

研究室活動状況 平成13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 (1-5):ニュートリノ物理の現象論、と (6-8):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 (SK) 大気ニュートリノ観測によるニュートリノ振動の発見、K2K 実験による確認、さらには SK と SNO の共同作業による太陽ニュートリノ振動の発見を受け、レプトンフレーバー混合の全体構造の解明に照準を合わせた研究が実験、理論の双方で進展しつつある。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」において我が都立大は理論系計画班の中核を形成し、今年度も国際共同研究を含む活発な研究活動を行った。

1) ニュートリノ振動における CP 位相効果と物質効果；CP 軌跡ダイアグラム表示

長基線ニュートリノ振動実験による CP 非保存効果の測定において純正 CP 位相効果とこれと見紛う効果を生じる物質効果の相互関係を完璧に理解することの重要性が指摘されてきた。この目的に向かって、この問題の理解に役立つ有用な道具として「双確率空間における CP 軌跡ダイアグラム表示」を導入し、この性質を明らかにした。この CP 軌跡ダイアグラムを使うと、CP 非保存位相効果、CP 保存位相効果、物質効果の三者を一枚の図の中に同時に表示でき、それぞれの効果の強さが一目瞭然で、いわば「ニュートリノ振動を目で見る」ことができる。これは、例えば CP 位相とニュートリノ質量パターン（順階層的あるいは逆階層的）との同時測定を目指す長基線ニュートリノ実験計画の立案に役立つと期待される。すでにこの CP 軌跡ダイアグラムを用いてパラメータ縮退の問題を議論する論文が現れるなど、ニュートリノ振動の理論的諸問題の解析に有力な手段を提供し始めている。

（この課題はブラジル、エスタデュアルパウリスタ大学・布川弘志氏との共同研究）

2) 牧-中川-坂田行列の (1-3) 行列要素の測定法

将来のニュートリノ振動実験による CP 非保存効果の測定にとって重要な条件はこの難しい測定の前に他の全てのフレーバー混合パラメータが精度よく決定されていることである。現時点でこの要請から最も遠いのが (1-3) 角である。この角は日本の将来計画 JHF2K 実験において測定されると期待されるが、我々はこの実験の第 1 期に予定されているニュートリノチャンネルのみを用いる測定では通常の実験誤差に加えてこれを上回る大きな固有の不定性が存在することを指摘した。

さらに上記の CP 軌跡ダイアグラムの方法を用いてこの問題の解決法を提案した。振動極大近くでエネルギーの微調整を行い、CP 軌跡ダイアグラムを最も薄っぺらにする。そこで反ニュートリノチャンネルを併用することによって精度よい測定ができることを示した。この提案は (1-3) 角が比較的大きいような場合には JHF2K 実験計画に影響を与える可能性がある。（この課題は東京大学宇宙線研究所・梶田隆章、エスタデュアルパウリスタ大学・布川弘志両氏との共同研究）

3) 長基線ニュートリノ振動の現象論における真空模倣機構

長基線ニュートリノ振動実験において、基線の長さが振動長よりも短い場合には、物質効果の寄与が無視できることが知られていて、真空模倣機構と呼ばれている。物質効果自身が弱い訳ではなく、MSW 共鳴効果が起きるようなパラメータの場合にも振動確率が真空中のニュートリノ振動のように振る舞うので不可思議な現象と考えられ、当該分野でもよく理解されてい

なかった。この研究ではしかるべき状況の下でのニュートリノ振動を一般的に議論して、真空模倣機構が働く条件を明らかにした。物質効果の1次項が相殺していることはよく知られていたが、次のオーダーまでの打ち消し合いがかなり一般的に起きることを示した。

4) 不活性ニュートリノを含むニュートリノ振動の現象論

いわゆる不活性ニュートリノを一種類含む四種類混合のニュートリノ振動のシナリオは、太陽ニュートリノ欠損・大気ニュートリノ問題・LSND実験を全てニュートリノ振動で説明するために活発に議論されて来た。我が研究室では昨年度にこの最も一般的な解析を世界で最初に実行し世に問うた。しかしながら、最近太陽ニュートリノと大気ニュートリノのデータが不活性ニュートリノ仮説を好まない傾向になってきたため、このような四世代形式の枠組の下で加速器・原子炉実験からの制約を満たし、太陽ニュートリノ・大気ニュートリノデータを説明するシナリオがどの程度の統計的確度で許されているかを定量的に再検討中である。

また、このシナリオが十分な確度で排除されてしまった場合を想定し、不活性ニュートリノを二種類以上に増やした拡張された枠組みを考察した。モデルのパラメータ空間は遥かに大きくなるにもかかわらず、この場合においても一つの質量自乗差が支配的になる限りすべての制約を満たすような解を得るのは四世代スキームと同程度に難しいことを一般的に示した。

5) ニュートリノを使った重力陥没超新星コアの診断学

ニュートリノ振動の発見によって、ニュートリノ観測を用いた重力陥没超新星コアの診断学の従来の戦略は変更を余儀なくされている。地上の検出器で観測された電子ニュートリノはコア中でタウニュートリノとして生まれたかも知れないからである。このような「ニュートリノ振動の存在を前提とした超新星コアの診断学」を体系的な研究プロジェクトとして開始した。今年度は水チェレンコフ検出器SK中での反電子ニュートリノ事象に限った解析を行った。これが考えられる全ての検出器のあらゆるチャンネルのうちで最も事象数が多い(銀河中心超新星で約1万イベント)からである。現在最有力の太陽ニュートリノ問題の大角度MSW解を仮定すると、通常期待されるように中性子星の束縛エネルギーと反電子ニュートリノの温度とが精度よく決定されること以外に、ミュー・タウ(正反)ニュートリノの温度が決定されるという驚くべき結果を得た。(この課題はバレンシア大学 Jose Valle、マックスプランク研究所 Ricard Tomas、エスタデュアルパウリスタ大学・布川弘志の各氏との共同研究)

6) 超弦理論と重力の量子効果

重力の量子効果(非摂動論的效果)が素粒子物理に重要であるという示唆は以前から提起されている。しかし、重力の量子効果を解析する手法(Euclidean gravity)が本質的な困難を抱えているため、あくまでも示唆にすぎなかった。しかし、最近の弦理論の発展(D-brane)により、示唆されていた重力の量子効果(black hole entropy)をこれまでとは異なる手法で再現することができた。従って、もう一度素粒子物理における重力の量子効果を、弦理論の技術を使って検討することが可能であると思われる。

そこでまず最初に、重力の量子効果による gravitino 凝縮によって超対称性が自発的に破れる可能性について研究した。

まず、D-brane(弦理論において実現される多次元の広がりを持った実体)の張力が、gravitino 凝縮が起きている場合とそうでない時に異なることを見出した。これは、低エネルギーの世界におけるD-braneを記述する低エネルギー有効作用の高次項を調べることによって得られる

結論である。高次項のうちの一部しかあからさまには書き下されていないため、必要な部分を新たに導いて上記のことを見出した。

次に、D-brane の張力を直接に超弦理論において計算した。時空間が平坦である時には gravitino 凝縮は起きず、このときの D-brane の張力はすでに計算されている。そこで、低エネルギー有効理論において gravitino 凝縮が起きると指摘されている特殊な時空間 (fivebrane background) における D-brane の張力を新たに計算し、二つの結果が一致しないことを見出した。Fivebrane background は位相的 (topological) に平坦な時空間とは異なっていて、また、位相的な性質は平坦になる極限をとっても消えない。したがって、得られた結果は背景時空間の位相的な効果により gravitino 凝縮が起きていることを示唆している。また、fivebrane background は半分の超対称性を破ることが知られていて、見出された張力のずれがまさにこの超対称性の破れに起源を持つことから、gravitino 凝縮が超対称性を破っていることも示唆される。

7) 高密度物質の物理に関連した低次元の場の理論

中性子星の核構造の解明や今後行われる重イオン衝突実験の解析をするためには有限のクォーク密度の下での量子色力学 (QCD) の真空構造を知ることが必要である。QCD において低密度、低温でのカイラル凝縮相とは違って高密度ではクォークがクーパー対を作って凝縮し、カラー超伝導相を形成するという指摘がなされている。また最近ではこれらの相が結晶構造を持つという指摘もされている。カイラルおよびクーパー対凝縮相をそれぞれもつ Gross-Neveu 型の 1+1 次元 4 体フェルミ模型の真空構造を調べ、前者においてはカイラル凝縮が結晶構造を持つという結果を再確認し、後者のクーパー対凝縮模型では超伝導相は空間的に一様で結晶構造を持たないことを初めて明らかにした。

さらに、QCD の臨界現象の理解の手助けとすべく Gross-Neveu 模型の有限温度・密度での相転移現象を取り扱った。特に、QCD と共通する際だった特徴である 3 重臨界点付近の振舞いを解析し、3 重臨界指数をラージ N 極限で計算した。また、数値計算の精度を高めて、この臨界指数が平均場近似での値と一致することを示した。

8) カイラル量子異常効果による Disoriented Chiral Condensate (DCC) ドメイン形成

1996 年 Minakata-Müller によって量子色力学に存在するカイラル・アノマリーの効果によって、相対論的重イオン衝突において DCC 状態の形成が飛躍的に強められる可能性が指摘された。この効果を浅川達の線形シグマ模型コードに組み込みんでこの可能性をテストした結果、アノマリー効果が DCC ドメイン形成に大きな影響を与えることが確かめられた。今年度においては、この DCC 形成におけるカイラル・アノマリー効果の実験的検証についての研究を行った。カイラル・アノマリーの効果の特徴を表すと思われる中性パイ中間子の角度分布を計算したところ、散乱平面に垂直な方向にピークを持つことが確認された。さらに、この崩壊生成物である光子の角度分布を計算したところ、中性パイ中間子と同様に散乱平面に垂直な方向に十分鋭いピークを持ち、より容易な包含 1 光子分布の測定によって DCC 形成におけるカイラル・アノマリー機構の実験的検証が行えることが分った。米国ブルックヘブン国立研究所の RHIC 実験によって我々の予言が検証されることが望まれる。

(この研究はデューク大学・Berndt Müller、京大・浅川正之の両氏との共同研究)

2. 研究業績

1) 論文

M. Arai and N. Okada: Vacuum Structure of Spontaneously Broken N=2 Supersymmetric Gauge Theory, Physical Review **D64** (2001) 025024.

H. Hiro-Oka and H. Minakata: Pion Production by Parametric Resonance Mechanism with Quantum Back Reactions Physical Review **C64** (2001) 044902.

T. Kajita, H. Minakata and H. Nunokawa: Method for Determination of $|U_{e3}|$ in Neutrino Oscillation Appearance Experiments Physics Letters **B528** (2002) 245-252 [hep-ph/0112345].

N. Kitazawa: Gravitino Condensation in Fivebrane Background, Physical Review **D65** (2002) 086004.

H. Minakata and H. Sugiyama: Lower Bound on $|U_{e3}|^2$ from Single and Double Beta Decay Experiments Physics Letters **B526** (2002) 335-344 [hep-ph/0111269].

H. Minakata and H. Nunokawa: Exploring Neutrino Mixing with Low Energy Superbeams Journal of High Energy Physics **0110** (2001) 001-033 [hep-ph/0108085].

H. Minakata and H. Nunokawa: Measuring Leptonic CP Violation by Low-Energy Medium Baseline Neutrino Oscillation Experiments, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A472** (2000) 421-426 [hep-ph/0009091].

K. Ohwa: Crystalline Ground State in Chiral Gross-Neveu and Cooper Pair Models at Finite Densities, Physical Review **D65** (2002) 085040.

H. Sugiyama: Critical and Tricritical Exponents of the Gross-Neveu Model in the Large-N Limit, Physical Review **D65** (2002) 085021.

J. Pinney and O. Yasuda: Correlations of Errors in Measurements of CP Violation at Neutrino Factories, Physical Review **D64** (2001) 093008.

O. Yasuda: Vacuum Mimicking Phenomena in Neutrino Oscillations, Physics Letters **B516** (2001) 111-115.

O. Yasuda: Analysis of the Superkamiokande Atmospheric Neutrino Data in the Framework of Four Neutrino Mixings, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A472** (2001) 343-347.

2) 国際会議報告

M. Arai and N. Okada: Potential Analysis of N=2 SUSY Gauge Theory with the Fayet-Iliopoulos Term, Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) **102** (2001) 219-226.

H. Minakata: The Three Neutrino Scenario, Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) **100** (2001) 237-243.

H. Minakata: Degenerate and Other Neutrino Mass Scenarios and Dark Matter, in *Dark Matter in Astro- and Particle Physics*, pp 404-419, edited by H. V. Klapdor-Kleingrothaus, Springer 2001.

O. Yasuda: Various Solutions of the Atmospheric Neutrino Data, in *Proceedings of the 2nd Workshop on Neutrino Oscillations and Their Origin (NOON 2000)* (2001) 134-143.

O. Yasuda: Four Neutrino Oscillation Analysis of Atmospheric Neutrino Data and Application to Long Baseline Experiments, in *Proceedings of the 30th International Conference On High-Energy Physics (ICHEP 2000)* (2001) 952-954.

M. Chiba, T. Kamijo, M. Kawaki, A. Husain, M. Inuzuka, M. Ikeda, and O. Yasuda: Study of Salt Neutrino Detector, in *AIP conference proceedings* **579** (2001) 204-221.

3) 学会講演

日本物理学会第 56 回年次大会 2001 年 3 月 27 日 ~ 3 月 30 日 (中央大学多摩キャンパス)

小川兼司、John Pinney、安田修：ニュートリノファクトリーでの CP 非保存の測定における誤差の相関

日本物理学会秋季大会 2001 年 9 月 22 日 ~ 9 月 25 日 (沖縄国際大学)

杉山弘晃：Gross-Neveu 模型の 3 重臨界指数

応和克己：4 体フェルミ模型における周期的基底状態

新井真人、岡田宣親：Vacuum Structure of Spontaneously Broken N=2 SUSY Gauge Theory

国内研究会

新世紀の素粒子像：2001 年 7 月 10 日 ~ 13 日 (京都大学基礎物理学研究所)

安田修：Recent Status of Neutrino Oscillation Study

PRISM Summer Workshop：2001 年 8 月 18 日 ~ 20 日 (日経連富士教育研修所)

安田修：Phenomenological Neutrino Oscillation – Situation after SNO

特定領域研究「ニュートリノ」神岡研究会：2001 年 9 月 5 日 ~ 6 日
(東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設)

安田修：Phenomenology of Neutrino Oscillations (Status including SNO Data)

Sapporo Winter School 2002：2002 年 1 月 9 日 ~ 11 日 (北海道大学理学部)

安田修：ニュートリノ振動の現象論

「特定・宇宙ニュートリノ研究会」

第 6 回：2001 年 6 月 2 日 (東京都立大学国際交流会館)

南方久和：太陽ニュートリノの教養物理

第8回：2001年11月9日（東京大学宇宙線研究所）

南方久和： θ_{13} 、 Δm_{13}^2 の符号、CP-phaseの測定と物質効果

国際会議

The Third International Workshop on Neutrino Factories based on Muon Storage Rings (NuFACT01), May 24-30, 2001, Tsukuba, Japan

H. Minakata and H. Nunokawa: CP Trajectory Diagram; A tool for pictorial representation of CP and matter effects in neutrino oscillations

O. Yasuda: Summary of Working Group 1 (Theory Part)

The Sixth Workshop on Non-Perturbative Quantum Chromodynamics
June 5-9, 2001, American University of Paris, France

O. Yasuda: Recent Status of Neutrino Oscillation Study (Invited talk).

7th International Workshop on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2001),
September 8-12, 2001, Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Assergi, Italy

H. Minakata and H. Nunokawa: CERN to Gran Sasso; Ideal Distance for Superbeam?

Frontiers in Particle Astrophysics and Cosmology; EuroConference on Neutrinos in
the Universe, Lenggries, Germany, September 29 - October 4, 2001

H. Minakata: Diagnostics of Supernova Neutrinos by Superkamiokande (Invited Plenary Session Talk).

Tamura International School on Neutrino Physics, November 23-25, 2001,
Tokyo University of Science, Japan

O. Yasuda: Phenomenological Theory (1): Current Understanding;
Phenomenological Theory (2): Future Problem (Invited talks).

The 3rd Workshop on Neutrino Oscillations and their Origin (NOON2001),
December 5-8, 2001, ICRP, Univ. of Tokyo, Japan

O. Yasuda: Physics Potential and Present Status of Neutrino Factories (Invited talk).

The 18th International Workshop on Weak Interactions and Neutrinos (WIN2002),
January 21-26, 2002, Christchurch, New Zealand

O. Yasuda: CP Violation in the Lepton Sector and Neutrino Oscillations (Invited talk).

Fourth International Heidelberg Conference on Dark Matter in Astro and Particle Physics
(Dark2002), Cape Town, South Africa, February 4-9, 2002

H. Minakata and H. Sugiyama: Single and Double Beta Decay Constraints on Neutrino Mixing Parameters (Invited talk).

4) 科学研究費等報告

南方久和：平成12年度～13年度科学研究費補助金（基盤研究C）成果報告書
「高密度・急冷過程でのハドロン場の理論」

5) 学会誌等

南方久和：平成13年第47回仁科記念賞 鈴木洋一郎氏、中畑雅行氏（学界ニュース）日本
物理学会誌 57 No. 2 (2002) pp 116.

原子核理論研究室

1. 研究活動の概要

1) 原子核の非弾性散乱における偏極移行量の一般論

原子核反応における偏極移行量は、原子核の(特にスピン励起の)構造を知るために不可欠の手段となっている。核反応における相互作用は、入射粒子のスピンや原子核の始・終状態のスピンにより多くの項から成り、これに応じて偏極移行に伴う多くの観測量が存在する。我々は偶々原子核を標的とする場合の相互作用の型、および偏極移行量の型を分類し、とくに前方散乱における偏極移行量の値と、相互作用パラメタとの関係、およびその値の取り得る範囲を示した。

2) 原子核における四重極集団励起の強度関数の揺らぎの分析

原子核表面の四重極振動は、粒子運動との相互作用により減衰するとともに、粒子運動にともなう強度関数の揺らぎで特徴づけられる。この揺らぎは、粒子運動のランダム性あるいは一定の規則性を反映していると予想される。これを分析するため、中重核におけるタム・ダンコフ計算を行ない、強度関数を、 Δ_3 統計及び局所スケールリングの方法を用いて分析した。その結果、これらの量は粒子・空孔相関により影響されること、二種の方法による分析から得られる揺らぎのエネルギー・スケールに関連が見られることがわかった。

3) SU(3)-(3,3)-型秩序変数の理論と高密度カラー超電導クォーク物質への応用

クォーク物質は、カラー交換力などの引力により対凝縮を起こしカラー超電導状態になるという理論的予測がある。非閉じこめ相におけるクォーク間相互作用は不明であるので、カラー秩序変数による半現象論(Landau-Ginzburg型有効理論)を用いた考察は、一般性の見地から重要である。我々は、秩序変数の4次項までを含むカラーSU(3)-(3,3)-型秩序変数のGinzburg-Landau型ポテンシャルの一般型を確定し、安定条件を完全に求めた。また、そのポテンシャルによるカラー相構造の完全な分類をおこなった。この結果は、論文として現在投稿中である。

4) パートン模型による構造関数の解析

深部非弾性散乱は、核子や原子核におけるクォーク分布を与えるが、これは核子・原子核の構造に対する洞察を助けるばかりでなく、QCDの適用に関しても貴重な情報を与える。核子のスピン構造を調べるために偏極深非弾性散乱の実験データを用いて偏極パートン分布を現象論的に分析した。また原子核のパートン分布についても、結合定数 α_s のleading orderで分布関数のパラメタを決定した。さらに、中間子雲を着た核子の模型に基づき、偏極反クォーク分布におけるフレーバー非対称性を調べた。とりわけ ρ 中間子の効果に注目し、 $\Delta\bar{u}$ に対して $\Delta\bar{d}$ が相対的に増加するという結論を得た。

5) ボーズ・フェルミ混合凝縮体における準束縛状態の形成と系の平行状態

極低温におけるボーズ・フェルミ混合原子気体において、二種の粒子間に引力が働いて束縛状態(複合フェルミオン)が形成される可能性を検討した。まず、現象論的な原子間s波散乱長を与える分離型ポテンシャルを決定した。このポテンシャルを用いて原子気体中での二体散乱方程式を解いた結果、弱い束縛状態が形成されることを示した。束縛エネルギーの温度・密度依存性を調べた。とくに、ボーズ・フェルミ両者の統計因子の違いのため、自由空間における散乱に近くなることがわかった。同時に、粒子の統計性の影響を調べるため、ボーズ粒子のみ

の系、フェルミ粒子のみの系において同様な計算を実行して比較を行なった。次いで、この系でボソン・フェルミオン・複合フェルミオンがいかなる比率において存在し平衡するかについて研究を行なった。複合フェルミオンのフェルミ縮退状態は束縛エネルギーの点で有利であるが、ボソン・フェルミオン解離状態はボース気体のエネルギーをいくらでも小さくできる点で有利であり、その競合により様々な相の存在が予想される。我々は、ボソン + フェルミオン \leftrightarrow 複合フェルミオン + Δm (束縛エネルギー) の平衡条件を数值的・解析的に調べ、相の構造を研究した。その結果、1) 温度・束縛エネルギー・粒子数による相構造の変化、2) 系がボース・アインシュタイン凝縮相転移温度を求め(全粒子が複合フェルミオンになることなく)ボース・アインシュタイン凝縮が起こるための条件、3) K原子の場合の相構造、を得た。

6) ボース・フェルミ混合原子気体における集団励起の RPA 計算

極低温原子気体の典型的な運動である振動励起はこれまでボース気体・フェルミ気体について理論的に詳しく研究され、ボース気体では実験とよい一致が示されている。ボース・フェルミ混合気体においては新たな運動モードの存在が予想される。今回は和則による計算を發展させて、本格的な RPA 計算を行なった。ボース粒子は Gross-Pitaevskii 方程式、フェルミ粒子は Thomas-Fermi 法に基づいて結合した方程式を解いて基底状態を求め、得られた一粒子軌道をもとに RPA 方程式を導いた。角運動量 $L = 0, 1, 2, 3$ について、種々のボース・フェルミ相互作用の強さに対し、RPA 行列を対角化して、振動励起状態を求めた。さらに、強度分布、典型的な状態の遷移密度、および力学的構造因子を計算した。励起状態の集団性を引き起こす相関、集団励起の相互作用依存性、運動モードの典型的な特徴と時間的な観測による強度分布の決定、等について検討を行なった。この結果は論文として投稿中である。

7) 縮退して原子フェルミ気体の集団強磁性状態

原子気体のレーザー冷却(原子気体のボース・アインシュタイン凝縮実験と同じ)を用いてフェルミ原子(K)を冷却し、トラップされた量子フェルミ気体をつくりその性質を調べる実験が行われている。また近年になって、光学的なトラップによるスピン縮退したボース・アインシュタイン凝縮体の実験が成功し、内部自由度を持つ量子原子気体の物理が関心をもたれ盛んに研究されている。我々は、縮退したスピン自由度を持つフェルミ原子の有限量子気体の基底状態に着目し特に偏極状態について研究をおこなった。この系では、フェルミ縮退によるエネルギーは無偏極(常磁性)状態に有利に働き、粒子間相互作用(斥力とする)は偏極(強磁性)状態を作ろうとする。我々は、統計理論(Thomas-Fermi 近似)を用いてこの問題を解析的に取り扱い、ある臨界粒子数において強磁性状態が有限気体の中心部分から出現し、粒子数の増加に伴いほとんどの部分が強磁性状態となることを示した。また、K原子を例にとりこの状態を実現するための実験的条件を議論した。この論文は現在投稿中である。

8) 一次元的なボース・フェルミ混合気体のパイエルス不安定性

著しく異方的な、一次元的トラップ中ではボース粒子とフェルミ粒子との間に強い相関が働く。この相関によって引き起こされるパイエルス不安定性の可能性について我々は調べ次のような結果を得た。i) ボース粒子とフェルミ粒子との相互作用が強い時、フェルミ波数の2倍程度を持つボース粒子型の準粒子スペクトルに異常が現れ混合気体が不安定となる(パイエルス不安定)。ii) 一次元方向に一樣な近似を用いた場合、パイエルス不安定性の結果として有限波数のボース凝縮体とフェルミ粒子の密度波の共存状態が系の基底状態として現れる。

9) ポジトロニウム間相互作用とボース・アインシュタイン凝縮

ポジトロニウム間相互作用の計算およびボース・アインシュタイン凝縮への応用に関する論文を出版した。ポジトロニウム間相互作用の計算がその後いくつかのグループでおこなわれたが、本論文が最初である。また、高エネルギー物理学実験研究室とポジトロニウムのボース・アインシュタイン凝縮に関する共同研究をおこない、ポジトロニウムのレーザー冷却の数値的シミュレーションの結果を論文として出版した。我々が特に行ったのは、ポジトロニウムの光電効果等の理論計算である。

2. 研究業績

1) 論文

S. Kumano and M. Miyama: Polarized light-antiquark distributions in a meson-cloud model, *Phys. Rev. D* **65** (2002) 034012.

Y. Hirabayashi, T. Suzuki and M. Tanifuji: New Distorted-Wave Impulse Approximation Calculation for Inelastic Scattering of Deuterons at Intermediate Energies by the Sudden Approximation, *Phys. Rev. C* **64** (2001) 013110.

T. Miyakawa, T. Suzuki and H. Yabu: Induced Instability for Boson-Fermion Mixed Condensate of Alkali Atoms Due to Attractive Boson-Fermion Interaction, *Phys. Rev. A* **64** (2001) 033611.

H. Iijima, T. Hirose, M. Irako, T. Kumita, M. Kajita, H. Yabu and K. Wada: Study of Ortho-Positronium Laser Cooling, *J. Phys. Soc. Jpn.* **70**(2001)3255-3260.

M. Hirai, S. Kumano and M. Miyama: Determination of nuclear parton distributions *Phys. Rev. D* **64** (2001) 034003.

K. Oda, T. Miyakawa, H. Yabu and T. Suzuki: S-Wave Scattering Parameters for Positronium-Positronium Interaction and Positronium Bose-Einstein Condensates, *J. Phys. Soc. Jpn.* **70** (2001) 1549-1555.

2) 国際会議報告

Y. Hirabayashi, T. Suzuki and M. Tanifuji: DWIA Calculations for Inelastic Scattering of Deuterons at $E_d = 400\text{MeV}$, *SPIN 2000* (AIP, 2001) pp.659-663.

M. Hirai, H. Kobayashi and M. Miyama: Determination of Polarized Parton Distribution Functions, *SPIN 2000* (AIP, 2001) pp.477-481.

T. Hirose, H. Iijima, M. Irako, M. Kajita, K. Kobayashi, T. Kumita, N. N. Mondal, K. Wada and H. Yabu: Bose-Einstein Condensation of Ortho-Positronium Laser Cooling, *Proc. Int. Conf. on LASERS 2000* (2001).

3) 学会講演

日本物理学会第56回年次大会 2001年3月27日～3月30日(中央大学)

蛇川純平、十河孝明、鈴木 徹：多重 R(4) モデルにおける準位交叉と散逸

高山靖敏、宮川貴彦、藪 博之、鈴木 徹、P.Schuck : ボーズ・フェルミ有限温度多体系における準束縛状態

宮川貴彦、藪 博之、鈴木 徹 : ボーズ・フェルミ凝縮体のボソンスペクトルにおけるコーン異常

日本物理学会 2001年秋季大会 2001年9月17日~9月20日 (徳島文理大学)

十河孝明、宮川貴彦、鈴木徹、藪博之: RPA を用いたボーズ・フェルミ混合縮退系の集団励起状態の考察

宮川貴彦、藪 博之、鈴木 徹 : 擬一次元ボーズ-フェルミ混合気体のパイエルス不安定性

高山靖敏、宮川貴彦、P.Schuck、鈴木徹、藪博之 : 混合原子系におけるボソン・フェルミオン準束縛状態の性質

日米物理学会合同核物理分科会 2001年10月17日~20日
(米国ハワイ州 Outrigger Wailea Resort Hotel)

M.Miyama : Estimate of uncertainties in polarized parton distributions

研究会「中性子過剰核における 粒子凝縮と2中性子凝縮」 2001年5月1日~3日
(理化学研究所)

鈴木 徹 : トラップされた原子のボーズ・フェルミ混合系の集団励起と安定性

研究会「中間エネルギー原子核反応」 2001年5月21日~23日
(大阪大学核物理研究センター)

鈴木 徹 : 重陽子および核子の非弾性散乱におけるスピン観測の関係

研究会「原子核の量子トンネル崩壊現象」 2001年7月2日~4日
(京都大学基礎物理学研究所)

藪 博之 : 原子気体 Bose-Einstein 凝縮体の不安定性とトンネル崩壊

研究会「熱場の量子論とその応用」 2001年8月6日~8日 (京都大学基礎物理学研究所)

宮川貴彦 : 擬一次元ボーズ-フェルミ原子気体におけるパイエルス転移

藪 博之 : 有限温度系でのボーズ-フェルミ原子気体の量子凝縮

第4回レーザー冷却研究会 2001年9月20日~22日 (ホテルニューアワジプラザ淡路島)

宮川貴彦 : 擬一次元ボーズ-フェルミ気体のパイエルス不安定性

研究会「400MeV/u 一次ビームによる物理」 2001年11月28日~29日 (理化学研究所)

鈴木 徹：重陽子偏極移行反応とスピン励起

研究会「有限量子多体系の励起構造と相関効果」 2001年12月3日～5日
(京都大学基礎物理学研究所)

鈴木 徹：有限量子系における音波について

十河孝明：RPAを用いたボーズ・フェルミ混合縮退系の集団励起状態への取り組み

宮川貴彦：強い異方性トラップ中のボーズ・フェルミ混合気体のパイエルス不安定性

研究会「原子核における集団運動：RPAから重イオン反応まで」 2002年3月22日～23日
(京都大学基礎物理学研究所)

鈴木 徹：ボーズ・フェルミ系における対相関とフェルミオン化

4) 学会誌等

2000年度宇宙空間原子分子過程研究会「反粒子の関わる原子物理」報告 “ポジトロニウム間相互作用におけるs波散乱パラメータの計算とポジトロニウム・ボース・アインシュタイン凝縮”
小田研二、宮川貴彦、鈴木徹、藪博之(平成13年発行、宇宙科学研究所)

宇宙物理理論研究室

1. 研究活動の概要

1) コンパクト天体への降着ガス

質量降着によって活動的になっている重力の強い天体（中性子星・ブラックホール）では、降着ガスは紫外線・X線の強い放射によって光電離され、電離度に比べ温度の低いガスになる。このようなガスの特性として熱的不安定な領域が生じるが、それらがさらに中心天体の強い重力によって力学的不安定になる条件を明らかにした。また、宇宙組成で元素比の大きい水素やヘリウムの電離フロントでは、光学的厚みが局所的に増大し中心天体からの放射をシールドする。このため、これらの元素の電離ポテンシャルよりわずかに高いポテンシャルをもつイオンは、中心天体の近傍であっても電離されずフロントにトラップされることが理論的に予想される。実際に最近、X線連星系で中性子星の近くから低電離の鉄が見つかり、ヘリウム電離フロントの計算結果とよく合うことが示された。

2) γ 線バーストのダイナミクス

X線アフターグローの観測が進み、鉄やシリコンの線スペクトル・再結合端の見られる例が報告されてきている。その放射メカニズムと起源を明らかにすることができれば、未だ源天体が同定されていない γ 線バーストの物理過程や宿主銀河を探る、重要なプローブとなることが期待される。再結合放射の要因として、バーストの高エネルギー放射による光電離、高温・高密度状態が急激に膨張して引き起こされる希薄波、あるいは強いシンクロトロン放射による急激な冷却などが考えられる。各々について可能性を検討するとともに、爆発前の自身の恒星風中で超新星爆発が起こった場合のダイナミクス（非相対論的）と対比して、相対論的な膨張の場合の時間発展を調べた。 γ 線バーストが重い星の爆発を起源とする可能性を想定したもので、アフターグローでの鉄スペクトルの計算から物質密度について制限を求めた。

3) 銀河リッチ X線放射と粒子加速

銀河リッチから放射されているX線のエネルギーは $\sim 10^{38}$ erg s^{-1} に及び、観測されている宇宙線粒子や γ 線放射のエネルギーと整合的な起源の解明は未だなされていない。また放射スペクトルには鉄などの重元素のK輝線が見られ、数keVから ~ 10 keV近いプラズマを考えないと再現できないとされているが、銀河ディスクの重力でこのような高温のプラズマを捕捉するのは困難である。一方、もし銀河から吹き出しているとすれば、莫大なエネルギーの供給源が問題になる。超新星起源の可能性、幅の広い鉄輝線の起源などについて熱的粒子・非熱的粒子による様々なプロセスを検討した結果、0.3–0.6 keV程度の比較的温度の低い星間プラズマ中で弱い乱流によって統計加速された準熱的電子を考えると、X線の放射エネルギーを整合的に説明できることを見出した。また、このような粒子とバルクプラズマとの相互作用によって、一見 ~ 10 keV近いプラズマに見える放射スペクトルの特徴を再現できることも示した。

4) 原始銀河内における星形成の可能性

銀河や星が形成されるためには、ガスが内部エネルギーを放出しながら冷却・収縮することが必要であり、特に重元素量の少ない初期宇宙では、水素分子の振動・回転準位間の遷移が本質的なエネルギー放出過程であったと考えられる。このため、原始銀河内における星形成の効率は、水素分子の形成・破壊のバランスによって強く制御されるが、これは周囲の環境（温度、紫

外線輻射の強さなど)に複雑に依存する。我々はこの過程を定量的に明らかにするため、原始銀河のダイナミクス、水素分子の非平衡化学反応、光子の輻射輸送、を全て統合的に解く輻射流体シミュレーションを実現させた。この結果、水素分子が効率良く形成され、星形成が促進されるために必要な物理条件が明らかになった。この物理条件は、観測される銀河の質量や宇宙の星形成史を説明する上で特に本質的であると考えられる。

5) 銀河団の数分布を用いた宇宙論パラメータの決定

銀河団は、現在の宇宙における最大スケールの自己重力系であり、宇宙初期における密度ゆらぎの性質を最も直接反映している天体であると考えられる。我々は、X線衛星 ASCA および ROSAT によって得られた銀河団温度関数(温度をパラメータとした数密度の分布関数)の最新のデータを、理論計算の結果と詳細に比較することにより、宇宙の平均密度と初期密度ゆらぎの振幅に対して、従来知られていたよりも厳しい制限を導くことに成功した。

6) X線観測を用いた銀河団ガスの構造と進化の研究

X線天文衛星あすかおよび ROSAT によって観測された過去最大のサンプル数の遠方銀河団の X線データを統一的に解析し、高温ガスの温度および空間分布を精度良く決定した。これにより、赤方偏移 0.5 までの高温ガスの性質には近傍銀河団と比較して大きな進化がみられないことがわかった。また、銀河団のコアの大きさが、特徴的な二つのスケールを持つ傾向があることを発見した。さらに、コアの大きさは、他の様々な銀河団の観測量と強く相関している。特に、銀河団の構造進化を知る上で重要な光度温度関係については、以前から報告されてきた理論モデルと観測結果の矛盾を解明するうえでの手がかりとなること指摘した。また、銀河団中心領域のガスの空間分布や温度分布をこれまでより高い精度で決定するために、Chandra 衛星で観測した CL0024 銀河団の解析を進めている。

7) 銀河の化学的進化とスペクトルの進化

銀河の化学的進化とスペクトル進化の理論的研究では、星の進化モデル、初期質量分布、星生成史などを仮定し、観測されている元素組成比やスペクトルなどと比較することで、銀河進化に制限をつけることを目標としている。本研究では、「我々の銀河系」および「銀河団中の楕円銀河」について、化学的進化モデルを適用し、その有効性を確認した。さらに、銀河のスペクトルの進化についても計算を行い、「青くて暗い銀河の超過問題」について研究を行った。その結果、遠方の銀河においては近傍の銀河について得られている銀河の形態と星生成史との間の相関が成立していない可能性を示した。

8) 銀河団ガスの非重力加熱過程

銀河団中のガスは銀河団形成中の加熱により高温状態になったと考えられている。しかし、最近の X線光度温度関係や、中心での温度構造などの観測結果は、それ以外の加熱過程が存在したことを示唆している。有力な候補である電波銀河による加熱過程を調べた。また、中心での温度構造を説明するためにはどのような加熱過程が考えられるか検討した。

2. 研究業績

1) 論文

M. Nakayama and K. Masai: Properties of photoionized gas in accretion-powered sources *Astron. Astrophys.*, **375** (2001) 328.

D. Yonetoku, T. Murakami, K. Masai, A. Yoshida, N. Kawai and M. Namiki: Nonequilibrium Ionization States of Gamma-Ray Burst Environments *Astrophys. J.*, **557** (2001) L23.

S. Inoue and S. Sasaki: Heating of the Hot Intergalactic Medium by Powerful Radio Galaxies and Associated High Energy Gamma-Ray Emission *Astrophys. J.*, **562** (2001) 618.

S. Sasaki and Y. N. Yamasaki: Scaling Relation to Understand Non-Detection of Cold Gas at the Cluster Center *Publ. Astron. Soc. Japan*, **54** (2002) L1.

T. Kitayama, H. Susa, M. Umemura and S. Ikeuchi: Criteria for the formation of Population III objects in the ultraviolet background radiation *Mon. Not. Royal Astron. Soc.*, **326** (2001) 1353.

T. Kitayama: Formation of primordial galaxies in the UV background radiation *Prog. Astron.*, **19** (2001) 111.

K. Mihara: Revisiting the Faint Blue Galaxy Problem *Publ. Astron. Soc. Japan*, **53** (2001) 611.

N. Ota and K. Mitsuda: X-Ray Study of 79 Distant Clusters of Galaxies: Discovery of Two Classes of Cluster Size *Astrophys. J.*, **567** (2002) L23.

Y. Ikebe, T. H. Reiprich, H. Boehringer, Y. Tanaka and T. Kitayama: A new measurement of the X-ray temperature function of clusters of galaxies *Astron. Astrophys.*, **383** (2002) 773

2) 国際会議報告

D. Yonetoku, T. Murakami, K. Masai, A. Yoshida, N. Kawai and M. Namiki: Iron Structures and Plasma States in X-ray Afterglows, *New Century of X-ray Astronomy* (eds. H. Inoue and H. Kunieda), *Astron. Soc. Pacific Conf.* 251, 504, 2001

S. Sasaki and A. Ikari: X-ray Absorption Features of the Intergalactic Medium, *New Century of X-ray Astronomy* (eds. H. Inoue and H. Kunieda), *Astron. Soc. Pacific Conf.* 251, 482, 2001

T. Kitayama and T. Totani: Forming Clusters of Galaxies as Gamma-Ray Sources (2001) *ASP Conf. Ser. Vol.251, New Century of X-ray Astronomy*, eds H. Inoue and H. Kunieda, p.462

N. Ota and K. Mitsuda, "X-ray Study of Distant Clusters of Galaxies; Structure and Evolution", 2001, *New Century of X-ray Astronomy, ASP Conference Series, Vol. 251*, p478-479

K. Mitsuda and N. Ota, "Cluster Structure and Evolution Implied from A Large Number of ROSAT and ASCA Cluster", 2001, *New Century of X-ray Astronomy, ASP Conference Series, Vol. 251*, p164-167

T. Oshima, K. Mitsuda, N. Ota, K. Futamoto, M. Hattori, A. Yonehara, Y. Sekimoto, T. Mihara, Y. Ikebe, J. P. Kneib and J. M. Miralles, "Probing Distant Universe X-ray Sources with Gravitational Lensing", *New Century of X-ray Astronomy, ASP Conference Series, Vol. 251*, p476-477

3) 学会講演

日本天文学会 2001 年春季年会 2001 年 3 月 25 日-28 日 (千葉大学)

太田直美、満田和久: ASCA・ROSAT による 80 個の遠方銀河団の系統的解析

大島泰、満田和久、太田直美、二元和朗、服部誠、池辺靖、J. P. Kneib、J. M. Miralles: 重力レンズ多重像を持つ BAL クエーサー H1413+117 の X 線観測

日本天文学会 2001 年秋季年会 2001 年 10 月 4 日-7 日 (イーグレ姫路・姫路市市民会館)

太田直美、満田和久: 銀河団の中心領域と光度温度関係

国内研究会

研究会「 γ 線バースト GRB2001」2001 年 8 月 23 日-25 日 (京都大学基礎物理学研究所)

政井邦昭: 鉄スペクトルの起源とアフターグローのダイナミクス

研究会「高エネルギー宇宙物理学の理論的研究」(大阪大学)

政井邦昭: 超新星残骸と銀河リッチ

NRO 小研究会「スニャーエフ・ゼルドビッチ効果の新展開」2001 年 12 月 26 日 本郷、東京大学

太田直美: 遠方銀河団の X 線観測 oral

基研研究会「ブラックホール、重力レンズとガンマ線バースト」

- Narayan 教授を交えたミニワークショップ - 2002 年 3 月 18 日-19 日 京都大学基礎物理学研究所

T. Oshima, K. Mitsuda, N. Ota, K. Futamoto, M. Hattori, K. Mori, A. Yonehara, Y. Ikebe, J. P. Kneib and J. M. Miralles: Chandra Observation of a quadruply lensed BAL QSO H1413+117 at $z=2.56$ oral

国際会議

XVIIth IAP Conference, GASEOUS MATTER IN GALAXIES AND INTERGALACTIC SPACE

June 19-23 (2001), Paris, France

T. Kitayama: "Criteria for the Formation of Population III Objects in the UV Background", poster presentation

IAU Symposium 208, Astrophysical Supercomputing using Particle Simulations

July 10-13 (2001) Tokyo, Japan

T. Kitayama: "Radiation-Hydrodynamical Simulations of Primordial Galaxy Formation in the UV Background Radiation", poster presentation

Japanese-German Seminar 2001, Studies of Galaxies in the Young Universe with

New Generation Telescopes, July 24-28 (2001), Sendai, Japan

T. Kitayama: "Formation of the first generation of galaxies and the cosmological implications", oral presentation

SESTO2001 Workshop "Tracing Cosmic Evolution with Galaxy Clusters" July 3-6 (2001)
Sesto Pusteria, Bolzano-Bozen, Italy

N. Ota and K. Mitsuda: Cluster Structure in a Large Sample of ROSAT and ASCA Clusters poster

The 5th RESCEU International Symposium "New Trends in Theoretical and Observational Cosmology" November 13-16 (2001) Sanjo Conference Hall, University of Tokyo

N. Ota and K. Mitsuda: Two Classes of Cluster Size and the Connection to the L-T Relation poster

4) 学会誌等

天文月報 9月号 Eureka 2001年9月

太田直美: X線による銀河団の構造と進化の系統的な研究 - 銀河団規模での二重構造の発見 -

基礎物理学研究グループ

1. 研究活動の概要

当研究グループは、分野の枠にとらわれない理論物理学の基礎的な研究を目指している。平成14年度に行われた研究の主な結果は以下の通りである。

1) 統一超弦理論に関わる数学的側面の研究

超弦理論は重力を含む無矛盾な統一理論として精力的に研究されてきたが、既存の数学はこれを記述するのに充分ではない。当グループでは、超弦理論の背景にある双対性がソリトン方程式系の持つ対称性と深く関わっていることを示してきた。双対性とは、例えば点と線、粒子と波動、電場と磁場、高温と低温と言うように、異なって(時には矛盾して)見える現象の入れ替えについて成り立つ対称性である。一方、ソリトン方程式系とは非線型でありながら完全に可積分(可解)な方程式系で、それから導かれる物理法則は決定論的である。更に、完全可積分な系は量子化可能な系でもあることが知られている。我々が目指す素粒子と宇宙の統一理論は、完全可積分な系として特徴付けられるものに他ならない。

しかし我々の周りの物理現象を眺めてみると、完全可積分系はすぐには見えてこない。非線型な物理現象では、法則は決定論的でありながら、その解は予測不可能な振る舞いをするカオスが重要な役目を果たしていることがむしろ多い。完全可積分系はその深奥に在って、無秩序を拒否するものである。従って、素粒子の統一理論を理解することは、非線型現象の中に完全可積分系を特徴づけることとして捉えることが出来る。

このような観点から進めた研究のいくつかを以下に挙げよう。

1. 非可換幾何学に基づく考察

統一超弦理論に現われる D-brane と呼ばれる多様体は、その時空構造の中に非可換性が自然に導入される。

(1) 平坦な時空に適用可能な Moyal 量子化は Weyl 型であるが、有限曲率を持った時空の量子化には Berezin 量子化を必要とする。しかし、Berezin 量子化は Wick 型でしか定義されていない。その不完全さを回避するため、Weyl 型の Berezin 積を始めて導入し、更に多重積を経路積分形式にすることにより、積の結合則が回復することを示した。

(2) B 行列模型は時空とゲージ場をダイナミカルに生成する有力な理論として与えられた。時空は B 行列模型の古典解として、ゲージ場はその揺らぎとして与えられる。しかし、既存の B 行列模型は非可換な古典解としては平らな空間しか持ち得ない。そこで我々は曲がった非可換時空の例として球面を古典解に持つ行列模型を 2 つ与えた。

2. 離散可積分系に基づく考察

無限個ある完全可積分な微分方程式は少数の離散方程式の様々な連続極限とみなすことが出来る。その意味で、完全可積分系を特徴付けることは、離散可積分系を特徴付けることに帰着する。

(1) これまで、離散 Lotka-Volterra 系を中心に研究を進めてきたが、得られた結果はそのまま一般化できることが示された。即ち、離散 Lotka-Volterra 系はより広い 2 次元離散戸田方程式から特殊化して得る事が出来る。同様の手続きにより、離散 KdV 方程式や変形 Painlevé 方程式が導かれ、これらが全て同一の理由で可積分系になることを具体的に示した。

(2) 離散写像の系列が、その見方を変えて、初期値を時間変数とする Hamilton 系として理解できる事は既に示した。この新しい力学系の解釈は、可積分系にも、また非可積分系にも適用できるものである。当年度は、自由度が 2 を越える場合にも同様の関係が成り立ち、その結果 Hamilton 系は自然に南部-Hamilton 系に一般化される事を示した。

2) 血液のレオロジー

1. 組織への酸素輸送におよぼす赤血球集合体の影響

ゆっくりと流れる血液中で生ずる可逆的な赤血球集合体形成は、組織への酸素輸送に大きな影響をおよぼす。酸素の透過可能な細い人工管に凝集赤血球サスペンションを流して行われた最近の実験によると、凝集程度が高くなるほどヘモグロビンの酸素飽和度がより高く維持されることが認められた。すなわち、赤血球集合体の形成は酸素輸送の障害になることが示唆された。我々は、より現実に近い数学的モデルを用い、前年度に引き続きこの原因の究明を目指した。血液中の酸化ヘモグロビンからの酸素の解離を考慮に入れて前年度に用いたモデルが拡張された。ここで得られた支配方程式系は非線形微分方程式であり、解析的に解くことが困難であるため、近似的に解を求めるためのいくつかの工夫がなされた。その結果、管の中の定常状態におけるヘモグロビンの酸素飽和度が求められ、実験結果と比較検討された。そして、赤血球の集合の程度が増すにつれ、血液に溶けている酸素の管壁への輸送がより妨げられ、そのためヘモグロビンの酸素飽和度がより高くなるという我々の考えが定量的に示された。

2. 表面に鎖状高分子のついた球粒子の沈降

ヒトの赤血球膜は一般の細胞膜と同じく多数の糖タンパク質をその表面から外側に露出していて、あたかも“ひげ”が生えたような外観を呈している。また、このタンパク質は生理的条件下では解離していて、その結果赤血球膜は負に帯電していることが知られている。最近、このひげの有効長さの違いが赤血球の沈降速度に影響を及ぼすのではないかと示唆される実験結果が報告された。そこで我々は、赤血球の沈降速度に及ぼすひげの効果の存在を定量的に明らかにすることを試みた。赤血球を剛体球粒子とし、表面蛋白質の存在を表面からある一定の距離の領域に一様に分布する点状の負電荷を持つ抵抗体で置き換え、抵抗体は粒子と同じ速度で電解質溶液中を移動するとした。更なるいくつかの近似の下で、流体の従う運動方程式および静電ポテンシャル、イオン分布の従う方程式が解析的に解かれ、流体の速度分布、イオン分布、静電ポテンシャル分布及び粒子に働く力が解析的に求められた。その結果、粒子に働く流体力学的力が抵抗体の密度と抵抗体の存在する領域の大きさの 2 つのパラメータにどのように依存するかが明らかにされ、沈降実験の結果が定性的によく再現された。

3) 流体中の運動の物理

1. 流体中の平板の落下運動

木の葉や紙片のような平らな物体の多様な落下運動の基礎的な研究を行った。完全流体中の 2 次元平板の運動方程式に粘性の効果考慮した運動方程式により自由落下運動の数値計算を行った。2 つの無次元パラメータ (Reynolds 数、無次元仮想質量) の組み合わせにより、究極の運動状態を表す 4 自由度の位相空間内のアトラクターの形状は、周期運動、多重周期運動、カオス運動を示す。そのような運動の中でとりわけ興味深いカオス運動に焦点を当て、周期運動からカオス運動に変化する臨界値近傍の運動の変化を詳しく調べた。周期運動からカオス運動の構造変化が水平方向の速度がゼロとなる瞬間の平板の角度と水平方向の移動距離の Return

Map の解析から水平方向の速度がゼロとなる瞬間が重要なポイントになっていることが判明した。

2. 流体中の微粒子の運動

これまで提案してきた球形微粒子モデルは粒子間に働く力を粒子間距離の逆ベキ展開で表すとまでは少なくとも正しく表現していることを示した。しかしこのモデルは粒子間距離が狭くなると精度が悪くなるのでこの点を改良した微粒子モデルを新しく提案した。この改良版の球形微粒子モデルを用いて 2 次元振動 Poiseuille 流と振動平板上の流れの中に直線状、および円上に配置した粒子群の運動を調べた。振動振幅、振動数、粒子を束縛する束縛力による粒子群の変形の依存性を研究中である。この研究は血液の振動流による赤血球の変形、破壊の要因を解明するための理論的研究の基礎となるものである。

2. 研究業績

1) 論文

Y. Narita, S. Saito, N. Saitoh and K. Yoshida : A Study of Solutions to Discrete Time Lotka-Volterra Equation I, Journ. Phys. Soc. Jpn. **70** (2001) 1246-1255.

S. Saito, N. Saitoh, J. Yamamoto and K. Yoshida : A Characterization of Discrete Time Soliton Equations, Journ. Phys. Soc. Jpn. **70** (2001) 3517-3523.

K. Wakatsuki : Symmetrization of the Berezin Star Product and Multiple Star Product Method, Journal of Physics A **34** (2001) 7701-7712.

S. Iso, Y. Kimura, K. Tanaka and K. Wakatsuki : Noncommutative Gauge Theory on Fuzzy Sphere from Matrix Model, Nuclear Physics B **604** (2001) 121-147.

2) 学会講演

第 24 回日本バイオレオロジー学会年会 2001 年 6 月 7 日 - 6 月 8 日 (慶応義塾大)

村田忠義、立石憲彦、鈴木洋司、前田信治 : 酸素輸送におよぼす赤血球集合体の影響の理論的見積り

日本物理学会秋季大会 2001 年 9 月 17 日 ~ 9 月 20 日 (徳島文理大学)

富山泰伸 : 流体中の平板落下運動のアトラクター .

研究集会「非線形波動現象の理論と応用」 2001 年 11 月 14 日 ~ 11 月 16 日

(九州大学応用力学研究所)

山本純一、齋藤 暁、齋藤革子、吉田勝彦 : 離散時間ソリトン方程式のある性質について

吉田勝彦、齋藤 暁、首藤 啓、山本純一 : 離散写像に伴う Hamiltonian flow について

統計物理理論研究室

1. 研究活動の概要

カオスや複雑系，非平衡系などを対象に，理論と数値シミュレーションの両面から研究している．最近おもに取り組んでいるテーマは以下のようなものである．

1) べき型スペクトルの起源

自然界には，そよ風や電気抵抗のゆらぎなど，スペクトルが周波数 f に逆比例する $1/f$ ゆらぎと呼ばれる現象や，より一般的に，スペクトルが f の逆べきに比例する現象（スペクトルのべき則）が数多くみられる．だが，このような現象の起源は一般的には解明されていない．具体的な物理系のモデルや数学的なモデルを用いて，どのような場合にべき型スペクトルが実現するかを研究している．ことに，ランダムウォークや，時定数の長いデバイ型の緩和過程から得られる $1/f^2$ 型スペクトルが，データの振幅切断というフィルタリング効果により $1/f$ スペクトルに近付くことが解析的取り扱い及び数値実験により示された (Chaos 11)．

2) カオスとノイズ

現実の系は常にノイズに曝されている．カオス系へのノイズの影響，大自由度カオスとノイズの区別，情報伝達においてノイズが積極的な役割を果たす確率共鳴現象などについて研究している．ことに，空間的に広がった系での情報の伝達がノイズによって促進されることを，閾値素子を結合させた系について，解析的に示した．

3) 水滴落下系のカオス

蛇口からしたたり落ちる水滴は，流量を制御すると，周期的な規則正しい落下から，2周期振動やカオス的な不規則な落下へと移り変わる．カオスになる詳しいメカニズムを，流体力学的シミュレーションと，質量の変化するバネという簡単なモデルの両面から調べている．まず，ラグランジュ描像に基づく新しいアルゴリズムにより，比較的少ない自由度で，実験写真と良く一致する水滴の形が得られた．このアルゴリズムにより長時間のシミュレーションが可能になり，流量を制御パラメタとしたときの分岐図も実験結果を良く再現できた．次に，流体力学的計算で得られた知見に基づき，古くから用いられているバネモデルを再構築した．このモデルにより，複雑に見える水滴落下系の振舞が，流量の広い範囲に渡り，基本的には1次元カオス力学系として説明できることが明らかになった．また，カオス的な運動をどのようにして規則的な運動に変えるかという，工学的に重要なカオス制御の問題にも取り組み，弱い周期外力下での，この系の分岐について調べた (J.P.S.J. 71)．

4) 情報処理過程の熱力学

情報の書き込みや消去といった個々の「計算過程」の，どこでどのような熱力学的変化が起こるかを，シミュレーションも行いながら調べている．計算機のような非エルゴード系は，従来のエルゴード系の熱力学の枠には収まらない新しい問題をはらんでいる．そのような系のエントロピーとは何か，それが情報のエントロピーとどのような関係にあるか，などについて研究している．まず，1ビットの計算に要するエネルギーコストの下限は $kT \ln 2$ であるという Landauer の理論を数値実験により検証した．その結果の解析に基づき，非エルゴード系では，熱力学的エントロピー，すなわち観測される発熱やエネルギーコストと直接結び付くエントロ

ピーが，静的な乱雑さや情報の欠如に起因する情報論的エントロピーとは異なるものであるという結論を得た．この結論を敷衍すれば，氷のいわゆる残留エントロピーとは，情報論的エントロピーではあっても，熱力学的状態量としてのエントロピーではないという新しい主張が導かれる (Chaos 11) ．

5) ラチェット系の運動

非対称な周期構造を持ち，偏りのないランダム力により駆動される系はブラウン・ラチェットと呼ばれ，生体内の分子モーターのモデルとして近年盛んに研究されている．熱力学第2法則によれば，単一の熱浴，すなわち白色ガウス過程のランダム力のみでは，正味一方向の運動は実現しない．一方向の運動を惹き起こすために，ランダム力の満たすべきミニマルな条件は何かという問題は面白くかつ重要である．我々は最近，ガウス分布するランダム力が白色ポワソン過程により発生する場合，一方向の運動が可能であることを，ランジュバン方程式に基づいて示した．このランダム力は限りなく白色ガウス過程に近付けることができる．この結果から，ランジュバン方程式における熱浴のモデル化の問題点について検討している．

6) 金融市場のダイナミクスと乱流

金融市場における時間スケールを決めたときの価格差を，乱流における空間スケールを決めたときの速度差に対応させると，これらの量の間には統計的類似性が見られることが知られている．このことに注目して，価格差の確率密度関数 (PDF) の形状やその時間スケール依存性を，最近の乱流のモデルに適用して調べている．このモデルにより，価格差のPDFと，価格差の局所分散 (ボラティリティ) のPDFを関連付け，これらの形状を共に良く再現できること，また，リスクや活性度の指標であるボラティリティは，いわば市場の「温度」に相当する量であることが示された．

7) 生体システムにおける心拍変動の動力学

様々な生物 (ウシガエル，イセエビ，アメリカザリガニ，ハチ，青虫，コガネムシ，バッタなど) の心拍変動の解析を行い，心拍に関わる生体システムのモデル構築を目指している．

2. 研究業績

1) 論文

Z. Gingl, S. Ishioka, D. Choi and N. Fuchikami: Amplitude truncation of Gaussian $1/f^\alpha$ noises: Results and problems, Chaos 11 (2001) 619-623.

S. Ishioka and N. Fuchikami: Thermodynamics of computing: Entropy of nonergodic systems, Chaos 11 (2001) 734-746.

K. Kiyono and N. Fuchikami: Bifurcations induced by periodic forcing and taming chaos in dripping faucets, J. Phys. Soc. Jpn. 71 (2002) 49-55.

2) 学会講演

日本物理学会第56回年次大会 2001年3月22日～25日 (中央大学多摩キャンパス)

加藤浩司，安武哲郎，淵上信子：ポワソン過程におけるラチェットの運動．

淵上信子，加藤浩司，安武哲郎：2自由度ラチェット系の温度．

第51回理論応用力学講演会 2002年1月22日～24日（日本学術会議・東京）

勝山智男，清野健，淵上信子：水滴落下のカオス（招待講演）．

第10回日本バイオイメーjing学会学術集会 2001年10月10日～12日
（国立感染症研究所・東京）

田中克典，清野健，勝山智男，島田一平，山田武範，矢澤徹：ウシガエル心拍の状態空間表示．
（ニコン賞受賞）

3) 学会誌等

清野健，淵上信子：水滴落下系カオスとその制御，機械の研究 2002年1月号, p.96-102.

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。2001年度における研究活動の概要は次の通りである。

1) 確率変動クラスターアルゴリズムのランダム系への応用

多体系を扱う統計力学において、モンテカルロ法は標準的なシミュレーション手法として広く用いられてきているが、我々は最近自動的に臨界点を決定できる新しい確率変動クラスターアルゴリズムを提案した。この方法の有効性は、2次元、3次元のポッツモデルの場合に既に確かめたが、本年はこの方法をいろいろな系に応用した。まず、ランダム系への応用として、具体的に2次元希釈イジングモデルの研究に確率変動クラスターアルゴリズムを用いた。有限サイズのランダム系においては個々のランダムサンプルに依存した転移温度からのずれについてスケールすることが重要で、確率変動クラスターアルゴリズムは正にこれに適している。本研究により、2次元希釈イジングモデルのクロスオーバーと自己平均性の性質を明らかにした。

2) 3次元反強磁性ポッツモデルの相転移

q 状態ポッツモデルは、相転移研究の基本的なモデルであるが、反強磁性系は強磁性系と比べて複雑な相転移を示す。 q が大きな3次元 q 状態反強磁性ポッツモデルの相転移については、異なる結果が報告されてきたが、我々は Wang-Landau により最近提案された新しいモンテカルロ法を用いて研究した。Wang-Landau 法はエネルギー状態密度を精度よく直接決定することができ、大きなサイズの系についても有効である。我々の研究は、 $q = 3, 4$ の場合には有限温度で相転移を示し、 $q = 5$ の場合は転移点が0になること、また $q = 6$ では相転移がないことを明らかにした。また、基底状態の性質、特に残留エントロピーの値を精度良く論じた。

3) 2次元クロックモデルの Kosterlitz-Thouless 転移

連続対称性をもつ XY モデルを q 方向の角度に制限した q 状態クロックモデルは2次元では $q > 4$ の場合に2つの Kosterlitz-Thouless (KT) 転移を持つことが知られている。しかし、KT 転移が臨界点ではなく臨界線を伴う転移であるため、特に低温側の転移について転移点、臨界指数の正確な決定がなされていなかった。本研究で、確率変動クラスターアルゴリズムを用いて、精度良く2つ KT 転移点を決定し、また臨界指数を議論することができた。一方、Wang-Landau 法を用いた研究も実施し、確率変動クラスターアルゴリズムによるものと一致する結果を得た。

4) 2次元スピン系の有限補正の効果

2次元イジングモデルは厳密解が得られているが、有限系の有限補正は、共形場理論とも関連して興味を持たれている。最近、臨界点における1スピンあたりの自由エネルギーと相関距離の有限補正項の展開係数の間にユニバーサルな振幅比があることが指摘された。我々は、サイズが N の系とサイズが $N/2$ の系の自由エネルギーと相関距離の有限サイズ補正項を直接比較し、変形を行なうことにより、ユニバーサルな振幅比を平易に導けることを示した。我々が示したことは臨界点上に限る性質ではなく、2次元イジングモデルの全体的な性質であり、同じユニバーサリティークラスに属する磁場中の1次元量子 XY モデルでも同様の性質を示す。

5) ランダム量子スピン系における臨界現象

ランダムネスが量子臨界現象に及ぼす影響については近年盛んに研究がなされている．通常はランダムネスは秩序を破壊する方向にはたらくが，逆にランダムネスをいれることではじめて秩序があらわれるような場合も知られている．また，ランダムネスに起因した異常な緩和現象なども古典的なモデルから量子力学的なモデルへと主な研究の舞台を移しつつある．2次元反強磁性ハイゼンベルクモデルをランダムに希釈した系について，絶対零度における物理的な転移点が幾何学的な浸透閾値がに正確には対応していないのではないかという予想があったが，我々はその磁氣的性質が磁性原子濃度とともにどのように変化するかを調べた．その結果，従来のいくつかの研究結果からなされていた予想に反し，ゼロ温度臨界点は2次元浸透閾値に正確に一致することが分かった．

6) 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，これまでは正確な数値計算が不可能であり，おぼろげな物理的の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えられつつある．

たとえば，通常双線形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はハルデー問題との関連で1次元の場合に非常に精力的に研究されているモデルである．1次元では多彩で強力な解析的手法が知られているのに対して，2次元以上では解析的手法の適用が非常に限られている為，その性質はこれまであまり調べられてこなかった．われわれはこのモデルを新しく開発したクラスタ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た結果，2次元以上では強磁性と反強磁性相の間に4重極秩序によってのみ特徴づけられる相が存在し，更に3次元以上では有限温度での相転移があることなどを明らかにした．

非常に高い対称性をもつ量子力学的モデルもまた一般には高次の相互作用項をもったスピンモデルとして表現することができる．たとえば，通常の等方的ハイゼンベルクモデルの $SU(2)$ よりもさらに高い $SU(N)$ 対称性をもったモデルに関してわれわれはこのモデルが，単純なグラフによってFortuin-Kasteleyn表現できることを見出した．これは効率的なモンテカルロ法の基礎となるものであり，実際この表現に基づいたモンテカルロは非常にはやく収束することがわかった．これを用いてこのモデルの基底状態での性質をしらべたところ，従来は $SU(4)$ モデルとこれより高い対称性のあるモデルでは基底状態が副格子磁化をもたないものであるとされていたのに反してむしろ有限の副格子磁化を示唆する結果をえた．

7) 交代磁場下でのボンドスピン密度波の安定性

1次元量子系にみられる多くの臨界性は，Tomonaga-Luttinger(TL)液体としての性質を示す．近年，この固定点およびその近傍にある系に対する理解が進歩したことにより，その基底状態および低エネルギー領域の性質を，より精密に記述できるようになった．また個々のモデルに対する数値的取り扱いから得られる有限サイズの系のデータをくりこみ群，および共形場理論をもとに解析することにより，これまで定性的にしか明らかでなかった系の相構造などに関して，極めて精密な情報が得られるようになってきている．本研究では，強相関電子系に見られるいわゆるボンドスピン密度波相に対する交代磁場の効果を研究した．液体状態にあるスピン

系に対しては，交代磁場はそのエネルギースケールの小ささの為、多くの場合レバントとなり，液体状態を破壊するとともに2次転移をもたらすが，スピン電荷分離が起こっている電子系では，スピンの自由度のみならず電荷分布の情報も交代磁場が参照することになるので，スピン系とは異なった振舞いが理論的に期待される．我々は実際，これらの予想を具体的なモデルに対する数値計算を通して定量的に示した．

8) クラスタールゴリズムの拡張と応用

クラスタールゴリズムによるモンテカルロ法は，古典，量子を問わず適用可能な数値的アプローチの1つであり，その可能性に近年注目が集まっている．ここでは，スピン変数の組により記述される系に対して，新しくグラフ変数の組を導入すること「Fortuin-Kasteleyn (FK) マッピング」により，スピンはお互いに独立な幾つかのクラスターに分割され，それらのダイナミクスに従って系の状態更新がなされる．一方で，相互作用のある系に対して，補助変数の組を導入することにより，相互作用のない系の重ね合わせに展開する方法「Hubbard-Stratonovich (HS) 変換」は，電子系のモンテカルロ計算などで，しばしば利用されてきた．本研究では FK および HS 変換を併用することにより，モンテカルロ法の際に生成されるクラスターの統計的性質をコントロールし，それにより，従来の方法では困難のある系に対して効果的な状態更新を可能とするアルゴリズムについて考察している．

2. 研究業績

1) 論文

Y. Tomita and Y. Okabe: Crossover and self-averaging in the two-dimensional site-diluted Ising model: Application of probability-changing cluster algorithm, *Phys. Rev. E* **64** (2001) 036114(1-6).

Y. Okabe and N. Kawashima: Universal relations in the finite-size correction terms of two-dimensional Ising models, *Phys. Rev. E* **64** (2001) 035103(R)(1-4).

C. Yamaguchi and Y. Okabe: Three-dimensional antiferromagnetic q -state Potts models: application of the Wang-Landau algorithm, *J. Phys. A* **34** (2001) 8781-8794.

K. Harada and N. Kawashima: Quadrupolar Order in Isotropic Heisenberg Model with Biquadratic Interaction, *Phys. Rev. B* (2002) **65** 52403-52407.

C. Yasuda, S. Todo, K. Harada, N. Kawashima, S. Miyashita and H. Takayama: Classical correlation-length exponent in non-universal quantum phase transition of diluted Heisenberg antiferromagnet, *Phys. Rev. B* **63** (2001) R140415-R140418.

H. Otsuka: Phase diagrams of the one-dimensional anisotropic extended Hubbard model, *Comp. Phys. Comm.* **142** (2001) 181-185.

H. Otsuka: Extended cluster algorithm in quantum simulations, *Phys. Rev. B* **64** (2001) 020406-020409(R)

2) 学会講演

日本物理学会第56回年次大会 2001年3月27日～3月30日(中央大学)

鶴間賢, 岡部豊: bond fluctuation model による ずり流動下の高分子ブラシのシミュレーション

岡部豊, 川島直輝: イジング系における有限サイズ補正項に対するユニバーサルな振幅比

富田裕介, 岡部豊: 確率変動クラスターアルゴリズムによる3次元希釈イジングモデルの解析

山口智明, 川島直輝, 岡部豊: Flat Histogram 法の改良

石塚潤一: 3-fold anisotropy を持つランダム磁場中における XY モデルの非平衡緩和法による解析

川島直輝, 原田健自: Bilinear-biquadratic 相互作用モデルの量子モンテカルロシミュレーション II

大塚博巳: 変形されたクラスターアルゴリズムの提案と量子スピン系への応用

日本物理学会2001年秋季大会 2001年9月17日～9月20日(徳島文理大学)

富田裕介, 岡部豊: 確率変動クラスターアルゴリズムによる 2D XY model の解析

岡部豊, 山口智明: レプリカ交換ヒストグラム法

山口智明, 岡部豊: Wang-Landau アルゴリズムの反強磁性 Q 状態ポッツ模型への応用

原田健自, 川島直輝: 正方晶異方性のある量子XYモデルにおける4重極秩序

大塚博巳: 拡張クラスターアルゴリズムの1次元電子系への応用

国際会議

DPG-Schule für Physik 2001 — Computational Physics —,
Bad Honnef, Germany, April 1-6, 2001

N. Kawashima: Quantum Monte Carlo and its applications (invited talk)

IUPAP International Conference on Statistical Physics STATPHYS21,
Cancun, Mexico, July 15-21, 2001

Y. Okabe and Y. Tomita: Probability-Changing Cluster Algorithm and Applications

Challenges in Computational Statistical Mechanics in the 21st Century,
Athens, Georgia, USA, July 23-25, 2001

Y. Okabe: Application of New Monte Carlo Algorithms to Random Spin Systems (invited talk)

Conference on Computational Physics 2001, Aachen, Germany 5-8 September 2001

H. Otsuka: New Cluster Algorithm and its Application to the $S=1/2$ XXZ Chain

International Symposium ISSP-Kashiwa 2001 Correlated Electrons,
Kashiwa, Chiba, October 2-5, 2001

H. Otsuka: Extended cluster algorithm in fermion simulations

International Workshop on Materials Simulation — Present and Future —,
Shonan, Japan, Nov. 7-10, 2001

Y. Okabe, Y. Tomita and C. Yamaguchi: Novel Monte Carlo Algorithms and Applications to Random Spin Systems (invited talk)

N. Kawashima and K. Harada: Cluster Algorithms for Spin hamiltonians with High Order Interactions (invited talk)

Y. Tomita and Y. Okabe: Probability-Changing Cluster Algorithm for Two-Dimensional Clock Models (poster)

16th Nishinomiya-Yukawa Memorial Symposium: Order and Disorder in Quantum Spin Systems,
Nishinomiya, Japan, Nov. 13-14, 2001

N. Kawashima: Quantum Monte Carlo (invited talk)

Yukawa Institute for Theoretical Physics International Workshop: Order, Disorder and
Dynamics in Quantum Spin Systems, Kyoto, Japan, Nov. 15-16, 2001

K. Harada and N. Kawashima: Quadrupole order in a quantum XY model with cubic anisotropy (invited talk)

15th Annual Workshop on Recent Developments in Computer Simulation Studies
in Condensed Matter Physics, Georgia, U.S.A, March 11-15, 2002

Y. Tomita and Y. Okabe: Probability-Changing Cluster Algorithm for Two-Dimensional Systems with the Vector Order Parameter

3) 学会誌等

岡部豊: 物理学会のIT化 — 電子化企画調整委員会報告 —, 日本物理学会誌 **56** (2001) 614-616.

非線形物理研究室

1. 研究活動の概要

1) 複素力学系を用いたカオスのトンネル効果の記述

多自由度の量子トンネル効果、とくに、古典系がカオスを発生するような非可積分系でのトンネル効果の研究を継続して行っている。今年度は、(1) エネルギー障壁をもつ非可積分系に対して、記号力学系を構成し、複素半古典プロパゲータに寄与する複素軌道を、記号力学を用いて表す表式を得た。(2) 一般に、複素回転領域の体積が4次元体積をもたないことを数値的に見出し、混合位相空間を持つような非可積分系が複素トンネル軌道がジュリア集合上の軌道でほぼ尽くされる、という予想を得た。

2) 平面ビリヤードの等スペクトル性と内側・外側問題の双対性

「太鼓の形を聞き分けることはできるか？」は、M. Kacによって提出された、平面ビリヤードの等スペクトル問題であるが、90年代の初めにその反例、すなわち、等スペクトルをもつ、形状の異なる平面ビリヤードの存在が示された。一方、Fredholmの積分方程式論を用いることにより、平面ビリヤードのスペクトルを決める際に出てくる積分方程式の行列式は、ディルクレ条件を課した内側領域の固有値問題と、ノイマン条件を課した外側散乱問題のS行列の情報に分解されることがわかっている。このことから、平面ビリヤードの形状は、内側領域に対する固有値の情報以外に、領域を外側から散乱体とみなしたときの散乱問題の情報も同時に持っていることがわかる。今年度は、等スペクトルをもつことが厳密に証明された平面ビリヤードの積分方程式の行列式を直接数値計算することにより、内側固有値列では、形状を聞き分けることができなかつたものでも、外側散乱問題のS行列の情報によって形状を聞き分けることができることを明らかにした。

3) エノン写像における pruning front の決定 と grammatical complexity の計算

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スメールの馬蹄型力学を自然に実現する。ここでは、エノン写像に見出される非自明な双曲領域でのマルコフ分割を、ホモクリニック点の分岐構造の問題と結びつけることによりその系統的・機械的構成法を提案し、エノン写像の pruning front を決定する処方箋を導いた。さらに、得られたマルコフ分割を用いることにより、Wolframが提案した grammatical complexity をエノン写像 one parameter family に対して計算した。

4) 内部自由度をもつ大自由度ハミルトン系の遅い緩和の起源

大自由度極限(マクロな自由度の極限)でのハミルトン系の緩和の問題を実在液相分子に対して議論した。我々の視点は、内部自由度の存在が系の自由度の如何に関わらず遅い緩和過程を生み出す有力な条件になっている、というものであるが、既に確認した液相水分子に加えて、エチルアルコールにおいても我々の作業仮説を支持する数値計算結果を得た。

5) 多項式摂動のある多自由度系の量子動力学

アーノルド拡散など多自由度古典系固有の現象や、動的局在・スカーといった自由度に依存して現れるさまざまな量子局在現象に興味がある。非可積分な量子動力学における多自由度効果を調べるため、非線形格子モデルをもちいた生存確率の数値実験を行い、量子古典対応を考察

した。多自由度 (≥ 3) 量子力学系においても、古典系と比較して局在傾向を示し、その生存確率の揺らぎは、古典のカオスで破壊されきれずに残った相空間の構造を、反映することを明らかにした。

6) 時間空間依存する軌道不安定性と有限時間 Lyapunov 指数

古典力学系がカオス的であるとは、正の Lyapunov 指数を持つ場合をいう。Lyapunov 指数の存在は一般的な仮定のもとで保証されているが、実際の数値実験では、時間の関数としてべき的な、遅い収束を示すことが知られている。この遅い収束の原因は有限時間区間の軌道不安定性を特徴付ける有限時間 Lyapunov 指数の時間空間依存性から理解されている。近年、有限時間 Lyapunov 指数は様々な物理量との関係が明らかにされ、ますます重要になりつつあるが、既存の計算法では一般の多自由度系 (特に縮退した Lyapunov 指数をもつ系) に対しては、正確に求めることが出来なかった。そこで、我々は、一般の多自由度力学系に適用可能な、任意の時間区間の有限時間 Lyapunov 指数を求める数値スキームを開発し、標準写像でこの有用性を確かめた。

7) 弱い測定の半古典解析

半古典論では、古典論で実の値を取っていた物理量が、複素数の値を取りうるようになる。これらが、近似理論の作りだした虚構ではなく、“観測可能な”物理量に直接対応することを示すことを試みた。量子干渉の発現する時間領域以前において、複素数の値を取る軌道は、“弱い測定”と呼ばれる手続きで、原理的に観測可能であることを明らかにした。さらに、弱い値として理解できる、Sokolovski and Baskin のトンネル時間に、半古典解析を適用した。

8) カオス的動力学による量子的な絡み合い

量子的な絡み合い (EPR 相関) は、量子論における基本概念であるばかりでなく、近年では、量子情報処理を遂行するために不可欠な資源と考えられている。しかしながら、絡み合いの動力学による生成の研究はまだ未開拓の状態である。我々は、最も素朴で基本的な場合である、カオス的な写像系を弱く結合させた系での、絡み合いの生成を調べた。強いカオス系では、非線型性を増しても、絡み合いの生成率が飽和することを見いだした。さらに、これを説明する解析理論は、flow 系において、カオスによる絡み合いの抑圧を预言することを明らかにした (分子研: 藤崎氏、東理大: 宮寺氏との共同研究)。

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** (2001) 025202-1-025202-4.

Y. Okada and A. Shudo: Equivalence between isospectrality and isolength spectrality for a certain class of planer billiard domains, J. Phys. A **34** (2001) 5911-5922.

2) 学会講演

日本物理学会第 56 回年次大会 2001 年 3 月 27 日-3 月 30 日 (中央大学多摩キャンパス)

萩原良一, 首藤啓: 双曲性条件を満たすエノン写像における有限型マルコフシフトの構成.

大西孝明, 首藤啓: 超越関数ポテンシャルを持つ系のトンネル集合について.

奥島輝昭: 多項式摂動のある多自由度系の量子力学: 数値スキーム.

日本物理学会 2001 年秋季大会 2001 年 9 月 17 日-9 月 20 日 (徳島文理大学 徳島校)

萩原良一, 首藤啓: 保測エノン写像におけるホモクリニック分岐と pruning.

岡田雄一郎, 首藤啓: 平面ビリヤードにおける等スペクトル問題 III.

奥島輝昭: 多項式摂動のある多自由度系の量子力学: 古典力学との比較.

田中篤司: tunnel 過程に対する滞在時間の半古典評価.

「確率論の総合的研究」科研費シンポジウム「撞球モデル周辺の最近の発展と展望」,
2001. 9. 10-9.12 (広島大)

岡田雄一郎, 首藤啓: Equivalence between isospectrality and iso-length spectrality of a certain class of planar billiard domains.

研究会「化学反応現象に特徴的な非平衡非定常性の解明」2001. 9. 14 (京都テルサ)

首藤啓: 水分子に見られる遅い緩和過程の起源について.

日本生物物理学会第 39 回年会シンポジウム 2001. 10. 6-10.8 (大阪大学豊中キャンパス)

首藤啓: 内部自由度をもつ分子の遅い緩和の起源とハミルトン力学系.

研究会「複雑な多谷ポテンシャル上で生起する力学的諸問題」2001. 11. 19-11. 21 (奈良女子大)

首藤啓: 内部自由度をもつハミルトン系について.

奥島輝昭: 多自由度系の量子力学: 古典力学との比較

科研費研究会「化学反応現象に特徴的な非平衡非定常性の解明 現代化学からみた統計理論の再考」
第一回公開シンポジウム 2002. 3.8 - 3. 10 (分子科学研究所)

首藤啓: 内部自由度をもつ系の遅い緩和過程.

数理解析研究所研究会「近可積分ハミルトン系の数理と応用」2002. 3. 4 - 3. 6 (京大)

首藤啓: 近可積分系の古典量子化条件について.

力学系理論と複雑系の数理、2001. 7. 30 - 8.3 (数理解析研究所)

奥島輝昭: 多項式摂動のある多自由度系の量子力学

国際会議

Japan-Italy joint workshop on: Fundamental problems in quantum mechanics, 2001. 9.27 - 9.29
(Waseda University)

A. Shudo: Julia set describes quantum tunneling in chaos (invited talk)

International conference on “Quantum Chaos: Theory and Applications”, 2001. 7. 8–13,
(Cocoyoc, Mexico)

Y. Okada and A. Shudo: Equivalence between isospectrality and iso-length spectrality of a certain class of planar billiard domains

T. Onishi, A. Shudo, K. S. Ikeda, and K. Takahashi: Tunneling mechanism due to chaos in a complex phase space.

The 7th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New
Technology, 2001. 8. 27–30, (Advanced Research Laboratory, Hitachi, Ltd.)

A. Tanaka: The WKB Method, Complex-Valued Classical Trajectories and Weak Measurements.

5th CREST workshop, Random matrix and random field theory, 2001. 11. 5–8
(The University of Tokyo)

A. Tanaka: A semiclassical approach to Multicomponent Systems.

3) 学会誌等

首藤啓：内部自由度のある古典力学—等分配測をめぐる Boltzmann-Jeans の解釈をめくって—
数理科学 39, (2001) 19-26.

首藤啓, 池田研介：量子エノン写像における複素トンネル軌道数理解析研究所講究録 1220 『複
素力学系と関連分野の研究』(2001) 39-54 .

田中篤司：弱値の半古典論による解釈, 物性研究 77 (2002), 922–925

田中篤司：WKB 法における複素古典軌道と弱い測定, 研究集会 『数理物理の諸問題と力学系』
報告集 35–45.

奥島輝昭：多項式摂動のある多自由度系の量子動力学, 数理解析研究所講究録 1244 『力学系理
論と複雑系の数理』 104–112.

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) CeB₆ の四重極相転移における多重極相互作用と揺らぎ

ここ数年の研究によって、CeB₆ の四重極秩序相の各磁場方向に対する秩序変数が確立し、同時に隠れた八重極モーメントの重要な役割が明らかになった。一方で、転移点近傍での秩序変数の大きな熱揺らぎの存在が実験から示唆されており、揺らぎを無視した平均場による近似解からのずれは定量的には小さくない。従って、基礎モデルがほぼ確立した現段階で、次のステップは、実験との定量的比較を視野に入れ、現実的な多重極相互作用に対して平均場近似を越えたより精密な解析を行う事である。

われわれは、このような状況を踏まえて、現在 CeB₆ における多重極揺らぎと動的励起スペクトルの解析に取り組んでいる。本年度は、まず、四重極相転移点近傍に対して、ランダウ理論の立場で平均場解からの d^{-1} 展開 (d :空間次元) を定式化し、最低次の補正を様々な相互作用の場合について詳しく調べた。その結果、磁場に依存した多重極揺らぎの影響を適切に採り入れることで、実験との一致が著しく改善されると同時に、幾つかの物理量にみられる異常な振舞が自然に説明されることが解った。また、CeB₆ における多重極相互作用の型を実験との定量的比較に基づいて決定し、それが Γ_8 基底に対して導かれた RKKY 相互作用と矛盾のないことを示した。以上の転移点近傍の解析とは独立に、本年度はさらに、ボソン化の方法を用いて中性子散乱実験に対応する多重極モーメントの動的励起の解析を始めており、これまでに既存の実験結果と定性的に一致する結果を得ている。[椎名、酒井、斯波(神戸大)、Thalmeier(MPI-CPfS)]

2) V 酸化物における軌道自由度

V 酸化物中の V イオンは 1 ケまたは 2 ケの t_{2g} 価電子を持ち、様々な結晶構造に応じて多様な軌道自由度の存在が予想されている。なかでも最も有名なのが V₂O₃ であり、半世紀以上にもわたる長い研究の蓄積がある。最近、このいわば古典的な系が、金属絶縁体転移や軌道自由度に関連して再び大きな注目を集め、理論実験両面からその複雑な物性の再検討が始められた。最近、我々は V₂O₃ の絶縁相における磁気構造とそれともなう t_{2g} 電子の軌道状態に焦点を絞り、低温相の秩序変数を明らかにする事に取り組んでいる。その結果、絶縁相における有効ハミルトニアンを用いて、複数の V イオンが関与した新奇な分子軌道の形成が問題の鍵であることを明かにした。分子間相互作用の詳しい解析から、現実的なパラメータ領域で V₂O₃ の複雑な磁気構造が分子軌道秩序とともに安定相となることを示し、その際、格子歪みやスピン容易軸などについても実験との定性的一致を得た。現在、スピン-軌道相互作用や軌道-格子相互作用の影響について、実験との定量的比較の観点から調べている。[椎名、Mila(Univ. de Lausanne), Zhang(Univ. of Cincinnati), Rice(ETH)]

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、占有電子の個数によっては、不対電子によるスピンも現れる。このスピンはリード内の伝導電子と結合し、近藤効果により、温度降下につれ一重項形成に伴う共鳴準位を生じる。低温で急激におきるこの状態変化に対応して、トンネル効果がどのような振舞いを示すか、実験と具体的な形で比較可能な計算は、従来無かった。われわれは、数値線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、最近発表された実験を解析し、実際に近藤効果が現れていることを実証して来た。量子ドット系は多様なデザインが可能であり、固体中の磁性イオンでは不可能であった種々の状況を作り出し、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。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た。その、特徴的振舞が奇数電子系と異っていることから話題となった。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。これに伴う電子の軌道占有状態の急激な再配列が起き、これがトンネル伝導度を増加させる。再配列の自由度を顕に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特徴の起源が解明された。[泉田 (ERATO、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。従来の、温度や磁場等のような一様な外場の変化による転移でなく、電子状態のある一部を、光によりピンポイント的に励起することにより、相転移を発生させている意味で、電子状態の役割がより明確に現れてくる。また、今後、光による物性の制御の可能性を秘める現象として注目される。このような系の振舞いをいかにモンテカルロシミュレーション法にのせ、解析すべきか、様々な研究を行っている。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。類似性と差異を明かにする観点からの研究を行った。有限温度系の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。原因が謎とされた階段状の急激な状態変化は、体積歪のピン止めのはずれによるとの解釈を提唱した。[酒井、石井、小川(大阪大)、越野(理研)]

5) 磁性半導体の磁気転移および電気伝導の理論

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。古くは、ユーロピウムと酸素など VIb 族との化合物、最近では 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をも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。本研究では、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する

ことを実行することにより、計算物理学的方法で信頼できる結果を得た。昇温につれ、RKKY 模型に較べスピン系の磁化が低温から減少を始めることや、磁気転移温度で電気抵抗が際立ったピークを示す、所謂臨界散乱的效果のあること等、実験で見出されていた定性的特徴の現れる機構を明かにした。また、今後の解析的近似理論による計算との比較の基準となり得る結果を導いた。[酒井、徳江、西澤 (GE), 鈴木 (広島大)]

2. 研究業績

1) 論文

W. Izumida, O. Sakai and S. Suzuki: Kondo Effect in Electron Tunneling through Quantum Dot, J. Phys. Soc. Jpn. **7** (2001) 1045–1053.

W. Izumida, O. Sakai and S. Tarucha: Tunneling through a Quantum Dot in Local Spin Singlet-Triplet Crossover Region with Kondo Effect, Phys. Rev. Lett. **87** (2001) 216803-1-4.

O. Sakai and S. Suzuki: Magnetic Interaction in Low Density Carrier Ferromagnetic Semiconductors, Physica E **10** (2001) 148–152.

O. Sakai, S. Suzuki and K. Nishizawa: Study on the Magnetic and Transport Properties of Low Density Carrier Ferromagnetic Semiconductors, J. Phys. Soc. Jpn. **70** (2001) 1105-1116.

O. Sakai, T. Ogawa and K. Koshino: Monte Carlo Simulation for the Photo-induced Low-spin to High-Spin State Transitions - Difference and Similarity with the Thermal Transition -, J. Phys. Soc. Jpn. **71** (2002) 978–988.

R. Shiina, F. Mila, F.-C. Zhang and T. M. Rice: Atomic Spin, Molecular Orbitals, and Anomalous Antiferromagnetism in Insulating V_2O_3 , Phys. Rev. B **63** (2001)144422-1-16.

R. Shiina: Quadrupolar Phase Transition and Field-Dependent Multipolar Fluctuation in CeB_6 , J. Phys. Soc. Jpn. **70** (2001) 2746-2756.

R. Shiina, F. Mila, F.-C. Zhang and T. M. Rice: Theory of Molecular Orbital Ordering and Anomalous Antiferromagnetism in V_2O_3 , Physica B **312-313** (2002) 696-697.

2) 学会講演

日本物理学会春の分科会 2001年3月27日～3月30日(中央大学)

泉田 渉、酒井 治：近藤結合系における局在スピン 1 重項-3 重項状態間のクロスオーバー

徳江 和幸、酒井 治：磁性半導体におけるマグネテックポーラロン効果

石井 正純、酒井 治、小川 哲生、越野 和樹：光誘起による low-spin high-spin 転移における格子歪との結合効果についてのモンテカルロシミュレーション II

日本物理学会 2001年秋の分科会 2001年9月17日～9月20日(徳島文理大学)

椎名亮輔： CeB_6 における四重極相転移と多重極揺らぎ

金田 保則、酒井 治：CeB₆ のエネルギーバンド構造とスピン分極

酒井 治、石井 正純、小川 哲生、越野 和樹：光誘起による low-spin high-spin 転移におけるドメイン核形成 -温度転移との類似と差異

国際会議

International Conference on Strongly Correlated Electrons with Orbital Degrees of Freedom (Orbital 2001), September 11-14, 2001, Sendai, Japan

R. Shiina: Quadrupolar Phase Transition and Field-Dependent Multipolar Fluctuation in CeB₆.

O. Sakai, R. Shiina, Y. Kaneta and H. Shiba: Multipolar interaction between Ce ions and spin polarization in CeB₆

F. Ishiyama and O. Sakai: Double layer structure and optical conductivity of CeSb

International Conference on “Photoinduced Phase Transitions, their Dynamics and Precursor Phenomena”, November 14-16, 2001, Tsukuba, Japan

O. Sakai, M. Ishii, T. Ogawa and K. Koshino: Monte Carlo simulation study on domain formation in the photo-induced low-spin high-spin transition (invited paper).

International Workshop on Materials Simulation -Present and Future-, November 2001, 7-10, Shonan, Japan

O. Sakai and W. Izumida: Numerical Study on Tunneling Phenomena through Quantum Dot with Kondo Effect (invited talk).

International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES'01), August 2001, Ann Arbor.

H. Shiba, K. Ueda, O. Sakai and S. Qin: Structure, effective Hamiltonian and excitation spectrum in charge-ordered Yb₄As₃.

R. Shiina, F. Mila, F.-C. Zhang and T. M. Rice: Theory of Molecular Orbital Ordering and Anomalous Antiferromagnetism in V₂O₃.

3) 学会誌等

なし

高エネルギー実験研究室

1. 研究活動の概要

物質の最小の要素であるクォークとレプトンの性質を実験的に明らかにし、物質の究極像を探求することが、当研究室の課題である。このため、世界の大型加速器を用いた、いわゆる「エネルギーフロンティア」における大がかりな実験を進めると同時に、基礎物理学に大きなインパクトを与えるユニークな非加速器実験にも目を向け、実験室レベルの研究にも取り組んでいる。

1) 電子-陽電子線形加速器 JLC の開発研究

21世紀初頭の高エネルギー物理学におけるエネルギーフロンティア計画として、電子-陽電子リニアコライダー計画が進められている。これは、500GeV～数TeVのエネルギー領域において、素粒子物理の標準理論を精密に検証するとともに、それを越えた新しい現象の探索を目指すものである。わが国が目指す Japan Linear Collider (JLC) 計画のために必要な超低エミッタンスビームの実現のため、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) に加速器試験施設 Accelerator Test Facility (ATF) が、建設された。われわれは、ATFからの超高品質電子ビームを利用し、ビーム物理学の視点からもユニークな研究を進展させている。

1.1) レーザーコンプトン散乱による偏極陽電子の生成

我々はこれまで、将来のリニアコライダー (LC) において、電子とともに陽電子の偏極が、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ことを指摘してきた。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・コンプトン散乱の利用を提案し、ATFを用いて一連の検証実験を進めている。円偏光したレーザー光を ATF ダンピングリングからの電子ビーム (1.28GeV , $7 \times 10^9 e^-/\text{bunch}$) によって後方コンプトン散乱させる。このとき、入射レーザー光を円偏光させておけば、散乱 γ 線はそのエネルギーに依存した偏極度をもつ。これを薄い金属ターゲットに当て、対生成した陽電子の高運動量側をとることにより、高エネルギー (数 10MeV) の偏極陽電子を発生させることができる。レーザー光は YAG レーザーの 2 倍高調波 (波長 532nm) で、最大出力 400mJ/パルスのもので使用した。 γ 線の生成強度を上げるため、レーザーを長焦点距離 (約 430cm) で収束させて電子ビームと衝突させる新型チェンバーを製作した。生成 γ 線強度は $9.3 \times 10^5/\text{パルス}$ と、焦点距離 15cm の旧型チェンバーの約 4 倍になった。 γ 線の偏極度を測定するため、コンプトン散乱断面積のspin方向依存性を利用したポーラリメーターを製作した。鉄ターゲットに磁場をかけて、ターゲット内の電子のspin方向を γ 線の入射方向と平行・反平行にすると、 γ 線が偏極していれば、その透過率に変化が現れる。実験では透過率の非対称度から γ 線の偏極を測定することに成功した。この結果、20ピコ秒という極短パルス γ 線ビームの偏極測定の方法を世界で初めて確立することができた。

1.2) 日米科学技術協力事業

平成 10 年度から、日米科学技術協力事業に採択され、米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) と共同で、光子ビームと電子ビームの衝突技術の高度化を進めている。とくに、レーザー光の逆コンプトン散乱によるピコ秒 X 線生成は、レーザーシンクロトロン光源 (LSS) として、今後広範な研究領域への応用が期待されている。2001 年の実験では、60MeV の電子ビームと 15GW の炭酸ガスレーザーを衝突させ、パルスあたり 1.7×10^8 光子の X 線の生成に成功した。これは、1999 年に我々のグループが達成した値の 7 倍で、この種の X 線源として世界最高強度である。

BNLの炭酸ガスレーザーは1TWの出力を目指して改良中であり、さらなるX線強度増加と電磁相互作用の非線形効果の観測が期待できる。X線強度を増大させる、もう一つのアプローチとして、内径1mmのプラスチック毛細管に放電を起こし、生成したプラズマによってレーザーを焦点サイズのまま20~30mm輸送する(プラズマ・チャンネル)実験に成功した。プラズマ・チャンネル中で逆コンプトン散乱を起こせば、比較的低出力のレーザーを使用しても大強度X線の生成が期待できる。

1.3) 単結晶を用いた陽電子源の開発

e^+e^- リニアコ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。通常の陽電子源では高エネルギー電子をタングステンなどの重金属標的に照射し、電磁シャワーで発生する陽電子を後段の加速管に収集して加速する。入射電子エネルギーに最適化した標的厚さを選び、強度を上げることで陽電子強度を増大させることができるが、標的中での多重散乱による陽電子の角度拡がりや標的の発熱のために、既存の方式の延長では一定の限界がある。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で限界を超える陽電子源を開発することを目的とする。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制動放射を大きく上回る。これによる陽電子生成率の増大は、昨年度行ったKEK-B Linacを用いた8GeVおよび4GeV電子ビームを用いた実験により確かめられた。具体的には、タングステン結晶標的による陽電子の生成率は標的の厚さとともに増大し、9mm厚のときに最大となった。このときの生成率は非晶質タングステン標的による陽電子最大生成率(14mm厚)に対して20~30%増であった。この結果は、同じ陽電子生成率を得るのに非晶質標的に比べて薄い結晶標的で済むことになり、多重散乱の影響や熱負荷の問題を解決する可能性があることを示している。

1.4) 回折放射によるビーム診断法の開発

将来のリニアコライダーやFELの開発のためには超低エミッタンスかつ高強度の電子ビームが必要とされている。電子ビームの特性を計測するために、遷移放射光(OTR)が一般に用いられる。OTRの可視光部の計測によって、電子ビームの拡がりや形状を測定することができる。しかしながら、OTR生成のためには電子ビームが導体標的を通り抜けるため、ビームのエミッタンスが著しく増大し、標的導体の表面が損傷して光学特性が変化したり、場合によってはビーム自体が失われて放射線の問題が発生するなど欠点が多い。リニアコライダーやFELの開発のためにはより高品質の電子ビームが求められており、OTRによる電子ビームの計測にとどまらず、よりすぐれた非破壊的な電子ビーム診断法の開発が必要である。本研究は、回折放射光(ODR)を計測することによる電子ビームの非破壊診断法を開発を行うことを目的とする。ODRは荷電粒子が真空中で導体標的の近傍を通過する際に発生する。ビームは標的の近傍を通過するのであるから、OTRの生成のようなビームに対する破壊的な影響は全く無い。実験はKEK-ATFの1.3GeV電子ビームを使用して行った。単パルス電子ビームをサブミクロンの精度で軌道調整して、標的と相互作用させた。標的導体として厚さ100ミクロンの表面研磨したアルミ薄膜を用いた。この標的導体をステップモータで位置制御することができる移動架台の上に取り付けた。標的導体と電子ビームは45度の角度で相互作用するように設置し、電子ビームが入射する標的側から回折放射光または遷移放射光が電子ビーム方向と90度方向に放射されるものを光学フィルターを通して微弱光検出用CCDカメラで計測した。ビームを標的に照射した場合、OTRの特徴であるリング状の光信号を観測した。OTRについては理論的・実験的に良く理解されているため、ビーム制御系の動作とバックグラウンドの性質や光学

系が正しく機能しているかどうかのチェックを行うことができた。標的を移動して OTR および ODR の標的エッジ付近での振る舞いを測定して、理論計算の予測と比較して良い一致を示すことがわかった。本実験による OTR/ODR の観測は、世界で始めて成功したものと言うことができる。

2) 陽電子科学の推進

これまで我々は、陽電子を用いたユニークな研究として、基礎物理法則の検証について多くの実績を蓄積してきた。とくに、電子あるいはポジトロニウムとレーザービームとの衝突反応の最先端技術に基礎を起きつつ興味ある基礎研究を進めている。

2.1) ポジトロニウムのレーザー冷却

電子と陽電子の束縛状態であるポジトロニウム (Ps) は、あらゆる原子の中でもっとも質量の小さいエキゾチック原子であり、ド・ブロイ波長が長いために、通常原子に比べてはるかに高い温度でボーズ・アインシュタイン凝縮 (BEC) を起こす。しかし Ps の寿命はスピン三重項 (オルソポジトロニウム) で 142ns と短いため、100ns オーダーの時間内に急速に冷却しなければならないという技術的な困難が伴う。我々は、Ps の BEC のための基礎研究として急速レーザー冷却法の開発を進めている。この研究の第一歩として、熱エネルギーを持った Ps (熱脱離 Ps) の生成と、レーザーを照射して Ps を $1s \rightarrow 2p$ 励起する実験を行った。パルス化した陽電子ビームを金箔ターゲットに照射し、生成される Ps の速度を time-of-flight 法で測定した。ターゲットの温度を 300K から 1000K まで変化させ、Ps の速度分布をフィットしたところ、陽電子仕事関数に相当するエネルギー (数 eV) をもった Ps の他にターゲットの温度と一致する Maxwell-Boltzman 分布をした熱脱離 Ps の生成が確認できた。また、ターゲットの温度が高いほど、熱脱離 Ps の生成数が多くなることが分かった。この熱脱離 Ps に Cr:LiSAF レーザーの 4 倍高調波 (波長 243nm) を照射して、Ps の $1s \rightarrow 2p$ 励起を行った。Ps に 500Gauss 程度の磁場をかけると、 $2p$ 準位のスピン一重項とスピン三重項が混合する。結果として、レーザーによる $1s \rightarrow 2p$ 励起を通じて $1s$ 準位のスピン三重項からスピン一重項への移行が起こり、Ps の 2 光子崩壊率が増加する。 γ 線エネルギーの測定から 2 光子崩壊率の増加を観測し、Ps のレーザー励起が確認できた。

2.2) ポジトロニウムの 4 光子、5 光子崩壊過程の研究

未だ検証されていない α^7 と α^8 の高次 QED 過程の検証を目的としている。基底状態ポジトロニウムのハイパーファインエネルギー差において、 α^6 までの QED 計算値が実験値と 3 標準偏差で一致しないとの報告がある。我々が以前から観測してきたポジトロニウムの 4 光子、5 光子崩壊過程の測定を、さらに高統計且つ高 S/N で測定を行う為に準備研究を行っている。検出器外部の線源より検出器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陽電子を導く永久磁石を利用した高効率陽電子ビーム輸送系を製作、さらに検出器を大立体角に改造して検出効率の向上を目指す。

3) 電子-陽子衝突型加速器 HERA による ZEUS 国際共同実験

HERA 加速器は 2000 年 9 月に開始された改造により、これまでの 5 倍以上のルミノシティを得ることができるようになる上に、電子を縦偏極させて右巻きあるいは左巻きの電子と陽子との衝突実験が可能となる。これにより今までに比べて格段に良い精度で、電弱相互作用パラメータの精密測定や、右巻き電流の存在に対する上限を決定することや、新現象の探索を行うことができる。そのためには電子の偏極度を 2% 以下の精度で決定しなければならない。偏極度の測定法は、偏極した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ビームを正面衝突させると後方散乱された線の上下の位置が電子ビームの偏極度に応じて、非対称となること

を用いる。したがって、偏極度を精度良く測定するには線の上下位置の精密測定が必要である。後方散乱された線の位置の測定は上下に分割されたカロリメータで行うが、上下のカロリメータからの信号差を位置に変換するために別途に行う校正曲線の測定値を用いる。校正曲線には系統誤差が伴うため、これまでの偏極度測定精度の限界を与えていた。従来の偏極度測定の系統誤差の原因を詳細に検討した結果、カロリメータの前面にシリコンマイクロストリップ素子を用いた位置感応光子検出器を設置した。これにより、カロリメータからの信号差測定と同時に、シリコンマイクロストリップ素子の位置測定値を得ることが出来、校正曲線を常時測定することができることになり、系統誤差を大幅に減少させることができる。一方、シリコンマイクロストリップが長期にわたる使用で放射線による損傷を受け、性能が劣化した場合の位置決定精度を監視するために、シンチレーションファイバーを用いたトリガーシステムを製作してマイクロストリップ検出器の前面に設置した。これらの性能を調べるため、2001年7月に DESY 電子シンクロトロン、同年8月に CERN の SPS ビームを用いてビームテストを実施した。DESY でのテストでは、可動式シンチレーションファイバー検出器の動作を確認し、シリコンマイクロストリップの読み出しに成功した。解析の結果、必要とされる位置精度が2つの位置検出器から得られることが判った。CERN のテストでは、DESY より高いエネルギーの電子ビームを用いてテストを行い、それぞれ期待どりの性能であることを確認した。12月にはこれらの検出器をカロリメータ本体と一体としてエンクロージャーに収納して HERA 加速器のトンネル内に設置した。HERA 加速器の試験運転中にビームによる信号データを取得して動作を確認するとともに、計測プログラムの総合的な組み上げを行って本番実験に備えている。

4) 超高エネルギーニュートリノ検出器の基礎研究

活動銀河核等から放出され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) を検出することで、他の観測手段では得られない超高エネルギーニュートリノの相互作用の研究とともに宇宙に於ける巨大エネルギーの発生と粒子加速機構についての知識を得ることが出来る。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、巨大な質量 10^9 トン以上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多数の过剩電子が発生し、それらが干渉効果により電波領域のチェレンコフ効果 (アスカラヤン効果) により検出可能なほど増幅されることが予測される。電波が岩塩中を減衰せずに長距離を伝搬すると比較的少数の電波検出器で巨大な質量の媒質をニュートリノ検出器として利用出来る。電波に対して透明度は岩塩鉱によって大きく異なる。世界数ヶ所の岩塩試料を振動空洞共振器法により吸収長測定を行った。その結果、良好な岩塩試料に於いては 94MHz で 330m 以上の吸収長が得られ、岩塩鉱を超高エネルギーニュートリノ検出器の電波伝播媒質として利用することの可能性を示した。一方、アスカラヤン効果を確かめる為に、高エネルギー電子加速器パルスビームを岩塩に照射した時の電波検出の予備実験を行い、加速器環境でのノイズ対策を進めた。

5) メカノ核反応

重水素ガス雰囲気中に於ける圧電物質リチウムニオベートの粉碎過程での微量中性子発生実験を低バックグラウンド環境で行った。系統誤差を低く抑制するために対照実験として核反応を起こさない軽水素雰囲気中の実験も行いつつある。

2. 研究業績

1) 論文

H. Iijima, T. Asonuma, T. Hirose, M. Irako, T. Kumita, M. Kajita, K. Matsuzawa and K. Wada: Laser cooling system of ortho-positronium, Nucl. Instr. Meth. A455 (2000) 104-108.

M. Kobayashi, Y. Usuki, M. Ishii, N. Senguttuvan, K. Tanji, M. Chiba, K. Hara, H. Takano, M. Nikl, P. Bohacek, S. Baccaro, A. Cecilia, M. Diemoz, A. Vedda and M. Martini: Scintillation characteristics of PbWO₄ single crystals doped with Th, Zr, Ce, Sb and Mn ions, Nucl. Instr. Meth. A465 (2001) 423-439.

H. Iijima, T. Asonuma, T. Hirose, M. Irako, K. Kadoya, M. Kajita, T. Kumita, B. Matsumoto, N.N. Mondal and K. Wada: Production of Thermal Positronium for Laser Cooling of Ortho-Positronium, Material Science Forum 363-365 (2001) 670-672.

H. Iijima, T. Hirose, M. Irako, M. Kajita, T. Kumita, H. Yabu and K. Wada: Monte Carlo Study of Ortho-Positronium Laser Cooling, J. Phys. Soc. Japan, 70 (2001) 3255-3260.

R. Hamatsu, H. Kojima, A. Masuyama et al.: Experimental Study of Positron Production from Crystal Targets by 0.6-1.0 GeV Electrons, Nucl. Instr. Meth. B183 (2001) 459-475

T. Hirose, R. Hamatsu, P. Karataev et al.: Feasibility of optical diffraction radiation for a non-invasive low-emittance beam diagnostics, Nucl. Instr. Meth. A472 (2001) 309-317

ZEUS Collaboration; J. Breitweg et al.: Measurement of open beauty production in photoproduction at HERA, The European Physical Journal C 18 (2001) 625-637

ZEUS Collaboration; J. Breitweg et al.: Measurement of dijet production in neutral current deep inelastic scattering at high Q^2 and determination of α_s , Phys. Lett. B507 (2001) 70-88

ZEUS Collaboration; S. Chekanov et al.: Study of the effective transverse momentum of partons in the proton using prompt photons in photoproduction at HERA, Phys. Lett. B511 (2001) 19-32

ZEUS Collaboration; S. Chekanov et al.: Multiplicity moments in deep inelastic scattering at HERA, Phys. Lett. B510 (2001) 36-54

2) 学会講演

第 38 回理工学における同位元素研究発表会 (日本青年館) 2001 年 7 月 11 日 ~7 月 13 日

門屋謙太郎、広瀬立成、五十子満大、汲田哲郎、飯島北斗、阿曾沼孝仁、和田数幸、松本文平、中野平、N.N.Mondal : Time-of-Flight 法による熱脱離ポジトロニウムの速度測定と陽電子パルス化装置の効率向上

千葉雅美、西村拓郎、尾形亮助、中川 純、津川天祐、中川 純: 永久磁石陽電子輸送系を用いた電子・陽電子多重光子消滅予備実験

千葉雅美、藤井政俊、白川利明、大久保賢、内海倫明、伊藤理恵子、榎本泰久、白石文夫: 重水素ガス中での LiNbO_3 破碎過程における微量中性子発生の検証

日本物理学会 2001 年秋季大会 (徳島文理大学) 2001 年 9 月 17 日 ~9 月 20 日

門屋謙太郎、五十子満大、汲田哲郎、中野平、広瀬立成、松本文平、和田数幸、N.N.Mondal : 金属表面からの熱脱離オルソポジトロニウム放出率の温度依存性

日本物理学会 2001 年秋季大会 (沖縄国際大学) 2001 年 9 月 22 日 ~9 月 25 日

神谷好郎、広瀬立成、汲田哲郎、浦川順治、横谷馨、大森恒彦、鷲尾方一、柏木茂、Igor Pogorelsky、Ilan Ben-Zvi、Karl Kusche、Vitaly Yakimenko: レーザー・ビーム散乱による高輝度 X 線生成実験

飯村隆志、青木哲、福田将史、広瀬立成、近匠、栗原良将、奥木敏行、大森恒彦、酒井いずみ、浦川順治、鷲尾方一: JLC のための偏極陽電子開発 X - レーザー・電子衝突におけるビーム診断 -

青木哲、福田将史、広瀬立成、飯村隆志、栗原良将、奥木敏行、大森恒彦、酒井いずみ、浦川順治、鷲尾方一: JLC のための偏極陽電子開発 XI - 偏極度測定装置用電磁石の最適化 -

福田将史、青木哲、広瀬立成、飯村隆志、栗原良将、奥木敏行、大森恒彦、酒井いずみ、浦川順治、鷲尾方一: JLC のための偏極陽電子開発 X - 偏極度測定装置の評価 -

津川天祐、千葉雅美、西村拓郎、尾形亮助: 永久磁石陽電子輸送系を用いた電子・陽電子 4 光子消滅予備実験

松澤邦裕、浜津良輔、犬塚将英、広瀬立成ほか: HERA 電子ビームポラリメーターの改良と性能の評価

笹原和俊、浜津良輔ほか: タングステン単結晶を用いた陽電子生成実験のシミュレーションによる解析

ビーム物理研究会 2001 (Spring8) 2001 年 12 月 5 日 ~12 月 7 日

広瀬立成: 電子レーザー衝突技術の高度化

神谷好郎: CO_2 レーザーの Compton 散乱実験: 高輝度 X 線生成および非線形 QED の検証

犬塚将英: HERA における電子ビーム偏極度測定

笹原和俊: タングステン単結晶を用いた陽電子源の開発 II

日本物理学会第 57 回年会 (立命館大学) 2002 年 3 月 24 日 ~3 月 27 日

中野平、五十子満大、門屋謙太郎、汲田哲郎、広瀬立成、松本文平、和田数幸、N.N.Mondal : 熱脱離オルソポジトロニウムの生成

和田数幸、五十子満大、門屋謙太郎、汲田哲郎、広瀬立成、松本文平、N.N.Mondal：熱脱離オルソポジトロニウムのレーザー励起

大森恒彦、青木哲、飯村隆志、浦川順治、奥木敏行、柏木茂、神谷好郎、汲田哲郎、栗原良将、酒井いずみ、常見明良、広瀬立成、福田将史、横谷馨、鷲尾方一：電子ビーム・レーザービーム衝突技術の高度化 I - JLC 偏極陽電子源の概念設計 -

青木哲、飯村隆志、浦川順治、大森恒彦、奥木敏行、栗原良将、酒井いずみ、土橋克広、広瀬立成、福田将史、横谷馨、鷲尾方一：電子ビーム・レーザービーム衝突技術の高度化 II - JLC 偏極陽電子源におけるキャプチャーシステムの最適化 -

飯村隆志、青木哲、浦川順治、大森恒彦、奥木敏行、栗原良将、近匠、酒井いずみ、広瀬立成、福田将史、鷲尾方一：電子ビーム・レーザービーム衝突技術の高度化 III - 長焦点チェンバーによる高輝度ガンマ線生成実験 -

福田将史、青木哲、飯村隆志、浦川順治、大森恒彦、奥木敏行、栗原良将、酒井いずみ、広瀬立成、鷲尾方一：電子ビーム・レーザービーム衝突技術の高度化 IV - ガンマ線偏極度測定装置の開発 -

神谷好郎、広瀬立成、汲田哲郎、浦川順治、横谷馨、大森恒彦、柏木茂、鷲尾方一、Igor Pogorelsky、Ilan Ben-Zvi、Karl Kusche、Vitaly Yakimenko：プラズマチャンネルを用いた CO₂ レーザーの Compton 散乱実験

笹原和俊、浜津良輔ほか：タングステン単結晶を利用した高強度陽電子源の可能性

国際会議

21st ICFA Beam Dynamics Workshop on Laser-Beam Interactions, June 11-15, 2001, Stony Brook, USA

K. Wada: Study of ortho-positronium laser cooling

T. Kumita: Experimental study of nonlinear laser-beam Thomson scattering

I. Sakai: Polarized gamma-ray generation through Compton back scattering of a circularly polarized laser photon off a relativistic electron

11th Workshop on Low Energy Positron and Positronium Physics, July 25-27, 2001, Santa Fe, USA

T. Kumita: Study on laser cooling of ortho-positronium

International Symposium of Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures, Sept. 10-14, 2001, Lake Aya, Altai Mountains, Russia

P. Karataev: Status of the Optical Diffraction Radiation experiment at KEK-ATF extraction line

P. Karataev: Grating optical diffraction radiation - promising techniques for non-invasive beam diagnostics

Second Asian Particle Accelerator Conference, Sept. 17-21, 2001, Beijing, China

M. Fukuda: Polarimetry of Short Pulse Gamma-rays and Positrons

International Symposium on Laser Aided Plasma Diagnostics, Sept. 24-28, 2001, Fukuoka, Japan

T. Hirose: Ultra-bright Laser Synchrotron Source for Generation of Polarized Positron Beams of Future Linear Collider

First National Center for Theoretical Sciences Workshop on Astroparticle Physics, Dec. 6-9, 2001, Hsinchu, Taiwan

M. Chiba: Measurement of attenuation length in rock salt and limestone in radio wave for ultra-high energy neutrino detector

International Workshop on Linear Collider, Feb. 4-8, 2002, Stanford, USA

M. Fukuda: Polarization measurement of short pulse gamma-rays produced at KEK-ATF

T. Muto: Measurement of Optical Diffraction Radiation

3) 著書、訳書、編集等

最新情報・用語事典「データパル 2001」(小学館) 広瀬立成(分担執筆)

「入門・超ひも理論」(PHP 出版) 広瀬立成

宇宙物理実験研究室

1. 研究活動の概要

本研究室は、2001年4月に石田助教授を新しいスタッフに迎え研究の幅も大きく広がった。2005年の再打ち上げを目指してX線天文衛星 Astro-E2 計画が発足し、本グループが参加する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) などの設計が進められた。観測面ではこれまでの「あすか」に加えて、Chandra 衛星のデータ解析も始まり、銀河系内外の天体についてさまざまな成果が得られた。実験では、宇宙研等との共同による TES 型マイクロカロリメータの開発 (エネルギー分解能 13 eV を実現)、マグネティックカロリメータや新しい断熱消磁冷凍機の開発、キャピラリー光学系と角分解能を高めた X 線望遠鏡の開発などが進められた。

1) 「あすか」による銀河・銀河団の観測

「あすか」による銀河団の温度分布、重元素分布のマッピング観測の解析では、Perseus の温度分布の結果をまとめ *Ap. J. Letter* に発表した。中心から東に半径 1 Mpc にも及ぶ巨大な低温領域があり、それを取り巻くようにリング状の高温領域が発見された。一方、Chandra 衛星による銀河団 A1060 の観測提案が採択され、6月に観測が実施された。CCDによる高分解能イメージは、銀河団中心の2つの銀河 NGC3309 と NGC3311 が、可視光よりもコンパクトな X 線発生領域を持つことを初めて示した。銀河団中の高いガス圧によって星間ガスが閉じ込められている一方、残されたガスの量は少ないので、蒸発あるいは stripping も進んでいると考えられる。一方、銀河団全体のガスの分布をもとに、重力ポテンシャルの構造を調べたところ、1成分のモデルでは、 β モデルでも NFW モデルでも合わせることができず、半径 60 kpc に段差が残ってしまうことがわかった。この半径は中心銀河よりも大きく、ダークマター分布があるスケールに集まるような性質を持つ可能性もあり、引き続き詳しく研究する必要がある。なお、AWM 7 については XMM-Newton の観測が採択されており、2002年夏に実施される予定である。

2) 「あすか」による X 線背景放射の観測

「あすか」によって行なわれた多数の観測のデータから、X線背景放射の全天に亙る大局的な性質を調べた。大橋を中心として開発した「あすか」の GIS 検出器は 3 分角の適度な空間分解能と直径 50 分角の広い視野に加え、荷電粒子によるバックグラウンドが極めて低いという特長があり、背景放射の強度やエネルギースペクトルを精度よく測定するのに優れている。本研究では、まず全 368 点の観測から、視野内、および周囲に背景放射の解析に影響するような明るい X 線源がなく、かつ露出時間が 2 万秒以上という条件に合う 91 観測を選びだし、続いて、全視野の平均と各視野ごとの X 線スペクトルを系統的に解析した。その結果、X 線背景放射の絶対強度として $(6.4 \pm 0.6) \times 10^{-8} \text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$ という値が得られた。この値から、2–10keV バンドでの X 線背景放射のうち、73 ~ 96 % が点源として分解されていることが初めて明らかになった。また、91 個の観測の視野ごとの背景放射強度のばらつきから、背景放射に寄与している個々の X 線源のエネルギーフラックス S と、 S 以上のフラックスを持つソースの個数 N の間の関係 ($\log N - \log S$ 関係) を求めることができる。得られた $\log N - \log S$ 関係は 91 視野で共通と考えて矛盾はなく、ばらつきの上限值は 4% と求められた。以上の結果は、久志野の学位論文としてまとめられた。

3) 激変星の観測

Nova Velorum 1999

矮新星 (Nova) は、白色矮星と低質量主系列星の連星系であり、主系列星の重力圏から溢れたガスが、白色矮星の表面で熱核反応を起こす天体である。我々は、1999年5月20日に矮新星爆発を起こした V382 Vel (Nova Vel 1999) を「あすか」と米国の *RXTE* 衛星を用いて、爆発直後から2か月に亘って断続的に観測した。その結果、矮新星爆発から僅か5日後に、温度1億度の熱制動放射によるX線を検出することに初めて成功した。爆発直後の矮新星は、厚く冷たいガスに覆われているため、X線は観測されにくいと考えられてきたが、今回の発見により、この定説が覆されたことになる。

V834 Cen

白色矮星と重力圏を満たしている低質量主系列星からなる連星のうち、白色矮星が 10^6 G よりも強い dipole 磁場を持っているものを強磁場激変星と呼んでいる。主系列星からのガスは、磁場で掃き集められて、白色矮星の磁極に集中し、定在衝撃波による加熱される。衝撃波でのプラズマの温度は1~4億度に達し、これがバルクには減速しながら白色矮星表面に軟着陸する。この冷却は光学的に薄いプラズマからの熱輻射で行なわれ、ヘリウム様、あるいは水素様に電離した鉄からの特性 $K\alpha$ 線が放射されるという特徴を持つ。プラズマの密度は $10^{16-18} \text{cm}^{-3}$ 程度になるため、バルクな速度勾配と共鳴散乱によって、鉄の $K\alpha$ 線が磁力線に平行な方向にビーミングされることが期待される。「あすか」による強磁場激変星 V834 Cen を観測したところ、我々の期待通り、鉄 $K\alpha$ 線のビーミングを初めて十分な精度で検出することに成功した。また、ビーミング量を定量的に評価することにより、衝撃波後面のプラズマの大きさや、閉じ込め空間の形状に制限がつけられることも明らかになった。

4) 「あすか」による球状星団の観測

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。連星系のうち、片方の星が高密度天体(ブラックホール、中性子星、白色矮星)であり、もう片方が重力圏を満たす主系列星の場合、質量降着によってX線を放出することが期待される。この考えに基づき、「あすか」によって観測された近傍の球状星団 NGC6397 と M4 とデータ解析を行なったところ、双方の球状星団の潮汐半径内に、それぞれ10個程度のX線源が検出された。しかしX線源の空間分布を見ると、星団コアの明るさは、NGC6397の方がM4よりも一桁近く明るくなっていることがわかった。NGC6397はM4よりも力学的進化が進んでおり、コア部分により多くの質量が集中していることが可視光での観測からわかっている。今後は、X線をプローブとして、球状星団の力学的進化と連星系形成の関係について研究をすすめることにしている。

5) TES カロリメータおよび SQUID の開発

昨年度に引き続き宇宙研、早稲田大学、セイコーインスツルメンツとの共同で TES 型カロリメータ (Transition Edge Sensor) の開発を進めた。早稲田大学では電子ビーム蒸着によって1 mm 角の Ti-Au (100/120 nm) 二層薄膜を温度計とし、Sn メッキによりX線吸収体を取り付け、X線信号の測定に成功したが、エネルギー分解能は100 eV 以上と悪かった。薄膜の超伝導転移温度は約0.22 K、抵抗変化の勾配を表す α は250程度であったが、吸収体と TES 素子の間の残留物のために熱特性が悪化していたと考えられ、製作方法の改善を検討している。一方、セイコーインスツルメンツによりスパッター法で製作された素子は、Ti/Au の厚みが40/110 nm、転位

温度は 105 mK、 $\alpha \sim 100$ であった。X線吸収体は Au をスパッターでつけたもので 0.3 mm 角、300 nm 厚 (5.9 keV で約 24% 吸収) である。この素子により Fe-55 (0.2mm ϕ にコリメート) に対するエネルギー分解能 12.6 ± 0.6 eV が得られ、ベースラインのゆらぎは 10.7 eV であった。実際 Mn-K α 1 と K α 2 をほぼ分離することができている。分解能的には大きな躍進であり、目標とする 3 eV に大きく近づいた。素子の再現性も極めて良く、同等の性能の素子を作る技術は確立したと言える。今年度は都立大に専用のスパッター装置が導入され、年度の終わりに稼働をはじめた。これにより膜質をさらに改良することにも目処がついた。今後は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。

6) 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 γ 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可能性がある。本年度は赤外線を真空中に導入し、金を熔融する装置を作成し、希土類である Er を金で希釈する実験を開始した。Er の希釈量については、RF-SQUID 装置を用いて磁化を測定することで 10ppm 程度の精度で定量的分析を行うことができる。予想通りではあるが、熔融時間が短い場合は、サンプル中での Er 濃度が一様ではないことが確認できた。濃度の分析を行ないつつ、希釈を複数回繰り返すことで、100ppm オーダーの希釈が可能となった。また ^3He を用いた小型冷凍器の内部に多段型 SQUID アンプの設置を行ない、磁場印加ができるシステムを構築した。

7) キャピラリ光学系の天体観測への応用の検討

キャピラリは、幾何学的に収束する形状を持つ細管の内壁で X線を反射し、X線を集光する光学系である。本研究では X-ray Optical Systems 社製のキャピラリを入手し、これの性能評価を行なった。集光システムは、太さ 10 μm 程度のボロン・ガラスを多数束ねて 200 μm 程度の太さにしたものを単位として、これを収束形状に束ね、管内壁で X線を多数回反射させて焦点に導くというものである。X線入射面の形状は 1 cm \times 1 cm 程度の正方形であり、焦点距離は約 100mm である。本研究では、このキャピラリに、様々な角度から平行 X線を入射させることで焦点面で集光特性を調べた。その結果、光軸上での検出効率は 2–15 keV の範囲で 20 ~ 30 %、焦点面でのスポットサイズは、X線の入射方向によらず 0.6 mm 程度視野の広さ視野 30 分角と、極めて良好な性能を有することがわかった。近未来の宇宙観測への応用として、このキャピラリとカロリメータの組合せることで、近傍の宇宙に広がっていると考えられる温度数百万度の薄いプラズマの空間分布を観測し、近傍の宇宙で現在観測にかかっていないミッシング・バリオンの量を求めることが考えられる。

8) 高い空間分解能を有する X線望遠鏡の開発

X線望遠鏡には、充分滑らかな金属面による全反射を利用する光学系を用いるのが一般的である。しかし、電磁波に対する物質の屈折率は、X線波長帯で 1 より僅かに小さい程度であるため、X線を全反射させるには、金属面スレスレ (角度にして 1 度程度以下) に X線を入射させなければならず、反射鏡の実面積に対する集光の有効面積は 1% 以下になってしまうのが普通である。わが国の X線望遠鏡は、この欠点を補うために、極めて薄いアルミニウムの基板に金を蒸着したものを同心円状に多数積層することで有効面積を稼いできた。しかし薄いアルミニウムの反射鏡を精度良く支持することが難しく、結像性能は、理論限界の 15 秒角に対して、その 8 倍の 2 分角程度にとどまっていた。本研究ではこの現状を打破すべく、反射鏡基板を望遠鏡の中で精度良く支持する機構の開発に着手した。その結果、反射鏡の母線に沿って、およ

そ 10g/cm の加重をかけると、表面のうねりをこれまでの $5\mu\text{m}$ 以上から $1\mu\text{m}$ 程度以下に抑えることができ、これによって結像性能を、原理的には現状の 2 分角から 1 分角以下に抑え込めることが確認された。今後は、X 線望遠鏡の試験モデルを製作し、実機で結像性能の向上を確認し、2010 年頃に打ち上げられる次世代 X 線天文衛星への搭載を目指すことになる。

9) Astro-E2 への検討

2005 年 1 ~ 2 月期の打上げを目指した Astro-E2 開発が、2001 年 4 月よりスタートした。都立大グループは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) の開発を担当している。本年度はこれらの設計の検討を行なうとともに、製作も開始した。

FW の電氣的デザインは前機 Astro-E と同じであるが、機械部には若干の変更が加えられる。まず、Astro-E ではフィルタ要素の種類は 6 種類あったが、これを through hole、透過率 10 %、ベリリウム $300\mu\text{m}$ の 3 種類に減らし、それぞれのフィルタ要素について、中心に、XRS のエネルギー較正用線源 ^{55}Fe (5.9keV) を搭載するものと、しないものの 2 種類を用意した。この結果、それぞれのフィルタ要素につき、較正用線源 on と off の 2 種類の観測条件が可能になる。フィルタ要素は既に製作に入っている。また、through hole については、XRS 検出器のゲインの非線形性を考慮し、 ^{55}Fe の他に ^{41}Ca 線源 (4.1keV) も搭載することが決まった。この他、地上での較正試験を可能にするため、XRS デュワーの入射窓に Be 膜を用いることとし、デザインを固めるとともに実際の製作も行なった。

2. 研究業績

1) 論文

T. Furusho, N. Y. Yamasaki, T. Ohashi, R. Shibata, T. Kagei, Y. Ishisaki, K. Kikuchi, H. Ezawa and Y. Ikebe: ASCA Temperature Maps of Three Clusters of Galaxies: Abell 1060, AWM 7, and the Centaurus Cluster, *Publ. Astron. Soc. J.* **53** (2001) 421-432.

T. Furusho, N. Y. Yamasaki, T. Ohashi, R. Shibata and H. Ezawa: Temperature Map of the Perseus Cluster of Galaxies Observed with ASCA, *Ap. J. L.* **561** (2001) L165-L169.

H. Ezawa, N. Y. Yamasaki, T. Ohashi, Y. Fukazawa, M. Hirayama, H. Honda, T. Kamae, K. Kikuchi and R. Shibata: ASCA Observations of the Temperature Structure and Metal Distribution in the Perseus Cluster of Galaxies, *Publ. Astron. Soc. J.* **53** (2001) 595-604.

Y. Ishisaki, Y. Ueda, A. Yamashita, T. Ohashi, I. Lehmann and G. Hasinger: ASCA Deep Survey in the Lockman Hole Field, *Publ. Astron. Soc. J.* **53** (2001) 445-457.

S. Sasaki and N. Y. Yamasaki: Scaling Relation to Understand Non-Detection of Cold Gas at the Cluster Center, *Publ. Astron. Soc. J.* **54** (2002) L1.-L4.

S. Uno, K. Mitsuda, H. Inoue, T. Takahashi, F. Makino, K. Makishima, Y. Ishisaki, Y. Kohmura, M. Itoh and W. H. G. Lewin: X-Ray Spectrum of Supernova 1993J Observed with ASCA and Its Evolution 8-572 Days after the Explosion, *Ap. J.* **565** (2002) 419-429.

Y. Terada, M. Ishida, K. Makishima, T. Imanori, R. Fujimoto, K. Matsuzaki and H. Kaneda: X-ray beaming caused by resonance scattering in the accretion column of magnetic cataclysmic variables *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **328** (2001) 112-126.

K. Makishima, H. Ezawa, Y. Fukazawa, H. Honda, Y. Ikebe, T. Kamae, K. Kikuchi, K. Matsushita, K. Nakazawa, T. Ohashi, T. Takahashi, T. Tamura and H. Xu: X-Ray Probing of the Central Regions of Clusters of Galaxies, *Publ. Astron. Soc. J.* **53** (2001) 401–420.

K. Mukai and M. Ishida: The Early X-Ray Emission from V382 Velorum (Nova Velorum 1999): An Internal Shock Model, *Ap.J.* **551** (2001), 1024–1030.

R. Shibata, M. Ishida, H. Kunieda, T. Endo, H. Honda, K. Misaki, J. Ishida, K. Imamura, Y. Hidaka, M. Maeda, Y. Tawara, Y. Ogasaka, A. Furuzawa, M. Watanabe, Y. Terashima, T. Yoshioka, T. Okajima, K. Yamashita, P. J. Serlemitsos, Y. Soong and K.-W. Chan: X-ray Telescope Onboard Astro-E: II. Ground-based X-ray Characterization, *Applied Optics* **40** (2001) 3762–3783.

A. Kushino, Y. Aoki, N. Y. Yamasaki, T. Namiki, Y. Ishisaki, T. D. Matsuda, T. Ohashi, K. Mitsuda and T. Yazawa: Erbium-doped yttrium aluminum garnet as a magnetic refrigerant for low temperature x-ray detectors, *J. Appl. Phys.* **90** (2001), 5812–5818.

2) 国際会議報告

R. Fujimoto, K. Mitsuda, N. Iyomoto, M. D. Audley, T. Mizayaki, T. Oshima, M. Yamazaki, K. Futamoto, Y. Takei, Y. Ishisaki, T. Kagei, T. Hiroike, U. Morita, T. Ohashi, N. Y. Yamasaki, A. Kushino, H. Kudo, H. Sato, T. Nakamura, E. Goto, S. Shoji, T. Homma, T. Osaka, Y. Kuroda, M. Onishi, M. Goto, K. Tanaka, T. Morooka, S. Nakayama and K. Chione: Status of X-ray Microcalorimeter Development at ISAS, “Low Temperature Detectors”, Eds. F.S. Porter, D. McCammon, M. Galeazzi and C.K. Stahle, AIP Conference Proceedings **605** (2002) 231–234.

H. Kudo, H. Sato, T. Nakamura, E. Goto, S. Shoji, T. Homma, T. Osaka, K. Mitsuda, R. Fujimoto, N. Iyomoto, M. D. Audley, T. Miyazaki, T. Oshima, M. Yamazaki, K. Futamoto, Y. Takei, Y. Ishisaki, T. Kagei, T. Hiroike, T. Ohashi, N. Y. Yamasaki, A. Kushino, Y. Kuroda, M. Onishi and M. Goto: Fabrication of an x-ray microcalorimeter with an electrodeposited x-ray microabsorber, “Low Temperature Detectors”, Eds. F. S. Porter, D. McCammon, M. Galeazzi and C.K. Stahle, AIP Conference Proceedings **605** (2002) 235–238.

A. Kushino, Y. Aoki, N. Y. Yamasaki, Y. Ishisaki, T. Ohashi and K. Mitsuda: Entropy behavior of Er-doped YAG for the application of ADR, “Low Temperature Detectors”, Eds. F.S. Porter, D. McCammon, M. Galeazzi and C.K. Stahle, AIP Conference Proceedings **605** (2002) 383–386.

M. Ishida: Observations of the Galactic Compact X-ray Binaries, “X-ray Astronomy 2000”, Eds. R. Giacconi, S. Serio and L. Stella ASP Conference Series **234** (2001) 251–262.

R. Shibata, M. Ishida, N. Y. Yamasaki, T. Ohashi, K. Matsushita, H. Böhringer, K. Kikuchi and H. Matsumoto: Distribution of the Temperature and Metal Abundance in the Virgo Cluster of Galaxies, “X-ray Astronomy 2000”, Eds. R. Giacconi, S. Serio and L. Stella ASP Conference Series **234** (2001) 357–362.

- T. Ohashi, T. Furusho, N. Y. Yamasaki and R. Shibata: Implications of Temperature and Metallicity Distributions in Clusters of Galaxies, “New Century of X-ray Astronomy”, Eds. H. Inoue and H. Kunieda, ASP Conference Series **251** (2001) 146–149.
- T. Endo, M. Ishida, H. Kunieda and F. Nagase: Probing Circumstellar Matter Surrounding the X-ray Binary Pulsar, GX 301–2 from *ASCA* Observations, “New Century of X-ray Astronomy”, Eds. H. Inoue and H. Kunieda, ASP Conference Series **251** (2001) 350–351.
- P. Mahasena, H. Inoue and M. Ishida: *ASCA* Observation of SS Cygni in an Optical-quiescence, “New Century of X-ray Astronomy”, Eds. H. Inoue and H. Kunieda, ASP Conference Series **251** (2001) 384–385.
- Y. Terada, K. Makishima, M. Ishida, R. Fujimoto, K. Matsuzaki, H. Kaneda and T. Imanari: X-ray Beaming due to Resonance Scattering in the Accretion Column of Magnetic Cataclysmic Variables, “New Century of X-ray Astronomy”, Eds. H. Inoue and H. Kunieda, ASP Conference Series **251** (2001) 418–419.
- T. Furusho, N. Y. Yamasaki, T. Ohashi, R. Shibata, T. Kagei, Y. Ishisaki, K. Kikuchi, H. Ezawa and Y. Ikebe: *ASCA* Temperature Maps of Four Clusters of Galaxies: Abell 1060, AWM 7, the Centaurus Cluster, and the Perseus Cluster, “New Century of X-ray Astronomy”, Eds. H. Inoue and H. Kunieda, ASP Conference Series **251** (2001) 446–447.
- Y. Ishisaki, Y. Ueda, A. Yamashita, T. Ohashi, I. Lehmann and G. Hasinger: *ASCA* Deep Survey of the Lockman Hole Field, “New Century of X-ray Astronomy”, Eds. H. Inoue and H. Kunieda, ASP Conference Series **251** (2001) 458–459.
- A. Kushino, Y. Ishisaki, T. Ohashi and Y. Ueda: Investigation of Large-scale Cosmic X-ray Background with *ASCA*, “New Century of X-ray Astronomy”, Eds. H. Inoue and H. Kunieda, ASP Conference Series **251** (2001) 464–465.
- K. Makishima, K. Nakazawa, Y. Fukazawa, Y. Ikebe, K. Matsushita, T. Ohashi, T. Tamura and H. Xu: Physics of the Central Regions of Clusters of Galaxies, “New Century of X-ray Astronomy”, Eds. H. Inoue and H. Kunieda, ASP Conference Series **251** (2001) 466–467.
- Y. Ueda, M. Akiyama, Y. Ishisaki, K. Makishima, R. Mushotzky, T. Ohashi, K. Ohta, T. Takahashi, S. Watanabe and T. Yamada: The *ASCA* Medium Sensitivity Survey: Source Catalog and Optical Identification, “New Century of X-ray Astronomy”, Eds. H. Inoue and H. Kunieda, ASP Conference Series **251** (2001) 494–495.
- S. Watanabe, T. Takahashi, Y. Ueda, Y. Ishisaki, M. Akiyama, T. Yamada, K. Ohta and R. Mushotzky: *Chandra* Observations of Hard X-ray Sources Discovered with *ASCA*, “New Century of X-ray Astronomy”, Eds. H. Inoue and H. Kunieda, ASP Conference Series **251** (2001) 498–499.
- M. D. Audley, R. Fujimoto, K. Mitsuda, K. A. Arnaud, K. C. Gendreau, K. R. Boyce, C. M. Fleetwood, R. L. Kelley, R. A. Keski-Kuha, F. S. Porter, C. K. Stahle, A. E. Szymkowiak, J. L.

- Tveekrem, Y. Ishisaki and T. Mihara: The XRS Blocking Filter Calibration, “New Century of X-ray Astronomy”, Eds. H. Inoue and H. Kunieda, ASP Conference Series **251** (2001) 516–517.
- R. Fujimoto, K. Mitsuda, N. Iyomoto, M. D. Audley, T. Miyazaki, T. Oshima, M. Yamazaki, K. Futamoto, Y. Ishisaki, N. Yamasaki, T. Ohashi, T. Kagei, A. Kushino, T. Hiroike, S. Shoji, H. Kudo, Y. Yokoyama, H. Sato, T. Nakamura, E. Gotoh, Y. Kuroda, M. Onishi and M. Goto: Status of X-ray Microcalorimeter Development at ISAS, “New Century of X-ray Astronomy”, Eds. H. Inoue and H. Kunieda, ASP Conference Series **251** (2001) 534–535.
- M. Ishida, R. Shibata, H. Kunieda, T. Endo, H. Honda, K. Misaki, J. Ishida, K. Imamura, Y. Hidaka, M. Maeda, K. Itoh, H. Mori, M. Watanabe, Y. Tawara, Y. Ogasaka, A. Furuzawa, Y. Terashima, T. Yoshioka, T. Okajima and K. Yamashita: Ground-based X-ray Characterization of the ASTRO-E XRT, “New Century of X-ray Astronomy”, Eds. H. Inoue and H. Kunieda, ASP Conference Series **251** (2001) 546–547.
- Y. Ishisaki, N. Yamasaki, T. Ohashi, T. Kagei, T. Miyazaki, K. Mitsuda, R. Fujimoto, N. Iyomoto, T. Oshima, M. Yamazaki, K. Futamoto, D. Audley, S. Shoji, H. Kudo and Y. Yokoyama: Development of a TES Microcalorimeter System for the Future X-ray Mission, “New Century of X-ray Astronomy”, Eds. H. Inoue and H. Kunieda, ASP Conference Series **251** (2001) 548–549
- K. Itoh, K. Misaki, M. Ishida, H. Honda, R. Shibata, T. Endo, J. Ishida, K. Imamura, Y. Hidaka, M. Maeda, H. Mori and H. Kunieda: Verifying the Parallelism and Uniformity of the Inverse-Telescope in the ISAS X-ray Beam Facility, “New Century of X-ray Astronomy”, Eds. H. Inoue and H. Kunieda, ASP Conference Series **251** (2001) 550–551
- K. Misaki, Y. Hidaka, R. Shibata, K. Imamura, K. Itoh, H. Mori, M. Ishida, H. Kunieda and K. Yamashita: Characterization of C-K Inverse-Telescope in the ISAS X-ray Beam Facility, “New Century of X-ray Astronomy”, Eds. H. Inoue and H. Kunieda, ASP Conference Series **251** (2001) 568–569.
- H. Mori, R. Shibata, H. Kunieda, M. Ishida, H. Honda, K. Misaki, T. Endo, J. Ishida, Y. Hidaka, K. Imamura, M. Maeda, K. Itoh and P. J. Serlemitsos: Stray Light Protection by Pre-Collimator for Astro-E2 XRTs, “New Century of X-ray Astronomy”, Eds. H. Inoue and H. Kunieda, ASP Conference Series **251** (2001) 574–575.
- T. Oshima, M. Yamazaki, K. Mitsuda, R. Fujimoto, N. Iyomoto, M.D. Audley, T. Miyazaki, K. Futamoto, Y. Ishisaki, N. Yamasaki, T. Ohashi, T. Kagei, A. Kushino, T. Hiroike, S. Shoji, H. Kudo and Y. Yokoyama: Performance of SII SQUID Amplifiers, “New Century of X-ray Astronomy”, Eds. H. Inoue and H. Kunieda, ASP Conference Series **251** (2001) 584–585.
- R. Shibata, Y. Hidaka, K. Misaki, T. Endo, K. Imamura, H. Mori, K. Itoh, M. Ishida and H. Kunieda: Limiting Factors of ASTRO-E XRT Performance, “New Century of X-ray Astronomy”, Eds. H. Inoue and H. Kunieda, ASP Conference Series **251** (2001) 588–589.
- M. Tashiro, Y. Ezoe, K. Ebisawa, Y. Fukazawa, T. Furusho, E. Idesawa, M. Ishida, Y. Ishisaki, H. Kubo, A. Kubota, K. Makishima, T. Ohashi, N. Y. Yamasaki, T. Yaqoob and the GIS

team: Nearly-Final In-Orbit Calibration of the GIS onboard ASCA, “New Century of X-ray Astronomy”, Eds. H. Inoue and H. Kunieda, ASP Conference Series **251** (2001) 592-593.

N. Y. Yamasaki, A. Kushino, Y. Aoki, Y. Ishisaki, T. Ohashi and K. Mitsuda: Measurement of the Specific Heat of Er-doped YAG and its Application to the X-ray Astronomy, “New Century of X-ray Astronomy”, Eds. H. Inoue and H. Kunieda, ASP Conference Series **251** (2001) 602-603.

T. Ohashi: The ASTRO-E2 Mission, “Clusters of Galaxies and the High Redshift Universe Observed in X-Rays”, XXIst Moriond Astrophysics Meeting, Eds. D. M. Neumann and J. T. T. Van, (2001) http://www-dapnia.cea.fr/Conferences/Morion_astro_2001/index.html

3) 学会講演

日本天文学会 2001年春季年会 2001年3月30日～4月2日(千葉大学)

石崎欣尚、影井智宏、大橋隆哉、山崎典子、久志野彰寛、広池哲平、宮崎利行、大島泰、満田和久、藤本龍一、伊予本直子、M. D. Audley、山崎正裕、二元和朗、庄子習一、工藤寛之、横山雄一：Ti-Au 薄膜を用いたマイクロカロリメータによる X 線検出

古庄多恵、山崎典子、大橋隆哉、柴田亮、江澤元：「あすか」によるペルセウス座銀河団の温度・重元素の 2 次元構造

村上裕一郎、久志野彰寛、篠崎慶亮、石井繭子、石崎欣尚、山崎典子、大橋隆哉、菊池健一、倉門雅彦：超伝導トンネル接合検出器の X 線撮像性能の研究 (III)

日本天文学会 2001年秋季年会 2001年10月4日～10月6日(イーグレひめじ、姫路市市民会館)

石川輝、石田学、石崎欣尚、大橋隆哉、牧島一夫、根来均：球状星団 M4 の「あすか」による観測

石田學、遠藤貴雄、國枝秀世、長瀬文昭：「あすか」による X 線パルサー GX301-2 からの広がった鉄輝線の解析

久志野彰寛、石崎欣尚、山崎典子、大橋隆哉、上田佳宏：「あすか」による宇宙 X 線背景放射の大規模ゆらぎの研究

森田うめ代、大橋隆哉、山崎典子、石崎欣尚、広池哲平、満田和久、藤本龍一、伊予本直子、大島泰、二元和朗、竹井洋、工藤寛之、佐藤裕崇、中村友亮、小林秀臣、荒川貴博、庄子習一、本間敬之、逢坂哲彌、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 I - 改良型検出器の製作と性能評価 -

竹井洋、満田和久、藤本龍一、伊予本直子、大島泰、二元和朗、森田うめ代、広池哲平、大橋隆哉、山崎典子、石崎欣尚、庄子習一、工藤寛之、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 II - 動作温度 100 mK の低ノイズカロリメータの開発 -

森英之、柴田亮、前田良知、見崎一民、幅良統、伊藤啓、飯塚亮、國枝秀世、石田学：ASTRO-E II XRT 搭載用プレカロリメータの開発とその性能評価

伊藤啓、見崎一民、前田良知、柴田亮、幅良統、森英之、飯塚亮、国枝秀世、石田学：X線望遠鏡基板の支持方法改善による結像性能の向上化への展望

山崎典子、大橋隆哉、古庄多恵：Chandra 衛星による A1060 銀河団中心の観測

日本物理学会第 56 回年会 2001 年 9 月 22 日～9 月 25 日（沖縄国際大学）

広池哲平、大橋隆哉、山崎典子、石崎欣尚、森田うめ代、満田和久、藤本龍一、伊予本直子、大島泰、二元和朗、竹井洋、工藤寛之、佐藤裕崇、中村友亮、小林秀臣、庄子習一、本間敬之、逢坂哲彌、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) - X 線分光性能の評価 -

伊予本直子、満田和久、藤本龍一、大島泰、二元和朗、竹井洋、大橋隆哉、山崎典子、石崎欣尚、広池哲平、森田うめ代、工藤寛之、佐藤裕崇、中村友克、小林秀臣、庄子習一、本間敬之、逢坂哲彌、黒田能克、大西光延、後藤雅也、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 —TES 温度計の性能向上—

石崎欣尚、久志野彰寛、大橋隆哉：Pisces-Perseus 超銀河団領域における広がった X 線放射の探索

International Workshop on Tracing Cosmic Evolution with Galaxy Clusters,

Bolzano-Bozen, Italy, July 3-6, 2001

T. Furusho: ASCA Study of Dynamical Evolution in Nearby Clusters

American Astronomical Society 199th meeting, Washington D.C., USA, January 7-10, 2002

T. Furusho: Chandra Observations of the non-cD Galaxy Cluster Abell 1060

第 6 回 X 線結像光学シンポジウム, 2001 年 12 月 20 日～21 日（つくば国際会議場）

飯塚亮、見崎一民、柴田亮、幅良統、伊藤啓、森英之、国枝秀世：キャピラリーの X 線特性測定とその有用性

見崎一民、日高康弘、柴田亮、今村晃介、伊藤啓、森英之、国枝秀世、石田学、山下広順：C-K(44Å) 用直入射逆望遠鏡による X 線平行光源の開発

国際会議

Two Years of Science of Chandra, Washington D. C., USA, September 5-7, 2001

N. Y. Yamasaki, T. Ohashi and T. Furusho: Chandra Observation of the Central Region of A1060

New Visions of the X-ray Universe in the XMM-Newton and Chandra Era,

Noordwijk, the Netherlands, November 26-30, 2001

T. Furusho, N. Y. Yamasaki and T. Ohashi: Chandra Observations of the Gravitational Potential Structure in Abell 1060

M. Ishida, K. Masai, T. Endo, H. Kunieda, H. Inoue and F Nagase: Detection of Broadening of the Nearly Neutral Iron Emission Line from GX301-2

4) 学会誌等

大橋隆哉: 「あすか」の見た銀河・銀河団、日本物理学会誌 56 (2001) 932-941.

原子物理学研究室

1. 研究活動の概要

当研究室では、主に多価イオンを用いた meV から GeV までの非常に広い衝突エネルギー領域に亘る原子・分子レベルでの衝突過程に関する実験的研究を、独自に開発した装置と測定手法を駆使して推進している。また、ゆらぎとカオスに関する実験的研究も行ってきた。

1) 極低温ヘリウム気体中におけるイオン移動度

独自開発の液体ヘリウムによる冷却が可能な移動管質量分析計を用いて極低温ヘリウム気体中における様々なイオンの移動度を測定してきた。今年度は O_2^+ に引き続いて分子イオンである NO^+ 、 CO_2^+ 、 CH^+ および CH_2^+ について気体温度 4.3 K および 77 K において測定を行った。これら全ての分子イオンについて低電場領域で古典的な分極力極限を下回る移動度が観測され、粒子間距離の 6 乗に反比例する引力ポテンシャルの寄与が示唆された。また、クラスターイオン生成機構解明を睨んで Ne^+ と移動管内で生成する $NeHe^+$ についても測定を行った。 $NeHe^+$ は二原子分子と見なせるほど大きな結合エネルギーを持つので、他の分子イオンとの比較という意味でも興味深い研究対象である。 Ne^+ については分極力極限に漸近する予想通りの測定結果となったが、 $NeHe^+$ の移動度は低電場領域において明瞭な極小を持ち、しかもこれまでの常識とは相容れない奇妙な圧力依存性を示した。これらの測定結果によって、三体結合反応と輸送現象にはこれまで議論されてこなかった複雑な関係があることが明らかとなった。

2) 低エネルギー多価イオンの電荷移行反応断面積の絶対値測定

本研究室で独自に開発した小型多価イオン源 (Mini-EBIS) と高周波技術を応用したイオンビームガイド (OPIG) を組み合わせた実験技術を用いて系統的に測定してきた。1 keV 以下の低エネルギー領域における C^{q+} 、 N^{q+} 、 $O^{q+}-He$ 、 H_2 衝突系 ($q = 2 - 6$) の一電子および二電子移行反応断面積の解析を行った。測定された 1 keV 以下の低エネルギー領域における電荷移行反応断面積は、大変強く特異な衝突エネルギー依存性を示す。これまで keV 領域の反応断面積を比較的旨く再現できる Classical Over Barrier Model (COBM) をそのまま適用したのでは、低エネルギー領域の特異な衝突エネルギー依存性を再現することはできない。この COBM に低エネルギー衝突で考慮されるべきより現実的な条件、1) 標的の分極による衝突軌道が曲がる効果、2) 不確定原理に基づく電子遷移確率、3) コア電子の寄与などを取り入れることにより、測定されたデータを定性的に説明することに成功した。

3) 低エネルギー多価イオン衝突における分子崩壊過程の研究

多価イオン・分子衝突における電子捕獲過程に伴う複雑な分子の崩壊過程を衝突後の多価イオンおよび標的分子のフラグメント対の全粒子を同時計測する新しい実験法により $Kr^{8+}-N_2$ 衝突系における複雑な分子崩壊の詳細解明を行った。さらに衝突後の散乱角依存とエネルギー分析を組み合わせた多次元同時計測による衝突散乱のインパクトパラメーター依存測定を可能とする実験装置の改善も行い、衝突ダイナミクスを議論できる測定実験を可能にした。

4) 相対論的多価イオンによる干渉性共鳴励起の研究

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 n 次の高調波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干渉性共鳴励起と呼ばれている。結晶通過後のイオンの電荷，および脱励起 X あるいは γ 線を通しての観測から，共鳴的な励起の検証，ラムシフト等の基本定数決定のための精密分光，および仮想強光子場によるコヒーレントな励起・脱励起の直接測定を行うことを目的として研究を進めてきた。本年度は H-like と He-like の両方のイオンビームを使った以下のような精密分光実験を放射線医学研究所の HIMAC を用いて行った。

1. H-like/He-like イオンの RCE 同時観測による 2 電子系イオンにおける基底準位から 2^1P , 2^3P 準位への遷移エネルギーの精密分光

He-like Fe に対して 6700.26 ± 0.15 eV および 6667.56 ± 0.15 eV という値が得られた。この値は現時点では世界で最も精度の良い観測値の一つであり，現在報告されている QED に基づく最新の理論値と比較すると誤差の範囲内でほぼ一致していることが判明した。

2. H-like Fe^{25+} イオンおよび He-like Fe^{24+} イオンの RCE に伴う脱励起 X 線スペクトルの放出角度依存性

He-like Fe^{24+} イオンの $(k, \ell) = (2, 1)$ フーリエ成分の結晶場による RCE に伴う脱励起 X 線の場合， 2^1P に対応するピークに関して，結晶面に平行に設置した場合，垂直の時と比べて 2 倍程度の強度を持つことが判明した。これは励起の際に利用される結晶内振動電場の方向と関係があると推測されるが，このような大きな異方性が観測されたのは今回が初めてである。

3. 460 MeV/u He-like $^{57}Fe^{25+}$ イオンの場合の電荷分布による核準位 RCE の観測のための R&D

核励起の候補である安定同位体 ^{57}Fe イオンを使ったイオンビームの開発，およびそれを使った原子準位励起 RCE，さらに核準位 RCE の観測の測定を試みた。核励起観測の手法として，軌道電子を持ったイオンを使って核励起後に起こる核による内部転換過程を通じてイオンを荷電変化させ，これを観測することを試みた。

5) 高速分子イオンチャネリング

数 100 MeV/u という高速分子イオンが結晶中を通過する際，入射エネルギーが上がると標的電子や核による分子イオンの電子損失およびそれに伴う分子崩壊確率が大きく下がるため，標的電子や核との衝突を免れて分子崩壊することなく数 μm まで分子イオンチャネリングする可能性は大きいと予想される。また，固体中での電子損失に伴うクーロン爆発現象（すなわち，MeV/u 程度の入射エネルギーの分子は固体中で瞬時に電子をはがされ，裸の核が互いのクーロン反発力によって離れてゆく現象）によって生成される 2 個の陽子もお互いの電荷を感じてクーロン反発しあいながらもチャネリングすると考えられる。これらのダイナミクスを結晶軸や結晶面に対する入射角度に依存した通過後のイオンの角度拡がりによって観測することを本研究の目的として高速分子イオンチャネリングの実験を HIMAC を用いて今年度よりスタートさせた。今年度はそのテスト実験として 160 MeV/u H_2^+ ビームを用いて，トランスポート系およびコリメーターの調整による平行ビームの開発，選別用磁場および二次元位置検出器による水素分子イオン及びその崩壊陽子の観測，さらにシリコン結晶を使ったチャネリング条件下での選別用磁場および二次元位置検出器による水素分子イオン及びその崩壊陽子の観測を行い，崩壊した陽子がチャネリングすることを確認した。

6) 多価イオンと固体表面の相互作用の研究

多価イオンが固体表面と衝突した際にどのような機構によって中性化されるかというダイナミクスはこの10年間の多価イオン物理の大きなトピックであった。この中で最近、多価イオンを表面で大角散乱をさせ、十分中性化する時間を与えないまま散乱させることによりその中性化ダイナミクスを研究しようとする実験が注目されている。我々は、ECRイオン源から取り出したビームを数keVまで減速し、これを清浄でよく配列が決定されている金属結晶表面に入射し、180度方向に散乱されてくるイオンあるいは中性原子をTOFによって測定し、180度散乱イオンの電荷数およびエネルギーを知るというCAICISS (coaxial impact collision ion scattering spectroscopy) を目指して装置の準備をスタートさせた。これによるとイオンの軌道は結晶面上に配列した原子ポテンシャルによって散乱されるため、軌道を限定することにより多価イオンの表面近傍における中性化過程をより定量的に議論できると期待される。本年度は減速レンズ系のおよびTOF装置の設計並びに実際の製作を行った。

7) 電子衝突による多価イオンの励起過程の研究

散乱電子の運動エネルギーと散乱角度の分布を二次元検出器によって同時に測定できるトロイダル型エネルギー分析器を独自に開発し、多価イオンによる電子散乱の微分散乱断面積の測定を行っている。この分析器では二次元検出器であるMCPに対する電子の入射方向が位置によって異なるため、検出感度が位置に依存するという問題が以前から判っていた。今年度は断面積の測定例が報告されている中性He気体による電子散乱を観測することで、相対的な検出効率を二次元検出器上の有効な全ての領域について位置の関数として求めることに成功した。また、本研究課題の最終的な目的である Ar^{7+} の3sから3pへの励起過程の測定にも初めて挑戦して100時間程度のシグナルの蓄積を行ったが、目的とする信号が非常に微弱であるために有意な形でのノイズとの分離はできなかった。

8) 多価イオンの電荷移行反応によって生成した励起状態の分光学的研究

中性標的分子と衝突した多価イオンが外殻軌道へ電子を捕獲することで生成される励起状態からの発光を可視光から紫外線の波長領域において観測し、特にその直線偏光度を測定することで、エネルギー的には縮重しているために分離することができない磁気副状態における生成断面積の分布に関する情報を得てきた。これまでHe様多価イオンの3p軌道への一電子捕獲反応によって生成した $^2\text{P}_{3/2}$ 状態について、イオン種と標的分子を変えながら系統的な測定を行ってきたが、今年度は二次元画像測定システムに異常が生じたため、その原因を究明することに大半の時間を費やしてしまった。結局、真空に封じられた二次電子増倍管の経年変化による劣化が原因であることが判明し、後継機種候補として試験的に導入した液体窒素冷却型のCCD検出器を用いて測定を行った結果、CCDの特性として暗電流レベルは非常に高いものの、シグナルについては従来の数倍程度の量子効率が得られるため、より精度の高い測定が可能となることが判った。

9) 多価イオンと分子の衝突によるクーロン爆発の研究

高速の多価イオンとの衝突によって瞬間的に多数個の電子を奪われた分子は、中性時の分子構造を保ったまま多価分子イオンとなる。多価分子イオンは不安定であるから、直ちに原子イオン間のクーロン反発によって崩壊する。このとき全ての解離フラグメントイオンの運動量ベクトルを測定し、純粋なクーロン爆発を仮定すると、解離直前の分子構造を決定することができる。この手法は単分子レベルでの顕微鏡とも呼べるもので、これまでに三原子までの小さな

分子について測定を行い，分光学的に求められた文献値と良く一致する結果を得てきた。また，この実験に不可欠な時間分解能の優れた二次元位置敏感型検出器を独自に開発してきた。今年度は CD_4 に関する測定を行い，分子の零点振動に起因する動的な鏡像体を分離して観測することに成功した。さらに日独国際共同研究の一環として C_{60} を用いた実験も行った。

10) 多重 Auger 電子放出における電子相関の研究

多価イオンが外殻軌道に多くの電子を捕獲することによって生成する多重励起状態は中空原子 (hollow atom) と呼ばれており，電子相関が非常に強い状態であると考えられている。中空原子からは同時に複数の Auger 電子が放出されると考えられるので，これらの電子の放出角度相関を実測できれば電子相関を直接的な方法で観測することが可能である。そこで磁気トラップ型の飛行時間分析器と二次元位置敏感型検出器を組み合わせることで，多価イオンと中性分子が衝突することで生成した中空原子からの Auger 電子の運動エネルギーと放出角度を測定する新しい装置を設計した。装置の製作は年度内にほぼ完了したので，分子のクーロン爆発を利用して計測系に関するテストを行った。

11) 流体系と生物系におけるゆらぎとカオスの実験的研究

1. 水滴落下系のカオス

蛇口から滴り落ちる水滴のカオス的振る舞いは，これまで主に離散力学系として調べられてきた。しかし，水滴落下のカオスの本質は蛇口にぶらさがった水滴の振動運動にある。これを実験的に調べるため，高速ビデオカメラで水滴を拡大撮影し，その画像より水滴の運動状態を表す状態空間軌道を得た。本年度はさらに状態軌道の詳しい解析を行い，この系の連続力学系としての表現を得た。また，系のポテンシャル (重力 + 表面張力による) を計算し，水滴の運動が低次元のポテンシャル面上の運動として理解されることを示した。カオス的な振る舞いは系がポテンシャル面のリッジを乗り越える際に引き起こされることを明らかにした。

2. 心臓神経系の非線形力学

心臓の拍動は，生体内の諸リズムの中でも際立って規則的である。この規則性は心臓自身の自律性と脳と心臓神経系からなる神経制御によってもたらされる。生体内外のさまざまな変動に対して安定に動作するこの系の非線形力学を解明するために心拍時系列データの採取および解析を行った。

2-1. アメリカザリガニの心拍における周期倍加 アメリカザリガニの遺伝的白化個体では平均心拍数の変動に伴って 1 周期状態から 2 周期状態への周期倍化が頻繁に引き起こされることを見出した。通常の個体ではこの周期倍化はほとんど見られない。白化個体はメラニン色素細胞を持たないが，この細胞が心拍数の制御に関わるある種の神経伝達物質の生成に関与している可能性が窺われる。

2-2. ウシガエルの心拍の周期性 ウシガエルの心拍を超音波血流計で観測し，特徴的な周期的心拍数変動を見出した。心拍数の変動周期は約 60 心拍あるいは 120 心拍であった。この周期はきわめて安定で，体温の変化に伴う平均心拍数の変化 (カエルは変温動物なので，外気温が変化すると体温が変化して代謝量や心拍数も変化する) にも依存しなかった。このことは従来のホメオスタシスの概念では説明できず，また既知のいくつかのタイプの生体タイマーのどれとも整合しない。

2. 研究業績

1) 論文

H. Tawara, K. Okuno, C. W. Fehrenbach, C. Verzani, M. P. Stockli, B. D. Depaola, P. Richard and P. C. Stancil: Electron-capture processes of low-energy Si^{3+} , Si^{4+} and Si^{5+} ions in collisions with helium atoms, *Phys. Rev. A* **63** (2001) 062701.

H. Tanuma, J. Matsumoto, T. Nishide, H. Shiromaru and N. Kobayashi: Present status of highly charged ion experiments with an ECR ion source at TMU, *J. Chin. Chem. Soc.* **48** (2001) 389-394.

T. Azuma, T. Ito, Y. Takabayashi, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada and T. Murakami: Resonant coherent excitation of hydrogen-like Ar ions to the $n = 3$ states, *Physica Scripta* **T92** (2001) 61-64.

T. Hayakawa, R. A. Lomsadze, C. Verzani, H. Watanabe, H. Tanuma, B. D. DePaola and N. Kobayashi: Polarization spectroscopy of $\text{N}^{4+}(1s^23p)$ produced in collisions of $\text{N}^{5+}(1s^2)$ with He and H_2 , *Physica Scripta* **T92** (2001) 322-324.

K. Ishii, T. Tanabe, R. Lomsadze and K. Okuno: Charge-changing cross sections in collisions of C^{q+} ($q = 2 - 5$) with He and H_2 at energies below 750 eV/u, *Physica Scripta* **T92** (2001) 332-334

T. Kaneyasu, K. Matsuda, M. Ehrich, M. Yoshino and K. Okuno: Fragmentation of N_2 and post collision effects in slow electron capture collisions of Kr^{8+} ion below 200 eV/amu, *Physica Scripta* **T92** (2001) 341-344.

J. Matsumoto, Z. Wang, A. Danjo, M. Yoshino, H. Tanuma and N. Kobayashi: Differential cross section measurements in electron-ion collisions using a troidal analyzer, *Physica Scripta* **T92** (2001) 367-369.

T. Nishide, F. A. Rajgara, T. Kitamura, H. Shiromaru, Y. Achiba and N. Kobayashi: Dissociation of highly charged CS_2 formed by low energy collisions with HCl, *Physica Scripta* **T92** (2001) 415-419.

Y. Kanai, K. Ando, T. Azuma, R. Hutton, K. Ishii, T. Ikeda, Y. Iwai, K. Komaki, K. Kuroki, H. Masuda, Y. Morishita, K. Nishio, H. Oyama, M. Sekiguchi and Y. Yamazaki: Metastable states produced with beam-capillary interaction, *Nucl. Instr. Meth. B* **182** (2001) 174-179.

T. Kitamura, T. Nishide, H. Shiromaru, Y. Achiba and N. Kobayashi: Direct observation of "dynamic" chirality by Coulomb explosion imaging, *J. Chem. Phys.* **115** (2001) 5-6.

F. A. Rajgara, M. Krishnamurthy, D. Mathur, T. Nishide, T. Kitanuma, H. Shiromaru, Y. Achiba and N. Kobayashi: Fragmentation dynamics of CS_2^{q+} ($q = 3 - 10$) molecular ions, *Phys. Rev. A* **64** (2001) 032712.

T. Yazawa and T. Katsuyama: Spontaneous and repetitive cardiac slowdown in the freely moving spiny lobster, *Panulirus japonicus*. *J. Comp. Physiol A* **187** (2001) 817-824.

G. Veshapidze, T. Nishide, H. Shiromaru, N. Kobayashi and T. Mizogawa: A time- and position-sensitive detector using a resistive film anode combined with a “modified backgammon with weighted capacitors” read out, *Jpn. J. Appl. Phys.* **41** (2002) 871-875.

M. Ehrich, U. Werner, H. O. Lutz, T. Kaneyasu, K. Ishii, K. Okuno and U. Saalman: Simultaneous charge polarization and fragmentation of N_2 molecules in slow keV collisions with Kr^{8+} ions, *Phys. Rev. A* **65** (2002) 030702(R).

S. Motoki, J. Adachi, K. Ito, K. Ishii, K. Soejima, A. Yagishita, S. K. Semenov and N. A. Cherepkov: Direct probe of the shape resonance mechanism in $2\sigma_g$ -shell photoionization of the N_2 molecule, *Phys. Rev. Lett.* **88** (2002) 063003.

2) 国際会議報告集

H. Tanuma : Electron transfer to individual magnetic substates of multi-charges ions, *Correlations, Polarization, and Ionization in Atomic Systems*, edited by D. H. Madison and M. Shulz (American Institute of Physics, 2002) 270-275.

3) 学会講演

日本物理学会第 56 回年次大会 2001 年 3 月 27 日 ~ 30 日 (中央大学多摩キャンパス)

今井誠, 左高政雄, 北澤真一, 川面澄, 小牧研一郎, 柴田裕実, 俵博之, 東俊行, 金井保之, 山崎泰規: 0 度電子分光による固体内電子衝突過程研究 II.

Giorgi Veshapidze, 西出龍弘, 北村友和, 城丸春夫, 小林信夫, 溝川辰巳: 高抵抗フィルム + バックギャモン型電極による位置敏感検出器.

柳下明, 元木創平, 足立純一, 伊藤健二, 石井邦和, 副島浩一: 配向 N_2 分子からの $2\sigma_g$ 光電子の角度分布測定による光電離の完全実験.

石井邦和, 奥野和彦: 低エネルギー多価イオンの電荷移行反応 XXIV $C^{6+} + He, H_2$ 衝突系における一電子及び二電子捕獲反応断面積.

高林雄一, 伊藤高臣, 東俊行, 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励起 III: Ar^{16+} (He-like) イオンの励起.

伊藤高臣, 高林雄一, 東俊行, 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励起 IV: He-like イオンの高分解能原子分光.

勝山智男, 矢澤徹: 神経伝達物質による心拍調節機構.

増永拓也, 勝山智男: 高速カメラによる水滴カオスの解析.

第 8 回原子衝突セミナー 2001 年 4 月 7 日 (東京大学本郷キャンパス)

東俊行: 結晶場を用いた高エネルギー重イオンの干渉性共鳴励起.

原子衝突研究協会第26回研究会 2001年8月23日~25日(立教大学)

神野智史, 日高宏, 田沼肇, 小林信夫: 極低温ヘリウム中におけるヘリウムクラスターイオンの移動度.

石井邦和, 奥野和彦: 低速 C^{q+} , N^{q+} , $O^{q+}+He$, H_2 衝突系における一電子及び二電子捕獲反応断面積.

近内亜紀子, 早川雄博, 田沼肇, 小林信夫: 電子捕獲した多価イオンの偏光分光.

西出龍弘, 北村友和, 城丸春夫, 阿知波洋次, 小林信夫: 多価イオン衝突による CD_4 のクーロン爆発イメージング.

日高宏, 神野智史, 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.

高林雄一, 近藤力, 伊藤高臣, 東俊行, 小牧研一郎, 山崎泰規, 高田栄一, 村上健: 相対論的重イオンビームによるオコロコフ効果.

金安達夫, 東俊行, 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過程の散乱角依存性.

松本淳, 田沼肇, 檀上篤徳, 吉野益弘, 小林信夫: アルゴン多価イオン-電子の弾性散乱における相対微分断面積の測定.

日本物理学会 2001年秋季大会 2001年9月17日~20日(徳島文理大学徳島キャンパス)

石井邦和, 奥野和彦: 低エネルギー多価イオンの電荷移行反応 XXV C^{q+} , N^{q+} , $O^{q+}+He$, H_2 衝突系における一電子及び二電子捕獲反応断面積.

金安達夫, 東俊行, 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過程の散乱角依存性.

今井誠, 左高政雄, 北澤真一, 川面澄, 小牧研一郎, 柴田裕実, 俵博之, 東俊行, 金井保之, 山崎泰規: 0度電子分光による固体内電子衝突過程研究 III.

高林雄一, 近藤力, 伊藤高臣, 東俊行, 小牧研一郎, 山崎泰規, 高田栄一, 村上健: 相対論的重イオンビームによるオコロコフ効果 VII.

松本淳, 田沼肇, 檀上篤徳, 吉野益弘, 小林信夫: Ar 多価イオンと電子の弾性散乱における相対微分断面積の測定 III.

日高宏, 神野智史, 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.

神野智史, 日高宏, 田沼肇, 小林信夫: 極低温ヘリウム中におけるヘリウムクラスターイオンの移動度.

田沼肇，近内亜紀子，早川雄博，小林信夫: 多価イオンへの電荷移行によって生成した励起状態の偏光分光 IV.

分子構造総合討論会 2001 2001年9月24日～27日 (札幌サンプラザ)

西出龍弘，北村友和，城丸春夫，阿知波洋次，小林信夫: クーロン爆発イメージングによる「動的」鏡像体の識別.

日本動物学会第72回大会 2001年10月6日～8日 (九州産業大学，福岡)

矢澤徹，勝山智男: 非拘束安静時イセエビにおける心拍変動解析.

第10回日本バイオイメージング学会 2001年10月12日 (国立感染症研究所，東京)

田中克典，清野健，勝山智男，島田一平，山田武範，矢澤徹: ウシガエル心拍リズムの状態空間表示. (同学会バイオイメージ賞)

第51回理論応用力学講演会 2002年1月22日～24日 (日本学術会議，東京)

勝山智男，清野健，淵上信子: 水滴落下系のカオス.

第233回基礎科学セミナー 2002年3月7日 (日本原子力研究所，東海村)

東俊行: 結晶場を用いたコヒーレント共鳴励起による核励起の挑戦.

第79回日本生理学会大会 2002年3月28日～30日 (県立広島女子大学)

田中克典，清野健，勝山智男，島田一平，山田武範，矢澤徹: ウシガエル心拍変動の決定論性.

矢澤徹，勝山智男，清野健，田中克典: 非拘束アメリカザリガニにおける心拍変動の周期倍化.

国際会議

International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarms
(Lincoln, NE, USA, July 14-16, 2001)

H. Hidaka, S. Jinno, H. Tanuma and N. Kobayashi: Molecular ion mobility in helium gas at very low temperature. (Poster)

S. Jinno, H. Hidaka, H. Tanuma and N. Kobayashi: Mobility of metastable O_2^+ ions in helium gas. (Poster)

XXII International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions
(Santa Fe, NM, USA, July 18-24, 2001)

T. Azuma: Resonant coherent excitation of heavy ions channeled in a silicon crystal. (Invited talk)

J. Matsumoto, Z. Wang, A. Danjo, M. Yoshino, H. Tanuma and N. Kobayashi: Differential cross sections for elastic scattering of electrons from Ar^{7+} ions. (Poster)

Y. Takabayashi, T. Ito, T. Azuma, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada and T. Murakami: Initial state dependence of convoy electron production for 460 MeV/u Fe ions incident of carbon foils. (Poster)

H. Tanuma, T. Hayakawa, B. D. DePaola and N. Kobayashi: Alignment of $\text{C}^{3+}(1s^23p)$ states produced in collisions of $\text{C}^{4+}(1s^2)$ with H_2 . (Poster)

C. Verzani, H. Tawara, K. Okuno, T. Kaneyasu and B. D. DePaola: Single and double charge exchange cross sections at very low energies. (Poster)

K. Ishii, A. Endo, B. Gür and K. Okuno: Charge changing cross sections of C^{q+} , N^{q+} , and O^{q+} ($q = 2 - 6$) in collisions with He and H_2 at low energies below 1 keV/u. (Poster)

T. Kaneyasu, T. Azuma, M. Ehrich, M. Yoshino and K. Okuno: Coulomb explosion of N_2 and post collision effect in electron capture collisions of Kr^{8+} ions at energies below 200 eV/u. (Poster)

S. Jinno, H. Hidaka, H. Tanuma and N. Kobayashi: Mobility of metastable O_2^+ ions in helium gas. (Poster)

H. Hidaka, S. Jinno, H. Tanuma and N. Kobayashi: Molecular ion mobility in helium gas at very low temperature. (Poster)

G. Veshapidze, T. Nishide, T. Kitamura, H. Shiromaru, N. Kobayashi and T. Mizogawa: New multi-hit 2D detector for the use in magnetic field. (Poster)

11th International Symposium on Polarization and Correlation in Electronic and Atomic Collisions (Rolla, MO, USA, July 25-28)

H. Tanuma: Electron transfer to individual magnetic substates of multicharged ions. (Invited talk)

19th International Conference on Atomic Collision in Solids (Paris, France, July 29-Aug. 3, 2001)

T. Azuma: Trajectory-dependent charge state and energy loss of relativistic heavy ions channeled in a silicon surface barrier detector. (Invited talk)

The 6th Experimental Chaos Conference (Potsdam, Germany, Sep. 22-27, 2001)

T. Masunaga and T. Katsuyama: Analyzing the chaos of a dripping faucet using a high-speed camera. (Poster, Conference 賞1等)

XXXIV International Congress of Physiological Sciences (Christchurch, New Zealand, Aug. 2001)

T. Katsuyama and T. Yazawa: Analysis of temporary cardiac arrest in the freely moving spiny lobster, *Panulirus japonicus*.

T. Ishiwata, T. Katsuyama and T. Yazawa: HPLC analysis of neurohormonal substances in hemolymph and microdialysate obtained from freely moving agonistic lobster and ice-anesthetized lobster.

International Symposium of Neuronal Organization and Plasticity in the Microbrain System (Tsukuba, Ibaraki, Oct. 13-14, 2001)

T. Katsuyama and T. Yazawa: Cardiac slowdown in the freely moving spiny lobster, *Panulirus japonicus*.

National Conference of Theoretical and Applied Mechanics (Tokyo, Jan. 2002)

T. Katsuyama, K. Kiyono and N. Fuchikami: Chaos in a dripping faucet.

4) 学会誌等

東俊行: 結晶場による相対論的重イオンのコヒーレント共鳴励起の観測. 日本物理学会誌 **56** (2001) 502-509.

田沼肇: CORONAにおける多価イオン衝突実験. *KEK Proceedings 2001-7* (2001) 65-86.

矢澤徹, 勝山智男, 加藤敦, 海崎勇人, 安松幹展, 石渡貴之, 長谷川博, 音川実: フーリエスペクトル解析および HPLC 分析による甲殻類心臓における神経とホルモンの二重賦活機構の研究. 法政大学多摩研究報告 **16** (2001) 29-40.

T. Azuma, T. Ito, Y. Takabayashi, K. Komaki, T. Kambara, Y. Kanai, Y. Nakai, T. M. Kojima and Y. Yamazaki: Radiative electron capture of swift heavy ions. *RIKEN Accel. Prog. Rep.* **34** (2001) 88.

J. Matsumoto, A. Danjo, M. Yoshino, H. Tanuma and N. Kobayashi: Measurements of differential cross sections for elastic scattering of electrons from Ar^{7+} , Ar^{8+} ions. *At. Coll. Res. Jpn.* **27** (2001) 18-19.

T. Kitamura, T. Nishide, H. Shiromaru, Y. Achiba and N. Kobayashi: Coulomb explosion of multiply charged CD_4 by collision of Ar^{8+} - Observation of "dynamic" chirality -. *At. Coll. Res. Jpn.* **27** (2001) 28-29.

H. Tanuma, T. Hayakawa, A. Konnai, N. Kobayashi, C. Verzani and B. D. DePaola: Alignment of $\text{C}^{3+}(1s^23p)$ states produced in collisions of $\text{C}^{4+}(1s^2)$ with H_2 . *At. Coll. Res. Jpn.* **27** (2001) 33-34.

T. Kaneyasu, T. Azuma, M. Ehrich, M. Yoshino and K. Okuno: Scattering angle dependent fragmentation of molecules by slow highly charged ion impact. *At. Coll. Res. Jpn.* **27** (2001) 39-40.

K. Ishii, K. Okuno, A. Endo and B. Gr: Single- and double-charge changing cross sections in slow collisions of C^{q+} , N^{q+} , O^{q+} with H_2 ($q = 4 - 6$). *At. Coll. Res. Jpn.* **27** (2001) 41-42.

Y. Takabayashi, T. Ito, K. Komaki, Y. Yamazaki, T. Azuma, E. Takada and T. Murakami: Resonant coherent excitation H-like, He-like, and Li-like Fe ions. *At. Coll. Res. Jpn.* **27** (2001) 68-69.

G. Veshapidze, T. Nishide, H. Shiromaru, N. Kobayashi and T. Mizogawa: Temporal- and positional resolution of a PSD consisting of a resistive film and an "MBWC" readout pad. *At. Coll. Res. Jpn.* **27** (2001) 73-74.

S. Jinno, H. Hiroshi, H. Tanuma and N. Kobayashi: Mobility of helium cluster ions in helium gas at very low temperature. *At. Coll. Res. Jpn.* **27** (2001) 98-99.

H. Hidaka, S. Jinno, H. Tanuma and N. Kobayashi: Molecular ion mobility in helium gas at very low temperature. *At. Coll. Res. Jpn.* **27** (2001) 100-101.

小林信夫: 平成 10 年度 ~ 12 年度科学研究費補助金 (基盤研究 B) 研究成果報告書「多価イオンと原子・分子の衝突の物理」.

小林信夫: 平成 11 年度 ~ 13 年度科学研究費補助金 (基盤研究 B) 研究成果報告書「中空原子からの多重オーグ電子放出における電子相関の研究」.

光物性研究室

1. 研究活動の概要

1) 局在磁気モーメントの温度依存性の評価

バルク試料の磁氣的性質を明らかにする上で、帯磁率を測定しその逆数を温度に対してプロットすることは広く行われているが、この手法は局在と遍歴とを問わず、バルクを平均した帯磁率を観測していることになる。これに対して、軟X線放射光を用いた内殻励起磁気円二色性(MCD)は、原子を特定して磁気モーメントを評価できるので、種々の磁氣的性質の起源を特定する有力な手段となる。これまで、主として磁気秩序の無い状態で、CePd₃、PrFe₄P₁₂、NdFe₄P₁₂、CeNi、CeSn₃、CeRu₄Sb₁₂等について希土類元素の3d内殻励起にともなう磁気円二色性の温度依存性を測定してきた。結果は、バルク帯磁率の振る舞いと定性的に同様な場合(NdFe₄P₁₂)もあるが多くは異なっており、特に「コヒーレント近藤物質」とよばれる物質(CeSn₃など)ではバルク帯磁率と非常に異なった振る舞いを示すことを明らかにした。コヒーレント近藤物質ではMCDから求めた帯磁率はキュリー・ワイス直線にのる傾向があり、それを外挿した負の温度はシングルサイトの近藤温度に相当するものと解釈された。また、磁気モーメントの大きさがフント基底状態を仮定した値と異なる場合も見出された。

2) 軟X線発光の磁気円二色性

軟X線発光スペクトルは、光学的には2次過程で中間状態を種々に選べるために、単なる光吸収よりは豊富な情報を含む。磁性体にたいしてこの手法を適用し、磁気円二色性(MCD)を測定すれば、磁氣的励起を含む多様な情報が得られる。しかし、希土類元素の4d内殻励起にともなう発光や3d遷移金属の3p内殻励起に伴う発光は、無輻射の緩和の確率が非常に大きいために発光確率が極めて小さく、測定は難しかった。当研究室では世界に先駆けて、この困難な測定に挑戦し、Gd、Tb、Dy、Ho等の希土類金属、およびNiとCoに対して測定を行った。前者においては、4f局在スピンの再配列にともなうラマンシフトが明瞭に観測され、後者においても、遍歴性が強いにも関わらずスピン励起にともなう構造が観測された。またGdなどにおいては、浅い内殻である5p電子が4d正孔を埋めるときの発光の多重項成分の一つが、ある共鳴条件の下で100%に近いMCDを示すことが示唆され、ラマン過程における共鳴効果を利用した分光法のメリットを明らかにした。

3) 光電子分光

1) RFe₄P₁₂ (R= La, Ce, Pr) の共鳴光電子分光 :

充填スクッテルダイト型構造を持つ希土類化合物RFe₄P₁₂とRRu₄Sb₁₂(R=希土類)は、様々な興味深い性質を持つ。今回はPrFe₄P₁₂とCeRu₄Sb₁₂及び関連物質の共鳴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のBL-11D($h\nu=120$ eV付近)とBL-2C($h\nu=900$ eV付近)で行い、4f電子状態を調べた。PrFe₄P₁₂のPr 4fスペクトルでは、フェルミ準位近くに³H₄ピークが肩構造として観測された。その強度、形状は高い近藤温度をもつCe化合物の $f_{5/2}$ ピークとは異なっていることから、近藤温度は高くないと考えられる。価数揺動物質と考えられているCeRu₄Sb₁₂の4fスペクトルでは、フェルミ準位直下に強度の弱い $f_{5/2}$ ピークが観測された。このことから近藤温度はせいぜい10K程度と考えられる。

2) 単層カーボンナノチューブの光電子分光：

単層カーボンナノチューブ (SWNT) の電子構造は、1次元 van Hove 特異点による特徴的なピーク構造をもつことが知られているが、今までどのグループもその直接観測に成功しなかった。我々は試料表面の処理法を工夫し、特徴的なピーク構造と金属的ナノチューブから生ずるフェルミ端をもつ SWNT の電子構造を光電子分光によって観測した。

4) 逆光電子分光

発光エネルギー 50eV ~ 200eV を測定できる逆光電子分光測定装置を製作した。装置全体のエネルギー分解能は発光エネルギー 60eV において約 0.3eV で、このエネルギー領域では世界有数の分解能をほこる。CeNi, CeCo₂ を試料として用いた Ce の 4d-4f 共鳴逆光電子分光測定では、混成の強さによって近藤ピーク (f^1 ピーク) の強度およびエネルギー位置が大きく異なることが観測された。また、励起エネルギー 60eV での高分解能測定では、 f^1 ピークにわずかな構造が観測された。これは近藤ピーク ($f_{5/2}^1$) とそのスピン軌道パートナー ($f_{7/2}^1$) であると考えられる。

5) 単層カーボンナノチューブ及びそれを母材とした新物質の合成と物性

1) カーボンナノチューブ及びピーポッドの高純度合成とその物性探査

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のシンプルな精製法を新たに開発し、触媒金属をほとんど取り除いた、ほぼ 100% 純度の試料合成を達成した。さらに、ナノチューブのキャップ除去、再構成を自在にコントロールすることが可能になった。これらの手法を用いて、キャップを除去した高純度ナノチューブを準備し、そこに気相反応でフラーレンを導入することにより、充填率がほぼ 100% のピーポッドの合成に成功した。(充填率は真庭等との共同研究で XRD により確認された) ナノチューブのラマンスペクトルに、以前の試料では見られなかった大幅な変化が観測され、高充填率化による新たな秩序相の出現が示唆された。また、IFW との共同研究として、ピーポッドに電気化学ドーピングを行いながら光学測定を行うことにより、電子構造について調べた。その結果、電子ドーブとホールドーブで C₆₀ 及びナノチューブの共鳴ラマン効果が全く異なることを見いだした。この結果は電子ドーブでは C₆₀ の LUMO に電子が入り、ホールドーブではナノチューブの価電子帯にホールが注入されるというモデルでうまく説明され、C₆₀ の LUMO がナノチューブの nearly free electron state と混成し、Fermi レベルの直上まで降りてきているという理論計算結果を裏付ける結果と考えられる。

同様な手法で、ポルフィリンをはじめとする各種有機分子のナノチューブへの導入を行い、内包された分子の特殊な電子構造を分光学的に調べた。今後幅広い物質系に拡張していく予定である。

2) 二層ナノチューブの共鳴ラマン散乱

上記高純度ピーポッドを 1200 °C で 8 時間真空中熱処理することにより、内部のフラーレンが壊れてナノチューブに変わり、二層ナノチューブになる。段階的な変化を、TEM、ラマン、XRD により確認した。(真庭等との共同研究) 内部にナノチューブが生成されるに従って、外側のナノチューブのラマン強度の減少が観測され、層間の相互作用によりナノチューブのバンドがブロードニングを起こし、共鳴効果が弱まっていることが示唆された。これは多層ナノチューブにおいて、一番内側のナノチューブからのみラマンシグナルが観測されることの原因が、層間相互作用によるバンドブロードニングにあるというモデルと矛盾しない結果である。内部に新たに出現したナノチューブは、非常に細い直径をもち、平面的な sp^2 軌道からのずれを反映し

てフォノン振動数のソフト化が観測された。特に G' バンドと呼ばれる高波数のモードでは、外側のチューブからの信号と内側のチューブからの信号がきれいに分離したダブルピーク構造となり、それぞれが異なった共鳴効果を示すという興味深い結果を得た。最近、ナノチューブのラマン散乱においては、欠陥が関係した二重共鳴が支配的であるというモデルが提唱されており、二層チューブにおける G' バンドの共鳴効果はその検証に都合が良い。また、内側のチューブは非常に細いため、通常のナノチューブとは異なった電子構造をとることが期待される。超伝導の探査を含めた詳細な実験を今後行う予定である。

3) ナノサイズ分光単一構造ナノチューブの単結晶が合成不可能な現状では、ナノチューブの構造敏感な電子構造を調べるには、個々のチューブの測定を行うしか道が残されていない。そこで、走査型近接場光顕微鏡 (SNOM) を導入し、ナノメートルサイズの分光測定の準備を行った。入射光源として各種チューナブルレーザーを用いることにより、SNOM を用いた分光測定を実現する。今後 AFM、STM、STS、顕微ラマン装置を相補的に使用することにより、個別ナノチューブの電子構造について詳細に調べる予定である。

6) 軟体動物平滑筋のキャッチ機構の研究

軟体動物平滑筋には、エネルギーを消費せずに長時間にわたって張力を維持するキャッチと呼ばれる収縮機構がある。キャッチの分子機構については、活性化状態と同じくアクチン分子とミオシン分子の相互作用によって張力が維持されるという考えが有力である。活性化状態における ATP 加水分解サイクルが、アクチンとミオシン頭部が強く結合した段階で停止し、この結合によって張力が維持されるのではないかと考えられている。本研究では、ムラサキガイ前足糸牽引筋を試料としてシンクロトン放射光を用いた X 線回折実験により、弛緩、活性化、キャッチの三状態におけるアクチンおよびミオシンフィラメントの構造の違いを調べた。その結果、従来の研究では観察できなかった重要な知見を得ることができた。試料を活性化するとアクチンフィラメントもミオシンフィラメントも共に構造周期が増大する。活性化状態からキャッチ状態に移行するとアクチンフィラメントの構造周期は短縮するが、ミオシンフィラメントの構造周期は逆に増大する。一本のアクチンフィラメントの中にミオシン頭部と強く結合している部分と解離した部分があり、後者の部分は弛緩状態の構造に戻って短縮し、強い結合をしている部分を介してミオシンフィラメントを延伸する結果になっていると思われる。

7) 二次空間コヒーレンスの測定法の開発

放射光の二次空間コヒーレンスは光子統計性を反映する物理量であり、近い将来実現が期待される自由電子レーザーの性能を評価するためには二次空間コヒーレンスの測定は不可欠である。我々は、東京都立大学において「二次空間測定法の測定法の確立」、KEK-PF において「放射光の二次空間コヒーレンスの測定」を行ってきた。

東京都立大学では、レーザー光を回転する擦りガラスに通すことで擬似カオス光を生成し、一次と二次の空間コヒーレンスの同時測定を試みた。この測定から、生成された光は擬似カオスとは違った性質であることが判明したが、これは一次、二次空間コヒーレンス測定によって検出される揺らぎの時定数が大きく異なるためだと考えられる。また、放射光を用いた実験では TAC (Time to Amplitude Converter) を用いて二次空間コヒーレンスの測定を試みた。二次空間コヒーレンスの定量的な評価はまだできていないが、カオス光的性質に起因するあきらかな相関が、TAC 出力に観測された。

2. 研究業績

1) 論文

T. Miyahara, H. Ishii, Y. Takayama, M. Hirose, K. Maruyama, K. Obu, M. Shinoda, T. Muro, Y. Saitoh, T. D. Matsuda, H. Sugawara and H. Sato: MCD Study on Materials without Magnetic Order, *J. Phys. Soc. Jpn.* **70** (2001) 2977-2981.

H. Ishii, K. Obu, M. Shinoda, C. Lee, Y. Takayama, T. Miyahara, T. D. Matsuda, H. Sugawara and H. Sato: Photoemission Study of 4f Electronic States in $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ and Related Pr Compounds, *J. Phys. Soc. Jpn.* **71** (2002) 156-161.

Y. Takayama, M. Shinoda, K. Obu, C. Lee, H. Shiozawa, M. Hirose, H. Ishii, T. Miyahara and J. Okamoto: Magnetic Circular Dichroism of X-Ray Emission for Gadolinium in 4d-4f Excitation Region, *J. Phys. Soc. Jpn.* **71** (2002) 340-346.

A. Fujiwara, R. Iijima, K. Ishii, H. Suematsu, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki and Y. Achiba: Local current density detection of individual single-wall carbon nanotube in a bundle, *Appl. Phys. Lett.* **80** (2002) pp. 1993 - 1995.

H. Kataura, Y. Maniwa, M. Abe, A. Fujiwara, T. Kodama, K. Kikuchi, H. Imahori, Y. Misaki, S. Suzuki, and Y. Achiba: Optical Properties of Fullerene and Non-fullerene peapods, *Appl. Phys. A.* **74** (2002) pp. 349-354.

X. Liu, T. Pichler, M. Knupfer, M. S. Golden, J. Fink, H. Kataura, Y. Achiba, K. Hirahara, and S. Iijima: Filling factors, structural, and electronic properties of C_{60} molecules in single-wall carbon nanotubes, *Phys. Rev. B* **65** (2002) pp. 045419-1-6.

A. Fujiwara, Y. Matsuoka, H. Suematsu, N. Ogawa, K. Miyano, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki, Y. Achiba: Photoconductivity in Semiconducting Single-Walled Carbon Nanotubes, *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** (2001) L1229 - L1231.

T. Pichler, H. Kuzmany, H. Kataura and Y. Achiba: Metallic polymers of C_{60} inside single wall carbon nanotubes, *Phys. Rev. Lett.* **87** (2001), 267401-1-4.

Y. Maniwa, R. Fujiwara, H. Kira, H. Tou, H. Kataura, S. Suzuki, Y. Achiba, E. Nishibori, M. Takata, M. Sakata, A. Fujiwara and H. Suematsu: Thermal Expansion of Single Wall Carbon Nanotube Bundles: X-Ray Diffraction Studies, *Phys. Rev. B* **64** (2001) 241402-1-3.

R. Sen, S. Suzuki, H. Kataura, and Y. Achiba: Growth of single-walled carbon nanotubes from the condensed phase, *Chem. Phys. Lett.* **349** (2001) pp. 383-388.

S. Suzuki, H. Yamaguchi, T. Ishigaki, R. Sen, H. Kataura, W. Kraetschmer, and Y. Achiba: Time Evolution of Emission by carbon Nanoparticles Generated with a Laser Furnace Technique, *Eur. Phys. J. D* **16** (2001) pp.369 - 372.

H. Kuzmany, W. Plank, M. Hulman, Ch. Kramberger, A. Gruneis, Th. Pichler, H. Peterlik, H. Kataura, Y. Achiba: Determination of SWCNT diameters from the Raman response of the radial breathing mode, *Eur. Phys. J. B* **22** (2001) pp. 307-320.

M. Yudasaka, H. Kataura, T. Ichihashi, L.-C. Qin, S. Kar, and S. Iijima: Diameter Enlargement of HiPco Single-Wall Carbon Nanotubes by Heat Treatment, *Nano letters* **1** (2001) pp. 487-489.

R. Sen, A. Govindaraj, K. Suenaga, S. Suzuki, H. Kataura, S. Iijima and Y. Achiba: Encapsulated and hollow closed-cage structures of WS₂ and MoS₂ prepared by laser ablation at 450 - 1050 C, *Chem. Phys. Lett.* **340** (2001) pp. 242 - 248.

S. Kazaoui, N. Minami, N. Matsuda, H. Kataura and Y. Achiba: Electrochemical tuning of electronic states in single-wall carbon nanotubes studied by in situ absorption spectroscopy and ac resistance, *Appl. Phys. Lett.* **78** (2001) pp. 3433 - 3435.

2) 国際会議報告

T. Miyahara, H. Ishii, K. Obu, M. Shinoda, Y. Takayama, T. D. Matsuda, H. Sugawara and H. Sato: Precursor Non-Magnetic States of PrFe₄P₁₂ and CePd₃ detected by Core Excitation MCD, *Surf. Rev. Lett.* (2002) in press.

H. Ishii, T. Miyahara, Y. Takayama, K. Obu, M. Shinoda, C. Lee, H. Shiozawa, S. Yuasa, T. D. Matsuda, H. Sugawara and H. Sato: Resonant Photoemission Study of RFe₄P₁₂ (R= La, Ce, Pr), *Surf. Rev. Lett.* (2002) in press.

Y. Takayama, H. Ohtsubo, M. Shinoda, K. Obu, C. Lee, H. Shiozawa, H. Ishii and T. Miyahara: Magnetic Circular Dichroism of 4d-4f Resonant X-Ray Emission for Gadolinium and Terbium, *Surf. Rev. Lett.* (2002) in press.

H. Shiozawa, K. Obu, C. Lee, Y. Takayama, T. Miyahara, R. Z. Tai, K. Namikawa, M. Ando, S. Yamamoto, J. Urakawa, H. Hayano: Measurement of the second-order coherence of synchrotron radiation in VUV region, *Surf. Rev. Lett.* (2002) in press.

H. Kataura, Y. Maniwa, T. Kodama, K. Kikuchi, K. Hirahara, S. Iijima, S. Suzuki, W. Krätschmer and Y. Achiba: Fullerene-peapods: synthesis, structure, and Raman spectroscopy, *Proceeding of IWEPNM2001, AIP Conference Proceedings* **591** (2001) pp. 251- 255.

X. Liu, T. Pichler, M. Knupfer, M. S. Golden, J. Fink, H. Kataura, Y. Achiba, D. M. Walters, K. Bradley, B. J. Bronikowski, and R. E. Smalley: Electronic structure and optical properties of single wall carbon nanotubes and C₆₀ peapods, *Proceeding of IWEPNM2001, AIP Conference Proceedings* **591** (2001) pp. 266- 272.

A. Grüneis, M. Hulman, C. Kramberger, H. Peterlik, H. Kuzmany, H. Kataura, and Y. Achiba: Oscillatory Behavior of Raman Modes in SWCNT, *Proceeding of IWEPNM2001, AIP Conference Proceedings* **591** (2001) pp. 319- 322.

T. Pichler, H. Kuzmany, H. Kataura and Y. Achiba: Photosensitive resonance Raman scattering in C₆₀ peapods, Proceeding of IWEPNM2001, AIP Conference Proceedings **591** (2001) pp. 261-265.

R. Sen, H. Kataura, Y. Ohtsuka, T. Ishigaki, S. Suzuki and Y. Achiba: Effect of Temperature Gradient near the Target and Gas Flow Rate on the Diameter Distribution of Single-Walled Carbon Nanotubes Grown by the Laser Ablation Technique, MRS Proceedings **633** (2001) A13.30.1 - A13.30.6.

S. Suzuki, R. Sen, H. Yamaguchi, T. Ishigaki, Y. Ohtsuka, Y. Achiba and H. Kataura: Time and Space Evolution of Emitting Carbon Nanoparticles- Correlation with the Formation of Fullerenes and Carbon Nanotubes, MRS Proceedings **633** (2001) A13.31.1 - A13.31.6.

H. Kuzmany, M. Hulman, W. Plank, A. Grueneis, C. Kramberger, H. Peterlik, T. Pichler, H. Kataura, and Y. Achiba: Quantum Oscillations for the Spectral Moments of Raman Spectra from SWCNT, Proceeding of ISNM2001, AIP Conference Proceedings **590** (2001) pp. 81 - 86.

J. Fink, X. Liu, H. Peisert, T. Pichler, M. Knupfer, M.S. Golden, D.M. Walters, H. Kataura: Electronic Structure Studies of Carbon Nanotubes: Aligned, Doped and Filled, Proceeding of ISNM2001, AIP Conference Proceedings **590** (2001) pp. 87 - 94.

R. Sen, S. Suzuki, H. Kataura, and Y. Achiba: Gas Dynamic and Time Resolved Imaging Studies of Single-Wall Carbon Nanotubes Growth in the Laser Ablation Process, Proceeding of ISNM2001, AIP Conference Proceedings **590** (2001) pp. 27 - 30.

S. Suzuki, H. Yamaguchi, R. Sen, H. Kataura, W. Krätschmer and Y. Achiba: Time and Space Evolution of Carbon Species Generated with a Laser Furnace Technique, Proceeding of ISNM2001, AIP Conference Proceedings **590** (2001) pp. 51 - 54.

S. Kazaoui, N. Minami, N. Matsuda, H. Kataura and Y. Achiba: In-Situ Spectroelectrochemical Study of Single-Wall Carbon Nanotubes, Proceeding of ISNM2001, AIP Conference Proceedings **590** (2001) pp. 15 - 18.

M. Ichida, S. Mizuno, H. Kataura, Y. Achiba and A. Nakamura: Optical Anisotropy of Aligned Single-Walled Carbon Nanotubes in Polymer, Proceeding of ISNM2001, AIP Conference Proceedings **590** (2001) pp. 121 - 124.

S. Masubuchi, H. Masubuchi, S. Kazama, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki, and Y. Achiba: The Effect of Solvent on Electrical Transport Properties in Single-Wall Carbon Nanotubes, Proceeding of ISNM2001, AIP Conference Proceedings **590** (2001) pp. 233 - 236.

A. Fujiwara, Y. Matsuoka, H. Suematsu, N. Ogawa, K. Miyano, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki, and Y. Achiba: Photoconductivity of Single-Walled Carbon Nanotubes, Proceeding of ISNM2001, AIP Conference Proceedings **590** (2001) pp. 189 - 192.

H. Kataura, T. Kodama, K. Kikuchi, K. Hirahara, K. Suenaga, S. Iijima, S. Suzuki, W. Krätschmer and Y. Achiba: Optical Properties of Fullerene-Peapods, Proceeding of ISNM2001, AIP Conference Proceedings **590** (2001) pp. 165 - 168.

T. Ito, Y. Yatsu, H. Fudo, Y. Iwasa, T. Mitani, H. Kataura, and Y. Achiba: Intercalation of SWNTs as Investigated by Raman and X-ray Photoemission Spectroscopy, Proceeding of ISNM2001, AIP Conference Proceedings **590** (2001) pp. 177 - 180.

K. Nomura, M. Osawa, K. Ichimura, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki, and Y. Achiba: STM/STS on Carbon Nanotubes at Low Temperature, Proceeding of ISNM2001, AIP Conference Proceedings **590** (2001) pp.197 - 200.

H. Kataura, Y. Maniwa, T. Kodama, K. Kikuchi, K. Hirahara, K. Suenaga, S. Iijima, S. Suzuki, W. Krätschmer and Y. Achiba: Optical properties of fullerenes encapsulated in single-wall nanotubes, Proc. of 25th Int. Conf. Phys. Semicond. (2001) pp. 1609 - 1612.

M. Ichida, S. Mizuno, S. Kuno, Y. Saito, H. Kataura, Y. Achiba, A. Nakamura: Coulomb effects on the fundamental optical transition in single-walled carbon nanotubes, Proc. of 25th Int. Conf. Phys. Semicond. (2001) pp. 1685 - 1686.

3) 学会講演

日本物理学会 第56回年次大会 2001年3月27日(火) ~ 30日(中央大学)

篠田元樹, 大部健司, 李徹, 塩沢秀次, 高山泰弘, 石井広義, 宮原恒あき, 岡本 淳: Gd の 4d-4f 内殻励起発光 MCD

大部健司, 篠田元樹, 李徹, 高山泰弘, 石井広義, 宮原恒あき, 松田達磨, 菅原仁, 佐藤英行: RFe₄P₁₂ (R= La, Ce, Pr) の共鳴光電子分光 II

塩沢秀次, 大部健司, 李徹, 高山泰弘, 宮原恒あき, RenZhong Tai, 並河一道, 安藤正海, 山本樹, 浦川順治, 早野仁司: 放射光の二次空間コヒーレンス測定 (ビーム物理)

真庭豊, 藤原竜児, 吉良弘, 藤秀樹, 片浦弘道, 鈴木信三, 阿知波洋次, 藤原明比古, 壽榮松宏仁: 単層カーボンナノチューブの X 線回折実験: 温度依存性

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の赤外フェムト秒ポンプ・プローブ分光

飯島良介, 壽榮松宏仁, 藤原明比古, 石井賢司, 片浦弘道, 阿知波洋次, 鈴木信三, 真庭豊: AFM-STM 二重法による単層カーボンナノチューブの局所電子構造の研究

日野照純, 渡辺浩幸, 岡田裕子, 岩崎賢太郎, 片浦弘道, 阿知波洋次, 平原佳織, 飯島澄男: C₆₀ 内包単層カーボンナノチューブ (peapod) の紫外光電子分光スペクトル

伊藤崇芳, 安藤弘朗, 岩佐義宏, 三谷忠興, 片浦弘道, 阿知波洋次: C₆₀ 内包ナノチューブへのアルカリ金属ドーピング

北尾真司, 瀬戸誠, 小林康浩, 春木理恵, 増淵伸一, 風間重雄, 片浦弘道, 真庭豊, 鈴木信三, 阿知波洋次: ヨウ素を挿入した単層カーボンナノチューブのメスバウアー効果 II

カザウイ・サイ, 南信次, 松田直樹, 片浦弘道, 阿知波洋次: 単層カーボンナノチューブの電気化学ドーピングによる光・電子物性制御

片浦弘道: (領域7, 領域9 合同シンポジウム「ナノチューブ科学の最近の進展: 新物質合成から応用まで」) ドーピング効果

日本物理学会 2001 年秋季大会 2001 年 9 月 17 日(月) ~ 9 月 20 日(木)(徳島文理大)

塩沢秀次, 大部健司, 高山泰弘, 石井広義, 宮原恒あき, 松田達磨, 菅原仁, 佐藤英行, 室隆桂之, 齋藤裕児: 磁気秩序のない状態における内殻吸収 MCD の温度依存性: $CeRu_4Sb_{12}$, $CeSn_3$ 及び $NdFe_4P_{12}$ の場合

篠田元樹, 大坪英雄, 大部健司, 李徹, 塩沢秀次, 高山泰弘, 石井広義, 宮原恒あき, 岡本淳: Gd, Tb, Ho, Dy の 4d-4f 共鳴励起発光 MCD と吸収 MCD との比較

大部健司, 篠田元樹, 李徹, 塩沢秀次, 高山泰弘, 石井広義, 宮原恒あき, 湯浅清司, 松田達磨, 菅原仁, 佐藤英行: RFe_4P_{12} (R= La, Ce, Pr) の共鳴光電子分光 II

藤原明比古, 真庭豊, 藤原竜児, 阿部真利, 吉良弘, 藤秀樹, 片浦弘道, 鈴木信三, 阿知波洋次, 西堀英治, 高田昌樹, 坂田誠, 壽榮松宏仁: C_{60} 内包単層カーボンナノチューブ束の X 線回折

阿部真利, 真庭豊, 藤原竜児, 吉良弘, 藤秀樹, 片浦弘道, 鈴木信三, 阿知波洋次, 藤原明比古, 西堀英治, 高田昌樹, 坂田誠, 壽榮松宏仁: フラーレン内包チューブの XRD

市村晃一, 大澤雅人, 野村一成, 片浦弘道, 真庭豊, 鈴木信三, 阿知波洋次: カーボンナノチューブの低温 STM/STS

酒井正俊, 水野秀平, 市田正夫, 片浦弘道, 阿知波洋次, 中村新男: 配向した単層カーボンナノチューブにおける共鳴ラマン散乱の偏光依存性

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の赤外フェムト秒ポンプ・プローブ分光 II

片浦弘道, 阿知波洋次, 吾郷浩樹, 大嶋哲, 湯村守雄: CVD 法で作製した単層ナノチューブのラマン散乱

増淵伸一, 大岩潔, 片浦弘道, 真庭豊, 鈴木信三, 阿知波洋次, 風間重雄: 単層カーボンナノチューブの電気輸送特性 (VIII)

第 15 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム (2002 年 1 月 11 日 ~ 13 日, 東京大学物性研究所)

大部健司, 大坪英雄, 李徹, 塩沢秀次, 高山泰弘, 石井広義, 宮原恒あき, 湯浅清司, 松田達磨, 青木勇二, 菅原仁, 佐藤英行: RFe_4P_{12} (R= La, Ce, Pr) の共鳴光電子分光 II

高山泰弘，大坪英雄，篠田元樹，大部健司，李徹，塩沢秀次，石井広義，宮原恒あき，岡本淳：
希土類金属 (Gd, Tb, Dy, Ho) の 4d-4f 共鳴発光 MCD 測定

塩沢秀次，篠田元樹，大部健司，高山泰弘，石井広義，宮原恒あき，松田達磨，菅原仁，佐藤英
行，室隆桂之，岡本淳，齋藤裕児：磁気秩序のない状態における内殻吸収 MCD の温度依存性

第 21 回フラーレン総合シンポジウム 2001 年 7 月 25 日 ~ 27 日 (つくば国際会議場)

T. Tamaki, H. Yamaguchi, S. Suzuki, R. Sen, H. Kataura and Y. Achiba: Laser vaporization
Process of Graphite under High Ambient Temperature with Ne, Ar, and Kr Gas Atmosphere

S. Suzuki, R. Sen, M. Mimori, A. Okada, H. Kataura and Y. Achiba: Annealing Effect on the
Formation of Single-Walled Carbon Nanotubes

M. Kimura, N. Choi, R. sen, S. Suzuki, H. Kataura, H. Tokumoto and Y. Achiba: Solvent
Effect on the Bundle Structure of Single-Walled Carbon Nanotubes

A. Fujiwara, R. Iijima, H. Suematsu, K. Ishii, H. Kataura, Y. Achiba, S. Suzuki, Y. Maniwa:
Local Electronic Structure of Single-Walled Carbon Nanotubes Measured by AFM / STS Dual
Probe Method.

N. Minami, Y. Guo, S. Kazaoui, A. Richter, M. Yoshida, N. Matsuda, H. Kataura, Y. Achiba:
Deposition of SWNT Thin Film and the Control of Their Electronic States.

第 22 回フラーレン総合シンポジウム 2002 年 1 月 9 日 ~ 11 日

(岡崎コンファレンスセンター)

S. Suzuki, R. Sen, H. Kataura, T. Tamaki and Y. Achiba: SWNT Formation by Use of Dual
Laser Vaporization Technique.

H. Kataura, T. Kodama, K. Kikuchi, S. Suzuki and Y. Achiba: Resonance Raman Scattering
of Fullerene-peapods.

M. Yudasaka, T. Ichihashi, D. Kasuya, H. Kataura, K. Takahashi, F. Kokai, S. Iijima: Coales-
cence of SWNTs and SWNHs by Heat Treatment.

H. Kataura, Y. Achiba, H. Ago, S. Oshima, M. Yumura: Resonance Raman Scattering of
Single-Wall Carbon Nanotubes Synthesized by Chemical Vapor Deposition.

N. Choi, H. Kataura, T. Shimizu, W. Mizutani, S. Suzuki, Y. Achiba and H. Tokumoto:
Purification and Manipulation of Carbon Nanotubes for Molecular Electronics.

日本生物物理学会第 39 回年会 2001 年 10 月 6 日 ~ 10 月 8 日 (大阪大学吹田地区)

田嶋佳子，牧野浩司，若林克三：軟体動物平滑筋のキャッチ状態の構造

PF 研究会「 X 線非弾性散乱を用いた物性研究」 2002 年 3 月 29 日 ~ 3 月 30 日

(高エネルギー加速器研究機構)

国際会議

XIII International Conference on Vacuum Ultraviolet Radiation Physics, July 23 - 27, 2001, Stazione Marittima, Trieste, Italy.

T. Miyahara, H. Ishii, K. Obu, M. Shinoda, Y. Takayama, T. D. Matsuda, H. Sugawara and H. Sato: Precursor Non-Magnetic States of $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ and CePd_3 detected by Core Excitation MCD.

H. Ishii, T. Miyahara, Y. Takayama, K. Obu, M. Shinoda, C. Lee, H. Shiozawa, S. Yuasa, T. D. Matsuda, H. Sugawara and H. Sato: Resonant Photoemission Study of $\text{RFe}_4\text{P}_{12}$ (R= La, Ce, Pr).

Y. Takayama, H. Ohtsubo, M. Shinoda, K. Obu, C. Lee, H. Shiozawa, H. Ishii and T. Miyahara: Magnetic Circular Dichroism of 4d-4f Resonant X-Ray Emission for Gadolinium and Terbium.

H. Shiozawa, K. Obu, C. Lee, Y. Takayama, T. Miyahara, R. Z. Tai, K. Namikawa, M. Ando, S. Yamamoto, J. Urakawa, H. Hayano: Measurement of the second-order coherence of synchrotron radiation in VUV region.

Third International Conference on Synchrotron Radiation in Material Science January, 21-24, 2002, Shangri-La Hotel, Singapore, Singapore.

H. Shiozawa, T. Miyahara, H. Ishii, Y. Takayama, K. Obu, T. Muro, Y. Saitoh, T. D. Matsuda, H. Sugawara and H. Sato: Measurements of temperature dependence of "localized susceptibility".

II International Workshop on the Science and Application of Nanotubes, July 22 - 25, 2001, Inselhotel Hermannswerder, Potsdam, Germany.

H. Kataura, T. Kodama, K. Kikuchi, K. Hirahara, K. Suenaga, S. Iijima, W. Krätschmer, S. Suzuki and Y. Achiba: Optical Properties of Fullerene- and Non-Fullerene-Peapods. (**Invited paper**)

M. S. Golden, X. Liu, T. Pichler, M. Knupfer, J. Fink, D. Walter, M. J. Bronikowski, R. E. Smalley, H. Kataura, O. Jost, A.A. Gorbunov and W. Pompe: The Optical Properties and Electronic Structure of SWNT: Empty, Stuffed or Surrounded by Dopants. (**Invited paper**)

X. Liu, T. Pichler, M. Knupfer, M.S. Golden, J. Fink, D. Walters, M.J. Bronikowski, R. E. Smalley, and H. Kataura: Electronic Structure of Pristine, Fullerene-Filled and Intercalated SWNT From High Resolution EELS in Transmission.

T. Pichler, W. Plank, A. Gruneis, H. Kuzmany, H. Kataura and Y. Achiba: Charge Transfer in Potassium Doped C_{60} Peapods From Resonance Raman Scattering.

Tsukuba Symposium on Carbon Nanotube in Commemoration of the 10th Anniversary of its Discovery, October 3-5, 2001, Tsukuba International Congress Center, Japan.

H. Kataura: Synthesis, Structure, and Optical Properties of Fullerene-peapods (**Invited Paper**)

A. Fujiwara, R. Iijima, S. Suematsu, K. Ishii, H. Kataura, Y. Achiba, S. Suzuki and Y. Maniwa: Local Electronic Structure of Single-Walled Carbon Nanotubes Measured by AFM/STS Dual Probe Method.

K. Ichimura, M. Osawa, K. Nomura, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki and Y. Achiba: Tunneling Spectroscopy on Carbon Nanotubes using STM.

N. Minami, Y. Guo, S. Kazaoui, M. Yoshida, N. Matsuda, H. Kataura, Y. Achiba and T. Miyashita: Deposition of Multi-layer LB Films and Fermi Level Control of SWNT.

M. Ichida, Y. Hamanaka, H. Kataura, Y. Achiba and A. Nakamura: Ultrafast Relaxation Dynamics of Photoexcited States in Semiconducting Single-Walled Carbon Nanotubes.

X. Zhao, Y. Ando, L-C. Qin, H. Kataura, Y. Maniwa and R. Saito: Characteristic Raman Spectra of Multiwalled Carbon Nanotubes.

S. Masubuchi, K. Ooiwa, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki, Y. Achiba and K. Kazama: Thermoelectric Power of Single Walled Carbon Nanotubes Containing Alcohol Molecules.

Materials Research Society 2001 Fall Meeting, November 26-30, 2001, Hynes Convention Center and Sheraton Boston Hotel, Boston, Massachusetts, USA

S. Suzuki, R. Sen, T. Tamaki, Y. Achiba, H. Kataura: Preparation of Single-Walled Carbon Nanotubes by Simultaneous Laser Ablation of Two Kinds of Target.

R. Sen, S. Suzuki, T. Tamaki, Y. Achiba, H. Kataura: Growth of Single-Walled Carbon Nanotubes in a Condensed Phase.

XVIth International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials, March 2 - 9, 2002, Hotel Sonnalp, Kirchberg / Tirol, Austria

H. Kataura, Y. Maniwa, A. Fujiwara, Y. Misaki, S. Suzuki and Y. Achiba: Fullerene-peapods and Double-wall Nanotubes: Structures and Optical Properties (**Invited Paper**)

A. Fujiwara, Y. Matsuoka, R. Iijima, H. Suematsu, N. Ogawa, K. Miyano, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki and Y. Achiba: Photoconductivity and Local Transport Properties of SWNT Bundles.

L. Kavan, L. Dunsch and H. Kataura: In-situ Raman Spectroelectrochemistry on Peapods.

R. Pfeiffer, T. Pichler, M. Holzweber, W. Plank, H. Kuzumany, H. Kataura and Y. Achiba: Concentration, Symmetry and Character of C₆₀ in C₆₀ Peapods. (**Invited Paper**)

T. Pichler, A. Kukovec, H. Kuzmany, Y. Achiba and H. Kataura: Charge Transfer in Intercalated C₆₀ peapods. (**Invited Paper**)

4) 学会誌等

片浦弘道: カーボンナノチューブとフラーレン内包～生成機構、基礎物性、光学特性から応用まで～、物性研究 77 (2002) pp. 739 - 746.

片浦弘道: フラーレン入りナノチューブの生成とラマン効果、機能材料 21 (2001) pp.76 - 84.

5) 著書

片浦弘道: カーボンナノチューブ - 期待される材料開発 - 、第 1 2 章「フラーレン入りナノチューブの生成とラマン効果」、シーエムシー(株)(2001) pp. 72 - 80.

ミクロ物性研究室

1. 研究活動の概要

1) 1) 超伝導およびナノクラスター凝縮体の物性研究

我々は、ナノメートルサイズの特徴的な構造を有する物質系の物性について、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て研究している。2001年度(平成13年度)における研究活動の概要は次のとおりである。なお、藤秀樹助手は2001年7月広島大学先端物質科学科助教授として転出し、2002年4月より松田和之氏(姫路工業大学学振特別研究員)を迎えることになった。

ア) 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、多数の原子・分子を取りこむことができる。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”を形成する。ゼオライト内には、したがって、空隙原子の結晶が形成されていると見なす事ができ、新規物性の発現舞台となる。本年度は、継続課題である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とともに、特にアルカリ-ゼオライトFAU系において物性探索を行った。前者についてはゼロ磁場 μ SR実験を行ない、磁気転移を確認した。現在、シリコンのNMRスペクトルと μ SRの緩和関数を同時に説明可能な、もっとも確からしい磁気構造モデルの検討を行っている。後者については、温度によって試料の色が顕著に変化する現象を発見し、その機構として二つのケージ内を電子が移動するモデルを提案した(中央大学、東京医科大との共同研究)。

イ) カーボンナノチューブの構造と相転移: 多層チューブの構造モデルは幾つか提案されている。閉じたチューブが入れ子状に配置した理想的なロシア人形型、一枚のグラフェンシートをぐるぐる巻いたスクロール型、これらの混合型などである。我々は水素中アーク放電法により作製した試料について放射光を用いたX線回折(XRD)実験を行った。詳細な解析の結果、閉じたチューブが多数存在すること、これらのチューブは10-20nm以下の細いチューブであること、太いチューブは外側が閉じていない混合型であることなどが示された。(名城大との共同研究)

単層チューブのXRD実験では、チューブ直径と格子定数を求め、それらの熱膨張率を初めて決定することに成功した。チューブ直径の熱膨張率はグラファイトの面内のそれ程度に小さいことがわかった。また、チューブ内に C_{60} 、 C_{70} を内包した“ピ-ポット”のXRD実験を行い、片浦らによる都立大試料が世界最高品質であることを示した。更に、チューブ内に形成されたフラレン1次元結晶の構造相転移について興味深い結果を得た。

ウ) 新規2次元超伝導体 $HfNCl$ の研究: ベータ型- $HfNCl$ は、HfとNがつくる二重八ニカム構造の二次元シートが積み重なり、その層間に広い2次元“ナノ”スペースを有する。Liと有機分子THFを挿入して電子ドープすることにより26Kの超伝導が発現する。これまでの研究から、二次元的な超伝導特性を示すこと、フェルミ面電子状態密度が小さいこと、電子格子相互作用と電子間相互作用が共に小さいこと、二次元自由電子ガスのことなどを明らかにしている。本年度は、窒素の同位体効果の測定を行ない、超伝導機構を議論した。(広島大学工学

部との共同研究)

エ) MgB₂ 超伝導体の研究: MgB₂ は金属間化合物の中では最高の超伝導転移温度を示し、2001年1月青山学院大学秋光グループにより発見された。我々は、ボロンのサイトの一部を炭素に置換した試料のNMR実験を行ない、転移温度の変化と電子状態の関連を議論した。(北陸先端大、東北大金研との共同研究)

オ) 学外共同利用施設による研究: X線を用いた実験は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、μ中間子を用いた実験は高エネルギー加速器研究機構(KEK PF)の中間子共同利用施設において行なわれた。課題名および課題番号は次のとおりである。(1)多層カーボンナノチューブの熱膨張率(SPring-8, 2002A0266-ND1-np)、(2)La@C₈₂内包カーボンナノチューブの構造と相転移(SPring-8, 2001B0205-ND-np)、(3)フラーレン内包カーボンナノチューブの構造(SPring-8, 2001A0187-ND-np)、(4)アルカリ金属を吸蔵したゼオライトLTAにおける超格子構造の安定性(SPring-8, 2001A0186-ND-np)、(5)カーボンナノチューブなどの炭素ナノ構造物質の研究(KEK PF, 2000G217)、(6)アルカリ金属を吸蔵したゼオライトの磁性(KEK MSL, S01-26)。

2) 2) 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研究グループは、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ずに電子スピン磁化率を測定できる。加圧下でのESR実験も可能で、格子定数を変え、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。以下に今年度行われた研究の概要を整理する。

ア) 導電性高分子のポリピロール、ポリアルキルチオフェンについて、K-バンド(約20 GHz) ESRとNMRにより高精度のg-値の異方性の測定を進めた。ポリピロールは中央大学、東京医科大学との共同研究、ポリアルキルチオフェンはノルウエー工科大学との共同研究として進められた。導電性高分子は、現在までの膨大な研究結果を踏まえ、企業において応用研究のフェーズに入っている。しかし、基礎物性の理解には未だ不明な点を多く残している。例えば、ESRはその電子状態を知る上で多用されているが、その解釈の基礎は確立しているとは言い難い。g-値の異方性は、ESR信号の因って来る所をしる重要な手がかりを与えられ考えられる。今回、ピロールでは電解合成する際に電流と垂直に磁場を適用して得られた高い配向性を持つ試料を調べることにより、ポリピロール本来のg-値の異方性が観測できるという画期的な結果を得た。

更に、同一構造を持ち、窒素が硫黄に代わったポリアルキルチオフェンでも高い配向性を持つ試料について調べることが可能となったため、これらの系の電子状態の詳しい解析が現実的になってきた。また、最終結論は得られていないが、ESR 信号の成因の解明に一步近づけたと言えよう。

イ) フラーレンが1次元的に繋がった斜方晶 Rb_1C_{60} ポリマー相の解析も継続して進めてきた。この系は常圧では 50 K で磁化率に異常が報告されている。圧力下 ESR と共に、バークレーの Zettl らの圧力下電気抵抗の結果を併せて解析を進めた結果、この系は、モット・ハバード型絶縁体・金属転移であることを示してきた。中性子散乱物性研究室との共同研究により加圧下の格子定数の測定を行い、Zettl らの加圧下電気抵抗の温度依存性の異常が圧力の温度依存性に起因する I-M-I 転移である可能性を明らかにし、また、モット・ハバード転移が起こる格子定数を見積もることが出来た。(NEC、大阪市大との共同研究)

ウ) C_{60} を構成要素とするもう一つの磁性体、TDAE- C_{60} の単結晶の ESR を昨年に引き続き調べた。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。これまでの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電総研の川本氏のモデルである、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だと主張してきた。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。更に、TDAE 分子の関与を調べるために 1 軸加圧の準備を進めている。(産総研との共同研究)

エ) 等方的な構造を持つが、やはり反強磁性相転移がからむ系として、アルカリ金属をドーブしたアルカリ - 電子 - ソーダライトの研究も昨年度に引き続き進めた。これは、UCSB のスルダノフ博士との共同研究である。この系の特徴は、大変シンプルな構造と、その中には、中心に原子核イオンを持たない電子がトラップされ、それらの電子相関を調べる舞台を提供する。特に、圧力により Al-O-Si の結合角が容易に変化するため、電子相関を変化させることが容易である。今年度は、Na と K をドーブした SES と KES の圧力下における磁化率を詳しく調べ、反強磁性転移温度とキュリー・ワイス温度の変化を測定した。解析の結果、アルカリイオンの種類の効果は、イオンサイズに起因するクーロン相互作用と格子ポテンシャルのバランスに影響し、SES は KES に 4 GPa の化学圧が働いた状態にあること、また、磁性の圧力依存性が Alumino-Silicate ケージの 2 種の結合窓のポテンシャル壁の高さの変化に起因する指数関数的なトンネル確率で良く理解できることを明らかにした。

オ) 一次元的な DMe-DCNQI スタックと Li 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) $_2$ Li は 65 K のスピンパイエルス (SP) 基底状態を持つ。周波数可変 ESR を適用して電子状態を調べた結果、キュリー・ワイススピンの DCNQI 分子 4 枚の周期で作るシングレットドメインの可動なスピンソリトンであり、 T_{SP} より十分低温ではポリアセチレンの中性ソリトンと同じフォノン駆動されること、 T_{SP} 近くで異常に拡散速度が増大することを示した。その機構は現在検討中である。また、この系は、圧力により、主に 1 次元鎖方向の相互作用が変化するため、スピンパイエルス転移と圧力の関係を調べるのに理想的な系である。転移温度は、圧力を 1.0、1.5 GPa と増加させるに従い、65 K、80 K、100 K と上昇しており、理論との比較

が興味深い。(理研との共同研究)

カ) 交互積層型電荷移動錯体は中性相、イオン性相の二種の相が存在するという特徴を持ち、代表的物質として TTF-CA が知られている。その仲間である (BEDT-TTF)(ClMeTCNQ) 及び (BEDO-TTF)(Cl₂TCNQ) 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-パイエルズ転移が押さえられると予想される。しかし (BEDT-TTF)(ClMeTCNQ) では圧力下 ESR により電子スピン磁化率の温度依存性にピークが観測され、このピーク温度で中性-イオン性転移とスピン-パイエルズ転移が同時に起きていると結論された。磁化率ピークは TTF-CA では見られず、その理由は (BEDT-TTF)(ClMeTCNQ) の交換相互作用が弱くまた一次元性が低いため、転移点前後でのスピン-パイエルズ状態のゆらぎが大きいためと思われる。一方、室温、常圧でイオン性相にいる (BEDO-TTF)(Cl₂TCNQ) では、圧力により一次元性が強められ低温ではやはり予想に反してスピン - パイエルズ転移が起きているように見える。(北大との共同研究)

2. 研究業績

1) 論文

K. Mizoguchi, M. Machino, H. Sakamoto, T. Kawamoto, M. Tokumoto, A. Omerzu and D. Mihailovic: Pressure effect in TDAE-C₆₀ ferromagnet : mechanism and polymerization, *Phys. Rev. B* **63**, 040417(R)1-4 (2001).

T. Kawamoto, M. Tokumoto, H. Sakamoto and K. Mizoguchi: Theoretical Study of Pressure Effect on TDAE-C₆₀, *J. Phys. Soc. Jpn.* **70**, 1892-1895 (2001).

K. Mizoguchi: Electronic states in conjugated polymers studied by electron spin resonance, *Synth. Met.* **119**, 35-38 (2001).

K. Mizoguchi, M. Machino, H. Sakamoto, M. Tokumoto, T. Kawamoto, A. Omerzu and D. Mihailovic: Mechanism of ferromagnetism in TDAE-C₆₀ : ESR study under pressure, *Synth. Met.* **121**, 1778-1779 (2001).

H. Sakamoto, S. Kobayashi, K. Mizoguchi, M. Kosaka and K. Tanigaki: ESR under pressure on polymer phase A₁C₆₀ (A=Rb, Cs), *Synth. Met.* **121**, 1103-1104 (2001).

K. Mizoguchi, M. Machino, H. Sakamoto, T. Kawamoto, M. Tokumoto, A. Omerzu and D. Mihailovic: Magnetic properties of TDAE-C₆₀ under pressure, *Nanonetwork Materials; Fullerenes, Nanotubes, and related Systems*, (AIP, 2001), **590**, p. 381-384.

S. Kobayashi, H. Sakamoto, K. Mizoguchi, M. Kosaka and K. Tanigaki: EPR in RbC₆₀ under pressure, *Nanonetwork Materials; Fullerenes, Nanotubes, and Related Systems*, (AIP, 2001), **590**, p. 309-312.

H. Sakamoto, H. Tou, Y. Maniwa, H. Ishii, E. Reny, and S. Yamanaka: NMR studies of silicon clathrate compounds; Fullerenes, Nanotubes, and Related Systems, (AIP, 2001), **590**, p. 503-506.

- H. Tou, Y. Maniwa, K. Mizoguchi, L. Damjanovic and V. I. Srdanov: NMR studies on antiferromagnetism in alkali-electro-sodalite, *J. Mag. Mag. Mater.* **226-230**, 1098-1100 (2001).
- Y. Maniwa, R. Fujiwara, H. Kira, H. Tou, E. Nishibori, M. Takata, M. Sakata, A. Fujiwara, X. Zhao, S. Iijima and Y. Ando: Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWNTs) Grown in Hydrogen Atmosphere: An X-Ray Diffraction Study, *Phys. Rev. B* **64**, 073105 (2001).
- Y. Maniwa, R. Fujiwara, H. Kira, H. Tou, H. Kataura, S. Suzuki, Y. Achiba, E. Nishibori, M. Takata, M. Sakata, A. Fujiwara and H. Suematsu: Thermal Expansion of Single-Walled Carbon Nanotube (SWNT) Bundles: X-Ray Diffraction Studies, *Phys. Rev. B* **64**, 241402(R) (2001).
- H. Tou, Y. Maniwa, T. Koiwasaki and S. Yamanaka: Unconventional Superconductivity in Electron-doped Layered $\text{Li}_{0.48}(\text{THF})_y\text{HfNCl}$, *Phys. Rev. Lett.*, **25**, 5775-5778 (2001).
- A. Fujiwara, Y. Matsuoka, H. Suematsu, N. Ogawa, K. Miyano, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki and Y. Achiba: Photoconductivity in Semiconducting Single-Walled Carbon Nanotubes, *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, L1229 - L1231 (2001).
- K. Kitazume, H. Tou, Y. Maniwa, M. Kosaka and K. Tanigaki: Electronic states of superconducting fullerenes with small lattice constants: a NMR study, *Synth. Met.* **121**, 1115-1116 (2001).
- Y. Maniwa, H. Ikejiri, H. Tou, M. Yasukawa and S. Yamanaka: NMR of Li-doped C60 polymers, *Synth. Met.* **121**, 1105-1106 (2001).
- H. Kataura, Y. Maniwa, T. Kodama, K. Kikuchi, K. Hirahara, K. Suenaga, S. Iijima, S. Suzuki, Y. Achiba and W. Kratschmer: High-yield fullerene encapsulation in single-wall carbon nanotubes, *Synth. Met.* **121**, 1195-1196 (2001).
- H. Kira, H. Tou, Y. Maniwa and Y. Murakami: Magnetic properties of K-absorbing zeolite LTA, *J. Mag. Mag. Mater.* **226-230**, 1095-1097 (2001).
- H. Tou, Y. Maniwa, T. Koiwasaki and S. Yamanaka: Magnetic properties of the layered superconductor $\text{Li}_{0.48}(\text{THF})_{0.3}\text{HfNCl}$ with $T_c \sim 26\text{K}$, *J. Mag. Mag. Mater.* **226-230**, 330-332 (2001).
- H. Kataura, Y. Maniwa, M. Abe, A. Fujiwara, T. Kodama, K. Kikuchi, H. Imahori, Y. Misaki, S. Suzuki and Y. Achiba: Optical properties of fullerene- and non-fullerene peapods, *Appl. Phys. A* **74**, 349-354 (2002).
- A. Fujiwara, R. Iijima, K. Ishii, H. Suematsu, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki and Y. Achiba: Local current density detection of individual single-wall carbon nanotubes in a bundle *Appl. Phys. Lett.* **80**, 1993-1995 (2002).
- H. Tou, N. Muroga, Y. Maniwa, T. Takenobu, H. Shimoda, Y. Iwasa and T. Mitani: NMR studies of ammoniated alkali fullerenes; Fullerenes, Nanotubes, and Related Systems, (*AIP*, 2001), **590**, p. 369-372.

Y. Maniwa, H. Ikejiri, H. Tou, S. Masubuchi, S. Kazama, M. Yasukawa and S. Yamanaka: NMR Studies of Alkali-Doped C₆₀ Polymers; Fullerenes, Nanotubes, and Related Systems, (AIP, 2001), **590**, p. 443-446.

K. Kitazume, H. Tou, Y. Maniwa, M. Kosaka and K. Tanigaki NMR Studies of Alkali-Doped C₆₀ Superconductors with Small Lattice Constants; Fullerenes, Nanotubes, and Related Systems, (AIP, 2001), **590**, p. 377-380.

H. Kira, H. Tou, Y. Maniwa and Y. Murakami: Magnetic properties of K-absorbing Zeolite LTA; Fullerenes, Nanotubes, and Related Systems, (AIP, 2001), **590**, p. 525-528.

A. Fujiwara, Y. Matsuoka, H. Suematsu, N. Ogawa, K. Miyano, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki and Y. Achiba: Photoconductivity of Single-Walled Carbon Nanotubes, ; Fullerenes, Nanotubes, and Related Systems, (AIP, 2001), **590**, p. 189-192.

S. Masubuchi, H. Masubuchi, S. Kazama, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki and Y. Achiba: The effect of solvent on electrical transport properties in single-wall carbon nanotubes; Fullerenes, Nanotubes, and Related Systems, (AIP, 2001), **590**, p. 233-236.

K. Nomura, M. Osawa, K. Ichimura, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki and Y. Achiba: STM/STS on carbon nanotubes at low temperature; Fullerenes, Nanotubes, and Related Systems, (AIP, 2001), **590**, p.197-200.

H. Kataura, Y. Maniwa, T. Kodama, K. Kikuchi, K. Hirahara, S. Iijima, S. Suzuki, W. Kratschmer and Y. Achiba: Fullerene-peapods: Synthesis, structure, and Raman spectroscopy, (AIP, 2001), **591**, p. 251-255.

2) 学会講演

日本物理学会 第56回年次大会 2001年3月27日～3月30日 (中央大学)

坂本浩一、溝口憲治、長谷川達生：(BEDT-TTF)(ClMeTCNQ)におけるESRの圧力依存性。

佐藤秀一、田久保才恵、山辺典昭、坂本浩一、溝口憲治、B. H. Kim、J. Joo：導電性高分子のESRとその圧力依存性。

平岡牧、坂本浩一、溝口憲治、加藤礼三：(DMe-DCNQI)₂LiのESR。

山辺典昭、溝口憲治、坂本浩一、L.J. Damjanovic, V.I. Srdanov：ゼオライト AES (Alkali-Electro-sodalite) の磁気共鳴。

町野正佳、溝口憲治、坂本浩一、山下正廣、石井知彦、徳本圓、川本徹、A. Omerzu、D. Mihailovic：圧力下でのTDAE-C₆₀のESR。

真庭豊(シンポジウム講演、岩佐義宏より交代)：軌道縮退系としてのフラーレン固体：磁気的性質と超伝導。

真庭豊、藤原竜児、吉良弘、藤秀樹、片浦弘道、鈴木信三、阿知波洋次、藤原明比古、壽榮松宏仁：単層カーボンナノチューブのX線回折実験：温度依存性。

藤原竜児、吉良弘、藤秀樹、真庭豊、趙新洛、飯島澄男、安藤義則、西堀英二、高田昌樹、坂田誠：多層カーボンナノチューブの構造 II .

飯島良介、壽榮松宏仁、藤原明比古、石井賢司、片浦弘道、鈴木信三、阿知波洋次、真庭豊：AFM - STM 二重法による単層カーボンナノチューブの局所電子構造の研究 .

北尾真司、瀬戸誠、小林康浩、春木理恵、増淵伸一、風間重雄、片浦弘道、真庭豊、鈴木信三、阿知波洋次：ヨウ素を挿入した単層カーボンナノチューブのメスバウアー効果 II .

吉良弘、藤秀樹、真庭豊、増淵伸一、風間重雄、村上洋一：K と Na を吸蔵した Zeolite LTA の物性 VII .

日本物理学会 2001 年秋の分科会 2001 年 9 月 17 日 ~ 9 月 20 日 (徳島文理大学)

溝口憲治、小林成徳、坂本浩一、徳山俊孝、神木正史、小坂真由美、谷垣勝巳：RbC₆₀ のモット・ハバード転移 .

佐藤秀一、坂本浩一、溝口憲治、盛岡弘幸、木村恒久：磁場中で合成された PPy の異方性 .

坂本浩一、溝口憲治、長谷川達生：(BEDT-TTF)(ClMeTCNQ) における ESR の圧力依存性 .

平岡牧、溝口憲治、坂本浩一、加藤礼三：ESR による (DMe-DCNQI)₂Li の研究 - 磁性及び Spin Soliton のダイナミクスについて .

藤原明比古、真庭豊、藤原竜児、阿部真利、吉良弘、藤秀樹、片浦弘道、鈴木信三、阿知波洋次、西堀英二、高田昌樹、坂田誠、壽榮松宏仁：C₆₀ 内包単層カーボンナノチューブ束の X 線回折 .

阿部真利、真庭豊、藤原竜児、吉良弘、藤秀樹、片浦弘道、鈴木信三、阿知波洋次、藤原明比古、西堀英二、高田昌樹、坂田誠、壽榮松宏仁：フラーレン内包ナノチューブの XRD .

真庭豊、坂本浩一、藤秀樹、E.A. Reny、山中昭司：Ba₈Si₄₆ 超伝導体における NMR の T₈ 異常 .

藤秀樹、真庭豊、竹延大志、下田英雄、岩佐義宏、三谷洋興：NMR によるアンモニア・フラーレンの磁性の研究 .

池尻英雄、藤秀樹、真庭豊、安川雅啓、山中昭司：アルカリ金属をドーブした C₆₀ ポリマーの NMR .

森川雅則、藤秀樹、真庭豊、伊藤崇芳、竹延大志、下田英雄、K. Prassides、岩佐義宏：層状超伝導体 MgB₂ の NMR による研究 .

国際会議

The Fourth International Symposium on Crystalline Organic Metals (ISCOM2001), Superconductors and Ferromagnets, Rusutsu, Japan, September 10 - 14, 2001

H. Sakamoto, K. Mizoguchi and T. Hasegawa: ESR studies of (BEDT-TTF)(ClMeTCNQ) under pressure.

K. Mizoguchi, S. Kobayashi, M. Machino, H. Sakamoto, T. Kawamoto, M. Tokumoto, M. Kosaka, K. Tanigaki, A. Omerzu and D. Mihailovic: Electronic states in magnetic fullerenes studied by ESR under pressure.

M. Hiraoka, H. Sakamoto, K. Mizoguchi and R. Kato: Spin soliton dynamics and magnetic susceptibility of (DMe-DCNQI)₂Li by ESR under pressure.

International conference of Strongly Correlated Electron Systems(SCES2001)
Ann Arbor, MI, USA, Aug. 6-10, 2001.

H. Tou, Y. Maniwa, T. Koiwasaki and S. Yamanaka Novel Superconductivity in Electron-Doped Layered Li-HfNCl (Oral)

International Conference on Strongly Correlated Electrons with Orbital Degrees of Freedom
(Orbital 2000)Sendai, JAPAN, September 11-14, 2001

H. Tou, Y. Maniwa, T. Tkachenko, H. Shimoda, Y. Iwasa and T. Mitani Molecular orbital ordering and antiferromagnetic ordering in ammoniated alkali fullerenes: NMR studies (Oral)

3) 学会誌等

溝口憲治: 導電性高分子研究のその後の発展(白川英樹博士ノーベル化学賞受賞記念), 日本物理学会誌 56 巻 8月号, 576 (2001).

真庭豊: カーボンナノチューブの基礎物性: 電子状態・構造・超伝導, “カーボンナノチューブ ~進む材料開発技術と今後の用途展開~”第1章 情報機構(2002).

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、先端加工技術により作製された微細な構造を持つ磁性導体を含むメソスコピックな系との二つに分類される。前者については、フラックス法、テトラアーク引き上げ法、超高真空ゾーンメルト法などの単結晶育成法を用いて純良単結晶の育成を行い、多くの共同研究者に供給している。

1) f-電子系強相関伝導物質

希土類やアクチナイド元素を含む物質では、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が出現する。それらの内、充填スクッテルダイト構造を持つ化合物 RE_TX_{12} (RE: 希土類、T: 遷移金属、X: P, As, Sb) は、構成元素を変えることにより、金属-非金属転移、超伝導、等の変化に富んだ物性を示すことから注目されている。また、次世代熱電材料としての可能性を持つことから、応用面からの研究も盛んに進められている。

平成 13 年度は、特に充填スクッテルダイト化合物に関する以下のテーマについて重点的に研究を進めた。

(a) $PrFe_4P_{12}$ における四重極相互作用を起源とする秩序と近藤効果の共存の可能性

$PrFe_4P_{12}$ が Pr 化合物としては極めて異常な重い電子状態を極低温・強磁場中で示すことを、de Haas-van Alphen (dHvA) 効果、磁場中比熱などの測定に基づいて既に報告した。更に興味深い事実として、核比熱の解析からゼロ磁場中で Pr が局所磁気モーメントを持たないということも明らかにした。これは、低温・低磁場での秩序状態の秩序パラメーターが非磁性である証拠となる。従って、この秩序相は強い質量増強された非磁性状態であることから、ともに四重極相互作用に基づく秩序状態と近藤効果が共存する初めての物質である可能性が大きい。この物質の異常性が広く認知され、更に機構を解明するための種々の実験が共同実験者とともに進められている。

(b) $PrOs_4Sb_{12}$ の示す異常な超伝導状態と磁場誘起秩序相

いまま超伝導を示す新物質は次々と見出されており、「超伝導物質」はもはや特別なものではない。しかし、その多くは広い意味での BCS 理論の枠内で説明され、電子間の引力の起源はフォノンが担っている。その中で、希土類や U 化合物で f 電子が強く伝導電子と混成した結果として出現する重い電子超伝導体は、その枠からはみ出した新しい可能性を期待させるものとなっている。しかし、これまで見出されている重い電子超伝導体は Ce または U 化合物に限られており、他の希土類化合物の場合 c-f 混成は極めて小さく 4f 電子が関与する興味深い超伝導は一切報告されていない。

最近、 $PrOs_4Sb_{12}$ で初めてこのルールから外れる重い電子超伝導の可能性が提示された。我々は、初めて dHvA 効果、磁場中比熱の測定を行った。結果として、超伝導状態の異常性を確認し、更に高磁場領域に新しい磁場誘起秩序相の存在を明らかにした。異常超伝導の機構を明らかにするために、種々の測定が共同研究として進められている。

(c) 非フェルミ液体異常を示す重い電子半金属 $CeRu_4Sb_{12}$

$RERu_4Sb_{12}$ は充填スクッテルダイトのなかで、 $REFe_4P_{12}$ とは逆に格子定数が大きく c-f 混成は比較的小さいことが予想される。実際、 $PrRu_4Sb_{12}$ では特に異常な振る舞いは観測されず、

通常の超伝導体となる。一方、 $\text{CeRu}_4\text{Sb}_{12}$ は低温で非フェルミ液体的異常を示すことが報告されたが、その磁場に対する耐性については全く矛盾する報告がなされている。我々は、純良単結晶を用いて Shubnikov - de Haas 振動の観測に成功し、低温ではキャリアー数がブリルアンゾーンの 2% 程度の小さなフェルミ面を持つ半金属であることを明らかにした。また、約 3T 以上の磁場で量子振動が観測されることは、この磁場でフェルミ液体として回復することを確認したことになる。一方、ホール係数の温度依存の測定から、フェルミ面が温度に依存して減少するという異常性を示唆する結果を得た。これらの異常性を確認し、その機構を解明するために、圧力下での物性測定が進められている。

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、阪大の大貫研究室、菅研究室、北岡研究室、那須研究室、播磨助教授、岩手大の吉澤研究室、新潟大の後藤研究室との共同研究である。

2) メソスコピック磁性体

微視的(ミクروسコピック)と巨視的(マクروسコピック)領域の間をメソスコピック領域と呼ぶ。これからの物性実験の可能性を開く一つの方向として、最先端技術を積極的に利用した実験領域の開拓が上げられており、その一つが、人工的に作られたメソスコピック磁性体の示す新しい物性の探索である。以下の 2 テーマは、最先端の微細加工技術を用いて作製されたメソサイズの磁性体や、その超伝導体との複合構造の伝導現象に関するものである。

(a) 微小トンネル磁気抵抗素子の時間依存伝導現象

電子の二つの特性のうち、電荷は伝導現象に、スピンは磁性にのみ現れ、伝導にスピンが直接顔を出すことはなかった。しかし、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、スピンと電荷が共に主役を務める現象が観測されるようになった。二つの強磁性体金属・合金の間に絶縁体薄膜を置くと、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、流れる電流が大きく変化する。これは、トンネル確率がスピン方向に依存することによって引き起こされ、スピン依存トンネル効果と呼ばれている。

この効果は、ハードディスクの記録密度をさらに上げるには不可欠な、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、また Magnetic Random Access Memory (MRAM) としても期待されて盛んな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、最先端技術で作製された微小サイズの強磁性トンネル接合の特性を、特に時間依存性に着目して測定する事により調べている。

このテーマは、NEC・基礎研究所との共同研究である。また、SRC 及び富士通のサポートを受けて研究が進められた。

(b) Fe/MgF_2 多層グラニューラー膜の電子輸送特性

強磁性の金属・合金と Al_2O_3 からなるグラニューラー膜において、通常の強磁性金属・合金で観測されるものに比較して、桁違いに大きな異常ホール効果が観測され、巨大ホール効果と名付けられた。実用化の可能性の提案もあり、実用・基礎の両面から研究が行われているが、いまだその機構は明からされていない。

我々は、物理的により単純な Fe エピタキシャル単層極薄膜においてホール効果の測定を行い、これまでの純 Fe に比較して、表面散乱の増大に伴いより大きな異常ホール効果がありうることを確認した。しかし、さらに高抵抗での測定への拡張を行うために、通常のグラニューラー

膜に比較して二次元性が保持された Fe/MgF₂ 多層グラニューラ膜において、異常ホール効果の積層膜厚への依存性を測定した。結果として、これまでの比抵抗値の範囲を越えて室温の異常ホール比抵抗が連続的に増大することと、温度の低下とともに異常ホール比抵抗は急激に減少することを明らかにした。これは、巨大ホール効果の機構を探る上で本質的な実験結果と言える。同時に行われた、磁気抵抗が通常のグラニューラ薄膜と異なる異方性を示すことを確認し、試料の積層構造における微細な構造変化によるものとして説明した。

このテーマは筑波大学・喜多研究室との共同研究である。

2. 研究業績

1) 論文

H. Sugawara, T. D. Matsuda, K. Abe, Y. Aoki, H. Sato, S. Nojiri, Y. Inada, R. Settai and Y. Ōnuki: Observation of heavy electrons in the filled skutterudite PrFe₄P₁₂ via the de Haas-van Alphen effect, *J. Magn. Magn. Mat.* **226-230** (2001) 48-50.

S. R. Saha, H. Sugawara, Y. Aoki and H. Sato: Magnetic properties in CeRu₄Si₄ and CeNi₄Ge₄ under uniaxial pressure, *J. Magn. Magn. Mat.* **226-230** (2001) 60-62.

T. D. Matsuda, K. Abe, F. Watanuki, T. Namiki, S. R. Saha, H. Sugawara, Y. Aoki and H. Sato: Pressure effect on the magnetic properties in PrFe₄P₁₂, *J. Magn. Magn. Mat.* **226-230** (2001) 66-67.

L. Keller, P. Fischer, T. Herrmannsdörfer, A. Dönni, H. Sugawara, T. D. Matsuda, K. Abe, Y. Aoki and H. Sato: Structural and magnetic properties of RFe₄P₁₂ (R=Pr, Nd) studied by neutron diffraction, *J. Alloys Compounds* **323-324** (2001) 516-519.

P. Javorský, H. Sugawara, D. Rafaja, F. Bourdarot and H. Sato: Magnetic Ordering in HoNiAl-single Crystal Study, *J. Alloys Compounds* **323-324** (2001) 472-476.

Y. Nakanishi, T. Simizu, M. Yoshizawa, T. Matsuda, H. Sugawara and H. Sato: Elastic Constants of PrFe₄P₁₂ in Magnetic Fields, *Phys. Rev. B* **63** (2001) 184429 (6 pages).

T. Miyahara, H. Ishii, Y. Takayama, M. Hirose, K. Haruyama, K. Obi, M. Shinoda, T. Muro, Y. Saito, T. D. Matsuda, H. Sugawara and H. Sato: MCD Study on Materials without Magnetic Order, *J. Phys. Soc. Jpn.* **70** (2001) No.10, 2977-2981.

P. Javorský, M. Diviš, H. Sugawara, H. Sato and H. Mutka: Crystal Field and Magnetocrystalline anisotropy in ErNiAl, *Phys. Rev. B* **65** (2001) 014404 (8 pages).

S. Ikeda, H. Shishido, M. Nakashima, R. Settai, D. Aoki, Y. Haga, H. Harima, Y. Aoki, T. Namiki, H. Sato and Y. Ōnuki: Unconventional Superconductivity in CeCoIn₅ Studied by the Specific Heat and Magnetization Measurements, *J. Phys. Soc. Jpn.* **70** (2001) No.8, 2248-2251.

A. Kushino, Y. Aoki, N.Y. Yamasaki, T. Namiki, Y. Ishisaki, T. D. Matsuda, T. Ohashi, K. Mitsuda and T. Yazawa: Erbium-doped yttrium aluminum garnet as a magnetic refrigerant for low temperature X-ray detectors, *J. Appl. Phys.* **90** (2001) 5812-5818.

H. Kinoshita, T. Mizuno, Y. Aoki, H. Sugawara, H. Sato, K. Matsuda, T. Mitsuzuka, A. Kamijo and H. Tsuge: Noise Measurement of Low-impedance NiFe/Al₂O₃/NiFe Tunnel Junction, J. Magn. Soc. Jpn. **25** (2001) 791-794.

H. Ishii, K. Obu, M. Shinoda, C. Lee, Y. Takayama, T. Miyahara, T. D. Matsuda, H. Sugawara and H. Sato: Photoemission Study of 4f Electron States in PrFe₄P₁₂ and Related Pr Compounds, J. Phys. Soc. Jpn. **71** (2002) No.1, 156-161.

Y. Aoki, T. Namiki, T. D. Matsuda, K. Abe, H. Sugawara and H. Sato: Anomalous Heavy-Fermion and Ordered States in Filled-Skutterudite PrFe₄P₁₂, Phys. Rev. B **65** (2002) 064446 (7 pages).

Y. Kobayashi, H. Sato, Y. Aoki, R. Loloee and W.P. Pratt Jr.: Hall effect and thermoelectric power in Co/Cu(Mn) multilayers, J. Magn. Magn. Mat. **238** (2002) 84-90.

2) 国際会議報告

A. Kushino, Y. Aoki, N. Y. Yamasaki, Y. Ishisaki, T. Ohashi and K. Mitsuda: Entropy behavior of Er-doped YAG for the application of ADR, "Low Temperature Detectors", Eds. F.S. Porter, D. McCammon, M. Galeazzi, and C.K. Stahle, AIP Conference Proceedings **605** (2002) 383-386.

N. Y. Yamasaki, A. Kushino, Y. Aoki, Y. Ishisaki, T. Ohashi and K. Mitsuda: Measurement of the Specific Heat of Er-doped YAG and its Application to the X-ray Astronomy, "New Century of X-ray Astronomy", Eds. H. Inoue and H. Kunieda, ASP Conference Series **251** (2001) 602-603.

3) 学会講演

日本物理学会第56回年次大会 2001年3月27日～30日(中央大学)

佐藤英行: 何故充填スクッテルダイトか?(シンポジウム講演).

菅原 仁、松田達磨、阿部敬介、青木勇二、佐藤英行、野尻さやか、稲田佳彦、撰待力生、大貫惇睦、播磨尚朝: dHvA と電子輸送から見た RFe₄P₁₂ 系の異常物性 (シンポジウム講演).

青木勇二、並木孝洋、松田達磨、菅原仁、佐藤英行, A. Dönni, L. Keller, P. Fischer, T. Herrmannsdörfer: 比熱と中性子散乱から見た RFe₄P₁₂ 系の異常物性 (シンポジウム講演).

森田知也、水野友人、並木孝洋、青木勇二、菅原仁、佐藤英行、金承九、大谷義近、深道和明、A.Kent: Fe 単層薄膜の低温電子輸送特性 II.

水野友人、木下日登美、森田知也、青木勇二、菅原仁、佐藤英行、松田和博、三塚勉、上条敦、柘植久尚: 強磁性トンネル接合 NiFe/Al₂O₃/NiFe のノイズ特性.

菅原仁、阿部敬介、松田達磨、並木孝洋、青木勇二、佐藤英行: CeOs₄Sb₁₂ の単結晶育成と電氣的磁氣的特性.

湯浅清司、岡田英之、阿部幸裕、阿部敬介、松田達磨、青木勇二、菅原仁、佐藤英行: $\text{La}_{1-x}\text{Ce}_x\text{Fe}_4\text{P}_{12}$ の電子輸送特性 II.

阿部敬介、松田達磨、菅原仁、青木勇二、佐藤英行、撰待力生、大貫惇睦: $\text{CeRu}_4\text{Sb}_{12}$ のドハース・ファンアルフェン効果.

並木孝洋、青木勇二、松田達磨、阿部敬介、菅原仁、佐藤英行: 比熱から見た $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ の重い電子状態の磁場方向依存性.

青木勇二、並木孝洋、山田善伸、松田達磨、阿部敬介、菅原仁、佐藤英行: 比熱で見た重い電子系 $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ の Pr サイトの La 置換効果.

松田達磨、阿部敬介、Shanta R. Saha、並木孝洋、菅原仁、青木勇二、佐藤英行: $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ の高磁場中輸送特性.

S. R. Saha, H. Sugawara, T. Namiki, Y. Aoki and H. Sato: Uniaxial Pressure Effect on the Metamagnetic Anomalies in CeRu_2Si_2 .

岩佐和晃、渡辺靖彦、桑原慶太郎、神木正史、菅原仁、青木勇二、松田達磨、佐藤英行: 充填スクッテルダイト系 $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ の異常低温相における構造相転移.

大部健司、篠田元樹、李徹、高山泰弘、石井広義、宮原恒あき、松田達磨、菅原仁、佐藤英行: $\text{RFe}_4\text{P}_{12}$ (R=La, Ce, Pr) の共鳴光電子分光 II.

池田修悟、青木大、宍戸憲明、渡辺なるみ、撰待力生、青木勇二、佐藤英行、芳賀芳範、大貫惇睦: CeCoIn_5 の比熱.

中西良樹、吉澤正人、松田達磨、菅原仁、佐藤英行: $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ の 6.4 K における弾性異常.

中西良樹、松田達磨、菅原仁、佐藤英行、吉澤正人: $\text{NdFe}_4\text{P}_{12}$ の超音波を用いた弾性特性.

日本物理学会秋季大会 2001年9月17日~20日 (徳島文理大学)

水野友人、碓垂矢子、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のジャンクション形状効果.

碓垂矢子、水野友人、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 $\text{NiFe}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{NiFe}$ のノイズ特性 II.

永井肇、水野友人、青木勇二、菅原仁、佐藤英行、田中厚志、長坂恵一: スピンバルブ膜を用いた CPP (current perpendicular to the plane) 素子の電子輸送特性.

森田知也、菅原仁、青木勇二、佐藤英行、小野一修、喜多英治: Fe/MgF_2 多層膜の電子輸送特性.

金山友幸、並木孝洋、青木勇二、菅原仁、佐藤英行: $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ の La 置換効果 II.

大崎舟司、並木孝洋、菅原仁、青木勇二、佐藤英行: $\text{ROs}_4\text{Sb}_{12}$ (R=La, Pr) の超伝導.

菅原仁、S. R. Saha、青木勇二、佐藤英行: $\text{CeT}_4\text{Sb}_{12}$ (T=Ru, Os) における圧力効果.

並木孝洋、青木勇二、菅原仁、佐藤英行：充填スクッテルダイト化合物 $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$ の磁場中比熱.

中西良樹、吉澤正人、山口隆、間広文、根本祐一、後藤輝孝、松田達磨、菅原仁、佐藤英行：
 $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ の低温における弾性定数のソフト化の行方.

名越千代子、岩佐和晃、桑原慶太郎、神木正史、菅原仁、青木勇二、佐藤英行、大山研司：直交する Eu^{2+} の一次元鎖を持つ $\text{Eu}_3\text{Ir}_4\text{Sn}_{13}$ の中性子回折による磁気構造の研究.

山崎篤志、今田真、榊田哲男、関山明、菅滋正、難波孝夫、菅原仁、松田達磨、佐藤英行、関根ちひろ、城谷一民、播磨尚朝：充填スクッテルダイト化合物 $\text{PrT}_4\text{X}_{12}$ ($\text{T}=\text{Fe}, \text{Ru}$; $\text{X}=\text{P}, \text{Sb}$) の 3d-4f 共鳴光電子分光.

大部健司、篠田元樹、李徹、塩沢秀次、高山泰弘、石井広義、宮原恒あき、湯浅清司、松田達磨、菅原仁、佐藤英行： $\text{RFe}_4\text{P}_{12}$ ($\text{R}=\text{La}, \text{Ce}, \text{Pr}$) の共鳴光電子分光 III.

山本悦嗣、芳賀芳範、宍戸寛明、中脇宙一、稲田佳彦、摂待力生、菅原仁、佐藤英行、大貫惇睦： UIr の物性.

筒井智嗣、葛下かおり、森本正太郎、那須三郎、松田達磨、菅原仁、佐藤英行： $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ の ^{57}Fe メスバウアー分光.

塩澤秀次、大部健司、高山泰弘、石井広義、宮原恒あき、松田達磨、菅原仁、佐藤英行、室隆桂之、斎藤祐児：磁気秩序のない状態における内殻吸収 MCD の温度依存性： $\text{CeRu}_4\text{Sb}_{12}$ 、 CeSn_3 及び $\text{NdFe}_4\text{P}_{12}$ の場合.

第 23 回日本応用磁気学会学術講演会、2000 年 9 月 12 日～15 日（早稲田大学）

木下日登美、水野友人、森田知也、青木勇二、菅原仁、佐藤英行、松田和博、三塚勉、上條敦、柘植久尚：強磁性トンネル接合 $\text{NiFe}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{NiFe}$ のノイズ測定.

国際会議

The 4th International Symposium on Metallic Multilayers (MML'01), Aachen Germany, June 24-29, 2001

Y. Aoki, H. Kinoshita, T. Mizuno, H. Sugawara, H. Sato, K. Matsuda, A. Kamijo and H. Tsuge: Noise characteristics in low-impedance $\text{NiFe}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{NiFe}$ tunnel junctions.

T. Mizuno, Y. Aoki, H. Sugawara, H. Sato, K. Takanashi, S. Mitani and H. Fujimori: Transport properties of Au/Fe monatomic multilayers with $L1_0$ ordered structure.

The 2nd NEDO meeting on Novel Thermoelectric Materials, San Diego USA, August 2-3, 2001

Y. Aoki, T. Namiki, T.D. Matsuda, K. Abe, H. Sugawara and H. Sato: Specific heat study on heavy-fermion $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$. (Oral)

H. Sato, Y. Aoki, H. Sugawara, T.D. Matsuda, K. Abe and T. Namiki: Transport studies of some filled skutterudite compounds. (Oral)

H. Sugawara, T.D. Matsuda, K. Abe, Y. Aoki, H. Sato, S. Nojiri, Y. Inada, R. Settai, Y. Ōnuki and H. Harima: De Haas-van Alphen effect in exotic filled skutterudite compounds. (Oral)

International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2001),
Ann Aber USA, August 6-10, 2001

Y. Aoki, T. Namiki, T. D. Matsuda, H. Sugawara and H. Sato: Nonmagnetic ordered state in heavy electron $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ evidenced by specific heat.

H. Sugawara, K. Abe, T.D. Matsuda, Y. Aoki, H. Sato, R. Settai and Y. Ōnuki: De Haas-van Alphen Effect in the Filled Skutterudite $\text{CeRu}_4\text{Sb}_{12}$.

T. Namiki, Y. Aoki, Y. Yamada, T. D. Matsuda, H. Sugawara and H. Sato: La-substitution study on filled-skutterudite $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$.

K. Abe, T. D. Matsuda, H. Sugawara, T. Namiki, Y. Aoki and H. Sato: Unusual behaviors in the heavy Fermion semimetal $\text{CeRu}_4\text{Sb}_{12}$.

K. Iwasa, Y. Watanabe, K. Kuwahara, M. Kohgi, H. Sugawara, T. D. Matsuda, Y. Aoki and H. Sato: Crystal-Structure Modulation in the Anomalous Low-Temperature Phase of $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$.

T.D. Matsuda, K. Abe, F. Watanuki, H. Sugawara, Y. Aoki, H. Sato, Y. Inada, R. Settai and Y. Ōnuki: De Haas-van Alphen Effect on $\text{PrRu}_4\text{Sb}_{12}$.

Y. Nakanishi, T. D. Matsuda, H. Sugawara, H. Sato and M. Yoshizawa: Elastic properties of $\text{NdFe}_4\text{P}_{12}$.

International Conference on Strongly Correlated Electrons with Orbital Degrees of Freedom
(ORBITAL2001), Sendai, September 11-14, 2001

Y. Aoki, T. Namiki, T.D. Matsuda, H. Sugawara and H. Sato: $4f^2$ -based heavy fermion $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$: nonmagnetic ordered state studied by La-substitution.

H. Sugawara, T.D. Matsuda, K. Abe, Y. Aoki, H. Sato, S. Nojiri, Y. Inada, R. Settai and Y. Ōnuki: Exotic heavy fermion state in $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ studied by the de Hass-van Alphen effect. (Oral)

T. Namiki, Y. Aoki, T. D. Matsuda, K. Abe, H. Sugawara and H. Sato: Anisotropy in heavy electron state of $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ studied by specific heat.

S.R.Saha, T. D. Matsuda, H. Sugawara, Y. Aoki and H. Sato: Effect of uniaxial pressure on the magnetic and electrical properties in $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$.

Y. Nakanishi, Y. Yamaguchi, H. Hazama, Y. Nemoto, T. Goto, T. D. Matsuda, H. Sugawara, H. Sato and M. Yoshizawa: Elastic properties of filled skutterudite compounds.

Today International Symposium ISSP-Kashiwa 2001, Kashiwa, October 2-5, 2001

Y. Aoki, T. Namiki, T. D. Matsuda, H. Sugawara and H. Sato: Anomalous ordered phase in $4f^2$ -based heavy electron $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$.

H. Sugawara, T.D. Matsuda, K. Abe, Y. Aoki, H. Sato, S. Nojiri, Y. Inada, R. Settai, Y. Ōnuki and H. Harima: De Haas-van Alphen effect in the filled skutterudite compounds.

S.R. Saha, H. Sugawara, Y. Aoki, T. Namiki, T. D. Matsuda and H. Sato: Uniaxial pressure effect on the metamagnetic anomalies in CeRu_2Si_2 .

The 17th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS2002),
Kyoto, March 5-8, 2002

R. Hanada, H. Sugawara, Y. Aoki, H. Sato, T. Ono, K. Shigeto and T. Shinjo: Monitoring domain wall motion in ferromagnetic wires at multiple voltage probes.

Y. Aoki, T. Mizuno, A. Ikari, H. Sugawara, H. Sato, K. Matsuda, A. Kamijo and H. Tsuge: Low-Energy Fluctuation Detected in Noise Measurements of Low-Impedance Magnetic Tunnel Junctions. (Oral)

A. Granovsky, Y. Aoki, H. Sato, S. Mitani, K. Takanashi, S. Ohnuma and H. Fujimori: Tunneling thermoelectric power in metal-insulator granular alloys.

4) 著書

佐藤英行 : Encyclopedia of Materials: Science and Technology (EI)

中性子散乱物性物理研究室

1. 研究活動の概要

2001年度も引き続き、希土類化合物強相関系を中心とする多くの物質の研究を、中性子散乱・X線回折を主な手段として行った。これらのうち、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計16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、国外では引き続きフランスのLLB研究所、ヨーロッパ連合のILL研究所、イギリスのRAL研究所およびスイスのPSI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、KEK放射光施設において計2課題の研究を行うとともに、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も一層強く押し進めた。以下に、これらの研究の成果の概要を述べる。

1) 少数キャリアー強相関系

a. Ceモノプニクタイト、CeX (X=P,As,Sb,Bi)、の電子状態 (岩佐、神木)

我々は、Ceモノプニクタイトを、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としてとらえ、ここ数年来研究をすすめている。本年度は、CePとCeSbについて、超高压における中性子回折の実験を引き続き進めた。その結果、CePについては、同一の試料で常圧から約3 GPaまでの相図を明らかにし、さらに約3.4GPa以上の圧力下では、強磁性相のみとなることを示す結果を得た。これにより、約6GPaで強磁性が消滅するまでの、CePの圧力下の相図の全体像が明らかになった。CeSbに関しては、約5GPaまでの圧力下の相図を明らかにし、約2GPa以上の圧力下の磁気的性質がCeBiの常圧下のものとほぼ同じであることを明らかにした。以上の結果は、Ceモノプニクタイト全系における多彩な物性が、キャリアー数を主要なパラメータとして統一的に記述できるというこれまでの解釈をより強く支持するものである。(原研先端研：長壁豊隆氏との共同研究); また、CeSbおよびCeBiについて、低温磁気秩序相におけるフォノンの測定を中性子非弾性散乱により行い、これまでにCeSbにおいて見いだされていた局在モード的な新しい励起が、CeBiにも存在することを明らかにした。この実験結果は、 p - f 混成効果による磁気ポーラロン格子に特徴的な原子振動が普遍的に存在していることを示している。(LLB：J.-M. Mignot、M. Braden、金材研：北澤英明、各氏との共同研究)

b. 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、一次元量子磁性を示す興味深い系である。これまでの研究により、ゼロ磁場においては、この系の低エネルギー有効ハミルトニアンは $S=1/2$ ・一次元ハイゼンベルグモデルでよく表されるが、磁場下においては、ジャロシンスキー・守谷相互作用のため、Yb³⁺イオンの一次元鎖内に交替磁場が誘起されることが明らかになっている。本年度は、上記の交替磁場を生じないように、Yb³⁺の1次元鎖に平行な磁場を加えて中性子非弾性散乱の研究を行ったが、ハイゼンベルグモデルから予想され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。このことは、この系にはさらに隠れた相互作用が存在することを示唆している。(LLB：J.-M. Mignot、ILL：A. Heiss、新潟大工：落合 明、青木英和、各氏との共同研究); さらに、Yb₄As₃の電荷秩序相転移の機構を探るフォノンの測定を継続して行い、これまでに発見した音速のC₄₄モードに対応する[100]方向のTAフォノンが、小さい波数ベクトル領域でのみ電荷秩序転移温度の直上

でソフトニングを示すことを見出した。(新潟大工：落合 明、東大物性研：青木英和、筑波産学協同推進：鈴木 孝、各氏との共同研究)

c. 圧力誘起半導体 金属転移を示す SmS の熱膨張異常 (岩佐、神木)

SmS は約 0.6 GPa の圧力で体積が約 14% 収縮し、Sm 価数が 2 価から 3 価へ近づいて金属化するとされる。しかし高圧金属相の電気抵抗の温度変化は単調でなく、単なる金属とは異なる。この異常を調べるため、低温高圧下 X 線回折実験を研究室装置と高エネルギー加速器研究機構放射光施設を使って行った結果、電気抵抗の異常が見られる圧力では、格子定数が数十 K の温度で極小をとることが観測された。この実験結果は、Sm の 4*f* 電子のフェルミ面近傍の状態密度にわずかなギャップが開いていることを示唆している。(名古屋大：佐藤憲昭氏との共同研究)

d. YbSb の 5 K 非磁性転移 (桑原、神木)

YbSb は、比熱等の測定から、5 K 及び 0.5 K で逐次相転移を示すことが確認されている。この物質の結晶場基底状態は 2 重項であるので、この 5 K での相転移については、誘起型の 4 重極転移の可能性が提案されている。この相転移の機構を調べるためイギリスの RAL 研究所において多結晶試料のパルス中性子非弾性散乱実験を行った。その結果、相転移点前後で明確に磁気スペクトルが変化していることがわかった。この実験結果はあるパラメータ領域では上記の 4 重極転移のモデルと矛盾しない。また、今回の実験により約 3 meV 以下で常磁性散乱と思われる新たな磁気励起が存在することがわかった。(東北大金研：大山研司、ISIS：R.I. Bewly、物質材料研：端健二郎、各氏との共同研究)

2) 希土類化合物における高濃度近藤効果・多重極秩序・電荷密度波・価数揺動

a. 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)

CeB_6 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。最近、 $Ce_xLa_{1-x}B_6$ において新たに IV 相と名付けられた未知の相が約 1K 付近の温度で見いだされ、これ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。我々は、この相の実体を解明するために、 $Ce_{0.75}La_{0.25}B_6$ をターゲットとして、中性子回折による研究を進めている。今年度は、ILL 研究所にある世界最強の粉末中性子回折装置 D20 において実験を行ったが、IV 相においては、やはり磁気散乱を見いだすことができなかった。この結果、IV 相における主要な秩序変数は磁気双極子ではないと結論するにいたった。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可能性が高いことも明らかになった。(PSI：P. Fishcher、ILL：T.C. Hansen、東北大理：国井 暁、各氏との共同研究)

b. 充填スクッテルダイト $PrFe_4P_{12}$ の反強四重極秩序 (岩佐、神木)

$PrFe_4P_{12}$ は、6.5 K で非磁性の相転移を示すが、磁場によりこの相転移が押さえられ同時に重い電子現象を示す興味深い物質である。これまでに、この転移に伴い Fe サイトの変位が顕著な超格子変調が生ずることを X 線回折により見いだしていたが、さらにこの現象の機構を探るため、磁場下中性子回折の実験を行った。その結果、低温秩序相において、Pr イオンの磁気モーメントの反強磁性配列が磁場により誘起されることが見いだされた。この実験結果は、この物質の低温秩序相が、Pr イオンの 4*f* 電子の反強四重極秩序相であることを直接的に示している。さらに、KEK パルス中性子施設において非弾性中性子散乱実験を行ったところ、この四重極秩序転移に対応して、6.5 K 以上の温度では結晶場は見られず準弾性的な磁気励起のみが見られる一方、低温相では、約 5meV 以下のエネルギー領域に、準弾性的なスペクトルに鋭

い励起スペクトルが重畳した特異なスペクトルが観測された。(電子物性研との共同研究)

c. 磁性-非磁性境界付近の重い電子系化合物の研究(門脇)

重い電子系化合物のなかで反強磁性-非磁性境界の付近に位置するものは、メタ磁性、非フェルミ液体、超伝導などの興味深い性質を示す。本研究は、反強磁性-非磁性境界のCe-系の物質の反強磁性揺動、長距離秩序を単結晶試料で調べることを目的とする。典型的な重い電子系化合物 $CeRu_2Si_2$ をとりあげ、その磁気揺動を SCR 理論の枠組みで理解すること、またメタ磁性転移前後の強磁場中での磁気励起スペクトルの変化を調べることを行なっている。また非フェルミ液体の振舞を示す $CeNi_2Ge_2$ の磁気揺動と、その関連物質である $Ce(Ni_{1-x}Pd_x)_2Ge_2$ 、 $Ce(Ni_{1-x}Rh_x)_2Ge_2$ の磁気構造を研究している。(河原崎修三(阪大理) 佐藤真直(原研) 福原忠、前沢邦彦(富山県立大工) J Flouquet(CEA) 石川征靖(物性研) 各氏との共同研究)

d. 近藤半導体 $CeRhAs$ の電荷密度波状態(岩佐、神木)

f 電子近藤半導体と考えられている $CeRhAs$ は、 $T_1 = 370$ K, $T_2 = 235$ K, $T_3 = 165$ K で電気抵抗の異常を示し、低温では半導体的に振る舞う。この逐次的な相転移を探るX線回折実験を行った。その結果、 T_1 より低温で波数ベクトル $(0, 1/2, 1/2)$ に相当する強い反射が現れ、かつブラッグ反射強度が大きな変化を示すことが観測された。 $T_3 < T < T_2$ では、 $(0, 1/3, 1/3)$, $(0, 1/6, 1/6)$, $(1/3, 1/3, 1/3)$, $(1/3, 0, 0)$ にあたるピークが観測され、 T_3 以下で $(1/3, 0, 0)$ ピークが主要となる。このような極端な変化は希土類化合物ではあまり例がなく、バンド構造と密接に関係した電子相転移(電荷密度波の形成)であると考えられる。(広島大:高島教授グループと産総研:李氏との共同研究)

e. $Eu_3Ir_4Sn_{13}$ における超周期構造転移と磁気秩序(岩佐、桑原、神木)

$Eu_3Ir_4Sn_{13}$ は、 $SnEu_3-4(IrSn_3)$ と表せるように2つの独立な結晶格子が組み合わさった独特の構造を持つ立方晶の結晶であり、Euの価数が比較的不安定であることと合わせて、結晶化学的にも磁性的にも興味深い。この物質は、10 Kと60 Kに二段の相転移を示し、これまでの中性子回折の実験から、10 K以下では、波数ベクトルが $(1, 1/2, 1/2)$ の反強磁性磁気秩序が生じていることが明らかになっている。これに対し、本年度行ったX線回折の実験の結果、60Kにおける転移に伴い、10 K以下の磁気秩序相における磁気構造と同じ波数ベクトル $(1, 1/2, 1/2)$ の超格子変調が生じているという興味深い事実が明らかになった。(電子物性研究室との共同研究)

3) 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)

圧力誘起強磁性超伝導体 UGe_2 の5f電子状態を調べるため中性子散乱による研究を行っている。今年度は、偏極中性子散乱による常磁性状態での磁場誘起モーメントの磁気形状因子の測定及びフォノンの予備的測定を行った。磁気形状因子の測定では、消衰効果の影響の除去が困難であるが、磁化容易軸(a-軸)方向と熱膨張に異常の見られるc-軸方向での形状因子の異方性の存在を示唆する結果を得た。また、極低温高圧下($T \leq \sim 0.8$ K, ~ 1.0 GPa $\leq P \leq \sim 1.7$ GPa)の超伝導状態におけるAC帯磁率と中性子散乱の同時測定を可能にするために、中性子散乱用圧力セルの改良を行っている。(原研先端基礎研:芳賀芳範、大貫惇睦、東大物性研:上床美也、各氏との共同研究)

b. 重い電子系 URu₂Si₂ の圧力誘起相転移 (桑原、神木)

URu₂Si₂ の圧力下中性子散乱実験によりこの系は低温高圧下 ($T \leq 35$ K, $P_c = \sim 1.5$ GPa) で圧力誘起相転移が起こっていることを示唆する実験結果が得られている。この実験結果で重要な点として、 P_c における約 0.2% の格子定数の不連続な減少がある。この結晶格子異常に注目して前年度から引き続き放射光を用いた 3 GPa までの高圧下粉末 X 線回折実験を行った。その結果、低温 ($T = 15$ K) での格子定数の圧力変化は加圧と共に一様に減少する振る舞いを示し、実験誤差範囲内で P_c において格子異常は観測されなかった。(北大理：網塚浩、東北大理：中尾裕則、村上洋一、各氏との共同研究)

c. U₃Pd₂₀Si₆ の磁気形状因子 (桑原、神木)

U₃Pd₂₀Si₆ は 5f 電子が良く局在した性質を持ち、 $T_N = 19$ K で反強磁性転移、 $T_C = 2$ K で強磁性転移をする。この系の U イオンは結晶学的に異なる二つのサイト (8c と 4a) にあり、 T_N での転移は 8c サイトの反強磁性秩序によるものであり、 T_C での転移は 4a サイトの強磁性秩序によると考えられている。この系の 5f 電子状態を調べるため、非偏極及び偏極中性子散乱実験によりこの系の磁気形状因子の測定を行った。低温磁場下 ($T = 1.5$ K, $B = 0.6$ T) での偏極中性子散乱実験による 4a サイトの磁気形状因子の測定から、磁気形状因子の異方性を示唆する興味深い実験結果が得られた。(阪大極限セ：立岩尚之、東北大極低セ：木村憲彰、青木晴善、東北大院理：小松原武美、各氏との共同研究)

4) その他

a. 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、この研究は通常の長距離秩序を示さない系をとり上げてその磁気揺動を解明することを目的とする。金属非金属転移を示すパイロクロア型酸化物 Y_{2-x}Bi_xRu₂O₇ の磁気揺動、絶縁体パイロクロア型酸化物 Ho₂Ti₂O₇、Ho₂Sn₂O₇、Tb₂Ti₂O₇、Dy₂Ti₂O₇ のスピン相関の研究を行なっている。(松平和之 (九州工業大工)、佐藤正俊 (名大理)、各氏との共同研究)

b. 熱外中性子回折による GdB₆ の磁気構造 (桑原、神木)

Gd 等の熱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可能にするために、前年度 KEK の KENS パルス中性子施設に新しく熱外中性子回折計を設置した。今年度はこの回折計により CeB₆ と同型の結晶構造を持つ GdB₆ の中性子磁気散乱実験を行った。その結果、GdB₆ の低温秩序相は波数ベクトル (1/2, 1/4, 1/4) の反強磁性構造であることが明らかになった。この波数ベクトルは CeB₆ の III 相の磁気構造と一致している。GdB₆ では軌道自由度が消失しているにもかかわらず、CeB₆ と同じ波数ベクトルの反強磁性構造を持つことは興味深い。(KEK：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, M. Kohgi, A. Gukasov, J.-M. Mignot, N. Shibata, A. Ochiai, H. Aoki and T. Suzuki: Polarized-neutron study of one-dimensional magnetic response under magnetic field in the charge ordered phase of Yb_4As_3 , *J. Magn. Magn. Mater.* **226-230** (2001) 441-443.

T. Shobu, Y. Noda, K. Iwasa, A. Hannan, M. Kohgi, N. Ishimatsu and O. Shimomura: Imaging of electron density distribution of CeP under high pressure by single crystal SR X-ray experiments, *J. Phys. Soc. Jpn.* **70** (2001) 1162.

H. Sagayama, K. Kuwahara, K. Iwasa, M. Kohgi, Y. Haga, Y. Onuki, K. Kakurai, M. Nishi, K. Nakajima and N. Aso: Magnetic form factor in UGe_2 , *J. Phys. Soc. Jpn.* **70** (2001) Suppl. A 28-30.

M. Kohgi, K. Iwasa, J.-M. Mignot, B. Fåk, P. Gegenwart, M. Lang, A. Ochiai, H. Aoki and T. Suzuki: Spin dynamics of the quantum spin system Yb_4As_3 under magnetic field, *J. Phys. Soc. Jpn.* **70** (2001) Suppl. A 109-111.

K. Iwasa, M. Kohgi, A. Gukasov, J.-M. Mignot, N. Shibata, A. Ochiai, H. Aoki and T. Suzuki: One-dimensional magnetic state in the charge-ordered phase of Yb_4As_3 investigated by polarized-neutron measurements, *J. Phys. Soc. Jpn.* **70** (2001) Suppl. A 112-114.

B. Schmidt, H. Aoki, T. Cichorek, J. Custers, P. Gegenwart, M. Kohgi, M. Lang, C. Langhammer, A. Ochiai, S. Paschen, F. Steglich, T. Suzuki, P. Thalmeier, B. Wand and A. Yaresko: Low-energy excitations of the semimetallic one-dimensional $S=1/2$ antiferromagnet Yb_4As_3 , *Physica B*, **300** (2001) 121-138.

K. Matsuda, Y. Kohori, T. Kohara, K. Kuwahara and H. Amitsuka: Spatially Inhomogeneous Development of Antiferromagnetism in URu_2Si_2 : Evidence from ^{29}Si NMR under Pressure, *Phys. Rev. Lett.* **87** (2001) 087203-1 - 4.

S. Itoh, Y. Kouchi, S. Ikeda, K. Iwasa, H. Ikeda, M. A. Adams and R. Kajimoto: Critical spin dynamics in the two-dimensional percolating Ising antiferromagnet, $\text{Rb}_2\text{Co}_c\text{Mg}_{1-c}\text{F}_4$, *J. Phys. Soc. Jpn.* **70** (2001) 3107-3111.

K. Iwasa, M. Kohgi, A. Gukasov, J.-M. Mignot, N. Shibata, A. Ochiai, H. Aoki and T. Suzuki: Staggered-field effect on the magnetic-field-induced magnetization of the one-dimensional antiferromagnet Yb_4As_3 , *Phys. Rev. B* **65** (2002) 052408-1 - 4.

K. Kuwahara, H. Sagayama, K. Iwasa, M. Kohgi, Y. Haga, Y. Ōnuki, K. Kakurai, M. Nishi, K. Nakajima, N. Aso and Y. Uwatoko: Magnetic form factor of UGe_2 under high pressure, *Physica B* **312-313** (2002) 106-108.

M. Kohgi, K. Iwasa, J.-M. Mignot, B. Fåk, P. Gegenwart, M. Lang, A. Ochiai, H. Aoki and T. Suzuki: Spin excitations of the one-dimensional $S=1/2$ Heisenberg antiferromagnet Yb_4As_3 under magnetic field, *Physica B*, **312-313** (2002) 359-361.

K. Iwasa, Y. Watanabe, K. Kuwahara, M. Kohgi, H. Sugawara, T. D. Matsuda, Y. Aoki and H. Sato: Crystal-structure modulation in the anomalous low-temperature phase of $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$, *Physica B* **312-313** (2002) 834-836.

N. Aso, N. Metoki, M. Kohgi, K. McEwen, Y. Koike, Y. Haga, N. Tateiwa, N. Kimura, H. Aoki, T. Komatsubara and Y. Morii: Spin wave excitations in single crystalline $\text{U}_3\text{Pd}_{20}\text{Si}_6$, *Physica B*, **312-313** (2002) 897-898.

K. Kuwahara, M. Kohgi, N. Tateiwa, R.I. Bewley, J. Allen, K.A. McEwen, N. Kimura, H. Aoki and T. Komatsubara: Crystal Field Excitations in $\text{U}_3\text{Pd}_{20}\text{Si}_6$, *Physica B* **312-313** (2002) 899-901.

T. Honma, T. Takeuchi, K. Kuwahara, A. Hannan, M. Kohgi, S. Tsutsui, Y. Haga, M. Nakada, S. Nasu and Y. Ōnuki: Magnetostriction in the ferromagnetic state of UGa_2 , *Physica B* **312-313** (2002) 904-905.

H Kadowaki, Y Ishii, K Matsuhira and Y Hinatsu: Neutron scattering study of dipolar spin ice $\text{Ho}_2\text{Sn}_2\text{O}_7$: Frustrated pyrochlore magnet, *Phys. Rev. B* **65** (2002) 144421-1 – 144421-8.

M Kanada, Y Yasui, Y Kondo, S Iikubo, M Ito, H Harashina, M Sato, H Okumura, K Kakurai and H Kadowaki: Neutron Scattering Study of the Spin Correlation in the Spin Ice System $\text{Ho}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$, *J. Phys. Soc. Jpn.* **71** (2002) 313-318.

Y Yasui, M Kanada, M Ito, H Harashina, M Sato, H Okumura, K Kakurai and H Kadowaki: Static Correlation and Dynamical Properties of Tb^{3+} -moments in $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ –Neutron Scattering Study–, *J. Phys. Soc. Jpn.* **71** (2002) 599-606.

2) 学会講演

日本物理学会第56回年次大会 2001年3月27日～3月30日(中央大学)

岩佐和晃、渡辺靖彦、桑原慶太郎、神木正史、菅原 仁、青木勇二、松田達磨、佐藤英行：充填スクッテルダイト系 $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ の異常低温相における構造相転移

岩佐和晃、神木正史、M. Braden、J. -M. Mignot、北澤英明、鈴木 孝：CeSbの磁気秩序相にのみ現れる新奇なフォノンモード

桑原慶太郎、神木正史、立岩尚之、J. Allen、K.A. McEwen、R.I. Bewly、木村憲彰、青木晴善、小松原武美： $\text{U}_3\text{Pd}_{20}\text{Si}_6$ の結晶場励起

目時直人、芳賀芳範、小池良浩、大貫惇睦、森井幸生、K.A. McEwen、阿曾尚文、神木正史、立岩尚之、木村憲彰、青木晴善、小松原武美： $\text{U}_3\text{Pd}_{20}\text{Si}_6$ におけるスピン波励起

佐賀山基、桑原慶太郎、岩佐和晃、神木正史、芳賀芳範、大貫惇睦、加倉井和久、西 正和、中島健次、阿曾尚文、上床美也： UGe_2 の高圧下磁気形状因子

本間徹生、竹内徹也、桑原慶太郎、A. Hannan、神木正史、芳賀芳範、大貫惇睦：強磁性体 UGa_2 の X 線回折と熱膨張

門脇広明, 松平和之, 日夏幸雄: フラストレートしたパイロクロア酸化物 $\text{Ho}_2\text{Sn}_2\text{O}_7$ の中性子散乱.

松平和之, 日夏幸雄, 天谷健一, 門脇広明, 榊原俊郎: パイロクロア型希土類酸化物のスピンアイス状態.

松田和之, 小堀洋, 小原孝夫, 桑原慶太郎, 網塚浩, 松本武彦: URu_2Si_2 の高圧下 ^{29}Si -NMR

松田和之, 小堀洋, 小原孝夫, 桑原慶太郎, 網塚浩: 単結晶 URu_2Si_2 の NMR/NQR

日本物理学会 2001 年度秋季大会 2001 年 9 月 17 日 ~ 9 月 20 日 (徳島文理大学)

中島基樹, 岩佐和晃, 神木正史, 末光敏明, 高畠敏郎: CeRhAs の電気抵抗異常に伴う結晶構造変調の X 線回折による研究

桑原慶太郎, 杉山星児, 岩佐和晃, 神木正史, 中村充孝, 稲村泰弘, 新井正敏, 国井 暁: 熱外中性子回折による GdB_6 の磁気構造と格子歪み

名越千代子, 岩佐和晃, 桑原慶太郎, 神木正史, 菅原仁, 青木勇二, 佐藤英行, 大山研司: 直交する Eu^{2+} の一次元鎖を持つ $\text{Eu}_3\text{Ir}_4\text{Sn}_{13}$ の中性子回折による磁気構造の研究

門脇広明, 福原忠, 前沢邦彦: 重い電子系 CeNi_2Ge_2 の磁気励起と非フェルミ液体.

伊藤晋一, 岩佐和晃, M. J. Bull: パーコレーション磁性体 $\text{RbMn}_{0.31}\text{Mg}_{0.95}\text{F}_3$ の臨界散乱

松田和之, 小堀洋, 小原孝夫, 桑原慶太郎, 網塚浩, 松本武彦: URu_2Si_2 の高圧下 ^{29}Si -NMR

松田和之, 小堀洋, 小原孝夫, 桑原慶太郎, 網塚浩: 単結晶 URu_2Si_2 の NMR/NQR

日本中性子科学会第 1 回年会 2001 年 12 月 6 日 ~ 12 月 7 日 (仙台市情報産業プラザ)

Hao Lijie, 岩佐和晃, 川名大地, 渡辺靖彦, 桑原慶太郎, 神木正史, 菅原 仁, 青木勇二, 松田達磨, 佐藤英行: $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ の異常低温相における構造相転移と反強四重極秩序

杉山星児, 桑原慶太郎, 岩佐和晃, 神木正史, 中村充孝, 稲村泰弘, 新井正敏, 國井 暁: 熱外中性子回折による GdB_6 の磁気構造と格子歪みの研究

門脇広明: バイアクロア磁性体におけるスピン相関

長壁豊隆, H. Hannan, 神木正史, 北澤英明: CeSb と CeBi の圧力-温度相図と磁気構造

伊藤晋一, 岩佐和晃, M. J. Bull: パーコレーション磁性体 $\text{RbMn}_{0.31}\text{Mg}_{0.69}\text{F}_3$ の臨界散乱

国際会議

International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2001 (SCES2001),
Ann Arbor, U. S. A., Aug. 6 - Aug. 10, 2001

K. Kuwahara, H. Sagayama, K. Iwasa, M. Kohgi, Y. Haga, Y. Ōnuki, K. Kakurai, M. Nishi, K. Nakajima, N. Aso and Y. Uwatoko: Magnetic Form Factor of UGe_2 under High Pressure.

K. Iwasa, Y. Watanabe, K. Kuwahara, M. Kohgi, H. Sugawara, T. D. Matsuda, Y. Aoki and H. Sato: Crystal-Structure Modulation in the Anomalous Low-Temperature Phase of $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$.

M. Kohgi, K. Iwasa, J.-M. Mignot, B. Fåk, A. Hiess, P. Gegenwart, M. Lang, A. Ochiai, H. Aoki and T. Suzuki: Spin Excitations of the One-Dimensional $S = 1/2$ Heisenberg Antiferromagnet Yb_4As_3 under Magnetic Field.

K. Kuwahara, M. Kohgi, N. Tateiwa, R.I. Bewley, J. Allen, K.A. McEwen, N. Kimura, H. Aoki and T. Komatsubara: Crystal Field Excitations in $\text{U}_3\text{Pd}_{20}\text{Si}_6$.

N. Aso, N. Metoki, M. Kohgi, K. McEwen, Y. Koike, Y. Haga, N. Tateiwa, N. Kimura, H. Aoki, T. Komatsubara and Y. Morii: Spin wave excitations in single crystalline $\text{U}_3\text{Pd}_{20}\text{Si}_6$

T. Honma, T. Takeuchi, K. Kuwahara, A. Hannan, M. Kohgi, S. Tsutsui, Y. Haga, M. Nakada, S. Nasu and Y. Ōnuki: Magnetostriction in the ferromagnetic state of UGa_2 .

International Conference on neutron Scattering (ICNS2001), München, Germany,
Sept. 9 - Sept. 13, 2001

A. Hannan, T. Osakabe, M. Kohgi and K. Iwasa: High Pressure magnetic Phase Diagram of CeP Studied by Neutron Diffraction.

T. Osakabe, A. Hannan, N. Tachi, M. Kohgi and H. Kitazawa: Magnetic P-T phase diagram and magnetic structure of CeSb

S. Itoh, K. Iwasa, H. Ikeda and M. Bull: Anomalous critical scattering from a three-dimensional percolating antiferromagnet $\text{RbMn}_{0.31}\text{Mg}_{0.95}\text{F}_3$.

K. Iwasa, A. Hannan, M. Kohgi, M. Braden, J.-M. Mignot, H. Kitazawa and T. Suzuki: Crystal-lattice modulation and phonon anomaly associated with strong p-f mixing effect of CeSb.

M. Kohgi, K. Iwasa, J.-M. Mignot, B. Fåk and A. Hiess: Neutron scattering studies of the one-dimensional quantum spin magnetism in Yb_4As_3 .

K. Kuwahara, S. Sugiyama, K. Iwasa, M. Kohgi, M. Nakamura, Y. Inamura, M. Arai and S. Kunii: EXCED - Epithermal Neutron Diffractometer at KENS.

N. Metoki, Y. Koike, Y. Haga, K.A. McEwen, M. Kohgi, N. Aso, T. Tateiwa, T. Komatsubara, N. Kimura and H. Aoki: Magnetic structure and excitations in a localized 5f system $\text{U}_3\text{Pd}_{20}\text{Si}_6$

3) 科学研究費等報告

神木正史：希薄キャリアー系における新しい電子相の極端条件下回折法による研究、平成 10-13 年度科研費（基盤研究 A）研究成果報告書

計算システム研究室

1. 研究活動の概要

00年度同様、2001年度も引続き国際的な2つの素粒子実験に参加した。ひとつは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。もう一つはKEKのBELLE実験である。1999年6月より実験が開始された。2年目のデータ取得となった。我々は、2001年度はATLAS実験においては初段トリガーシステムの開発を行ない、中心となるVLSIの設計、製作を終了させ、続いて大規模な装置の一部を入力から出力まで全段つなげる統合システムの完成をめざした。BELLE実験では定常データ収集が開始され測定器の運転、維持、管理を担当した。

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物理学的な事象のみを抽出、解析し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に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。粒子の飛跡は電気信号に変えられ、その信号のみで簡単なパターン認知(レベル1トリガー)を行おうとするものである。

2001年度我々はこのパターン認知の方法を確立、その方法の論理回路への実装および回路のVLSI化を完成させた。この計画は大学院学生により強力に押し進められている。IC化は東京大学大規模集積システム設計教育センター(VDEC)の制度、設備を利用した。2001年度は4つの専用カスタムチップの制作を行った。このうち4つのVLSIのうち3つはATLASレベル1トリガーで直接利用されるものである。それらは初段処理(入力データ同期) Low-pT及びHigh-pTパターン認識用チップである。開発経過は2000年9月にクラコフ(ポーランド)で開催されたLEB 2000(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)で公表していたので、2001年度はさっそくこのチップを使った総合システムの開発を行った。このテスト結果は来るべき2002年秋の国際会議で報告する予定である。残りのチップの1つは関連はしているが、ATLAS実験には直接使用しないものである。これは上記の3つのVLSIの重要な機能を1つにコンパクトにまとめたもので、動作周波数も40MHzをはるかにしのぎ200MHzで安定稼働する高速のものである。測定器開発テスト、ビームテストなどに利用される。またこのチップは原子核ビーム実験などで利用されるMWPCの読みだし処理用汎用ICとしての機能も備えている。このチップの開発、製作、評価の結果は”An MWPC Readout Chip for High Rate Environment”としてIEEE学会誌にて公表された。ATLASトリガー回路は広い領域に分離されて収容される。このため各部分での40MHzのクロックやトリガー信号の同期をとるのに専用エレクトロニクスが必要とされる。当研究室はこの同期回路の設計開発を行い、製作評価を行なった。いわゆるトリガータイミングコントロール(TTC)と呼ばれるエレクトロニクスの高精度信号分配システムを完成させた。またこのTTCシステムのコンパク

トなエミュレータを開発させ、大規模なシステムを必要としなくても ATLAS のタイミング、トリガー情報を開発中のエレクトロニクスに利用できるようにした。この開発経過、結果は 2001 年 9 月ストックホルムで行われた LHC 実験エレクトロニクス開発会議で発表した。

2) BELLE

BELLE は KEK の電子陽電子貯蔵型リング KEKB において両粒子散乱の結果形成される (4S) から崩壊する B 中間子を精密に観測し、CP 非対称で想定されるさまざまな物理量を測定しようとする実験である。これらの物理量はキャビッポ 小林 益川 (CKM) クォーク混合マトリックスから導かれるものであり、B 中間子から特定の崩壊モードを精査することにより定量化される。

当研究室はこの共同実験においてシリコン検出器の開発を担当してきた。責任を負ってきたのがその検出器からのデータ収集システム (DAQ システム) の開発である。シリコン検出器の装置の開発、製作、および BELLE ディテクタ本体への組み込みは終了している。なおこの検出器はその後改編、改良が重ねられて来ており、現在第 2 世代の検出器が組み込まれている。現在 BELLE 測定器は 1 日最高 400 事象/ナノバースのルミノシティでデータを収集している

2. 研究業績

K. Abe et al.(BELLE collaboration): Measurement of Inclusive Production of Neutral Pions from $\Upsilon(4S)$ Decays Physical Review **D64** (2001) 072001

K. Abe et al.(BELLE collaboration): A Measurement of the Branching Fraction for the inclusive $B \rightarrow \Xi_s \gamma$ Decays with BELLE Physics Letters **B511** (2001) 151-158

K. Abe et al.(BELLE collaboration): Observation of Cabibbo Suppressed $B \rightarrow D^* K^-$ Decays at BELLE Physical Review Letters **87** (2001) 111801

K. Abe et al.(BELLE collaboration): Observation of $B \rightarrow J/\Psi K_1(1270)$ Physical Review Letters **87** (2001) 111801

S. Mori et al.(BELLE collaboration): The BELLE Detector Nuclear Instruments and Methods **A479** (2002) 117-232

K. Abe et al.(BELLE collaboration): Search for Direct CP Violation in $B \rightarrow K\pi$ Decays Physical Review **D64** (2001) 071101

K. Abe et al.(BELLE collaboration): Observation of Large CP Violation in the Neutral B Meson System Physical Review Letters **87** (2001) 091802

K. Abe et al.(BELLE collaboration): Measurement of the Branching Fraction for $B \rightarrow \eta' K$ and Search for $B \rightarrow \eta' \pi^+$ Physics Letters **B517** (2001) 309-318

K. Abe et al.(BELLE collaboration): Observation of the Decay $B \rightarrow K \mu^+ \mu^-$ Physical Review Letters **88** (2002) 021801

K. Abe et al.(BELLE collaboration): Production of Prompt Charmonia in e^+e^- annihilation at $\sqrt{s} \sim 10.6$ GeV Physical Review Letters **88** (2002) 052001

K. Abe et al.(BELLE collaboration): A Measurement of Lifetime Difference in D^0 Meson Decays
Physical Review Letters **88** (2002) 162001

K. Abe et al.(BELLE collaboration): Observation of Cabibbo Suppressed and W Exchange Λ_C^+
Baryon Decays Physics Letters **B524** (2002) 33-43

K. Abe et al.(BELLE collaboration): Determination of $|V_{CB}|$ using the Semileptonic Decay
 $\bar{B}^0 \rightarrow D^* e^- \bar{\nu}$ Physics Letters **B526** (2002) 247-257

K. Abe et al.(BELLE collaboration): Observation of $B^+ \rightarrow \chi_{c0} K^+$ Physical Review Letters **88**
(2002) 162001

K. Abe et al.(BELLE collaboration): Measurement of $B(\bar{B}^0 \rightarrow D^+ l \bar{\nu})$ and Determination of
 $|V_{CB}|$ Physics Letters **B526** (2002) 258-268

H. Kano, C. Fukunaga, M. Ikeno, O. Sasaki, K. Sato and S. Matsuura: An MWPC Readout
Chip for High Rate Environment IEEE Transaction on Nuclear Science **48** (2001) 509-513

K. Abe et al.(BELLE collaboration): Study of Three Body Charmless B Decays Physical
Review **D65** (2002) 092005

R. Abe et al.: Performance of the BELLE Silicon Vertex Detector IEEE Transaction on Nuclear
Science **48** (2001) 997-1001

K. Abe et al.(BELLE collaboration): Precise Measurement of B Meson Lifetimes with Hadronic
Decay Final States Physical Review Letters **88** (2002) 171801

K. Abe et al.(BELLE collaboration): Observation of $B^\pm \rightarrow p \bar{p} K^\pm$ Physical Review Letters **88**
(2002) 171801

1) 学会講演

日本物理学会年次大会 2001年3月27日～3月30日

香取勇一他アトラス日本TGCエレクトロニクスグループ: 「ATLAS 前後方ミュオントリガー
システム用フルカスタムICの開発, 初段回路」

田中賢一他アトラス日本TGCエレクトロニクスグループ: 「ATLAS 前後方ミュオントリガー
システム用フルカスタムICの開発」

溝内健太郎他アトラス日本TGCエレクトロニクスグループ: 「ATLAS 前後方ミュオントリ
ガーシステム用フルカスタムIC - 読み出し系の開発 - 」

一宮亮他アトラス日本TGCエレクトロニクスグループ: 「ATLAS 前後方ミュオントリガー
システム用セクタロジックの開発(続)」

石田康明他アトラス日本TGCエレクトロニクスグループ: 「ATLAS 前後方ミュオントリガー
システム用TTCモジュールの動作特性」

日本物理学会秋季大会 2001年9月22日～25日

青木利文他テレスコープ計画グループ: 「テレスコープアレイ計画 19: 全体計画とその進展について」

田中賢一他アトラス日本 TGC エレクトロニクスグループ: 「ATLAS 前後方ミュオントリガーシステム用タイミング調整 IC 及び High-pT モジュールの開発」

溝内健太郎他アトラス日本 TGC エレクトロニクスグループ: 「ATLAS 前後方ミュオントリガーシステム用フルカスタム IC の開発 - 初全機能実装版 ASIC の動作報告 - 」

20th International Symposium on Lepton and Photon Interactions
at High Energies (Lepton Photon 01), Rome, Italy, 23-28 Jul. 2001

K. Abe et al.(BELLE collaboration): Observation of Color Suppressed $\bar{B} \rightarrow D^* \chi_0$ Decays

K. Abe et al.(BELLE collaboration): Observation of $B^+ \rightarrow \chi_{c0} K^+$

K. Abe et al.(BELLE collaboration): Study of Three Body Charmless B Decays at BELLE

K. Abe et al.(BELLE collaboration): Observation of radiative B Meson Decays into Higher Kaonic Resonances

K. Abe et al.(BELLE collaboration): Evidence for the Electroweak Penguin Decay $B \rightarrow \Xi_s l^+ l^-$

K. Abe et al.(BELLE collaboration): Measurement of D^0 Decays to $K_L^0 \pi^0$ and $K_S^0 \pi^0$ at BELLE

K. Abe et al.(BELLE collaboration): Observation of $\Lambda_C^+ \rightarrow \Lambda^0 K^+$, $\Lambda_C^+ \rightarrow \Sigma^0 K^+$ and $\Lambda_C^+ \rightarrow \Sigma^+ K^+ \pi^-$ Decays

B Physics and CP violation, Ise-Shima 2001

A. Abashian et al.(BELLE collaboration): Search for the Lepton Flavor Violating Decay $\tau \rightarrow l K^0$ Published in Proceedings of B Physics and CP violation, Ise-Shima 2001 pp.295-298

Electronics for LHC Experiments, Stockholm, Sweden, Sept. 2001

Y. Nakamura, K. Hasuko, H. Kano, H. Sakamoto, M. Ikeno, O. Sasaki, R. Ichimiya, H. Kurashige, K. Mizouchi, C. Fukunaga, Y. Ishida and K. Tanaka: A Remote Control System for On-detector VME Modules of the ATLAS End-cap Muon Trigger Published in Proceedings of Workshop of Electronics for LHC Experiments, Stockholm, Sweden, Sept. 2001 pp.391-395

Y. Ishida, C. Fukunaga, K. Tanaka, N. Takahata, M. Ikeno and O. Sasaki: An Emulator of Timing, Trigger and Control (TTC) System for the ATLAS End-cap Muon Trigger Electronics Published in Proceedings of Workshop of Electronics for LHC Experiments, Stockholm, Sweden, Sept. 2001 pp.432-435

2) 学会誌等

なし

編集後記

今年の桜の早咲きにはひどく驚かされた。大学近くで見られる桜も入学式の頃にはほとんどその盛りを過ぎていたように思う。ツツジもフジも2週間ほど例年より開花が早いという。日本列島のこの異様な暖かさに反応したわけではないが、年次報告書の完成も予定より早められることになった。4月8日の第一回の編集委員会では、昨年と同様に出来るだけ早く発行しようと、6月28日の完成を目指した。しかし今年度、大学院入試が繰り上げ実施されることになり、それに伴って開催が早められることになった大学院説明会に間に合わせるには、完成予定の一週間繰り上げが必要となった。昨年度に比べて掲載内容の大幅な変更は行わず、その上原稿提出期限が厳守されるならば、編集期間の短縮でこれに対応できるとの判断がなされ、急遽6月21日の完成に向けて委員会は行動することになった。もっともこの判断は、 $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ による編集体制が昨年までにほぼ確立されていたことと、 $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ を熟知していることで編集作業を引き受けた高山編集委員の負担増を前提にしたものであった。編集後記を受け持ったものの、何を書くべきかと悩んでいたが、おかげでそれに悩まされる時間も短縮された。

現代は評価の時代であり、大学もその対象の例外ではあり得ないという。大学にいるものとしてそれへの対応が迫られている。どのような側面にせよ高く評価されることが、そのことのみが熾烈な競争に勝ち生き残るために重要であるとの認識のもとでこれに対処することになったら、大学での教育・研究はこれから先どうなっていくのだろうか、評価の実態が明確でない今、一抹の不安を覚えるのは私だけだろうか。大学の何がどのように評価されるべきなのか、そもそも公平な大学評価なるものが可能であるのかといった疑問を残し、限りある資源を有効に活用したいという国や自治体の経営の論理に真っ向から立ち向かう大学関係者の論理もかすむ中、自己評価での抵抗もむなく第三者機関による評価へと事態は進んでいて、その流れは止めようもない。

このような流れの中であって、大学での教育・研究に携わっている我々がなしうることは何だろうか。あるべき姿を念頭に教育・研究に対して絶え間ない努力をはらうという当然の事しか思いつかないが、しかしさらに必要なことはその過程と結果を誇張無しに誠実に分かりやすく外部に対して報告することであろう。この年次報告書が、単なる物理学教室の記録や大学院入学希望者のための資料であるにとどまらず、評価に耐えうる報告書であってほしいと、これまで年次報告書の編集にたずさわった人なら誰でも願うに違いない。この年次報告書を全都民に配布し感想を求めたらと、ふとそのような思いが頭をかすめた。

(村田記)

平成13年度年次報告編集委員

奥野和彦(2001年度教室主任)

大橋隆哉

村田忠義

高山泰弘