, Y. Achiba, M. Nakatake, T. Narimura, M. Higashiguchi, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi: Direct observation of Tomonaga-Luttinger-liquid state in carbon nanotubes at low temperatures, *Nature* **426** (2003) 540 - 544.

A. Fujiwara, Y. Matsuoka, Y. Matsuoka, H. Suematsu, N. Ogawa, K. Miyano, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki, Y. Achiba: Photoconductivity of Single-Wall Carbon Nanotube Films, *Carbon* **42** (2004) 919 - 922.

L. Kavan, L. Dunsch, H. Kataura: Electrochemical tuning of electronic structure of carbon nanotubes and fullerene peapods, *Carbon* **42** (2004) 1011 - 1019.

W. Zhou, K. I. Winey, J. E. Fischer, T. V. Sreekumar, S. Kumar, H. Kataura: Out-of-plane mosaic of single-wall carbon nanotube films, *Appl. Phys. Lett.* **84**, (2004) 2172 - 2174.

X. Liu, T. Pichler, M. Knupfer, J. Fink, H. Kataura: Electronic properties of potassium-intercalated C₆₀ peapods, *Phys. Rev. B* **69** (2004) 075417-1 - 7.

S. Okubo, T. Sekine, S. Suzuki, Y. Achiba, K. Tsukagoshi, Y. Aoyagi, H. Kataura: Purification of Single-Wall Carbon Nanotubes synthesized from Alcohol by Catalytic Chemical Vapor Deposition, *Jpn. J. Appl. Phys.* **43** (2004) L396 - L398.

H. Ago, R. Azumi, S. Ohshima, Y. Zhang, H. Kataura, M. Yumura: STM study of molecular adsorption on single-wall carbon nanotube surface, *Chem. Phys. Lett.* **383** (2004) 469 - 474.

R. Pfeiffer, H. Kuzmany, T. Pichler, H. Kataura, Y. Achiba, M. Melle-Franco, F. Zerbetto: Electronic and mechanical coupling between guest and host in carbon peapods, *Phys. Rev. B* **69** (2004) 035404-1 - 7.

P. M. Rafailov, H. Kataura, C. Thomsen: Resonance and High-pressure Raman studies on Carbon Peapods, *Phys. Rev. B* **68** (2003) 193411 - 193414.

A. Kukovecz, M. Smolik, S. N. Bokova, H. Kataura, Y. Achiba, H. Kuzmany: Diameter dependence of the fine structure of the Raman G-band of single wall carbon nanotubes revealed by a Kohonen self-organizing map, *Chem. Phys. Lett* **381** (2003) 434 - 440.

Y. Maniwa, H. Kataura, K. Matsuda, Y. Okabe: A one-dimensional Ising model for C₇₀ molecular ordering in C₇₀-peapods, *New Journal of Physics* **5** (2003) 127.1 - 127.5.

S. Suzuki, R. Sen, T. Tamaki, H. Kataura, Y. Achiba: Single-walled carbon nanotube formation with double laser vaporization technique, *Eur. Phys. J. D* **24** (2003) 401 - 404.

T. Takenobu, T. Takano, M. Shiraishi, Y. Murakami, M. Ata, H. Kataura, Y. Achiba, Y. Iwasa: Carrier doping from inside in single-walled carbon nanotube, *Nature Materials* **2** (2003) 683 - 688.

Y. Matsuoka, A. Fujiwara, N. Ogawa, K. Miyano, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki, Y. Achiba: Temperature dependence of photoconductivity at 0.7 eV in single-wall carbon nanotube films, *Sci. Tech. Adv. Mat.* **4** (2003) 47 - 50.

M. Abe, H. Kataura, H. Kira, T. Kodama, S. Suzuki, Y. Achiba, K. Kato, M. Takata, A. Fujiwara, K. Matsuda, Y. Maniwa: Structural transformation from single-wall to double-wall carbon nanotube bundles, *Phys. Rev. B* **68** (2003) 041405(R)-1-4.

L. Kavan, L. Dunsch, H. Kataura, A. Oshiyama, M. Otani, S. Okada, Electrochemical Tuning of Electronic Structure of C₆₀ and C₇₀ Fullerene Peapods: In-situ Vis-NIR and Raman Study, *J. Phys. Chem. B* **107** (2003) 7666 - 7675.

T. Takenobu, M. Shiraishi, A. Yamada, M. Ata, H. Kataura, Y. Iwasa: Hydrogen storage in C₇₀ encapsulated single-walled carbon nanotube, *Synthetic Metals* **135-136** (2003) 787 - 788.

R. Pfeiffer, H. Kuzmany, Ch. Kramberger, Ch. Schaman, T. Pichler, H. Kataura, Y. Achiba, J. Kurti, V. Zolyomi: An unusual high degree of unperturbed environment in the interior of single wall carbon nanotubes, *Phys. Rev. Lett.* **90** (2003) 225501-1-4.

M. Yudasaka, T. Ichihashi, D. Kasuya, H. Kataura, S. Iijima: Structure changes of single-wall carbon nanotubes and single-wall carbon nanohorns caused by heat treatment, *Carbon* **41** (2003) 1273 - 1280.

Y. Sakakibara, S. Tatsuura, H. Kataura, M. Tokumoto, Y. Achiba: Near-infrared Saturable Absorption of Single Wall Carbon Nanotubes Prepared by Laser Ablation Method, *Jpn. J. Appl. Phys.* **42** (2003) L494 - L496.

H. Shiozawa, T. Miyahara, K. Obu, Y. Takayama, H. Ishii, T. D. Matsuda, H. Sugawara, H. Sato, T. Muro, Y. Saitoh: Local Magnetic Susceptibility in Rare-Earth Compounds, *J. Phys. Soc. Jpn.* **72** (2003) 2079 - 2084.

Y. Takayama, H. Shiozawa, T. Yoshida, C. Lee, K. Obu, H. Otsubo, T. Miyahara, S. Yamamoto, T. Miyahara: Measurement of the two-photon correlation of synchrotron radiation in the VUV region by a delay-time modulation technique, *J. Synchrotron Rad.* **10**, (2003) 303 - 309.

2) 国際会議報告

H. Shiozawa, H. Ishii, H. Kataura, H. Yoshioka, H. Otsubo, Y. Takayama, T. Miyahara, S. Suzuki, Y. Achiba, T. Kodama, M. Nakatake, T. Narimura, M. Higashiguchi, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi: Valence-Band Photoemission Study of Single-Wall Carbon Nanotubes, *Proc. of IWEPNM2003, AIP Conference Proceedings* **685** (2003) 139 - 142.

A. Fujiwara, Y. Matsuoka, N. Ogawa, K. Miyano, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki, Y. Achiba: Temperature Dependence of Photoconductivity of Single-Wall Carbon Nanotubes, *Proc. of IWEPNM2003, AIP Conference Proceedings* **685** (2003) 156 - 159.

A. Kukovecz, M. Smolik, S. N. Bokova, E. D. Obraztsova, H. Kataura, Y. Achiba, H. Kuzmany: Artificial Neural Networks in the Analysis of the Fine Structure of the SWCNT Raman G-Band, *Proc. of IWEPNM2003, AIP Conference Proceedings* **685** (2003) 211.

R. Pfeiffer, C. Kramberger, C. Schaman, A. Sen, M. Holzweber, H. Kuzmany, T. Pichler, H. Kataura, Y. Achiba: Defect Free Inner Tubes in DWCNTs, *Proc. of IWEPNM2003, AIP Conference Proceedings* **685** (2003) 297.

M. Holzweber, C. Kramberger, F. Simon, A. Kukovecz, H. Kuzmany, H. Kataura: Catalyst Free Growth of Single-Wall Carbon Nanotubes (SWCNTs), *Proc. of IWEPNM2003, AIP Conference Proceedings* **685** (2003) 306.

C. Kramberger, R. Pfeiffer, C. Schaman, H. Kuzmany, H. Kataura: Assignment of Chiral Vectors in Carbon Nanotubes” *Proc. of IWEPNM2003, AIP Conference Proceedings* **685** (2003) 310.

A. Sen, C. Kramberger, C. Schaman, R. Pfeiffer, H. Kuzmany, H. Kataura: Listing of Raman Lines from Double-Walled Carbon Nanotubes, *Proc. of IWEPNM2003, AIP Conference Proceedings* **685** (2003) 314.

L. Kavan, L. Dunsch, H. Kataura: Tuning of Electronic Structure of $C_{60}@SWCNT$ and $C_{70}@SWCNT$ (Peapods): In-Situ Raman and Vis-NIR Spectroelectrochemical Study, *Proc. of IWEPNM2003, AIP Conference Proceedings* **685** (2003) 344.

M. Shiraishi, T. Takenobu, H. Kataura, M. Ata: Recent Progress in Hydrogen Adsorption in Single-Walled Carbon Nanotube Systems, *Proc. of IWEPNM2003, AIP Conference Proceedings* **685** (2003) 573.

H. Kataura, Y. Maniwa, T. Kodama, K. Kikuchi, S. Suzuki, Y. Achiba, K. Sugiura, S. Okubo, K. Tsukagoshi: One-dimensional System in Carbon Nanotubes, *Proc. of IWEPNM2003, AIP Conference Proceedings* **685** (2003) 349.

3) 学会講演

日本物理学会 第 58 回年次大会：2003 年 3 月 28～3 月 31 日 (東北大学川内キャンパス)

塩澤秀次, 石井廣義, 片浦弘道, 大坪英雄, 高山泰弘, 宮原恒昱, 鈴木信三, 阿知波洋次, 仲武昌史, 吉岡英生, 成村孝正, 東口光晴, 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

塩澤秀次, 石井広義, 片浦弘道, 大坪英雄, 高山泰弘, 宮原恒昱, 鈴木信三, 阿知波洋次, 仲武昌史, 吉岡英生, 成村孝正, 東口光晴, 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の高分解能光電子分光

高山泰弘: 磁気秩序のない物質の MCD および微弱発光の MCD

高山泰弘, 吉田徹夫, 岡村健司, 大坪英雄, 塩澤秀次, 石井広義, 宮原恒昱, 菅原仁: Gd/Co 多層膜の内殻励起発光 MCD 測定

阿部真利, 片浦弘道, 鈴木信三, 阿知波洋次, 吉良弘, 宇高彰子, 神島謙二, 松田和之, 真庭豊: SWNT 内に形成されるアイスナノチューブの構造

大窪清吾，関根毅，片浦弘道，鈴木信三，阿知波洋次，塚越一仁，青柳克信: アルコール CVD で作製したカーボンナノチューブのラマン散乱

宇高彰子，阿部真利，吉良弘，神島謙二，松田和之，真庭豊，片浦弘道，鈴木信三，阿知波洋次: K をドーブしたカーボンナノチューブの X 線回折

片浦弘道，阿部真利，真庭豊，大窪清吾，鈴木信三，阿知波洋次: 分子内包ナノチューブのラマン散乱

渡辺英一郎，塚越一仁，八木巖，大窪清吾，青柳克信，兒玉健，片浦弘道，西川浩之，池本勲，菊地耕一: ナノギャップ電極上 C₆₀ クラスタ薄膜の伝導特性

大坪英雄，岡村健史，塩澤秀次，高山泰弘，片浦弘道，石井広義，宮原恒昱: カーボンナノチューブの逆光電子分光測定

市田正夫，濱中泰，片浦弘道，阿知波洋次，中村新男: 単層カーボンナノチューブにおける光励起キャリアの超高速緩和 II

松岡亨卓，藤原明比古，小川直毅，宮野健次郎，片浦弘道，真庭豊，鈴木信三，阿知波洋次: 単層カーボンナノチューブの光伝導温度依存性

日本物理学会 2003 年秋季大会 2003 年 9 月 20 日～9 月 23 日 (岡山大学津島キャンパス)

石井廣義 (招待講演): 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的性質の直接観察

塩澤秀次，石井廣義，片浦弘道，木原英夫，大坪英雄，高山泰弘，宮原恒昱，鈴木信三，阿知波洋次，仲武昌史，吉岡英生，成村孝正，東口光晴，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の高分解能光電子分光 II

塩澤秀次，宮原恒昱，中村聡，大坪英雄，高山泰弘，石井広義，菅原仁，佐藤英行，中村哲也，室隆桂之，斎藤祐児: 希土類価数揺動物質 (CeRh₂, YbAl₃) の局所帯磁率

宇高彰子，小笠原俊介，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: 酸素を吸蔵したカーボンナノチューブの X 線回折

松田和之，真庭豊，片浦弘道，鈴木信三，阿知波洋次: 単層カーボンナノチューブに吸蔵された水の NMR

片浦弘道，木村美緒，鈴木信三，阿知波洋次: ミセル化単層ナノチューブのラマン散乱

市田正夫，脇田浩之，梅津郁朗，片浦弘道，木村美緒，鈴木信三，阿知波洋次，安藤弘明: ミセル化単層カーボンナノチューブにおける時間分解発光

松岡亨卓，藤原明比古，小川直毅，宮野健次郎，片浦弘道，真庭豊，鈴木信三，阿知波洋次: 単層カーボンナノチューブ薄膜の光伝導による輸送特性評価

大窪清吾，関根毅，片浦弘道，鈴木信三，阿知波洋次，塚越一仁，青柳克信: アルコール CVD により作成されたナノチューブの精製と直径制御

第 17 回日本放射光学会年会放射光科学合同シンポジウム 2004 年 1 月 8 日～1 月 10 日

(つくば国際会議場)

中村聡, 宮原恒昱, 吉田徹夫, 塩澤秀次, 大坪英雄, 高山泰弘, 石井広義, 菅原仁, 佐藤英行, 中村哲也, 室隆桂之, 斎藤祐児, 海老原孝雄: 内殻励起磁気円二色性による局所帯磁率の評価

吉田徹夫, 宮原恒昱, 中村聡, 大坪英雄, 塩澤秀次, 高山泰弘, 石井広義: 希土類金属の内殻励起発光磁気円二色性による局所磁化の評価

木原英夫, 石井広義, 片浦弘道, 大坪英雄, 高山泰弘, 宮原恒昱, 鈴木信三, 阿知波洋次, 仲武昌史, 吉岡英生, 成村孝正, 東口光晴, 島田賢也, 生天目博文, 谷口雅樹: カーボンナノチューブの紫外線光電子分光

PF 研究会「ナノテクノロジーと高分解能電子分光」2003 年 12 月 19～12 月 20 日

(KEK 物質構造科学研究所)

石井広義: カーボンナノチューブの高分解能光電子分光

塩澤秀次, 石井広義, 木原英夫, 片浦弘道, 大坪英雄, 高山泰弘, 宮原恒昱, 鈴木信三, 阿知波洋次, 吉岡英生, 仲武昌史, 東口光晴, 成村孝正, 島田賢也, 生天目博文, 谷口雅樹: フラレン内包カーボンナノチューブの光電子分光

第 8 回 HiSOR シンポ 2004 年 3 月 19 日～3 月 20 日 (広島大学放射光科学研究センター)

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, M. Taniguchi: High-resolution Photoemission Spectroscopy of Single-Wall Carbon Nanotubes

第 21 回 PF シンポジウム 2004 年 3 月 24 日～3 月 25 日 (高エネルギー加速器研究機構)

石井広義 (招待講演): カーボンナノチューブ (1 次元金属) の電子伝導性

第 25 回フラレン・ナノチューブ記念シンポジウム 2003 年 7 月 23～7 月 25 日

(淡路夢舞台国際会議場)

市田正夫, 濱中泰, 脇田浩之, 片浦弘道, 阿知波洋次, 中村新男: 単層カーボンナノチューブにおけるキャリアの超高速緩和と非線形光学応答

松岡亨卓, 藤原明比古, 小川直毅, 宮野健次郎, 片浦弘道, 真庭豊, 鈴木信三, 阿知波洋次: 光伝導から見た半導体カーボンナノチューブの伝導特性

松岡裕相, 川崎晋司, 沖野不二雄, 東原秀和, 片浦弘道: 高温高圧処理したカーボンナノチューブの構造および物性

平原佳織, 坂東俊治, 片浦弘道, Mathieu Kociak, 飯島澄男: 直径 0.7nm 以下のナノチューブの電子回折

西出大亮, 片浦弘道, 鈴木信三, 大窪清吾, 塚越一仁, 青柳克信, 阿知波洋次: レーザー CVD 法による単層カーボンナノチューブの合成

鈴木信三, 玉城孝憲, 西頼元樹, 西出大亮, 片浦弘道, 阿知波洋次: フラレン・単層カーボンナノチューブ生成における雰囲気ガスの効果

関根毅, 大窪清吾, 片浦弘道, 鈴木信三, 阿知波洋次: アルコール CVD 法を用いたカーボンナノチューブ生成における触媒効果

土屋顕也, 片浦弘道, 鈴木信三, 阿知波洋次: ダブルレーザー蒸発法を用いた単層カーボンナノチューブ生成

大窪清吾, 関根毅, 片浦弘道, 鈴木信三, 阿知波洋次, 塚越一仁, 青柳克信: アルコール CVD 法で作製したカーボンナノチューブのラマン散乱

宇高彰子, 阿部真利, 吉良弘, 神島謙二, 松田和之, 真庭豊, 片浦弘道, 鈴木信三, 阿知波洋次: 酸素をドーピングしたカーボンナノチューブの X 線回折

片浦弘道, Ladislav Kavan, Lothar Dunsch, 押山淳, 大谷実, 岡田晋: C_{60} および C_{70} ピーポッドへの電気化学ドーピング

真庭豊, 井上壮太郎, 片浦弘道, 阿部真利, 松田和之, 吉良弘, 兒玉健, 阿知波洋次, 藤原明比古: SWNT 内フラレン C_{70} 分子のダイナミクス

片浦弘道, 真庭豊, 兒玉健, 菊地耕一, 鈴木信三, 阿知波洋次: ナノチューブのラマン散乱, 孤立, 束, そして分子内包

第 26 回フラレン・ナノチューブ総合シンポジウム 2004 年 1 月 7~1 月 9 日
(岡崎コンファレンスセンター)

片浦弘道: カーボンナノチューブ及びピーポッドの光電子分光

川崎晋司, 小松康祐, 沖野不二雄, 東原秀和, 片浦弘道: 開端および閉端単層カーボンナノチューブのフッ素化

宇高彰子, 小笠原俊介, 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: 酸素をドーピングしたカーボンナノチューブの X 線回折 II

鈴木信三, 牧田靖規, 西出大亮, 片浦弘道, 阿知波洋次: 窒素雰囲気中における単層カーボンナノチューブ生成

大窪清吾, 関根毅, 片浦弘道, 鈴木信三, 阿知波洋次, 塚越一仁, 青柳克信: アルコール CVD により作製されるナノチューブの精製と直径制御

牧田靖規, 鈴木信三, 片浦弘道, 阿知波洋次: 窒素中アーク放電による単層カーボンナノチューブ生成

白石誠司, 岩井俊憲, 竹延大志, 岩佐義宏, 片浦弘道, 阿多誠文: 液相プロセスによる SWNT-FET の作製と評価

国際会議

International Symposium on Synchrotron Radiation Research for Spin and Electron States in d and f Electron Systems (SRSES2003) November 19 - 21, 2003 Hiroshima University, Japan

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, M. Taniguchi: Photoemission Spectroscopy on Single-Wall Carbon Nanotubes

XVIIIth International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials,
Molecular Nanostructures, Kirchberg/Tirol, Austria, Mar. 6 - 13, 2004.

H. Kataura, H. Shiozawa, H. Yoshioka, M. Nakatake, M. Taniguchi, H. Ishii: Electronic Structure of Single-Wall Carbon Nanotubes and Peapods: Photoemission Study (Invited paper)

The 20th Yokohama City University International Forum: Science and Technology
in Nanometer-Scale Materials, Yokohama Symposia, Japan, January 24 - 26, 2004.

H. Kataura: Optical properties of carbon nanotubes: Photoemission spectroscopy (Invited paper)

International Conference on the Science and Application of Nanotubes,
Seoul, Korea, July 7 - 11, 2003.

H. Kataura: One-dimensional Molecular Crystals Formed inside Single-Wall Carbon Nanotubes (Invited paper)

K. Hirahara, S. Bandow, H. Kataura, M. Kociak, and S. Iijima: Electron diffraction study of the small-diameter carbon nanotube less than 0.7nm

4) 学会誌等

高山泰弘: 真空紫外領域での内殻励起発光 MCD, FOTON FACTORY NEWS **21** (2003) 20 - 26.

石井廣義: 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的性質の直接観測, 固体物理 **39** (2004) 45 - 52.

ミクロ物性研究室

1. 研究活動の概要

1) 主に電子スピン共鳴法による研究

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準備中である。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、ESR を用いてサケの DNA の電子状態を調べる研究を進めている。特に、2 価の金属イオンを DNA にドーピングし、ESR によりその電子状態を調べた。イオン種として、Zn, Ca, Mg, Mn を用いた。Mn を除くイオンをドーピングした系の ESR 信号強度は非常に弱く、DNA の G-C や A-T 等のアミノ基対あたり千分の 1 から数万分の 1 であった。Mn の場合はアミノ基対あたり 1 スピン程度存在することや、電頭を用いた EDS スペクトルから、どのイオン種もほぼアミノ基対あたり 1 イオン以上入っていることが分かった。これらのことから、2 価のイオンを溶液反応でドーピングした場合には、イオンから放出される 2 つの電子が、2 つの Na カウンターイオンの代わりに 2 つの燐酸基に電子を供給しており、アミノ基鎖の π -バンドに電荷担体を導入できず、伝導性ナノワイヤに向かないことが明らかになった。

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進めてきた。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。最近、NMR のスペクトル解析から、 C_{60} ボールのヤン・テラー歪みも示され、ますます可能性が高まってきた。このモデルの検証に加えて、TDAE 分子の強磁性に対する関与を調べるために 1 軸変位の実験を行い、b 軸方向に変位させると強磁性転移温度が更に上昇することを見出した。一方、 C_{60} が 1 次元的に並ぶ c-軸方向に一軸変位を加えた所、1 kbar という低い加圧により T_C が急激に降下する事を見出した。これらの結果は我々の提案しているモデルで良く理解できることが示された。(産総研との共同研究)



図 1: 神秘的な雰囲気を漂わせる鮭の DNA の十字架型結晶。

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、 $(DMe-DCNQI)_2M$ ($M=Li$ or Ag) 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)

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 $(BEDO-TTF)(Cl_2TCNQ)$ 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 $(BEDO-TTF)(Cl_2TCNQ)$ は、キュリーワイス温度依存性を示し、分子当たり 1 スピンが存在する。しかし、120 K で構造相転移を起こし、スピン-パイエルス相に入る。更に、17 K 以下で反強磁性的な新たな信号が観測された。スピン-パイエルス相内のスピンソリトンが反強磁性を誘起する可能性が予想されたが、W-band で詳しく調べ始めたところ、反強磁性共鳴では無く、別の原因を考える必要があることが明らかになってきた。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が詳しく解析できることが分かってきた。(産総研、分子研との共同研究)

2) ナノクラスター凝縮体の物性研究

松田、真庭らは、ナノメートルサイズの特徴的な構造を有する物質系について、核磁気共鳴 (NMR)、磁化測定、電気伝導度測定、X線回折実験などの方法を用いた基礎物性の研究と、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。2003 年度 (平成 15 年度) における研究活動の概要は次のとおりである。

ア) 光照射 NMR 実験: NMR 法は物質のミクロの構造、電子状態、運動状態を調べる強力な手段であり、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。これまで、光励起された電子と核スピンの相互作用を利用して NMR の信号増大を図る光照射 (ポンプ) 法の装置を立ち上げ、GaAs 結晶の光照射 NMR 実験を行い、150 倍以上の信号増大効果を確認している。本年度は低温における光照射実験を可能にする、光学窓付クライオスタットを導入した。

イ) 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。我々は、これまでカリウムを吸蔵したゼオライト LTA の強磁性発現機構の研究を行ってきた。ゼロ磁場および縦磁場 μ SR 緩和と高磁場 NMR スペクトルの同時解析を行い、もっとも確からしい磁気構造モデルに到達している。また、FAU 型ゼオライトにおける熱的着色現象の機構を明らかにするために、高温 ESR 測定を行った (中央大学風間、東京医科大増淵氏らとの共同研究)。

ウ) 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 (片浦氏、門脇氏、岡部氏との共同研究): 単層カーボンナノチューブ (SWNT) の 1 次元ナノ空洞内の物質系は、壁との相互作用や空間次元などにより、3 次元的なバルク結晶にはない興味深い物性が期待できる。本年度は特に以下の研究を行った。(1) SWNT 内の水相転移を SWNT の直径依存性に注目して研究した。(2) アルカリ金属が SWNT のバンドル内に吸蔵される過程をその場観察の X 線回折法で明らかにした。(3) 各種ガス (酸素、窒素、ヘリウム、水素、メタン、アルゴン) の SWNT バンドルへの吸着過程を X 線回折法により研究した。(4) SWNT 内の C70 の 1 次元結晶における配向を記述するイジングモデルを提案した。

エ) ナノ構造炭素における水、酸素、水素などのミクロ物理基礎過程の研究を開始した。

オ) 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) 磁性分子を内包した単層カーボンナノチューブの構造 (2003A0302-ND1-np/SPring-8) (1) 単層カーボンナノチューブ内の液体の構造と相転移 (2003B0340-ND1d-np/SPring-8) (4) 磁性分子を内包した SWNT

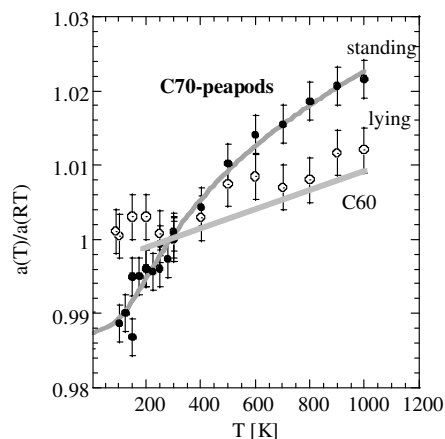


図 2: C70 の 1 次元結晶の熱膨張。曲線は配向を記述する 1 D イジングモデルによる解析結果。1 D イジングモデルは SWNT の直径に依存し、C70 分子の長軸の配列について、強配向秩序 (FOO) 反強配向秩序 (AFOO) 強配向秩序 (FOO) などの最低温秩序相が現れることを予想している。

の磁性 (2003A0301-NS1-np/SPring-8) (5) カーボンナノストラクチャーの研究 (2002G215/PF) (6) ナノ構造炭素の磁性 (2003G002/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。

2. 研究業績

1) 論文

M. Hiraoka, H. Sakamoto, K. Mizoguchi, T. Kato, and R. Kato: Charge transport in the insulating state of (DMe-DCNQI)₂Li above T_{SP} : a possibility of the fractional charged soliton conduction with $\pm\frac{1}{2}e$, Phys. Rev. Lett. **91**, 056604 (2003).

D. W. Breiby, S. Sato, E. J. Samuelsen, and K. Mizoguchi: Electron Spin Resonance Studies of Anisotropy in Semiconducting Polymeric Films, J. Polym. Sci.: Part B: Polym. **41**, 3011-3025 (2003).

S. Sato, H. Sakamoto, K. Mizoguchi, H. Morioka, and T. Kimura: Orientational distribution of PPy rings analysed with g-shift anisotropy of ESR, Synth. Met. **135-136**, 421-422 (2003).

H. Sakamoto, K. Mizoguchi, and T. Hasegawa: ESR studies of mixed-stack charge-transfer compounds of (BEDT-TTF) analogs under pressure, Synth. Met. **135-136**, 611-612 (2003).

K. Mizoguchi, T. Yamabe, H. Sakamoto, L. Damjanovic, and V. I. Srdanov: Pressure tuning of the exchange interactions between s-electrons in a b.c.c. lattice of sodalite cages, Physica B **329-333**, 1255-1256 (2003).

M. Hiraoka, H. Sakamoto, K. Mizoguchi, and R. Kato: Quasi-one dimensional diffusive motion of spin solitons in the spin-Peierls state of (DMe-DCNQI)₂Li, Physica B **329-333**, 1201-1202 (2003).

K. Mizoguchi, T. Yamabe, H. Sakamoto, L. Damjanovic, and V. I. Srdanov: Electronic states of alkali-electro-sodalite under pressure, Synth. Met. **137**, 909-910 (2003).

M. Hiraoka, H. Sakamoto, K. Mizoguchi, and R. Kato: Evidence for spin solitons in spin-Peierls system (DMe-DCNQI)2Li, Synth. Met. **135-136**, 649-650 (2003).

Y. Maniwa, H. Kataura, K. Matsuda and Y. Okabe: A one-dimensional Ising model for C₇₀ molecular ordering in C₇₀-peapods: New J. Phys. **5** (2003) 127.1-5.

H. Kataura, Y. Maniwa, T. Kodama, K. Kikuchi, S. Suzuki, Y. Achiba, K. Sugiura, S. Okubo, and K. Tsukagoshi: One-dimensional System in Carbon Nanotubes: AIP Conf. Proc. **685** (2003) 349-352.

M. Abe, H. Kataura, H. Kira, T. Kodama, S. Suzuki, Y. Achiba, K. Kato, M. Takata, A. Fujiwara, K. Matsuda and Y. Maniwa: Structural Transformation from Single-wall to Double-wall Carbon Nanotube Bundles: Phys. Rev. **B68** (2003) 041405R1-4.

A. Fujiwara, Y. Matsuoka, N. Ogawa, K. Miyano, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki, Y. Achiba: Temperature Dependence of Photoconductivity of Single-Wall Carbon Nanotube Films: AIP Conf. Proc. **685** (2003) 156-159.

A. Fujiwara, Y. Matsuoka, H. Suematsu, N. Ogawa, K. Miyano, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki, Y. Achiba: Photoconductivity of single-wall carbon nanotube films: Carbon **42** (2004) 919-922.

K. Matsuda, Y. Kohori, T. Kohara, H. Amitsuka, K. Kuwahara, and T. Matsumoto: The appearance of homogeneous antiferromagnetism in URu₂Si₂ under high pressure: a ²⁹Si nuclear magnetic resonance study: J. Phys.: Condens. Matter **15** (2003) 2363-2373.

2) 学会講演

日本物理学会 第58回年次大会 2003年3月28日～3月31日 (東北大学)

塩原尚史、平岡牧、佐藤秀一、竹井正人、坂本浩一、溝口憲治：DNAのESR。

佐藤秀一、坂本浩一、溝口憲治、盛岡弘幸、木村恒久、増淵伸一、加藤立久、古川貢：ESRによるPolypyrrolの異方性。

竹井正人、溝口憲治、坂本浩一、徳本圓、川本徹、A.Omerzu、D. Mihailovic：TDAE-C60の強磁性に対する一軸圧効果。

平岡牧、坂本浩一、溝口憲治、加藤立久、古川貢、加藤礼三、開康一、高橋利宏：DMe-DCNQI系の電子状態。

坂本浩一、溝口憲治、長谷川達生：(BEDO-TTF)(Cl₂TCNQ)の圧力下ESR II。

阿部真利、片浦弘道、鈴木信三、阿知波洋次、吉良弘、宇高彰子、神島謙二、松田和之、真庭豊：SWNT内に形成されるアイスナノチューブの構造。

宇高彰子、阿部真利、吉良弘、神島謙二、松田和之、真庭豊、片浦弘道、鈴木信三、阿知波洋次：KをドーピングしたカーボンナノチューブのX線回折。

片浦弘道、阿部真利、真庭豊、大窪清吾、鈴木信三、阿知波洋次：分子内包ナノチューブのラマン散乱。

松岡亨卓、藤原明比古、小川直毅、宮野健次郎、片浦弘道、真庭豊、鈴木信三、阿知波洋次：単層カーボンナノチューブの光伝導温度依存性。

松田和之、坂本浩一、真庭豊、清遠純一、福岡宏、山中昭司: シリコンクラスレート化合物 $\text{Ba}_8\text{Si}_{46-x}\text{Ge}_x$ の NMR.

神島謙二、吉良弘、真庭豊: 遷移金属をドーブしたゼオライトの磁性.

吉良弘、阿部真利、森川雅則、松田和之、真庭豊、藤秀樹、門野良典、髭元亘、村上洋一: μ SR によるアルカリ金属を吸蔵した zeolite LTA の磁性研究 II.

松田和之: URu_2Si_2 における NMR (シンポジウム講演).

日本物理学会 2003 年秋の分科会 2003 年 9 月 20 日 ~ 9 月 23 日 (岡山大学)

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: $(\text{DMe-DCNQI})_2\text{M}$ ($\text{M}=\text{Li}, \text{Ag}$) の EPR .

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

坂本浩一、小川将、塩原尚史、溝口憲治 : DNA の ESR II .

吉良弘、藤秀樹、真庭豊: アルカリ金属を吸蔵した zeolite LTA の NMR.

松岡亨卓、藤原明比古、小川直毅、宮野健次郎、片浦弘道、真庭豊、鈴木信三、阿知波洋次: 単層カーボンナノチューブ薄膜の光伝導による輸送特性評価.

宇高彰子、小笠原俊介、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: 酸素を吸蔵したカーボンナノチューブの X 線回折.

松田和之、真庭豊、片浦弘道、鈴木信三、阿知波洋次: 単層カーボンナノチューブに吸蔵された水の NMR.

真庭豊: ナノチューブ空洞内の液体の構造と相転移 (シンポジウム講演).

第 25 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム 2003 年 7 月 23 日 ~ 7 月 25 日

(淡路夢舞台国際会議場)

松岡 亨卓、藤原 明比古、小川 直毅、宮野 健次郎、片浦 弘道、真庭 豊、鈴木 信三、阿知波 洋次: 光伝導から見た半導体カーボンナノチューブの伝導特性

宇高彰子、阿部真利、吉良弘、神島謙二、松田和之、真庭豊、片浦弘道、鈴木信三、阿知波洋次: 酸素をドーブしたカーボンナノチューブの X 線回折

真庭豊、井上壮太郎、片浦弘道、阿部真利、松田和之、吉良弘、児玉健、阿知波洋次、藤原明比古: SWNT 内フラーレン C_{70} 分子のダイナミクス

片浦弘道、真庭豊、児玉健、菊地耕一、鈴木信三、阿知波洋次: ナノチューブのラマン散乱、孤立、束、そして分子内包

第 26 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム 2004 年 1 月 7 日 ~ 1 月 9 日

(岡崎コンファレンスセンター)

宇高彰子、小笠原俊介、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: 酸素をドーブしたカーボンナノチューブの X 線回折

国際会議

International Conference on Magnetism (ICM2003), Rome, Italy, July 27 - August 8, 2003

K. Mizoguchi, M. Takei, M. Machino, H. Sakamoto, M. Tokumoto, T. Kawamoto, A. Omerzu, and D. Mihailovic: Magnetism of α - and β -TDAE-C₆₀. (Oral talk)

K. Mizoguchi, M. Hiraoka, H. Sakamoto, T. Kato, and R. Kato: Fractionally charged soliton transport in the insulating state of (DMe-DCNQI)₂Li.

H. Sakamoto, K. Mizoguchi, and T. Hasegawa: Magnetic studies in mixed stack charge-transfer compound (BEDT-TTF)(ClMeTCNQ).

M. Hiraoka, H. Sakamoto, K. Mizoguchi, T. Kato, K. Furukawa, R. Kato, K. Hiraki, T. Takahashi: Spin soliton dynamics and pressure effects in the spin-Peierls system (DMe-DCNQI)₂M (M=Li, Ag).

International Workshop on Quantum Transport in Synthetic Metals & Quantum Functional Semiconductors, 2003 (QTSM & QFS 2003), Seoul, Korea, November 20 - 22, 2003

K. Mizoguchi: Electronic Properties of DNA with/without Doping Studied by ESR. (Invited talk)

M. Hiraoka, K. Mizoguchi, H. Sakamoto, T. Kato and R. Kato: Fractional charge transport in the insulating state of (DMe-DCNQI)₂M, (M=Li or Ag).

XVIIIth International Winter School on Electronic Properties of Novel Materials (IWEPM2004), Kirchberg, Austria, March 6-13, 2004

Y. Maniwa : Phase transition of confined water inside SWNTs (Invited talk).

3) 学会誌等

真庭 豊、片浦弘道、藤原明比古: 放射光を用いたカーボンナノチューブの構造研究、放射光学会誌 16 巻 (2003) 296-305.

岩佐義宏、真庭豊 : カーボンナノチューブのインターカレーション、パリティ 18 No8 (2003) 25-29.

吉良弘、真庭豊 : 実用 μ SR 講座「ミュオンはどこにいる? サイト問題あれこれ」(III) 磁気秩序相での磁性イオンからの双極子磁場の評価から、めそん No.18 (2003) 9-12.

4) 著書

真庭豊: 「カーボンナノチューブの基礎と応用」斎藤理一郎、篠原久典共編、第 18 章 X 線回折および NMR 実験法、培風館 (2003) 238-257.

電子物性研究室

1. 研究活動の概要

本研究室の研究対象は、大きく、希土類やアクチナイドなどの 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、高圧結晶育成装置などの単結晶育成法を用いて自ら純良単結晶の育成を行い、多くの研究者との共同研究を行っている。後者については、企業等の先端技術で作製されたサンプルを、時間依存伝導現象に着目した特殊な測定技術を用いて研究している。

1) f -電子系強相関伝導物質

我々は、これまで f -電子と伝導電子の強い相関効果に起因する興味深い現象を明らかにするために、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、それらの内、特に充填スクッテルライト構造を持つ化合物 RE_TX_{12} (RE :希土類、 T :遷移金属、 X :P、As、Sb) に注目して純良単結晶の育成を行い、変化に富んだ興味深い振舞を見出している。平成15年度に探索した充填スクッテルライト化合物のうち、典型的なものを取り上げて解説する。

1-1) 特異な超伝導特性を示す重い電子超伝導体 $PrOs_4Sb_{12}$

我々は、純良単結晶を育成し、磁場中比熱、電子輸送測定を行なうとともに、国内外の研究者との、de Haas-van Alphen(dHvA) 効果、中性子散乱、NMR、熱伝導度、光物性、超音波吸収などの測定を進めることにより、磁場誘起秩序相を見出し、超伝導相とあわせて総合相図を決定し、この物質の示す興味深い特性を明らかにしてきた。しかし、この物質はありふれた超伝導体とは異なり、興味深い特性が見出され、多くの研究者により更なる挑戦が行なわれている。

本年度は、その超伝導特性の本質を明らかにするために、以下の実験を進めた。

(a) ミュオンスピン緩和の測定

ゼロ磁場環境下で行うミュオンスピン緩和実験 ($ZF-\mu SR$) は、静的内場発生の有無を調べる上で最も高い感度を持つ実験手法である。KEK 中間子科学研究施設において $PrOs_4Sb_{12}$ の $ZF-\mu SR$ 実験を行い、超伝導転移温度以下で、自発的な静的内部磁場 (1 Gauss 程度の大きさ) の発生の証拠をとらえた。このことは、従来型のものとは決定的に異なる「時間反転対称性を破った」特異な超伝導状態がこの系で発現していることを示している。時間反転対称性の破れた超伝導状態とは、超伝導状態であると同時に、クーパ対が「磁気的にも秩序化した」状態であることを意味する。金属間化合物超伝導体では本系が初めてであり、また超伝導体全体を見渡しても酸化物超伝導体 Sr_2RuO_4 について二例目である。さらに、 f 電子を含まない参照物質 $LaOs_4Sb_{12}$ の超伝導転移では、内場発生がないことを実験精度内で確認し、上記の異常な超伝導が f 電子に起因していることを明らかにした。

(b) フラックスフロー抵抗測定

第二種超伝導体に流す電流を増加してゆくと、臨界磁場以下でも電圧が現れる。渦糸のピン止め力にマグナス力が打ち勝って渦糸が動き出すことにより抵抗が発生するためであり、フラックスフロー (磁束流) 抵抗と呼ばれる。 $PrOs_4Sb_{12}$ では、磁場中熱伝導度の測定において2回および4回対称の磁場角度依存性を見出され、超伝導ギャップの異方性の異なる二つの超伝導相の可能性が提案されている。フラックスフロー抵抗は磁束格子パターンを始めとする超伝導特性を反映する可能性があるため、有効な測定となりうる。測定の結果、我々は抵抗の磁場依存性に二段の抵抗の極小を見出した。これまでも、多くの超伝導体でピーク効果に対応する抵抗極小が報告されているが、二段のピーク効果はこれまでに初めての発見であり、この物質の超伝導状態の異常性の一つの証拠と考えられる。さらにピン止め力の角度依存性を磁気抵抗測定及び電流 - 電圧特性から決定したところ、電流を [100] 方向に流した場合、4

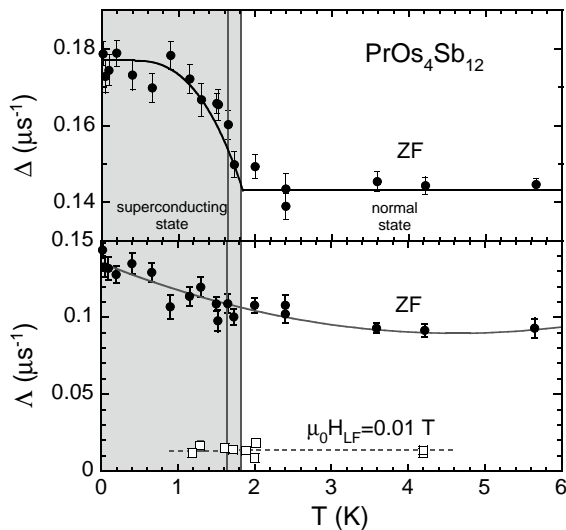


図 1: 静的内部磁場の分布巾を表す量 Δ (久保-鳥谷部関数に含まれるパラメタ) と動的に揺らぐ内場を特徴づける量 Λ の温度依存。超伝導相における Δ の増大は、自発的内場発生証拠である。

回対称性を示した。磁場・温度は熱伝導度測定で 4 回対称性が見出された領域に一致しており、その機構について検討を進めている。

(c) Pr サイトの La 置換による超伝導特性の評価

PrOs₄Sb₁₂ の示す異常な超伝導の発現機構解明には Pr イオンの結晶場基底状態や Pr イオン間の相互作用についての知見を得ることが重要である。Pr イオンサイトの一部を La イオンで置換し、Pr イオン間の距離が Pr 単一サイトの物性や超伝導特性にどのように影響するかを調べるため、Pr_xLa_{1-x}Os₄Sb₁₂ 系の単結晶を作成し、電気抵抗、磁化、比熱等の測定を行った。その結果、 $x = 0.8$ ではほとんど T_c に変化がなく、それ以上の La 置換により T_c は単調に減少し、LaOs₄Sb₁₂ の T_c に近づくのに対し、 T_c での比熱の飛び $\Delta C/T_c$ は $x = 0.4$ 以上で 1 桁以上も減少することが明らかとなった。このことから、PrOs₄Sb₁₂ の示す異常な超伝導状態には Pr イオン間の相互作用が重要であると考えられる。

1-2) CeOs₄Sb₁₂ の電子輸送特性-基底状態は？

この物質の電気抵抗は約 100K 以下から降温とともに増加するため、近藤半導体と考えられた。一方、その温度依存性が $\exp((T^*/T)^{1/2})$ に比例することから、variable range hopping モデルに基づいた理解をする提案もなされている。しかし、抵抗測定のみで電気伝導を理解するのは不十分であるので、比抵抗とホール効果の磁場・温度依存性の系統的な測定を行なった。その結果、温度降下とともに約 30K 以下で比抵抗、ホール係数は各々 $T^{-1/2}$ 、 T^{-1} で増加する特徴的な振舞いを見出した。更に、低温領域で、磁場印加により比抵抗、ホール係数ともに劇的に減少することを見出した。

1-3) SmFe₄P₁₂ の dHvA 効果と磁気抵抗

最近、武田、石川により SmFe₄P₁₂ が強磁性転移温度 1.6K、電子比熱係数 $\gamma = 370 \text{ mJ/K}^2\text{mol}$ の Sm をもとにした初めての重い電子系強磁性体であると報告された。我々はこの物質においても Sb フラックス法により、残留抵抗比が約 400 の純良単結晶の育成に成功し、dHvA 効果及び磁気抵抗の測定を行なった。dHvA 効果で観測されたブランチのフェルミ面は 4f 電子を持たない比較物質 LaFe₄P₁₂ のものと類似していることは、SmFe₄P₁₂ の 4f 電子は基本的には局在していることを示唆する。一方、横磁気抵抗の測定からは広い角度範囲で磁気抵抗は飽和傾向にあることは開軌道のない補償金属であることを示唆しており、dHvA 効果の結果と矛盾する。しかし、dHvA 効果から見積もられた SmFe₄P₁₂

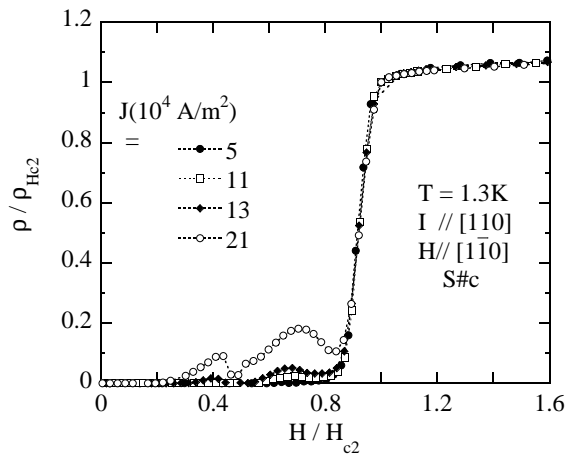


図 2: PrOs₄Sb₁₂ の比抵抗の磁場依存性。磁場増加に伴い、抵抗は通常の超伝導体のように単調に H_{c2} 近傍で 0 から常伝導状態の値に増加するのではなく、ピン止め力の増加を反映して、二つの磁場で抵抗値が極小を示す。

の質量増強と大きな電子比熱を考慮すると、観測されていない重い有効質量を持つフェルミ面が存在していると考えるのが自然であり、今後さらにこの物質の電子状態を明らかにするため、光電子分光など他の実験が必要である。

1-4) SmOs₄Sb₁₂ の結晶育成と基礎物性測定

SmOs₄Sb₁₂ の物性測定にかなう単結晶育成に初めて成功し、電気抵抗、磁化率、比熱の測定を行った。その結果、この物質が電気抵抗の測定から SmFe₄P₁₂ で見られるような近藤効果的な振る舞いや、電子比熱係数が約 800 mJ/K²mol の重い電子系物質であることを初めて明らかにした。今後、より大型・良質単結晶の育成を進め、この物質の磁気的な基底状態や電子状態を調べる予定である。

(以上のテーマは本学の中性子散乱物性研究室、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、播磨助教授、物性研・榊原研究室、松田研究室、上床研究室、後藤研究室、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、高畠研究室、世良研究室、岡山大・小林研、イリノイ大・E.E.M. Chia 博士、M.B. Salamon 教授、フロリダ大・B. Andraka 教授との共同研究である。)

2) 微細磁性体の電気伝導

電子の二特性のうち、電荷は伝導現象に、スピンは磁性にのみ現れ、伝導にスピンの直接顔を出すことはなかったが、最先端の微細加工技術を利用して、電子がスピン情報を保持する長さに比較して十分微細な構造を持つ磁性体や超伝導体の組み合わせを作製出来るようになり、スピンの電荷と共に主役を務める現象が観測されるようになった。本年度は、特に微小トンネル磁気抵抗 (TMR) 素子及びスピンプルブ型 CPP 素子の時間依存伝導現象に着目して研究を進めた。

二つの強磁性体金属・合金の間に絶縁体極薄膜を置くと、二つの電極間の伝導は電子のトンネル効果によって行われる。この場合、二つの強磁性層の磁化が平行か反平行かにより、トンネル電流が大きく変化し、スピン依存トンネル効果と呼ばれている。一方、CPP 素子は非磁性の金属薄膜を絶縁体薄膜の代わりに用いたもので、通常のスピンプルブ素子が電流 (Current) を薄膜層 (Plane) に平行 (Plane) に流すのに対し、垂直 (Perpendicular) に流すことからこの名が付けられた。両素子とも、ハードディスクの磁気記録の更なる高密度化に不可欠な次世代の磁気記録読み取りヘッドとして、大きな期待が掛けられ、精力的に研究が進められている。我々は、物理的に新しい現象の探索を目指して、微小サイズ ($\sim \mu\text{m}^2$ 程度または以下) の両素子のノイズ特性に着目して測定を進めた。測定された ~ 5 kHz までの周波数領域では、両素子とも二準位間 (Two level fluctuator: TLF) ノイズと $1/f$ ノイズが優勢である。前者は、通常の試料では基本的な問題とはなり得ず、後者の機構の解明が不可欠である。詳しいノイズスペクトルとトンネル磁気抵抗を同時測定することにより、微細な強磁性体ドメインの揺らぎがトンネルMRを通して現れていることが分かった。(このテーマは、NEC、富士通、SRC からの試料提供、支援を受けて研究が進められた。)

2. 研究業績

1) 論文

M. Kohgi, K. Iwasa, M. Nakajima, N. Metoki, S. Araki, N. Bernhoeft, J-M. Mignot, A. Gukasov, H. Sato, Y. Aoki and H. Sugawara: Evidence for Magnetic-field-induced Ordering in the Heavy Fermion Superconductor PrOs₄Sb₁₂, J. Phys. Soc. Jpn. **72**(2003) 1002-1005.

A. Amato, B. Roessli, P. Fischer, N. Bernhoeft, A. Stunault, C. Baines, A. Donni and H. Sugawara: Magnetic Fluctuations and Superconductivity in YbPd₂Sn, Physica B **326** (2003) 369-373.

- H. Sugawara, S. Osaki, E. Kuramochi, M. Kobayashi, S.R. Saha, T. Namiki, Y. Aoki and H. Sato: High Field Magnetoresistance in Heavy Fermion Superconductor $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$, *Physica B* **329-333** (2003) 551-552.
- M. Kobayashi, S.R. Saha, H. Sugawara, T. Namiki, Y. Aoki and H. Sato: Pressure Effect on the Transport Properties in Heavy-fermion Semimetal $\text{CeRu}_4\text{Sb}_{12}$, *Physica B* **329-333** (2003) 605-606.
- S.R. Saha, H. Sugawara, Y. Aoki, H. Sato, T.D. Matsuda, Y. Haga, E. Yamamoto and Y. Onuki: Transport Properties in UCoAl under Uniaxial Pressure, *Physica B* **329-333** (2003) 530-531.
- Y. Aoki, T. Namiki, S. Ohsaki, S.R. Saha, H. Sugawara and H. Sato: Specific Heat Study on the Anomalous Normal State of Heavy-fermion Superconductor $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$, *Physica C* **388-389** (2003) 557-558.
- T. Namiki, Y. Aoki, T.D. Matsuda, H. Sugawara and H. Sato: Magnetic Anisotropy of Heavy Fermion State in $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$, *Physica B* **329-333** (2003) 462-463.
- M. Hedo, Y. Uwatoko, H. Sugawara and H. Sato: Pressure Effect on the Electrical Resistivity of the Filled Skutterudite Compound $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$, *Physica B* **329-333** (2003) 456-457.
- K. Ishii, T. Inami, Y. Murakami, L. Hao, K. Iwasa, M. Kohgi, Y. Aoki, H. Sugawara, H. Sato, S. Imada, H. Nakao, H. Sawa and Y. Wakabayashi: Resonant X-ray Study on the Filled Skutterudite $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$, *Physica B* **329-333** (2003) 467-468.
- S. Tsutsui, K. Kuzushita, T. Tazaki, S. Morimoto, S. Nasu, T.D. Matsuda, H. Sugawara and H. Sato: ^{57}Fe Mossbauer Spectroscopic Study of $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$, *Physica B* **329-333** (2003) 469-470.
- T. Kumagai, Y. Nakanishi, H. Sugawara, H. Sato and M. Yoshizawa: Elastic Properties of $\text{ReRu}_4\text{Sb}_{12}$ (Re;La,Pr), *Physica B* **329-333** (2003) 471-473.
- T. Sakakibara, T. Tayama, T. Onimaru, D. Aoki, Y. Onuki, H. Sugawara, Y. Aoki and H. Sato: Quadrupole Ordering and Multipole Interactions in Pr-based Compounds, *J. Phys: Condens. Mater.* **15** (2003) S2055-S2061.
- H Sato, H Sugawara, T Namiki, S R Saha, S Osaki, T Kanayama, M Kobayashi, T. D Matsuda, Y Aoki, R Settai, Y Inada and Y Onuki: Exotic Behaviors in the Pr-based Filled Skutterudites, *J. Phys: Condens. Mater.* **15** (2003) S2063-S2070.
- S.R. Saha, H. Sugawara, T. Namiki, Y. Aoki and H. Sato: Transport Properties on Metal-insulator Transition of $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ Single Crystal, *J. Phys: Condens. Mater.* **15** (2003) S2163-S2166.
- T. Tayama, T. Sakakibara, H. Sugawara, Y. Aoki and H. Sato: Magnetic Phase Diagram of the Heavy Fermion Superconductor $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$, *J. Phys. Soc. Jpn.* **72** (2003) 1516-1522.
- M. Yogi, H. Kotegawa, Y. Imamura, G. -q. Zheng, Y. Kitaoka, H. Sugawara, and H. Sato: Sb-NQR Probe for Superconducting Properties in the Pr-based Filled-skutterudite Compound $\text{PrRu}_4\text{Sb}_{12}$, *Phys. Rev. B* **67** (2003) 180501.

Y. Aoki, A. Tsuchiya, T. Kanayama, S.R. Saha, H. Sugawara, H. Sato, W. Higemoto, A. Koda, K. Ohishi, K. Nishiyama, and R. Kadono: Time-reversal Symmetry-breaking Superconductivity in Heavy Fermion $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ Detected by Muon Spin Relaxation, *Phys. Rev. Lett.* **91** (2003) 067003.

H. Shiozawa, T. Miyahara, K. Obu, Y. Takayama, H. Ishii, T.D. Matsuda, H. Sugawara, H. Sato, T. Muro and Y. Saitoh: Local Magnetic Susceptibility in Rare-Earth Compounds, *J. Phys. Soc. Jpn.* **72** (2003) 2079-2084.

M. Matsunami, H. Okamura, T. Nanba, H. Sugawara and H. Sato: Gap Formation in the Filled Skutterudite $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$, *J. Phys. Soc. Jpn.* **72** (2003) 2722-2725.

E.M. Chia, M.B. Salomon, H. Sugawara and H. Sato: Probing the Superconducting Gap Symmetry $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$: A Penetration Depth Study, *Phys. Rev. Lett.* **91** (2003) 247003.

C.R. Rotundu, H. Tsujii, Y. Takano, B. Andraka, H. Sugawara, Y. Aoki and H. Sato: High Magnetic Field Phase Diagram of $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$, *Phys. Rev. Lett.* **92** (2004) 037203.

R. Shiina and Y. Aoki: Theory of Field-Induced Phase Transition in $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$, *J. Phys. Soc. Jpn.* **73** (2004) 541-544.

Y. Nakanishi, T. Kumagai, M. Yoshizawa, H. Sugawara and H. Sato: High Magnetic Field Phase Diagram of $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$, *Phys. Rev. B* **69** (2004) 064409.

2) 学会講演

日本物理学会第 58 回年次大会 2003 年 3 月 28 日 ~ 31 日 (東北大学川内キャンパス)

横田真太郎、菅原 仁、青木勇二、佐藤英行、中積誠、小野一修、喜多英治: Fe/MgF_2 多層膜のホール効果と磁気抵抗.

永井肇、碓垂矢子、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 素子のノイズ特性 II.

碓垂矢子、永井肇、青木勇二、菅原 仁、佐藤英行、松田和博、上條敦、柘植久尚: 強磁性トンネル接合におけるノイズ強度の磁場依存性 II.

山本一成、荻田典男、宇田川眞行、菅原 仁、青木勇二、佐藤英行: 充填スクッテルダイト化合物 $\text{RFe}_4\text{P}_{12}$ ($\text{R}=\text{La}$, Ce , Pr , Nd) のラマン散乱 II.

小林未希、S.R.Saha、大崎舟司、並木孝洋、菅原 仁、青木勇二、佐藤英行: $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ の磁気抵抗の異方性.

土屋明久、青木勇二、並木孝洋、金山友幸、菅原 仁、佐藤英行、関根ちひろ、城谷一民: $\text{PrOs}_4\text{As}_{12}$ の磁場中比熱.

山崎篤志、関山明、恒川雅典、今田真、C. Dallera、L. Braicovich、T.-L. Lee、大崎舟司、菅原 仁、佐藤英行、摂待力生、大貫惇睦、播磨尚朝、菅滋正: 重い電子系 Pr 化合物の高エネルギー X 線内殻光電子分光.

高山泰弘、吉田徹夫、岡村健司、大坪英雄、塩澤秀次、石井広義、宮原恒あき、菅原 仁: Gd/Co 多層膜の内殻励起発光 MCD 測定.

栗田伸之、小林未希、辺土正人、菅原 仁、佐藤英行、上床美也: 高压下での $\text{CeRu}_4\text{Sb}_{12}$ の電気抵抗測定.

與儀護、小手川恒、今村洋寿、鄭国慶、北岡良雄、大崎舟司、菅原 仁、佐藤英行: $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$ の Sb-NQR による研究.

菅原 仁、倉持英一、松田達磨、並木孝洋、青木勇二、佐藤英行: $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ における磁気抵抗の異方性.

熊谷智之、中西良樹、吉澤正人、金山友幸、青木勇二、菅原 仁、佐藤英行: $\text{Pr}_x\text{La}_{1-x}\text{Fe}_4\text{P}_{12}$ の弾性特性.

S.R. Saha、菅原 仁、並木孝洋、青木勇二、佐藤英行: Transport and magnetic properties on metal-insulator transition of filled skutterudite $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ single crystal.

Hao Lijie、岩佐和晃、桑原慶太郎、神木正史、菅原 仁、青木勇二、佐藤英行、関根ちひろ、李哲虎、播磨尚朝: X 線回折による $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ の金属-非金属転移における構造相転移の研究.

中西良樹、熊谷智之、吉澤正人、S.R.Saha、菅原 仁、佐藤英行: $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ の弾性特性と Pr の結晶場基底状態.

並木孝洋、青木勇二、金山友幸、S. R. Saha、菅原 仁、佐藤英行: 単結晶 $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ の磁場中比熱測定: 異常な低温熱励起.

田山孝、榊原俊郎、菅原 仁、青木勇二、佐藤英行: $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ の磁気相図.

岩佐和晃、中島基樹、神木正史、荒木新吾、金子耕土、目時直人、N. Bernhoeft、菅原 仁、青木勇二、佐藤英行: 中性子散乱による $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ における磁場誘起反強四重極秩序の研究.

青木勇二、髭本亘、土屋明久、金山友幸、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 μSR による観測.

日本物理学会秋季大会 2003 年 9 月 20 日 ~ 23 日 (岡山大学)

以下 4 件: 領域 8 シンポジウム「スクッテルダイトの新しい物性 ($\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ の超伝導を中心として)」

佐藤英行、菅原 仁、青木勇二: はじめに (シンポジウム講演).

田山孝、榊原俊郎、菅原 仁、青木勇二、佐藤英行: $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ の低温磁化 (シンポジウム講演).

後藤輝孝、根本祐一、坂井一浩、山口 隆、赤津光洋、柳澤達也、間 広文、大貫佳、菅原仁、佐藤英行: $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ の四重極子感受率と超伝導 (シンポジウム講演).

青木勇二、髭本亘、土屋明久、金山友幸、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: μSR から見た $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ の超伝導状態—時間反転対称性の破れの証拠—(シンポジウム講演).

S. R. Saha, Y. Aoki, A. Tsuchiya, T. Namiki, H. Sugawara, H. Sato Specific heat study on a $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ single crystal.

岩佐和晃、Hao Lijie、桑原慶太郎、神木正史、S. R. Saha、菅原 仁、青木勇二、佐藤英行: 金属-非金属転移系 $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ の磁気励起から見た 4f 電子状態の特異な変化

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: 軌道秩序を示すスクッテルダイト化合物 $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ の磁気状態.

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

今田 真、山崎篤志、関山 明、菅滋 正、菅原 仁、松田達磨、佐藤英行、播磨尚朝: $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ の光電子スペクトルの温度依存性.

石井賢司、稲見俊哉、村上洋一、Hao Lijie、岩佐和晃、神木正史、青木勇二、菅原 仁、佐藤英行、今田 真、中尾裕則、若林裕助、澤 博: 共鳴 X 線散乱による $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ の異常秩序相の研究.

土屋明久、青木勇二、並木孝洋、菅原 仁、佐藤英行: 重い電子系 $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ の磁場中比熱測定.

桑原慶太郎、岩佐和晃、神木正史、金子耕土、荒木新吾、目時直人、菅原 仁、青木勇二、佐藤英行: $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ の非弾性中性子散乱.

與儀 護、小手川恒、今村洋寿、鄭国 慶、北岡良雄、菅原 仁、青木勇二、佐藤英行: $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ 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: $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ のラットリング、四重極子揺らぎと超伝導.

小林未希、菅原 仁、S.R.Saha、並木孝洋、藤原英泰、青木勇二、佐藤英行: $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ のフラックスフロー抵抗.

菊地大輔、小林未希、菅原 仁、青木勇二、佐藤英行、摂待力生、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.

津田俊輔、横谷尚睦、辛 埴、菅原 仁、佐藤英行: スクッテルダイト超伝導体 $\text{LaRu}_4\text{P}_{12}$ の高分解能光電子分光.

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

中西良樹、熊谷智之、及川雅史、吉澤正人、並木孝洋、菅原 仁、佐藤英行: $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$ の弾性特性と Ce 基底状態.

中西良樹、熊谷智之、及川雅史、吉澤正人、青木勇二、菅原 仁、佐藤英行: $\text{ReOs}_4\text{Sb}_{12}$ の弾性特性と Re の基底状態.

坂井一浩、大貫 佳、山口 隆、根本祐一、後藤輝孝、菅原 仁、佐藤英行: 重い電子超伝導体 $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ の四重極子効果とラットリング.

今村洋寿、小手川恒、與儀 護、鄭国 慶、北岡良雄、菅原 仁、青木勇二、佐藤英行: $\text{Pr}_{0.95}\text{La}_{0.05}\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$ の Sb-NQR による超伝導の研究.

今村洋寿、小手川恒、與儀 護、鄭国 慶、北岡良雄、菅原 仁、佐藤英行: $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ の ^{31}P -NMR による研究.

安東郁真、田畑金士、小林達生、日高宏之、播磨尚朝、菅原 仁、佐藤英行: $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ の圧力下電気抵抗率測定.

日高宏之、安東郁真、田畑金士、小林達生、播磨尚朝、菅原 仁、小林未希、佐藤英行: $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ の高圧下磁化測定.

熊谷智之、中西良樹、及川雅史、吉澤正人、金山友幸、青木勇二、菅原 仁、佐藤英行: $\text{Pr}_x\text{La}_{1-x}\text{Fe}_4\text{P}_{12}$ の弾性定数と Pr の結晶場基底状態.

名越千代子、菅原 仁、神木正史、鬼丸孝博、森江孝明、榊原俊郎: $\text{Ce}_3\text{Ir}_4\text{Sn}_{13}$ の磁化測定と X 線回折測定による超周期構造の研究.

坂井正樹、横田真太郎、青木勇二、菅原 仁、佐藤英行: 強磁性トンネル接合におけるノイズ強度の磁場依存性.

横田真太郎、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依存性.

塩澤秀次、宮原恒あき、中村聡、大坪英雄、高山泰弘、石井広義、菅原 仁、佐藤英行、中村哲也、室隆桂之、斎藤祐児: 希土類価数揺動物質の局所帯磁率.

第 27 回 日本応用磁気学会 学術講演会 2003 年 9 月 16 日 ~19 日 (大阪大学)

青木勇二、菅原仁、佐藤英行: 充填スクッテルダイトにおける強相関電子と熱電効果 (シンポジウム「磁気物性に基ついた熱電現象」).

特定領域研究「充填スクッテルダイト構造に創出する新しい量子多電子状態の展開」第一回研究会 2003 年 11 月 27 日 ~29 日 (都立大学)

佐藤英行: はじめに

菅原仁: 充填スクッテルダイト化合物の純良単結晶育成の現状と今後の計画

青木勇二: $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ の重い電子超伝導と μSR による研究

小林未希: $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ のフラックスフロー抵抗

土屋明久: 重い電子系 $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ の比熱

菊池大輔: $\text{SmFe}_4\text{P}_{12}$ のドハース・ファンアルフェン効果

国際会議

International Conference on Magnetism (ICM2003), Rome Italy, July 27-August 1, 2003

M. Matsunami, H. Okamura, T. Nanba, H. Sugawara and H. Sato: Optical Properties of the Filled Skutterudites $\text{CeT}_4\text{Sb}_{12}$ (T=Fe,Ru,Os).

M. Yogi, H. Kotegawa, Y. Imamura, G. -q. Zheng, Y. Kitaoka, S. Ohsaki, H. Sugawara and H. Sato: Sb-NQR Study of the Filled Skutterudites $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$.

P. Giudicelli, B. Roessli, A. Stunault, J. Ollivier, A. Donni, A. Amato, P. Fischer, H. Sugawara and N. Bernhoeft: Eutic of Low Energy Magnetic Excitations in Superconducting YbSnPd₂.

Y. Nakanishi, T. Kumagai, S.R. Saha, H. Sugawara, H. Sato and M. Yoshizawa: Elastic Behaviour Around Metal-insulator Transition in PrRu₄P₁₂.

M Kobayashi, H. Sugawara, S. R. Saha, T. Namiki, S. Osaki, W. Abe, Y. Aoki and H. Sato: Flux-flow Resistivity in the Heavy Fermion Superconductor PrOs₄Sb₁₂.

T. Tayama, T. Sakakibara, H. Sugawara, Y. Aoki and H. Sato: Magnetization Study of the Heavy Fermion Superconductor PrOs₄Sb₁₂.

T. Kumagai, Y. Nakanishi, T. Kanayama, Y. Aoki, H. Sugawara, H. Sato and M. Yoshizawa: Elastic Behaviour and 4f Ground State of Pr Ions in Pr_xLa_{1-x}Fe₄P₁₂.

K. Izawa, Y. Nakajima, J. Goryo, Y. Matsuda, S. Osaki, H. Sugawara, H. Sato, P. Talmeier and K. Maki: Observation of a Symmetry Change in the Gap Function in Heavy-fermion Superconductor PrOs₄Sb₁₂.

C.R. Rotundu, H. Tsujii, Y. Takano, B. Andraka, H. Sugawara and H. Sato: Calorimetric Study of PrOs₄Sb₁₂ at Low and High Magnetic Fields.

N. Kurita, M. Hedo, Y. Uwatoko, M. Kobayashi, H. Sugawara, H. Sato and N. Mori : Pressure-dependent Electrical Resistivity of the Filled Skutterudite compound CeRu₄Sb₁₂.

H. Sugawara, M. Kobayashi, E. Kuramochi, S. Osaki, S. R. Saha, T. Namiki, Y. Aoki and H. Sato: High Field Magnetoresistance in CeOs₄Sb₁₂.

N. Metoki, S. Araki, M. Kohgi, K. Iwasa, M. Nakajima, N. Bernhoeft, J-M. Mignot, A. Gukasov, H. Sato, Y. Aoki and H. Sugawara: Neutron Scattering Study on Field Induced Antiferro-quadrupolar Ordering in the Heavy Fermion Superconductor PrOs₄Sb₁₂.

L. Hao, K. Iwasa, K. Kuwahara, M. Kohgi, S.R. Saha, H. Sugawara, Y. Aoki, H. Sato, C. Sekine, C.H. Lee, and H. Harima: Crystal-lattice Modulation of the Metal-insulator Transition System PrRu₄P₁₂ Studied by X-ray Diffraction.

S. R. Saha, H. Sugawara, T. Namiki, M. Kobayashi, W. Abe, Y. Aoki and H. Sato: Anomalous Physical Properties in Filled Skutterudite PrRu₄P₁₂ Single Crystal.

K. Ishii, T. Inami, Y. Murakami, L. Hao, K. Iwasa, M. Kohgi, Y. Aoki, H. Sugawara, H. Sato, S. Imada, H. Nakao, Y. Wakabayashi and H. Sawa: Resonant X-ray Scattering Study on the Filled Skutterudite PrFe₄P₁₂.

3) 学会誌等

青木勇二、菅原仁、佐藤英行：充填スクッテルダイト化合物で見いだされた特異な磁性と超伝導. 日本応用磁気学会誌 **27** (2003) 877-883.

4) 科学研究費等報告

佐藤英行：平成 12 ～ 14 年度科学研究費補助金（基盤研究 (B)(2)）成果報告書「充填スクッテルダイト化合物の異常物性とその一軸圧力による制御」

青木勇二：平成 13 ～ 14 年度科学研究費補助金（基盤研究 (C)(2)）成果報告書「Pr スクッテルダイト化合物における重い電子状態の究明」

中性子散乱物性物理研究室

1. 研究活動の概要

本研究室は、希土類化合物における強相関電子現象を中心に、各種の興味深い新しい現象の研究を、中性子散乱・X線回折を主な手段として行っている。本年度は、中性子散乱による研究に関しては、国内では、日本原子力研究所、KEK 物質構造研究所において約 20 課題の共同利用研究・協力研究あるいは共同開発研究を行い、また、国外では、フランスの LLB 研究所、ヨーロッパ連合の ILL 研究所において計 6 課題の共同研究を行った。中性子散乱以外では、本研究室および物理教室の X 線回折システムを用いた研究を進めるとともに、あらたに、超音波を用いた強相関系物質の弾性特性の研究を開始した。さらに、X 線回折による研究に関しては、KEK 放射光施設において計 3 課題の研究を行うとともに、理研播磨研、原研放射光科学センタ - との共同で、Spring-8 において 2 課題の研究を行なった。以下に、これらの研究により得られた主な成果の概要を述べる。なお、本年度 7 月をもって、本研究室開設当初からの中心的メンバーである、岩佐和晃助手が東北大学理学研究科に転出した。岩佐氏は本研究室の研究業績に多大の貢献をし、またその研究成果が評価されて、日本における中性子散乱研究の拠点の一つである東北大学に助教授として迎えられたものである。本研究室としてはこのことを誇りに思うと同時に、氏の今後の活躍を期待するものである。

1) 希土類化合物における強相関電子現象の研究

a. 充填スクッテルダイト化合物の多彩な電子現象 (岩佐、桑原、神木)

我々は、本物理教室の電子物性研との強い共同のもとに、多彩な強相関電子現象を示す充填スクッテルダイト化合物 RT_4X_{12} ($R=$ 希土類、 $T=Fe, Ru, Os$ 、 $X=P, As, Sb$) の研究を行っている。これまでにすでに、重い電子系 $PrFe_4P_{12}$ において、約 6K 以下の温度で Pr 原子の $4f$ 電子軌道の反強的四重極秩序が生じていること、また、重い電子超伝導体 $PrOs_4Sb_{12}$ については、磁場下で反強的四重極秩序が誘起されることを、X 線回折並びに中性子回折により見いだしている。本年度はさらに、これらの物質を中性子非弾性散乱により研究し、Pr イオン間の四重極相互作用の存在を反映していると思われる特異な低エネルギー - 励起を見いだした。また、これらの磁気励起が、それぞれ、反強四重極秩序温度、あるいは超伝導転移温度前後で大きな温度変化を示すこと明らかにした。以上の実験結果は、これらの物質の重い電子現象あるいは超伝導現象に対して、Pr イオンの四重極自由度が重要な役割を果たしていることをより一層明らかにしている (LLB : J.-M. Mignot, A. Gukasov 氏、原研先端研 : 目時直人氏、CEN-G : S. Raymond 氏, J. Flouquet 氏との共同)。また、金属 - 絶縁体転移を示す $PrRu_4P_{12}$ についても中性子非弾性散乱の研究を行った結果、系が低温の絶縁体状態から高温の金属状態に移り変わるとともに、励起スペクトルが、局在系特有の鋭いピ - クから低エネルギー - へのシフトを伴った巾の広いものに移り変わる現象を発見した。これは、金属 - 絶縁体転移に伴う $4f$ 電子の伝導電子との混成効果の劇的な変化を表すとともに、充填スクッテルダイト化合物における $p - f$ 混成効果の重要性を示すものとして重要である。

b. 少数キャリア - 系 Ce モノプニクタイトの電子状態 (岩佐、桑原、神木)

Ce モノプニクタイト、 CeX ($X=P, As, Sb, Bi$) は、少数キャリアーと f 電子系との相互作用に基づく新しい物理を示す典型的な系である。これまでの多年にわたる研究により、特に CeP について、約 6T 以下の磁場下、および 3GPa 以下の圧力下で、複雑多彩な磁気相図を示すことを明らかにし、これが少数キャリア - 系特有の磁気ポ - ラロンモデルでよく理解できることを明らかにしてきた。現在の研究の目的は、より高圧における磁性の消滅過程 (CeP) および、異常な伝導異常 (CeSb) を中性子散乱およ

びX線回折により研究すること、並びに放射光を用いた磁気ポ - ラロン格子状態の直接的研究である。本年度は、この目的のために、CeP について 3.9GPa までの高圧化の中性子回折の実験を成功させ高圧力下の強磁性磁気モ - メントの減少傾向を明らかにした (原研先端研: 長壁豊隆氏との共同研究)。また、CeSb に関する共鳴X線散乱の研究を行い、磁気秩序相 (AFP 相) における Sb の K 吸収端における共鳴散乱を観測した (東北大/原研: 村上洋一、グー - プとの共同研究)。

c. 高濃度近藤系 $Ce_xLa_{1-x}B_6$ の新しい秩序相 (岩佐、桑原、神木)

CeB₆ は、近藤効果と *f* 電子の多重極相互作用の競合系として知られているが、La 希釈系 $Ce_xLa_{1-x}B_6$ において約 1K 付近で見いだされ IV 相と名付けられた未知の相が、新たな多重極秩序相ではないかとして興味を持たれている。本年度は、一昨年度に引き続き、ILL 研究所にある粉末中性子回折装置 D20 においてより精度の高い実験を行った結果、IV 相における主要な秩序変数が磁気双極子ではないこと、また、約 1K 以下の III 相における磁気構造が、これまでに報告されていたものと異なることを最終的に明らかにした。(PSI: P. Fishcher、ILL: T.C. Hansen、東北大理: 国井 暁、各氏との共同研究)

d. Yb₄As₃ における電荷秩序と重い電子異常および量子スピン現象 (岩佐、神木)

Yb₄As₃ は、希薄なキャリアーが重い電子的異常を示すとともに、電荷秩序により、一次元磁性を示す興味深い系である。これまでの研究により、ゼロ磁場下での一次元量子スピン励起の観測、ならびに、ジャロシンスキ - 守谷 (J-M) 相互作用による、磁場下における量子 sine-Gordon 系形成の直接観察を行ってきたが、J-M 相互作用が働かないと考えられる、スピン鎖と平行な磁場下における中性子非弾性散乱において、理論的に予想された、反強磁性波数 ($q = \pi$) 付近における非整合磁気励起モードを観測することができなかった。本年度は、このことの決着をつけるために、ILL の IN14 分光器において、分解能を最大限発揮できる実験配置を考案して実験を行なった結果、非整合磁気励起モードの存在を示すデータを取得することができた。これにより、Yb₄As₃ における磁性に関しては、一次元量子スピン系モデルでほぼ完全に理解できることになる。(LLB: J.-M. Mignot、ILL: A. Heiss、東北大理: 落合 明、東大物性研: 青木英和、各氏との共同研究)

e. GdB₆ の磁気構造と格子歪み (桑原、神木)

GdB₆ は、近藤効果と *f* 電子の多重極相互作用の競合系として知られている CeB₆ やその他の希土類 6 硼化合物に対する、*f* 電子が軌道の自由度を持たない参照系として興味深い。前年度までの熱外中性子回折の実験により、GdB₆ の低温磁気秩序相は CeB₆、PrB₆ 等でみられる波数ベクトル (1/2, 1/4, 1/4) の反強磁性構造を持つこと、また、X 線回折により同一の波数ベクトルの格子歪みが存在することを明らかにした。今年度は磁場下熱外中性子回折実験を継続して行い、また、放射光を用いた非共鳴 X 線回折において (1/2, 1/4, 1/4) の超格子反射には磁気散乱成分が含まれることを偏光解析により直接確認した。(KEK: 新井正敏、東北大理: 中尾裕則、村上洋一、国井暁、原研: 石井賢司、各氏との共同研究)

f. 重い電子系の量子臨界現象の研究 (門脇)

反強磁性-非磁性境界に位置する遍歴電子系は、T=0 に位置する量子臨界点の性質に起因する臨界現象や非フェルミ液体的な振舞を示すことで、最近興味を持たれている。このような性質を示す Ce-系の重い電子系化合物 CeNi₂Ge₂、CeRu₂Si₂、におけるスピン揺動、磁気構造の研究を行っている。(河原崎修三、田畑吉計 (阪大理)、福原忠、前沢邦彦 (富山県立大工)、B Fak、S Raymond、J Flouquet (CEA-Grenoble) との共同研究)

g. R₃T₄X₁₃ における重い電子異常と磁性 (桑原、岩佐、神木)

R₃T₄X₁₃ (R=希土類, T=Ir, Pt, X=Sn, In) は、3本のR原子の一次元鎖が互いに直交して存在するとともに、各一次元鎖間を結ぶ第2近接R原子が正三角形をなし磁気相互作用がフラストレーションしてい

る興味深い系である。我々はこれまでの研究により、 $\text{Eu}_3\text{Ir}_4\text{Sn}_{13}$ において、60 K以下の温度において、波数ベクトルが $(1/2, 1/2, 0)$ の超格子変調が生ずるとともに、これと同じ波数ベクトルの反強磁性磁気秩序が 10 K 以下で生じていることを明らかにした。本年度は、低温で 2 段の相転移を示すとともに、重い電子異常を示すことが知られている $\text{Ce}_3\text{Ir}_4\text{Sn}_{13}$ について、帯磁率および X 線回折の実験を行った結果、この物質においては、2K でまず非磁性の構造異常を含む転移を示した後、0.6K において反強磁性秩序を示すことがわかった。本年度はさらに、 f 電子に関して参照系である $\text{Gd}_3\text{Ir}_4\text{Sn}_{13}$ を合成し、熱外中性子回折の実験を行なった結果、10 K 以下の温度で波数ベクトルが $(1, 0, 0)$ の反強磁性秩序が生じていることを明らかにした。(電子物性研究室、物性研榊原俊郎、グレル - プとの共同研究)

2) アクチナイド化合物の電子状態

a. 重い電子系強磁性超伝導体 UGe_2 の $5f$ 電子状態 (桑原、神木)

UGe_2 は強磁性相内の低温高圧下で超伝導を示すことから興味が持たれている。これに関して、キュリー温度 T_C 以下の T^* と呼ばれる温度で様々な物理量に異常が観測されており、この異常と超伝導発現機構との関連が議論されている。我々は、これまでの高圧下の中性子回折の実験から、 T^* 以下の温度領域において斜方晶の b 軸と c 軸の格子定数の温度依存性に顕著な異方性が現れることを明らかにし、また、中性子非弾性散乱により T_C 前後で分散のない強い準弾性的磁気励起を観測した。本年度は、引き続き中性子非弾性散乱の実験を行ない、この非弾性散乱が磁化容易軸方向である a -軸方向の磁気揺動のみに起因すること、また、この磁気揺動が T^* 以上の温度で顕著になることを明らかにした。(原研先端基礎研：芳賀芳範、大貫惇睦、各氏との共同研究)

b. 重い電子系 URu_2Si_2 の $5f$ 電子状態 (桑原、神木)

重い電子系化合物 URu_2Si_2 の $5f$ 電子状態を調べるため、偏極中性子散乱によりこの系の磁場誘起磁気モーメントの磁気形状因子測定を継続して行った。今年度は消衰効果の影響をさけるため試料サイズを薄くした単結晶試料での実験を行った。散乱強度の特に大きな幾つかの指数以外は前回の実験結果と一致し、この系の磁気形状因子は他のウラン系と同様に自由ウランイオンの値に非常に近いことがわかった。(北大理：網塚浩氏との共同研究)

3) 幾何学的フラストレーションを示す磁性体の磁気揺動 (門脇)

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 $\text{Y}_{2-x}\text{Bi}_x\text{Ru}_2\text{O}_7$ 、 $\text{R}_2\text{M}_2\text{O}_7$ ($\text{R}=\text{Ho}, \text{Dy}, \text{Tb}, \text{Pr}, \text{Nd}$; $\text{M}=\text{Ti}, \text{Sn}$) のスピン相関、磁気構造を測定し各々の系のフラストレーションの起源を解明している。(松平和之(九州工業大工)、佐藤正俊(名大理)、田畑吉計(阪大理)、阿曾尚文(物性研)との共同研究)

4) 熱外中性子回折装置の開発と運用 (桑原、神木)

Gd 等の熱外中性子をよく吸収する元素を含む物質の磁気構造の研究を行うために、KEK の KENS に設置された熱外中性子回折装置 EXCED の開発と運用に協力している。本年度は、昨年度使用可能とした超伝導磁石システムを用いて、 GdB_6 、 $\text{Gd}_3\text{Ir}_4\text{Sn}_{13}$ の磁場下の磁気散乱を測定し、これらの物質の磁気構造についての情報を得た。(KEK：横尾哲也、新井正敏、東北大理：国井 暁、各氏との共同研究)

2. 研究業績

1) 論文

K. Iwasa, A. Hannan, M. Kohgi and T. Suzuki: Direct observation of the modulation of 4f-electron orbital state by strong p-f mixing effect in CeSb, *Phys. Rev. Lett.*, **88** (2002) 20720-(1-4). (2002 年度 年次報告未収録分)

K. Ishii, T. Inami, Y. Murakami, L. Hao, K. Iwasa, M. Kohgi, Y. Aoki, H. Sugawara, H. Sato, S. Imada, H. Nakao, H. Sawa and Y. Wakabayashi: Resonant X-ray scattering study on the filled skutterudite $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$, *Physica B* **329-333** (2003) 467-468.

K. Iwasa, K. Kuwahara, M. Kohgi, P. Fischer, A. Dönni, T. C. Hansen and S. Kunii: Neutron-diffraction studie of the unusual ordered phases of $\text{Ce}_{0.75}\text{La}_{0.25}\text{B}_6$, *Physica B* **329-333** (2003) 582-583.

M. Kohgi, K. Iwasa, N. Nakajima, N. Metoki, S. Araki, N. Bernhoeft, J.-M. Mignot, J.-M. Mignot, A. Gukasov, H. Sato, Y. Aoki and H. Sugawara: Evidence for magnetic-field-induced quadrupolar ordering in the heavy-fermion superconductor $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **72** (2003) 1002-1005.

M. Kohgi, K. Iwasa, K. Kuwahara, A. Hannan, D. Kawana, Y. Noda, T. Shobu, K. Katsumata, Y. Narumi and 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.

H. Kadowaki, B. Fåk, T. Fukuhara, K. Maezawa, K. Nakajima, M. A. Adams, S. Raymond, and J. Flouquet: Spin fluctuations and non-Fermi-liquid behavior of CeNi_2Ge_2 , *Phys. Rev. B* **68** (2003) 140402-1 - 140402-4.

H. Kadowaki, M. Sato, and S. Kawarazaki: Spin Fluctuation in Heavy Fermion CeRu_2Si_2 , *Phys. Rev. Lett.* **92** (2004) 097204-1 - 097204-4.

K. Watanabe, Y. Uwatoko, Y. Tabata, H. kadowaki, C. Kanadai, T. Taniguchi and S. Kawarazaki: Pressure-Induced Instability of Magnetic Order in Kondo-Lattice System: Neutron Diffraction Study of the Pseudo-Binary Alloy System $\text{Ce}(\text{Ru}_{0.90}\text{Rh}_{0.10})_2(\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y)_2$, *J. Phys. Soc. Jpn.* **72** (2003) 1751-1757.

K. Kamazawa, Y. Tsunoda, H. Kadowaki and K. Kohn: Magnetic neutron scattering measurements on a single crystal of frustrated ZnFe_2O_4 , *Phys. Rev. B* **68** (2003) 024412-1 - 024412-9.

2) 学会講演

日本物理学会第 58 回年次大会 2003 年 3 月 28 日 ~ 3 月 31 日 (東北大学)

佐賀山基, 桑原慶太郎, 神木正史, 中島健次, 西正和, 上床美也, 芳賀芳範, 山本悦嗣, 大貫惇睦: UGe_2 のスピン揺動と格子異常

中島基樹, 岩佐和晃, 神木正史, 益盛健太, 笹川哲也, 高畠敏郎: CeRhAs における逐次相転移と格子定数の温度変化

川名大地, 長壁豊隆, A. Hannan, 岩佐和晃, 神木正史: CeP の高圧下磁気相図

長壁豊隆，川名大地，神木正史，岩佐和晃，北澤英明，芳賀芳範：Ce モノプニクタイトの圧力 - 温度磁気相図

Hao Lijie，岩佐和晃，桑原慶太郎，神木正史，菅原仁，青木勇二，佐藤英行，関根ちひろ，李哲虎，播磨尚朝：X 線回折による PrRu₄P₁₂ の金属 - 非金属転移における構造相転移の研究

岩佐和晃，中島基樹，神木正史，荒木新吾，金子耕司，目時直人，N. Bernhoeft，菅原仁，佐藤英行中性子散乱による PrOs₄Sb₁₂ における磁場誘起反強四重極秩序の研究

日本物理学会 2003 年度秋季大会 2003 年 9 月 20 日～9 月 23 日（岡山大学）

岩佐和晃，Hao Lijie，桑原慶太郎，神木正史，S. R. Saha，菅原仁，青木勇二，佐藤英行：金属 - 非金属転移系 PrRu₄P₁₂ の磁気励起から見た 4f 電子状態の特異な変化

石井賢司，稲見俊哉，村上洋一，Hao Lijie，岩佐和晃，神木正史，青木勇二，菅原仁，佐藤英行，今田真，中尾祐則，若林祐助，澤博：共鳴 X 線散乱による PrFe₄P/12 の異常秩序相の研究

名越千代子，菅原仁，神木正史，鬼丸孝博，森江孝明，榊原俊郎：Ce₃Ir₄Sn₁₃ の磁化測定と X 線回折測定による超周期構造の研究

川名大地，A.Hannan，桑原慶太郎，神木正史，鳴海康雄，田畑吉計，勝又紘一：少数キャリア物質 CeP の高磁場下における長周期構造

山本竜之介，桑原慶太郎，岩佐和晃，神木正史，中尾裕則，石井賢司，村上洋一，國井暁：GdB₆ の磁気構造と格子歪み

神木正史：中性子から見た PrOs₄Sb₁₂ の電子状態（シンポジウム講演）

佐賀山基、桑原慶太郎、神木正史、西正和、中島健治、松田達磨、山本悦嗣、芳賀芳範、大貫惇睦：UGe₂ の異方的スピン揺動

桑原慶太郎，岩佐和晃，神木正史，金子耕士，荒木新吾，目時直人，菅原仁，青木勇二，佐藤英行：PrOs₄Sb₁₂ の非弾性中性子散乱

田端吉計，谷口年史，河原崎修三，鳴海康雄，田中良和，勝又紘一，木村尚次郎，石川哲也，矢崎牧名，神木正史，岩佐和晃：重い電子系 Ce(Ru_{1-x}Rh_x)₂Si₂ における SDW と CDW の共存

松田達磨，芳賀芳範，Andrei Galatnu，池田修悟，宍戸寛明，山田美音子，桑原慶太郎，岩佐和晃，神木正史，伊藤光雄，山本悦嗣，摂待力生，大貫惇睦：新三元ウラン化合物の単結晶育成と磁気特性

特定領域研究会「充填スクッテルダイト構造に創出する新しい量子多電子状態の展開」

2003 年 11 月 27 日～11 月 29 日（都立大学国際交流会館）

桑原慶太郎：PrOs₄Sb₁₂ の磁気励起

岩佐和晃：PrFe₄P₁₂ の重い電子 - 四重極秩序相転移に関する中性子散乱研究

日本中性子科学会第 3 回年会 2003 年 12 月 10 日～12 月 12 日（東海会館）

岩佐和晃，Hao Lijie，桑原慶太郎，神木正史，菅原仁，青木勇二，S. R. Saha，松田達磨，佐藤英行，J. -M. Mignot，A. Gukasov，西正和：PrFe₄P₁₂ と PrRu₄P₁₂ における強相関電子現象の中性子散乱研究

桑原慶太郎, 岩佐和晃, 神木正史, 金子耕士, 荒木新吾, 目時直人, 菅原 仁, 青木勇二, 佐藤英行, S. Raymond, J. Flouquet : 重い電子系超伝導体 $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ の磁気励起

神木正史, 岩佐和晃, J.-M. Mignot, A. Hiess, 青木英和, 落合 明 : Dzyaloshinsky-Moriya 相互作用を持つ一次元 $S = 1/2$ 反強磁性体 Yb_4As_3 の磁気励起

山本竜之介, 桑原慶太郎, 岩佐和晃, 神木正史, 横尾哲也, 新井正敏, 中尾裕則, 石井賢司, 村上洋一, 國井 暁 : GdB_6 の磁気構造と格子歪み

国際会議

International Conference on Magnetism (ICM 2003), Roma, Italy, 27 July - 1 August, 2003

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

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 $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ Studied by X-ray diffraction

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

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

N. Metoki, S. Araki, M. Kohgi, K. Iwasa, N. Nakajima, N. Bernhoeft, J.-M. Mignot, J.-M. Mignot, A. Gukasov, H. Sato, Y. Aoki and H. Sugawara: Neutron scattering study on field-induced antiferro-quadrupolar ordering in the heavy-fermion superconductor $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$

K. Ishii, T. Inami, Y. Murakami, L. Hao, K. Iwasa, M. Kohgi, Y. Aoki, H. Sugawara, H. Sato, S. Imada, H. Nakao, Y. Wakabayashi and H. Sawa: Resonant X-ray scattering study on the filled skutterudite $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$

H. Kadowaki, M. Sato and S. Kawarazaki: Magnetic excitation of the heavy fermion compound CeRu_2Si_2 : description of experimental spectra by the spin fluctuation theory

Conferenve on Polarized Neutrons and Synchrotron X-rays for Magnetism, Venice, Italy, 4-6 August, 2003

M. Kohgi, K. Iwasa, K. Kuwahara, A. Hannan, D. Kawana, Y. Noda, T. Shobu, K. Katsumata, Y. Narumi and Y. Tabata: Studies of unusual magnetic and electronic properties of the low-carrier system CeP by synchrotron X-rays

計算システム研究室

1. 研究活動の概要

2002年度同様、2003年度も引続き国際的な素粒子実験に参加するとともに、CPUデザイン・実装研究も継続させた。素粒子実験はCERNで2007年から開始される計画のATLAS実験である。測定器建設が進められている。我々は、2003年度、ATLAS実験において初段（レベル1）トリガーシステムの開発の中心をにない、システムの核となるVLSIの設計、製作を終了させ、統合システム（スライスシステム）のビームテストを遂行した。

1) ATLAS

CERN研究所で建設されているATLAS実験計画に当研究室も参加し、トリガー用ミュオンエンドキャップチェンバーのトリガーエレクトロニクス回路及び読み出し回路（データ収集系）の設計研究をここ数年来継続して行っている。実験は40MHzで起きる陽子・陽子衝突現象のうちバックグラウンドノイズを除去し物理学事象のみを効率的に抽出し、解析することにより標準模型の中で実験的にその存在が確認されていないヒッグス粒子の探査、B中間子崩壊からのCP非保存の精密測定、トップクォークの物理やさらに4世代目のクォークの存否の確認、標準模型を超えてSUSY、テクニカラーモデルから予想される粒子の探索など多くの物理的解明を意図して企画されている。トリガーミュオンチェンバーは陽子・陽子衝突で派生するさまざまな粒子のうち、ミュオン（ μ ）粒子を観測、同定することを目的として設置される。ミュオン粒子は物理学事象が陽子・陽子衝突によって形成された場合の目安となる特徴的な粒子であり、かつその飛行パターンからそれを特定することは比較的容易になされる。粒子候補の飛跡はミュオンチェンバーで電気信号に変えられ、その信号系列から簡単なパターン認識（レベル1トリガー）を行い、ミュオン粒子同定を行おうとするものである。

前年度までに核となるASICを完成させた我々は、2003年度はそれらを実際システムとしてくみ上げ実際のミュオンビームを使い、それらの飛跡に沿って励起されたミュオンチェンバーのヒット信号を入力させASICの評価をできるだけ現実に近い環境条件のもとで行った。このビームテストの完遂に我々は全力を傾けた。

レベル1トリガーそのものはすべてハードウェアロジックによるパターン認識によりなされるが、このビームテストシステムのランコントロールやシステム内のハードウェアコンポーネントのパラメータ設定のためには大規模なソフトウェアを必要とする。我々はこのコントロールソフトウェアをATLAS DAQ-1 online systemのフレームワークに準拠する形で開発した。またこれらの統合コントロール用GUIの開発を行った。GUIはjavaを使い、イベントディスプレイにはpythonを使った。コンフィギュレーションデータベースはやはりATLAS標準フレームワークの書式に従いxmlで記述した。これらのソフトウェア開発は大学院学生によって強力に押し進められた。このビームテストの結果は2003年10月にアムステルダム（オランダ）で開催されたLECC2003（大型ハドロン衝突型加速器LHCのためのエレクトロニクス開発研究国際会議）で公表した。

このビームテストで得られた結果のさらに進んだ解析はその後も順調に行われ米国オレゴン州ポートランドで2003年10月に行われたIEEE NSS（原子核科学シンポジウム）2003にて公表した。

2) CPUデザイン

2002年度よりCPUアーキテクチャおよびFPGAを利用したりコンフィギュラブルコンピュータの研究を開始した。ソフトウェアにより何度も書き換え可能な論理ゲートアレイFPGAを用いて実践的に新しいCPUのデザインを開拓する、またFPGAにCPUをひとつ埋め込み、空いた部分は目的用途に応

じてリコンフィギュラブルに回路を構成させる場合どのようなシステム形態をとるのが良いかの研究に着手した。

初年度である 2002 年度は 1990 年代前半に盛んに利用されその後、後継 CPU の製作の不調によりその製作が打ち切られたトランスピュータに焦点を当ててこの再構築を完成させた。トランスピュータは C.A.R.Hoore が提唱した情報科学理論 Communication Sequential Process (CSP) に基づき設計されたプログラム言語 Occam を実行する CPU チップである。CSP 理論の実現ということによりこのチップは複数集めて並列処理が高速で行える CPU である。1 CPU でも容易に複数のプロセスを生成・実行できるようになっている。しかしハードウェア実装の不完全さから理論も Occam 言語も完璧であるがハードウェアで大きなシステムを構成するとうまく機能しないことが指摘されていた。

我々はこの CPU を機械語の動きから分析し、回路を再構成し FPGA を用いてハードウェア実装することを行った。またトランスピュータが並列分散システムの 1 つのプロセッサエレメントとして利用される特徴を生かし、ひとつの FPGA 上に複数の我々独自のトランスピュータを実装させその結合形態は外部から自由に変えられるように設計した。2003 年度第 1 版の完全版トランスピュータを完成させることができた。動作クロックはまだ 23MHz 程度だった。この製作結果は 2004 年 1 月横浜で行われた第 11 回日本 CPLD/FPGA デザインコンファレンスにおいて公表した。今後は動作クロックの向上、トランスピュータ ASIC の製作（我々のデザインが FPGA でなく単体 IC としてどこまでの性能がだせるかの確認）を行い複数トランスピュータシステムの設計、製作に向かっていこうと考えている。この結果は 2004 年 9 月の CPA2004 (Computer Parallele Architecture 2004) 国際会議にて公表予定である。

2. 研究業績

1) 論文

H.C.Huang et al., (Belle Collaboration), EVIDENCE FOR $B \rightarrow \text{PHI PHIK}$ Phys. Rev. Lett. 91:241802, 2003

K.Abe et al., (Belle Collaboration), AN UPPER BOUND ON THE DECAY $\text{TAU} \rightarrow \text{MU GAMMA}$ FROM BELLE Phys. Rev. Lett. 92:171802, 2004

M.Z.Wang et al., (Belle Collaboration), OBSERVATION OF $B^+ \rightarrow P \text{ ANTI-P PI}^+$, $B^0 \rightarrow P \text{ ANTI-P K}^0$, AND $B^+ \rightarrow P \text{ ANTI-P K}^{*+}$. Phys. Rev. Lett. 92:13180104

K.Abe et al., (Belle Collaboration), MEASUREMENT OF $K^+ K^-$ PRODUCTION IN TWO PHOTON COLLISIONS IN THE RESONANT MASS REGION Eur.Phys. J.C32:323-336, 2003

M.C.Chang et al., (Belle Collaboration), SEARCH FOR $B^0 \rightarrow L^+ L^-$ AT BELLE. Phys. Rev. D68:111101, 2003

S.L.Zang et al., (Belle Collaboration), SEARCH FOR $B^- \rightarrow J / \text{PSI LAMBDA ANTI-P}$ DECAY Phys. Rev. D69:017101, 2004

K.Hasuko et al., (ATLAS Level1 Trigger collaboration), THE FIRST INTEGRATION TEST OF THE ATLAS END-CAP MUON LEVEL 1 TRIGGER SYSTEM IEEE Trans.Nucl.Sci.50:864-868, 2003

S.K.Choi et al., (Belle Collaboration), OBSERVATION OF A NARROW CHARMONIUM - LIKE STATE IN EXCLUSIVE $B^{+-} \rightarrow K^{+-} \text{ PI}^+ \text{ PI}^- J / \text{PSI}$ DECAYS Phys. Rev. Lett. 91:262001, 2003

A. Drutskoy et al., (Belle Collaboration), OBSERVATION OF RADIATIVE $B \rightarrow \Phi K \text{ GAMMA}$ DECAYS Phys. Rev. Lett. 92:051801, 2004

K.Abe et al., (Belle Collaboration), OBSERVATION OF $B \rightarrow K^* L+ L-$. Phys. Rev. Lett. 91:261601, 2003

K.Abe et al., (Belle Collaboration), EVIDENCE FOR $B_0 \rightarrow \text{PI}0 \text{ PI}0$ Phys. Rev. Lett. 91:261801, 2003

K.Abe et al., (Belle Collaboration), OBSERVATION OF RADIATIVE DECAY $D_0 \rightarrow \Phi K \text{ GAMMA}$ Phys. Rev. Lett. 92:101803, 2004

K.Abe et al., (Belle Collaboration), MEASUREMENT OF TIME DEPENDENT CP VIOLATING ASYMMETRIES IN $B_0 \rightarrow \Phi K_0(S)$, $K+ K- K_0(S)$, AND $\text{ETA-PRIME } K_0(S)$ DECAYS Phys. Rev. Lett. 91:261602, 2003

K.Abe et al., (Belle Collaboration), MEASUREMENT OF THE $E+ E- \rightarrow D^{(*)+} D^{(*)-}$ CROSS-SECTIONS Surveys High Energ.Phys. 18:221-232, 2003

A.Garmarsh et al., STUDY OF B MESON DECAYS TO THREE BODY CHARMLESS HADRONIC FINAL STATES. Phys. Rev. D69:012001, 2004

K.Abe et al., (Belle Collaboration), MEASUREMENTS OF THE $D(SJ)$ RESONANCE PROPERTIES Phys. Rev. Lett. 92:012002, 2004

J.Zhang et al., (Belle Collaboration), OBSERVATION OF $B+ \rightarrow \text{RHO}+ \text{RHO}0$. Phys. Rev. Lett. 91:221801, 2003

M.Z.Wang et al., (Belle Collaboration), OBSERVATION OF $B_0 \rightarrow P \text{ ANTI-LAMBDA } \text{PI-}$ Phys. Rev. Lett. 90:201802, 2003

K.Abe et al., (Belle Collaboration), EVIDENCE FOR CP VIOLATING ASYMMETRIES $B_0 \rightarrow \text{PI}+ \text{PI-}$ DECAYS AND CONSTRAINTS ON THE CKM ANGLE $\Phi(2)$ Phys. Rev. D68:012001, 2003

2) 国際会議報告

International Europhysics Conference on High-Energy Physics (HEP 2003), Aachen, Germany, 17-23 Jul 2003 K.Abe et al., (Belle Collaboration), OBSERVATION OF THE $D^*(SJ)(2317)$ AND $D^*(SJ)(2460)$ IN B DECAYS

International Europhysics Conference on High-Energy Physics (HEP 2003), Aachen, Germany, 17-23 Jul 2003 K.Abe et al., (Belle Collaboration), MEASUREMENTS OF THE $D(SJ)$ RESONANCE PROPERTIES

21st International Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energies (LP 03), Batavia, Illinois, 11-16 Aug 2003. K.Abe et al., (Belle Collaboration), OBSERVATION OF $B^{+-} \rightarrow D(CP)K^{*+-}$ DECAYS

21st International Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energies (LP 03), Batavia, Illinois, 11-16 Aug 2003. K.Abe et al., (Belle Collaboration), EVIDENCE FOR $B^+ \rightarrow \Omega^- L^+ \nu$

21st International Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energies (LP 03), Batavia, Illinois, 11-16 Aug 2003. K.Abe et al., (Belle Collaboration), STUDIES OF $B^0 \rightarrow \rho^{+-} \pi^+$ AND EVIDENCE OF $B^0 \rightarrow \rho^0 \pi^0$

21st International Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energies (LP 03), Batavia, Illinois, 11-16 Aug 2003. K.Abe et al., (Belle Collaboration), OBSERVATION OF A NEW NARROW CHARMONIUM STATE IN EXCLUSIVE $B^{+-} \rightarrow K^{+-} \pi^+ \pi^- J / \psi$ DECAYS

21st International Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energies (LP 03), Batavia, Illinois, 11-16 Aug 2003. K.Abe et al., (Belle Collaboration), MEASUREMENT OF THE D^0 ANTI- D^0 LIFETIME DIFFERENCE USING $D^0 \rightarrow K \pi / K K$ DECAYS

21st International Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energies (LP 03), Batavia, Illinois, 11-16 Aug 2003. K.Abe et al., (Belle Collaboration), MEASUREMENT OF TIME DEPENDENT CP VIOLATING ASYMMETRIES IN $B^0 \rightarrow \phi K^0(S)$, $K^+ K^- K^0(S)$, AND η' -PRIME $K^0(S)$ DECAYS

21st International Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energies (LP 03), Batavia, Illinois, 11-16 Aug 2003. K.Abe et al., (Belle Collaboration), OBSERVATION OF RADIATIVE DECAY $D^0 \rightarrow \phi \gamma$

21st International Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energies (LP 03), Batavia, Illinois, 11-16 Aug 2003. S.Nishida et al., (Belle Collaboration), MEASUREMENT OF THE CP ASYMMETRY IN $B \rightarrow X(S) \gamma$

21st International Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energies (LP 03), Batavia, Illinois, 11-16 Aug 2003. K.Abe et al., (Belle Collaboration), MEASUREMENT OF THE BRANCHING FRACTION FOR $B \rightarrow \psi(2S) K^*(892)$ DECAYS

21st International Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energies (LP 03), Batavia, Illinois, 11-16 Aug 2003. K.Abe et al., (Belle Collaboration), EVIDENCE FOR $B^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$

21st International Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energies (LP 03), Batavia, Illinois, 11-16 Aug 2003. K.Abe et al., (Belle Collaboration), MEASUREMENT OF THE ANGLE $\phi(3)$ WITH DALITZ ANALYSIS OF THREE BODY D^0 DECAY FROM $B \rightarrow D^0 K$ PROCESS

21st International Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energies (LP 03), Batavia, Illinois, 11-16 Aug 2003. A.Ishikawa et al., (Belle Collaboration), OBSERVATION OF $B \rightarrow K^* L^+ L^-$

21st International Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energies (LP 03), Batavia, Illinois, 11-16 Aug 2003. K.Abe et al., (Belle Collaboration), STUDY OF CP VIOLATING EFFECTS IN TIME DEPENDENT $B^0(\text{ANTI-}B^0) \rightarrow D^{(*)-+} \pi^{\pm}$ DECAYS

21st International Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energies (LP 03), Batavia, Illinois, 11-16 Aug 2003. K.Abe et al., (Belle Collaboration), STUDY OF TIME DEPENDENT CP VIOLATION IN $B^0 \rightarrow J / \Psi \pi^0$ DECAY

IEEE 2002 Nuclear Science Symposium (NSS) and Medical Imaging Conference (MIC) and Symposium on Nuclear Power Systems, Norfolk, Virginia, 10-16 Nov 2002 C.Fukunaga THE FIRST INTEGRATION TEST OF THE ATLAS END-CAP MUON LEVEL 1 TRIGGER SYSTEM

28th International Cosmic Ray Conferences (ICRC 2003), Tsukuba, Japan, 31 Jul - 7 Aug 2003 Y.Aita et al., (ASHRA collaboration), HIGH ENERGY ASTROPHYSICS BY ASHRA

28th International Cosmic Ray Conferences (ICRC 2003), Tsukuba, Japan, 31 Jul - 7 Aug 2003 Y.Aita et al., (ASHRA collaboration), HIGH ENERGY ASTROPHYSICS BY ASHRA

28th International Cosmic Ray Conferences (ICRC 2003), Tsukuba, Japan, 31 Jul - 7 Aug 2003 Y.Aita et al., (ASHRA collaboration), ASHRA TRIGGER AND READOUT PIXEL SENSORS

28th International Cosmic Ray Conferences (ICRC 2003), Tsukuba, Japan, 31 Jul - 7 Aug 2003 Y.Aita et al., (ASHRA collaboration), THE ASHRA DETECTOR

28th International Cosmic Ray Conferences (ICRC 2003), Tsukuba, Japan, 31 Jul - 7 Aug 2003 Y.Aita et al., (ASHRA collaboration), PARTICLE PHYSICS IN ASHRA

3) 学会講演

日本物理学会 第 59 回年次大会 (2 0 0 4 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

日本物理学会 2003 年秋 : 「秋季大会」(宮崎ワールドコンベンションセンター・サミット)

佐久間孝雄他 : ATLAS 実験ミュオントリガシステムで用いる LSI の放射線耐性試験 (線 , 陽子線)

渋谷和弘他 : ATLAS TGC エレクトロニクスシステムのビームテストによる性能評価

IEEE 2003 Nuclear Science Symposium (NSS) and Medical Imaging Conference (MIC) and Symposium on Nuclear Power Systems, Portland, Oregon, 10-16 Oct 2003

C.Fukunaga BEAM TEST OF THE ATLAS END-CAP MUON LEVEL 1 TRIGGER SYSTEM

9th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Amsterdam, the netherland,

29 Sep-3 Oct 2003 C.Fukunaga BEAM TEST OF THE ATLAS END-CAP MUON LEVEL 1 TRIGGER SYSTEM

編集後記

このたび、光栄にも 2003 年度年次報告の編集後記を執筆する機会を与えられた。初めての経験なので、まず川島助教授による昨年度の編集後記を拝読した。それには、昨今世界では暴力的で暗いニュースばかりということが述べられていたが、私も最近 NHK のニュースを見たとき、残念ながら世界情勢は好転していないことを再確認した。イラクでは戦争が続いているし、日本の閣僚たちは年金を納めていない(私だって納めているのに!)。膨大な資金が戦争のために拠出されており、学術部門や社会福祉にはまわされていない。数学や物理において我々は常に問題の根本となるもの—すなわち最も重要な要素や、基本的な原因を模索するものだ。では、戦争や暴力の元凶はなんだろうか？

もちろん、歴史を振り返って一般論を述べるつもりはない。しかし私には、こうした現象の主たる原因のひとつは、異文化を理解・尊重しないことにあるように思える。したがって、人々が今ある問題に共に取り組みながら、互いをより知るようになれば、世界はより良い、安全なものになることだろう。現代科学は国際化しており、国境はない。その例として、世界の主要な大学に留学生や外国人教授がいることに驚く人などどき誰もいないだろう。ところで、私も外国人教授の一人である。都立大学に着任する以前、私はロシア、アメリカ、ドイツやその他多くの国々の大学で活動してきた。私の旧友たちは同情的に首を振って、畳の上での寝心地はどうか、とか、日本のカップヌードルの味は、とか、計算違いをしたらハラキリをしなくてはならないのか、とか、いろいろ尋ねてくる。それで私が、自分が日本で使っているのはフランス製のベッドだし、イタリアンピザも食べる、講義で使う言語は英語で秘書との会話はロシア語、Eメールはドイツ語、それにイトーヨーカドーで自分の下手な日本語の訓練もしている、と答えると、彼らはとても驚くのである。とはいえ、私が日本で最も気に入っているのは、何かにつけて会釈することだ。

できる限り多くの世界の人たちがもっと日本のことを知り、また日本人たちには外国人と接する機会をもっと持ってほしいと思う。だから私は日本の学生たちに、英語をはじめとする外国語は、まず第一に人とつきあうための手段であり、書くことはその次である、と言っている。問題を論じ合うことは、人の考えを模倣することよりはるかに重要だ。疑問がなければ講義もゼミも理解はできない。自分の顔を見るためには、それを鏡に映さなくてはならないのと同じで、自国の文化や言語を理解するためには、少なくとももう 1 カ国のそれを理解する必要がある。

科学に携わるといことは、専門分野の勉強を深め、一人前になるための可能性を物理学の学生に与えてくれる。科学を通じて、学生たちは世界やそこで起きている出来事に向けてより幅広く、国際的でグローバルな視野が開けてくることであろう。そしてこのことは、世界がよい方向に変化することへの希望を我々に与えてくれるのだ。

(セルゲイ・ケトフ 記)

平成 14 年度年次報告編集委員

酒井 治 (2003 年度教室主任)

岡部 豊

セルゲイ・ケトフ

田中 篤司