

研究室活動状況 平成 14 年度

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

1. 研究活動の概要

2. 研究業績

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

素粒子理論研究室

1. 研究活動の概要

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

1998年スーパーカミオカンデ大気ニュートリノ観測によるニュートリノ振動の発見をニュートリノ物理の第一の転換点とすれば、今年2002年にはカムランド実験によって原子炉ニュートリノの欠損が確認され、ニュートリノ物理学は第二の転換点を迎えた。この実験によって、40年近い長きにわたって未解決であった太陽ニュートリノ問題が最終的に大角度MSW解というニュートリノ振動解によって解決されたのである。この結果、我々はレプトンフレーバー混合を記述する牧・中川・坂田行列の(1-2)(太陽)および(2-3)(大気)セクターの構造をほぼ把握することができた。

さて、残るのは(1-3)セクターである。この中には世界のコミュニティの一致した次の目標である(1-3)角、さらにはレプトン小林・益川位相が含まれる。この探索方法を見出すべく今年度においても我が都立大計画班は文科省科研費 特定領域研究「ニュートリノ振動とその起源の解明」において理論系計画班の中核を形成し、国際共同研究を含む活発な研究活動を行った。

1) ニュートリノ振動確率の解析的表式

一定密度の物質中における三世代のニュートリノ振動の厳密な振動確率は比較的簡単な解析的表式で表わされることが木村・高村・横枕によって示された。この確率公式の小林・益川位相依存性は驚くべき簡単なものである一方、彼らが示したこの公式の導出方法は試行錯誤による要素があり、必ずしも体系的であるとはいえない。そこでこれを見通しのよい体系的な仕方でも導出することができる新しい定式化を提案した。この定式化によって、振動確率公式を一般の世代数のニュートリノ振動に対しても導出することができ、さらに物質効果が存在しかつ一様磁場がかかった場合にも同様な方法で振動確率が簡単な解析的表式で表わされることを示した。

2) CP・Tダイアグラム表示を用いたニュートリノ振動の統一的記述

昨年度、長基線ニュートリノ振動実験における純正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明快に図示できる有用な道具として「双確率空間におけるCPダイアグラム表示」を導入した。今年度の研究ではこれをT(時間反転)非保存測定をも考慮してこのダイアグラムの概念を拡張した。この結果得られた統一CP・Tダイアグラムの性質を解析することによって今まで十分な注意を払われることのなかったCPやT変換で結びつく振動確率間の新たな関係式(CP-CP、およびT-CP関係式)が得られた。このCP・TダイアグラムによってCP共役およびT共役を含む様々のチャンネルのニュートリノ振動の統一的記述が実現されていることも示された。

3) ニュートリノ振動におけるパラメータ縮退の一般論

極く最近のことであるが、加速器によるニュートリノ振動実験によるフレーバー混合パラメータの決定において「パラメータ縮退の問題」という深刻な問題が存在することが認識されてきた。これは、ニュートリノ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$)および反ニュートリノ($\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$)振動確率を実験で如何に精密に測定しても、(1-3)角、(2-3)角、およびCP位相がユニークに決まらず、一般には8重縮退解をもつというものである。上記研究で導入しその性質が明らかにされたCP・Tダイアグラムを用いるとこのニュートリノ振動におけるパラメータ縮退という現象の生起する理由が簡明に理解できる。この理解に基礎をおき、太陽質量二乗差が大気質量二乗差に比して十分小さいという実際によく近似の下でこのパラメータ縮退問題を解析的に解き、この一般的構造を明らかにした。特にこれまで求められていなかった縮退解間のCP位相の関係を簡単な形に解析的に表示することに成功した。また、この結果を用いて縮退を解くために必要

とされる(1-3)角に対する実験精度のおおまかな評価を行った。さらに T 非保存測定におけるパラメータ縮退問題を初めて議論し、この CP の場合との際だった定性的特徴の相違を明らかにした。

(上記2課題はブラジル、パウリスタ州立大学・布川弘志、および米国フェルミ国立加速器研・Stephen Parke 両氏との共同研究)

4) 原子炉実験による(1-3)角の測定とパラメータ縮退の問題

カムランド後ますます注目を浴びることとなった(1-3)角の決定に関して原子炉実験による測定法を提案した。この方法は加速器ニュートリノ実験に比して少なくとも一桁安価で、しかも素早く実行できる特質をもっている。我々はまた、この原子炉を使う測定法が加速器によるニュートリノ振動実験による方法と相補的役割を果たすこと、さらにはこれらを組み合わせることによって上記のパラメータ縮退の一部が解けることを具体的に示した。

この原子炉を使う(1-3)角の測定法は先にロシアのグループによって提案されていたが、その実現性の薄さから余り注目されてこなかった。我々の提案は24 GW という世界最大の熱出力(したがって最大の反電子ニュートリノフラックス)をもつ柏崎-刈羽原発における実験を想定した具体的なものであったこと、さらには、ちょうどタイムリーに衝撃的な実験結果を発表したカムランドグループの中核メンバーが含まれていたこと、などの理由で世界的に反響を巻き起こし、これを追って欧州、米国においていくつかの競合的計画が立案されてきた。

(この課題は東北大学ニュートリノセンター・末包文彦、井上邦雄両氏との共同研究)

5) レプトンフレーバー混合と二重ベータ崩壊

ニュートリノ振動を使うパラメータ決定には固有の限界がある。それはニュートリノ振動確率がニュートリノ質量二乗差だけに依存し、その絶対スケールの決定を許さないからである。この絶対値を決定するための最も有望な実験手段はニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊という現象を使う方法であると信じられている。現在このタイプの実験からは質量パラメータについての上限が知られている。一方、最近この現象を観測したと主張する人たちも現れた。この無ニュートリノ二重ベータ崩壊から実験的な上下限が与えられた場合にフレーバー混合パラメータや絶対質量スケールに課される制限をいかなる模型にも依らない仕方で一般的に導いた。さらに、これらを現実の実験値に当てはめ、例えば、二重ベータ崩壊実験から宇宙のオメガパラメータに対するニュートリノの寄与の上限を与えた。カムランド実験が(1-2)角をほぼユニークに決定した今、このような解析は極めて任意性の少ないものとなった。

6) ニュートリノを使った重力陥没超新星コアの診断学

昨年度開始した「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」研究プロジェクトを続行した。この基本的アイデアは、ニュートリノ振動の存在を前提とし反電子ニュートリノの温度とミュー・タウ(正反)ニュートリノの温度に差があることを使って、水チェレンコフ検出器で最も高統計の反電子ニュートリノ事象を使ってミュー・タウニュートリノの性質を調べようというものであった。一方最近独マックスプランク研究所のグループによって反電子およびミュー・タウニュートリノの温度にそれほど差がない可能性が強く示唆された。今年度の研究ではこの可能性を深刻に受け取り、1メガトンの体積をもつ日本の次期計画ハイパーカミオカンデ検出器でどの程度までこの困難を克服できるかを調べた。10%程度の温度差であれば我々の方法は有効であることが分かった。

(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、パウリスタ州立大学・布川弘志の各氏との共同研究)

7) 超弦理論と重力の量子効果

重力の量子効果（非摂動的効果）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により、もう少し踏み込んだ研究が可能になった。

そこでまず、重力の量子効果によるフェルミ粒子の凝縮について研究した。フェルミ粒子の動力学的な凝縮があると、何らかの対称性が自発的に破れる可能性があり、そして、対称性の自発的破れは素粒子物理学において非常に重要な現象であるからである。

タイプ II 型超弦理論とヘテロ型超弦理論における非自明な背景場の配位に fivebrane と呼ばれるものがある。この fivebrane においては非自明な時空間が実現されており、重力の量子効果によるフェルミ粒子（グラビティーノとディラティーノ）の凝縮が期待される。両理論の低エネルギー有効理論であるタイプ II 型超重力理論とヘテロ型超重力理論において、背景場の周りのフェルミ粒子のゼロモードを調べることにより、タイプ II 型理論においてはフェルミ粒子の 4 体凝縮が、そしてヘテロ型理論においてはフェルミ粒子の 2 体凝縮が可能であることが分かった。また、タイプ II 型理論においては、ある特定のフェルミ粒子（時空の対称性 $SO(5,1) \times SO(4) \subset SO(9,1)$ の $SO(4)$ spinor）の 2 点相関関数がゼロでなければならないことが予想された。

次にタイプ II 型超弦理論において直接に、D-brane boundary state を変形した boundary state を用いて、フェルミ粒子の 2 点相関関数を計算した。その結果、 $SO(4)$ spinor の 2 点相関関数は確かにゼロであることが分かった。さらにゼロでない 2 点相関関数をもつフェルミ粒子については、6 次元超重力理論の多重項の成分として理解できることが分かった。このような弦理論とその低エネルギー有効理論である超重力理論との直接の比較はすでに多くなされているが、フェルミ粒子についての事例は少なく、この研究はその第一歩であるといえる。

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

以前の研究で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を指摘した。今年度においては、このカイラル・アノマリーによる DCC 形成機構に特有な実験的予言を明らかにし、実験的コミュニティーに提案した。カイラル・アノマリーの効果の特徴を表し、かつ観測の容易な中性パイ中間子の崩壊生成物である光子の角度分布を測定し、このエリプティックフローパラメータ v_2 を決定すればよいというもので、通常の重イオン衝突事象に広く存在する流体力学的効果によるものと異なり、アノマリー機構は数 % の大きさの負の v_2 を予言することが分かった。これが米国ブルックヘブン国立研究所の RHIC 実験によってテストされ、立証（または逆に棄却）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. Asakawa, H. Minakata and B. Müller: Experimental Signatures of Anomaly Induced Disoriented Chiral Condensate Formation, *Physical Review* **C65** (2002) 057901.

P. Hernandez and O. Yasuda: Neutrino Oscillation Physics at a ν Factory, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* **A485** (2002) 811-818.

N. Kitazawa: Fermionic Zero-modes in Type II Fivebrane Backgrounds, *Modern Physics Letters* **A17** (2002) 2617-2625.

H. Minakata and H. Nunokawa: CP Trajectory Diagram; A tool for pictorial representation of CP and matter effects in neutrino oscillations, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A503** (2002) 218-221.

H. Minakata, H. Nunokawa and S. J. Parke: CP and T Trajectory Diagrams for a Unified Graphical Representation of Neutrino Oscillations, Physics Letters **B537** (2002) 249-255.

H. Minakata, H. Nunokawa and S. J. Parke: Parameter Degeneracies in Neutrino Oscillation Measurement of Leptonic CP and T Violation, Physical Review **D66** (2002) 093012.

H. Minakata, H. Nunokawa, R. Tomas and J. W. F. Valle: Proving Supernova Physics with Neutrino Oscillations, Physics Letters **B542** (2002) 239-244.

H. Minakata and H. Sugiyama: Constraints on Neutrino Mixing Parameters by Observation of Neutrinoless Double Beta Decay, Physics Letters **B532** (2002) 275-283.

2) 国際会議報告

H. Minakata and H. Nunokawa: CERN to Gran Sasso; Ideal Distance for Superbeam? Nucl. Phys. Proc. Suppl. **110** (2002) 404-406.

O. Yasuda: Recent Status of Neutrino Oscillation Study, in *Proceedings of the Sixth Workshop on Non-Perturbative QCD* (2002) 1-6 (World Scientific, Singapore, 2002).

O. Yasuda: Neutrino Oscillations with Four Generations, in *New initiatives on lepton flavor violation and neutrino oscillation with high intense muon and neutrino sources* (2002) 151-163.

O. Yasuda: Physics potential and present status of neutrino factories in *Proceedings of the Third International Workshop on Neutrino Oscillations and Their Origin (NOON2001)* (2002) 259-268 (World Scientific, Singapore, 2002).

3) 学会講演

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

安田修: ニュートリノ振動における真空模倣現象

日本物理学会秋季大会 2002 年 9 月 13 日 ~ 9 月 16 日 (立教大学)

南方久和, 杉山弘晃: Constraints on Neutrino Mixing Parameters by Observation of Neutrinoless Double Beta Decay

安田修: 2 種類以上の不毛ニュートリノがあるシナリオに対する制限

国内研究会

ミュオン蓄積リングを使ったニュートリノ源とそれが拓く物理: 2002 年 6 月 14 日-15 日 (KEK)

安田修: WG2 overview

「特定・宇宙ニュートリノ研究会」

第 9 回: 2002 年 5 月 8 日 (東京都立大学国際交流会館)

杉山弘晃：二重ベータ崩壊理論解析のレビュー

第10回：2002年11月22日（東京大学宇宙線研究所）

南方久和：実験屋さんのためのパラメータ縮退

杉山弘晃：原子炉実験による θ_{13} 角の測定 (他の可能性・方法についてのレビューを含む)

第11回：2002年12月11日（東京大学宇宙線研究所）

南方久和：コメント - ニュートリノ振動現象論の立場から -

第12回：2003年1月9日-10日（新潟大学）

安田修：KamLAND and Solar Neutrinos II

国際会議

INT Miniworkshop on Neutrino Masses and Mixing

April 8 - 12, 2002, Seattle, USA

O. Yasuda: Status of Sterile Neutrino Schemes (Invited talk).

Third International Conference on Beyond Standard Model Physics (BEYOND2002),

Oulu, Finland, June 2 - 8, 2002

H. Sugiyama: Constraints on Neutrino Mixing Parameters by Observation of Neutrinoless Double Beta Decay (Invited talk).

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

The Fourth International Workshop on Neutrino Factories based on Muon Storage Rings

(NuFACT02), July 1-6 2002, London, UK

H. Minakata: Method for Determination of $|U_{e3}|$ in Neutrino Oscillation Appearance Experiments (Invited talk).

O. Yasuda: Summary of Working Group 2 (Theory Part).

Third Tropical Workshop on Particle Physics and Cosmology,

August 19-23, 2002, San Juan, Puerto Rico

H. Minakata: Diagnostics of Supernova by Neutrinos (Invited talk)

XVI Particles and Nuclei International Conference (PANIC02),

September 30-October 4, 2002, Osaka, Japan

M. Asakawa, H. Minakata and B. Müller: Negative Elliptic Flow from Anomaly Induced DCC Formation

H. Sugiyama: Constraints on Neutrino Mixing Parameters by Neutrinoless Double Beta Decay Experiments

Plenary Meeting of Studies of Neutrino Factory Complex

December 11, 2002, CERN, Geneva, Switzerland

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

The Fourth Workshop on Neutrino Oscillations and their Origin (NOON2003)

February 10-14, 2003, Kanazawa, Japan

H. Minakata, H. Nunokawa, and S. Parke: Long Baseline Neutrino Oscillations: Parameter Degeneracy and JHF/NUMI Complementarity (Invited talk).

H. Sugiyama: Double Beta Decay Constraints (Invited talk).

O. Yasuda: Parameter Degeneracy and Reactor (Invited talk).

4) 学会誌等

南方久和：小柴先生、お待ちどうさま

天文月報 95, No. 12 (2002) 600.

南方久和：平成43回藤原賞 戸塚洋二氏（学界ニュース）

日本物理学会誌 57, No. 9 (2002) 676.

南方久和：佳境に入ったニュートリノ振動実験

パリティ 17, No. 04 (2002) 32-39.

原子核理論研究室

1. 研究活動の概要

本研究室は、原子核、ハドロン、およびポテンシャルにトラップされた量子縮退原子気体の静的・動的性質を中心とした研究を進めている。後者はごく最近急速に実験的・理論的研究が進展しており、原子核・ハドロンと同様な有限量子多体系としての特徴的な相や励起モードが見いだされている。本年はとりわけこれらの共通の性質に関わる研究を進めるとともに、昨年度より開始した国際共同研究を進展させた。

1) 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

原子核の高励起状態は、一方で巨大共鳴などのきれいな集団励起が観測されるとともに、他方ではエネルギー準位の統計的性質が量子カオスの予想に一致するなど、「秩序と混沌」の両側面があらわている。本研究では、カオスの性質が波動関数にどのように現れるか、それが集団励起の散逸過程・ゆらぎとしてどのような測度に観測されるか、を調べている。本年は原子核の四重極振動強度関数におけるゆらぎの分析を進め、とくに局所スケール次元におけるランダム行列計算からのずれと、四重極励起の散逸における戸口状態のエネルギー・スケールと関係していることを見出した。この結果は現在論文にまとめている。

2) 重陽子非弾性散乱における T 行列と SUDDEN 近似

重陽子など弱く束縛した粒子の散乱現象は、入射エネルギーが高い場合、散乱の過程では内部運動を凍結して扱う SUDDEN 近似がよいと考えられる。この方法を非弾性散乱に適用して、散乱断面積や種々の偏極量を調べてきた。多くの場合実験結果をよく再現するが、一部の偏極量については比較的大きなずれが見られる。この原因の可能性として入射粒子と標的との励起相互作用が考えられる。このため、相互作用として核子散乱素過程の T 行列を用いる可能性を検討し、SUDDEN 近似における定式化と平面波近似の枠内での検討を行なった。

3) クォーク物質におけるスピン偏極現象とカラー超伝導の研究

量子色力学の非閉じ込め相、特に低温高密度の領域におけるクォーク物質相の諸性質を相対論的な平均場理論の枠内で議論した。本年は特に、軸性ベクトル平均場によって特徴付けられるスピン偏極現象とカラー超伝導について議論し、これらの相は殆ど競合することなく共存することを見出した。この場合、超伝導ギャップは、スピン偏極による回転対称性の破れに伴ない非等方的になるが、これは完全に相対論的な効果から生じることが分かった。また解析的な考察により、クォークの有効質量がスピン偏極に対して不可欠な役割を果たすことを示した。

4) 極低温ボーズ・フェルミ混合原子気体の研究

ポテンシャルにトラップされた極低温原子気体は、新たな有限量子多体系として様々な研究課題を提起している。我々はとくにボーズ・フェルミ混合縮退系に焦点をあて、原子核物理での理論的手法を拡張して研究を進めている。本年はまず、乱雑位相近似による集団励起の計算に関連したさまざまな性質を調べた。

a) ボソン励起を経由するフェルミ粒子間相互作用

希薄な気体では粒子間の直接の相互作用にはほぼ s 波のみが寄与し、通常は短距離の有効相互作用としてあつかわれる。しかし一般には系の励起モードを経由した間接的な相互作用が存在する。この効果は混合気体を考える場合に明瞭である。ボーズ・フェルミ混合系において、ボーズ粒子系の励起を通じた

フェルミ粒子間相互作用は、電子系のBCS機構に類似しており、フェルミ気体の超流動をもたらす可能性が考えられる。我々はこの過程によるフェルミ粒子間の対相互作用を調べ、行列要素がボーズ凝縮体のコヒーレント長の到達距離をもつ湯川型相互作用でよく近似できることを見出した。

b) フェルミ粒子の泡型配位と単極子振動

ボーズ粒子数が遙かに多い場合、異種粒子間相互作用に斥力が働くと、フェルミ粒子は次第に中心から押し出され、ついには相分離が起こってフェルミ粒子は泡型配位をとる。この過程を理論計算で確認し、かつフェルミ系の一粒子スペクトルや単極子振動モードが特徴的な変化を起こすことを見出した。とりわけ、後者は相分離領域で擬似的なゼロ・モードとなり、これはフェルミ粒子の瞬間的な並進対称性に関連していることがわかった。

c) 擬一次元ボーズ-フェルミ混合系の不安定性

擬一次元中のボーズ-フェルミ混合気体はパイエルス不安定性や相分離に対する不安定性などを持つ。本研究ではこれらの不安定性を、励起スペクトルに現れるゼロエネルギーモードの現れを調べる事で議論した。

5) 極低温フェルミ原子気体の研究

フェルミ縮退原子気体は、ボーズ凝縮系とは対照的な種々の性質を示し、実験的な研究も盛んに行なわれている。われわれは特にスピン自由度が凍結されていない、二成分フェルミ気体に焦点をあてて研究を進めている。

a) 有限縮退フェルミ原子気体の集団強磁性

集団強磁性とは、スピンが縮退した相関の小さいフェルミ粒子気体は量子統計の効果により高密度でスピン偏極した状態が安定になる現象である。これはもともとブロッホによって金属強磁性を説明するために電子気体に対して考えられたものである。実際には、大きな相関のために、電子気体ではこのような強磁性は起こらないことがわかっている。原子気体のボース・アインシュタイン凝縮(BEC)と同じ実験的技術を用いて、フェルミ原子の有限縮退系がつくられるようになり、研究が発展しつつある。この系ではBECと同様に相関の強さを実験的に変化させることが可能で、非常に弱い相関をもったフェルミ気体ができ、そこではブロッホの考えた集団強磁性が実現すると期待される。我々は、弱い斥力を持つ有限縮退フェルミ気体の集団強磁性について研究し、トーマス・フェルミ近似のもとで相転移がおこる条件を代数的に厳密に求めた。また、集団強磁性化がどのように進行するかを解析的に調べ、有限系では内部から偏極が発生し外側に広がることを示した。また、集団強磁性を実際につくるための実験的条件を議論した。これらの結果は論文として出版された。

b) 縮退した原子フェルミ気体の対相関・超流動状態とゆらぎ

縮退フェルミ気体では、系が有限であっても粒子間引力が十分強ければ、対相関による相転移を起こし、超流動相が実現されると期待される。この転移過程では、系の励起モードがソフト化し揺らぎの振幅が増幅されて、実験量に反映されると予想される。本研究では引力の働く二成分有限フェルミ気体について、引力の強さをパラメタとして系の基底状態および対振動状態を計算し、秩序変数の特徴、ソフト・モードのエネルギー、対行列要素(遷移振幅)の変化を調べた。とくに、系の有限性がソフト・モードのふるまいや秩序変数のゆらぎに与える影響を明らかにした。

c) フェルミ気体の四波混合

本研究では二成分の内部自由度を持ったフェルミ気体の四波混合を調べる事でフェルミ粒子の多体干渉性について研究を行なった。フェルミ粒子の占有分布は有限の運動量幅を持つため、初期状態に与えたコヒーレンスは有限の崩壊時間を持つ。本研究で、内部状態が異なるフェルミ粒子間の相互作用効果によってコヒーレンス時間が長くなり、四波混合のプロセスが有効に働く事を示した。

2. 研究業績

1) 論文

T. Sogo, T. Miyakawa, T. Suzuki and H. Yabu: RPA Study of Collective Excitations in the Bose-Fermi Mixed Condensate of Alkali-Metal Gases, *Phys. Rev. A* **66** (2002) 013618

T. Sogo and H. Yabu : Collective Ferromagnetism in Two-component Fermi-degenerate Gas trapped in Finite Potential, *Phys. Rev. A* **66** (2002) 043611

E.Nakano, T.Suzuki and H.Yabu: Colour-SU(3)-Ginzburg-Landau effective potential for order parameter with 3×3 symmetry, *J.Phys.G* **29** (2003) 491-508.

2) 国際会議報告

T. Miyakawa, H. Yabu, and T. Suzuki: Peierls instability and periodic order parameter in quasi-1D uniform bose-fermi mixtures, Proc. ICAP XVIII(2002)160.

3) 学会講演

日本物理学会「第57回年次大会」 2002年3月24日(日)-27日(水) (立命館大)

高山靖敏、鈴木徹、藪博之、P.Schuck : Boson, Fermion, Composite Fermion 間の平衡状態の性質

十河孝明、藪博之 : 原子気体の2成分フェルミ縮退系における強磁性状態

丸山智幸、藪博之、鈴木徹 : ボーズ凝縮・フェルミオン共存層の時間依存ダイナミクス

研究会「核力と核物理」, 2002年7月23日~25日 (大阪大学核物理研究センター)

鈴木 徹 : 極低温原子気体における振動モードと相互作用

研究会「熱場の量子論とその応用」, 2002年8月7日~9日 (基礎物理学研究所)

十河孝明、宮川貴彦、鈴木 徹、藪 博之 : RPA study of collective excitations in the Bose-Fermi mixed condensate of alkali-metal gases

仲野英司 : A spin-polarized state of quark matter with color superconductivity

基研研究会「場の量子論の基礎的諸問題と応用」, 2002年12月18-20日 (基礎物理学研究所)

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

第5回レーザー冷却研究会, 2003年1月7日~9日,(淡路)

T. Miyakawa, H. Christ, C.P. Search, P. Meystre: Fermionic four-wave mixing beyond the undepleted pump approximation

研究会「極限状態におけるハドロン物質相の研究」, 3月18日~3月20日 (日本原子力研究所)

仲野英司 : Spin Polarization and Color Superconductivity

研究会「原子核の複雑さと散逸」, 2003年3月12日~14日 (基礎物理学研究所)

鈴木 徹 : Bubble Fermi Gas

国際会議

18th International Conference on Atomic Physics,
July 21-26,2002, Cambridge, Massachusetts, USA

T. Miyakawa, H. Yabu, and T. Suzuki: Peierls instability and periodic order parameter in quasi-1D uniform bose-fermi mixtures

The 23rd International Conference on Low Temperature Physics,
Hiroshima, August 20-27, 2002

T. Sogo and H. Yabu: Collective Ferromagnetic States of Degenerate Atomic Fermi Gas with Two Components in Trapping Potential

T. Sogo, T. Miyakawa, T. Suzuki and H. Yabu: RPA Study of Collective Excitations in the Bose-Fermi Mixed Atomic Gases with Large Excess of Bosons

T. Miyakawa, H. Yabu, and T. Suzuki: Peierls instability of quasi-one-dimensional Bose-Fermi mixed gas

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

Waseda International Symposium on Fundamental Physics,
Waseda Univ., November 12-15, 2002

T. Sogo, T. Miyakawa, T. Suzuki and H. Yabu: RPA Study of Collective Excitations in the Bose-Fermi Mixed Atomic Gases

T. Sogo and H. Yabu: Collective Ferromagnetism in Two-Component Fermi-Degenerate Gas Trapped in Finite Potential

International Symposium on Frontiers of Collective Motions,
Aizu Univ., November 6-9 ,2002

T.Sogo, T.Miyakawa, T.Suzuki and H.Yabu: RPA Study of Collective Oscillations in the Bose-Fermi Mixed Gases of Trapped Atoms

T.Maruyama, H.Yabu and T.Suzuki: Time-Dependent Dynamics of the Bose-Fermi Mixed Condensed System

宇宙物理理論研究室

1. 研究活動の概要

1) コンパクト天体降着ガスでの輻射輸送

中性子星連星やブラックホールジェット天体から、高階電離した鉄の吸収スペクトルが観測されるようになってきた。何れもインクリネーションの大きな低質量連星系であることから、ディスク降着に共通するガスの構造を反映していると考えられる。スペクトルの形成過程を定量的に調べることを目的として、準位の占有密度とカップルした non-LTE 輻射輸送の定式化に取り組んだ。輸送方程式を解いた結果、重元素の E1 スペクトル線では Einstein の A 係数がひじょうに大きいこと、吸収ガスが強い輻射で光電離されることによって、古典的な散乱・吸収モデルによる curve of growth からは大きくずれることが解った。とくに、比較的 column density が小さい領域でずれが顕著である。さらに、P Cygni プロファイルを形成する条件に着目して、ジェットなどの質量放出につながる可能性を調べている。

2) 銀河団ガスの熱的進化

ビリアル半径の $\sim(10-20)\%$ より外側は質量で決まる重力平衡分布に近いガス分布が期待されるが、内側では放射冷却のために個々の銀河団の熱的進化に依存してガス分布が決まることが考えられる。また、最近の観測的研究で、中心部のガス温度がある温度以上には下がっておらず、放射冷却が強く効いていると考えられていた銀河団でも cooling flow rate は従来の評価より 1 桁小さいことが明らかになってきた。このような銀河団ガスのプロパティを統合的に理解することを目的として、流体力学コードを用いたガスの熱的進化の理論的研究を進めている。電子熱伝導の効果の他、中心天体が存在した場合の輻射あるいは粒子による圧力の影響なども考慮して、銀河団形成～現在までの時間発展を調べている。

3) 統計的粒子加速の基礎過程

Fokker-Planck 方程式を解くことにより、星間ガスや銀河団ガスにおいて乱流磁場などで散乱され、統計的に加速される粒子のエネルギー・スペクトルを精確に求める研究を行った。加速がない場合に自然に熱的な分布函数 (Maxwell 分布) が得られることを確認したうえで、加速過程を取り入れて様々な温度・密度条件の下で生成される粒子の分布函数を求めた。熱的分布 + 非熱的分布という 2 成分の描像が正しくないことを示し、中間領域に準熱的粒子群が形成されることを明らかにした。また、準熱的粒子の生成効率やエネルギーの温度・密度依存性を求めた。準熱的粒子が存在すると、実際の温度・密度より高い温度・密度の放射スペクトルに見えることを、既に銀河リッチ放射について指摘している。銀河団ガスの熱的進化や X 線放射などに、加速された粒子が関わる可能性についてさらに研究を進めている。

4) 重力レンズ銀河団の質量分布の研究

銀河団の質量分布を推定する方法として、X 線観測と重力レンズ効果という独立な二つの方法に着目し、両者の比較を行った。サンプルとして用いた CL0024+17 銀河団は、強い重力レンズ効果による多重アーク像を持ち、過去に重力レンズのモデリングからダークマター分布にフラットなコアを持つことが指摘されたことでも注目されている。この銀河団についてチャンドラ衛星で取得した X 線観測データの解析から、中心領域の高温ガスの空間分布と温度分布を精度良く決定した。これよりガス温度に半径依存性はなく等温とみなせること、および X 線表面輝度分布は二つのモデルの重ね合わせでよく説明できることがわかった。以上の解析結果に基づいて銀河団の質量推定を行った結果、X 線から求められる質量は重力レンズ質量に比べて、factor 3 小さいことが明らかになった。このような大きな食い違いを生む原因として、銀河団同士の衝突合体现象の影響について議論を進めている。

5) 銀河団の質量温度関係

銀河団ガスを特徴づける観測量として X 線光度や温度などがあるが、それらの間の関係は単純なスケール則からずれていることが知られている。どのような物理過程によって、ずれが生じるのかをみるには質量との間の相関を調べるのが重要になる。そこで、観測から得られた X 線光度温度関係と X 線温度関数から質量温度関係を導いた。その結果は単純なスケール則の予言するものよりも緩やかなものであることがわかった。この結果をもとに、銀河団ガスの熱的進化について研究を進めている。

2. 研究業績

1) 論文

M. Kawasaki, M. Ozaki, F. Nagase, K. Masai, M. Ishida, R. Petre: ASCA Observations of the Supernova Remnant IC 443: Thermal Structure and Detection of Overionized Plasma, *Astrophys. J.* **572** (2002) 897-905.

T. Endo, M. Ishida, K. Masai, H. Kunieda, H. Inoue, F. Nagase: Broadening of Nearly Neutral Iron Emission Line of GX 301-2 Observed with ASCA, *Astrophys. J.* **574** (2002) 879-898.

V. A. Dogiel, H. Inoue, K. Masai, V. Schönfelder, and A. W. Strong: The Origin of Diffuse X-Ray Emission from the Galactic Ridge I. Energy Output of Particle Sources, *Astrophys. J.* **581** (2002) 1061-1070.

K. Masai, V. A. Dogiel, H. Inoue, V. Schönfelder, and A. W. Strong: The Origin of Diffuse X-Ray Emission from the Galactic Ridge II. Nonequilibrium Emission due to In-Situ Accelerated Electrons, *Astrophys. J.* **581** (2002) 1071-1079.

M. Shimizu, T. Kitayama, S. Sasaki and Y. Suto: Reliability of Merger Tree Realizations of Dark Halos in the Monte-Carlo Modeling of Galaxy Formation, *Publ. Astron. Soc. Japan* **54** (2002) 645-653.

2) 国際会議報告

N. Ota, M. Hattori, E. Pointecouteau, and K. Mitsuda: Chandra Spectroscopy and Mass Estimation of the Lensing Cluster of Galaxies CL0024+17, the proceedings of the 8th IAU Asian-Pacific Regional Meeting Vol.I., 2002

T. Oshima, K. Mitsuda, N. Ota and N. Y. Yamasaki: Chandra Detection of an Extended Emission around the Edge-on Galaxy NGC 55, The proceedings of the 8th IAU Asian-Pacific Regional Meeting Vol.II., the Astronomical Society of Japan, 287, 2002

N. Ota and K. Mitsuda: A uniform X-ray analysis of 79 distant clusters of galaxies, X-ray Survey, *Astron. Nachr.*, v324, 172, 2003

3) 学会講演

日本天文学会 2002 年春季年会, 2002 年 3 月 27 日-31 日 (茨城大学)

北山 哲、政井邦昭: 銀河団ガスの冷却可能性

日本物理学会 2002 年秋季大会 2002 年 9 月 13 日-16 日 (立教大学)

佐々木 伸: 大規模構造・銀河団形成

国内研究会

第 20 回 NRO ユーザーズミーティング 2002 年 7 月 17 日 ~ 19 日 (国立天文台野辺山電波観測所)

太田直美、江澤元、松尾宏、北山哲、桑原健、須藤靖、吉川耕司、小松英一郎、坪井昌人 他: 45m 鏡マルチビーム受信機の連続波データ解析手法の開発 (1)

線バースト GRB2002 , 2002 年 8 月 28-30 日 (京都大学)

政井邦昭 : アフターグロー輝線の起源

高エネルギー宇宙物理学の理論的研究 , 2002 年 10 月 30-11 月 1 日 (東京大学)

政井邦昭 : Implications of X-ray absorption lines from X-ray binaries

国際会議

The 8th IAU Asian-Pacific Regional Meeting, Hitotsubashi Memorial Hall, July 2-5, 2002

N. Ota, M. Hattori, E. Pointecouteau, and K. Mitsuda Chandra Spectroscopy and Mass Estimation of the Lensing Cluster of Galaxies CL0024+17

Japan-Germany Workshop on Galaxies and Clusters of Galaxies, Shuzenji, October 29-31, 2002

T. Kitayama and K. Masai: Possibility of Radiative Cooling in Clusters of Galaxies

N. Ota, M. Hattori, E. Pointecouteau, and K. Mitsuda Chandra Analysis and Mass Estimation of the Lensing Cluster of Galaxies CL0024+17

X-ray survey in the light of the new observatories, Santander, Spain, September 4-6, 2002

N. Ota and K. Mitsuda A uniform X-ray analysis of distant clusters of galaxies

基礎物理学研究グループ

1. 研究活動の概要

本研究グループでは、昨年度までの流体理論、生体レオロジー、可積分系に基づく超弦理論の研究に加えて、2002年7月1日付でS. ケトフ助教授をドイツ・カイザースラウテルン大学から迎え、量子重力や非摂動的超弦理論の研究が新しく開始された。

1) 血液のレオロジー、サスペンションのレオロジー

1. 減衰振動型レオメータによる粘性率の測定法減衰振動型レオメータは試料を入れる円筒状の容器とそれを吊るす針金とから成る粘度計である。液体試料を入れた容器に初期ねじり角を与えて開放すると容器は軸の周りに回転振動するが、その振幅は容器内の液体の粘性により減衰する。液体の粘性率はこの対数減衰率と周期との測定から決定される。この原理は古くから知られていたものの対数減衰率と周期から粘性率を導くための理論解析が複雑なためこの型の粘度計の使用は少なかった。しかし、うまく設計された装置では対数減衰率が液体の粘性率の変化に敏感に反応することがわかり、そのためサスペンションの内部構造が時間変化するような現象を調べるのに有用であることが指摘され、血液の凝固過程や沈降現象を調べるのに用いられるようになった。そこで、液体の粘性の変化がどのように対数減衰率の変化に反映されるかを知るために我々は容器の側面ばかりでなく上下底面の影響を考慮に入れて容器内でのニュートン流体の振動流動を解析的に調べた。その結果を用いて容器に働く粘性応力を計算し、容器の減衰振動の運動方程式を導き、ラプラス変換によってその解を求め、対数減衰率と周期から液体の粘性率と密度を求める方法を明らかにした。

2. 血沈に及ぼす振動流動場の影響血液中における赤血球の沈降現象（血沈）は非常に古くから知られており、沈降速度は患者の健康状態を検査する簡便な方法の一つとして広く用いられてきた。また、沈降現象は赤血球集合現象と密接に関係していると考えられるため、両者の関係を解明するための実験的・理論的研究はこれまでに数多くなされてきている。しかし両者の関係の定量的な理解は十分とはいえない。赤血球集合体形成は赤血球の数、形態、表面電荷、レオロジー的性質等とフィブリノーゲン濃度などの血漿の性質に依存することが知られているが、その他に外部から加えられる流れの場にも強く影響される。しかし、血沈に及ぼす流れ場の影響を報告した研究は数少ない。最近 Kawakami 等は減衰振動型レオメータを用いて、種々のフィブリノーゲン濃度でのヒト赤血球サスペンションの対数減衰率の時間変化を測定し、その速い変化から振動流動場中での血沈速度は静止状態におけるものに比べ著しく速くなることを示唆した。我々は、Kawakami 等の実験データから上澄み層の厚さと時間との関係、すなわち沈降曲線を導出し、彼らの示唆を定量的に示すことを目指した。赤血球サスペンションが上澄み層と沈殿層の2層に分離した状態における対数減衰率を上澄み層の厚さの関数として理論的に求めた。理論的に得られた対数減衰率と上澄み層の関係と、Kawakami 等によって実験的に得られた対数減衰率と時間との関係を比較して上澄み層の厚さの時間変化、すなわち沈降曲線が求められた。この結果から、静止状態に比べ振動状態における沈降速度は著しく速く約10分で平衡値に達することが示された。

2) 流体中の平板の運動

短冊状平板の落下運動は、木の葉や紙片の舞い落ちる運動の面白さとも関連して古くから興味をもたれているが、長い間この問題への取り組みは十分になされていなかった。最近になって平板運動に対するいくつかのモデル方程式が提案されたが、それらは定常運動を行う平板に対する理論と実験に基づいた

現象論的方程式で、これらを非定常運動にまで適用することは大いに疑わしい。非定常運動する平板に適用可能な方程式を確立するために、完全流体の理論に基づいて流体中を運動する平板の周りの流れから平板に働く力とトルクを求め、平板と平板から放出された渦糸の運動方程式を導いた。これらの方程式による平板の落下運動の研究に先立ち、方程式の妥当性を調べるための予備的計算として、異なる迎角で等速運動する平板に働く力と放出渦の分布を数値計算により求めた。得られた結果はそれに対応する実験値や可視化写真と比較的に良く合致していることが示された。また、迎角90度で運動する平板の後方で負抗力を示す渦対の配置領域の存在が示された。この存在により、静止状態から加速する平板運動の抗力の急激な立ち上がりとその後の減少の解釈が可能となった。

3) タイプ II 超弦理論におけるインスタントン補正の研究

この研究は Krasnojarsk 大学 (ロシア) 物理教室の A.Cheshel 博士と共同で行ったものである。Becker-Becker-Strominger 公式は2つの Del Pezzo 面の交線に沿った4フェルミ相互作用に対する世界面インスタントンの寄与を記述する。その標準的な公式を具体的に計算することが出来た。更にこの結果を用いて Pati-Salam の超対称大統一模型における選択則を具体的に求めることが出来た。

4) 超弦理論における非摂動効果の計算

この研究では、4または5次元時空の $N = 2$ 超対称重力理論における所謂ユニバーサル超対称多重項の非摂動的な量子幾何学を調べた。ユニバーサル超対称多重項の低エネルギー有効作用は4次元の $U(1) \times U(1)$ 対称性を持った4重極非線型シグマ模型によって与えられることが知られている。ユニバーサル超対称多重項の計量は双曲面上のプラシアン固有関数であるところの単一の実プレポテンシャルによって支配されている。我々はタイプ II 超対称ストリングの Calabi-Yau 局所化によって生じるユニバーサル超対称多重項の標準的な計量に対応した古典的なプレポテンシャルを計算した。その結果 D インスタントンを記述する非摂動的な4重極計量を、プレポテンシャルが $SL(2, Z)$ を持つという仮定の下で見出した。ここで見出したプレポテンシャルは一意的であり、それはまた10次元において Green と Gutperle (Cambridge 大) が以前に見つけた D インスタントン関数と一致し、更に次数が $3/2$ の Einstein 系列で与えられることが分かった。

5) 弦の境界共形場理論とソリトン方程式

Callan et al による境界共形場理論は弦理論の非摂動的記述を可能にする。そこに現われるトポロジカルなソリトンと、可積分方程式の解として得られるソリトン解との類似に注目し、それらの関係を詳細に調べた。その結果、境界共形場の理論におけるソリトン-反ソリトン対が古典ソリトン方程式の解として現れる事を明らかにし、更にそれらの間に成り立つ代数関係を見出した。

6) ブレイン力学と南部方程式

超弦理論の非摂動的記述において、開弦の端点で作る高次元多様体はブレインと呼ばれるが、その力学を記述する数学はまだ存在しない。南部方程式はハミルトン方程式を高次元に一般化したものであるが、まだその内容は理解されていない。本研究では南部方程式を用いてブレイン力学を記述する可能性を探った。その結果、メンブレインと呼ばれる3次元ブレインに付いては、それが南部方程式を解いて得られるものと一致する事を示した。更に高次元のブレインについても現在研究を進めている。

7) 量子力学的な KAM の定理について

超弦理論は離散可積分系によって特徴付けられる、と言う本研究の立場からは、一般的な非線形系の中に離散可積分系を特徴付けること自体が超弦理論を理解する上で重要となる。古典力学においては KAM の定理がその役割を果たすことから、KAM の定理を場の理論的に定式化する事によって、その量子化

を試みた。その結果、Gallavotti の示した、古典 KAM の定理と場の理論におけるくり込み群との対応に注目し、プランク定数がゼロでない場合のファインマン規則を確立した。量子効果を見る為の場の理論的な計算は今後の課題である。

2. 研究業績

1) 論文

A.Cheshel and S.Ketov: Type II String Instanton Corrections to the Four fermion Correlator in the intersection of Del Pezzo surfaces, *Phys. Rev.* **D67** (2003) 026007.

S.Ketov: Summing up D-instantons in $N = 2$ Supergravity, *Nucl. Phys.* **B649** (2003) 365-388.

S.Saito, N.Suzuki and H.Yamaguchi: Discrete Conjugate Nets of Strings, Contemporary Mathematics, in INTEGRABLE SYSTEMS, TOPOLOGY, AND PHYSICS **309** (2002) 211-218.

S.Saito, A.Shudo, J.Yamamoto and K.Yoshida: A Hamiltonian Flow Associated with Two Dimensional Map, *Journ. Math. Phys.* **43** (2002) 4963-4965.

J. Yamamoto: Möbius Symmetry of Discrete Time Soliton Equations, *J. Phys. Soc. Jpn.* **72** 253-264.

2) 国際会議報告

S.Ketov: Non-perturbative low-energy effective action of the universal hypermultiplet

International Workshop in String Theory 京都大学基礎物理学研究所、2002 年 11 月 15-16 日

3) 学会講演

日本物理学会第 58 回年会 2003 年 3 月 28 日 ~ 3 月 31 日 (東北大学)

富山泰伸、杉田貴司：平板運動に及ぼす放出運動の影響

第 25 回日本バイオレオロジー学会年会 2002 年 6 月 6 日 - 6 月 7 日 (信州大学)

オーガナイズドセッション「微小循環と組織への酸素輸送」村田忠義、白石敬亮、立石憲彦、鈴木洋司、前田信治：微小管内を流れる血液からの酸素輸送に及ぼす赤血球集合体形成の効果

京大基研短期研究会「量子カオス：理論と実験の現状」2002 年 9 月 9 日 ~ 9 月 11 日 (京都大学)

齋藤 暁：場の理論と量子カオスとの接点

国際会議

International Workshop in String Theory, 京都大学基礎物理学研究所, November 15-16, 2002

S.Ketov: Non-perturbative low-energy effective action of the universal hypermultiplet

4) 学会誌等

齋藤 暁：場の理論と量子カオスとの接点を求めて、数理科学 (サイエンス社) **477** (2003) 13-19.

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きた．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) 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 (F.N.L. 3)．

2) ラチェット系の運動と熱浴のモデル

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，ガウス分布するランダム力が無相関のポワソン過程により発生する場合，一方向の運動が実現することを Langevin 方程式に基づき摂動展開により示した．この結果によれば，限りなく白色ガウス過程に近いランダム力で一方向の運動が可能となる．そこで，熱分子が系と直接弾性衝突するような，より現実的な熱浴のモデルを提案し，マスター方程式として，従来の Fokker-Planck 方程式と異なる微積分方程式を導いた．この方程式の定常解はカノニカル分布となり，Langevin 方程式における見かけ上のパラドックスを解消する．

3) 生体システムにおける心拍変動の動力学

心拍などの生体内信号は，正常な場合でも不規則に変動しており，長時間相関をもったゆらぎを示すことが知られているが，そのメカニズムについては明らかになってはいない．我々は，様々な生物の心拍変動の解析を通じて，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．イセエビの心拍変動時系列を解析し，イセエビの心拍ゆらぎにも長時間相関があることを見いだした．さらに，心拍が速くなる場合と遅くなる場合で，相関の性質が異なることを明らかにし，促進性と抑制性神経活動が異なる相関をもって活動していることを示唆した．また，ウシガエルについても調べ，その変動に決定論性があることを見いだした．

4) ハミルトン系の遅い緩和の起源

大自由度ハミルトン系の遅い緩和の問題が，最近注目されている．可積分系に弱い摂動が加わった場合の，いわゆる Nekhoroshev 型の遅い緩和は，系の自由度の増大と共に実現しなくなることが知られている．だが Benettin は，並進運動の自由度に比べて短い時間スケールで振動するような内部自由度を持つ系では，その時間スケールの比の増大と共に緩和時間が指数関数的に増大すること，また，自由度が大きくなっても遅い緩和が可能であることを数学的に証明した．我々は最近，線形バネで繋がれた2原子分子から成る1次元分子気体についての数値実験を開始した．緩和時間は分子数の増大と共にはじめは減少し，やがて飽和するという新しい結果が得られた．この分子数依存性は，緩和のしくみが Nekhoroshev 型から Benettin 型へと移り替わるためではないかと考えられる．より詳しい解析を続けている(九大化学：渡辺氏との共同研究)．

5) 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。このような水滴落下のメカニズムを詳しく調べるために、流体力学的シミュレーションを実行した。このシミュレーションは、これまで実験で観測されてきたカオスを含むさまざまな非線形現象を再現し、また、連続時間の状態空間における低次元のカオスアトラクタの構造を明らかにした。カオスアトラクタの低次元性は、高速カメラを用いた実験でも確かめられた(勝山・増永との共同研究)。さらに、この系のポテンシャルに注目した数値解析を行い、液滴落下を支配する低次元のポテンシャル曲面の存在を明らかにした。ポテンシャル曲面を導入することで、流体の変形運動と、カオスを生み出す非線形力学系との関連を直感的に理解することが可能になり、液滴落下のダイナミクスに統一的な説明を与えることに成功した。

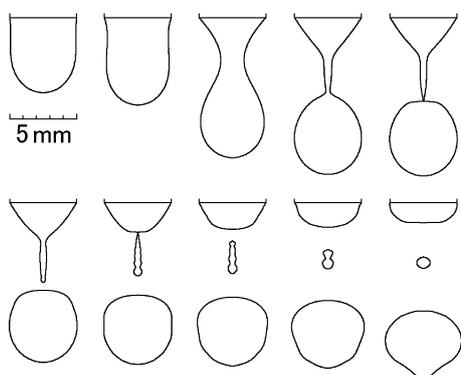


図 1: 水滴形成のシミュレーション。

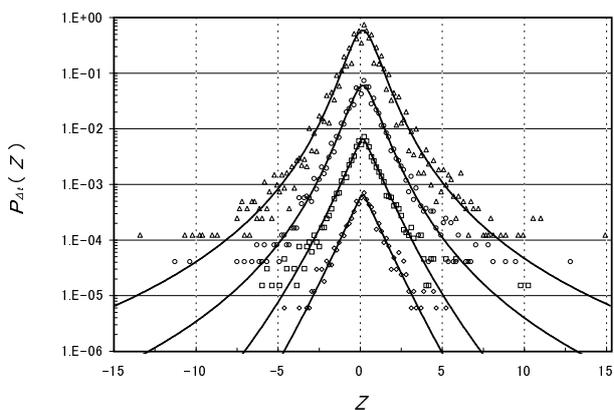


図 2: 価格差 (米ドル/独マルク) の P D F . 実線は Tsallis 分布. (N. Kozuki and N. Fuchikami: Physica A 掲載予定)

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 (P D F) 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た。このモデルにより、価格差の P D F と、価格差の局所分散 (ボラティリティ) の P D F を関連付け、これらの形状を共に良く再現することができる。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、また、価格差自身の相関は短いにもかかわらず、ボラティリティが非常に長い相関時間を持つことも示された。

2. 研究業績

1) 論文

N. Fuchikami and T. Sakaguchi: Noise-induced transmission of signals through a chain of level-crossing detectors: Fluctuation and Noise Lett. **3** (2003) L11-L22.

2) 国際会議報告

T. Katsuyama, K. Kiyono and N. Fuchikami: Chaos in a dripping tap, Theor. Appl. Mech. Jpn. **51** (Proc. Jpn. National Con. for Theoretical and Applied Mechanics, ed. K. Uetani, 2002) 381-385.

3) 学会講演

日本物理学会第57回年次大会 2002年3月24日～27日(立命館大学)

上月直基, 淵上信子: 非加法的パラメタを用いた為替変動データの解析

清野健, 勝山智男, 増永拓也, 淵上信子: 液滴落下系カオスの動力学

石岡俊也, 淵上信子: ブラウン粒子を記述する熱浴のモデル

坂口俊文, 淵上信子: リング上につながった素子からなる系の確率共鳴

日本物理学会 2002年秋季大会 2002年9月6日～9日(中部大学)

淵上信子, 上月直基: 価格変動のダイナミクスと Tsallis 分布

第17回生体・生理工学シンポジウム 2002年9月9日～11日(北海道大学)

清野 健, 矢澤 徹: 変温動物における心拍リズムの非線形現象

国際会議

Dynamics Days Europe 2002, Heidelberg, Germany, July 15-19, 2002

K. Kiyono, T. Katsuyama, T. Masunaga and N. Fuchikami: Low-dimensional chaotic dynamics in dripping taps.

K. Tanaka, K. Kiyono, T. Katsuyama and T. Yazawa: Heartbeat dynamics in freely moving bullfrog.

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研究

多自由度系の量子トンネル効果，とくに，古典系がカオスを発生する状況でのトンネル効果の研究を複素半古典論を用いて行っている．今年度は，混合位相空間をもつような一般の非可積分系について，とくに，KAM トーラス，あるいはその複素拡張がトンネル効果におよぼす影響を調べた．面積保測写像の複素回転領域（あるいは，一般的に滞留点集合）が4次元体積をもたないこと（数値的傍証は既にある），および，Bedford and Smillie が与えた複素平衡測度の台 (support) がジュリア集合と一致すること，の2つを仮定することにより，任意のKAM トーラスの近傍をつなぐ（複素）古典軌道が存在することがわかった．

2) 強レーザー場における分子のイオン化過程の半古典的機構

光子場強度が摂動領域から外れ，多価イオンが形成される程度の光子場強度に至ると，強レーザー場中の分子の動力学には，大変形・大振幅振動が発生し，多数自由度の絡む複雑な現象が発生する．こういった強摂動領域では，光子場によって歪んだポテンシャルから電子がトンネル効果を介してイオン化する可能性が出てくるが，このような領域で期待される「複数自由度が本質的に関与したトンネル効果」を研究するため，周期電場の加わったソフトクーロン型のポテンシャルをもつ1次元系を調べた．特に，複素相空間の構造を調べることができるような縮約系を考え，モデルのパラメータの適当な調節の後，量子論・半古典論等の予備的な計算を行った．

3) 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

量子ビリヤード問題の固有スペクトルを数値的に求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．このことから，M. Kac によって提出された「太鼓の形を聞き分けることはできるか？」という平面ビリヤードの等スペクトル問題の反例も，外部散乱問題の散乱極を観測することにより「聞き分ける」ことができる可能性が出てくる．ここでは，この予想を数値的に検証した．また，この検証作業のために避けては通れない，角のある撞球台に境界積分法を適用する方法を開発した．

4) 内部自由度をもつ大自由度ハミルトン系の遅い緩和の起源

大自由度極限でのハミルトン系の緩和の問題を実在液相分子をめぐる議論している．ハミルトン系での遅い緩和の起源は，位相空間にKAM トーラスと呼ばれる局所的な保存量と結びつけて議論されることが多い．しかしながら，一般に，KAM トーラスは，自由度が大きくなる極限でその体積が減少し，緩和に対する影響力を弱めることから，大自由度ハミルトン系の遅い緩和の起源にはまったく異なる理由付けが求められる．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．既に確認した液相水分子・エチルアルコールが遅い緩和を示すのに対して，内部自由度間のタイムスケールに差のない，酸素分子の分子動力学計算を行った結果，通常のデバイ型の緩和が観測された．このことで，我々の作業仮説はさらに強い支持を得た．

5) 時間空間依存する軌道不安定性と有限時間 Lyapunov 数

非平衡統計力学の基礎として，多自由度量子カオス系の動力学の性質，特に量子古典対応の考察を行っている．この考察に必要な数値手法，多自由度系に適応した量子動力学，及び古典動力学のリャプノフ指数（軌道不安定性の指標）の数値手法を開発した．本年度では，この局所リャプノフ指数の数値手法

が、既存手法では近似的にしか求めることが出来なかった多自由度振動子系についても正確な解法であることを示し、その特異な振る舞いを明らかにした。

6) カオスの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。本研究で、我々は、カオスの動力学による量子的な絡み合いを、理論的に、また同時に、数値実験を通して研究した。まず、弱結合領域において、絡み合いの“線形応答理論”を構築した。昨年度の強いカオス系での研究に引き続き、この解析理論を、弱いカオス系、すなわち, chaotic sea と tori の共存する系に適用した。そこで、絡み合いの生成に係わる物理量のゆらぎの変化と、tori からの影響による振動数の変化が、絡み合いの生成率を支配することを説明した。一方、以上で用いた“線形応答理論”は、摂動論的であるため、絡み合い状態を完全に特徴づける Schmidt 展開を得ることが困難である。これに対して、半古典 coherent state 経路積分法の単一軌道近似を用いることで、結合不安定調和振動子の Schmidt 展開を解析的に得た (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

A. Shudo, Y. Ishii and K.S. Ikeda: Julia set describes quantum tunneling in the presence of chaos *J. Phys. A.* **35** L225-L231.

S. Saito, A. Shudo, J. Yamamoto and K. Yoshida: Hamiltonian flows associated with discrete maps, *J. Math. Phys.* **43** 2002 4963-4965.

Atushi Tanaka, Hiroshi Fujisaki and Takayuki Miyadera: Saturation of the production of quantum entanglement between weakly coupled mapping systems in a strongly chaotic region, *Phys. Rev. E* **66** 045201-1 – 045201-4.

Atushi Tanaka: Semiclassical theory of weak values, *Phys. Lett. A* **297** 307–312.

2) 国際会議報告

A. Shudo, T. Onishi, K.S. Ikeda and K. Takahashi : “Dynamical and Energetic Barrier Tunneling in the Presence of Chaos in Complex Phase Space”, *FUNDAMENTAL ASPECTS OF QUANTUM PHYSICS*, eds; L. Accardi and S. Tasaki, p157-177 (World Scientific, 2003)

Atushi Tanaka: “The WKB method, complex-valued classical trajectories and weak measurements”, in *Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology, ISQM-TOKYO '01*, (World Scientific, Singapore, 2002), ed. Y. A. Ono and K. Fujikawa, p. 307–310

3) 学会講演

日本物理学会 第 57 回年次大会 2002 年 3 月 24 日 ~ 3 月 27 日 (立命館大学)

岡田 雄一郎, 首藤 啓, 田崎 秀一, 原山 卓久: 内部等スペクトルビリヤードの外部散乱問題

萩原 良一, 首藤 啓: エノン写像における grammatical complexity の定量化

田中篤司, 藤崎弘士, 宮寺隆之: 結合した chaos 系の entanglement と decoherence I

日本物理学会 2002 年秋季大会, 2002 年 9 月 6 日-9 日 (中部大学)

田中篤司, 藤崎弘士, 宮寺隆之: 結合した chaos 系の entanglement と decoherence II

京大基研短期研究会「量子カオス:理論と実験の現状」2002 年 9 月 9 日~9 月 11 日 (京都大学)

首藤 啓: 複素力学系と量子カオス

大西 孝明: Tunneling Mechanism due to Chaos in a Complex Phase Space

岡田 雄一郎: 等スペクトルビリヤードの散乱問題

田中篤司: Chaos 的動力学による量子論的絡みあいの生成

科研費研究会「特定領域研究 強レーザー光子場における分子制御」2002 年 10 月 15 日 (東京大学)

首藤 啓: 複素半古典理論

第 11 回 凝縮系物理 (非平衡系の統計物理) シンポジウム, 2002 年 12 月 18 日-20 日 (筑波大学)

田中篤司: Chaos 動力学による量子論的絡みあいの生成

科研費研究会「力学系理論と物質科学」2003 年 1 月 9 日~1 月 11 日 (立命館大学)

奥島 輝昭: 軌道不安定性と集団運動

大西 孝明: 複素相空間カオスによるトンネリング機構

岡田 雄一郎: 聞き分けられない太鼓の形を聞き分けるには

萩原 良一: 記号力学による馬蹄力学系の崩壊過程の表現

市来 広一郎: 内部自由度をもつ分子の等分配則とハミルトンダイナミクス

研究会「強い場における原子分子過程 – 強光子場と強クーロン場 –」2003 年 1 月 6 日~1 月 7 日

大西 孝明, 首藤 啓, 池田 研介, 高橋公也: 複素相空間カオスとトンネリング

国際会議

“Spectral theory and related questions” June 10 - June 11, 2002 (Institut Henri Poincare, France)

A. Shudo: Complex semiclassical description of quantum tunneling in the presence of chaos (invited talk)

5th International Summer School/Conference “Let’s face chaos through nonlinear dynamics”

June 30, 2002 - July 14, 2002 (Maribor, Slovenia)

A. Shudo : Quantum chaos in mixed phase space and the Julia set (invited talk)

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

Y. Okada, A. Shudo, S. Tasaki and T. Harayama : Can one determine the shape of a drum through the spectrum of the interior Dirichlet problem and the cross sections of the exterior Neumann scattering? (poster)

JST International Symposium on Control of Molecules in Intense Laser Fields

Sept. 9 - Sept. 10, 2002 (Tokyo)

A. Shudo : Chaotic tunneling : a novel aspect of quantum tunneling in the presence of chaos (invited talk)

T. Onishi, A. Shudo, K.S. Ikeda and K. Takahashi : Tunneling Mechanism due to Chaos in a Complex Phase Space (poster)

T. Okushima : Quantum effects in dynamics of polynomially interacting oscillators systems (poster)

Mini-symposium on Tunneling Ionization and Chaotic Tunneling, Sept. 12, 2002 (Tokyo)

A. Shudo : Complex classical trajectories and an aspect of quantum tunneling in the presence of chaos (invited talk)

Slovenia-Japan Seminar, Nov. 18 - Nov. 19, 2002, (Waseda)

A. Shudo: Origin of slow relaxation in liquid water dynamics (invited talk)

Atushi Tanaka: Quantum entanglement induced by chaotic dynamics

Waseda International Symposium on Fundamental Physics, Nov. 12–15, 2002 (Waseda University)

Atushi Tanaka: Adiabatic representation and the notion of subsystems in quantum theory (poster)

4) 学会誌等

首藤 啓 : 近可積分系の量子論と高次元複素力学系数理科学 **477** (2003) 35–41.

首藤 啓 : 近可積分系の量子化条件について , 数理解析研究所講究録 **1282** (2002) 156-162.

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。2002年度における研究活動の概要は次の通りである。

1) 相関関数比の有限サイズスケーリングと確率変動アルゴリズムの一般化

異なる距離の相関関数の比の有限サイズスケーリングの性質を調べ、この比が2次相転移だけでなく Kosterlitz-Thouless (KT) 転移を示す系の転移点の評価に大変良い量となっていることを明らかにした。図1に、2次元6状態クロックモデルの場合に、相関関数比とモーメント比の有限サイズスケーリングを比較し、相関関数比がKT転移を調べるのに有効であることを示す。このことを利用すると、我々の開発した転移点を自動的に決定する確率変動アルゴリズムを一般化できることを示した。すなわち、従来の手法ではクラスターの浸透の性質を利用していたので、クラスター表現のできる系に確率変動アルゴリズムの適用が限られていたが、一般化アルゴリズムではこのような制限はなく、適用範囲が大幅に広がる。例として、量子シミュレーションへの応用を試みた。具体的に、スピン $1/2$ の2次元 XY モデルに一般化確率変動アルゴリズムを適用し、KT 転移点を精度よく短時間の計算で求めることができることを示した。

2) 2次元フラストレートクロックモデルの相転移

2次元フラストレート XY モデルは、磁気的な自由度とカイラリティーの自由度の両方が相転移をするが、両者が同一の転移点で転移するか否か、またイジング的な対称性をもつカイラリティー転移の臨界現象がイジング普遍性からずれるか否か、という論争が続いている。論争に決着をつけるためには、精度の高い数値情報が望まれている。我々は、三角格子上の反強磁性6状態クロックモデルの相転移を、精度よく状態密度を求められる Wang-Landau 法を用いて調べた。このモデルの基底状態が XY モデルの基底状態と同様の状態であること、6状態クロックモデルはエネルギーがすべて $J/2$ の整数倍で表され状態密度の計算が容易であること、また、グラファイト上に吸着した CF_3Br の実験との関連が議論されていることが、このモデルを扱う積極的な理由である。磁気的 KT 転移点とカイラリティー転移点は異なること、クロックモデルの離散性のために低温でもう1回 KT 転移を起こすことなどを示した。

3) イジングスピングラスの基底状態

スピングラスの基底状態を効率よく探査することは、最適化問題の観点からも興味深い研究対象である。最近 extremal optimization (EO) とよばれる手法が有効であるとの主張がなされた。一方、状態密度を求めるモンテカルロ法であるフラットヒストグラム法や等ヒット法も基底状態探索に用いることができるので、有効性を比較検討した。EO 法は小さなサイズの系については確かに有効であるが、大きなサイズの系では等ヒット法も同程度の有効性をもつことを示した。状態密度を求めるモンテカルロ法の利点は、基底状態だけでなく熱平均量も直ちに求められることであるが、EO 法に修正を加え熱平均量を計算できるようにする方法を示した。

4) 拡張アンサンブル法とクラスターアルゴリズムを組み合わせたモンテカルロアルゴリズム

モンテカルロ法は統計物理学における数値シミュレーションの標準的手法として確立しているが、しばしば平衡への緩和が異常に遅くなるスローダイナミクスの問題に直面する。この問題を回避する手法として拡張アンサンブル法とクラスターアルゴリズムの2つのタイプの方法が成功を収めている。この両者を組み合わせる試みとして Janke-Kappler により提案された方法がある。これはクラスターアルゴリズム

ムにおけるグラフの数に関するヒストグラムに基づく方法である。我々はこの方法に、Wang-Landau の手法を導入することによってボンド数の状態密度の収束が加速することを示した。さらに、エネルギー状態密度を用いる計算に利用されてきたブロードヒストグラム関係式をボンド数の状態密度に拡張し、この関係式に基いたダイナミクスを用いて状態更新を行う新しいアルゴリズムを提唱した。この関係式の利用により精度の高い計算が可能になることを、2次元イジングモデルの比熱測定の誤差比較によって実証した。また、我々はこの方法が量子スピン系に応用可能であることを見出した。量子スピン系においては古典系と異なりエネルギーが直接サンプルされる量でないために、通常のヒストグラムに基づく拡張アンサンブル法が使えなかった。我々は量子系のクラスタルゴリズムに着目し、生成される非自明グラフ（恒等演算子に対応しないグラフ）の個数に関するヒストグラムによって拡張アンサンブル法を構成した。この方法によって従来は効率良く計算する方法がしられていなかった量子系におけるエントロピーなども計算できるようになると期待される。

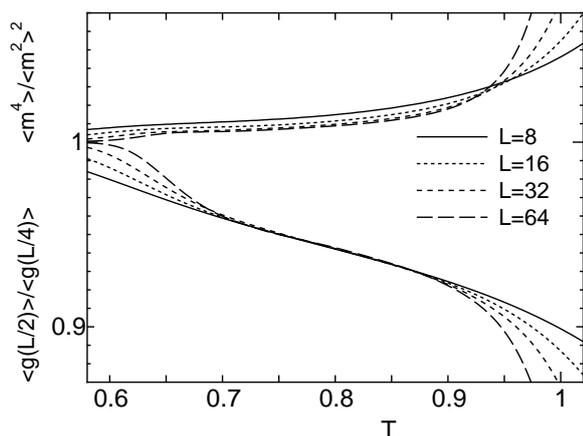


図 1: 2次元6状態クロックモデルの相関関数比 $\langle m^4 \rangle / \langle m^2 \rangle^2$ とモーメント比 $\langle g(L/2) \rangle / \langle g(L/4) \rangle$ の有限サイズスケージングの比較。

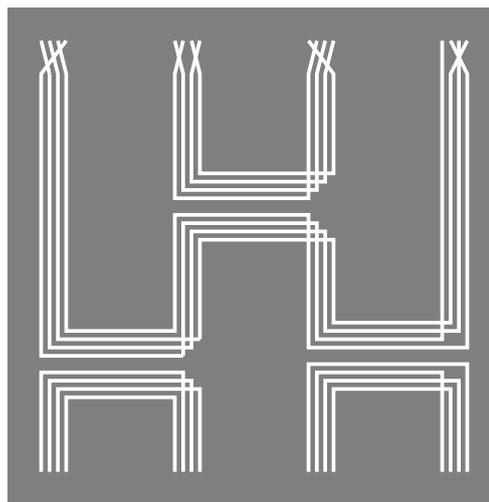


図 2: SU(4) 対称性をもった量子スピンモデルの Fortuin-Kasteleyn 表示に現れるグラフの例。図中縦軸は虚数時間、横軸は実空間に対応。

5) 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 of 効率的なシミュレーションを可能にした。これを用いて、これまででは正確な数値計算が不可能であり、おぼろげな物理的理解しか得られてこなかった種々の問題に関して、明確で新しい知見が得られつつある。たとえば、我々は通常 of 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の性質を調べた。この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。我々はこのモデルを新しく開発したクラスタ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次元以上における有限温度臨界現象の精密な計算に成功した。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 of 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(図2)。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法は非常に早く収束する

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， N が4以下のときにはネール秩序，5以上のときにはダイマー秩序が存在し，予想されていたスピン液体相が存在しないことがわかった．

6) ボーズ粒子系の新しいアルゴリズム

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

7) 自己形成型神経回路モデル

神経回路に対するニューラルネットワークモデルは単にモデルであるにとどまらず，機械学習のための実用的な手段として，すでに広く応用されている．しかし，その際にもっとも大きな問題は，与えられた学習課題に対して適当なネットワーク構造を決定する問題であり，これに関してはいままのところ一般的な処方箋が知られていない．これはネットワークの構造と学習可能性の関係の問題であり，実用上の難問であるだけでなく，人間の脳の認知機構，概念形成機構を解明する上でも重要で基礎的な問題である．我々はこの問題へのアプローチとして，従来から知られてはいたが，定量的な比較がなされてこなかった自己形成型ネットワークモデルをとりあげ，階層構造と学習性能の間の関係の定量的な測定を行った．この結果，階層数まで含めて自己形成を行うモデルが複雑な課題の学習には有利であることなどが確かめられた．

8) 1次元電子系の相構造の探求

1次元電子系にみられる臨界性は Tomonaga-Luttinger(TL) 液体としての振舞いを広く示す．そこでは電子のスピンおよび電荷の自由度が分離しており，お互いにあたかも独立に振舞っているように見える．近年この固定点およびその近傍にある系に対する理解の進歩により，その基底状態および低エネルギー領域での性質を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有限系の数値的データを，くりこみ群および共形場理論をもとに解析することで，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する極めて精密な情報が得られるようになっている．我々は，最近強相関電子系に見られる様々な交代摂動の基底状態に与える効果を調べているが，そこでは電子相関により一旦は分離していた2つの自由度の再結合がおり，それらの間のインタープレイが見られる：一例として、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レレバントであるが、電子系では、スピンの自由度と共に電荷分布の情報も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，具体的なモデルに対する数値計算を通してボンドスピン密度波相の安定領域を定量的に決定した．また交代化学ポテンシャルの効果は、電子有機物質 TTF-Chloranil や強誘電体遷移金属酸化物 BaTiO_3 などの研究において、Mott 絶縁体に対するイオン性の影響を調べる目的で議論されて来たが、これに対しても現在モデル計算を進めている．

9) フラストレートした量子スピン鎖におけるクロスオーバー現象

$S = 1/2$ 反強磁性スピン鎖は最も基本的な1次元量子臨界系のモデルである．この臨界性に対してフラストレーションは、それが十分弱い場合イレレバントであり、系はガウシアン固定点により記述されるが、閾値を越えるとイレレバントとなりダイマーギャップをもたらす．一方、最近注目されている有機化合物：Cu-Benzoate、無機化合物： Yb_4As_3 など磁場誘起ギャップ系にみられる交代磁場は、そのエネルギースケールの小ささ故、必ずイレレバントとなりギャップをもたらす．これら2つの摂動は、そのどち

らかが単独で作用した場合ガウシアン臨界性は破壊されてしまうが、しかしそれらはお互いに競合関係にあることから、ある与えられたフラストレーションの強さに対し適度な交代磁場 (h^*) を与えることにより、臨界性を回復させることが出来る。このようにして得られた量子スピン鎖は $c = 1$ と $1/2$ を繋ぐ、くりこみフロー上にあると考えられ、従ってその臨界性は2次元イジング模型のユニバーサリティークラスに属することが予想される。我々は厳密対角化法を用いて、まず h^* を決めることによりこの模型の基底状態における相構造を解明した。相境界線はガウシアン固定点近傍にて有効なクロスオーバー議論より得られる理論的予想と一致する一方、フラストレーションが強い領域では、セントラルチャージを数値的に評価することにより相境界のイジング的臨界性を直接検証することができた。また相境界近傍でのスピギャップに対する有限サイズスケリングの手法を用いた解析から、交代磁場が2次元イジング模型におけるエネルギーオペレータの役目を果たし、その結果として臨界的降るまいが指数 $\nu = 1$ の相関長の発散により特徴付けられることが明らかになった。

2. 研究業績

1) 論文

Y. Tomita and Y. Okabe: Finite-size Scaling of Correlation Ratio and Generalized Scheme for the Probability-Changing Cluster Algorithm, *Phys. Rev. B* **66** (2002) 180401(R)-(1-4).

C. Yamaguchi, N. Kawashima and Y. Okabe: Broad histogram relation for the bond number and its applications, *Phys. Rev. E* **66** (2002) 036704-(1-7).

Y. Okabe, Y. Tomita and C. Yamaguchi: Application of new Monte Carlo algorithms to random spin systems, *Comp. Phys. Commun.* **146** (2002) 63-68.

Y. Tomita and Y. Okabe: Probability-Changing Cluster Algorithm: Study of Three-Dimensional Ising and Percolation Models, *J. Phys. Soc. Jpn.* **71** (2002) 1570-1575.

Y. Tomita and Y. Okabe: Probability-Changing Cluster Algorithm for Two-Dimensional XY and Clock Models, *Phys. Rev. B* **65** (2002) 184405-(1-5).

Kenji Harada, Naoki Kawashima and Matthias Troyer: Neel and Spin-Peierls ground states of two-dimensional $SU(N)$ quantum antiferromagnets, *Phys. Rev. Lett.* **90** (2003) 117203-117206.

Kenji Harada and Naoki Kawashima: Coarse-grained loop algorithms for Monte Carlo simulation of quantum spin systems, *Phys. Rev. E* **66** (2002) 056705-056716.

Chiaki Yamaguchi and Naoki Kawashima: Combination of improved multibondic method and the Wang-Landau method, *Phys. Rev. E* **65** (2002) 056710-056716.

H. Otsuka: Crossover behavior of the J_1 - J_2 model in a staggered magnetic field, *Phys. Rev. B* **66** (2002) 172411-172414.

2) 国際会議報告

Y. Okabe, Y. Tomita and C. Yamaguchi: Applications of the Probability-Changing Cluster Algorithm and Related Problems, in *Computer Simulation Studies in Condensed Matter Physics XIV*, Eds. D. P. Landau, S. P. Lewis, and H. B. Shüttler (Springer Verlag, Heidelberg, Berlin, 2002) p. 140-153.

Naoki Kawashima: Quantum Monte Carlo Methods, Progress of Theoretical Physics Supplement (proceedings of "Order and Disorder in Quantum Spin Systems"), eds T.Tonegawa, S.Miyashita and H.Takayama **145** (2002) 138-149.

Kenji Harada and Naoki Kawashima: Quadrupolar order in the Quantum XY model with cubic anisotropy, Progress of Theoretical Physics Supplement (proceedings of "Order and Disorder in Quantum Spin Systems"), eds T.Tonegawa, S.Miyashita and H.Takayama **145** (2002) 194-199.

3) 学会講演

日本物理学会第57回年次大会 2001年3月24日～3月27日(立命館大学)

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 $S=1/2$ 次元 XY model の解析

岡部豊, 富田裕介: 相関比の有限サイズスケーリングと確率変動アルゴリズムの一般化

山口智明, 川島直輝, 岡部豊: ポテンシャルムーブを用いたクラスターアルゴリズム

Tasrief Surungan, 富田裕介, 岡部豊: Study of the fully-frustrated clock model by Wang-Landau algorithm

岩松雅夫, 岡部豊: 共進化型大域的最適化アルゴリズムによるクラスター構造の決定

川島直輝, 原田健自, C. Batista, J. Gubernatis: 1次元 bilinear-biquadratic モデルにおける Chubukov 相の有無

原田健自, 川島直輝: 高い対称性をもつ量子スピンモデルのモンテカルロシミュレーション

鈴木基文, 川島直輝: 複合ルールの学習によるニューロンの分化

大塚博巳: 交代磁場中のボンドスピン密度波相の安定性について

日本物理学会2002年秋季大会 2002年9月6日～9月9日(中部大学)

富田裕介, 岡部豊: Fully Frustrated XY model への確率変動アルゴリズムの適用と解析

Tasrief Surungan, 富田裕介, 岡部豊: Critical properties of the fully-frustrated clock models

原田健自, 川島直輝: 量子モンテカルロ法のためのワームアルゴリズムとループアルゴリズム

鈴木基文, 小松三佐子, 川島直輝: 自己形成型ニューラルネットワークにおける層数可変型と二層固定型の比較

大塚博巳: 交代ポテンシャル中の1次元絶縁体の相構造

京大基研研究会「新奇的な秩序を持つ系での相転移」 2002年6月10日～6月12日
(京都大学基礎物理学研究所)

岡部豊, 富田裕介, Tasrief Surungan: ベクトル秩序パラメータをもつ系への新しいアルゴリズムの応用

山口智明, 川島直輝, 岡部豊: マルチボンディック法について

川島直輝: スピン演算子に関して4次以上の項を含むモデルのモンテカルロシミュレーション

物性研短期研究会「物性研究における計算物理」 2002年11月6日～11月8日

(東京大学物性研究所)

富田裕介, 岡部豊: 確率変動クラスターアルゴリズムとその応用

国際会議

StatPhys-Taiwan-2002: LATTICE MODELS AND COMPLEX SYSTEMS, Taipei, Taiwan,
May 25 - June 1, 2002

Y. Okabe, Y. Tomita and C. Yamaguchi: Novel Monte Carlo algorithms and their applications (invited)

Conference on Computational Physics 2002, San Diego, California, USA, August 25-28, 2002

Y. Okabe and Y. Tomita: Generalized scheme for the probability-changing cluster algorithm and application to quantum Monte Carlo simulation

C. Yamaguchi, N. Kawashima and Y. Okabe: Broad histogram relation for the bond number and flat histogram method

5th International Conference on Monte Carlo and Quasi-Monte Carlo Methods in Scientific
Computing, Singapore, November 25 - 28, 2002

Y. Okabe: Application of the Monte Carlo methods to compute the density of states (invited)

16th Annual Workshop on Recent Developments in Computer Simulation Studies
in Condensed Matter Physics, Georgia, U.S.A, February 24-28, 2003

Y. Tomita and Y. Okabe: Generalized Probability-Changing Algorithm

APS March Meeting, Austin, Texas, U.S.A, March 3-6, 2003

N. Kawashima: Large Spins and High Order Interactions (invited)

J. Smakov, K. Harada and N. Kawashima: Quantum Monte Carlo algorithm for soft-core bosons

The 23rd International Conference on Low Temperature Physics
Hiroshima, August 20 - 27 2002

Hiromi Otsuka: Bond Spin-Density-Wave Phase in the Staggered Magnetic Field

4) 著書等

岡部豊, 堂寺知成: 「新訂 エネルギーと熱」放送大学教育振興会

固体電子理論研究室

1. 研究活動の概要

本研究室は、固体の示す磁気や、電気、光学的等、様々な物性のなかから興味深いものを取り上げ、その起源や機構を電子論の立場から解明することを目的として研究を行っている。現在は多重極転移、量子ドットにおけるトンネル効果、光誘起磁気相転移等をテーマとしている。

1) 多重極秩序の理論

近年、重い電子系の複雑な秩序相に関する研究の進展とともに、f 電子のもつ多重極自由度への関心が高まっている。我々は、四重極相転移を示す典型物質 CeB_6 、 TmTe に着目し、その磁気相図と異常物性の微視的起源の解明に取り組んでいる。そのほか、興味ある磁気励起スペクトルを示す Yb_4As_3 なども対象としている。

A) 多重極ゆらぎの解析：

実験との定量的比較を視野に入れ、現実的な相互作用に基づく多重極揺らぎの解析を行ってきた。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有効模型について計算した。磁場に依存した大きな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。弱磁場領域での実験との定量的比較に基づいて、高磁場領域の相図の形状と磁場異方性について詳しく調べた。その結果は、ごく最近の高磁場実験とよく一致することが示されている。[椎名、酒井、斯波 (神戸大)]

B) 多重極励起と中性子散乱の理論：

多重極励起と動力学を多重極モーメントのボソン展開の方法で調べた。展開係数の対称性の解析から励起の選択則を明かにし、多くの励起モードが磁気二重極ゆらぎをともなうこと、それゆえに中性子散乱により観測可能であることを示した。現実的な多重極相互作用から中性子散乱スペクトルを計算した。通常の磁気励起に対応する低エネルギーの顕著なピークに加えて、八重極振動をともなうモードが高エネルギー領域に局在し、小さなピークをもたらしことを示した。これらの特徴およびその運動量依存性が、実験結果と半定量的に一致することを示した。[椎名、酒井、斯波]

C) 多重項相互作用の一般形と、その反強的多重極秩序変数同定への応用：

反強的多重極秩序は、最近、隠れた秩序としての重要性が認識されてきたことから分かるように、直接的観測が難しい。一方、磁気双極子秩序である反強磁性秩序を中性子回折の方法により同定する方法は確立している。反強 4 重極秩序状態に磁場を印可すると、反強磁性磁気モーメントが誘起される。これを観測することにより、反強 4 重極秩序パラメータを同定することは、 CeB_6 の研究で重要な役割を果たし、その後の TmTe の研究をとうして有効性が示され、現在はひとつの標準的手段となって来ている。椎名等により、如何なる 4 重極に如何なる方向の磁場をかけたとき、如何なる反強磁性磁気モーメントが誘起されるかを群論的に求めたテーブルがつくられ、有用な役割を果たした。しかし、 TmTe において、実験結果との若干のずれも生じている。椎名等のテーブルは、s.c. 格子の波数 $(1/2, 1/2, 1/2)$ の秩序に対応して作られたもので、同じ波数ではあるが f.c.c. 格子の TmTe への適用には注意が必要である。一般の波数にたいして椎名等のテーブルに対応するものを、作ることは、多重極相互作用の一般形を求めることに帰着出来ること、これを求めるにはタイトバインディング模型のバンド計算の知識を援用出来ることを示した。これにより、s.c.、f.c.c.、b.c.c. 格子の一般の波数にたいする解析を可能にした。 TmTe の実験の解釈、Pr スクッテルタイトの多様な多重極秩序同定や、 NpO_2 への適用を行った。[酒井、椎名、斯波]

D) Yb_4As_3 の磁気励起 :

Yb_4As_3 は、3 次元的構造を取るにもかかわらず、その磁気励起スペクトルが、1 次元鎖上の等方的ハイゼンベルグ交換模型的な特徴を持つことが知られている。しかし、鎖の方向を基準にすると、静的な磁気異方性は極めて大きい。以前の研究において、 Yb_4As_3 は磁気異方性は大きいにもかかわらず、励起スペクトルは本質的に等方的相互作用で現される性質を持ち得ることを示した。本研究では、そのようなモデルに基づき、磁気励起スペクトルの精密な計算を行った。[斯波、酒井]

2) 磁気秩序状態にある物質のバンド理論的計算

A) CeSb の磁気構造の起源と磁気光効果 :

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

B) バンド計算による磁気構造因子の計算 :

希土類やウラン化合物の磁気モーメントには軌道角運動量からの寄与が大きい。しかし磁性を担う電子が遍歴性を帯び、バンド電子となると、軌道磁気モーメントの計算は難しくなり、バンド理論の立場から統一した計算はまだ行われていない。このような理論の定式化、およびそれに基づき、実際のバンド計算から磁気構造因子を理論的に計算することを行っている。[酒井、金田 (東大)]

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。磁性スピンと伝導電子の相互作用による現象は、近藤効果と呼ばれ、興味を持たれて来た。近藤効果のあらわれて来る低温で、トンネル効果がどのような振舞いを示すか、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、数値繰り込み群や量子モンテカルロ法など、計算物理学的方法に基づく計算手法を開発して、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。量子ドット系は様々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、また、特徴的振舞い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とがある。これに伴う電子の軌道占有状態の急激な再配列が起き、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著しい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

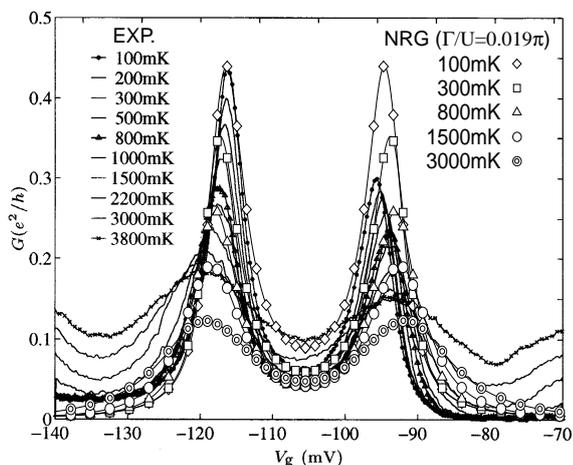


図 1: トンネル伝導度のゲート電圧依存性。横軸がゲート電圧、縦軸は伝導度、様々な温度の場合を示す。低温になると、伝導度が増大する。数値線り込み群法により求めた結果(マーク)と、Goldharber-Gordon 等 (Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 5225) による実験の比較

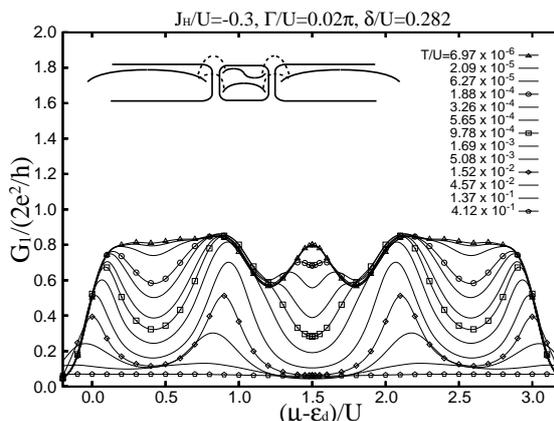


図 2: スピントロニック領域の異常。ゲート電圧が 1.5 ではドット上の電子数は 2 個である。この領域では高温で存在しなかったピークが低温で育ってくる点が、左図と較べて異っている。実験でも同様な特徴が見出された。

の相転移が発生している。このような系の代表物質のひとつである鉄ピコリルアミン錯体の低スピン高スピン転移を、モンテカルロ法を発展させた方法により調べた。この転移はドメイン形成を伴い、一見、温度誘起の 1 次相転移に似た振舞を示すが、実際は極低温でおきている現象である。類似性と差異を明かにする観点からの研究を行った。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、上羽、小川 (大阪大)]

5) 磁性半導体の磁気転移および伝導の理論

磁性を持ったイオンが半導体中に存在する系が、注目されている。GaAs に Mn をドーブした系等である。キャリア (以後、電子と呼ぶ) 媒介の磁性イオン間相互作用の標準模型に RKKY 相互作用があるが、これは電子系のフェルミエネルギーが電子と磁性イオンの交換相互作用に較べ充分大きいということを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。以前の研究で、電子系にたいする数値的対角化を行い、その自由エネルギーをスピン系の系エネルギーとしてモンテカルロシミュレーションを実行することにより、信頼できる結果を導く方法を発展させた。しかし、電子系の対角化に時間がかかることから、希薄スピンの大きな系への適用は出来なかった。電子系の対角化のかわりに、ハミルトニアンを Chebyshev 多項式を利用する方法を発展させ、並列化により計算を高速化して希薄系へ適用する準備を進めた。[酒井、牧野、大河内、森下]

6) 光電子分光の解析

以前にパッケージとして開発した、レゾルベント法によるプログラムにより、実験家と共同で希土類化合物の光電効果の解析を行った。本年は、以前の Ce イオン系ばかりではなく、Yb 系への適用へ範囲を

拡げた。[岡根(原研)、酒井、谷口]

2. 研究業績

1) 論文

R. Shiina: Theory of Field-Dependent Multipolar Fluctuation in CeB_6 , J. Phys. Soc. Jpn. **71** (2002) Suppl.56.

R. Shiina: Remark on High-Field Phase Diagram of CeB_6 , J. Phys. Soc. Jpn. **71** (2002) 2257-2262.

R. Shiina: Ordering and Fluctuation of Quantum Multipoles in CeB_6 , Acta Physica Polonica B34 (2003) 1089-1092

T. Okane, S. Fujimori, A. Ino, A. Fujimori, S. K. Dhar, C. Mitra, P. Manfrinetti, A. Plalenzona, and Osamu Sakai: Photoemission Study of $\text{Yb}_2\text{Co}_3\text{X}_9$ ($X = \text{Ga}, \text{Al}$): Variation of the Electronic Structure from Mixed-Valent to Kondo-Lattice Systems
Phys. Rev. B **65** (2002) 125102-1-7.

F. Ishiyama and O. Sakai: Double Layer Structure and Optical Conductivity of CeSb
J. Phys. Soc. Jpn. **71** Suppl. (2002) 294-296.

H. Shiba, K. Ueda, O. Sakai and S. Qin: Theory of Field-induced Gap Formation in Charge-Ordered Yb_4As_3
Physica B **312–313** (2002) 309-313.

O. Sakai, M. Ishii, T. Ogawa and K. Koshino: Monte Carlo Simulation for the Macroscopic Phase Separation in Photo-induced Low-spin to High-spin State Transition
J. Phys. Soc. Jpn. **71** (2002) 2052–2060.

S. Kimura, M. Okuno, H. Iwata, H. Kitazawa, G. Kido, F. Ishiyama and O. Sakai: Optical and Magneto-Optical Studies on Electronic Structure of CeSb in the Magnetically Ordered States
J. Phys. Soc. Jpn. **71** (2002) 2200-2207.

O. Sakai, T. Ogawa and K. Koshino: Monte Carlo Simulation Study on Domain Formation in the Photo-induced Low-spin High-spin Transition
Phase Transitions **75** (2003) 743–751.

2) 学会講演

日本物理学会 2002 年秋期大会 2002 年 9 月 6 日～9 月 9 日 (中部大学)

椎名亮輔、斯波弘行、Peter Thalmeier、高橋篤、酒井治: CeB_6 における多重極励起と中性子散乱の理論

酒井治、金田保則: CeB_6 のエネルギーバンド構造とスピン分極の空間分布

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

酒井治、椎名亮輔、斯波弘行: 多重極相互作用の不変形式とその誘起反強磁性磁化解析による反強四重極秩序同定への応用

金田保則、酒井治: CeB_6 のエネルギーバンド構造と磁氣的秩序状態

国際会議

International Conference on Strongly Correlated Electron Systems
(SCES'02), July 10-15, 2002, Krakow, Poland

R. Shiina: Ordering and Fluctuation of Quantum Multipoles in CeB₆

Advances in the Physics of f-electron Systems, November 12-14, 2002, Tokai, Japan

R. Shiina, H. Shiba, P. Thalmeier, A. Takahashi and O. Sakai: Theory of Multipolar Excitations and Neutron Scattering in CeB₆

Workshop on Orbital Ordering and Fluctuations in d- and f-electron Systems, February
17-19, 2003, Tokai, Japan

R. Shiina, O. Sakai, H. Shiba and P. Thalmeier: Analysis of Ce Magnetic Form Factor in Quadrupolar Ordering Phase of CeB₆

Workshop on Transport and Thermal Properties of Advanced Materials, Higashi-Hiroshima,
August, 16-19 2002

O. Sakai and W. Izumida: Study on the Kondo Effect in the Tunneling Phenomena through a Quantum Dot

The 23rd International Conference on Low Temperature Physics, August 20-27, 2002, Hiroshima,
Japan

O. Sakai, R. Shiina and H. Shiba: Possible Form of Multi-polar Interaction in Cubic Lattice

高エネルギー実験研究室

1. 研究活動の概要

本研究室では、2002年4月に住吉孝行教授が着任し、現在日本が世界をリードしている B ファクトリーを用いた粒子・反粒子対称性の破れの研究が柱の1つとして加わり、益々活発かつ多様な研究が行われるようになった。12月には、五十子満大助手が退官した。

1) 衝突型加速器実験

B ファクトリー実験 (Belle)

当研究室は、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の非対称エネルギー電子・陽電子衝突型加速器 (B ファクトリー) を用いた素粒子実験グループ (Belle) に参加し、 B 中間子系における粒子・反粒子対称性 (CP 対称性) の破れの研究を行っている。昨年度 Belle グループは新たに約 60/fb のデータを蓄積し、これまでの2倍のデータ量となった。総計1億4000万事象に及ぶ B ・反 B 中間子対を観測したことになる。これらの大量のデータの解析から、昨年度、世界で初めて $B \rightarrow \pi\pi$ 崩壊過程における直接的な CP 対称性の破れの観測に成功した。

昨年度 Belle グループは35編のジャーナルへの投稿論文と50編以上の国際会議への Contribution Paper を発表している。それらの何れもが、世界初またはこれまでのデータを大きく改善した物である。特に都立大学グループは片方の B 中間子を完全に再構成することによって、バックグラウンドのない高純度の B 中間子の崩壊現象を研究している。これは、素粒子物理学の標準モデルの中に現れる重要なパラメーターである CKM 行列の行列要素を正確に決定するための有効な手段を提供する。

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

電子-陽子衝突型加速器 HERA による ZEUS 国際共同研究

HERA 加速器は改造を行って、これまでの5倍以上にルミノシティを増大し、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った。これにより今までに比べて格段に良い精度で、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%以下の精度で決定することが必要である。

これまでの偏極度測定精度の限界を与えていた原因を詳細に検討した結果、カロリメーターによる線の位置決定精度であることが判明したため。カロリメーター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。また、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。

HERA の運転が再開され、偏極度測定装置により測定データを取得した。2002年9月の HERA の運転では電子ビームを偏極させなかったが、データを解析して、シリコンマイクロストリップ検出器で線の上下位置を計測し、これとカロリメーターで得られたエネルギーの上下非対称性パラメータの相関を得ることができた。この関係式をもとに実験条件を取り入れたシミュレーションを行って電子ビームの偏極度を100%としたときの非対称度を求めて、期待どおりに偏極度測定装置が動作していることを確認した。2003年3月の運転では、電子ビームの偏極度の調整が行われて、偏極度測定装置による測定で偏極度が50%という結果が得られた。これは、HERA の偏極電子ビームの目標値である。今後は得られた測定値が絶対値でどこまで正しいかの詳細な検討を行う予定である。

2) 将来加速器の研究

2012年実験開始を目標としている電子-陽電子リニアークライダー・GLC (Global Linear Collider: JLC から改称) をはじめとする将来の加速器に用いられる加速器技術に関する様々な研究を行っている。

レーザーコンプトン散乱による偏極陽電子の生成

GLCにおいて、電子と共に陽電子ビームを偏極させれば、標準理論の精密検証および標準理論を超える新しい現象の探求に重要な役割を果たす。都立大学・KEK・早稲田大学の共同研究グループは、偏極陽電子の生成法として、レーザーコンプトン散乱による新しい方法を提案し、KEKの加速器試験施設(ATF)において、一連の基礎実験を進めてきた。円偏光させたYAGレーザー2倍高調波(波長532nm)をATFダンピングリングからの電子ビーム(1.26GeV)によって後方コンプトン散乱させると、散乱線はそのエネルギーに依存した偏極度をもつ。これを金属の薄膜ターゲットに当て、対生成した陽電子の高運動量側をとることにより、偏極陽電子を発生させることができる。

今までは、焦点距離15cmでレーザーを集光していたが、新たに400cmの長焦点チェンバーを製作し、生成線の強度を約10倍($1.1 \times 10^6 \gamma/\text{パルス}$)に高めることに成功した。

磁化させた鉄ターゲットに偏極線を入射し、ターゲット中の電子を線入射方向と平行・反平行にした時に、コンプトン散乱断面積の違いにより線透過率が非対称となることを利用した線偏極度測定装置を製作し、レーザーコンプトン散乱によって生成した線が偏極していることを確認した。現在は、同様に鉄ターゲット透過率のスピンの非対称性を利用した陽電子の偏極度測定装置を製作している。

レーザーコンプトン散乱による高輝度X線の生成

日米科学技術協力事業として、ブルックヘブン国立研究所(BNL)において、レーザーコンプトン散乱を利用した高輝度X線生成実験を行っている。KEKの実験との違いは、炭酸ガスウ課璽供次頁板 $10.6 \mu\text{m}$ と60MeVの電子ビームを用いるため、生成光子は最高エネルギー6.5keVのX線となる。この手法は、放射光X線に代わる次世代の高輝度X線源として、広範な研究領域への応用が期待されている。現在まで、14GWのレーザーにより、世界最高強度のX線($1.7 \times 10^8/\text{パルス}$)の生成に成功している。2002年度は、新しい増幅器の追加によるレーザーの短パルス・大パワー化の改良を行った。現在、調整中であるが、ピーク・パワーを1TWに向上させることを目標としている。これが実現すれば、レーザーの高密度電磁場による、電磁相互作用の非線形効果の観測が期待される。非線形効果観測のために、シリコン/モリブデンの人工多層膜とCCDを利用した2次元X線検出器を用いたX線のエネルギー・角度分布をワン・ショットで測定可能なスペクトロメーターを製作した。

レーザー光と電子ビームの衝突距離は、Rayleigh長でmm程度に制限される。プラズマを光ファイバーのように用いてレーザーを焦点程度に絞ったまま数cm輸送(プラズマ・チャンネル)できれば、レーザーの強度を上げなくても生成X線強度を増大させることができる。2002年度は、電子ビームがプラズマ・チャンネル中を通過する時に、どのような影響を受けるかを観測した。この結果、プラズマ航跡場によって、電子ビームが35MeV/mという高い勾配で加速されていることを確認した。これは実験の副産物であるが、超小型高エネルギーの加速器を可能とする技術を検証することができた。

単結晶を用いた陽電子源の開発

GLCや次世代Bファクトリーでは、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。標的に単結晶を用いると電子ビームが結晶軸に対して小さい角度で入射する時、電子が周期的な結晶電場(実効的に10TV/m)により結晶軸の周りを蛇行する。このとき電子の蛇行運動による放射、すなわちチャンネルリング放射の放射強度は非結晶標的からの制動放射(ベータ・ハイトラ過程)を大きく上回る。本研究の目的は、単結晶を標的に使用して陽電子の生成効率をあげることによって既存の方式の限界を超える陽電子源を開発することである。現在まで、KEK-8GeVLinacを用

いてタングステン単結晶および非結晶との組み合わせによる陽電子生成実験による実験を行ってきた。

これらの実験に引き続き、2002年度は、低Zの結晶標的（ダイヤモンド、シリコン）を用いた実験を行った。ダイヤモンドは古くからチャネリング実験や Coherent Bremsstrahlung 実験に用いられて、チャネリング放射体としての優位性は良く知られており、また低Zであるため熱負荷や放射線損傷への耐性は高い。陽電子コンバーターとしての非晶質タングステンとの組み合わせにより高い陽電子生成効率を実証することができれば、陽電子源としての実用化へ道を拓く点で意義は大きい。ダイヤモンド標的として厚さが約5mmの天然ダイヤモンドを入手した。その他、2.5, 10, 30, 50mmのシリコン結晶を用いた。予備的な結果ではあるが、5mmのダイヤモンドではエンハンスメントファクターは21であった。この数値はこれまでに行ってきた結晶標的による陽電子生成実験で観測された最大値である。その他、3mmか15mmまで3mmおきに厚さを変えた非結晶タングステンを結晶標的の後ろに置いて陽電子生成率の測定をおこなっている。シリコン単結晶についても同様のデータを得ており、データ解析が進行中である。

回折放射によるビーム診断法の開発

次世代加速器で使用される高品質電子ビームのサイズと位置を高い精度で制御し、その特性を診断するためには、非破壊的な電子ビーム診断法の開発が進められなければならない。

可視光域回折輻射（ODR）は相対論的な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、標的からの影響をごくわずかしか受けない。そのため、ODRは非破壊的かつ即時的な電子ビーム診断法として非常に有望視されており、金属薄板に開けたスリット孔をターゲットとして、ビーム断面のサイズ、位置や方向を計測する方法が提案されている。ODRによるビーム診断では、可視光域の計測を行うため、多様な光学機器を組み合わせることが出来るという利点もある。

KEK-ATFの電子ビーム取り出しラインにODRの測定装置を設置し、エネルギー1.28 GeV、繰り返し1.56Hz、バンチ当たり 7×10^9 個の電子ビームを用いて実験を行った。ターゲットを移動させながら、光電子増倍管からの信号を計測した。ターゲットをビームが通過している時には可視光域遷移輻射（OTR）による光信号が観測され、さらにターゲットが電子ビームと衝突しない位置で光の放出を観測した。ターゲット端の影響を取り入れたOTRとODRの理論計算と実験結果を比較したところ、衝突係数の広い範囲で良い一致を示した。このことから、本実験で観測した光はODRであると断定した。これは非干渉ODRの観測としては世界で初めてのものである。光電子増倍管とその前に置かれたスリットをImage Intensified CCD Camera（ICCD）で置き換えて光信号を計測した結果、ビームバンチ毎に2次元の角度分布を測定することができた。得られた角度分布を光電子増倍管を用いた結果と比較したところ、良い一致が見られた。

3) 陽電子物理実験

ポジトロニウムの4光子、5光子崩壊過程の測定

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。ポジトロニウムの4光子、5光子消滅過程の我々の測定結果をさらに高統計且つ高精度で測定を行う為の検出装置の大立体角化を図った。測定装置は30本のNaI(Tl)線検出器からなり、それぞれは測定装置中心のポジトロニウム生成ターゲットを向いている。それらの測定装置中心からの距離を262mmから144mmに近づけた。検出効率は4光子、5光子消滅過程においてそれぞれ76、214倍の増加となる。検出器外部に線源を設置し、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によりバックグラウンドの減少させてこの大立体角化が可能となった。その装置で予備的な実験を行った。

ポジトロニウムのレーザー冷却

ポジトロニウムをレーザー冷却によって、絶対温度1度以下に冷却し、ボーズ・アインシュタイン凝縮を起こさせることを最終目的とした実験を、RI棟に設置された陽電子ビーム生成装置を用いて行っている。ポジトロニウムは放射線源 ^{22}Na の β^+ 崩壊によって生成された陽電子ビームを金属ターゲットに照射することによって得られるが、レーザー冷却を行うためには、レーザー・パルスと同期したタイミングでパルス化された陽電子ビームによってポジトロニウムを生成する必要がある。

パルス化陽電子によるポジトロニウム生成で、常に問題となるのは、ターゲットで反射した陽電子がビーム・ライン上流に逆向し、もう一度ターゲットに向かうことによって、生成時間が遅れたポジトロニウムがバックグラウンドになることである。これを改善するため、パルス引き出し時間に同期させてゲートを開閉し、ターゲットで反射した陽電子が再入射できない機構を開発した。この装置によって、ポジトロニウムの生成・崩壊時間に関する実験の精度を上げることが可能となった。

4) 超高エネルギーニュートリノ検出器の基礎研究

GZK過程や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} 電子ボルト以上)を検出することを目的としている。人工的な加速器では得ることが出来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、他の観測手段では得られない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、巨大な質量ギガトン以上($1\text{km} \times 1\text{km} \times 1\text{km}$ 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電磁シャワー中に多数の过剩電子が発生し、それらが干渉性チェレンコフ効果(アスカラヤン効果)により電波を発生することが予測される。電波は岩塩中を減衰せずに長距離を伝搬するならば比較的少数の電波検出器で巨大な質量の媒質を利用出来る。岩塩鉱の岩塩試料を入手し1、10GHzで撮動空洞共振器法で複素誘電率の測定を行った。良好な試料では複素部と実部の比に周波数依存性がないと仮定すると、100MHzで1km近い減衰長が得られ、岩塩鉱が超高エネルギーニュートリノ検出器の巨大媒質となる可能性が示された。電子加速器ビームによる岩塩におけるアスカラヤン効果実験は実験装置の周囲に電波吸収体を設置して不要信号除去を進めた。

2. 研究業績

1) 論文

Belle Collaboration; K.Abe *et al.*: Study of time-dependent CP -violating asymmetries in $b \rightarrow sq\bar{q}$ decays, Phys. Rev. **D67** (2003) 031102(R)

Belle Collaboration; P.Krokovny *et al.*: Observation of $\bar{B}^0 \rightarrow D^0 \bar{K}^0$ and $\bar{B}^0 \rightarrow D^0 \bar{K}^{*0}$ Decays, Phys. Rev. Lett **90** (2003) 141802

Belle Collaboration; N.Gabyshev *et al.*: Observation of the Decay $\bar{B}^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{p}$, Phys. Rev. Lett **90** (2003) 121802

Belle Collaboration; N.C. Hasting *et al.*: Studies of $B^0 - \bar{B}^0$ mixing properties with inclusive dilepton events, Phys. Rev. **D67** (2003) 052004

Belle Collaboration; K. Abe *et al.*: Measurement of branching fractions and charge asymmetries for two-body B Meson Decays with charmonium, Phys. Rev. **D67** (2003) 032003

Belle Collaboration; A. Satpathy *et al.*: Study of $\bar{B}^0 \rightarrow D^{(*)0}\pi^+\pi^-$ Decays, Phys. Lett. **B553** (2003) 159–166

Belle Collaboration; K. Inami *et al.*: Search for the electronic dipole moment of the τ lepton, Phys. Lett. **B551** (2003) 16–26

Belle Collaboration; K. Abe *et al.*: Measurement of the inclusive semileptonic branching fraction of B mesons and $|V_{cb}|$, Phys. Lett. **B547** (2002) 181–192

Belle Collaboration; F. Fang *et al.*: Measurement of Branching Fractions for $B \rightarrow \eta_C K^{(*)}$ Decays, Phys. Rev. Lett. **90** (2003) 071801

Belle Collaboration; N. Gabyshev *et al.*: Study of exclusive B decays to charmed baryons, Phys. Rev. **D66** (2002) 091102(R)

Belle Collaboration; B.C.K. Casey *et al.*: Charmless hadronic two-body B meson decays, Phys. Rev. **D66** (2002) 092002

Belle Collaboration; J. Kaneko *et al.*: Measurement of the Electroweak Penguin Process $B \rightarrow X_s l^+ l^-$, Phys. Rev. Lett. **90** (2003) 021801

Belle Collaboration; K. Abe *et al.*: Improved measurement of mixing-induced CP violation in the neutral B meson system, Phys. Rev. **D66** (2002) 071102(R)

Belle Collaboration; P. Krikovny *et al.*: Observation of $D_s^+ K^-$ and Evidence for $D_s^+ \pi^-$ Final States in Neutral B Decays, Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 231804

Belle Collaboration; K.F. Chen *et al.*: Measurement of CP -violating parameters in $B \rightarrow \eta' K$ decays, Phys. Lett. **B546** (2002) 196–205

Belle Collaboration; A. Drutskoy *et al.*: Observation of $B \rightarrow D^{(*)} K^- K^{0(*)}$ decays, Phys. Lett. **B542** (2002) 171–182

Belle Collaboration; K. Hara *et al.*: Measurement of the $B^0 - \bar{B}^0$ Mixing Parameter Δm_d using Semileptonic B^0 Decays, Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 25183

Belle Collaboration; T. Tomura *et al.*: Measurement of the oscillation frequency for $B^0 - \bar{B}^0$ mixing using hadronic B^0 decays, Phys. Lett. **B542** (2002) 207–215

Belle Collaboration; R.-S. Lu *et al.*: Observation of $B^\pm \rightarrow \omega K^\pm$ Decay, Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 191801

Belle Collaboration; K. Abe *et al.*: Studies of the Decay $B^\pm \rightarrow D_{CP} K^\pm$, Phys. Rev. Lett. **90** (2003) 131803

Belle Collaboration; A. Gordon *et al.*: Study of $B \rightarrow \rho\pi$ decays at Belle, Phys. Lett. **B542** (2002) 183–192

Belle Collaboration; K. Abe *et al.*: Observation of the Decay $B^0 \rightarrow D^\pm D^{*\mp}$, Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 122001

Belle Collaboration; K. Abe *et al.*: Observation of Double $c\bar{c}$ Production in e^+e^- Annihilation at $\sqrt{s} \approx 10.6$ GeV, Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 142001

Belle Collaboration; S.-K. Choi *et al.*: Observation of the $\eta_C(2S)$ in Exclusive $B \rightarrow KK_S K^- \pi^+$ Decays, Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 102001

Belle Collaboration; K. Abe *et al.*: Measurement of χ_{c2} production in two-photon collisions. Phys. Lett. **B540** (2002) 33–42

Belle Collaboration; K. Abe *et al.*: Observation of $\bar{B}^0 \rightarrow D^{(*)0} p\bar{p}$, Phys. Rev. Lett **89** (2002) 151802

Belle Collaboration; S. Nishida *et al.*: Radiative B Meson Decays into $K\pi\gamma$ and $K\pi\pi\gamma$ Final States, Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 231801

Belle Collaboration; K. Abe *et al.*: Measurements of branching fractions and decay amplitudes in $B \rightarrow J/\Psi K^*$ decays, Phys. Lett. **B538** (2002) 11-20

Belle Collaboration; K. Abe *et al.*: Study of CP -Violating Asymmetries in $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ Decays, Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 071801

Belle Collaboration; K. Abe *et al.*: Search for charmless two-body baryonic decays of B mesons, Phys. Rev. **D65** (2002) 091103(R)

Belle Collaboration; K. Abe *et al.*: Observation of χ_{c2} Production in B Meson Decay, Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 011803

Belle Collaboration; K. Abe *et al.*: Observation of mixing-induced CP violation in the neutral B meson system, Phys. Rev. **D66** (2002) 032007

Belle Collaboration; K. Abe *et al.*: Observation of $B^\pm \rightarrow p\bar{p}K^\pm$, Phys. Rev. Lett. **88** (2002) 181803

Belle Collaboration; K. Abe *et al.*: Precise Measurement of B Meson Lifetimes with Hadronic Decay Final States, Phys. Rev. Lett. **88** (2002) 17801

Belle Collaboration; A.Garmash *et al.*: Study of three-body charmless B decays, Phys. Rev. **D65** (2002) 092005

Experimental study of positron production from a W single crystal by the KEK 8-GeV electron linac beam H. Okuno *et al.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **B201** (2003) 259-265

Measurement of positron production efficiency from a tungsten mono-crystalline target using 4 and 8 GeV electrons T. Suwada *et al.*, Physical Review **E67** (2003) 016502 1-8

Observation of incoherent diffraction radiation from a single edge target in the visible light region T. Muto *et al.*, Physical Review Letters **90** (2003) 104801 1-4

Status of optical diffraction radiation experiment at KEK-ATF extraction line P. Karataev *et al.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **B201** (2003) 140-152

Grating optical diffraction radiation - Promising technique for non-invasive beam diagnostics P. Karataev *et al.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **B201** (2003) 201-211

Measurement of subjet multiplicities in neutral current deep inelastic scattering at HERA and determination of α_s ZEUS Collaboration; S. Chekanov *et al.*, Physics Letters **B558** (2003) 41-58

Measurement of event shapes in deep inelastic scattering at HERA ZEUS Collaboration; S. Chekanov *et al.*, Europ. Phys. Journal **C27** (2003) 531-545

Observation of the strange sea in the proton via inclusive ϕ -meson production in neutral current deep inelastic scattering at HERA ZEUS Collaboration; S. Chekanov *et al.*, Physics Letters **B553** (2003)141-158

Study of the azimuthal asymmetry of jets in neutral current deep inelastic scattering at HERA ZEUS Collaboration; S. Chekanov *et al.*, Physics Letters **B551** (2003) 3-4

Measurements of inelastic J/ψ and ψ' photoproduction at HERA ZEUS Collaboration; S. Chekanov *et al.*, Europ. Phys. Journal **C27** (2002) 173-188

Inclusive jet cross sections in the Breit frame in neutral current deep inelastic scattering at HERA and determination of α_s ZEUS Collaboration; S. Chekanov *et al.*, Physics Letters **B547** (2002) 164-180

A ZEUS next-to-leading-order QCD analysis of data on deep inelastic scattering ZEUS Collaboration; S. Chekanov *et al.*, Phys. Review **D67**, 012007 (2003)

Measurement of diffractive production of $D^{*\pm}$ (210) mesons in deep inelastic scattering at HERA ZEUS Collaboration; S. Chekanov *et al.*, Physics Letters **B545** (2002) 244-260

Measurement of proton-dissociative diffractive photoproduction of vector mesons at large momentum transfer at HERA ZEUS Collaboration; S. Chekanov *et al.*, Eur. Phys. J. **C26** (2003) 389-409

Measurement of high- Q^2 charged current cross sections in e^-p deep inelastic scattering at HERA ZEUS Collaboration; S. Chekanov *et al.*, Physics Letters **B539** (2002) 197-217 Erratum: Physics Letters **B552** (2003) 308

Leading Neutron production in e^+p collisions at HERA ZEUS Collaboration; S. Chekanov *et al.*, Nucl. Physics **B637** (2002) 3-56

Masatoshi Fujii, Hiromichi Nakahara, Keisuke Sueki, Toshiaki Shirakawa, Masami Chiba, Yasushi Fujimoto, Yoshikazu Hayami, Tachishige Hirose, Michiaki Utsumi, Masaki Hayashi, Takaharu Yokoyama and Satoru Yonekura: Neutron Emission from Fracture of Piezoelectric Materials in Deuterium Atmosphere, Jpn. J. Appl. Phys. **41**(2002) 2115-2119.

M.Kobayashi, S.Sugimoto, Y.Yoshimura, T.K.Kobatsubara, K.Mimori, K.Omata, T.Sekiguchi, T.Tsunemi, T.Yoshioka, Y.Tamagawa, H.Shirasaka, T.Fujiwara, Y.Usuki, M.Ishii: A beam test of PbWO₄ Cherenkov radiators: Nucl. Instr. Meth. in Physical Research **A484** (2002) 140-148.

M.Kobayashi, M.Chiba, H.Ikeda, K.Mimori, K.Okada, K.Omata, K.Shiino, F.Takeutchi, Y.Yoshimura: Silicon strip detector as a real-time, fast, medium-segmented hodoscope, Nucl. Instr. Meth. in Physical Research **A487** (2002) 353-363.

Masami Chiba, Jun Nakagawa, Hiromasa Tsugawa, Ryosuke Ogata, and Takuro Nishimura: A detector with high detection efficiency in 4- and 5-photon positronium annihilations, *Can. J. Phys.* **80** (2002) 1287-1295.

T. Kumita, T. Hirose, M. Irako, K. Kadoya, B. Matsumoto, K. Wada, N. N. Mondal, H. Yabu, K. Kobayashi, and M. Kajita: Study on laser cooling of ortho-positronium, *Nucl. Instr. Meth.* **B192** (2002) 171-175

H. Iijima, T. Asonuma, T. Hirose, M. Irako, K. Kadoya, T. Kumita, B. Matsumoto, K. Wada and M. Washio: Time bunching of slow positrons for lifetime and time-of-flight measurements of ortho-positronium, *Nucl. Instr. Meth.* **A483** (2002) 641-648

2) 学会講演

日本物理学会 2002 秋季大会 2002 年 9 月 13 日 ~ 19 日 (立教大学池袋キャンパス)

梶裕志、加藤聡美、浜津良輔、松澤邦裕、李栄篤、他 ZEUS Collaboration HERA における電子ビームの偏極度測定

神谷好郎、汲田哲郎、大森恒彦、浦川順治、横谷馨、広瀬立成、柏木茂、鷲尾方一、Ilan Ben-Zvi、Karl Kutsche、Igor Pogorelsky、Peter Siddons、Vitaly Yakimenko: レーザーと電子ビームの非線形コンプトン散乱観測のための 2 次元 X 線スペクトログラフの開発

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

松本崇博、田端岳彦、足立一郎、鈴木一仁、飯嶋徹、住吉孝行、河合秀幸、Peter Krizan、Samo Korpar、Rok Pestotnik: Belle ACC アップグレードのための RICH の開発研究

関貴之、飯嶋徹、池田博一、住吉孝行、須山本比呂、松本崇博: HPD の性能テストと ASIC による読出し
原順一、浜津良輔、笹原和俊、他: 単結晶標的を用いた陽電子源の開発

武藤俊哉、Pavel Karataev、浜津良輔、他: ビーム診断のための回折輻射の研究

広瀬立成、大橋歩、神谷好郎、汲田哲郎、福田将史、他: LC のための偏極陽電子源 1: 現状と将来展望

福田将史、大橋歩、他: LC のための偏極陽電子源 2: 陽電子偏極度測定装置の開発

山崎一成、福田将史、大橋歩、他: LC のための偏極陽電子源 3: 改良型偏極度測定用電磁石設計

大橋歩、福田将史、他: LC のための偏極陽電子源 4: 加圧式チェレンコフカウンター

汲田哲郎、神谷好郎、他: LC のための偏極陽電子源 5: プラズマチャンネル中でのトムソン散乱

神谷好郎、汲田哲郎、他: LC のための偏極陽電子源 6: 非線形トムソン散乱 (実験)

李冬国、浜津良輔、他: LC のための偏極陽電子源 7: Nonlinear Compton scattering of linearly polarized laser photons

松澤邦裕、梶裕志、加藤聡美、浜津良輔、李栄篤、他 ZEUS Collaboration: HERA におけるレプトクォークの探索

和田数幸、梶田雅稔、汲田哲郎、田邊徹、中野平、広瀬立成: ^{22}Na 線源を用いた低速陽電子パルス化ビームの改良

千葉雅美、上條敏生、安田修、小林佳、酒井崇史: 岩塩ニュートリノ検出器の為の電波減衰長の測定
国際会議

4th Workshop on Higher Luminosity B Factory, 4th Feb. 2003, KEK

T.Matsumoto: Aerogel RICH R&D

XIVth Rencontres De Blois, Matter-AntiMatter Asymmetry, 16 - 22 June 2002,
Chateau de Blois, France

T.Matsumoto: CPV in DK decays of B mesons

The 4th Ring Imaging Cherenkov workshop, Jun-5 to - 10, 2002, Pyros(Greek)

T.Sumiyoshi: Particle Identification detectors other types than RICH (invited talk)

International conference on Precision Physics of Simple Atomic Systems,
St. Petersburg, Russia, June 30-July 4, 2002

Masami Chiba: A detector with high detection efficiency in 4- and 5-photon-positronium annihilations.

Astronomical Telescopes and Instrumentation-SPIE, Hawaii, USA, Aug. 22-28, 2002

Toshio Kamijo and Masami Chiba: Microwave Properties of Rock Salt and Lime Stone for Detection of Ultra-High Energy Neutrino

26th Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop on Nanometre-Size Colliding Beams,
Lausanne University, Switzerland, Sept. 2-6, 2002

Y. Kamiya: Experimental study of Laser-Compton scattering in the non-linear regime

Joint 28th ICFA Advanced Beam Dynamics & Advanced & Novel Accelerators Workshop
ON QUANTUM ASPECTS OF BEAM PHYSICS, Jan. 7-11, 2003, Hiroshima University,
Higashi-Hiroshima, Japan

R. Hamatsu: Experimental investigations on a new kind of positron source using oriented crystals

T. Kumita: Study of laser-Compton scattering in a plasma channel

Y. Kamiya: X-ray Spectrometer for Observation of Nonlinear Compton Scattering

M. Fukuda: Production of a short-bunch polarized positron and design of a positron polarimeter

P. Karataev: Application of Optical Diffraction Radiation to a Non-Invasive Low-Emittance High-Brightness Beam Diagnostics

D.Li: Polarization of final photons in nonlinear Compton scattering for linearly polarized laser

宇宙物理実験研究室

1. 研究活動の概要

本研究室では、X線天文衛星を用いて宇宙の観測的研究を行なうとともに、将来の衛星搭載を目指した次世代X線観測機器の開発を推し進めている。2001年に観測を終えた「あすか」衛星の他、現在軌道上で観測を行なっている欧州のXMM-Newton衛星や、米国のChandra衛星のデータを駆使し、銀河系内のコンパクト天体の連星系から、活動銀河、銀河団など、宇宙のほぼすべての階層の天体の研究を進めることで、研究の幅が大きく広がりつつある。

一方では、2005年の打ち上げを目指すX線天文衛星Astro-E2計画において、本研究室はマイクロカロリメータ(XRS)、フィルターホイール(FW)、X線望遠鏡(XRT)の開発に主要な役割を果たしている。既にフライト品の設計は固まり、実機の製作や環境試験が着々と進められている。また、Astro-E2以降を目指した観測機器開発の基礎実験では、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6 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、角分解能を高めた新型X線望遠鏡の開発が精力的に進められた。

なお、本研究室の助手であった山崎典子氏は、2002年6月30日をもって転出し、7月1日付けで文部科学省・宇宙科学研究所の助教授に着任した。

1) 銀河・銀河団・銀河間物質の観測

Chandra衛星による銀河団A1060の中心部の観測データの解析が終結し、論文(Yamasaki et al.)がApJに出版された。この論文では中心の2つの銀河NGC 3311とNGC 3309の性質が詳しく調べられ、X線ハローがいずれも非常にコンパクトで温度は $kT = 0.8 - 0.9$ keVほどであり、銀河団ガスのためにハローのガスがはぎ取られたことを示した(図10.1を参照)。A1060については引き続き重力ポテンシャルの構造と、鉄の空間分布の詳しい解析を進めている。またChandraによるAWM7のアーカイブデータの解析を行い、中心部のガスが特異なhard blobを作っていること、また鉄が中心から正反対の2方向に吹き出してやはりblob状の分布を示すことなどがわかり、これらの結果を論文(Furusho et al.)としてApJに投稿した。一方XMM-Newtonについては、すでに我々をPIとして採択されていた2つの観測(AWM7およびIC310)が2月末に実行され、現在解析を始めているところである。

一方、宇宙を広く包みこむ温度 10^6 Kほどの中高温の銀河間ガスを、酸素の輝線を使ってサーベイしようという専用衛星の計画を、宇宙研、名大、東大のグループとの共同で検討を始め、6月に都立大学でワークショップの形で議論を行った。構造形成で作られる中高温ガスが、ここで計画する $S\Omega \sim 100$ cm² deg²程度かつエネルギー分解能2-3 eVの装置で観測可能であることがsimulationによって示された。この結果はYoshikawa et al.としてPASJへ投稿中である。

2) X線背景放射の観測

「あすか」によるX線背景放射のまとめの論文(Kushino et al.)が出版された。これは91箇所の観測視野ごとの強度のばらつきから、背景放射の絶対強度と $\log N - \log S$ 関係、さらに銀河系内のX線放射の場所による強度の違いも定量的に与えるもので、「あすか」による背景放射の研究の集大成ともよべる論文となった。この結果は9月にスペインで行われた国際学会でも2つの発表として報告された。

3) 超新星残骸IC443の観測

超新星が爆発すると、爆風は秒速10,000kmもの初速で星の外層(ejecta)を星間空間にまき散らす。この超音速のejectaが星間ガスに衝突すると衝撃波が形成され、そこから温度数百万度から数千万度の熱的なX線放射が観測される。このような超新星残骸では、電子の加熱に比べてイオンの電離の方が遅く、

連続 X 線から決められる電子温度と、重元素の特性 X 線から決まる電離温度では電離温度の方が低くなっているのが一般的である。ところが IC443 では電子温度が 1.0keV であるのに対し、珪素や硫黄の特性 X 線から求められた電離温度は 1.5keV という驚くべき結果が得られた。詳しい解析により、電子温度 1.0keV のプラズマの外側に、電子温度 0.2keV のシェル状のプラズマが存在しており、電子温度と電離温度の逆転は、内側の 1.0keV のプラズマから外側の 0.2keV のプラズマへの電子による熱伝導で定量的に説明できることがわかった。「あすか」のデータをサーベイしたところ、他にも W49B という超新星残骸で同様の逆転現象が発生していることがわかった。多数の超新星残骸の中で、なぜこの 2 つだけがこのような特異な振舞を見せているかについては、最終的な結論が得られていない。超新星爆発が起こった場所の周囲の環境との関連や、超新星残骸の年齢などの観点から研究を続けている。

4) 大質量 X 線連星パルサー GX301-2 の観測

大質量 X 線パルサー GX301-2 は B2 型のスペクトルを持つ超巨星 (質量 = $35M_{\odot}$ 、半径 = $43R_{\odot}$ 、ただし suffix の \odot は太陽を表す) であり、10 万年で太陽一つ分を失うほどの質量放出をしている。放出された質量の一部が、すぐそばを回っている磁化した ($B = 3 \times 10^{12}$ Gauss) 中性子星の磁極に落ち込む。この時解放される重力エネルギーが、中性子星の自転周期 (約 700 秒) で強度変動する強い連続 X 線として観測されている。

一方で、中性子星のまわりには、まだ中性子星に落ち込んでいない冷たいガスが存在する。ガス中の鉄原子が中性子星からの連続 X 線に照らされて K 殻の電子を失った後の緩和過程で $K\alpha$ 線が観測される。「あすか」による観測で、この $K\alpha$ 線のスペクトルが、中性子星の回りのケプラー運動から期待されるよりも一桁以上大きく広がっていることがわかった。詳しい解析の結果、鉄 $K\alpha$ 線のかなりの部分が、中性子星ごく近傍の磁極にまさに落ち込んで行く領域から放射されていることがわかった。従来、この領域は温度が 1 億度を遥かに越え、全ての重元素が完全に電離していると思われていたが、今回の「あすか」による発見はこの定説を覆すものである。重元素の電離を妨げるメカニズムとしては、一階電離したヘリウムの光電吸収による遮蔽が有力である。

5) 球状星団の観測

球状星団は、銀河系の他の場所に比べて星密度が高いため、潮汐捕捉によって多数の連星系が形成されると考えられる。これらの連星系の形成状況を調べることにより、銀河系に 150 個ほどの存在が知られている球状星団の力学的進化を調べている。本年度は、史上最も優れた解像度を誇る Chandra 衛星のデータにより、地球から最も近くにある球状星団 M4 と NGC6397 の研究を開始した。

6) TES カロリメータおよび SQUID の開発

2010 頃の打ち上げを想定して日本の X 線グループで検討が進んでいる NeXT 衛星への搭載を目指し、宇宙研、早稲田大学、セイコーインスツルメンツとの共同で TES (Transition Edge Sensor) 型カロリメータの開発を精力的に進めている。目標性能としては、 ~ 2 eV の超高エネルギー分解能と ~ 1000 コの多ピクセルアレイを目指しており、実現すれば Astro-E2 衛星に搭載される XRS 検出器をさらに大きく上回る性能を持つこととなる。

TES とは、超伝導遷移端の鋭い抵抗変化を利用した温度計のことで、これをカロリメータの温度計として使用することで優れたエネルギー分解能を発揮する。セイコーインスツルメンツによりスパッタ法で成膜された素子 (図 2 上) は、TES となる Ti/Au の 2 層薄膜の厚みが 40/110 nm、超伝導転移温度は 145 mK、温度計の感度 $\alpha \sim 100$ であった。この上に X 線吸収体となる Au が 0.3 mm 角 300 nm 厚 (5.9 keV で約 24 % 吸収) でつけられている。この素子により ^{55}Fe (0.2 mm ϕ にコリメート) に対するエネルギー分解能 6.6 ± 0.6 eV が得られ (図 2 下)、ベースラインのゆらぎは 6.4 eV であった。実際 Mn- $K\alpha 1$ と

$K\alpha_2$ をほぼ分離することができ、エネルギースペクトルのフィットには自然幅を考慮する必要がある。また、時定数が $\tau_{\text{eff}} = 75 \mu\text{s}$ と速く、1年以上の間安定して動作しているということも大きな利点である。分解能的には世界記録に迫る大きな躍進であり、目標とする 2 eV に大きく近づいた。この素子に関しては、8月の SPIE 国際会議で発表を行なったほか、11月にはアメリカのローレンスリバモア研究所 (LLNL) においてさらに詳細な性能評価を行ない、森田の修士論文としてまとめられた。

また早稲田大学で製作を行なった素子は、電子ビーム蒸着によって成膜した 0.3 mm 角の Ti/Au (100/200 nm) 2層薄膜を温度計とし、Sn メッキにより 0.5 mm 角 8 μm 厚の X 線吸収体を取り付けた。TES と吸収体の接合部は 0.1 mm 角である。このように TES よりもサイズの大きいいわゆるマッシュルーム型の吸収体をつけることで X 線に対する開口面積を上げることができ、メッキを利用した製作プロセスにより多ピクセル化にも対応ができる我々オリジナルな手法である。しかし、Sn メッキ吸収体を用いた素子は、X 線が吸収された時に超伝導となっている Sn のクーパー対が破壊されてできる準粒子がフォノンになるまでの寿命に対応すると考えられる数ミリ秒の長い時定数のパルス成分が発生し、エネルギー分解能的には十分な性能ではなかった。現在、吸収体を半金属である Bi で作成する手法を試みており、すでに試作品ができています。しかし Bi の密着性にやや問題があり、冷却中に一部の吸収体が剥がれたりするので改善を検討中である。エネルギー分解能としては、吸収体が剥がれた素子に対してではあるが、転移温度が $\sim 200 \text{ mK}$ と高いにも関わらず $6.3 \pm 0.4 \text{ keV}$ が得られており、十分に期待が持てる。2001 年度には都立大に専用のスパッタ装置が導入され、本年度から本格的に稼働をはじめた。これにより TES の膜質をさらに改良することにも目処が付き、転移温度を下げることでさらにエネルギー分解能を上げることも可能と考えている。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。

7) マグネティックカロリメータの開発

Er をドーブした素材は、X 線や 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。赤外線を真空中に導入し希土類である Er を金で希釈、共通実験装置の RF-SQUID で磁化を測定することで 100 ppm オーダーのサンプルの製作が可能となった。また ^3He を用いた小型冷凍器の内部に入力コイルが 8 の字型の特殊な形状の 2 段 SQUID アンプを設置し数 mT の磁場中での動作を確認した。このような入力コイルを用いることで、外部磁場をキャンセルできる利点がある。当面 5.5 MeV の γ 線の検出を目指して装置を改良中である。

8) 断熱消磁冷凍器の開発

TES カロリメータの動作環境として、比較的コンパクトな断熱消磁冷凍器を開発を行なっている。理研の三原が設計したものを都立大で組み上げ、100 mK 以下まで冷却を行なえることを確認した。現在、TES カロリメータと SQUID を組み込んで X 線検出が行なえるところまで進んでおり、篠崎の修士論文としてまとめられた。

9) 高い空間分解能を有する X 線望遠鏡の開発

物質に対する X 線の屈折率は 1 より僅かに小さいため、望遠鏡を製作する際には、可視光のような直入射光学系を用いることはできず、代わりに、充分滑らかな金属面にすれすれに入射する時に起きる全反射を利用した斜入射光学系を用いる。望遠鏡の光学系として、わが国は伝統的に、極限まで薄くした ($t = 170 \mu\text{m}$) 回転放物面と回転双極面を動径方向に多数積層 (170 層程度) した「薄板多重積層型」を採用してきた。この方式では大きな開口面積と高エネルギー側 12keV までの広いエネルギー帯域を実現できる反面、鏡面精度が充分保持できないことによる解像度の低下が問題になっていた。本研究室では鏡面自体による強度の保持を諦めて鏡面基板を 120 μm まで薄くし、外部の補強材をマイクロマシーニン

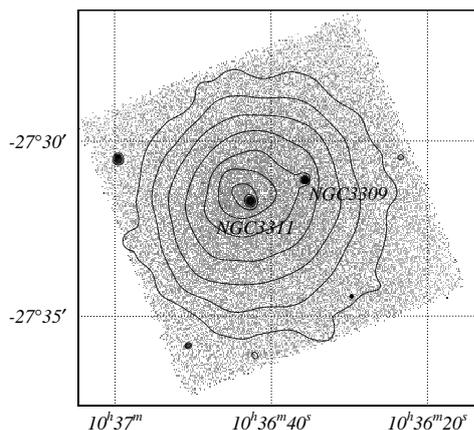


図 1: *Chandra* による銀河団 A1060 の X 線イメージ。

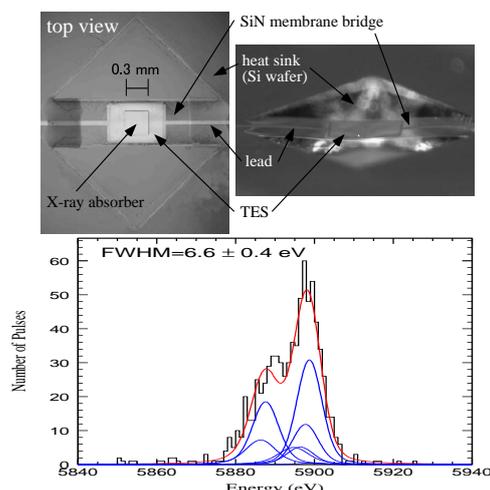


図 2: セイコーインスツルメンツで製作した TES カロリメータ素子の写真 (上) と Mn-K α 線のエネルギースペクトル (下)。

グ技術を用いて高精度で加工するという独自の発想により解像度低下の困難を克服しようとしている。本年度は Astro-E2 に搭載される X 線望遠鏡と同型の望遠鏡構体を試作し、反射鏡を 7 枚だけ挿入した状態で、解像度を 2.1 分角から 1 分角以下に向上させることに成功した。次年度以降は、さらに改良を重ねるとともに、実機と同様の 175 枚の反射鏡を詰めた上で、原理的な限界である解像度 15 秒角に挑戦する。

10) 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。都立大グループはエネルギー分解能 6 eV を実現する主検出器マイクロカロリメータ (XRS) とフィルタ・ホイール (FW) の開発、および X 線望遠鏡 (XRT) の地上較正試験を担当している。このうち FW については、軌道上での XRS 検出器のエネルギー較正用キャリブレーションソースの設計が固まり、FW と駆動回路のフライト品の製作がほぼ完了し、環境試験も始められた。また XRT は、フライト品と同型のモデルが NASA/Goddard Space Flight Center で完成し、日本に持ち込まれて較正試験が始まった。製作行程の向上により、Astro-E1 用 XRT よりも開口面積は約 10% 増え、解像度は 2.1 分角から 1.6 分角に向上していることが確認された。

2. 研究業績

1) 論文

N. Y. Yamasaki, T. Ohashi, T. Furusho: Chandra Observation of the Central Galaxies in the A1060 Cluster of Galaxies, *Astrophys. J.* **578** (2002) 833–841

T. Endo, M. Ishida, K. Masai, H. Kunieda, H. Inoue, F. Nagase: Broadening of Nearly Neutral Iron Emission Line of GX301–2 Observed with ASCA, *Astrophys. J.* **574** (2002) 879–898

M. T. Kawasaki, M. Ozaki, F. Nagase, K. Masai, M. Ishida, R. Petre: ASCA Observations of the Supernova Remnant IC443: Thermal Structure and Detection of Overionized Plasma, *Astrophys. J.* **572** (2002) 897–905

A. Kushino, Y. Murakami, N. Y. Yamasaki, T. Ohashi, and M. Kurakado: Two Dimensional Imaging by Series-Connected STJs with Sapphire Absorber, *NIMPA* **487** (2002) 488–493

A. Kushino, Y. Ishisaki, U. Morita, N. Y. Yamasaki, M. Ishida, T. Ohashi: Study of the X-Ray Background Spectrum and Its Large-Scale Fluctuation with ASCA, *Publ. Astron. Soc. Japan* **54** (2002) 327–352

S. Osone, K. Makishima, K. Matsuzaki, Y. Ishisaki, Y. Fukazawa: Search for Hot Gas in the Local Group with ASCA, *Publ. Astron. Soc. Japan* **54** (2002) 387–392

2) 国際会議報告

Y. Ishisaki, A. Kushino, U. Morita, N. Y. Yamasaki, M. Ishida, T. Ohashi, Y. Ueda: ASCA study of the X-ray background spectrum I. observation, analysis and the Galactic distribution, *Astronomische Nachrichten* **324** (2003) 154

A. Kushino, Y. Ishisaki, U. Morita, N.Y. Yamasaki, M. Ishida, T. Ohashi, Y. Ueda: ASCA study of the X-ray background spectrum II. Absolute CXB intensity and cosmic variance *Astronomische Nachrichten* **324** (2003) 155

A. Parmer, G. Hasinger, M. Arnaud, X. Barcons, D. Barret, A. Blanchard, H. Boeringer, M. Cappi, A. Comastri, T. Courvoisier, A. C. Fabian, I. Georgantopoulos, R. Griffiths, N. Kawai, K. Koyama, K. Makishima, P. Malaguti, K. O. Mason, C. Motch, M. Mendez, T. Ohashi, F. Paerels, L. Piro, J. Schmitt, van der Klis, M. Ward: XEUS: the X-ray evolving universe spectroscopy mission, *SPIE* **4851** (2003) 304–313

K. Misaki, R. Shibata, Y. Hidaka, H. Kunieda, M. Ishida, H. Honda, Y. Maeda, T. Endo, K. Imamura, Y. Haba, K. Itoh, H. Mori, R. Iizuka, A. Hayakawa, T. Morihisa: Error budgets for the image degradataion of X-ray telescope on board Astro-E2, *SPIE* **4851** (2003) 459–470

H. Kunieda, K. Misaki, Y. Haba, M. Ishida, K. Itoh, H. Mori, R. Shibata: Normal incidence multilayer telescope for soft X-ray beam expander, *SPIE* **4851** (2003) 666–672

R. Shibata, H. Mori, Y. Maeda, K. Misaki, Y. Haba, K. Itoh, R. Iizuka, T. Morihisa, H. Kunieda, A. Hayakawa, M. Ishida: ASTRO-E2 XRT precollimator for stray light protection I. design and expected performance, *SPIE* **4851** (2003) 684–695

Y. Maeda, A. Itoh, K. Itoh, H. Kunieda, Y. Haba, A. Hayakawa, R. Iizuka, C. Inoue, M. Ishida, K. Misaki, H. Mori, R. Shibata: An X-ray calibration facility with a dynamical pencil beam for the post-Astro-E2 telescopes, *SPIE* **4851** (2003) 734–741

Y. Haba, R. Iizuka, A. Hayakawa, K. Misaki, R. Shibata, K. Itoh, H. Mori, Y. Maeda, M. Ishida, H. Kunieda: X-Ray characterization of capillary system, *SPIE* **4851** (2003) 742–749

H. Mori, R. Shibata, Y. Maeda, K. Misaki, Y. Haba, K. Itoh, R. Iizuka, T. Morihisa, H. Kunieda, A. Hayakawa, M. Ishida: ASTRO-E2 precollimator for stray light protection II. Fabrication and x-ray calibration *SPIE* **4851** (2003) 750–761

Y. Ishisaki, U. Morita, T. Koga, K. Sato, T. Ohashi, K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, R. Fujimoto, N. Iyomoto, T. Oshima, K. Futamoto, Y. Takei, T. Ichitsubo, T. Fujimori, S. Shoji, H. Kudo, T. Nakamura, T. Arakawa, T. Osaka, T. Homma, H. Sato, H. Kobayashi, K. Mori, K. Tanaka, T. Morooka, S. Nakayama, K. Chinone, Y. Kuroda, M. Onishi, K. Otake: Present performance of a single pixel Ti/Au bilayer TES calorimeter, *SPIE* **4851** (2003) 831–841

N. Iyomoto, T. Ichitsubo, T. Oshima, K. Mitsuda, R. Fujimoto, K. Futamoto, Y. Takei, T. Fujimori, T. Miyazaki, Y. Ishisaki, T. Hiroike, U. Morita, N. Y. Yamasaki, T. Koga, K. Sato, T. Ohashi, S. Shoji, H. Kudo, T. Nakamura, H. Sato, H. Kobayashi, T. Homma, T. Osaka, S. Nakayama, T. Morooka, K. Chinone, K. Tanaka, Y. Kuroda, M. Onishi, M. Goto: Multipixel readout of TES calorimeters, *SPIE* **4851** (2003) 965–974

M. Itoh, H. Yamada, Y. Ishisaki, T. Ishikawa, T. Dotani, K. Terada: The total spectrum of solar X-rays and its long-term variation obtained from Earth albedo data of ASCA GIS, the IAU 8th Asian-Pacific Regional Meeting, Eds. S. Ikeuchi, J. Hearnshaw, and T. Hanawa, ASP Conference Series, **289** (2003) 435–436

Y. Ishisaki, A. Kushino, U. Morita, N. Y. Yamasaki, M. Ishida, T. Ohashi, Y. Ueda: Study of the X-ray background spectrum and its large-scale fluctuation with ASCA, the IAU 8th Asian-Pacific Regional Meeting, Eds. S. Ikeuchi, J. Hearnshaw, and T. Hanawa, ASP Conference Series, **289** (2003) 69–70

3) 学会講演

宇宙放射線シンポジウム 2003年3月18日～19日 (文部科学省 宇宙科学研究所)

大橋隆哉、石田 學、満田和久、山崎典子: NeXT で探る宇宙大規模プラズマのサイエンス

石田 學、石崎欣尚、大橋隆哉、満田和久、山崎典子、藤本龍一: NeXT 軟X線分光器用 X線望遠鏡の検討

満田和久、石崎欣尚、石田學、大橋隆哉、藤本龍一、山崎典子: NeXT 軟X線分光器の検討

山崎典子、満田和久、藤本龍一、大橋隆哉、石田 學、石崎欣尚: NeXT 衛星搭載軟X線分光器による diffuse line 観測の可能性

未踏科学技術協会主催シンポジウム「宇宙・生命 科学・産業のための超高精度計測技術」
2003年2月7日 (東京大学先端科学技術センター)

石崎欣尚: 国内外の TES アプリケーション

大橋隆哉: X線による宇宙観測

第3回宇宙科学シンポジウム 2003年1月9日～10日 (文部科学省 宇宙科学研究所)

大橋隆哉、石田學、満田和久、山崎典子、藤本龍一、前田良知、田原讓、須藤靖、吉川耕司: 宇宙の大規模構造を探る広視野 X線分光ミッション

藤本龍一、満田和久、山崎典子、伊豫本直子、大橋隆哉、石崎欣尚: 広視野 X線ミッションのための X線マイクロカロリメータアレイの開発

日本天文学会 2002年秋季年会 2002年10月6日～10月9日(宮崎シーガイア)

古賀丈雄、石崎欣尚、森田うめ代、佐藤浩介、大橋隆哉、山崎典子、満田和久、藤本龍一、伊予本直子、大島 泰、竹井 洋、市坪太郎、藤森玉行、二元和朗、田中啓一、師岡利光、中山 哲、茅根一夫: W38a TES型X線マイクロカロリメータの開発 IV

森田うめ代、石崎欣尚、佐藤浩介、古賀丈雄、大橋隆哉、山崎典子、満田和久、藤本龍一、伊予本直子、大島 泰、竹井 洋、市坪太郎、藤森玉行、二元和朗: W39a TES型マイクロカロリメータ超電導薄膜の性能評価

市坪太郎、伊予本直子、満田和久、藤本龍一、大島泰、二元和朗、竹井洋、藤森玉行、宮崎利行、大橋隆哉、山崎典子、石崎欣尚、森田うめ代、佐藤浩介、古賀丈雄、田中啓一、師岡利光、中山哲、茅根一夫: W40a 撮像型のTES型X線マイクロカロリメータの読み出し系の開発

石崎欣尚、森田うめ代、佐藤浩介、古賀丈雄、大橋隆哉、山崎典子、満田和久、藤本龍一、伊予本直子、大島 泰、竹井 洋、市坪太郎、藤森玉行、二元和朗: W41a TES型マイクロカロリメータX線パルスの最適信号処理

古庄 多恵、山崎 典子、大橋 隆哉: T15b Chandra 衛星による AWM7 銀河団の観測

長瀬文昭、渡辺伸、石田 學、森田うめ代、石崎欣尚、迫 昌男、S. Kahn、F.Paerels: N02a X線パルサーGX301-2における蛍光鉄輝線のコンプトン散乱ハンプ

寺田幸功、牧島一夫、石田學: N16a 強磁場激変星の降着円筒における共鳴線の異方的伝搬

大橋隆哉: D08a X線観測による化学組成からの年齢推定

日本物理学会 2002年秋季大会 2002年9月13日～9月16日(立教大学池袋キャンパス)

佐藤浩介、森田うめ代、古賀丈雄、石崎欣尚、山崎典子、大橋隆哉、竹井洋、市坪太郎、藤森玉行、二元和朗、大島泰、伊予本直子、藤本龍一、満田和久 16aRA-4 TES型カロリメータ用の超伝導薄膜の性能評価

銀河間物質探索ミッション検討会 2002年6月5日(東京都立大学国際交流会館中会議室)

大橋隆哉: 銀河間物質の観測の現状

山崎典子: 他のX線ミッションで観測はできるか?

石田 學: キャピラリーオブティックスの可能性について

日本天文学会 2002年春季年会 2002年3月27日～3月31日(茨城大学)

久志野彰寛、石崎欣尚、森田うめ代、山崎典子、石田 學、大橋隆哉、上田佳宏: S04a 「あすか」によるX線背景放射のスペクトルと大規模揺らぎの研究

篠崎慶亮、石川 輝、石崎欣尚、山崎典子、大橋隆哉、三原建弘: 37b 次世代X線マイクロカロリメータ開発用の断熱消磁冷凍機の製作

早川 彰、石田 學、飯塚 亮、見崎一民、柴田 亮、幅 良統、伊藤 啓、森 英之、國枝秀世、前田良知: W44a キャピラリーの特性測定とX線観測への応用

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、田中啓一、師岡利光、中山 哲、茅根一夫: W45a TES 型 X 線マイクロカロリメータの開発 III

森英之、柴田亮、飯塚亮、伊藤啓、國枝秀世、幅良統、前田良知、見崎一民、石田學、早川彰: W31a ASTRO-E2 XRT 搭載用プレコリメータの試作品の性能評価

伊藤啓、見崎一民、幅良統、早川彰、石田學、柴田亮、森英之、飯塚亮、前田良和、國枝秀世: W32a X 線望遠鏡の結像性能向上化の研究

藤本龍一、満田和久、大橋隆哉、山崎典子、石崎欣尚、Richard Kelley、古庄多恵、他、XRS チーム: W30a Astro-E2 衛星搭載 X 線分光装置 XRS

石川輝、篠崎慶亮、石田學、山崎典子、石崎欣尚、大橋隆哉、牧島一夫、根來均: N68a 球状星団 M4 と NGC 6397 のあすかによる観測

古庄多恵、山崎典子、大橋隆哉: T11b Chandra 衛星による A1060 銀河団ガスの温度・輝度分布

川崎正寛、尾崎正伸、長瀬文昭、政井邦昭、石田學、Robert Petre: Q21a 「あすか」観測による超新星残骸 IC443 の過電離プラズマの発見

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

寺田幸功、牧島一夫、石田學 27aXD-7 強磁場白色矮星の降着プラズマにおける共鳴光子の非等方的な伝搬過程 (II)

久志野彰寛、石崎欣尚、森田うめ代、山崎典子、石田學、大橋隆哉、上田佳宏: 27aXD-1 「あすか」による宇宙 X 線背景放射の大スケールゆらぎの研究

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、田中啓一、師岡利光、中山哲、茅根一夫: 27pXD-5 TES 型 X 線マイクロカロリメータの開発 (VII) — 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、宮崎利行、大橋隆哉、山崎典子、石崎欣尚、広池哲平、森田うめ代、中山哲: 27pXD-6 撮像型カロリメータ読み出しのための SQUID 素子の開発

国際会議

International Workshop on Extreme Optics and Sensors, Ikebukuro, Tokyo, Jan 14–17, 2003

R. Fujimoto, K. Mitsuda, N. Yamasaki, N. Iyomoto, T. Oshima, Y. Takei, T. Ichitsubo, T. Fujimori, K. Futamoto, T. Ohashi, Y. Ishisaki, U. Morita, T. Koga, K. Sato, K. Tanaka, T. Morooka, S. Nakayama, K. Chinone: Excess Noise and AC Characteristics of TES microcalorimeters

Japan-German workshop on galaxies and clusters of galaxies, Laforet Shuzenji, Shuzenji, October 29–31, 2002

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

T. Ohashi: Dynamical Aspects of Clusters of Galaxies

K. Yoshikawa, N. Y. Yamasaki, Y.Suto, T. Ohashi, K. Mitsuda, Y.Tawara, and A. Furuzawa: Detectability of the Warm/Hot Intergalactic Medium Through Emission Lines of OVII and OIII

The 34th COSPAR Scientific Assembly, Houston, TX, USA, October 10-19, 2002

T. Furusho, N.Y. Yamasaki, T. Ohashi: Chandra Imaging Spectroscopy of the Central Region of AWM7

International Workshop on X-ray Surveys, in the light of the new observatories, Santander, Spain, September 4-6, 2002

Y. Ishisaki, A. Kushino, U. Morita, N. Y. Yamasaki, M. Ishida, T. Ohashi, Y. Ueda: ASCA study of the X-ray background spectrum I. Observation, analysis and the galactic distribution

A. Kushino, Y. Ishisaki, U. Morita, N.Y. Yamasaki, M. Ishida, T. Ohashi, Y. Ueda: ASCA study of the X-ray background spectrum II. Absolute CXB intensity and cosmic variance

SPIE, Astronomical Telescopes and Instrumentation, X-ray and Gamma-ray Telescopes and Instruments for Astronomy Waikoloa, Hawaii, USA, August 24-28, 2002

A. Parmer, G. Hasinger, M. Arnaud, X. Barcons, D. Barret, A. Blanchard, H. Boeringer, M. Cappi, A. Comastri, T. Courvoisier, A. C. Fabian, I. Georgantopoulos, R. Griffiths, N. Kawai, K. Koyama, K. Makishima, P. Malaguti, K. O. Mason, C. Motch, M. Mendez, T. Ohashi, F. Paerels, L. Piro, J. Schmitt, van der Klis, M. Ward: XEUS: the X-ray evolving universe spectroscopy mission

K. Misaki, R. Shibata, Y. Hidaka, H. Kunieda, M. Ishida, H. Honda, Y. Maeda, T. Endo, K. Imamura, Y. Haba, K. Itoh, H. Mori, R. Iizuka, A. Hayakawa, T. Morihisa: Error budgets for the image degradataion of x-ray telescope on board Astro-E2

H. Kunieda, K. Misaki, Y. Haba, M. Ishida, K. Itoh, H. Mori, R. Shibata: Normal incidence multilayer telescope for soft X-ray beam expander

R. Shibata, H. Mori, Y. Maeda, K. Misaki, Y. Haba, K. Itoh, R. Iizuka, T. Morihisa, H. Kunieda, A. Hayakawa, M. Ishida: ASTRO-E2 XRT precollimator for stray light protection I. Design and expected performande

Y. Maeda, A. Itoh, K. Itoh, H. Kunieda, Y. Haba, A. Hayakawa, R. Iizuka, C. Inoue, M. Ishida, K. Misaki, H. Mori, R. Shibata: An X-ray calibration facility with a dynamical pencil beam for the post-Astro-E2 telescopes

Y. Haba, R. Iizuka, A. Hayakawa, K. Misaki, R. Shibata, K. Itoh, H. Mori, Y. Maeda, M. Ishida, H. Kunieda: X-ray characterization of capillary system

H. Mori, R. Shibata, Y. Maeda, K. Misaki, Y. Haba, K. Itoh, R. Iizuka, T. Morihisa, H. Kunieda, A. Hayakawa, M. Ishida: ASTRO-E2 precollimator for stray light protection II. Fabrication and x-ray calibration

Y. Ishisaki, U. Morita, T. Koga, K. Sato, T. Ohashi, K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, R. Fujimoto, N. Iyomoto, T. Oshima, K. Futamoto, Y. Takei, T. Ichitsubo, T. Fujimori, S. Shoji, H. Kudo, T. Nakamura, T. Arakawa, T. Osaka, T. Homma, H. Sato, H. Kobayashi, K. Mori, K. Tanaka, T. Morooka, S. Nakayama, K. Chinone, Y. Kuroda, M. Onishi, K. Otake: Present performance of a single pixel Ti/Au bilayer TES calorimeter

N. Iyomoto, T. Ichitsubo, T. Oshima, K. Mitsuda, R. Fujimoto, K. Futamoto, Y. Takei, T. Fujimori, T. Miyazaki, Y. Ishisaki, T. Hiroike, U. Morita, N. Y. Yamasaki, T. Koga, K. Sato, T. Ohashi, S. Shoji, H. Kudo, T. Nakamura, H. Sato, H. Kobayashi, T. Homma, T. Osaka, S. Nakayama, T. Morooka, K. Chinone, K. Tanaka, Y. Kuroda, M. Onishi, M. Goto: Multipixel readout of TES calorimeters

The 7th International Symposium on Nuclei in the Cosmos, Fuji-Yoshida, July 8–12, 2002

T. Ohashi: Metal distribution in clusters of galaxies and the prospect of Astro-E2 (invited)

IAU 8th Asian-Pacific Regional Meeting, Hitotsubashi Memorial Hall, Tokyo, July 2–5, 2002

M. Itoh, H. Yamada, Y. Ishisaki, T. Ishikawa, T. Dotani, K. Terada: The Total Spectrum of Solar X-rays and Its Long-Term Variation Obtained from Earth Albedo Data of ASCA GIS

Y. Ishisaki, A. Kushino, U. Morita, N. Y. Yamasaki, M. Ishida, T. Ohashi, Y. Ueda: Study of the X-ray Background Spectrum and its Large-Scale Fluctuation with ASCA

T. Ohashi: Instrumental Development in Japan for Future Missions

Workshop on Transition Edge Sensor Device Physics,

NIST, Boulder, Colorado, USA, April 25–26, 2002

Y. Ishisaki, T. Hiroike, U. Morita, T. Ohashi, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda, R. Fujimoto, N. Yamasaki, N. Iyomoto, T. Oshima, K. Futamoto, Y. Takei, S. Shoji, H. Kudo, T. Nakamura, T. Arakawa, H. Sato, T. Homma, T. Osaka, K. Tanaka, T. Morooka, S. Nakayama, K. Chinone, Y. Kuroda, M. Onishi, M. Goto: Present Performance and Limiting Factors of a Ti/Au bilayer TES Calorimeter

原子物理学研究室

1. 研究活動の概要

一価ならびに多価のイオンの関与する meV から GeV までの非常に広いエネルギー領域に亘る衝突現象のダイナミクスを独自に開発した装置と測定手法を駆使して原子・分子レベルの視点から実験的に解明するのが本研究室の継続的な研究課題である。今年度から化学専攻・反応物理化学研究室との共同による静電型イオン蓄積リングの建設が開始され、これまで以上の新たな展開が始まることになった。なお、1996 年度に当研究室へ移籍し主に統計物理学的な見地から乱流やカオスなどの実験的研究を担当してきた勝山智男助手は 2002 年 4 月に沼津高等専門学校・助教授として転出した。

1) 静電型イオン蓄積リングによる原子分子衝突の研究

元来、イオン蓄積リングは高エネルギー実験のために利用することを目的として発展してきたが、最近では原子物理実験に導入され大きな成功を収めている、一方で、これらのリングは基本的に磁場によってビームの偏向と収束を行っており、イオン軌道が \sqrt{mE}/q (m : 質量, E : エネルギー, q : 価数) に支配されるためイオンの質量が増すと蓄積が難しく、低価数の重イオンを回すことができない。ところが、“静電型”イオン蓄積リングは以下のような数多くの特徴を備えている。1) イオン軌道は E/q に支配され、一定のエネルギーに対してイオンの質量に関係しない。そのため重い多原子分子イオンやクラスターイオンを蓄積できる。2) 分子イオンの場合には、イオン源で生成されたときの振動励起状態が赤外光放射によって脱励起され周囲の環境温度にまで安定化する。さらにリングを液体窒素温度まで冷却することにより分子イオンをより冷却することが可能である。3) 磁場型リングと同様に単回衝突実験に比べビームが周回するため実質的ビーム強度が強い。4) ヒステリシスのない再現性の良い小型の装置を作ることができる一方、リング途中に直線部分を設けることにより、レーザー等のビームとの合流型衝突実験が容易である。

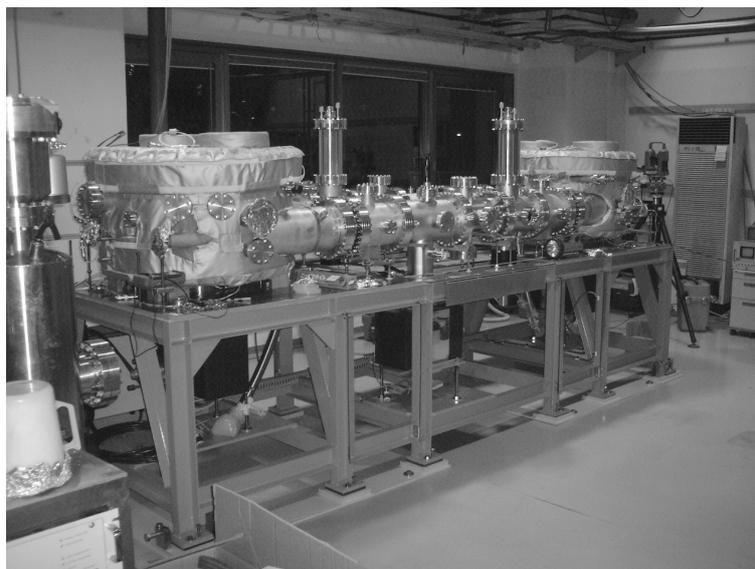


図 1: 静電型イオン蓄積リングの全景 (撮影: 2003 年 3 月)

以上のような特徴を生かした多原子分子イオンさらにクラスターイオンについての寿命や、電子・中性原子・正負イオン・光子との相互作用の研究は、今後全く新しい原子衝突物理を切り開く可能性のある

大変有望なテーマである．そこで本年度、静電型イオン蓄積リングの設計建設をクラスター化学を専門とする化学専攻：城丸春夫助教授との共同研究の下に行い、周回長約 8 m でエネルギーは最大 30 q keV のリングを完成させた．リング全体を高温でベーキングすることにより 10^{-9} Pa (10^{-11} Torr) 台の超高真空を達成した．また、リング電極全体を液体窒素で冷却することにより液体窒素温度に到達させることにも成功した．これと平行して、数十個にも及ぶ電極に印可する電圧の制御機構の開発、テスト用のイオンを供給するための duoplasmatron 型イオン源の開発も行った．今後マシンスタディを経て、多原子分子イオンやクラスターイオンの蓄積、電子・中性原子・レーザーとのマージング衝突実験を行う環境整備を行う予定である．

2) 極低温ヘリウム気体中におけるイオン移動度

希薄な気体中でのイオン移動度を液体窒素および液体ヘリウムによる気体の冷却が可能な移動管装置を用いて測定している．分子イオンではヘリウム中の移動度が極低温・弱電場領域で古典的な分極極限 K_{pol} を下回るという一般的な傾向が伺えるため興味を持って測定を続けてきた．今年度は CO_2^+ および NO_2^+ について測定を行った．二価分子イオンである CO_2^+ は初めて 77 K においても弱電場領域で K_{pol} を下回る結果となった． NO_2^+ では分子構造や幾何学的サイズの類似した CO_2^+ と殆ど同じ測定結果が得られた．これらの結果を解釈するために古典的な理論計算コードを開発した．粒子間ポテンシャルが既知である原子イオンについては他の計算値や実験値を再現する結果が得られ計算コードの信頼性が確かめられた．二原子分子イオンについて求められた *ab initio* ポテンシャルを用いて衝突配向を固定した Monchick-Mason 近似に基づく計算を行ったが K_{pol} を超えることはなかった．この計算結果から分子イオンとヘリウム原子の多重衝突による大角度散乱が現象の理解に直接的に結びついていることが示唆された．

3) 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

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は、測定困難と言われた 1 keV 以下の低エネルギー領域において、原子分子を標的とする多価イオンの電子捕獲反応断面積の絶対値測定を可能にし、これまでに 100 を越える多価イオン衝突系の基礎データ蓄積に貢献してきた．平成 13 年度には昨年度後半より開始した二価分子イオンと分子の衝突実験で、10 eV 以下の低エネルギー領域で原子交換を含むイオン分子反応の重要性を見出す新たな展開が得られた．また年度後半には、理論的に予言されている“低エネルギー多価イオン・原子衝突にけるオービティング共鳴現象”を実験的に検証すべく、マージングビーム法による低エネルギー衝突実験用の中性ビーム源開発に着手した．

4) 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

低速の多価イオン・分子衝突における分子崩壊過程は、電子捕獲と運動量移行を伴い極めて複雑である．これまでこの複雑な分子崩壊過程を解明すべく同一衝突平面上の散乱全粒子の電荷と運動量、そして散乱角を同時に観測できる多次元同時計測実験法の開発に取り組んできた．平成 13 年度には、 Kr^{8+} - N_2 衝突の二電子捕獲過程における全散乱粒子多次元同時計測で複雑な分子崩壊過程の詳細解明に成功し、衝突ダイナミクスを議論できる分子崩壊解明実験法を確立させた．

5) 高速多価イオンのコヒーレント共鳴励起の研究

単結晶中をチャネリングするイオンは、結晶の周期ポテンシャルを振動磁場 (仮想光子) として感じる．この振動数あるいはその高調波 (n 次) が入射イオンの核あるいは原子レベルの励起エネルギーと一致するとき、共鳴的な励起が期待される．この現象はオコロコフ効果もしくはコヒーレント共鳴励起 (RCE) と呼ばれている．その観測は入射ビームに対して結晶を回転させながら、結晶通過後のイオンの電荷、

および脱励起 X 線を測定することによって行う。400 MeV/u の重イオンを使って放射線医学総合研究所の HIMAC で行ってきた従来からの実験を進展させ、本年度は以下のような実験を行った。

1. 偏光結晶振動電場によるアライメント本年度で、一連の 1-2 電子系 $\text{Ar}^{16,17+}$ 、 $\text{Fe}^{24,25+}$ イオンに対して、基底状態から $n=2$ 準位へ RCE 励起されたイオンからの脱励起 X 線の角度分布測定を完成させた。2 台の Si(Li) X 線検出器を使って、プロジェクトイル系から観測したときに (220) 結晶面に対し、平行および垂直な方向に放出された X 線を測定した。X 線収量は共鳴条件下で増大するが、 2^1P 状態への共鳴条件下では、平行方向の X 線は垂直方向と比較して、2 電子系 (He-like) の Ar^{16+} イオンでは 50% 程度、 Fe^{24+} イオンでは 2 倍以上強いことが観測された。この顕著な異方性は水平方向の振動電場が垂直方向より強いことに起因しており、そのために垂直方向への RCE 遷移確率が大きくなりアライメントしていると考えられる。
2. Ar^{17+} イオンの $n=3$ 準位に対するシュタルク効果以前、390 MeV/u H-like Ar^{17+} イオンにおける基底状態から $n=3$ への RCE を通過イオンの電荷分布を測定することによって観測した。その際に観測された 2 本のピークが、 $j=1/2$ 及び $3/2$ の準位に対する真空中の理論値から大きくシフトしていることを発見した。そこで本年度は、シリコン表面障壁型検出器を結晶標的として採用することにより RCE の詳細測定を行った。検出器は日本原子力研究所との共同研究で製作したもので、結晶中でイオンが付与するエネルギーを測定できるという利点がある。通過イオンの電荷分布、付与エネルギーをコインシデンス同時計測した。この付与エネルギーは結晶チャンネル中でのイオン軌道の振動振幅に 1 対 1 対応している。観測で得られた最小付与エネルギーの領域ではイオンは結晶の中心を走るために静的結晶電場を感じない。このとき共鳴の位置は真空中の $j=1/2$ 及び $3/2$ のエネルギー準位と一致することが観測された。また、チャンネル中心から離れたところではこの準位は電場によるシュタルク効果のため分裂、シフトしていることもはっきり観測された。
3. Kr イオンの RCE 今年度、今までに試みられた核種としては最も重い 1 電子系 (H-like) Kr^{35+} イオンの RCE 観測に、通過イオンの電荷分布および放出脱励起 X 線の測定から初めて成功した。電荷分布では数%しか共鳴に伴う変化を観測できなかった一方で、2 倍以上の大きな X 線収量の増加を観測した。これは、重いイオンの励起状態の自然寿命が短いことと、結晶電子によるイオン化確率が低いことの両方で説明される。この観測により我々は他の手法では困難である、13.5 keV もの高エネルギーの疑似光子による原子準位の励起に成功したことを意味している。

6) 高速分子イオンチャネリングの研究

高速分子イオンが結晶中に入射した際、電子損失に伴って起こる分子崩壊によって生成される 2 個の陽子が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研究することを目的として 160 MeV/u H_2^+ の高速分子イオンチャネリングの観測を、生成陽子収量の、分子イオン入射角および生成陽子散乱角度両方に対する依存性測定を通して行った。

7) 多価イオンによる電子の微分散乱断面積

多価イオンによって散乱された電子の角度分布およびエネルギー分布を同時に測定するためにトロイダル型エネルギー分析器を開発して測定を行ってきた。 Ar^{8+} および Ar^{7+} による衝突エネルギー 100 eV における電子の弾性散乱について、幾多の実験的な困難を克服して最終的に信頼できる微分散乱断面積を決定し、古典論および量子論による計算と詳細な比較検討を行うことに成功した (新潟大・檀上篤徳教授、芝浦工大・吉野益弘助教授との共同研究)

8) 多価イオンの偏光分光

中性気体分子標的と衝突して電子を捕獲した多価イオンはその殆どが励起状態にあるため電子または光の放出を起こす。一電子移行では殆どの場合、一電子励起状態が生成されるので発光のみが可能である。この脱励起光の偏光度を測定することでエネルギー的には縮重して分離できない励起状態の磁気副準位分布を観測している。今年度はECR(電子サイクロトロン共鳴)型多価イオン源で生成したHe様の C^{4+} および N^{5+} と種々の標的気体を衝突させ、一電子捕獲反応で生成したLi様イオンの $3s-3p$ 遷移について偏光度の衝突速度依存性および標的依存性を測定した。反応が起こる粒子間距離と偏光度の間の相関、および $3p$ 状態の二つの微細構造生成断面積比と偏光度の間の相関が初めて観測された。イオン化した標的の作る電場によるStark効果とスピン軌道相互作用が原因ではないかと推察し詳しい考察に取り組んでいる。

9) 多重 Auger 電子放出における電子相関

多電子捕獲した多価イオンの場合には Auger 電子の放出が主要な脱励起過程となる。複数の Auger 電子が放出される場合に電子間の放出角度相関を実測できれば多重励起状態における電子相関を直接的に観測することが可能である。磁気トラップ型飛行時間分析器と二次元位置敏感型検出器から成る装置を用いて Ar^{8+} と Ar , He および H_2 標的との衝突における Auger 電子の観測を行った。磁場の一様性に問題があることが判明したためコイルを製作し直して測定を継続している(化学専攻・反応物理化学研究室・城丸春夫助教授との共同研究)

10) 多価イオン衝突による分子のクーロン爆発

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分子構造を保ったままで多価分子イオンとなる。この多価分子イオンは原子イオンの集合体と見なせるので直ちにイオン間のクーロン反発によって爆発的に解離する。解離フラグメントの運動量ベクトルを位置敏感型飛行時間分析器によって測定すると解離直前の分子構造を決定できる。今年度は平面型多原子分子である C_2H_4 と CH_2Cl_2 について測定を行った(化学専攻・反応物理化学研究室・城丸春夫助教授との共同研究)

2. 研究業績

1) 論文

A. Collins, S. Cvejanovic, C. Dawson, T. J. Reddish, D. P. Seccombe, A. Huetz, L. Malegat, P. Selles, A. K. Kazansky, A. Danjo, K. Soejima, K. Okuno and A. Yagishita : Double photoionization of helium at an excess energy of 60 eV using left- and right-elliptically-polarized light, *Phys. Rev. A* **65** (2002) 052717.

K. Okuno : Ion-molecule reactions in hydrogen systems and charge transfer of multiply charged ions with atoms and molecules in the energy range of 0.8~2000 eV per ion charge, *At. Plasma-Mater. Interact. Data Fusion*, **10** (2002) 163-199.

T. Azuma, T. Ito, Y. Takabayashi, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada and T. Murakami : Trajectory-dependent charge state and energy loss of relativistic heavy ions channeled in a silicon surface barrier detector, *Nucl. Instr. Meth. B* **193** (2002) 178-182.

F. A. Rajgara, D. Mathur, T. Nishide, T. Kitamura, H. Shiromaru, Y. Achiba and N. Kobayashi : Multi-hit, position-sensitive, time-of-flight spectrometry using MBWC anode, *Int. J. Mass Spectrom. and Ion Phys.* **215** (2002) 151-162.

G. Veshapidze, T. Nishide, H. Shiromaru, N. Kobayashi and T. Mizogawa : Position sensitive detector using resistive film anode combined with a "Modified Backgammon with Weighted Capacitors" readout pad, Jpn. J. Appl. Phys. **41** (2002) 871-875.

H. Hidaka, S. Jinno, H. Tanuma and N. Kobayashi : Mobility of NO^+ in helium gas at 77 and 4.3 K, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **36** (2003) 1515-1524.

2) 国際会議報告

T. Azuma : Resonant coherent excitation of heavy ions channeled in a crystal, *Photonic, Electronic & Atomic Collisions* (Rinton Press, 2002) 687-697.

H. Tanuma : Electron transfer to individual magnetic substates of multi-charged ions, *Correlations, Polarization, and Ionization in Atomic Systems* (American Institute of Physics, 2002) 270-275.

3) 学会講演

日本物理学会第 57 回年次大会 2002 年 3 月 24 日 ~ 3 月 27 日 (立命館大学びわこ・くさつキャンパス)

近藤力, 高林雄一, 東俊行, 小牧研一郎, 山崎泰規, 高田栄一, 村上健 : 160 MeV/u 水素分子イオンのチャネリングの試み

金安達夫, 東俊行, Michael Ehrich, 吉野益弘, 奥野和彦 : 低速多価イオン・二原子分子衝突における解離過程の散乱角依存性 II

石井邦和, 奥野和彦 : 低速多価イオンの電荷移行反応 XXVI: 衝突エネルギー依存性を考慮に入れたオーバーバリアモデルによる電荷移行反応断面積解析

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 : 相対論的多価イオンの干渉性共鳴励起 V: Fe イオンの脱励起 X 線測定

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 II

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 O_2He_n^+ クラスタイオンの移動度

原子衝突研究協会第 27 回研究会 2002 年 8 月 5 日 ~ 8 月 7 日 (京都大学)

奥野和彦 : 低エネルギーイオン衝突実験総集編 : 低エネルギー多価イオンの電荷移行反応 (依頼講演)

金安達夫, 東俊行, Michael Ehrich, 吉野益弘, 奥野和彦 : 低速多価イオン衝突における二原子分子の解離過程 - 電子状態の特定と散乱角依存性

日高宏, 神野智史, 的場史朗, 田沼肇, 小林信夫 : 極低温ヘリウム中における二価分子イオンの移動度

神野智史, 東俊行, 城丸春夫, 田沼肇, 児玉健, 奥野和彦, 小林信夫 : 東京都立大学における静電型イオン蓄積リングの建造計画

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振る舞い

野村雅人, 西出龍弘, A. Reinkoester, F. A. Rajgara, 城丸春夫, 阿知波洋次, 小林信夫 : 多価イオン衝突による CH_2Cl_2 の解離

日本物理学会 2002 年秋季年会 2002 年 9 月 6 日～9 月 9 日 (中部大学)

日高宏, 神野智史, 的場史朗, 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 III

田沼肇: 低温でのヘリウムクラスターイオン生成 (領域 1 シンポジウム「低速原子衝突と低温化学反応」)

G. Veshapize, 城丸春夫, 小林信夫: Ar^{8+} と H_2 , He の衝突で放出されたオージェ電子の位置敏感飛行時間測定

金安達夫, 東俊行, 吉野益弘, Michael Ehrich, 奥野和彦: 低速多価イオン衝突における二原子分子の崩壊過程 - 状態の選別と散乱角依存性

福田健太郎, 石井邦和, 奥野和彦: 低速多価イオンの電荷移行反応 XXVII: 2 価分子イオン衝突

近内亜紀子, 田沼肇, 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 V

東俊行, 高林雄一, 近藤力, 小牧研一郎, 山崎泰規, 高田栄一, 村上健: 相対論的多価イオンの干渉性共鳴励起 VI

近藤力, 東俊行, 高林雄一, 小牧研一郎, 山崎泰規, 高田栄一, 村上健: 相対論的多価イオンの干渉性共鳴励起 VII: H-like および He-like Ar, Fe イオンの脱励起 X 線強度角度分布異方性の測定

神原正, 金井保之, 中井陽一, 池田時浩, 福西暢尚, 高林雄一, 東俊行, 小牧研一郎, 山崎泰規: 結晶を用いた擬似光子場による多価イオンの高分解の分光

分子構造総合討論会 2002 年 10 月 1 日～10 月 4 日 (神戸国際会議場)

野村雅人, 西出龍弘, A. Reinkoester, F. A. Rajgara, 城丸春夫, 阿知波洋次, 小林 信夫: Ar^{8+} と CH_2Cl_2 の衝突により生成した解離断片の位置敏感飛行時間測定

立教大学物理学教室・談話会 2002 年 12 月 20 日 (立教大学)

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

第 3 回原子・分子・光・科学 (AMOS) 懇談会 2002 年 12 月 21 日 (東京大学・本郷キャンパス)

田沼肇: 低温ヘリウムガス中のイオン移動度

2002 年度宇宙空間原子分子過程研究会 2003 年 1 月 6 日～1 月 7 日 (宇宙科学研究所)

金安達夫, 東俊行, 奥野和彦, 吉野益弘: 低速多価イオン衝突における二原子分子の解離過程

東俊行, 村中友子, 近藤力, 畠山温, 小牧研一郎, 山崎泰規, 高田栄一, 村上健: コヒーレント共鳴励起における‘光子’

田沼肇, 近内亜紀子, 小林信夫: 多価イオンの電荷移行反応における Stark 効果の可能性

国際会議

International Workshop on Atomic Physics Reseaches at Storage Rings,
Lanzhou, China, 14-18 August, 2002

T. Azuma : Recent experiments on resonant coherent excitation of heavy ions at HIMAC (invited talk).

11th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions (HCI-2002),
Cean, France, 1-6 September, 2002

Y. Takabayashi, C. Kondo, T. Ito, T. Azuma, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada and T. Mirakami : High resolution spectroscopy of highly charged heavy ions using resonant coherent excitation phenomena (poster).

T. Ikeda, Y. Nakai, Y. Kanai, T. Kambara, N. Fukunishi, T. Azuma, K. Komaki, Y. Takabayashi and Y. Yamazaki : Development of a 5-axis high-precision goniometer for crystal assisted high-resolution spectroscopy of highly charged ions (poster).

A. Konnai, H. Tanuma and N. Kobayashi : Electron transfer to individual magnetic substates of $3p\ ^2P$ in collisions of helium-like ions with two-electron targets (poster).

T. Kaneyasu, T. Azuma, M. Ehrich, M. Yoshino and K. Okuno : State-selective scattering angular dependent fragmentation of N_2 by slow Kr^{8+} ion impact (poster).

T. Azuma, Y. Takabayashi, C. Kondo, T. Ito, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada and T. Mirakami : Anisotropic X-ray emission from resonant coherent excited highly-charged heavy ions (poster).

Y. Nakai, T. Ikeda, Y. Kanai, T. Kambara, N. Fukunishi, T. Azuma, K. Komaki, Y. Takabayashi and Y. Yamazaki : Resonant coherent excitation of 95 MeV/u Ar^{17+} ions channeling through a Si-crystal (poster).

M. Seliger, K. Tókési, C. O. Reinhold, J. Burgdörfer, Y. Takabayashi, T. Ito, K. Komaki, T. Azuma and Y. Yamazaki : Electron transport probed by convoy electron emission (poster).

The fifth Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics (AISAMP 5),
Nara, Japan, 2-5 October, 2002

T. Azuma : Recent experiments on resonant coherent excitation of heavy ions at HIMAC (invited talk).

J. Matsumoto, A. Danjo, M. Yoshino, H. Tanuma and N. Kobayashi : Measurements of differential cross sections for elastic scattering of electron from Ar^{7+} , Ar^{8+} ions (poster).

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

H. Tanuma, A. Konnai and N. Kobayashi : Alignment of $1s^23p\ ^2P_{3/2}$ states produced by one-electron transfer to He-like multiply charged ions (poster).

T. Kaneyasu, T. Azuma, M. Ehrich, M. Yoshino and K. Okuno : State-selective scattering angle resolved fragmentation of N_2 by slow highly charged ion impact (poster).

H. Shiromaru, M. Nomura, F. A. Rajgara, T. Nishide, Y. Achiba and N. Kobayashi : Coulomb explosion imaging of simple molecules (poster).

G. Veshapidze, H. Shiromaru and N. Kobayshi : Position-sensitive TOF measurements of Auger electrons originating from $\text{Ar}^{8+} + \text{H}_2$, He collision processes (poster).

S. Jinno, H. Tanuma, T. Azuma, K. Okuno, N. Kobayashi, K. Kodama and H. Shiromaru : Construction of electrostatic ion storage ring (poster).

8th Japan-Russia International Symposium on Interaction of Fast Charged Particles with Solids, Kyoto, Japan, 24-30 November, 2002

T. Azuma, T. Muranaka, Y. Takabayashi, T. Ito, C. Kondo, A. Hatakeyama, K. Komaki, Y. Yamazaki, S. Datz, E. Takada, and T. Murakami : Anisotropic X-ray emission from resonant coherently excited highly-charged heavy ions (invited talk).

K. Komaki, Y. Takabayashi, Y. Yamazaki, T. Azuma, M. Seliger, K. Tórkési, J. Burgdörfer, E. Takada, T. Murakami : Convoy electron production in relativistic heavy ion collisions (invited talk).

20th International Conference on Atomic Collision in Solids (ICACS 20), Puri, India, 19-24 January 2003

T. Azuma, Y. Takabayashi, T. Ito, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada and T. Murakami : Convoy electron emission from resonant coherently excited 390 MeV/u hydrogen-like Ar ions (poster).

C. Kondo, Y. Takabayashi, T. Muranaka, T. Azuma, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada and T. Murakami : X-ray emission from high-energy heavy ions channeled in a Si crystal (poster).

4) 学会誌等

T. Azuma, C. Kondo, T. Muranaka, Y. Takabayashi, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada and T. Murakami : X-ray emission from resonant coherently excited highly-charged heavy ions, *At. Coll. Res. Jpn.* **28** (2002) 10-13.

K. Fukuda, K. Ishii and K. Okuno : Study of charge transfer reactions in collisions of doubly charged molecular ions, N_2^{2+} , with N_2 and O_2 , *At. Coll. Res. Jpn.* **28** (2002) 14-15.

H. Hidaka, S. Matoba, S. Jinno, H. Tanuma and N. Kobayashi : Molecular ion mobility in helium gas at very low temperature, *At. Coll. Res. Jpn.* **28** (2002) 18-19.

T. Ikeda, Y. Nakai, Y. Kanai, T. Kambara, N. Fukunishi, T. Azuma, K. Komaki, Y. Takabayashi and Y. Yamazaki : Resonant coherent excitation of 94 MeV/u Ar^{17+} ions channeling through a Si-crystal, *At. Coll. Res. Jpn.* **28** (2002) 22-24.

T. Kaneyasu, T. Azuma, M. Ehrich, M. Yoshino and K. Okuno : State-selective angle-resolved fragmentation of molecules by slow highly charged ion impact, *At. Coll. Res. Jpn.* **28** (2002) 29-30.

A. Konnai, H. Tanuma and N. Kobayashi : Magnetic substate distribution in single-electron transfer collisions of He-like ions, *At. Coll. Res. Jpn.* **28** (2002) 33-35.

G. Veshapidze, H. Shiromaru and N. Kobayshi : Position sensitive TOF measurements of Auger electrons emitted by collisions of Ar^{8+} and Ar, *At. Coll. Res. Jpn.* **28** (2002) 50-51.

S. Jinno, T. Takao, Y. Omata, H. Tanuma, T. Azuma, K. Okuno, N. Kobayashi, A. Satou, K. Kodama and H. Shiromaru : Construction of electrostatic ion storage ring, *At. Coll. Res. Jpn.* **28** (2002) 78-79.

5) 著書

K. Okuno: Application of the beam guide technique to low energy collision experiments, in "*The Physics of Multiply and Highly Charged Ions*", ed. by F. J. Currell, (Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 2002) pp.217-234.

光物性研究室

1. 研究活動の概要

1) 電子状態を特定した「局所帯磁率」の温度依存性の測定

昨年度に引き続いて、内殻励起磁気円二色性 (MCD) を用いて、希土類金属を含む合金を試料として、 $4f$ 電子状態の担う「局所帯磁率」を測定した。CeNi など「コヒーレント近藤系」と呼ばれる物質では、 $4f$ の局所帯磁率の温度依存性はバルクの帯磁率の温度依存性と大きく異なっており、むしろありふれた希薄近藤物質の振る舞いに近かった。すなわち、Curie-Weiss プロットをすると、高温側では直線ののり、これを延長して負の温度軸を横切る「ワイス温度」はバルクの「近藤温度」よりもはるかに低温であり、また帯磁率が飽和してフラットになり始める温度も同様の傾向を示した。Ni の MCD は観測されなかったから、このことはバルク帯磁率に $5d$ 電子の寄与が含まれていることを示唆する。また、この実験手法は、適当な核種がなくて NMR が困難な物質についても新しい局所磁気測定の可能性を示しており、高輝度光源が十分な時間をもって利用できれば今後も大きく発展することが期待される。将来は、より低温にできる環境、磁場を可変にできる環境を整えて行く必要があり、場合によっては室温よりはるかに高温の測定も可能にする必要がある。

2) 内殻励起発光磁気円二色性によるバルク敏感な磁化評価

内殻励起発光磁気円二色性 (MCD) とは、磁性体に右および左円偏光 X 線を入射したとき、磁性体からの発光スペクトルに差が生じる現象である。発光 MCD スペクトルを計測する磁化評価法は、これまで数多く行われてきた全光電子収量法による内殻励起吸収 MCD 測定と比較して、(1) 電子状態について遥かに多くの知見が得られる、(2) 光電子が関与しないので磁性体のバルク磁化状態が分かる、等いくつかの重要な利点がある。この様な特徴を利用して、膜厚のことなる数種類の Gd/Co 多層膜を作製し、Gd の $4d-4f$ および Co の $3p-3d$ 共鳴内殻励起発光 MCD による磁化評価をフォトンファクトリーで試みた。過去に Gd の $3d-4f$ および Co の $2p-3d$ 内殻励起吸収 MCD で観測されたのと同様に、Gd と Co の磁化は互いに反強磁性的に結合し、Gd の原子数濃度約 25 % 程度を境にそれぞれの磁化の向きが反転することが発光 MCD でも見出せた。しかし、吸収 MCD で見積もられた Gd の磁化の方が、印加磁場方向の磁化成分が大きいことが分かった。これは、多層膜表面第一層目が Gd であること、多層膜内部と表面の磁化状態が異なっていることが原因であるためだと考えられる。バルク敏感な発光 MCD 測定と表面敏感な吸収 MCD 測定を組み合わせることで、試料のバルクおよび表面の磁化状態を評価できることが明らかになった。

3) 単層カーボンナノチューブの高分解能光電子分光

単層カーボンナノチューブ (SWNT) は、その幾何学的構造に由来する奇妙な電子状態をもっている。チューブの周方向の電子状態は、周期的境界条件により量子化されて、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、チューブ軸方向では1次元電子系とみなされ、朝永・ラッティンジャー液体といわれる特殊な電子状態になっていることが予想されている。我々は SWNT の高分解能光電子分光を、フォトンファクトリーと広島大学 HiSOR で行った。その結果、van Hove 特異点によるピーク構造を、光電子分光では世界で初めて観測に成功した。また、フェルミ準位付近のスペクトル関数は、エネルギー (ω) に対して $\omega^{0.46}$ のべき乗則を示し、フェルミ準位の状態密度は、温度 (T) に対して $T^{0.5}$ のべき乗則を示した。これらの結果は、理論から予想された関数とよく一致しており、SWNT において朝永・ラッティンジャー液体状態が実現していることの直接的な証拠である。

4) 単層カーボンナノチューブの合成と応用

レーザーアブレーション法により合成した単層カーボンナノチューブを高度に精製し、内包系や応用研究において、いくつかの興味深い結果を得た。ミクロ物性研究室の真庭等との共同研究では、ナノチューブ内部に水を挿入した系で、低温で氷のナノチューブが形成されることを X 線回折により見いだした。産総研との共同研究では、近赤外に見られるナノチューブ固有の吸収帯において、光強度が増すほどに透過率が増すという可飽和吸収効果が顕著に観測されることを見いだした。光通信に使われる 1.55 ミクロン帯に吸収を合わせた試料を作製し、その薄膜をファイバーレーザーの共振器に挿入したところ、CW 発振からピコ秒のモードロック発振へと変化し、実際に安価なモードロックレーザーが作製出来ることを示した。これらの非線形光学へのナノチューブの応用は、これまでの応用と異なり、ナノチューブ固有の電子構造・1次元性を活用した物であり、他の物質では代替できないものである。今後大きな広がりをもつ研究開発分野になることが期待される。このほか、2層カーボンナノチューブの構造と光学的性質の詳細な研究を真庭や Wien 大学の Kuzmany 等と行い、ナノチューブ内に生成されるナノチューブの生成機構や、出来たナノチューブに欠陥がほとんど無いことなどが明らかになった。また、金属塩化物を用いて金属内包ナノチューブの合成に成功した。

2. 研究業績

1) 論文

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 the VUV region, *Surf. Rev. & Lett.* **9**, No.1, (2002) 631 - 634.

T. Miyahara, H. Ishii, K. Obu, M. Shinoda, Y. Takayama, T. Muro, T.D. Matsuda, H. Sugawara, H. Sato: Precursor Nonmagnetic States of $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ and CePd_3 Detected by Core Excitation MCD, *Surf. Rev. & Lett.* **9** No.2, (2002) 831 - 835.

Y. Takayama, H. Ohtsubo, M. Shinoda, K. Obu, C. Lee, H. Shiozawa, H. Ishii, T. Miyahara, J. Okamoto: Magnetic Circular Dichroism of 4d-4f resonant x-ray emission for Gadolinium and Terbium, *Surf. Rev. & Lett.* **9** No.2, (2002) 837 - 841.

H. Ishii, T. Miyahara, Y. Takayama, K. Obu, M. Shinoda, C. Lee, H. Shiozawa, S. Yuasa, T.D. Matsuda, H. Sugawara, H. Sato: Resonant Photoemission Study of $\text{RFe}_4\text{P}_{12}$ (R=La, Ce, Pr), *Surf. Rev. & Lett.* **9**, No.2, (2002) 1257 - 1261.

H. Shiozawa, T. Miyahara, H. Ishii, Y. Takayama, K. Obu, T. Muro, Y. Saitoh, T. D. Matsuda, H. Sugawara, H. Sato: Measurement of temperature dependence of "localized susceptibility", *Nucl. Instr. & Meth. B* **199**, (2003) 318 - 322.

T. Pichler, A. Kukovecz, H. Kuzmany, H. Kataura, Y. Achiba: Quasicontinuous electron and hole doping of C_{60} peapods, *Phys. Rev. B* **67** (2003) pp. 125416-1 - 7.

D. Nishide, H. Kataura, S. Suzuki, K. Tsukagoshi, Y. Aoyagi, Y. Achiba: High-yield production of single-wall carbon nanotubes in nitrogen gas, *Chem. Phys. Lett.*, **372** (2003) pp. 45-50.

H. Kuzmany, R. Pfeiffer, C. Kramberger, T. Pichler, X. Liu, M. Knupfer, J. Fink, H. Kataura, Y. Achiba, B. W. Smith, D. E. Luzzi: Analysis of the concentration of C_{60} fullerenes in single wall carbon nanotubes, *Appl. Phys. A* **76** (2003) pp. 449-455.

- Y. Maniwa, H. Kataura, M. Abe, A. Fujiwara, R. Fujiwara, H. Kira, H. Tou, S. Suzuki, Y. Achiba, E. Nishibori, M. Takata, M. Sakata, H. Suematsu: C₇₀ Molecular Stumbling Inside Single-Walled Carbon Nanotubes, *J. Phys. Soc. Jpn.* **72** (2003) pp. 45 - 48.
- Y. Maniwa, H. Kataura, M. Abe, S. Suzuki, Y. Achiba, H. Kira, K. Matsuda: Phase Transition in Confined Water Inside Carbon Nanotubes, *J. Phys. Soc. Jpn.* **71** (2002) pp. 2863 - 2866.
- N. Choi, M. Kimura, H. Kataura, S. Suzuki, Y. Achiba, W. Mizutani, H. Tokumoto: Effect of Amines on Single-Walled Carbon Nanotubes in Organic Solvents: Control of Bundle Structures, *Jpn. J. Appl. Phys.* **41** (2002) pp. 6264 - 6266.
- Y. Iwasa, H. Fudo, Y. Yatsu, T. Mitani, H. Kataura, Y. Achiba: Intercalation Processes of Single-Walled Carbon Nanotube Ropes, *New Diamond and Frontier Carbon Technology*, **12** (2002) pp. 325 - 330.
- X. Liu, T. Pichler, M. Knupfer, M. S. Golden, J. Fink, H. Kataura, Y. Achiba: Detailed analysis of the mean diameter and diameter distribution of single-wall carbon nanotubes from their optical response, *Phys. Rev. B* **66** (2002) pp. 045411-1-8.
- X. Zhao, Y. Ando, L-C. Qin, H. Kataura, Y. Maniwa, R. Saito: Characteristic Raman spectra of multiwalled carbon nanotubes, *Physica B* **323** (2002) pp. 265 - 266.
- M. Ichida, Y. Hamanaka, H. Kataura, Y. Achiba, A. Nakamura: Ultrafast relaxation dynamics of photoexcited states in semiconducting single-walled carbon nanotubes, *Physica B* **323** (2002) pp. 237 - 238.
- K. Ichimura, M. Osawa, K. Nomura, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki, Y. Achiba: Tunneling spectroscopy on carbon nanotubes using STM, *Physica B* **323** (2002) pp. 230 - 232.
- S. Masubuchi, K. Ooiwa, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki, Y. Achiba, S. Kazama: Thermoelectric power of single walled carbon nanotubes containing alcohol molecules, *Physica B* **323** (2002) pp. 267 - 268.
- A. Fujiwara, R. Iijima, H. Suematsu, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki, Y. Achiba: Local electronic transport through a junction of SWNT bundles, *Physica B* **323** (2002) pp. 227 - 229.
- X. Zhao, Y. Ando, L.C. Qin, H. Kataura, Y. Maniwa, and R. Saito: Multiple splitting of G-band modes from individual multiwalled carbon nanotubes, *Appl. Phys. Lett* **81** (2002) pp. 2550 - 2552.
- Masao Ichida, Shuhei Mizuno, Yahachi Saito, Hiromichi Kataura, Yohji Achiba, and Arao Nakamura: Coulomb effects on the fundamental optical transition in semiconducting single-walled carbon nanotubes: Divergent behavior in the small-diameter limit, *Phys. Rev. B* **65** (2002) pp. 241407(R) 1 - 4.
- X. Zhao, Y. Ando, L.C. Qin, H. Kataura, Y. Maniwa, R. Saito: Radial breathing modes of multiwalled carbon nanotubes, *Chem. Phys. Lett.* **361** (2002) pp. 169 - 174.
- L. Kavan, L. Dunsch and H. Kataura: In-situ Vis-NIR and Raman Spectroelectrochemistry at Fullerene Peapods, *Chem. Phys. Lett.* **361** (2002) pp. 79 - 85.

M. Shiraishi, T. Takenobu, A. Yamada, M. Ata and H. Kataura: Hydrogen storage in single-walled carbon nanotube bundles and peapods, Chem. Phys. Lett. **358** (2002) pp. 213 - 218.

R. Pfeiffer, H. Kuzmany, W. Plank, T. Pichler, H. Kataura, and Y. Achiba: Spectroscopic analysis of single-wall carbon nanotubes and carbon nanotube peapods, Diamond and Related Materials, **11** (2002) pp. 957 - 960.

2) 国際会議報告

H. Kataura, M. Abe, A. Fujiwara, T. Kodama, K. Kikuchi, Y. Misaki, S. Suzuki, Y. Achiba, and Y. Maniwa: Fullerene Peapods and Double Wall Nanotubes: Structures and Optical Properties, Proc. of IWEPM2002, AIP conference Proceeding **633** (2002) pp. 103 - 107.

R. Pfeiffer, T. Pichler, M. Holzweber, W. Plank, H. Kuzmany, H. Kataura, and D. E. Luzzi: Concentration of C_{60} Molecules in SWCNT, Proceeding of IWEPM2002, AIP conference Proceeding **633** (2002) pp. 108 - 112.

T. Pichler, A. Kukovecz, H. Kuzmany, H. Kataura, and Y. Achiba: Charge Transfer in Intercalated C_{60} Peapods, Proceeding of IWEPM2002, AIP conference Proceeding **633** (2002) pp. 118 - 122.

L. Kavan, L. Dunsch and H. Kataura: In-situ Raman Spectroelectrochemistry on Fullerene Peapods, Proc. of IWEPM2002, AIP conference Proceeding **633** (2002) pp. 123 - 126.

A. Fujiwara, Y. Matsuoka, R. Iijima, H. Suematsu, N. Ogawa, K. Miyano, K. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki, and Y. Achiba: Photoconductivity and Local Transport Properties of Single-Wall Carbon Nanotubes, Proceeding of IWEPM2002, AIP conference Proceeding **633** (2002) pp. 247 - 250.

X. Liu, T. Pichler, M. Knupfer, M. S. Golden, J. Fink, and H. Kataura: Electronic Structure of Intercalated Single-Wall Carbon Nanotubes, Proceeding of IWEPM2002, AIP conference Proceeding **633** (2002) pp.267 - 270.

3) 学会講演

日本物理学会 第57回年次大会：2002年3月24日(日) - 27日(水) (立命館大学)

塩澤秀次, 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, 室隆佳之, 岡本淳, 齋藤祐児: 局在磁気モーメントの温度依存性

大部健司, 大坪英雄, 李徹, 塩澤秀次, 高山泰弘, 石井広義, 宮原恒あき, 金山友幸, 湯浅清司, 松田達磨, 青木勇二, 菅原仁, 佐藤英行: RFe_4P_{12} と RRu_4Sb_{12} (R=La, Ce, Pr) の共鳴光電子分光

高山泰弘, 大坪英雄, 大部健司, 石井広義, 宮原恒あき: Ce および Pr 化合物の 4d-4f 共鳴逆光電子分光装置の開発

安藤義則, 趙新洛, 片浦弘道, 齋藤理一郎: 多層カーボンナノチューブの RBM

趙新洛, 安藤義則, 片浦弘道, 齋藤理一郎: 多層カーボンナノチューブの G-バンドの分裂

阿部真利, 真庭豊, 吉良弘, 藤原竜児, 片浦弘道, 鈴木信三, 阿知波洋次, 高田昌樹, 坂田誠, 加藤健一: 二層カーボンナノチューブの X線回折

片浦弘道，兒玉健，菊地耕一，鈴木信三，阿知波洋次: 2層カーボンナノチューブの共鳴ラマン散乱

第23回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム：2002年7月17日-19日（松島大観荘）

M. Shiraishi, T. Takenobu, M. Ata, and H. Kataura: Hydrogen storage in single-walled carbon nanotubes and peapods

Y. Ando, X. Zhao, H. Kataura, Y. Maniwa, and R. Saito: Characteristic Raman spectra of multiwalled carbon nanotubes

Y. Maniwa, H. Kataura, M. Abe, A. Fujiwara, R. Fujiwara, H. Kira, S. Suzuki, Y. Achiba, E. Nishibori, M. Takata, M. Sakata, and H. Suematsu: Phase transition of one-dimensional C₆₀ and C₇₀ crystals at the inside of SWNTs

L. Kavan, L. Dunsch, and H. Kataura: In-situ Raman spectro-electrochemistry on fullerene peapods

M. Ichida, Y. Hamanaka, H. Kataura, Y. Achiba, and A. Nakamura: Femtosecond spectroscopy in single-walled carbon nanotubes

T. Tamaki, H. Kataura, S. Suzuki, and Y. Achiba: The ambient gas effects of the fullerene formation process

Y. Tanaka, H. Murakami, N. Nakashima, H. Kataura and Y. Achiba: Sidewall-functionalized water soluble fullerene-encapsulated carbon nanotubes

M. Abe, Y. Maniwa, H. Kira, K. Matsuda, H. Kataura, S. Suzuki, and Y. Achiba: Adsorption of water molecules at the inside of SWNTs

N. Choi, H. Kataura, S. Suzuki, and Y. Achiba: Chromatographic separation of carbon nanotubes

D. Nishide, H. Kataura, S. Suzuki, and Y. Achiba: The ambient gas effect on the formation of single-wall carbon nanotube

A. Tsuchiya, H. Kataura, S. Suzuki, and Y. Achiba: Time scale of single-wall carbon nanotube formation

日本物理学会 2002年秋季大会：2002年9月6日（金）- 9日（月）（中部大学）

塩澤秀次，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，斎藤祐児: CeRu₂Si₂ 及び CeCo₂Ge₂ における Ce4f 磁気モーメントの温度依存性

大坪英雄，塩澤秀次，高山泰弘，宮原恒あき: CeCo₂，CeNi，Co，Ni の共鳴逆光電子分光

石井広義，大坪英雄，大部健司，塩澤秀次，高山泰弘，宮原恒あき，金山友幸，湯浅清司，松田達磨，青木勇二，菅原仁，佐藤英行: RFe₄P₁₂ と RRu₄Sb₁₂(R=La, Ce) の共鳴光電子分光

高山泰弘，大坪英雄，篠田元樹，大部健司，李徹，塩澤秀次，石井広義，宮原恒あき，岡本淳: Co，Ni の 3p-3d 励起発光 MCD 測定

阿部真利，吉良弘，藤原竜児，松田和之，真庭豊，片浦弘道，鈴木信三，阿知波洋次: 水を吸着した単層ナノチューブの X 線回折

塩澤秀次, 石井広義, 片浦弘道, 大坪英雄, 高山泰弘, 宮原恒あき, 鈴木信三, 阿知波洋次: 単層カーボンナノチューブの光電子分光

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

Ladislav Kavan, Lothar Dunsch, 片浦弘道: Fullerene-peapod への電気化学ドーピング

宇高彰子, 阿部真利, 吉良弘, 真庭豊, 片浦弘道, 鈴木信三, 阿知波洋次: アルカリ金属をドーブしたカーボンナノチューブの X 線回折

第 24 回 フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム: 2003 年 1 月 8 日-10 日

(岡崎コンファレンスセンター)

片浦弘道, 塚越一仁: DNA を内包した単層カーボンナノチューブのラマン散乱

阿部真利, 片浦弘道, 鈴木信三, 阿知波洋次, 吉良弘, 宇高彰子, 神島謙二, 松田和之, 真庭豊: SWNT への水の吸蔵: 同位体効果

木村美緒, 片浦弘道, 鈴木信三, 阿知波洋次: 水蒸気処理による HiPco ナノチューブの精製

宇高彰子, 片浦弘道, 阿部真利, 鈴木信三, 阿知波洋次, 吉良弘, 神島謙二, 松田和之, 真庭豊: SWNT へのインターカレーション過程の研究: カリウム

玉城孝憲, 鈴木信三, 西出大亮, 西瀬元樹, 片浦弘道, 阿知波洋次: フラーレン生成に及ぼす金属の影響

第 16 回 日本放射光学会合同シンポジウム: 2003 年 1 月 9 日-11 日 (イーグレひめじ)

塩澤秀次, 石井広義, 片浦弘道, 宮原恒あき, 鈴木信三, 阿知波洋次, 仲武昌史: カーボンナノチューブの光電子分光

石井広義, 大坪英雄, 塩澤秀次, 高山泰弘, 宮原恒あき, 金山友幸, 湯浅清司, 松田達磨, 青木勇二, 菅原仁, 佐藤英行: RFe_4P_{12} と RRu_4Sb_{12} ($R=La, Ce$) の共鳴光電子分光

高山泰弘, 吉田徹夫, 大坪英雄, 塩澤秀次, 石井広義, 宮原恒あき, 岡本淳: Gd/Co 多層膜の内殻励起共鳴発光磁気円二色性測定

国際会議

International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals, Shanghai

International Convention Centre, June 29 - July 5, 2002, Shanghai, China

H. Kataura, Y. Maniwa, H. Ishiii, T. Kodama, Y. Misaki, S. Suzuki, and Y. Achiba: Synthesis, Structural Analysis, and Optical Properties of Fullerene-peapods and Double-Wall Carbon Nanotubes **(invited paper)**

T. Pichler, A. Kukovecz, H. Kuzmany, and H. Kataura: Charge Transfer in Doped Single Wall Carbon Nanotubes **(invited paper)**

T. Takenobu, M. Shiraishi, A. Yamada, M. Ata, H. Kataura, and Y. Iwasa: Hydrogen Storage at Moderated Temperature in SWNT Bundles and Peapods

NT'02, International Conference on the Science and Application of Nanotubes, July 6- 11, 2002,
Boston College, USA

H. Kataura, Y. Maniwa, T. Kodama, Y. Misaki, S. Suzuki and Y. Achiba: Optical properties of double wall carbon nanotubes converted from peapods

T. Pichler, A. Kukovecz, H. Kuzmany, H. Kataura, Y. Achiba: Charge transfer in n- and p-doped single wall carbon nanotubes (SWCNT) and C₆₀ peapods

H. Ishii, H. Kataura, S. Suzuki, Y. Achiba and T. Miyahara: Photoemission spectroscopy of single-wall carbon nanotubes

26th International Conference on the Physics of Semiconductors, July 29 - August 2, 2002
Edinburgh, UK

M Ichida, Y Hamanaka, H Kataura, Y Achiba, A Nakamura: Ultrafast relaxation dynamics of photoexcited carriers in single-walled carbon nanotubes

XVIIIth International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials
(IWEPNM2003), March 8 - 15, Kirchberg/ Tirol AUSTRIA

H. Kataura, Y. Maniwa, H. Ishii, H. Shiozawa, S. Suzuki, Y. Achiba: One-dimensional system in carbon nanotubes (**invited paper**)

A. Kukovecz, M. Smolik, S.N. Bokova, E.D. Obrastova, H. Kataura, Y. Achiba, H. Kuzmany: Artificial neural networks in analysis of the fine structure of the SWCNT Raman G- band

M. Shiraishi, T. Takenobu, M. Ata, H. Kataura: Recent progress in hydrogen adsorption in SWNTs

R. Pfeiffer, Ch. Kramberger, Ch. Schaman, A. Sen, M. Holzweber, H. Kuzmany, H. Kataura, Y. Achiba: Spectroscopic properties of CNTs beyond simple tight binding (**invited paper**)

L. Kavan, L. Dumsch, H. Kataura: Tuning of electronic structure of C₆₀@SWCNT and C₇₀@SWCNT (peapods): in- situ Raman and VIS-NIR spectroelectrochemical study (**invited paper**)

A. Fujiwara, Y. Matsuoka, N. Ogawa, K. Miyano, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki, Y. Achiba: Temperature dependence of photoconductivity of SWNTs

Ch. Kramberger, R. Pfeiffer, Ch. Schaman, H. Kuzmany, H. Kataura: Assignment of chiral vectors in carbon nanotubes (CNTs)

X. Liu, T. Pichler, M. Knupfer, J. Fink, H. Kataura: Electronic properties of n- and p-doped single wall carbon nanotubes (SWCNT) and C₆₀ peapods

H. Shiozawa, H. Ishii, H. Kataura, H. Yoshioka, H. Otsubo, Y. Takayama, T. Miyahara, S. Suzuki, Y. Achiba, M. Nakatake, T. Narimura, M. Higashiguchi, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi: Electronic structure of single-wall carbon nanotubes: valence-band photoemission study

Optical Fiber Communication Conference 2003, March 23 - 28 (2003), Atlanta, Georgia, USA

S. Y. Set, H. Yaguchi, M. Jablonski, Y. Tanaka, Y. Sakakibara, A. Rozhin, M. Tokumoto, H. Kataura, Y. Achiba, K. Kikuchi: A noise suppressing saturable absorber at 1550 nm based on carbon nanotube technology

S. Y. Set, H. Yaguchi, M. Jablonski, Y. Tanaka, Y. Sakakibara, A. Rozhin, M. Tokumoto, H. Kataura, Y. Achiba, K. Kikuchi: Mode-locked fiber lasers based on a saturable absorber incorporating carbon nanotubes (**post deadline paper**)

4) 著書

片浦弘道: 「カーボンナノテクノロジーの基礎と応用」、第2章、2.2「フラーレン入りナノチューブの生成、サイペック(株)(2002)、 pp. 42 - 53.

ミクロ物性研究室

1. 研究活動の概要

1) 主に電子スピン共鳴法による研究

電子スピン共鳴 (ESR) 法を中心に幾つかの物質について研究を進めている。通常は X - バンド (10 GHz) が使われることが多いが、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。今年度から、分子研の加藤立久先生との協力研究により、Q-バンド (34 GHz) 及び、W-バンド (約 94 GHz) ESR も利用して、更に強力な体制を整えた。

この種の研究が可能なグループは、単一の研究室としては世界的に見ても殆ど例がない。本研究手段の特徴を幾つかあげてみよう。低次元電子系では、スピン担体の微視的なダイナミクスの異方性を定量的に見積れ、多結晶試料にも適用できる。静水或いは一軸加圧下での ESR 実験も可能で、任意の軸のみ或いは一様に格子定数を変えて、電子間、電子格子間の相互作用を変調し、物性発現に寄与する相互作用を調べられる。物構研の松本先生のご協力により、CrNiAl 材を内筒に用いた超高压用セルや、クランプ型ではないその場加圧用のプローブも作成準備中である。以下に今年度行われた研究の概要を整理する。

ア) 生物の遺伝情報をつかさどるデオキシリボ核酸 (DNA) は、磷酸、糖に 4 種のアミノ基を組み合わせた梯子構造からなる有機高分子である。ナノマニピュレーション技術の発展に伴い、DNA 一本、或いはバンドルの電気輸送特性が、絶縁体、金属、超伝導の近接効果と種々報告された。一方、 $ZnCl_2$ を用いて Zn^{2+} をドーピングし、ナノサイズの分子電線の報告もされた。そこで、サケの DNA の電子状態を調べている。その結果、DNA は ESR 信号を与えるスピンを持たず、電気伝導度から結論された金属、或いはギャップの小さな半導体とは相容れないことがわかった。スピンを持たない荷電ソリトンによる電気伝導も考えられるが、超伝導の近接効果は DNA 単体では理解しがたい現象だと結論される。現在、種々の方法でドーピングを行った DNA について研究を進めている。

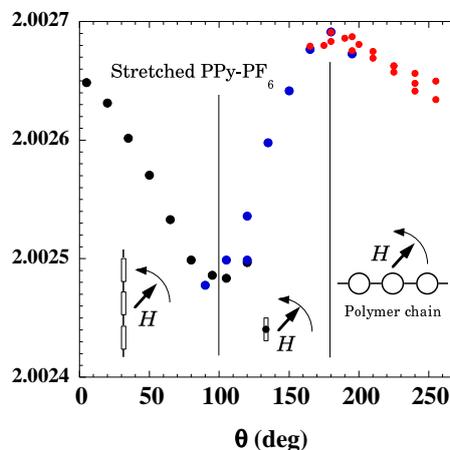


図 1: 単結晶的な配向を示す PPy-PF₆ フィルムの異方的 g-因子

イ) 導電性高分子のポリピロール (PPy)、ポリヘキシルチオフェン (PHT) について、Q-バンド及び、W-バンドにより高精度で g-値を測定した。PPy は中央大学、東京医科大学と、PHT はノルウエー工科大学との共同研究である。導電性高分子の一つの壁は、単結晶作成が困難な点にある。単結晶により導

電性高分子の基礎的な性質が更に明確になると共に、応用面でもそのメリットは大きい。W-band ESR を用いた解析を、有機溶媒中で電気化学的に合成した PPy と、水面上に展開して作成した PHT 膜について行った。その結果、高分子のユニットである 5 つの原子のリング (5 員環) 面が、フィルム面に対して垂直に並んでいることが分かった。更に、これらのフィルムを機械的に延伸配向させると、ほぼ単結晶的な配向が得られることを示した (図 1 参照)。

ウ) 強磁性体 TDAE-C₆₀ の単結晶の一軸変位下の ESR により、我々が提案してきたモデルの検証実験を進めている。転移温度の静水圧依存性と定性的、定量的に一致するモデルを産総研の川本徹氏、徳本圓氏との共同研究により進めてきた。それは、協力的ヤン・テラー効果で歪んだ C₆₀ ボールの反強磁性的な軌道秩序を起源とする。このモデルの検証に加えて、TDAE 分子の強磁性に対する関与を調べるために 1 軸変位の実験を行い、b 軸方向に変位させると強磁性転移温度が更に上昇することを見出した。現在、他の方向の変位の研究を進めている。また、TDAE 分子上のスピンの生き返ることを見出した高分子の β-TDAE-C₆₀ についてもその電子状態を明らかにするために研究を進めている。(産総研との共同研究)

エ) DMe-DCNQI スタックと Li スタックから成る $\frac{1}{4}$ -filled の一次元 電子系 (DMe-DCNQI)₂Li は転移温度 65 K のスピンパイエルス (SP) 基底状態を持つ。強い電子相関のため 2 つのハバードバンドに分裂し、実質的な half-filled バンドは 2 量体化し $4k_F$ 電荷密度波 (CDW) が実現している。クーロン反発 U のため電荷ホッピングは起こり得ないが、65 K 以上で 10~150 S/cm と電気伝導度が高いため CDW の集団的運動が提案されてきた。しかし、W-band ESR からスピンのスタック間ホッピングが電気伝導度と同じ 250 K 程度の熱励起温度を持つことから、CDW の集団運動ではない新たな電荷の輸送機構が必要になる。可能な機構として、分数電荷を持つホール及びスピンソリトンの熱生成を提案した。(理研、分子研との共同研究)

オ) (BEDT-TTF)(ClMeTCNQ)、(BEDO-TTF)(Cl₂TCNQ) は、ドナー、アクセプター分子が交互に並んだ柱から成り、中性相、イオン性相の二種の相が存在し得る。これらの系では、BEDT-TTF、BEDO-TTF 分子の強い二次元的相互作用が低温の SP 転移を押さえる可能性があるが、(BEDT-TTF)(ClMeTCNQ) では電子スピン磁化率から中性-イオン性 (N-I) 転移と SP 転移が同時に起こった。また、室温で常圧から N-I 転移の起こる 10kbar まで上げると、磁化率が急激に増加した。これは、転移に近づく過程で中性相中のイオン性相ドメインの発達を磁氣的にとらえたものと思われる。一方、室温、常圧でイオン性相の (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 SP 転移が起きているように見えることがわかった。(産総研との共同研究)

2) 超伝導およびナノクラスター凝縮体の物性研究

我々 (松田、真庭ら) は、ナノメートルサイズの特徴的な構造を有する物質系について、核磁気共鳴 (NMR)、磁化測定、電気伝導度測定、X 線回折実験などの方法を用いた物性研究と、そのための手法の開発を行っている。2002 年度 (平成 14 年度) における研究活動の概要は次のとおりである。なお、2002 年 4 月より松田和之氏 (姫路工業大学学振特別研究員) を助手として迎えることになった。

ア) 光照射 NMR 実験: NMR 法は物質のミクロの構造、電子状態、運動状態を調べる強力な手段であ

り、物理学、化学、生物学などの広い領域で利用されている。また、医療分野では非破壊的な断層撮像法 (MRI) として広く一般に知られている。しかし、感度が他の方法と比較して格段と低いため、界面、薄膜、微細試料などの研究には不向きであるとされてきた。我々は、このような NMR の低感度を克服して、微細領域の NMR を可能にする方法を開発し、特に薄膜・界面における種々の物性発現機構を研究する強力なプローブとして確立することを試みている。本年度は、光励起された電子と核スピンとの相互作用を利用して NMR の信号増大を図る光照射 (ポンプ) 法の装置を立ち上げた。GaAs 結晶の光照射 NMR 実験を行い、150 倍以上の信号増大効果を確認した (図 2 参照)。

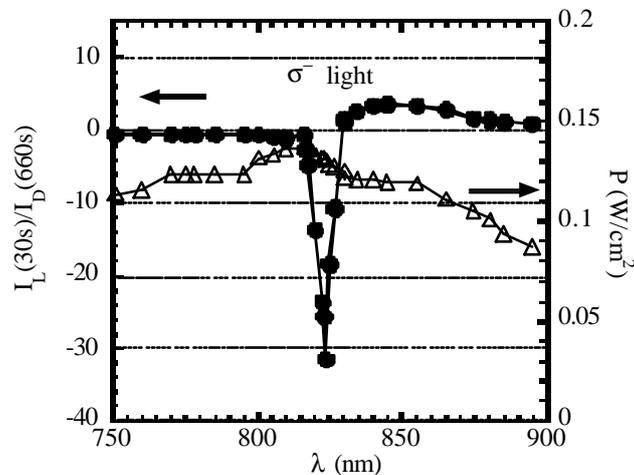


図 2: ^{69}Ga 光ポンプ NMR 信号の励起波長依存性

イ) ゼオライトの空隙内に形成された電子系の研究: ゼオライト結晶ではナノメートルサイズの空隙が周期的に配列し、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 (超原子)” を形成する。したがって、アルカリ金属を吸蔵したゼオライトは、規則的に配列した空隙原子の結晶であるとみなす事ができ、新規物性発現の舞台となる。我々は昨年度に引き続いてカリウムを吸蔵したゼオライト LTA の強磁性発現機構の研究を行った。ゼロ磁場および縦磁場 μSR 緩和と高磁場 NMR スペクトルの同時解析を行い、もっとも確からしい磁気構造モデルに到達した。また、FAU 型ゼオライトにおける熱的着色現象の機構を明らかにするために、高温 ESR 測定を行った (中央大学風間、東京医科大増淵氏らとの共同研究)。物質開発では、高シリカゼオライト FAU のナノ構造を利用して、ナノ磁性体の作製に成功した (科学技術振興財団ポスドク研究員神島氏との共同研究)。

ウ) カーボンナノチューブの構造と相転移 (光物性研究室片浦氏との共同研究): 単層カーボンナノチューブの 1 次元ナノ空洞内に水が大量に吸蔵されることを確認し、さらにこの水が低温で環状氷 (アイスナノチューブ) に転移することを発見した。また、 C_{60} ピーポットを高温加熱することにより得られる 2 層カーボンナノチューブ (DWNT) の構造研究を行い、多層カーボンナノチューブの層間距離と生成機構について重要な知見を得ることができた。

エ) 新規超伝導体の研究: 昨年度に引き続き、2 次元超伝導体 HfNiCl 、 MgB_2 やシリコンクラスレート超伝導体の超伝導機構を研究した。(広島大学藤、山中氏、東北大学岩佐氏らと共同研究)

オ) 学外共同利用施設による研究:高エネルギー加速器研究機構 (KEK PF) と高輝度光科学研究センター (SPring 8) の放射光施設において共同利用実験を行った。以下に課題名 (課題番号) を示す。(1) 多層カーボンナノチューブの熱膨張率 (2002A0266-ND1-np/Spring-8)、(2) 単層カーボンナノチューブ内に形成されたフラーレン結晶の構造相転移 (2002B0425-ND1-np/Spring-8) (3) 磁性分子を内包した単層カーボンナノチューブの構造 (2003A0302-ND1-np/Spring-8) (4) 磁性分子を内包した SWNT の磁性 (2003A0301-NS1-np/Spring-8) (5) カーボンナノストラクチャーの研究 (2002G215/PF) (6) ナノ構造炭素の磁性 (2003G002/PF)。また、東北大学金属材料研究所において、(7) ナノクラスター薄膜の作製と微小領域 NMR (採択番号 126) に関する共同利用研究を行った。

2. 研究業績

1) 論文

M. Hiraoka, H. Sakamoto, K. Mizoguchi and R. Kato: Spin soliton dynamics and magnetic susceptibility of (DMe-DCNQI)₂Li by ESR under pressure, *Synth. Met.* **133-134**, 417-418 (2003).

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 fullerides studied by ESR under pressure, *Synth. Met.* **133-134**, 695-696 (2003).

H. Sakamoto, K. Mizoguchi and T. Hasegawa: ESR studies of (BEDT-TTF)(ClMeTCNQ) under pressure, *Synth. Met.* **133-134**, 627-628 (2003).

M. Hiraoka, H. Sakamoto, K. Mizoguchi and R. Kato: Evidence for spin solitons and their dynamics in a spin-Peierls system (DMe-DCNQI)₂Li, *Phys. Rev. B* **65**, 174413(4) (2002).

B.-H. Kim, J.-H. Jung, S.-H. Hong, J. Joo, A. J. Epstein, K. Mizoguchi, J. W. Kim and H. J. Choi: Nanocomposite of polyaniline and Na⁺-montmorillonite clay, *Macromolecules* **35**, 1419-1423 (2002).

H. Tou, Y. Maniwa and S. Yamanaka: Superconducting characteristics in electron-doped layered hafnium nitride: ¹⁵N isotope effect studies, *Phys. Rev. B* **67**,100509(R)1-4 (2003).

Y. Maniwa, H. Kataura, M. Abe, A. Fujiwara, R. Fujiwara, H. Kira, H. Tou, S. Suzuki, Y. Achiba, E. Nishibori, M. Takata, M. Sakata and Hiroyoshi Suematsu: C70 molecular stumbling inside single-walled carbon nanotubes, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **72**, 45-48 (2003).

A. Fujiwara, R. Iijima, H. Suematsu, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki and Y. Achiba : Local electronic transport through a junction of SWNT bundles, *Physica* **B323**, 227-229 (2002).

X. Zhao, Y. Ando, L.-C. Qin, H. Katura, Y. Maniwa and R. Saito: Characteristic Raman spectra of multiwalled carbon nanotubes, *Physica* **B323**, 265-266 (2002).

Y. Maniwa, H. Kataura, M. Abe, S. Suzuki, Y. Achiba, H. Kira and K. Matsuda: Phase Transition in Confined Water inside Carbon Nanotubes, *J. Phys. Soc. Jpn.* **71**, 2863-2866 (2002).

X. Zhao, Y. Ando, L.C. Qin, H. Kataura, Y. Maniwa and R. Saito: Radial breathing modes of multiwalled carbon nanotubes, *Chem. Phys. Lett.* **361**, 169-174 (2002).

X. Zhao, Y. Ando, L.C. Qin, H. Kataura, Y. Maniwa and R. Saito: Multiple splitting of G-band modes from individual multiwalled carbon nanotubes, *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 2550-2552 (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. 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).

H. Tou, Y. Maniwa, T. Koiwasaki and S. Yamanaka: DC-magnetization and ^1H -NMR studies of layered superconductor $\text{Li}_{0.48}(\text{THF})_{0.3}\text{HfNCl}$, *Physica B* **312-323**, 155-156 (2002).

H. Kira, H. Tou, Y. Maniwa and Y. Murakami: Magnetic interaction in K-adsorbing zeolite LTA, *Physica B* **312-323**, 789-790 (2002).

K. Matsuda, Y. Kohori, T. Kohara, H. Amitsuka and T. Matsumoto: ^{29}Si NMR study of URu_2Si_2 under pressure, *Physica B* **312-313**, 504-505 (2002).

H. Amitsuka, M. Yokoyama, S. Miyazaki, K. Tenya, T. Sakakibara, W. Higemoto, K. Nagamine, K. Matsuda, Y. Kohori and T. Kohara: Hidden order and weak antiferromagnetism in URu_2Si_2 , *Physica B* **312-313**, 390-396 (2002).

K. Ichimura, M. Osawa, K. Nomura, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki and Y. Achiba: Tunneling spectroscopy on carbon nanotubes using STM, *Physica B* **323**, 230-232 (2002).

S. Masubuchi, K. Ooiwa, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki, Y. Achiba and S. Kazama: Thermoelectric power of single walled carbon nanotubes containing alcohol molecules, *Physica B* **323**, 267-268 (2002).

A. Fujiwara, Y. Matsuoka, R. Iijima, H. Suematsu, N. Ogawa, K. Miyano, K. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki and Y. Achiba: Photoconductivity and local transport properties of single-wall carbon nanotubes, *Proceeding of IWEPNM2002, AIP conference proceeding* **633**, 247-250 (2002).

H. Kataura, M. Abe, A. Fujiwara, T. Kodama, K. Kikuchi, Y. Misaki, S. Suzuki, Y. Achiba and Y. Maniwa: Fullerene peapods and double wall nanotubes: Structures and optical properties, *Proceeding of IWEPNM2002, AIP conference proceeding* **633**, 103-107 (2002).

2) 学会講演

日本物理学会 第57回年次大会 2002年3月24日～3月27日(立命館びわこ・くさつキャンパス)

山辺典昭、坂本浩一、溝口憲治、Dj. Damjanovic、V.I. Srdanov : アルカリ・エレクトロソードライトの磁性 .

佐藤秀一、坂本浩一、溝口憲治、盛岡弘幸、木村恒久、D. W. Breiby、E. J. Samuelsen: 高配向 Regioregular Poly-Hexyl-thiophene 及び Polypyrrol の異方性 .

平岡牧、坂本浩一、溝口憲治、加藤礼三：(DMe-DCNQI)₂Li の磁気共鳴・電子スピン緩和時間の異方性。

坂本浩一、溝口憲治、長谷川達生：(BEDT-TTF)(TCNQ) 系交互積層型電荷移動錯体の圧力下 ESR。

藤秀樹、真庭豊、小岩崎剛、山中昭司：HfNCI 超伝導体における ¹⁵N アイソトープ効果の研究。

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

南沢俊文、真庭豊^A、吉良弘^A、増淵伸一^B、風間重雄：ゼオライト FAU 中に形成された Na クラスターの物性。

真庭豊（シンポジウム講演）：分子性結晶・クラスター系における分子軌道秩序と NMR。

藤原竜児、真庭豊、藤原明比古：多層カーボンナノチューブの電子線回折。

阿部真利、真庭豊、吉良弘、藤原竜児、片浦弘道、鈴木信三、阿知波洋次、高田昌樹、坂田誠、加藤健一：二層カーボンナノチューブの X 線回折。

森川雅則、真庭豊、藤秀樹、岩佐義宏、伊藤崇芳、竹延大志、K.Prassides：MgB_{2-x}C_x の NMR による研究。

松田和之（シンポジウム講演）：重い電子系超伝導体 URu₂Si₂ における隠された自由度と高圧下 NMR。

松田和之、小堀洋、小原孝夫、網塚浩、桑原慶太郎、松本武彦：URu₂Si₂ の高圧下 ²⁹Si NMR。

日本物理学会 第 2002 年秋季大会 2002 年 9 月 6 日～9 月 9 日（中部大学）

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

佐藤秀一、坂本浩一、溝口憲治、盛岡弘幸、木村恒久、増淵伸一、D. W. Breiby、E. J. Samuelsen：Regioregular Poly-Hexyl-Thiophene 及び Polypyrrole の異方性。

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

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

松田和之、坂本浩一、真庭豊、福岡宏、山中昭司：シリコンクラスレート化合物 Ba₈Ge_xSi_{46-x} の NMR。

吉良弘、松田和之、真庭豊、南沢俊文、風間重雄、増淵伸一：アルカリ金属を吸蔵した zeolite の着色現象。

藤秀樹、世良正文、真庭豊、山中昭司：Li(THF)HfNCI 超伝導体の超伝導特性。

真庭豊（シンポジウム講演）：チューブ内フラレン結晶の 1 次元揺らぎ。

阿部真利、吉良弘、藤原竜児、松田和之、真庭豊、片浦弘道、鈴木信三、阿知波洋次：水を吸着した単層ナノチューブの X 線回折。

宇高彰子、阿部真利、吉良弘、真庭豊、片浦弘道、鈴木信三、阿知波洋次：アルカリ金属をドーピングしたカーボンナノチューブの X 線回折。

荒川悦雄, 伊藤正久, 石松直樹, 鈴木基寛, 河村直己, 桜井浩, 伊藤文武, 本間佳哉, 落合明, 赤浜裕一, 松田和之, 小堀洋, 岸本俊二, 平野馨一, 圓山裕, 並河一道, 下村理: 多重極限下の X 線磁気回折実験系の立ち上げ.

第 23 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム 2002 年 7 月 17 日~7 月 19 日 (大観荘 松島)

真庭豊, 阿部真利, 片浦弘道, 藤原明比古, 藤原竜児, 吉良弘, 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: SWNT 内のフラーレン 1 次元結晶の構造と相転移.

阿部真利, 真庭豊, 片浦弘道, 吉良弘, 藤原竜児, 藤原明比古, 鈴木信三, 阿知波洋次, 加藤健一, 高田昌樹, 坂田誠: 水を内包した SWNT の X 線構造解析.

第 24 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム 2003 年 1 月 8 日~1 月 10 日 (岡崎コンファレンスセンター)

阿部真利, 片浦弘道, 鈴木信三, 阿知波洋次, 吉良弘, 宇高彰子, 神島謙二, 松田和之, 真庭豊: SWNT への水の吸蔵: 同位体効果.

宇高彰子, 片浦弘道, 阿部真利, 鈴木信三, 阿知波洋次, 吉良弘, 神島謙二, 松田和之, 真庭豊: SWNT へのインターカレーション過程の研究: カリウム.

国際会議

International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals (ICSM2002), Shanghai, China, June 29 - July 5, 2002

H. Sakamoto, K. Mizoguchi, and T. Hasegawa: ESR studies of mixed-stack charge-transfer compounds of (BEDT-TTF) analogs under pressure.

S. Sato, H. Sakamoto, K. Mizoguchi, H. Morioka, and T. Kimura: Orientational distribution of PPy rings analysed with g-shift anisotropy of ESR.

M. Hiraoka, H. Sakamoto, K. Mizoguchi, and R. Kato: Evidence for spin solitons in spin-Peierls system (DMe-DCNQI)₂Li.

K. Mizoguchi, T. Yamabe, H. Sakamoto, L. Damjanovic, and V. I. Srdanov: Electronic states of alkali-electro-sodalite under pressure.

International Conference on Low Temperature Physics (LT23), Hiroshima, Japan, August 20 - 27, 2002

M. Hiraoka, H. Sakamoto, K. Mizoguchi, and R. Kato: Quasi-one dimensional diffusive motion of spin solitons in the spin-Peierls state of (DMe-DCNQI)₂Li.

K. Mizoguchi, T. Yamabe, H. Sakamoto, L. Damjanovic, and V. I. Srdanov: pressure tuning of the exchange interactions between s-electrons in a b.c.c. lattice of sodalite cages.

電子物性研究室

1. 研究活動の概要

本研究室の研究対象は、大きく、希土類やアクチナイドなどの f-電子を含む強相関電子系物質と、微細な構造（伝導電子のスピンの拡散距離に比較して）を持つ磁性体 / 非磁性体複合系との二つに分類される。前者については、フラックス法、引き上げ法、超高真空ゾーンメルト法などの単結晶育成法を用いて自ら純良単結晶の育成を行い、逆に後者に関しては、企業等の先端技術で作製されたサンプルを、時間依存した伝導現象に着目した特殊な測定技術を用いることにより、多くの研究者との共同研究を行っている。

1) f-電子系強相関伝導物質

我々は、これまで f-電子と伝導電子の強い相関効果に起因する興味深い現象を明らかにするために、希土類やアクチナイド元素を含む典型的化合物や新化合物の純良単結晶を育成し物性探索を行ってきた。最近、それらの内、特に充填スクッテルダイト構造を持つ化合物 $RE_4T_3X_{12}$ (RE:希土類, T:遷移金属, X:P, As, Sb) に注目して純良単結晶の育成を行い、変化に富んだ興味深い振舞を見出している。平成 14 年度に探索した充填スクッテルダイト化合物のうち、典型的なものを取り上げて解説する。

(a) (Pr 化合物としては) 初めての重い電子超伝導体 $PrOs_4Sb_{12}$:

(1) 初めて、その参照物質 $LaOs_4Sb_{12}$ とともに、de Haas-van Alphen(dHvA) 効果の測定に成功した。フェルミ面は $LaOs_4Sb_{12}$ と極めて近いという 4f 電子が局在している証拠を示す一方、4f 電子と伝導電子との相関を示唆する重い有効質量の直接確認という、これまでの Ce 系と一見矛盾する結果を得た。(2) NMR の共同研究に於いても、 $1/T_1$ はコヒーレンスピークを示さないにもかかわらず、等方的なギャップを示すという特異な超伝導を示唆する結果を得た。(3) 磁場中・熱伝導の角度依存性測定から、ポイントノードの存在を示す異方的なギャップの存在を示唆する結果が得られ、更には対称性の変化を伴う二段転移を見出し、対応する超伝導相図が決定された。(4) 比熱及び磁化の磁場・角度依存性測定を系統的に行い、磁場誘起秩序相の異方性を確認し、更に局在モデルの範囲で、結晶場基底状態として Γ_1 以外ありえないことを明らかにした。磁場中輸送効果測定の結果を加え、超伝導相と磁場誘起秩序相の総合相図を明らかにした(図 1 参照)。更に、中性子散乱実験により、この磁場誘起秩序相の秩序パラメーターが磁気双極子ではありえず、四重極秩序であることを証明することに成功した。

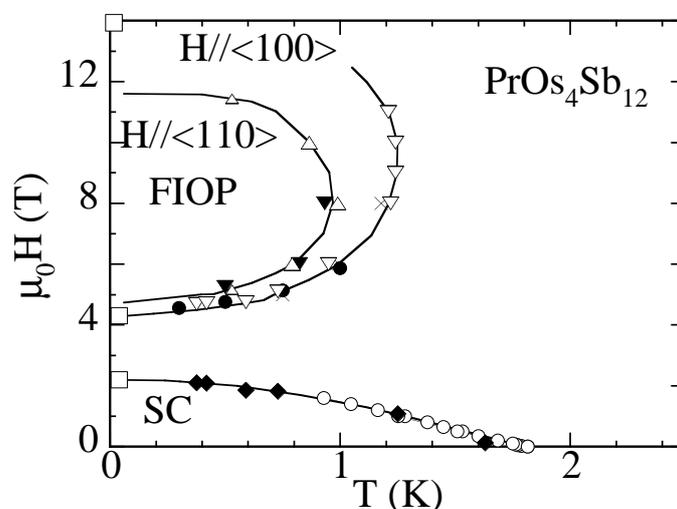


図 1: 重い電子超伝導体 $PrOs_4Sb_{12}$ の磁場-温度相図

(b) 四重極相互作用を起源とする秩序と近藤効果の共存する $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$:

(1) μSR 測定を行う事により、基底状態が非磁性であることをより高い精度で確認した。また、低温・磁場中での中性子線回折実験により、磁場誘起の反強磁性成分と強磁性成分を詳しく評価することにより、低温秩序相が四重極秩序である事を明らかにした(図2に相図を示す)。この結果は、この物質が、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を更に高めるものである。(2) また、Pr サイトの La 置換を行い、電子輸送・磁気・熱測定を行い、低温秩序相が置換に対し極めて脆弱であり、強磁性的な秩序が発生することを見出した。

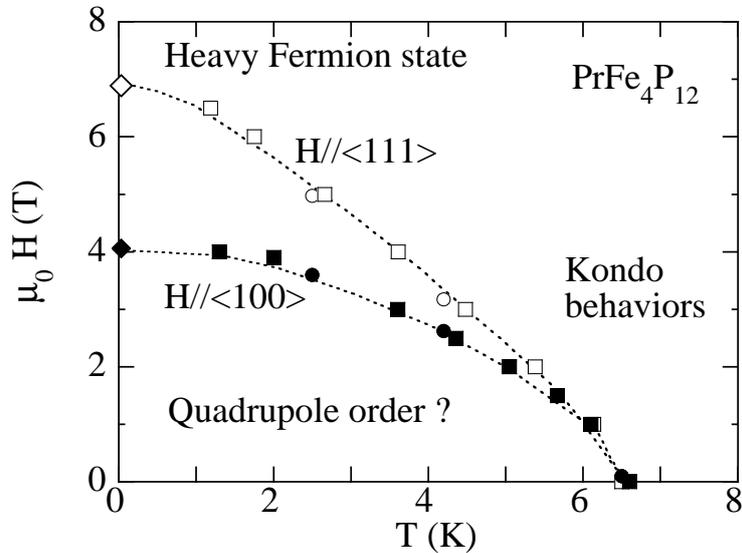


図 2: $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ の磁場-温度相図

(c) $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ の非磁性秩序と極低温磁性:

$\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ は、関根らにより、Pr 充填スクッテルダイト化合物としては初めて、興味深い金属-非金属転移が見出された重要な物質であり、転移の起源としてフェルミ面のネスティングモデルが提案されているが、その参照物質、 $\text{LaRu}_4\text{Sb}_{12}$ 純良単結晶での $d\text{HvA}$ 効果によりフェルミ面の決定を行い、また、 $\text{PrRu}_4\text{Sb}_{12}$ の純良単結晶での電子輸送、比熱測定を行った。結果として、ネスティングモデルのみでは理解できないこと、極低温領域に磁氣的に敏感な相が存在することを見出した。

(d) 異常特性を示す Ce 充填スクッテルダイト $\text{CeT}_4\text{X}_{12}$:

Pr-系で c-f 混成による異常が観測されることから、Ce-充填スクッテルダイトではより強い混成効果が期待され、実際格子定数が小さな $\text{CeFe}_4\text{P}_{12}$ や $\text{CeRu}_4\text{P}_{12}$ では強い混成効果による近藤半導体としての振舞が観測されている。年度は、比較的混成効果が小さく、Shubnikov-de Haas 振動の観測により半金属として振舞うことを確認した $\text{CeRu}_4\text{Sb}_{12}$ と混成ギャップが極めて小さいとされている $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$ 、の本質を探るために、圧力下での電子輸送特性の評価に重点を置いて研究を進めた。

(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、物性研の榊原研究室、松田研究室、上床研究室、後藤研究室、辛研究室、岩手大の吉澤研究室、新潟大学の後藤研究室、神戸大の難波研究室、高エネ研の鬚本氏、門野氏、及川氏、広島大の宇田川研究室、との共同研究である。)

2) 微細磁性体の電気伝導

電子の二特性のうち、電荷は伝導現象に、スピンは磁性にのみ現れ、伝導にスピン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。

(a) 微小トンネル磁気抵抗素子の時間依存伝導現象 (ノイズ特性):

二つの強磁性体金属・合金の間に絶縁体極薄膜を置くと、二つの電極間の伝導は電子のトンネル効果によって行われる。この場合、二つの強磁性層の磁化が平行か反平行かにより、トンネル電流が大きく変化し、スピン依存トンネル効果と呼ばれている。この効果は、ハードディスクの磁気記録の更なる高密度化に不可欠な次世代の磁気記録読み取りヘッドとして、大きな期待が掛けられ、精力的に研究が進められている。我々は、物理的に新しい現象の探索を目指して、最先端技術で作製された微小サイズ ($\sim \mu\text{m}^2$ 程度または以下) のトンネル接合のノイズ特性に着目して測定した。測定された、 $\sim 5\text{kHz}$ までの周波数領域で通常のバイアス電流では $1/f$ ノイズと二準位間 (Two level fluctuator: TLF) ノイズで支配される。前者は、通常の試料では基本的な問題とはなり得ず、後者の機構の解明が不可欠である。詳しいノイズスペクトルとトンネル磁気抵抗を同時測定することにより、微細な強磁性体ドメインの揺らぎがトンネルMRを通して現れていることが分かった。(このテーマは、NEC・基礎研究所との共同研究であり、SRC 及び富士通の支援を受けて研究が進められた)

(b) Fe/MgF₂ 多層グラニューラ膜の電子輸送特性:

強磁性金属・合金と Al₂O₃ からなるグラニューラ膜において、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・基礎の両面から研究が行われてきたが、その機構は明からされていない。我々は、通常のグラニューラ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、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が明らかになった。異常ホール効果が、比抵抗ではなく、温度への依存性が重要である事実は、巨大ホール効果の機構を探る上で本質的な情報である。同時に測定された磁気抵抗が、加えられた磁場が積層面に平行か垂直かにより異なることを確認し、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

A. S. Panfilov, G. E. Grechnev, I. V. Svechkarev, H. Sugawara, H. Sato, O. Eriksson: Effect of pressure on the magnetic susceptibility of CeCo₂, *Physica B* **319** (2002) 268-276.

T. D. Matsuda, S. R. Saha, T. Namiki, H. Sugawara, Y. Aoki and H. Sato: Effect of Uniaxial Pressure on the Magnetic Properties in PrFe₄P₁₂, *J. Phys. Soc. Jpn.* **71** (2002) Suppl. 246-248.

Y. Nakanishi, T. Yamaguchi, H. Hazama, T. Goto, T. D. Matsuda, H. Sugawara, H. Sato and M. Yoshizawa: Elastic Properties of Filled Skutterudite Compounds, *J. Phys. Soc. Jpn.* **71** (2002) Suppl. 249-251.

H. Shishido, R. Settai, D. Aoki, S. Ikeda, S. Araki, M. Nakashima, Y. Inada, Y. Haga, H. Harima, Y. Aoki, T. Namiki, H. Sato and Y. Onuki: Fermi Surface, Magnetic and Superconducting Properties of LaRhIn₅ and CeTIn₅ (T:Co and Rh), *J. Phys. Soc. Jpn.* **71** (2002) Suppl. 276-278.

Y. Aoki, H. Kinoshita, T. Mizuno, H. Sugawara, H. Sato, K. Matsuda, A. Kamijo and H. Tsuge: Noise characteristics in low-impedance NiFe/Al₂O₃/NiFe tunnel junctions, *J. Magn. Mater.* **240** (2002) 134-136.

- 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, *J. Magn. Magn. Mater* **240** (2002) 358-361.
- Y. Aoki, T. Namiki, T. D. Matsuda, H. Sugawara, and H. Sato: Anomalous Ordered Phase in $4f^2$ -based Heavy-Electron $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$, *J. Phys. Chem. Solids* **63** (2002) 1201-1205.
- S. R. Saha, H. Sugawara, T. Namiki, Y. Aoki and H. Sato: Uniaxial Pressure Effect on the Metamagnetic Anomaly in CeRu_2Si_2 , *J. Phys. Chem. Solids* **63** (2002) 1171-1174.
- S. Araki, R. Settai, M. Nakashima, H. Shishido, S. Ikeda, H. Nakawaki, Y. Haga, N. Tateiwa, T.C. Kobayashi, H. Harima, H. Yamagami, Y. Aoki, T. Namiki, H. Sato, and Y. Onuki: Heavy fermions in cerium and uranium compounds studied by the de Haas-van Alphen experiment, *J. Phys. Chem. Solids* **63** (2002) 1133-1139.
- S. R. Saha, H. Sugawara, T. Namiki, Y. Aoki and H. Sato: Effect of Uniaxial Pressure on the Metamagnetic Anomalies of the Heavy-fermion metamagnet CeRu_2Si_2 , *Phys. Rev. B* **65** (2002) 214429(6pages).
- 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 $\text{RFe}_4\text{P}_{12}$ ($\text{R}=\text{La}, \text{Ce}, \text{Pr}$), *Surface Review and Letters*, **9** (2002) 1257-1261.
- T. Miyahara, H. Ishii, K. Obu, M. Shinoda, Y. Takayama, T. Muro, T. D. Matsuda, H. Sugawara and H. Sato: Precursor nonmagnetic states of $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ and CePd_3 detected by core excitation MCD, *Surface Review and Letters*, **9** (2002) 831-835.
- Y. Aoki, T. Namiki, T. D. Matsuda, K. Abe, H. Sugawara, and H. Sato: Nonmagnetic Ordered State in Heavy Electron $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ Evidenced by specific heat, *Physica B* **312-313** (2002) 823-824.
- 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.
- 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 $\text{PrRu}_4\text{Sb}_{12}$, *Physica B* **312-313** (2002) 832-833.
- Y. Nakanishi, T. D. Matsuda, H. Sugawara, H. Sato and M. Yoshizawa: Elastic Properties of $\text{NdFe}_4\text{P}_{12}$, *Physica B* **312-313** (2002) 827-928.
- T. Namiki, Y. Aoki, Y. Yamada, T. D. Matsuda, H. Sugawara, and H. Sato: La-substitution Study on Filled-skutterudite $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$, *Physica B* **312-313** (2002) 825-826.
- 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 $\text{CeRu}_4\text{Sb}_{12}$, *Physica B* **312-313** (2002) 264-266.
- K. Abe, T. D. Matsuda, H. Sugawara, T. Namiki, Y. Aoki and H. Sato: Unusual behavior in the heavy Fermion semi-metal $\text{CeRu}_4\text{Sb}_{12}$, *Physica B* **312-313** (2002) 256-258.

- Y. Aoki, T. Namiki, S. Ohsaki, S. R. Saha, H. Sugawara and H. Sato: Thermodynamical Study on the Heavy-Fermion Superconductor PrOs₄Sb₁₂: Evidence for Field-Induced Phase Transition, *J. Phys. Soc. Jpn.* **71** (2002) 2098-2101.
- 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 the Filled Skutterudite PrFe₄P₁₂ uncovered by the de Haas-van Alphen Effect, *Phys. Rev. B* **66** (2002) 134411(5pages).
- R. Hanada, H. Sugawara, Y. Aoki, H. Sato, K. Shigeto, T. Shinjo, T. Ono and H. Miyajima: The local domain wall position in ferromagnetic thin wire: simultaneous measurement of resistive and transverse voltages at multiple points, *J. Phys.: Condens. Matter* **14** (2002) 6491-6500.
- A. Granovskii, H. Sato, Y. Aoki and A. Yurasov: Tunneling Thermopower in Magnetic Granular Alloys, *Physics of the Solid State* **44** (2002) 2095-2097.
- H. Sugawara, S. Osaki, S. R. Saha, Y. Aoki, H. Sato, Y. Inada, H. Shishido, R. Settai, Y. Ōnuki, H. Harima and K. Oikawa: Fermi Surface of the Heavy-fermion Superconductor PrOs₄Sb₁₂, *Phys. Rev. B* **66** (2002) 220504(R)(4pages).
- K. Abe, H. Sato, T.D. Matsuda, T. Namiki, H. Sugawara and Y. Aoki: Transport Properties in the Filled Skutterudite Compounds RERu₄Sb₁₂ (RE-La, Ce, Pr and Nd); an Exotic Heavy-fermion Semimetal CeRu₄Sb₁₂, *J. Phys.: Condens. Matter* **14** (2002) 11757-11768.
- Y. Nakanishi, M. Yoshizawa, T. Yamaguchi, H. Hazama, Y. Nemoto, T. Goto, T. D. Matsuda, H. Sugawara and H. Sato: Unconventional Emergence of Elastic Softening Induced by Magnetic Fields in the unusual Heavy-fermion Compound PrFe₄P₁₂, *J. Phys.: Condens. Matter* **14** (2002) L715-720.
- H. Kotegawa, M. Yogi, Y. Imamura, Y. Kawasaki, G. -q. Zheng, Y. Kitaoka, S. Ohsaki, H. Sugawara, Y. Aoki and H. Sato: Evidence for Unconventional Strong-Coupling Superconductivity in PrOs₄Sb₁₂: An Sb Nuclear Quadrupole Resonance Study, *Phys. Rev. Lett.* **90** (2003) 027001(4pages).
- H. Sato, Y. Aoki, T. Namiki, T.D. Matsuda, K. Abe, S. Osaki, S.R. Saha and H. Sugawara: Transport and thermal properties of Ce- and Pr-filled skutterudites, *Physica B* **328** (2003) 34-38.
- S.R. Saha and H. Sugawara, R. Sakai, Y. Aoki, H. Sato, Y. Inada, H. Shishido, R. Settai, Y. Ōnuki and H. Harima: De Haas-van Alphen Effect in LaRu₄P₁₂, *Physica B* **328** (2003) 34-38.
- H. Shiozawa, T. Miyahara, H. Ishii, Y. Takayama, K. Obu, T. Muro, Y. Saito, T. D. Matsuda, H. Sugawara and H. Sato: Measurements of temperature dependence of “localized susceptibility”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* **199** (2003) 318-322.
- H. Sato, Y. Abe, T.D. Matsuda, K. Abe, T. Namiki, H. Sugawara and Y. Aoki: Anomalous transport properties in the filled skutterudites, *J. Magn. Magn. Mater.* **258-259** (2003) 67-72.
- E. Bauer, St. Berger, S. Gabani, G. Hilscher, H. Michor, Ch. Paul, M. Giovannini, A. Saccone, C. Godart, P. Bonville, Y. Aoki, H. Sato: Non-Fermi-liquid features of novel Yb₂Pd₂In, *Acta Physica Polonica B* **34** (2003) 367-370.

- H. Sugawara, S. Osaki, S.R. Saha, Y. Aoki, H. Sato, Y. Inada, H. Shishido, R. Settai, and Y. Ōnuki: De Haas-van Alphen Effect in Heavy Fermion Superconductor $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$, *Acta Physica Polonica B* **34** (2003) 1125-1128.
- E. Kuramochi, H. Sugawara, T. D. Matsuda, Y. Abe, K. Abe, Y. Aoki and H. Sato: Magnetic Field Effect on the Transport Properties of the Anomalous Heavy Fermion $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$, *Acta Physica Polonica B* **34** (2003) 1129-1132.
- S.R. Saha, M. Kobayashi, H. Sugawara, T. Namiki, K. Abe, Y. Aoki and H. Sato: Uniaxial Pressure Effect on the SdH Oscillations in Heavy-fermion Semimetal $\text{CeRu}_4\text{Sb}_{12}$, *Acta Physica Polonica B* **34** (2003) 1137-1140.
- Y. Aoki, T. Namiki, T. Kanayama, S. Ohsaki, S.R. Saha, H. Sugawara and H. Sato: Specific Heat Study on the Heavy-fermion Pr Compounds with Filled Skutterudite Structure, *Acta Physica Polonica B* **34** (2003) 1145-1148.
- T. Namiki, Y. Aoki, H. Sugawara and H. Sato: Anomalous Ordered State of Filled Skutterudite $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$, *Acta Physica Polonica B* **34** (2003) 1161-1164.
- L. Hao, K. Iwasa, M. Nakajima, D. Kawana, K. Kuwahara, M. Kohgi, H. Sugawara, T.D. Matsuda, Y. Aoki, and H. Sato: Antiferro-quadrupolar Ordering of 4f-electron State in the Filled Skutterudite $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$, *Acta Physica Polonica B* **34** (2003) 1113-1116.
- K. Iwasa, L. Hao, M. Nakajima, M. Kohgi, H. Sugawara, Y. Aoki, and H. Sato: Magnetic Excitations in the Heavy-fermion and Antiferro-quadrupolar-ordering Systems $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$, *Acta Physica Polonica B* **34** (2003) 1117-1120.
- Y. Nakanishi, M. Yoshizawa, T. Yamaguchi, H. Hazama, Y. Nemoto, T. Goto, H. Sugawara, T.D. Matsuda and H. Sato: Evidence of Non-Kramers Doublet Ground State in $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$, *Acta Physica Polonica B* **34** (2003) 1079-1083.
- H. Kotegawa, Y. Imamura, Y. Kawasaki, Y. Tokunaga, K. Ishida, G. -q. Zheng, Y. Kitaoka, S. Osaki, H. Sugawara, Y. Aoki and H. Sato: NQR Study of $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$, *Acta Physica Polonica B* **34** (2003) 1003-1006.
- A. Yamasaki, S. Imada, T. Masuda, A. Sekiyama, T. Nanba, H. Sugawara, T.D. Matsuda, H. Sato, C. Sekine, I. Shirovani, H. Harima and S. Suga: Heavy-fermion Behavior of Pr 4f Electrons in Filled Skutterudites Studied by Bulk-sensitive Photoemission, *Acta Physica Polonica B* **34** (2003) 1035-1038.
- K. Izawa, Y. Nakajima, J. Goryo, Y. Matsuda, S. Osaki, H. Sugawara, H. Sato, P. Thalmeier and K. Maki: Multiple Superconducting Phases in New Heavy Fermion Superconductors $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$, *Phys. Rev. Lett.* **90** (2003) 117001(4pages).

2) 学会講演

日本物理学会第57回年次大会 2002年3月24日～27日 (立命館大学びわこ・くさつキャンパス)

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

青木勇二、並木孝洋、大崎舟司、S.R.Saha、菅原 仁、佐藤英行: $4f^2$ を基にする重い電子超伝導体 $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ の熱物性.

並木孝洋、青木勇二、菅原 仁、大崎舟司、S. R. Saha、佐藤英行: 充填スクッテルダイト化合物 $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ の磁場中比熱: 異常な低温熱励起.

小手川恒、北岡良雄、大崎舟司、菅原 仁、佐藤英行: $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ の NMR、NQR による研究.

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変調と四重極秩序

松波雅治、西龍彦、木村真一、難波孝夫、松田達磨、菅原 仁、佐藤英行: $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ の光学スペクトルからみた電子構造.

山崎篤志、今田真、榊田哲男、関山明、菅滋正、難波孝夫 A、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 $\text{PrT}_4\text{X}_{12}$ ($\text{T}=\text{Fe}, \text{Ru}$; $\text{X}=\text{P}, \text{Sb}$) のバルク電子状態.

大崎舟司、菅原 仁、並木孝洋、Shanta R. Saha、青木勇二、佐藤英行: 重い電子系超伝導 $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ の磁性と電子輸送効果.

菅原 仁、大崎舟司、小林未希、S. R. Saha、並木孝洋、青木勇二、佐藤英行: $\text{NdOs}_4\text{Sb}_{12}$ の磁性と電子輸送現象.

小林未希、S.R.Saha、大崎舟司、並木孝洋、阿部敬介、菅原 仁、青木勇二、佐藤英行: $\text{CeRu}_4\text{Sb}_{12}$ の一軸圧力効果.

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 III.

中西良樹、熊谷智之、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: $\text{CeRu}_4\text{Sb}_{12}$ の弾性特性.

筒井智嗣、葛下かおり、田崎尚、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 II.

熊谷智之、中西良樹、松田達磨、菅原 仁、佐藤英行、吉澤正人: $\text{LaRu}_4\text{Sb}_{12}$ および $\text{PrRu}_4\text{Sb}_{12}$ の弾性特性.

塩澤秀次、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、室隆佳之、岡本淳、斎藤祐児: 局在磁気モーメントの温度依存性.

大部健司、大坪英雄、李徹、塩澤秀次、高山泰弘、石井広義、宮原恒あき、金山友幸、湯浅清司、松田達磨、青木勇二、菅原 仁、佐藤英行: $\text{RFe}_4\text{P}_{12}$ と $\text{RRu}_4\text{Sb}_{12}$ ($\text{R}=\text{La}, \text{Ce}, \text{Pr}$) の共鳴光電子分光.

植田泰輝、穴戸寛明、芳賀芳範、竹内徹也、鳴海康雄、中村仁子、並木孝洋、青木勇二、佐藤英行、杉山清寛、金道浩一、大貫惇睦 CeNiIn_4 の磁性.

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

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: 強磁性トンネル素子における磁場中ノイズ.

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 NiFe/Al₂O₃/NiFe のノイズ特性 III.

永井肇、水野友人、青木勇二、菅原 仁、佐藤英行、長坂恵一、田中厚志: 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 II.

日本物理学会秋季大会 2002年9月6日~9日(中部大学)

小林未希、S.R.Saha、大崎舟司、並木孝洋、菅原 仁、青木勇二、佐藤英行: CeRu₄Sb₁₂ の圧力効果.

辺土正人、上床美也、小林未希、菅原 仁、佐藤英行: CeOs₄Sb₁₂ の電気抵抗の圧力依存.

大崎舟司、菅原 仁、小林未希、S.R.Saha、並木孝洋、青木勇二、佐藤英行、及川健一: ROs₄Sb₁₂(R=La、Ce、Pr、Nd) の構造解析と電子輸送効果.

山本一成、荻田典男、宇田川眞行、菅原 仁、青木勇二、佐藤英行: 充填スクッテルダイト化合物 RFe₄P₁₂(R=La、Ce、Pr、Nd) のラマン散乱.

青木勇二、金山友幸、並木孝洋、菅原 仁、佐藤英行、髭本亘: PrFe₄P₁₂ の異常秩序状態の μ SR による観測.

岩佐和晃、Hao Lijie、中島基樹、神木正史、菅原 仁、青木勇二、松田達磨、佐藤英行: PrFe₄P₁₂ における重い電子・四重極転移における磁場誘起磁性と励起状態.

金山友幸、並木孝洋、青木勇二、菅原 仁、佐藤英行: Pr_xLa_{1-x}Fe₄P₁₂ の Pr 高濃度領域における磁化率測定.

菅原 仁、大崎舟司、S.R.Saha、青木勇二、佐藤英行、稲田佳彦、宍戸寛明、摂待力生、大貫惇睦、播磨尚朝: PrOs₄Sb₁₂ のドハース・ファンアルフェン効果.

田山孝、榊原俊郎、菅原 仁、青木勇二、佐藤英行: PrOs₄Sb₁₂ の低温磁化.

仲島康行、井澤公一、松田祐司、大崎舟司、菅原 仁、佐藤英行: 熱伝導率から見た充填スクッテルダイト化合物 PrOs₄Sb₁₂ の超伝導ギャップ構造.

山崎篤志、今田真、榊田哲男、東谷篤志、鴻池光一朗、関山明、大崎舟司、菅原 仁、佐藤英行、播磨尚朝、難波孝夫、菅滋正: 重い電子系超伝導体 PrOs₄Sb₁₂ の高分解能バルク敏感光電子分光.

並木孝洋、青木勇二、佐藤英行、関根ちひろ、城谷一民充填スクッテルダイト化合物 PrRu₄As₁₂ の磁場中比熱測定.

與儀護、小手川恒、今村洋寿、北岡良雄、青木勇二、大崎舟司、菅原 仁、佐藤英行: PrT₄Sb₁₂(T=Os、Ru) の NQR による研究.

S. R. Saha、菅原 仁、坂井亮一、青木勇二、佐藤英行、稲田佳彦、宍戸寛明、摂待力生、大貫惇睦、播磨尚朝: dHvA Effect in LaRu₄P₁₂.

松波雅治、岡村英一 A、難波孝夫、菅原 仁、佐藤英行: $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$ における光学ギャップの観測.

塩澤秀次、篠田元樹、大部健司、高山泰弘、石井広義、宮原恒せい、松田達磨、菅原 仁、佐藤英行、室隆桂之、岡本淳、斎藤祐児: CeRu_2Si_2 及び CeCo_2Ge_2 における $\text{Ce}4f$ 磁気モーメントの温度依存性.

石井広義、大坪英雄、大部健司、塩澤秀次、高山泰弘、宮原恒せい、金山友幸、湯浅清司、松田達磨、青木勇二、菅原 仁、佐藤英行: $\text{RFe}_4\text{P}_{12}$ と $\text{RRu}_4\text{Sb}_{12}$ ($\text{R}=\text{La}$ 、 Ce) の共鳴光電子分光.

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

永井肇、碓垂矢子、青木勇二、菅原 仁、佐藤英行、長坂恵一、瀬山喜彦、田中厚志: スピンバルブ膜を用いた CPP 素子の電子輸送特性 III.

横田真太郎、菅原 仁、青木勇二、佐藤英行、中積誠、小野一修、喜多英治: Fe/MgF_2 多層膜の電子輸送特性 III.

第 26 回 日本応用磁気学会 学術講演会 2002 年 9 月 17 日 ~ 20 日 (東京農工大学)

青木勇二、並木孝洋、大崎舟司、S.R. Saha、菅原仁、佐藤英行: Pr 充填スクッテルダイトの強相関電子状態の熱物性 (優秀講演賞受賞).

国際会議

Moscow International Symposium on Magnetism, Moscow Russia, June 20-24, 2002

H. Sato, Y. Abe, K. Abe, T.D. Matsuda, H. Sugawara and Y. Aoki: Anomalous Transport Properties in the Filled Skutterudites. (Invited)

Polish-Japanese Workshop organized by Institute of Low Temperature and Structure Research in Wroclaw, Wroclaw Poland, July 7-9, 2002

H. Sato: Exotic Behaviors in the Filled Skutterudite Compounds. (Oral)

Y. Aoki: Anomalous Heavy-Fermion Behaviors in the $4f^2$ based Exotic Filled Skutterudites. (Oral)

H. Sugawara: De Haas-van Alphen Effect in the Exotic Filled Skutterudite Compounds. (Oral)

International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2002), Krakow Poland, July 10-13, 2002

H. Sugawara, S. Osaki, S. R. Saha, Y. Aoki, H. Sato, Y. Inada, H. Shishido, R. Settai and Y. Ōnuki: De Haas-van Alphen Effect in Heavy-Fermion Superconductor $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$.

E. Kuramochi, H. Sugawara, T. D. Matsuda, Y. Abe, K. Abe, Y. Aoki and H. Sato: Magnetic field effect on the transport properties of the anomalous heavy fermion $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$. (Oral)

S.R. Saha, M. Kobayashi, T. Namiki, K. Abe, H. Sugawara, Y. Aoki and H. Sato: Uniaxial Pressure Effect on the Shubnikov-de Haas Oscillations in Heavy Fermion Semimetal $\text{CeRu}_4\text{Sb}_{12}$. (Oral)

Y. Aoki, T. Namiki, T. Kanayama, S. Ohsaki, S. R. Saha, H. Sugawara and H. Sato: Specific Heat Study on Heavy-Fermion Pr Compounds with Filled Skutterudite Structure. (Oral)

L. Hao, K. Iwasa, M. Nakajima, D. Kawana, K. Kuwahara, M. Kohgi, H. Sugawara, T. D. Matsuda, Y. Aoki and H. Sato: Antiferro-quadrupolar Ordering of 4f-electron State in the Filled Skutterudite $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$. (Oral)

K. Iwasa, L. Hao, M. Nakajima, M. Kohgi, H. Sugawara, Y. Aoki, H. Sato and T. D. Matsuda: Magnetic Excitations in the Heavy-electron and Antiferro-quadrupolar-ordering System $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$.

T. Namiki, Y. Aoki, H. Sugawara and H. Sato: Anomalous Ordered State of Filled Skutterudite $\text{CeOs}_4\text{Sb}_{12}$.

Y. Nakanishi, T. Yamaguchi, H. Hazama, Y. Nemoto, T. Goto, T. D. Matsuda, H. Sugawara, H. Sato and M. Yoshizawa: Evidence of Non-Kramers Doublet Ground State in $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$.

A. Yamasaki, S. Imada, T. Matsuda, A. Sekiyama, T. Nanba, H. Sugawara, T. D. Matsuda, H. Sato, C. Sekine, I. Shirogane, H. Harima and S. Suga: Heavy Fermion behavior of Pr 4f electrons in the Filled Skutterudite Studied by Bulk-sensitive Photoemission.

H. Kotegawa, Y. Imamura, M. Yogi, Y. Kawasaki, Y. Tokunaga, K. Ishida, G.-q. Zheng, Y. Kitaoka, S. Ohsaki, H. Sugawara, Y. Aoki and H. Sato: NQR Study of $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$.

E. Bauer, St. Berger, S. Gabani, G. Hilscher, H. Michor, Ch. Paul, M. Giovannini, A. Saccone, C. Godart, P. Bonville, Y. Aoki, H. Sato: Non-Fermi-liquid features of novel $\text{Yb}_2\text{Pd}_2\text{In}$.

The 2nd Hiroshima Workshop, Transport and Thermal Properties of Advanced Materials (T²PAM), Hiroshima Japan, August 16-19, 2002

H. Sato, Y. Aoki, T. Namiki, T. D. Matsuda, K. Abe, S. Osaki, S. R. Saha, and H. Sugawara: Transport and Thermal Properties in the Filled Skutterudites. (Invited)

S.R. Saha, H. Sugawara, R. Sakai, Y. Aoki, H. Sato, Y. Inada, H. Shishido, R. Settai and Y. Ōnuki: DHvA Effect in $\text{LaRu}_4\text{P}_{12}$.

International Conference on Lowtemperature Physics (LT23), Hiroshima Japan, August 20-27, 2002

H. Sugawara, S. Osaki, E. Kuramochi, M. Kobayashi, S. R. Saha, T. Namiki, Y. Aoki and H. Sato: High Field Magnetoresistance in Heavy Fermion Superconductor $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$.

S.R. Saha, H. Sugawara, Y. Aoki, H. Sato, T. D. Matsuda, Y. Haga, E. Yamamoto and Y. Ōnuki: Transport Properties in UCoAl under Uniaxial Pressure.

M Kobayashi, S. R. Saha, H. Sugawara, T. Namiki, Y. Aoki and H. Sato: Pressure Effect on the Transport Properties in Heavy Fermion Semimetal $\text{CeRu}_4\text{Sb}_{12}$.

Y. Aoki, T. Namiki, S. Osaki, S. R. Saha, H. Sugawara and H. Sato: Specific Heat Study on the anomalous normal state of Heavy Fermion Superconductor $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$.

T. Namiki, Y. Aoki, T. D. Matsuda, H. Sugawara and H. Sato: Magnetic Anisotropy of the Heavy Fermion State in PrFe₄P₁₂.

T. Kumagai a, Y. Nakanishi, H. Sugawara, H. Sato and M. Yoshizawa: Elastic properties of ReRu₄Sb₁₂ (Re; La, Pr).

S. Tsutsui, K. Kuzushita, T. Tazaki, S. Morimoto, S. Nasu, T. D. Matsuda, H. Sugawara and H. Sato: ⁵⁷Mossbauer Spectroscopic Study of PrFe₄P₁₂.

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

M. Hedo, Y. Uwatoko, H. Sugawara and H. Sato: Pressure Effect on the Electrical Resistivity of the Filled Skutterudite compound CeOs₄Sb₁₂.

The 3rd International Symposium on Advanced Science Research (ASR2002), Advances in the Physics of f-electron Systems, JAERI Tokai Japan, November 12-14, 2002

H. Sato, H. Sugawara, T. Namiki, S. R. Saha, S. Osaki, T. Kanayama, M. Kobayashi, T. D. Matsuda, Y. Aoki, R. Settai, Y. Inada and Y. Ōnuki: Exotic Behaviors in the Pr-based Filled Skutterudites. (Invited)

Y. Aoki, T. Namiki, S. Ohsaki, S.R. Saha, H. Sugawara and H. Sato: Thermodynamic Anomalies in the Heavy-fermion Superconductor PrOs₄Sb₁₂.

S.R. Saha, H. Sugawara, Y. Aoki, H. Sato: Transport Properties on M-I Transition in the Filled Skutterudite PrRu₄P₁₂.

The 3rd International Symposium on New Developments in "Strongly Correlated Electron Phase under Multiple Environment", Osaka Japan, February 20-22, 2003

H. Sato, H. Sugawara, T. Namiki, S. R. Saha, S. Osaki, T. Kanayama, M. Kobayashi, Y. Aoki, Y. Inada, H. Shishido, R. Settai and Y. Ōnuki: Strong c-f Hybridization and Exotic Behaviors in the Filled Skutterudites. (Invited)

H. Sugawara, S. Osaki, S.R. Saha, M. Kobayashi, T. Namiki, Y. Aoki, H. Sato, Y. Inada, H. Shishido, R. Settai, Y. Ōnuki and H. Harima: Transport and dHvA Experiments in Heavy Fermion Superconductor PrOs₄Sb₁₂.

S. R. Saha, H. Sugawara, Y. Aoki and H. Sato: Transport Properties on Metal-insulator Transition of PrRu₄P₁₂ Single Crystal.

中性子散乱物性物理研究室

1. 研究活動の概要

本研究室は、希土類化合物における強相関電子現象を中心に、各種の物質の示す興味深い新しい現象の研究を、中性子散乱・X線回折を主な手段として行っている。本年度の研究のうち、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 15 課題の共同利用研究・協力研究あるいは共同開発研究を行い、また、国外では、フランスの LLB 研究所、ヨーロッパ連合の ILL 研究所において計 6 課題の共同研究を行った。中性子散乱以外では、KEK 放射光施設において計 2 課題の研究を行うとともに、あらたに、理研播磨研、原研放射光科学センターとの共同で、SPring-8 において 2 課題の研究を開始した。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、これらの研究により得られた主な成果の概要を述べる。

1) 希土類化合物における強相関電子現象の研究

a. 充填スクッテルダイト化合物の多彩な電子現象（岩佐、桑原、神木）

充填スクッテルダイト化合物 RT_4X_{12} (R =希土類、 T =Fe, Ru, Os、 X =P, As, Sb) は、 R , T , X の 3 原子の組み合わせを変えることによって、磁性原子 R に起因する強磁性・反強磁性、金属 - 非金属転移、重い電子状態、非通常型超伝導、近藤半導体的状態、非フェルミ液体状態等々、 f 電子系強相関現象のほとんどすべての現象が現れることから、ユニークな系として注目されている。我々は、本物理教室の電子物性研との強い共同のもとに、この系の研究を行っている。すでに前年度までに、 $PrFe_4P_{12}$ において、 Pr 原子の $4f$ 電子軌道の反強的四重極秩序が生じていることを、X 線回折並びに中性子回折により見いだしているが、本年度はさらに、重い電子超伝導体 $PrOs_4Sb_{12}$ においても、磁場下で反強的四重極秩序が誘起されることを直接的に見いだした（原研先端研：目時直人氏との共同）。以上の実験結果は、 $PrOs_4Sb_{12}$ の超伝導を含め、これらの物質の重い電子状態を研究するうえで、重要な情報となる。また、金属 - 絶縁体転移を示す $PrRu_4P_{12}$ について X 線回折の実験を行い、絶縁体相における超格子変調が、四重極秩序相の $PrFe_4P_{12}$ における超格子変調とは同じ波数でありながら、原子変位（特に P 原子の変位）の大きさがけた違いに大きいことを見いだした（室蘭工大：関根ちひろ氏、産総研：李哲虎氏との共同研究）。これは、 $PrRu_4P_{12}$ が、 $PrFe_4P_{12}$ とは同じフェルミ面の不安定性（ネスティング条件）持ちながら、 f 電子の 4 重極相互作用ではなく、バンドヤンテラ効果により秩序状態を作っている可能性を示唆している。

b. 少数キャリア系 Ce モノプニクタイトの電子状態（岩佐、桑原、神木）

我々は、Ce モノプニクタイト、 CeX (X =P, As, Sb, Bi)、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。本年度はまず、 CeP に対する超高压下の中性子回折の実験により、約 3.2GPa 以上の圧力下で系は低温で強磁性を示すのみであることを明らかにした（原研先端研：長壁豊隆氏との共同研究）。これにより、今後はより高压下での強磁性の消滅過程の研究が興味深い。また、 CeP の高磁場下の X 線回折の実験を SPring-8 で開始し、約 10 T 以上の磁場下で、より短い周期の磁気構造が存在することを示す超格子反射の測定に成功した（理研播磨研：勝又紘一グル - プとの共同研究）；SPring-8 ではさらに、 $CeSb$ に関する共鳴 X 線散乱の研究を開始した（東北大 / 原研：村上洋一グル - プとの共同研究）；また、 $CeSb$ および $CeBi$ について、磁気ポーラロン格子に特徴的な原子振動と思われる特異なフォノンモードの測定を継続して行った（LLB：J.-M. Mignot、M. Braden、金材研：北澤英明、各氏との共同研究）。

c. Yb_4As_3 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)

Yb_4As_3 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。本年度は前年度に引き続き、電荷秩序相の Yb^{3+} 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。その結果、比較的高エネルギーのスピンの励起は、ハイゼンベルグモデルから予想される様な複雑なスペクトルを示すが、反強磁性波数 ($q = \pi$) 付近では、予想された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可能性を示唆している。(LLB: J.-M. Mignot、ILL: A. Heiss、東北大: 落合 明、東大物性研: 青木英和、各氏との共同研究); さらに、 Yb_4As_3 の電荷秩序相転移の機構に関連して、これまでに、[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ているが、本年度も、この異常の正確な測定を継続した。(東北大: 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)

d. GdB_6 の磁気構造と格子歪み (桑原、神木)

GdB_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 CeB_6 やその他の希土類 6 硼化物に対する、 f 電子が軌道の自由度を持たない参照系として、興味深い。我々は、前年度までの熱外中性子回折の実験により、この物質の低温秩序相では、 CeB_6 や PrB_6 でも見られる、波数ベクトル $(1/2, 1/4, 1/4)$ の反強磁性構造を持つことを明らかにした。本年度はこの磁気構造をさらに詳しく調べるために、磁場下での熱外中性子回折実験を開始した。また、KEK-PF における放射光を用いた単結晶 X 線散乱により、低温秩序相で反強磁性構造と同じ波数ベクトルの超格子歪みが存在することを発見した。以上の実験事実は、希土類 6 硼化物においては、軌道の自由度のみならず、伝導電子のバンド構造や結晶構造の不安定性も、その多彩な物性に大きな役割を果たしていることを示唆している。(KEK: 新井正敏、東大理: 中尾裕則、村上洋一、国井暁、原研: 石井賢司、各氏との共同研究)

e. 重い電子系の量子臨界現象の研究 (門脇)

反強磁性-非磁性境界に位置する遍歴電子系は、 $T=0$ に位置する量子臨界点の性質に起因する臨界現象や非フェルミ液体的な振舞を示すことで、最近興味を持たれている。このような性質を示す Ce-系の重い電子系化合物 CeNi_2Ge_2 、 $\text{Ce}(\text{Ni}_{1-x}\text{Pd}_x)_2\text{Ge}_2$ 、 $\text{Ce}(\text{Ni}_{1-x}\text{Rh}_x)_2\text{Ge}_2$ 、 $\text{Ce}(\text{Ru}_{1-x}\text{Rh}_x)_2\text{Si}_2$ におけるスピン揺動、磁気構造の研究を行っている。(阪大理: 河原崎修三、田畑吉計、富山県立大工: 福原忠、前沢邦彦、CEA-Grenoble: B Fak、S Raymond、J Flouquet、物性研: 石川征靖、阿曾尚文、吉沢英樹、各氏との共同研究)

f. 近藤半導体 CeRhAs の逐次相転移 (岩佐、神木)

CeRhAs は、 $T_1 = 370$ K、 $T_2 = 235$ K、 $T_3 = 165$ K と 3 つの温度で逐次的に相転移を行い、低温では半導体的に振る舞う。 T_1 以上の高温での価数揺動的振る舞いから、この系は近藤半導体ではないかと言われている。本年度までの我々の X 線回折の実験により、 T_1 以上の高温相の 6 方晶構造を基本にして、 T_1 以下の温度では、 c -軸の大幅な収縮を伴って c -面内で 2 倍の周期の構造が安定化し、また、 T_2 以下で、さらに c -軸方向に 3 倍周期の超格子変調構造が現れること、さらにこれに加え、 T_2 と T_3 の間でのみ、 c -面内に 3 倍周期の超格子変調が加わることが明らかになった。このような複雑な構造の変化は希土類化合物ではあまり例がなく、この物質の示す逐次相転移は、バンド構造と密接に関係した電子相転移であると考えられる。(広島大: 高島敏郎、グレル - プとの共同研究)

g. $\text{R}_3\text{T}_4\text{X}_{13}$ における超周期構造転移と磁気特性 (桑原、岩佐、神木)

$\text{R}_3\text{T}_4\text{X}_{13}$ (R =希土類、 T =Ir, Pt、 X =Sn, In) は $\text{R}_3\text{X} - 4(\text{TX}_3)$ と表せるように、2 つの独立な立方結晶格子が組み合わさり、また、 R 原子の一次元鎖が直交して存在する興味深い結晶構造を持つ。本年度ま

での中性子回折およびX線回折による研究により、 $\text{Eu}_3\text{Ir}_4\text{Sn}_{13}$ において、60 K以下の温度において、波数ベクトルが $(1, 1/2, 1/2)$ の超格子変調が生じていることを見いだすとともに、10 K以下では、これと同じ波数ベクトルの反強磁性磁気秩序が生じていることを明らかにした。この実験結果は、 $\text{Eu}_3\text{Ir}_4\text{Sn}_{13}$ においては、結晶構造特有の構造不安定性と結合して磁気的秩序が生じていることを示している。この物質系では、 $\text{Ce}_3\text{Ir}_4\text{Sn}_{13}$ が低温で2段の相転移を示すとともに、重い電子異常を示すことが知られているので、結晶構造とこの重い電子異常との関連を調べるため研究を開始した。(電子物性研究室との共同研究)

2) アクチナイド化合物の電子状態

a. 重い電子系強磁性超伝導体 UGe_2 の $5f$ 電子状態 (桑原、神木)

UGe_2 はキュリー温度 T_C 以下の T^* と呼ばれる温度で様々な物理量に異常が観測されており、この異常と超伝導発現機構との関連が議論されている。この T^* での異常に注目して、中性子散乱により常圧下でのフォノン及び圧力下での熱膨張測定を行った。今回調べた結晶主軸方向の音響フォノンには T^* 前後で異常は観測されていない。一方、 T^* 以下の温度領域において斜方晶 b 軸と c 軸の格子定数の温度依存性に顕著な異方性が現れることが初めて明らかになった。また、この系では低温で明確なスピン波励起は観測にかかっていないが、 T_C 前後で分散のない強い磁気励起が観測されている。本年度の研究により、この磁気励起は通常の強磁性体の臨界散乱とは大きく異なり T_C 以下の広い温度領域で存在することが分かった。(原研先端基礎研：芳賀芳範、大貫惇睦、各氏との共同研究)

b. 重い電子系 URu_2Si_2 の $5f$ 電子状態 (桑原、神木)

重い電子系超伝導体 URu_2Si_2 の $5f$ 電子状態を調べるため、偏極中性子散乱によりこの系の常磁性状態 ($T = 60$ K, $B = 6$ T || c 軸) での磁場誘起モーメントの磁気形状因子の測定を行った。得られた結果は自由ウランイオンの磁気形状因子に非常に近い値となったが、今後試料サイズを薄くした単結晶試料での実験により消衰効果の影響を見積もる必要がある。(北大理：網塚浩氏との共同研究)

3) 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、パイロクロア型酸化物 $\text{Y}_{2-x}\text{Bi}_x\text{Ru}_2\text{O}_7$ 、 $\text{R}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ ($\text{R}=\text{Ho}, \text{Dy}, \text{Tb}$)、 $\text{R}_2\text{Sn}_2\text{O}_7$ ($\text{R}=\text{Pr}, \text{Nd}, \text{Ho}, \text{Dy}, \text{Tb}$) のスピン相関、磁気構造を測定し各々の系のフラストレーションの起源を解明している。(九州工業大工：松平和之、名大理：佐藤正俊、各氏との共同研究)

b. 熱外中性子回折装置の開発 (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行うために、KEKのKENSに設置された熱外中性子回折装置 EXCED の開発に協力している。今年度は、超伝導磁石を用いた回折実験が行なえるように装置を改良し、 GdB_6 、 GdGa_2 等の物質の磁場下の磁気構造を測定した。(KEK：新井正敏、東北大理：国井 暁、九州工大：浜崎達一、各氏との共同研究)

2. 研究業績

1) 論文

K. Kuwahara, S. Sugiyama, K. Iwasa, M. Kohgi, M. Nakamura, Y. Inamura, M. Arai and S. Kunii: EXCED – epithermal neutron diffractometer at KENS, *Appl Phys A* **74** (2002) S302–304.

A. Hannan, T. Osakabe, M. Kohgi and K. Iwasa: High-pressure magnetic phase diagram of CeP studied by neutron diffraction, *Appl Phys A* **74** (2002) S565–567.

S. Itoh, K. Iwasa and M.J. Bull: Anomalous critical scattering from a three-dimensional percolating antiferro magnet $\text{RbMn}_{0.31}\text{Mg}_{0.69}\text{F}_3$, *Appl Phys A* **74** (2002) S789–791.

T. Osakabe, A. Hannan, N. Tachi, M. Kohgi and H. Kitazawa: Magneti P-T phase diagram and magnetic structure of CeSb, *Applied Phys. A*, **74** (2002) S799–801.

M. Kohgi, K. Iwasa, J.-M. Mignot, A. Gukasov, B. Fåk, A. Hiess, A. Ochia i and H. Aoki: Neutron scattering studies of the one-dimensional quantum spin magnetism in Yb_4As_3 , *Appl Phys A* **74** (2002) S871–873.

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, *Appl Phys A* **74** (2002) S1779–1781.

Y. Koike, N. Metoki, Y. Haga, K.A. McEwen, M. Kohgi, R. Yamamoto, N. Aso, N. Tateiwa, T. Komatsubara, N. Kimura and H. Aoki: Magnetic structure, phase diagram, and a new type of spin-flop transition dominated bu higher order interaction in a localized 5f system $\text{U}_3\text{Pd}_{20}\text{Si}_6$, *Phys. Rev. Lett.* **89** (2002) 077202–(1–4).

T. Sasakawa, T. Suemitsu, T. Takabatake, Y. Bando, K. Umeo, M.H. Jung, M. Sera, T. Suzuki, T. Fujita, M. Nakajima, K. Iwasa, M. Kohgi, Ch. Paul, St. Berger and E. Bauer: Successive phase transition and energy-gap formation in CeRhAs, *Phys. Rev. B*, **66** (2002) 041103–(1–4).

M. Yokoyama, H. Amitsuka, K. Kuwahara, K. Tenya and T. Sakakibara: Anomalous Fermi Liquid Behavior of the Dilute Uranium Alloys $\text{La}_{1-x}\text{U}_x\text{Ru}_2\text{Si}_2$ ($x \leq 0.07$), *J. Phys. Soc. Jpn.*, **71** (2002) 3037–3042.

T. Fukuhara, H. Kadowaki, N. Aso, T. Takeuchi, T. Kuwai, J. Sakurai and K. Maezawa: Magnetic Structure of $\text{Ce}(\text{Ni}_{1-x}\text{Pd}_x)_2\text{Ge}_2$ Proximate to the Magnetic Instability, *J. Phys. Soc. Jpn.* **71** (2002) 1360–1364.

H. Kadowaki, T. Fukuhara, K. Maezawa, N. Aso, H. Yoshizawa, T. Ooshima and M. Ishikawa: Neutron Diffraction Study of Magnetic Structure of the Heavy Fermion Antiferromagnet $\text{Ce}(\text{Ni}_{1-x}\text{Rh}_x)_2\text{Ge}_2$ *J. Phys. Soc. Jpn.* **71** (2002) 2069–2070.

H. Kadowaki, T. Fukuhara and K. Maezawa: Low-energy spin fluctuations of the heavy-Fermion compound CeNi_2Ge_2 : origin of non-Fermi liquid behavior, *Acta Phys. Pol. B* **34** (2003) 375–378.

M. Nakajima, K. Iwasa, M. Kohgi, T. Sasakawa and T. Takabatake Successive Structural Phase Transitions of the Semiconductive CeRhAs, *Acta Physica Polonica B*, **34** (2003) 1109–1112.

L. Hao, K. Iwasa, M. Nakajima, D. Kawana, K. Kuwahara, M. Kohgi, H. Sugawara, T.D. Matsuda, Y. Aoki and H. Sato Antiferro-Quadrupolar Ordering of 4f-Electron State in the Filled Skutterudite $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$, *Acta Physica Polonica B*, **34** (2003) 1113–1116.

K. Iwasa, L. Hao, M. Nakajima, M. Kohgi, H. Sugawara, Y. Aoki, H. Sato and T. D. Matsuda Magnetic Excitations in the Heavy-Electron and Antiferro-Quadrupolar-Ordering System $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$, *Acta Physica Polonica B*, **34** (2003) 1117–1120.

Y. Koike, N. Metoki, Y. Haga, K.A. McEwen, M. Kohgi, R. Yamamoto, N. Aso, T. Komatsubara, N. Kimura and H. Aoki: Neutron scattering study on magnetic order and magnetic excitations of a localized uranium compounds $\text{U}_3\text{Pd}_{20}\text{Si}_6$, *Acta Physica Polonica B*, **34** (2003) 1121–1124.

M. Kohgi, K. Iwasa, J.-M. Mignot, A. Hiess, A. Ochiai and H. Aoki Magnetic Field Effects on the One-Dimensional $S=1/2$ Antiferromagnet Yb_4As_3 , *Acta Physica Polonica B*, **34** (2003) 1217–1220.

K. Kuwahara, M. Kohgi, K. Ohoyama, R.I. Bewly, K. Hashi: Anomalous Magnetic Excitations in YbSb , *Acta Physica Polonica B* **34** (2003) 1231–1234.

T. Takabatake, T. Suemitsu, T. Sasakawa, J. Kitagawa, K. Umeo, M. Nakajima, K. Iwasa and M. Kohgi Anisotropic Thermoelectric Properties of CeRhAs with Superstructures, *Acta Physica Polonica B*, **34** (2003) 1303–1308.

T. Osakabe, A. Hannan, D. Kawana, M. Kohgi, H. Kitazawa: Magnetic P–T Phase Diagrams of CeSb and CeBi , *Acta Physica Polonica B*, **34** (2003) 1469–1473.

2) 学会講演

日本物理学会第57回年次会 2002年3月 (立命館大学)

岩佐和晃, 桑原慶太郎, 神木正史, P. Fischer, A. Dönni, T. Hansen, 國井 暁: $\text{Ce}_{0.75}\text{La}_{0.25}\text{B}_6$ の低温相における中性子散乱

A. Hannan、長壁豊隆、岩佐和晃、神木正史: CeP の高圧磁気相図

長壁豊隆、A. Hannan、神木正史、北澤英明: CeX ($X=\text{Sb}, \text{Bi}$) の圧力 - 磁気相図と磁気構造

桑原慶太郎, 大山研司, 神木正史, R.I. Bewly, 端健二郎: YbSb の 5K 非磁性転移と磁気励起異常

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変調と四重極秩序

神木正史, 岩佐和晃, J.-M. Mignot, A. Hiess, 青木英和, 落合 明: 1次元 $S = 1/2$ 反強磁性体 Yb_4As_3 のスピン励起の磁場方向依存性

門脇広明: パイロクロア磁性体におけるスピン相関の観測: スピンアイスとスピン液体.

日本物理学会秋季大会 2002年9月 (中部大学)

佐賀山基, 桑原慶太郎, 神木正史, 中島健次, 西正和, 阿曾尚文, 小池良浩, 目時直人, 立岩尚之, 木村憲彰, 青木晴善: 局在 5f 電子系 $\text{U}_3\text{Pd}_{20}\text{Si}_6$ の磁気形状因子

岩佐和晃，徳山俊孝，神木正史，佐藤憲昭，毛利信男：SmS の圧力誘起絶縁体 - 金属転移における異常熱膨張

岩佐和晃，八才麗傑，中島基樹，神木正史，菅原 仁，青木勇二，松田達磨，佐藤英行：PrFe₄P₁₂ の重い電子・四重極転移における磁場誘起磁性と励起状態．

佐賀山基，川名大地，桑原慶太郎，神木正史，長壁豊隆，芳賀芳範，山本悦嗣，松田達磨，大貫惇睦：UGe₂ の結晶格子異常

桑原慶太郎，佐賀山基，岩佐和晃，神木正史，宮崎志功，野崎順，野上淳司，横山淳，網塚浩，中尾裕則，村上洋一：URu₂Si₂ の高圧下 X 線回折

中島基樹，岩佐和晃，神木正史，笹川哲也，高畠敏郎：CeRhAs におけるギャップ形成と逐次構造相転移

日本中性子科学会第 2 回年会 2002 年 12 月 (熊取公民館)

岩佐和晃，Hao Lijie，中島基樹，桑原慶太郎，神木正史，菅原 仁，青木勇二，佐藤英行，目時直人，荒木新吾，金子耕士，松田達磨，J.-M. Mignot，A. Gukasov，石井賢司，稲見俊哉，村上洋一，中尾裕則，若林裕助，澤 博，関根ちひろ，李 哲虎：スクッテルダイトの多彩な電子状態と相転移に関する中性子・X 線散乱研究

国際会議

6th Prague Colloquium on f-Electron Systems (PCFES6), Praha, Czech, 6-9 July, 2002

M. Kohgi, K. Iwasa, A. Hannan and T. Osakabe: Physics of the Low-Carrier System Ce-Monopnictides (Invited)

International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2002), Kraków, Poland, 10-13 July, 2002

L. Hao, K. Iwasa, M. Nakajima, D. Kawana, K. Kuwahara, M. Kohgi, H. Sugawara, T. D. Matsuda, Y. Aoki and H. Sato: Antiferro-quarupolar ordering of 4f-electron state in the filled skutterudite PrFe₄P₁₂.

K. Iwasa, L. Hao, M. Nakajima, M. Kohgi, H. Sugawara, T. D. Matsuda, Y. Aoki and H. Sato: Magnetic excitations in the heavy-electron and antiferro-quadrupolar-ordering system PrFe₄P₁₂.

M. Kohgi, K. Iwasa, J.-M. Mignot, A. Hiess, A. Ochiai and H. Aoki: Magnetic field effects on the one-dimensional $S = 1/2$ antiferromagnet Yb₄As₃.

K. Kuwahara, H. Sagayama, K. Iwasa, M. Kohgi, S. Miyazaki, J. Nozaki, J. Nogami, M. Yokoyama, H. Amitsuka, H. Nakao and Y. Murakami: High pressure X-ray diffraction study of URu₂Si₂.

T. Takabatake, T. Suemitsu, T. Sasakawa, J. Kitagawa, K. Umeo, M. Nakajima, K. Iwasa and M. Kohgi: Anisotropic thermoelectric properties of CeRhAs with superstructures.

K. Kuwahara, M. Kohgi, K. Ohoyama, R.I. Bewly, K. Hashi: Anomalous Magnetic Excitations in YbSb

H. Kadowaki, T. Fukuhara and K. Maezawa: Low-energy spin fluctuations of the heavy-Fermion compound CeNi_2Ge_2 : origin of non-Fermi liquid behavior

The 23rd International Conference on Low Temperature Physics (LT23),
Hiroshima, Japan, 20-27 August, 2002

K. Ishii, L. Hao, T. Inami, Y. Murakami, K. Iwasa, M. Kohgi, Y. Aoki, H. Su gawara, H. Sato, S. Imada, H. Nakao, H. Sawa and Y. Wakabayashi : Resonant X-ray scattering study on the filled skutterudite $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$.

K. Iwasa, K. Kuwahara, M. Kohgi, P. Fischer, A. Dönni, T. C. Hansen and S . Kunii: Neutron-diffraction study of the unusual ordered phases of $\text{Ce}_{0.75}\text{La}_{0.25}\text{B}_6$.

計算システム研究室

1. 研究活動の概要

2001年度同様、2002年度も引続き国際的な2つの素粒子実験に参加するとともに、新たにCPUデザイン・実装研究も開始させた。素粒子実験のひとつは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。4年目のデータ取得となった。我々は、2002年度、ATLAS実験において初段トリガーシステムの開発の中心をにない、システムの核となるVLSIの設計、製作を終了させ、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(スライステストシステム)を完成させ、そのコントロールシステムの開発と全体のシステム評価を行った。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バックグラウンドノイズを除去し物理学事象のみを効率的に抽出し、解析することにより標準模型の中で実験的にその存在が確認されていないヒッグス粒子の探査、B中間子崩壊からのCP非保存の精密測定、トップクォークの物理やさらに4世代目のクォークの存否の確認、標準模型を超えてSUSY、テクニカラーモデルから予想される粒子の探索など多くの物理的解明を意図して企画されている。トリガーミュオンチェンバーは陽子・陽子衝突で派生するさまざまな粒子のうち、ミュオン(μ)粒子を観測、同定することを目的として設置される。ミュオン粒子は物理学事象が陽子・陽子衝突によって形成された場合の目安となる特徴的な粒子であり、かつその飛行パターンからそれを特定することは比較的容易になされる。粒子候補の飛跡はミュオンチェンバーで電気信号に変えられ、その信号系列から簡単なパターン認識(レベル1トリガー)を行い、ミュオン粒子同定を行おうとするものである。

前年度までに核となるASICを完成させた我々は、2002年度レベル1ミュオントリガーシステムの入力部から出力部までチャンネル数は1000分の1ながらとにかくすべてつなげたスライステストシステムを完成させた。チャンネル数は256程度であるがミュオンチェンバーの2次元読み出しにも対応しハードウェアで処理されるあらゆるトリガーパターンのテスト(1部の境界テストを除く)が行えるシステムである。このシステムテストの完遂に我々は全力を傾けた。

レベル1トリガーそのものはすべてハードウェアロジックによるパターン認識によりなされるが、このテストシステムのランコントロールやシステム内のハードウェアコンポーネントのパラメータ設定のためには大規模なソフトウェアを必要とする。我々はこのコントロールソフトウェアをATLAS DAQ-1 online systemのフレームワークに準拠する形で開発した。またこれらの統合コントロール用GUIの開発を行った。GUIはjavaを使い、イベントディスプレイにはpythonを使った。コンフィギュレーションデータベースはやはりATLAS標準フレームワークの書式に従いxmlで記述した。これらのソフトウェア開発は大学院学生によって強力に押し進められた。このソフトウェア開発により得られた知見は2002年9月にコルマル(フランス)で開催されたLECC2002(大型ハドロン衝突型加速器LHCのためのエレクトロニクス開発研究国際会議)で公表した。

このスライステストの結果の評価も行った。このテスト結果は2つの観点から評価された。それは

1. パターン認識論理回路の正確さ

2. トリガー判定所要時間 (レイテンシー)

である。1項目の評価はこの装置の入力、トリガー判定、それに出力と同じ論理構造をもつシミュレーションソフトウェアを作成し同じデータを入力させ、出力結果を比較することによりなされた。スライテストシステムへのデータ入力はパターンジェネレータを用いた。なにかどちらのシステムの修正を行い最終的にはどちらの結果も一致するようになった。レイテンシーはシステムに入力されてから出力されるまでの所要時間であるが、我々には 1250ns の時間が与えられている。この時間内であればよい。測定結果は 1200ns であった。これらの結果は LECC2002 研究会でも公表し、米国、ノーフォークで 2002 年 11 月に行われた IEEE NSS (原子核科学シンポジウム) 2002 にても公表した。

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。

3) CPU デザイン

2002 年度より CPU アーキテクチャおよび FPGA を利用したリコンフィギュラブルコンピュータの研究を開始した。ソフトウェアにより何度も書き換え可能な論理ゲートアレイ FPGA を用いて実践的に新しい CPU のデザインを開拓する、また FPGA に CPU をひとつ埋め込み、空いた部分は目的用途に応じてリコンフィギュラブルに回路を構成させる場合どのようなシステム形態をとるのが良いかの研究に着手した。

初年度である 2002 年度は 1990 年代前半に盛んに利用されその後、後継 CPU の製作の不調によりその製作が打ち切られたトランスペュータに焦点を当ててこの再構築に取り掛かってみた。トランスペュータは C.A.R.Hoore が提唱した情報科学理論 Communication Sequential Process (CSP) に基づき設計されたプログラム言語 Occam を実行する CPU チップである。CSP 理論の実現ということによりこのチップは複数集めて並列処理が高速で行える CPU である。1 CPU でも容易に複数のプロセスを生成・実行できるようになっている。しかしハードウェア実装の不完全さから理論も Occam 言語も完璧であるがハードウェアで大きなシステムを構成するとうまく機能しないことが指摘されていた。

我々はこの CPU を機械語の動きから分析し、回路を再構成し FPGA を用いてハードウェア実装することを行った。またトランスペュータが並列分散システムの 1 つのプロセッサエレメントとして利用される特徴を生かし、ひとつの FPGA 上に複数の我々独自のトランスペュータを実装させその結合形態は外部から自由に変えられるように設計した。2002 年度一部にまだ未設定の機械語命令があるが第 1 版のトランスペュータを完成させることができた。動作クロックはまだ 14MHz 程度である。この製作結果は 2003 年 11 月横浜で行われた第 10 回日本 CPLD/FPGA デザインコンファレンスにおいて公表した。今後は動作クロックの向上、トランスペュータ ASIC の製作 (我々のデザインが FPGA でなく単体 IC としてどこまでの性能がだせるかの確認) を行い複数トランスペュータシステムの設計、製作に向かっていこうと考えている。

2. 研究業績

1) 論文

K.Hara et al.(BELLE collaboration): Measurement of the B^0 and \bar{B}^0 Mixing Parameter $\Delta(M_D)$ using Semileptonic B^0 Decays, Phys. Rev. Lett. **89** 251803,2002

K.Hasuko et al.: A Remote Control System for FPGA-Embedded Module in Radiation Environments, IEEE Transaction on Nuclear Science **49** 501-505 2002

P.Krokovny et al.(BELLE collaboration): Observation of $\bar{B}^0 \rightarrow D^0 \bar{K}^0$ and $\bar{B}^0 \rightarrow D^0 \bar{K}^{*0}$ Decays, Phys. Rev. Lett. **90** 141802,2003

K.Abe et al.(BELLE collaboration): Study of Time Dependent CP Violating Asymmetries in $B \rightarrow s\bar{q}q$ Decays, Phys. Rev. **D67** 031102,2003

N.C.Hastings et al.(BELLE collaboration): Studies of $B^0 - \bar{B}^0$ Mixing Properties with Inclusive Dilepton Events, Phys. Rev. **D67** 052004,2003

K.Abe et al.(BELLE collaboration): Measurement of Branching Fractions and Charge Asymmetries for Two-body B Mesons with Charmonium, Phys. Rev. **D67** 032003,2003

A.Satpathy et al.(BELLE collaboration): Study of $\bar{B}^0 \rightarrow D^{0(*)}\pi^+\pi^-$ Decays, Phys. Lett **B553** 159-166,2003

K.Inami et al.(BELLE collaboration): Search for the Electric Dipole Moment of the tau lepton, Phys. Lett **B551** 16-26,2003

F.Fang et al.(BELLE collaboration): Measurement of Branching Fractions for $B \rightarrow \eta_c K^{(*)}$ Decays, Phys. Rev. Lett. **89** 071801,2002

K.Abe et al.(BELLE collaboration): Study of CP-violating Asymmetries in $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ Decays, Phys. Rev. Lett. **89** 071801,2002

K.Abe et al.(BELLE collaboration): Measurement of the Inclusive Semileptonic Branching Fraction of B Mesons and V_{cb} , Phys. Lett. **B547** 181-192,2002

J.Kaneko et al.(BELLE collaboration): Measurement of the Electroweak Penguin Process $B \rightarrow \chi_s l^+ l^-$, Phys. Rev. Lett. **90** 021801,2003

K.Abe et al.(BELLE collaboration): An Improved Measurement of Mixing Induced CP Violation in the Neutal B Meson System, Phys. Rev.**D66** 071102,2002

B.C.K.Cassey et al.(BELLE collaboration): Charmless Hadronic Two-body B Meson Decays, Phys. Rev. **D66** 092002,2002

P.Krokovny et al.(BELLE collaboration): Observation of $B \rightarrow D^{(*)}K^- K^{0(*)}$ Decays, Phys. Rev. Lett. **89** 231804,2002

A.Druts koy et al.(BELLE collaboration): Observation of $B \rightarrow D^* K^- K^{0(*)}$ Decays, Phys. Lett. **B542** 171-182,2002

K.F.Chen et al.(BELLE collaboration): Measurement of CP Violating Parameters in $B \rightarrow \eta' K$ Decays, Phys. Lett. **B546** 196-205,2002

T.Tomura et al.(BELLE collaboration): Measurement of the Oscillation frequency for $B^0 - \bar{B}^0$ Mixing using Hadronic B^0 Decays, Phys. Lett. **B546** 196-205,2002

R.S.Lu et al.(BELLE collaboration): Observation of $B^\pm \rightarrow \omega K^\pm$ Decay, Phys. Rev. Lett. **89** 191801,2002

K.Abe et al.(BELLE collaboration): Studies of the Decay $B^\pm \rightarrow D_{CP} K^\pm$ Decays at BELLE, Phys. Rev. Lett. **90** 131803,2003

A.Gordon et al.(BELLE collaboration): Study of $B \rightarrow \rho\pi$ Decays at BELLE, Phys. Lett. **B542** 183-192,2002

K.Abe et al.(BELLE collaboration): Observation of the Decay $B^0 \rightarrow D^\pm D^{*\mp}$, Phys. Rev. Lett. **89** 122001,2002

S.K.Choi et al.(BELLE collaboration): Observation of the $\eta(C)(2S)$ in Exclusive $B \rightarrow KK_S K^- \pi^+$ Decays, Phys. Rev. Lett. **89** 102001,2002

K.Abe et al.(BELLE collaboration): Observation of Double $c\bar{c}$ Production in e^+e^- Annihilation at \sqrt{s} approximately 10.6 GeV, Phys. Rev. Lett.**89**142001,2002

K.Abe et al.(BELLE collaboration): Measurement of χ_{C2} Production in Two Photon Collisions, Phys. Lett. **B540** 33-42,2002

R.Abe et al.(BELLE SVD group): Status of the BELLE SVD Detector, Nucl. Instrum. Meth.**A478** 296-298,2002

2) 国際会議報告

S.Komatsu et al.: Software Framework Developed for the Slice Test of the ATLAS Endcap Muon Trigger System, Proceedings of the 8th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Colmar, France, 9-13 Sep 2002, pp.. 384-388

H.Kano et al.: Results of a Sliced System Test for the ATLAS End-cap Muon Level-1 Trigger, Proceedings of the 8th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Colmar, France, 9-13 Sep 2002, pp.241-245

R.Ichimiya et al.: Sector Logic Implementation for the ATLAS Endcap Level-1 Muon Trigger, Proceedings of the 8th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Colmar, France, 9-13 Sep 2002, 36-240

3) 学会講演

日本物理学会年次大会 2002年3月24日～3月27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 30: 全体計画とその進展について」

小松 知他 ATLAS エンドキャップミュオンレベル1トリガーグループ:「LHCにおける ATLAS 実験 TGC エレクトロニクス開発の進行状況」

辻 伸介他 ATLAS エンドキャップミュオンレベル1トリガーグループ:「LHCにおける ATLAS 実験 TGC エレクトロニクス開発の進行状況2」

溝口健太郎他 ATLAS エンドキャップミュオンレベル1トリガーグループ:「ATLAS 前後方ミュオントリガーシステム用エレクトロニクスの開発 - インテグレーションテスト 結果報告 -」

佐々木真人他:「テレスコープアレイ 42 ニュートリノ観測」

日本物理学会秋季大会 2002年9月13日～9月16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 43: 全体計画とその進展について」

佐々木真人他:「全天監視高精度宇宙線望遠鏡計画(1): 設計と期待される成果」

第10回 FPGA/PLD デザインコンファレンス(日本エレクトロニクスショー協会主催)

2002年1月31日

豊島克幸、田中 誠、福永 力「並列処理専用小型プロセッサおよびそのネットワークの FPGA への実装」

国際会議

8th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Colmar, France, 9-13 Sep 2002

S.Komatsu et al.: Software Framework Developed for the Slice Test of the ATLAS Endcap Muon Trigger System

H.Kano et al.: Results of a Sliced System Test for the ATLAS End-cap Muon Level-1 Trigger

R.Ichimiya et al.: Sector Logic Implementation for the ATLAS Endcap Level-1 Muon Trigger

IEEE Nuclear Science Symposium, Norfolk, Virginia, USA, 9-16 Nov. 2002

C.Fukunaga et al., The First Integration Test of the ATLAS End-cap Muon Level1 Trigger System

4) 学会誌等

なし

新緑の気持ちのいい季節になった。

大学周辺の山林を歩いていると、世間のニュースがまるで自分に関係のないことのように思えてくる。ところが、ひとたびオフィスに戻ると、それらのニュースが遅かれ早かれ何らかの形で自分の身の上にかかりかかってくるという現実呼び戻される。比較的身近な話題から世界規模の話題にいたるまで、悪いことほどとりあげられるのはいつものことではあるが、それにしても最近では気分が暗くなる話題ばかり目立つ。日本の景気の長期低迷、イラク戦争、北朝鮮のミサイル・核開発問題、身近なものでは、大学の人員・諸予算のきりつめ、4大学統合後の見通し（これは「暗い」というとしかられそうなので「いろいろな問題が懸念される」という程度にしておこう...）ほかにもいろいろあったはずだが、頑張っと思いついても、どんどん暗くなるばかりなのでこのぐらいにしておく。

そういえば、最近ではSARSの蔓延というのもあった。

あったというより、これは現在マスコミなどでは最も人気のある話題であり、この年次報告が印刷・製本されるころまでに解決されているとも思えない。私のところもストックホルムから学生さんがひとり訪問する予定になっていたのだが、その人からメールでSARSに関する問い合わせがあった。「日本ではSARSはどう受け止められているのか。実は『日本に行く』といたら両親に猛反対された。」日本ではその時点でSARSと診断された人はゼロで、「うたがい例」とか「可能性例」とかいわれる人が何人かいただけだから、最初そのメールをみたときには、なんだか滑稽な感じがしたが、すぐに笑えないことに気づいた。というのは自分も夏に北京で開かれるワークショップに誘われていて、いけないほうがいいかな、と考えていたところだからである。北京と東京では全然ちがうのだが、それは日本人の常識で、その学生さんの両親から見ると多分北京と東京は一緒なのだ。そういえば、ドイツでは中華料理屋で日本料理もだす（と看板に書いてある）店をあちこちでみかけた。日本人の感覚では中華料理の店で日本料理がうまからうわけがないのだが、それは日本人の思うことで、多分ヨーロッパの少なくとも一部（と多分アメリカ）では日本と中国はかなりいっしょくたにされている。単にいっしょくたにされているならいいのだが、どうも日本というのは中国の一部と思われているのではないかと思うこともある。中国は最近ますます存在感を増しているから、そういう傾向はこれからさらに強まっていくかもしれない。

結局、その学生さんにはWHOに把握されていたSARS感染者数と死亡者数の分布世界地図をインターネットで見つけてきて送ってあげた。スウェーデンと日本では公開されているデータでみるかぎりSARSの危険度にさしてかわりはないのである。ついでにSARSのほかにも自動車事故、地震、火事、飛行機の墜落、などなど災難の種はいっぱいあるので、安心してきなさいと書いて書き送った結果、その本人はいま私の傍らのパソコンで作業中である。

（川島記）

平成14年度年次報告編集委員

大橋隆哉（2002年度教室主任）

酒井 治

川島直輝

佐々木 伸