

## 研究室活動状況 平成12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

今年度から4年間の予定で文部科学省科学研究費 特定領域研究「ニュートリノ振動とその起源の解明」が開始され、我が研究室は理論系計画班中で最大規模を持つ都立大班の中核としてその一翼を担っている。以下に研究室の活動を(1-6):ニュートリノ物理の現象論、と(7-11):それ以外の研究項目の順序で記述する。

### 1) 超新星ニュートリノを使ったニュートリノ質量パターンの決定

スーパー神岡実験によるニュートリノ振動現象の発見と KEK → 神岡長基線ニュートリノ実験 (K2K 実験) による確認を受けて確定してきたニュートリノ3世代混合スキームにおいて残された未決定な重要な要素の一つとしてニュートリノ質量パターンの問題がある。本年度の研究において、この順階層的あるいは逆階層的パターンのどちらが実現しているのかという問題への回答が超新星ニュートリノの観測とその分析によって与えられる可能性を指摘し、さらに超新星 1987A からのニュートリノデータの解析によって逆階層的パターンがほぼ排除できることを示した。これは超新星中の高い物質密度(太陽中心の  $10^{10}$  倍)によって、(1-3)混合角が余程小さくないかぎり超新星中において起きるニュートリノ準位交差は必然的に断熱的であることに拠っている。この性質によってニュートリノ質量パターンが順階層的パターンか、あるいは逆階層的パターンかによって共鳴転換を起こすのがニュートリノなのか反ニュートリノなのかが決まり、水チェレンコフ検出器の特性を使ったデータの分析によって後者の場合がデータの統計精度の範囲で容易に排除されてしまうからである。

### 2) 低エネルギーニュートリノ振動実験による CP 非保存効果の測定

長基線ニュートリノ振動実験による CP 非保存効果の測定法において「物質汚染問題のない、しかも実験可能なパラメータ領域を探せ」という新しい戦略を追及している。100 MeV 程度のエネルギーを持つ正反ミュー・ニュートリノ実験の差によって CP 非保存効果の測定が行えることを指摘した。この過程で、短距離において物質効果が打ち消し合い混合角は強く物質効果を受けているにもかかわらず、CP 非保存項を含む振動確率は真空振動によって近似できる、という「真空模倣機構」を発見した。このタイプの低エネルギーニュートリノ実験で CP 非保存効果の測定を行う場合に最も都合のよい基線長の評価を行い、30 – 40 km という近距離がよいという結果を得た。具体的に K2K 実験のビーム強度の1桁の改善とメガトン級水チェレンコフ検出器を仮定し、統計的視点からは十分実行可能な実験であることを示した。我々の論文投稿後に現れた大物実験家 B. Richter の論文が影響して、このタイプの実験は反響を呼び、実際 CERN (欧州原子核研究機構) において検討されている実験計画案は我々のオリジナル案に酷似している。(上記2課題はブラジル・カンピナス大、布川弘志氏との共同研究)

### 3) ニュートリノファクトリーの現象論

加速リング中に蓄積されたミュオン崩壊から得られる強いニュートリノフラックスをビームとして使う長基線実験であるニュートリノファクトリーというアイデアが数年前から脚光を浴びている。三世代のニュートリノの枠組の中で未決定でありまた最も重要視されている CP 非対称の位相の測定の可能性を、各混合角・質量自乗差・密度の不定性の誤差の相関とバックグラウンドの寄与を従来の取り扱いよりも遥かに注意深く見積もることによって議論した。その結果、

従来最良であると思われていた基線の長さ 3000km、ミューオンのエネルギー 50GeV よりは若干小さな値 (基線の長さ  $\sim 2000$ km、ミューオンのエネルギー  $\sim 20$ GeV) の方が一般に良いという結論が得られた。この研究は、KEK 菅原機構長のイニシアティブによって創設された NuFACTJ Working Group の活動の一貫として行なわれた。(大和日英基金奨学生 John Pinny 氏との共同研究)

#### 4) 四種類混合のニュートリノ振動の現象論

不活性ニュートリノを含む四種類混合のニュートリノ振動のうち、いわゆる  $(2+2)$  スキームの枠組で大気ニュートリノのデータの解析を行ない、ニュートリノの3つの混合角がどれだけの範囲で許容されるかを議論し、大気ニュートリノの振動が  $\nu_\mu \rightarrow \mu_\tau$  と  $\nu_\mu \rightarrow \mu_s$  の混合で記述されるような解がまだ許されることを示した。さらに、その結果と太陽ニュートリノに関するパレンシアグループの結果とを組み合わせることにより、両方の実験で活性ニュートリノ振動と不活性ニュートリノ振動が混じる解のみが許容されることを示した。又、このような  $(2+2)$  スキームで K2K 型の実験において中性カレントを使って CP 非保存を測定する可能性を議論した。この4世代解析は混合パラメーターへの人為的制限を含まず、現在のところ世界で最も一般的な解析である。

#### 5) 磁場と重力場によるフレーバー転換への影響

重力場と磁場の両方が存在する時には、従来知られている物質効果の他に重力場から誘引される物質効果があることが知られているが、そのニュートリノのフレーバー転換に与える影響を、活動銀河核などの強い重力場のある状況下で有効ハミルトニアンを書き下すことにより議論した。特に質量自乗差が無視できる場合にも大きな効果が期待できることが示された。一方、二重中性子星が合体する時に発生すると考えられているガンマ線バーストの火の玉においても高エネルギーのニュートリノが生成されると予想されているが、非常に強い磁場があるためにニュートリノ振動が質量だけによる場合に比べてタウニュートリノの強度が大きくなることを示した。又、等価原理の破れによりニュートリノ振動が起こる場合にも従来の結果と違うタウニュートリノの強度が期待されることも示した。

#### 6) 高エネルギーニュートリノ観測の検討

AMANDA 等の  $km^2$  程度の広さを持つ高エネルギーニュートリノの観測の可能性について詳細な検討をし、活動銀河核などから飛来する高エネルギーニュートリノの事象数、フレーバーの識別をする方法、バックグラウンドの見積りを行った。

#### 7) 超重力理論における超対称性の動力的破れ

超重力理論における超対称性の動力的破れの機構 (ゲージ化された  $U(1)_R$  対称性を用いるもの) に関して研究を進めた。この超対称性の動力的破れの機構は、昨年度に提案したものであるが、今年度はこの動力学を具体的な素粒子模型に組み込む努力をした。特に、超対称性が破れる系と我々の系が空間的 (時空の第5次元目に関して) に離れている場合 (“brane world”) について適用した。このように超対称性の破れが我々の系と空間的に離れているところ (“sequestered sector”) で起こる場合には、超対称性の破れは「アノマリー媒介」と呼ばれている機構で我々の系に伝わるしかない。この機構はとても単純でもっともらしいのであるが、一部の超対称粒子の質量の2乗が負になってしまうという問題を抱えている。ゲージ化された  $U(1)_R$  対称性がある場合にはこの問題が解決できることを示し、さらにこのゲージ対称性を利用した超対称性の動力学

的破れと組み合わせることは非常にもったらしいことを具体的に素粒子模型を構成して指摘した。現在の所、素粒子模型は時空間4次元の有効理論として記述されているが、本来あるべき5次元時空での記述をめざしてさらに研究を進めている。

#### 8) 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)が素粒子物理において重要な役割を演じるという示唆は以前から提起されてきている。しかし、重力の量子効果を解析する手法(Euclidean gravity)が本質的な困難を抱えているため、あくまでも示唆にすぎなかった。しかし、最近の弦理論の発展(D-brane)により、示唆されていた重力の量子効果(black hole entropy)をミクロスコピックな計算方法で再現することができた。従って、もう一度素粒子物理における重力の量子効果を、弦理論の技術を使って検討し直すことが可能であると思われる。この少々野心的な目標に向けて研究を進めている。

#### 9) 自発的に破れる $N = 2$ 超対称ゲージ理論の真空構造

$N = 2$  超対称ゲージ理論は低エネルギー有効理論が非摂動効果まで含めて厳密に決定されることが知られている。我々は、自発的に破れる  $N = 2$  超対称ゲージ理論に対して非摂動効果も含めた有効作用を構築し、その真空構造を解析した。このタイプのモデルは、古典的には超対称性が破れているにも関わらず真空期待値が無限に縮退していて真空が唯一に決まらない、という構造を持っている。しかし、非摂動効果を考慮した結果そのような縮退は解け、理論の真空が唯一に決まる可能性があることを示すことができた。

#### 10) Disoriented Chiral Condensate (DCC) のパラメーター共鳴機構

昨年度に引き続いてDCCドメイン形成のパラメーター共鳴機構に関する研究を続行した。今年度の研究では粒子生成に伴う反作用としての背景シグマ場の振動の減衰効果をハートリー近似の範囲で取り込む定式化を使い、反作用がパラメーター共鳴機構の実験的特徴を覆い隠してしまわないかどうかという問題に関する検討を行った。小振幅近似の範囲で1粒子運動量分布を解析した結果、量子論的な反作用の効果を取り込んだ後も共鳴ピークが消失することはないという結論を得た。これは線形シグマ模型が結合定数が20という非常な強結合系であることを考えると驚くべき結果であり、この性質はパラメーター共鳴機構の実験的探査可能性に対して明るい見通しを与えるものである。(北里大・廣岡秀明氏との共同研究)

#### 11) アハラノフ・ボーム散乱

Aharonov-Bohmによる記念碑的研究以来40年弱を経た今日もこの散乱に対する理解は完全な結着をみていない。この現象に対するより深い理解を実現するための第一歩として以前アハラノフ・ボーム散乱振幅のユニタリー性について調べた。(新井・南方、98年)この研究を発端としてアハラノフ・ボーム散乱振幅の前方付近での振る舞いについて徹底的な再検討を行った。Aharonov-Bohmによって導かれた散乱振幅は散乱角を一定にして高エネルギー極限をとる運動学的領域で有効であるが、前方付近では有効性が失われる。そこでユニタリティを議論する際に必要な表式を求めるために、アハラノフ・ボーム波動関数に立ち返ってこの積分表示を考察した。Bessel関数のSommerfeldの積分表示から出発し、巧妙な積分路および式変形によって前方付近で正確に成り立つ新しい表式を求めることに成功した。(イェール大学・Charles Sommerfeld教授との共同研究)

## 2. 研究業績

### 1) 論文

H. Athar and José F. Nieves: Matter effects on neutrino oscillations in gravitational and magnetic fields. *Physical Review D* **61** (2000) 103001.

H. Athar: Neutrino conversions in cosmological gamma-ray burst fireballs, *Astroparticle Physics* **14** (2000) 217-225.

H. Athar, G. Parente, and E. Zas: Prospects for observations of high-energy cosmic tau neutrinos, *Physical Review D* **62**, (2000) 093010.

H. Athar, M. Jezabek and O. Yasuda: Effects of neutrino mixing on high-energy cosmic neutrino flux, *Physical Review D* **62** (2000) 103007.

N. Kitazawa, N. Maru and N. Okada: R-mediation of dynamical supersymmetry breaking, *Physical Review D* **63** (2001) 015005.

N. Kitazawa, N. Maru and N. Okada: Models of dynamical supersymmetry breaking with gauged  $U(1)_R$  symmetry, *Nuclear Physics B* **586** (2000) 261-274.

N. Kitazawa, N. Maru and N. Okada: Dynamical supersymmetry breaking with gauged  $U(1)_R$  symmetry, *Physical Review D* **62** (2000) 077701.

H. Minakata and H. Nunokawa: Measuring Leptonic CP Violation by Low Energy Neutrino Oscillation Experiments, *Physics Letters B* **495** (2000) 369-377.

H. Minakata and H. Nunokawa: Inverted Hierarchy of Neutrino Masses Disfavored by Supernova 1987A, *Physics Letters B* **504** (2001) 301-308.

### 2) 国際会議報告

A. Chodos, H. Minakata, F. Cooper, W. Mao, and A. Singh: Two-Dimensional Model with Chiral Condensate and Cooper Pairs Having QCD-like Phase Structure, in *Dynamics of Gauge Fields: TMU-Yale Symposium*, pages 81-90, edited by A. Chodos, N. Kitazawa, H. Minakata and C. M. Sommerfield, Universal Academy Press, Tokyo, October 2000.

C. M. Sommerfield and H. Minakata: Aharonov-Bohm and Coulomb Scattering Near the Forward Direction, in *Dynamics of Gauge Fields: TMU-Yale Symposium*, pages 263-270.

N. Kitazawa: Physical Auxiliary Field in Supersymmetric QCD with Explicit Supersymmetry Breaking, in *Dynamics of Gauge Fields: TMU-Yale Symposium*, pages 103-109.

H. Minakata: MSW Effect in Supernova and Supernova Neutrinos, *KOSEF-JSPS Joint Seminar on New Developments in Neutrino Physics*, pages 98-109, edited by S. K. Kang, C. W. Kim, and K. Nakamura, published by Korea Institute for Advanced Study.

O. Yasuda: Neutrino Oscillation Analysis of Solar and Atmospheric Neutrino Data, *KOSEF-JSPS Joint Seminar on New Developments in Neutrino Physics*, pages 255-272.

H. Minakata: Answering the Sphinx's Questions on Neutrinos, *Proceedings of Workshop on Neutrinos Oscillations and Their Origin*, pages 343-346, edited by Y. Suzuki, M. Nakahata, M. Shiozawa, and K. Kaneyuki, Universal Academy Press, Tokyo, 2000.

O. Yasuda: Neutrino Oscillations in High Energy Cosmic Neutrino Flux, *Proceedings of Workshop on Neutrinos Oscillations and Their Origin*, pages 271-274.

O. Yasuda: Constraining Degenerate Neutrino Masses and Implications. Proceedings of 2nd Int. Conf. Physics Beyond the Standard Model, (IOP Bristol, eds. Klapdor-Kleingrothaus and I. Krivosheina), p 223 – 235 (2000).

A. Husain: High-Energy Cosmic Tau Neutrinos. Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) **87** (2000) 442-444.

O. Yasuda: Phenomenology of Neutrino Oscillations at a Neutrino Factory, Proceedings of KEK Int. Workshop on High Intensity Muon Sources (World Scientific, Singapore, eds. Y. kuno and T. Yokoi), p 107 – 118 (2001).

### 3) 学会講演

日本物理学会春の分科会 2000年3月30日～4月2日 (近畿大学)

北澤敬章, 丸信人, 岡田宣親: Dynamical Supersymmetry Breaking with Gauged U(1)(R) Symmetry,

安田修: ニュートリノファクトリーにおけるニュートリノ振動の物理

日本物理学会第55回年次大会 2000年9月22日～9月25日 (新潟大学)

南方久和: ニュートリノ振動; これまでの成果と今後 (シンポジウム講演)

新井真人, 岡田宣親: Potential Analysis of  $N = 2$  SUSY Gauge Theory with Fayet-Iliopoulos Term

北澤敬章, 丸信人, 岡田宣親: R-mediation of Supersymmetry Breaking .

小林慶重, 南方久和, 応和克己, 杉山弘晃: 2次元モデルによる Lorentz 対称性の破れの解析

千葉雅美, 安田修, Athar Husain 他4名: 岩塩を用いた超高エネルギーニュートリノ検出器の基礎研究

廣岡秀明, 南方久和: Dynamical Pion Production via Parametric Resonance from Disoriented Chiral Condensate

南方久和, 布川弘志: Measuring Leptonic CP Violation by Low Energy Neutrino Oscillation Experiments

安田修: 4種類ニュートリノ混合による大気ニュートリノの解析.

## 国内研究会

研究会「ミューオン蓄積リングを使ったニュートリノ源とそれが拓く物理」

第1回研究会：2000年5月10日～11日（高エネルギー加速器研究機構）

安田修：ニュートリノファクトリーにおけるニュートリノ振動の現象論.

第2回研究会：2000年9月13日～14日（高エネルギー加速器研究機構）

安田修：Four-Generation Neutrino Oscillation

3rd Workshop on High Intensity Secondary Beam with Phase Rotation

2001年3月12日～13日（高エネルギー加速器研究機構）

安田修：ニュートリノ振動の物理（最近の進展）

仙台現象論研究会「NEW DIRECTIONS TO UNIFIED THEORIES」

2000年10月23日～25日（東北大学理学部）

A. Husain: High-Energy Cosmic Neutrinos

「特定・宇宙ニュートリノ研究会」

第1回：2000年5月12日（東大宇宙線研究所）

安田修：大気ニュートリノの4世代解析とステライルニュートリノシナリオの現状

安田修：Conventional beam と neutrino factory における CP 非保存測定の比較

南方久和：Measuring Leptonic CP Violation by Low Energy Neutrino Oscillation Experiments

第3回：2000年9月29日（東大宇宙線研究所）

南方久和：超新星における MSW 機構の基礎

第4回：2000年10月31日～11月1日（新潟大学理学部）

安田修：二重ベータ崩壊から得られる制限のサマリー.

第5回：2001年2月23日～24日（東大宇宙線研究所）

安田修：日本版ニュートリノファクトリー WG レポート

## 国際会議

The 11th Mini-Workshop on Particle and Astroparticle Physics, Pusan, Korea,

May 19-20, 2000

N. Kitazawa: Dynamics of Supersymmetric Gauge Theories (Invited Lecture)

International Workshop on Muon Storage Ring for A Neutrino Factory (NuFACT'00),

Monterey, CA, May 22-26, 2000

O. Yasuda: Analysis of the Super-Kamiokande Atmospheric Neutrino Data in the Framework of Four Neutrino Mixings (Invited talk)

H. Minakata and H. Nunokawa: Measuring CP Violation by Low-Energy Medium Baseline Neutrino Oscillation Experiments

Third International Conference on Dark Matter in Astro and Particle Physics (Dark2000),  
July 10-15, 2000, Heidelberg, Germany

H. Minakata: Degenerate and Other Neutrino Mass Scenarios and Dark Matter (Invited Talk)

International Conference on Supersymmetry and Quantum Field Theory; D. V. Volkov  
Memorial Conference (SSQFT2000), July 25-29, 2000, Kharkov, Ukraine

M. Arai and N. Okada: Potential Analysis of  $N = 2$  SUSY Gauge Theory with the Fayet-Iliopoulos Term

The 8th Asia Pacific Physics Conference (APPC2000), August 7-10, 2000, Taipei, Taiwan

H. Minakata: A Two-Dimensional Analog Model for QCD (Invited Talk)

H. Minakata: Introduction to University Mobility in Asia and the Pacific (UMAP) Activity

H. Athar: Ultrahigh-Energy Cosmic Neutrinos

30th International Conference on High-Energy Physics (ICHEP 2000), Osaka, Japan,  
July 27-Aug 2, 2000

O. Yasuda: Four Neutrino Oscillation Analysis of Atmospheric Neutrino Data and Application to Long Baseline Experiments

Europhysics Neutrino Oscillation Workshop (NOW2000), September 9-16, 2000  
Conca Specchiulla, Otranto, Lecce, Italy

H. Minakata: The Three Neutrino Scenario (Invited Talk)

Joint U.S./Japan Workshop on New Initiatives in Lepton Flavor Violation and Neutrino  
Oscillations with Very Intense Muon and Neutrino Sources, Honolulu, Hawaii,  
October 2-6, 2000

O. Yasuda: Four-Generation Neutrino Oscillation. (Invited talk)

KOSEF-JSPS Joint Workshop on "New Developments in Neutrino Physics",  
Korea Institute for Advanced Study, Seoul, Korea, October 16-20, 2000

H. Minakata: MSW Effect in Supernova and Supernova Neutrinos (Invited Talk)

O. Yasuda: Neutrino Oscillation Analysis of Solar and Atmospheric Neutrino Data (Invited talk)

2nd Workshop on Neutrino Oscillations and Their Origin, Tokyo, Japan,  
December 6-8, 2000

O. Yasuda: Various Solutions of the Atmospheric Neutrino Data. (Invited talk)

#### 4) 科学研究費等報告

南方久和：平成9年度～11年度科学研究費補助金（国際学術研究（大学間協力研究）・基盤研究B）成果報告書「ゲージ場理論の動力学」

安田修：平成10年度～12年度科学研究費補助金（基盤研究C）成果報告書「大気ニュートリノ異常に関連した物理学」

#### 5) 学会誌等

浅川正之、南方久和：カイラル対称性の破れによるドメイン構造（解説）日本物理学会誌 55(2000) 263-272 .

#### 6) 編著書等

A. Chodos, N. Kitazawa, H. Minakata, and C. M. Sommerfield (ed.): *Dynamics of Gauge Fields: TMU-Yale Symposium*, Proceedings of TMU-Yale Symposium on the Occasion of TMU's 50th Anniversary and External Activity of APCTP, (407 pages), Universal Academy Press, Tokyo, October 2000.

# 原子核理論研究室

## 1. 研究活動の概要

### 1) 原子核の非弾性散乱における偏極移行量と核構造

原子核の励起状態の構造を探る上で、反応のプロープや入射エネルギーなどの調整とともに、観測の種類を増やすことは重要な役割を占めている。最近の実験技術は、重陽子などの複合粒子に対しても入射・出射チャンネルでの偏極を測定することを可能にした。我々は、これまで核子散乱に用いられてきた歪曲波近似を突然近似を用いて拡張し、重陽子などの弱く束縛された複合粒子の散乱に適用する方法を提案した。この方法では散乱振幅が核子による非弾性散乱の振幅であらわされ、実験的に観測された偏極移行量をよく再現することを示した。また、よい近似のもとで、複合粒子散乱と核子散乱における偏極移行量の間関係を見いだした。

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

中性子星の中心では物質の密度が通常の数倍になり、核子の構成要素であるクォークが漏れ出したクォーク物質となる可能性がある。クォーク物質は、(カラー交換力などの)引力により対凝縮を起こしカラー超電導状態にあるという理論的予想がある。非閉じこめ相におけるクォーク間相互作用は不明であるので、カラー秩序変数による半現象論(Landau-Ginzburg型有効理論)を用いた考察は、一般性見地から重要である。この秩序変数はカラー荷としてSU(3)の(3,3)表現を持ち、超流動He3のような豊富な相構造がありうる。我々は、Landau-Ginzburg型ポテンシャルの基底状態の一般的分類をおこない、いかなるカラー超電導相が現れうるかについて研究をおこなった。また、これらの相は様々な位相構造を持ち、それに対応した様々な渦解を持つ。我々は、Landau-Ginzburg方程式の解としてこれら渦解を求め、カラーマイスナー効果などの性質を調べるとともに、これらの励起状態が中性子星に及ぼす効果について研究した。

### 3) 準安定カイラル凝縮系の散逸過程における荷電自由度の役割

クォーク・グルーオン・プラズマ相の崩壊途中の準安定相として予想されるDCC(Disoriented Chiral Condensate)相は、存在はまだ確認されていないがハドロン系の新しい相として興味深い。我々はDCC相の散逸過程において荷電自由度の果たす役割を、Caldeira-Leggett法に基づく枠組みの中で調べた。とりわけ、荷電パイ中間子放出に関わるエネルギー散逸過程を検討し、緩和時間が中性パイ中間子放出の場合と同様に $m_\pi$ で特徴付けられる一方、電荷に関しては、(始状態が電荷を持つ場合)電荷空間における減衰振動を行うことが示された。

### 4) パートン模型による構造関数の解析

核子内部のスピン構造を調べるために偏極深非弾性散乱の実験データを用いて偏極パートン分布の決定を行い、その結果から核子スピンに対するクォーク・グルーオンのスピンの寄与を調べた。さらに得られた分布の誤差解析やFORTRANライブラリの作成などをおこなった。また、非偏極パートン分布においてはすでによく知られている反クォーク分布のフレーバー非対称性を中間子雲模型を用いて調べ、偏極パートン分布においても同様の現象が現れることを示した。さらに、様々な原子核を標的とした深非弾性散乱で得られた原子核構造関数の実験データを用いて、質量数依存性を持つ原子核内パートン分布関数の決定を行った。

## 5) ボーズ・フェルミ混合凝縮体の研究

極低温におけるアルカリ原子気体の研究は、ボーズ・アインシュタイン凝縮の実現によって急速に進展し、ごく最近では極低温のボーズ・フェルミ混合縮退系も実現された。我々はこの混合縮退系の静的・動的性質の研究を行ない、基底状態の密度分布や集団励起モードの特徴についてそれぞれ論文を出版するとともに、ボーズ・フェルミ粒子間に引力が働く場合の系の相図と準安定相の崩壊に関して考察した。とくに、引力が働く場合の新しいシナリオとして、ボーズ・フェルミ粒子が準束縛状態をつくる可能性を考察した。その結果、弱い引力のもとでもこの複合フェルミ粒子が形成されること、その性質は気体の温度にほとんど依存しないことを見いだした。また、ボーズ・フェルミ混合系の特徴の一つとして、一次元系における応答関数を調べ、フェルミ波数に対応する運動量領域で異常性が現れることを示した。Kohn 異常性の検討を行った。

## 6) ポジトロニウム間相互作用とボーズ・アインシュタイン凝縮

ポジトロニウム間相互作用は、ポジトロニウム多体系、特にポジトロニウムのボーズ・アインシュタイン凝縮を研究する場合に重要な物理量であるが、それについては実験的・理論的にほとんど知られていない。我々は、有効相互作用ポテンシャルの方法を用いてポジトロニウム散乱の計算をおこない、散乱長からポジトロニウム間相互作用の大きさを理論的に評価した。また、スピンの異なるチャンネル(オルソ-オルソ、パラ-パラなど)の散乱長を求める一般式を導出し、低エネルギー相互作用の完全な分類・評価を行なった。これらの結果をまとめた論文はすでに掲載決定となっている。また、高エネルギー物理学実験研究室が推進しているポジトロニウムレーザー冷却の計算において理論面での共同研究をおこなった。

## 7) 準位交叉に伴う散逸過程の模型的研究

核分裂などの大きい振幅をもつ集団運動においては、集団パラメタの値によって核子の占有する軌道の性質が大きく変化し、その変化は一粒子準位が Landau-Zener 型の準位交叉を次々に経由していくことによって実現される。このような過程の厳密な考察は困難であり、そのため断熱的 HF 法など種々の手法が開発されてきた。我々は種々の近似法の妥当性を検討するため、準位交叉を含み厳密な対角化が可能な模型を構築した。この模型は  $R(4)$  対称性を含み、原子核で重要な対相関と単純化された粒子・空孔相関を含んでいる。本年はこの模型に基づき、平均場近似の妥当性を調べ、基底状態の相転移近傍では近似が悪くなること、この領域では準位交叉による粒子軌道の変化が重要であることを確認した。

## 8) 二次元非調和振動子の応答関数

古典力学における二次元の非調和振動子は、ポテンシャルのパラメタの値により、可積分から擬可積分、カオスの性質まで様々なふるまいを示す。量子力学的なエネルギースペクトルの性質に関しても、対応する特徴が、近接準位間隔分布や  $\Delta_3$  統計について成立する。我々はこの系の波動関数の特徴を、大次元空間でハミルトニアンを対角化し、基底状態からの励起の応答関数を計算することによって調べた。この量は、波動関数の特徴が長さのスケールによってどのように変化するかを示している。主要な特徴は、エネルギー準位の場合に対応することがわかったが、一方、カオス系においても、応答関数に規則的寄与を行う成分が見いだされた。この成分を検討した結果、応答関数の励起演算子に対応する周期的古典軌道が重要な役割を果たしていることを見いだした。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

H. Aiba and T. Suzuki: Response Function of an Irregular Oscillator, Phys. Rev. E **63** (2001) #026207.

Y. Goto, N. Hayashi, M. Hirai, H. Horikawa, S. Kumano, M. Miyama, T. Morii, N. Saito, T.-A. Shibata, E. Taniguchi, and T. Yamanishi: Polarized Parton Distribution Functions in the Nucleon, Phys. Rev. D **62** (2000) #034017.

T. Miyakawa, T. Suzuki and H. Yabu: Sum Rule Approach to Collective Oscillations of Boson-Fermion Mixed Condensate of Alkali Atoms, Phys. Rev. A **62** (2000) #046012.

T. Miyakawa K. Oda, T. Suzuki and H. Yabu: Static Properties of the Trapped Bose-Fermi Mixed Condensate of Alkali Metal Atoms, J. Phys. Soc. Jpn. **69** (2000) 2779-2785.

### 2) 国際会議報告

T. Suzuki: Invariants of polarization transfer at forward angles, in 'Spins in Nuclear and Hadronic Reactions' H.Yabu, T.Suzuki and H.Toki, eds., (World Scientific, 2000) pp.42-48.

Y. Hirabayashi, T. Suzuki and M. Tanifuji: Relation between (p,p') and (d,d') on  $^{12}\text{C}$  in the sudden approximation, in 'Spins in Nuclear and Hadronic Reactions' H. Yabu, T. Suzuki and H. Toki, eds., (World Scientific, 2000) pp.56-64.

H. Yabu: Bose-Einstein condensation in atomic and nuclear physics, in 'Spins in Nuclear and Hadronic Reactions' H. Yabu, T. Suzuki and H. Toki, eds., (World Scientific, 2000) pp.278-281.

### 3) 学会講演

日本物理学会第2000年春の分科会 2000年3月22日～3月25日 (関西大学)

宮川貴彦、鈴木 徹、藪 博之: ボソン - フェルミオン引力結合による原子のボソン - フェルミオン凝縮の不安定性.

日本物理学会第2000年春の分科会 2000年3月30日～4月2日 (近畿大学)

相場浩和、鈴木 徹: カオスモデルの応答関数のゆらぎにみる中間構造.

仲野英司、鈴木 徹、藪 博之: クォーク対凝縮相の分類2.

虻川純平、鈴木 徹: 時間依存外場による多自由度系の散逸過程.

十河孝明、鈴木 徹、藪 博之: 散逸機構を取り入れたDC状態の崩壊過程.

日本物理学会題55回年次大会 2000年9月22日～9月25日 (新潟大学)

相場浩和、松尾正之, 西崎 滋, 鈴木 徹:  $^{40}\text{Ca}$  の四重極巨大共鳴の強度関数のゆらぎ.

仲野英司、鈴木 徹、藪 博之: カラー超伝導における渦糸格子状態の研究.

十河孝明、鈴木 徹、藪 博之: 境界面を持つ荷電DC状態の散逸過程.

深山正紀、熊野俊三: 偏極反クォーク分布におけるフレーバー非対称性の研究.

宮川貴彦、鈴木 徹、藪 博之: 有限温度系での原子のボソン - フェルミオン混合.

研究会「場の量子論の基礎的諸問題と応用」 2000年12月20日~22日  
(京都大学基礎物理学研究所)

藪 博之:  $|\phi|^4$  有効理論による原子気体の Bose-Einstein 凝縮体の記述と引力相互作用による凝縮体の真空崩壊

仲野英司: Coreless Vortex in Diquark Condensed Phase

研究会「反粒子の関わる原子物理」 2000年12月25日~26日(宇宙科学研究所)

藪 博之、小田研二、宮川貴彦、鈴木 徹: ポジトロニウム間相互作用におけるS波散乱パラメータの計算とポジトロニウム - ボーズ・アインシュタイン凝縮.

研究会「Nuclear Physics on Few-Body Scattering Systems」 2001年1月29日~30日  
(東京大学山上会館)

鈴木 徹: Relations of Polarization Observables between d-A and p-A Scatterings.

研究会「Chiral Symmetry Aspects in Hot and Dense QCD」 2001年3月5日~6日  
(京都大学基礎物理学研究所)

藪 博之: Study of Color SU(3) Ginzburg-Landau Equation.

## 国際会議

Internal Conference on Giant Resonances, RCNP, Osaka, June 12-15, 2000.

T. Miyakawa, T. Suzuki and H. Yabu: Sum Rule Approach to Collective Oscillations of Trapped Boson-Fermion Mixed Condensates of Alkali Atoms.

H. Aiba, M. Matsuo, S. Nishizaki and T. Suzuki: A Study of the Nature of the background States through the Fluctuation Analysis of the Strength Function of a Collective State.

Int. Workshop on artificial atoms and related finite fermion and boson systems, ECT Star, Trento, Sept.24-Oct.6, 2000.

H. Yabu, T. Miyakawa and T. Suzuki: Induced instability for boson-fermion mixed condensate of Alkali-atoms due to attractive boson-fermion interaction.

T. Miyakawa, H. Yabu and T. Suzuki Sum Rule Approach to Collective Oscillations of Boson-Fermion Mixed Condensates of Alkali Atoms.

14th International Spin Physics Symposium (SPIN 2000), RCNP, Osaka, October 16-21, 2000.

T.Suzuki, Y.Hirabayashi and M.Tanifuji: DWIA Calculations for Inelastic Scattering of Deuterons at  $E_d=400\text{MeV}$ .

M. Miyama: Determination of polarized parton distribution functions.

Third Workshop on the Physics of Laser Cooling and Its Applications, Hayama, Kanagawa, January 8-10, 2001.

T. Suzuki, T. Miyakawa and H. Yabu: Some Facets of the Bose-Fermi Mixed Condensates of Alkali Atoms.

#### 4) 科学研究費報告書

鈴木 徹：多粒子系の集団励起状態における散逸過程の研究. 平成10～12年度科学研究費補助金(基盤研究C)

#### 5) 著書・訳書・編集等

藪 博之、鈴木 徹、土岐 博(共編): Spins in Nuclear and Hadronic Reactions - Proc. RCNP-TMU Symposium (World Scientific, 2001) 292pp.

# 宇宙物理理論研究室

## 1. 研究活動の概要

### 1) 銀河団の力学平衡

銀河団はビリアル平衡にあると考えられる宇宙で最大の自己重力系で、重力ポテンシャルを説明するには銀河や銀河間高温ガスの他、ダークマターの存在が不可欠と考えられている。ダークマターは直接調べる観測的手段がないため、銀河団形成の計算機シミュレーションなどで重力収縮過程の質量分布が調べられているが力学的平衡を保証するものではない。そこで、シミュレーションの予測するダークマターの質量分布（ユニバーサルプロファイル）が力学平衡の一つの解としてあり得るか？また、その分布の下で重力相互作用をするガスや銀河はどのような質量分布を示すか？について、複数の位相空間分布関数をもとに調べた。その結果、ユニバーサルプロファイルは既知の分布関数・等温の下では平衡解にならないことが示された。シミュレーションの結果は形成途中の過渡的な分布であると考えられ、実際、最新の観測ではユニバーサルプロファイルに否定的な結果が出始めている。

### 2) コンパクト天体への降着ガス

質量降着によって活動的になっていると考えられる重力の強い天体（中性子星・ブラックホール）では、降着ガスは紫外線・X線の強い放射によって光電離され、電離度に比べ温度の低いガスになると考えられる。このようなガスの特性として熱的不安定な領域が生じることを明らかにしてきたが、さらに、その一部は強い重力の下で力学的不安定になることを見出した。これら一連の研究の結果は、モノクロマチックな放射過程をもとに構築されてきた従来の降着モデルに疑問を呈するもので、部分電離した吸収物質の存在など、いくつかの新しい観測事実を説明することも期待される。そこでさらに、光電離ガスの熱的特性が降着流のダイナミクスに及ぼす影響について詳しい研究を進めている。

### 3) $\gamma$ 線バーストのダイナミクス

最近の観測で、X線アフターグローの放射スペクトルの中に鉄の線スペクトル・吸収端が発見された。その放射メカニズムと起源を明らかにすることができれば、未だ源天体が同定されていない線バーストの物理過程やホスト銀河を探る、重要なプローブとなることが期待される。スペクトルの特徴から、バーストの高エネルギー放射によって電離された物質から放射された可能性、高温・高密度状態から急激に冷却されたプラズマからの放射の可能性を検討した。とくに後者の観点から、衝撃波が低密度空間に抜けるときの希薄波に着目し、その際に引き起こされる非平衡状態での放射スペクトル形成過程を調べた。その結果から逆に、バースト現象のダイナミクスや周辺の物理環境に制限を付けられるものと考えてさらに研究を進めている。

### 4) 紫外線背景放射中での原始銀河形成

宇宙初期に現れた星やクエーサー等が起源と考えられる紫外線背景放射は、物質のイオン化やそれに伴う加熱などを引き起こすため、原始銀河の形成に大きな影響を与える。我々は、この影響を調べる上で本質的となる光子の輻射輸送を統合的に取り込んだ数値流体シミュレーションを新たに実現させた。この結果、収縮する原始銀河中で光子が遮蔽され、中性化されたコア領域が

中心部に形成される過程が明らかになると共に、紫外線背景放射に抗して銀河形成が可能となるための物理条件が得られた。さらにこの結果に基づき、原始銀河内における星形成の可能性についての考察を行なった。

#### 5) ミリ波における銀河団の高分解能観測

近年、遠方宇宙の研究手段として、Sunyaev-Zel'dovich(SZ) 効果と呼ばれる現象の観測が注目されている。SZ 効果は、銀河団の高温プラズマが宇宙マイクロ波背景放射光子を散乱し、背景放射スペクトルに歪みを生じる現象であり、これを用いれば X 線や可視光よりもさらに遠くの天体の観測が可能である。我々は、野辺山 45m 電波望遠鏡を用い、ミリ波 (周波数 150GHz) において、銀河団 RXJ1347-1145 を観測した。この結果、同周波数帯では従来最高となる空間分解能 (13") で SZ 効果が検出され、この銀河団の中心から数 10 秒離れた領域に、これまで知られていなかった非一様なガスの分布が存在することが明らかになった。このようなガス構造の起源が何であり、どれだけ普遍的に存在するかは、今後銀河団の物理を考える上での重要な課題である。

#### 6) ガンマ線における銀河団の観測可能性

銀河団の高温プラズマの大部分は熱平衡にあるが、電波や硬 X 線等の観測から、若干量の非熱的なガス成分も存在することが示唆されている。このような非熱的ガスは、銀河団の形成段階に生じた衝撃波によって高エネルギーに加速されたとする説が現在有力である。我々は、このような過程で生じた銀河団中の非熱的電子が、ガンマ線領域で観測可能であることを見出し、ガンマ線衛星 EGRET により検出された未同定天体や背景放射の起源となり得ることを示した。更に、この仮説は、2005 年頃に打上げが計画されている衛星 GLAST によって検証可能であるので、そのための具体的な方法も提案した。

#### 7) Faint Blue Galaxy Problem と銀河進化モデル

"Faint Blue Galaxy Problem" とは、観測されている暗くて青い銀河の数が理論モデルから予想される数に比べて多すぎるというものである。私は不規則銀河の進化モデルを見直し、標準的な「星生成が遅く現在青い銀河・Sモデル」の他に「星生成が比較的早いいため、遠方では青く明るいのだが、現在は暗くなっている銀河・Rモデル」を導入し、この問題を解決した。

#### 8) 銀河団の超新星爆発による加熱

銀河団の X 線光度と高温ガスの温度の間には簡単なスケールリング則が成り立つことが理論的には予想されている。しかし、観測結果は理論モデルと比べて傾きが急であることが報告されている。この結果を説明する一つとして、銀河団ガスに何らかの形でエネルギーを注入するというものがあるが、そのエネルギー源は良くわかっていない。一つの可能性として今まで考慮されていなかった銀河間空間における超新星爆発を提案し、その検証可能性についても議論をした。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

K. Masai and M. Nakayama: Thermal Structure and Radiation Spectra of Photoionized Gas in Accretion-Powered X-Ray Sources, *Rev. Mex. Astron. Astrofís.* **9** (2000) 48.

T. Kitayama, Y. Tajiri, M. Umemura, H. Susa and S. Ikeuchi: Radiation-Hydrodynamical Collapse of Pregalactic Clouds in the Ultraviolet Background, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Letters, **315** (2000) L1-L7.

Y. Suto, K. Yamamoto, T. Kitayama and Yi-Peng Jing: Two-point Correlation Functions of X-ray Selected Clusters of Galaxies: Theoretical Predictions for Flux-limited Surveys, The Astrophysical Journal, **534** (2000) 551-558.

H. Susa and T. Kitayama: Collapse of Low Mass Clouds under UV Radiation Field, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **317** (2000) 175-178.

T. Totani and T. Kitayama: Forming Clusters of Galaxies as the Origin of Unidentified GeV Gamma-Ray Sources, The Astrophysical Journal, **545** (2000) 572-577.

E. Komatsu, H. Matsuo, T. Kitayama, M. Hattori, R. Kawabe, K. Kohno, N. Kuno, Y. Suto, S. Schindler and K. Yoshikawa: Substructures Revealed by the Sunyaev-Zel'dovich Effect at 150GHz in the High Resolution Map of RXJ1347-1145, Publications of the Astronomical Society of Japan, **53** (2001) 57-62.

S. Sasaki: Intracluster Supernova as a Possible Extra Energy Source of Clusters, Publications of the Astronomical Society of Japan, **53** (2001) 53-55.

## 2) 国際会議報告

H. Susa and T. Kitayama: Cosmological Formation of Subgalactic Objects and Radiative Feedback, Proceedings of "The Physics of Galaxy Formation", ASP Conference Series Vol. 222, eds M. Umemura and H. Susa, pp.79-84 (2001)

T. Kitayama, H. Susa, M. Umemura and S. Ikeuchi: Impacts of Radiative Feedback on the Formation of Promordial Galaxies, Proceedings of "The Physics of Galaxy Formation", ASP Conference Series Vol. 222, eds M. Umemura and H. Susa, pp.85-90 (2001)

## 3) 学会講演

日本天文学会 2000年春季年会 2000年4月3日～4月5日 (東京大学)

北山哲、小松英一郎：Sunyaev-Zel'dovich 効果のゆらぎ。

日本天文学会 2000年秋季年会 2000年10月5日～10月7日 (群馬県総合教育センター)

北山哲、須佐元、梅村雅之、池内了：UV 背景放射下での水素分子冷却と星形成の可能性。

## 国際会議

The Physics of Galaxy Formation, University of Tsukuba, July 3-7 2000

T. Kitayama: Impacts of Radiative Feedback on the Formation of Promordial Galaxies, oral presentation

Cosmology in the New Millennium, Shanghai Observatory, China, October 17-19 2000

T. Kitayama: Formation of Primordial Galaxies in the UV Background Radiation, oral presentation

S. Sasaki: Intracluster Supernova as a Possible Extra Energy Source of Clusters, oral presentation

New Century of X-ray Astronomy, Yokohama, March 6-8, 2001

D. Yonetoku, T. Murakami, K. Masai, A. Yoshida, N. Kawai, M. Namiki: Iron Structures and Plasma States in X-ray Afterglows of GRBs

S. Sasaki and A. Ikari: X-Ray Absorption Features of the Intergalactic Medium, Poster session

# 基礎物理学研究グループ

## 1. 研究活動の概要

当研究グループは、分野の枠にとらわれない理論物理学の基礎的な研究を目指している。本年度に行われた主な研究テーマは、流体中を落下する平板や微粒子の運動の解析、赤血球を用いた生物レオロジーの定式化、離散可積分系による素粒子超弦理論の解析、等である。

### 1) 離散可積分系による超弦理論の解析

当研究グループでは、非摂動的に統一された超弦理論を可積分理論の立場から理解する方向でこれまで研究を進めてきた。超弦理論統一に向けて行った本年度の研究のうち、主な3つのアプローチは以下の通りである。

#### 1. 非可換幾何学からのアプローチ

- 非平坦な時空の量子化は Berezin 型の量子化を必要とするが、それを実行する場合に積の結合則が破れ、その回復には経路積分法への一般化が必要となることを示した。新しいこの結果は、Leeds で開かれた国際会議でも報告された。
- この方法の応用として Reshetkhin-Takhtajan による積の規格化因子が1次の近似では不必要な事も示された。
- 更に、具体的な球面 fuzzy 量子化との関係も明らかにされた。
- 時空量子化、特に Moyal 量子化の場合について、離散可積分系との関係を戸田格子の場合について詳しく調べ、明らかにした。

#### 2. 離散幾何学からのアプローチ

微分幾何学とソリトン方程式との対応は古くからよく知られている。この関係を離散ソリトン方程式に拡張することによって、離散幾何学を数学的に構成することができる。そのうち特に Doliwa 等によって導入された離散幾何学は、広田差分双線型方程式に対応しており、従って弦理論の相関関数を記述していることが予測される。このことを明確な形で示す事が出来た。主な結果は次ぎのようである。

- 基底粒子の運動量空間は離散幾何学における conjugate net の離散基底をなし、弦の相関関数は離散 conjugate net の接ベクトルになっている。
- 応用として、双曲型離散双対 Yang-Mills 系を記述する離散 Nahm 方程式もまた離散幾何学的に理解する事が可能となる。

#### 3. 複素力学系からのアプローチ

完全可積分系と統一超弦理論との関係は上述の研究から明らかであるが、これらの関係を更に深く理解する為には、可積分系そのものの全貌を明らかにすることが必要であると考えられる。我々はこの立場から研究を進め、特に非可積分系に特徴的な Julia 集合が可積分系に移行するとき消滅するときの振る舞いを調べてきた。本年度新たに明らかにした結果は、以下のようなものである。

- 離散 Lotka-Volterra 系は完全可積分な場合であっても、その時間発展は一意的ではない。このことは、可積分系についての従来の考え方が変更されなければならない事を示唆している。
- 上記の可積分系をある一定の仕方で変形する事によって、非可積分系へ転移する過程を解析的に調べ、Julia 集合は可解な軌道に一樣に収束することが確かめられた。
- 写像の離散系列が与えられた時、その逆写像が存在するならば、写像の初期値を時間パラメータとする Hamilton 方程式が導ける事を示した。具体的に Henon 写像、Lotka-Volterra 系、離散 KdV 方程式について Hamiltonian を求めた。これらは可積分系にも非可積分系にも適用可能であり、特性方程式との関係を明らかにする事によって離散系の Painleve 解析に有用であることが期待される。
- 一方、可積分系の側から BKP 及び DKP 系の持つ幾何学的な対称性を見だし、それが affine Weyl 群である事を示した。この群が離散 Painleve 系の解析と深く結びついている事は大変興味深い。

## 2) 血液のレオロジー

### 1. 減衰振動型レオメータにおける線形粘弾性体の流れの解析

血液の凝固過程におけるレオロジー的性質の時間変化を観測する目的で新しいタイプの減衰振動型レオメータが開発された。この装置では、試料を入れた円筒管の振動周期および対数減衰率が時間の関数として測定される。この装置を用いた測定結果はこれまでに数多く報告されており、これら測定量の時間変化の様子から血液の凝固時間に及ぼす血液成分の効果の判定や抗血栓材料の評価が可能であることが示唆され、その有用性は高い評価を得ている。しかし測定される対数減衰率と振動周期が試料のどのようなレオロジー的性質を反映しているかが定量的に明確になればさらにこの装置の利用範囲は広まると思われる。そのためには装置内での粘弾性流体の流れの様子を知る必要がある。そこで我々はまず最初に、最も簡単な粘弾性流体のモデルとして Maxwell 流体を取り上げ、この流体の減衰振動する円筒管内での流れの様子を解析的に調べた。その結果、対数減衰率および振動周期と粘弾性モデルに含まれるパラメータである粘性率と弾性率との関係が明らかにされた。

### 2. 組織への酸素輸送におよぼす赤血球集合体の影響

組織への酸素の輸送は、赤血球によって運ばれてきた酸素が微小循環領域において赤血球から開放され、血漿中を移流拡散によって移動し、血管壁を透過して組織中へ拡散していく一連の過程による。したがって酸素の輸送には赤血球の流動状態が大きく影響することが予測される。特に血液中で形成される赤血球の集合体が酸素輸送に大きな障害となることが近年実験結果から指摘された。我々はその機構を探る目的で、前年度に得られた結果をもとにモデルの拡張を行い、赤血球の集合状態が組織への酸素輸送に及ぼす影響を理論的に調べた。拡張された Axial Train Model を用い、管を流れる血液中の酸素濃度分布を求め、濃度分布に及ぼす赤血球速度、赤血球集合度、赤血球膜の透過度等のパラメータの依存性を明らかにした。その結果、集合体形成により赤血球膜透過の抵抗が増大することが組織への酸素輸送の主要な障害であることが示唆された。

### 3) 流体運動の物理

#### 1. 流体中の平板の落下運動

木の葉や紙片のような平たい物体の多様な落下運動の振る舞いを調べるため、基本的で解析的に取り扱い易い2次元平板の落下運動の研究を行った。完全流体中の2次元平板の運動方程式を導き、それに粘性の効果を取り入れ改良した運動方程式を用いて自由落下運動の数値計算を行った。平板運動の自由度は平板重心の接線方向、法線方向の速度、重心のまわりの回転速度、回転角度の4つである。無次元化された運動方程式は2つの無次元パラメーター( Reynolds 数と無次元仮想質量 )を含む。種々の無次元パラメーターの組み合わせの下で傾けた平板を自由落下させて到達する運動状態を4つの自由度で構成される位相空間内のアトラクターの形状に基づいて、単純な周期運動、複雑な多重周期運動、カオス運動、カオス運動を引き起こす無次元パラメーター空間領域内の部分領域に現れる周期運動<窓>、トーラス運動に分類した。数値計算の結果は円板の落下運動の実験結果と定性的に良い一致を示している。我々の理論と実験の分類の判定法の相違を考慮して双方の結果を比較検討中である。今後は運動状態の分岐の構造を解明する予定である。

#### 2. 流体中の微粒子の運動

流体中を浮遊する微粒子を Stokes 源、2重 Stokes 源、2重湧き出し、4重湧き出しの4つの特異点で表す粒子モデルを提案し、その有効性とモデル粒子群の運動の基本的な性質を調べた。モデルの有効性は粒子サイズの数倍以上の粒子間距離により保たれる。2個の粒子の落下運動は単純であるが、3個以上の場合には幾何学的に対称な相対的な配置の粒子群は単純な運動や周期運動を安定的に行い、対称性のない配置の粒子群は複雑な運動を行うことが示された。特に、粒子群が水平面内の正多角形の頂点に位置するとき安定な定常運動を行うことが判明した。非対称な配置の粒子群の複雑な運動の解明は今後の課題である。モデル粒子を球面上に配置して再構成した球形粒子が一様流中で受ける力は Stokes 力となることが確認され、種々の物体をモデル粒子で構成する可能性が開かれた。これらの取り扱いを発展させて、微粒子群の運動が流体の実効粘性などに及ぼす統計的な影響、遅い流れの中の物体運動への壁効果などの研究を検討中である。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

N.Shinzawa: Symmetric Linear Bäcklund Transformation for Discrete BKP and DKP Equations, J. Phys. A: Math. Gen. **33** (2000) 3957-3970.

S.Saito and K.Wakatsuki: Symmetrization of the Berezin Star Product and Path-Integral Quantization, Prog. Theor. Phys. **104** (2000) 893-901.

T.Masuda: Normalized Weyl Type Star Product on Kähler Manifolds, Mod. Phys. Lett. A, **15** (2000) 2177-2182.

N.Saitoh, S.Saito and K.Yoshida: On Periodic Solutions of the Discrete Time Lotka-Volterra equation, Transactions Mater. Res. Soc. Jpn. **26** (2001) 377-380.

## 2) 学会講演

日本物理学会春の分科会 2000年3月22日～3月25日 (関西大学)

富山泰伸：流体中の落下平板の乱舞運動。

日本物理学会春の分科会 2000年3月30日～4月2日 (近畿大学)

増田拓也、齋藤暁: Noncommutative Field Theory on Poisson Manifolds

若月一模、齋藤暁：Atring path-integral and Berezin quantization

山口洋徳、齋藤暁：差分幾何と string

日本バイオレオロジー学第23回会年会 2000年6月8日～6月9日 (倉敷公民館)

村田忠義、石黒康悦：管を流れる赤血球サスペンション中の赤血球濃度分布と速度分布。

流体力学会年会2000 2000年7月25日～27日 (京都大学)

オーガナイズドセッション：バイオ流体

村田忠義、石黒康悦：円管内流動場における血液中の赤血球濃度分布。

日本物理学会第55回秋の分科会 2000年9月22日～25日 (新潟大学)

磯暁、木村祐介、田中かんじ、若月一模: 行列模型と非可換球面上のゲージ理論

富山泰伸：流体中の微粒子の運動。

第48回レオロジー討論会 2000年9月25日～27日 (高知大学)

喜多理王、貝原真、村田忠義：減衰振動型レオメータによる線形粘弾性体の解析。

村田忠義、石黒康悦：管を流れる非ニュートンサスペンション中の分散粒子の濃度分布。

## 国際会議

Workshop on Mathematical Methods of Regular Dynamics (Leeds, April 12-15, 2000)

S.Saito: String Realization of Discrete Geometry

K.Wakatsuki: Symmetrization of Berezin Quantization

The 9th Mathematical Society of Japan - International Research Institute,

“Integrable Systems in Differential Geometry (MSJ-IRI)” (Tokyo, July 25-28, 2000)

S.Saito: Discrete Conjugate Nets of D-brane

Symmetries and Integrability of Difference Equations (Tokyo, Nov. 27 - Dec. 1, 2000)

N.Saitoh, S.Saito and K.Yoshida: On the Behaviour of Solutions to Discrete Time Lotka-Volterra Equation I - Integrable Case

K.Yoshida, S.Saito and N.Saitoh: On the Behaviour of Solutions to Discrete Time Lotka-Volterra Equation II - Non-integrable Case

The 12th Symposium of The Materials Research Society of Japan (Kanagawa, Dec 7-8, 2000)

N.Saitoh, S.Saito and K.Yoshida: On Periodic Solutions of the Discrete Time Lotka-Volterra Equation

International Symposium "Frontiers of Fundamental Physics" (Hyderabad, Dec 11-13, 2000)

T.Masuda: Normalized Weyl-type Star-product on Kähler Manifolds

# 統計物理理論研究室

## 1. 研究活動の概要

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

### 1) べき型スペクトルの起源

自然界には，そよ風や，電気抵抗のゆらぎなど，スペクトルが周波数  $f$  に逆比例する  $1/f$  ゆらぎと呼ばれる現象や，より一般的に，スペクトルが  $f$  の逆べきに比例する現象（スペクトルのべき則）が数多くみられる．だが，このような現象の起源は一般的には解明されていない．具体的な物理系のモデルや数学的なモデルを用いて，どのような場合にべき型スペクトルが実現するかを研究している．ことに，ランダムウォークや，時定数の長いデバイ型の緩和過程から得られる  $1/f^2$  型スペクトルが，データの振幅切断というフィルタリング効果により  $1/f$  スペクトルに近付くことが解析的に示された (P.L.A 269, J.P.S.J.70)．

### 2) カオスとノイズ

現実の系は常にノイズに曝されている．カオス系へのノイズの影響，大自由度カオスとノイズの区別，情報伝達においてノイズが積極的な役割を果たす確率共鳴現象などについて研究している．

### 3) 水滴落下系のカオス

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

### 4) 情報処理過程の熱力学

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

この結論を敷衍すれば，氷のいわゆる残留エントロピーとは，情報論的エントロピーではあっても，熱力学的状態量としてのエントロピーではないという新しい主張が導かれる．

### 5) ラチェット系の運動

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

## 2. 研究業績

### 1) 論文

S. Ishioka, Z. Gingl, D. Choi and N. Fuchikami: Amplitude truncation of Gaussian  $1/f^\alpha$  noises, Phys. Lett. A **269** (2000) 7-12.

D. Choi and N. Fuchikami : Generalized amplitude truncation of Gaussian  $1/f^\alpha$  noise, J. Phys. Soc. Jpn. **70** (2001) 297-304.

### 2) 国際会議報告

Z. Gingl, S. Ishioka, D. Choi and N. Fuchikami: Theoretical and experimental results concerning the amplitude truncation of Gaussian  $1/f^\alpha$  noises, in Unsolved Problems of Noise and Fluctuations - Proc. 2nd Int. Conf., eds. D. Abbott and L. B. Kiss (AIP press, 2000) pp.136-143.

S. Ishioka and N. Fuchikami: Entropy generation in computation and the second law of thermodynamics, in Unsolved Problems of Noise and Fluctuations - Proc. 2nd Int. Conf., eds. D. Abbott and L. B. Kiss (AIP press, 2000) pp.329-340.

N. Fuchikami, H. Iwata and S. Ishioka: Entropy production and heat generation in computational processes, in Unsolved Problems of Noise and Fluctuations - Proc. 2nd Int. Conf., eds. D. Abbott and L. B. Kiss (AIP press, 2000) pp.341-346.

### 3) 学会講演

日本物理学会 2000年春の分科会 2000年3月22日～25日（関西大学）

鈴木昌樹，淵上信子：内部自由度を持つラチェット系．

増永拓也，清野健，駒井美知子，勝山智男，淵上信子：水滴落下系アトラクタにおける見かけ上の多重構造．

日本物理学会第55回年次大会 2000年9月22日～25日（新潟大学）

崔東学， 瀧上信子：ガウス型  $1/f^\alpha$  ノイズの振幅切断．

清野健， 瀧上信子：大域分岐を利用した水滴落下系カオスの制御．

安武哲郎， 加藤浩司， 瀧上信子：内部自由度を持つラチェット系 II．

#### 国際会議

20th Int. Con. Theoretical and Applied Mechanics, Chicago, USA, 27 Aug - 2 Sept, 2000

K. Kiyono, T. Katsuyama, T. Masunaga and N. Fuchikami: The dripping faucet as a chaotic dynamical system.

Dynamics Days 2001, Chapel Hill, USA, 3 - 6 Jan, 2001

K. Kiyono and N. Fuchikami: Controlling a chaotic dripping faucet with periodic perturbations.

#### 4) 学会誌等

清野健， 勝山智男：水滴落下系のカオス，日本物理学会誌 2000 年 4 月号 p.247-256.

清野健， 瀧上信子：水滴落下系のシミュレーションとカオス，日本液体微粒化学会誌 2000 年 5 月号, p.270-282.

瀧上信子：雫の物理 — ぶらさがる雫，ちぎれる雫，数理科学 2000 年 7 月号, p.68-75.

瀧上信子：雫の物理 — したたり落ちる水滴のシミュレーション，数理科学 2000 年 8 月号, p.59-66.

瀧上信子：雫の物理 — 身近なカオス，水滴落下系，数理科学 2000 年 9 月号, p.68-75.

# 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。2000年度における研究活動の概要は次の通りである。

### 1) トポロジ的に変わった境界条件をもつ系の臨界現象

臨界現象における有限サイズスケール関数は、境界条件や系の形状に依存することが知られている。Klein 壺と Möbius 帯というトポロジ的に変わった境界条件を課した 2 次元イジングモデルの臨界点近傍の有限サイズスケール関数を論じた。秩序変数の分布関数の境界条件依存性をモンテカルロ法を用いて調べ、さらに周期境界(トーラス)、片周期境界(シリンダー)、自由境界の系と比較した。5 つの境界条件の系の有限サイズスケール関数のふるまいを有限系の縦横比の関数として調べ、境界条件による秩序変数の分布の変化の起源を、クラスターの解析により明らかにした。

### 2) 確率変動クラスターアルゴリズムの提案と応用

多体系を扱う統計力学において、モンテカルロ法は標準的なシミュレーション手法として広く用いられてきているが、しばしば緩和が長くなる問題に直面する。その問題を克服する手法がいくつか試みられているが、ここでは自動的に臨界点を決定できる新しい確率変動クラスターアルゴリズムを提案する。Swendsen-Wang 法として知られるクラスターフリップの方法を拡張するものである。通常は温度を固定してシミュレーションを行うが、我々の方法ではクラスターが浸透するかどうかを判定して温度を変動させる。負のフィードバックが働き、自動的に系の大きさに応じた臨界点に収束する。有限サイズスケール関数の解析と合わせて、無限系の臨界点を効率よく決定することができる。2 次元、3 次元のポッツモデルの場合にこの方法の有効性を確かめ、さらにランダム系への応用を開始した。

### 3) ずり流動下の高分子ブラシの研究

高分子ブラシとは、高分子鎖の一方の端を、鎖が面に垂直方向に伸びる程度の密度で面に植え込んだものであるが、高分子ブラシを 2 枚向かい合わせにして圧縮すると、高分子鎖が相互作用をしてその配位が変形を受ける。さらに面に沿った方向に一定の速度で相対運動(ずり流動)をさせたときの高分子鎖の配位や弾性応答を調べることは興味深い問題である。ここでは、bond fluctuation モデルとよばれる格子モデルに基いたシミュレーション法を高分子ブラシの問題に適用した。ずり流動をかけたときの高分子鎖の広がり、傾きの変化、高分子鎖を構成する単分子の分布関数を調べた。ずり流動による高分子鎖の伸張と絡み合いが解けることの 2 つの効果の兼ね合いで様々な現象が現れる。圧縮ブラシにおいては 1 枚のブラシの場合と比べてずり流動の影響を大きく受けることを示した。

### 4) ランダム量子スピン系における臨界現象

ランダムな横磁場のある 2 次元量子イジングモデルの研究を行った。この系に関してモンテカルロ法のための新しいクラスターアルゴリズムを提案しこれによってシミュレーションを行い、ランダムネスを増加させたときに絶対零度相転移が起こることを確認し、相図を決定した。さらに

転移点よりランダムネスが強い側でのグリフィス異常性について調べ、動的臨界指数のランダムネス異存性を調べた。これらの結果、1次元で成り立っていると思われる D.Fisher による描像が2次元でも成り立っていることが示された。

2次元反強磁性ハイゼンベルクモデルをランダムに希釈した系についてその磁気的性質が磁性原子濃度とともにどのように変化するかを調べた。その結果、従来のいくつかの研究結果からなされていた予想に反し、ゼロ温度臨界点は2次元浸透閾値に正確に一致することが分かった。その一方、そこでの臨界現象はスピンの長さによって定性的に違ったものになるという特異な現象を発見した。

#### 5) 2次元スピングラス系におけるドロップレット 励起のフラクタル性

2次元古典スピングラス系における絶対零度臨界現象について厳密に有限系の基底状態を計算する方法によって調べた。とくに系の大きな空間スケールでの降るまいを決定するドロップレット励起の幾何学的性質に着目して計算を行った結果、2次元においてはドロップレット励起がコンパクトではなく、約 1.8 という次元をもったものになることが分かった。更に、ドロップレットの励起エネルギーを特徴付ける臨界指数の値を評価した結果、その評価値とドロップレット理論から導かれる他の諸臨界指数が他の計算からすでに得られている値と一致することが確認された。ドロップレット励起の臨界指数の値は境界壁エネルギーのスケールリングを特徴づける指数とは明らかに異なるものであった。以上のことからドロップレット理論は2次元古典スピングラス系の臨界現象をよく記述している一方、境界壁くりこみ群の議論は正しくないことが分かった。

#### 6) 量子スピンモデルにおける磁気 4 重極秩序

通常の変換相互作用に加えて双 4 重極型の相互作用をもったモデルはハルデー問題との関連で1次元の場合に非常に精力的に研究されているモデルである。1次元では多彩で強力な解析的手法が知られているのに対して、2次元以上では解析的手法の適用が非常に限られている為、その性質はこれまであまり調べられてこなかった。われわれはこのモデルを新しく開発したクラスターアルゴリズムを用いた量子モンテカルロ法によって調べた結果、2次元以上では強磁性と反強磁性相の間に4重極秩序によってのみ特徴づけられる相が存在し、更に3次元以上では有限温度での相転移があることなどを明らかにした。

#### 7) 異方的拡張ハバード鎖の基底状態における相図

1次元量子系にみられる臨界状態は、1次元系特有の固定点である Tomonaga-Luttinger (TL) 液体としての性質を示す。近年、この固定点およびその近傍での系に関する理解が進歩したことにより、その基底状態および低エネルギー領域における性質を、より精密に記述できるようになった。一方で、定量的に信頼しうる情報を得る為には個々のモデルに対する数値計算が不可欠である。我々は、有限サイズ補正、くりこみ群、および励起の対称性に関する考察を基礎とするレベルスペクトロスコピー法を用いて、スピン空間内で異方性を持つよう変形された拡張ハバード鎖を調べ、基底状態における相図の大域的構造を数値的に明らかにすると同時に、幾つかの極限領域における解析的計算結果との詳細な比較を行った。

#### 8) クラスタアルゴリズムの拡張と量子スピン系への応用

クラスタアルゴリズムによるモンテカルロ法は、古典、量子を問わず適用可能な数値的アプローチの1つであり、その可能性に近年注目が集まっている。そこでは、スピン変数の組によ

り記述される系に対して，新しくグラフ変数の組を導入すること [Fortuin-Kasteleyn (FK) マッピング] により，スピンはお互いに独立な幾つかのクラスターに分割され，それらのダイナミクスに従って系の状態更新がなされる．一方で，相互作用のある系に対して，補助変数の組を導入することにより，相互作用のない (ランダム場の中に置かれた) 系の重ね合わせに展開する方法 [Hubbard-Stratonovich (HS) 変換] は，電子系のモンテカルロ計算などで，しばしば利用されてきた．本研究では FK および HS 変換を併用することによりクラスターアルゴリズムの変形を議論すると同時に，実際に量子スピン鎖への適用を通して新アルゴリズムの有効性を確認した．

## 2. 研究業績

### 1) 論文

M. Iwamatsu and Y. Okabe: Reducing quasi-ergodicity in a double well potential by Tsallis Monte Carlo simulation, *Physica A* **278** (2000) 414-427.

Y. Okabe, K. Kaneda, Y. Tomita, M. Kikuchi and C.-K. Hu: Cluster Analysis of the Ising Model and Universal Finite-Size Scaling, *Physica A* **281** (2000) 233-241.

K. Kaneda, Y. Okabe and M. Kikuchi: Effects of shape and boundary conditions on finite-size functions for anisotropic three-dimensional Ising systems, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **138** (2000) 458-459.

Y. Okabe, Y. Tomita and K. Kaneda: Percolating Properties of Ising Model and Related Problems, *J. Phys. Soc. Jpn. Suppl.* **A69** (2000) 199-205.

Y. Tomita and Y. Okabe: Probability-Changing Cluster Algorithm for Potts Models, *Phys. Rev. Lett.* **86** (2001) 572-575.

K. Kaneda and Y. Okabe: Finite-size scaling for the Ising model on the Möbius strip and the Klein bottle, *Phys. Rev. Lett.* **86** (2001) 2134-2137.

N. Kawashima and T. Aoki: Zero-temperature critical phenomena in two-dimensional spin glasses, *J. Phys. Soc. Jpn. Suppl.* **A69** (2000) 169-177.

Yu-Cheng Lin, Naoki Kawashima, Ferenc Iglói, and Heiko Rieger: Numerical renormalization group study of random transverse Ising models in one and two space dimensions: *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **138** (2000) 479-488.

Naoki Kawashima: Optimization algorithms based on renormalization group, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **138** (2000) 448-453.

K. Kato, S. Todo, K. Harada, N. Kawashima, S. Miyashita and H. Takayama: Quantum phase transition of the randomly-diluted Heisenberg antiferromagnet on a square lattice, *Phys. Rev. Lett.* **84** (2000) 4202-4207.

Naoki Kawashima: Fractal droplets in two-dimensional spin glass, *J. Phys. Soc. Jpn.* **69** (2000) 987-990.

D. Karevski, Y.-C. Lin, H. Rieger, N. Kawashima and F. Iglói: Random quantum magnets with broad disorder distribution, Euro. Phys. J B **20** (2001) 267-276.

H. Otsuka: Global structure of the ground-state phase diagrams in the one-dimensional anisotropic extended Hubbard model, Phys. Rev. B **63** (2001) 125111-125119.

H. Otsuka: Ground states of the One-Dimensional anisotropic extended Hubbard model, Phys. Rev. Lett. **84** (2000) 5572-5575.

H. Otsuka: Quantum phase transition in one-dimensional Peierls-Hubbard model with nearest-neighbor hopping integrals, Prog. Theor. Phys. Suppl. **138** (2000) 139-140.

## 2) 学会講演

日本物理学会 2000年春の分科会 2000年3月22日～3月25日(関西大学)

金田和久, 岡部豊: クラインボトルとメビウスストリップにおける有限サイズスケーリング

富田裕介, 岡部豊: 新しい確率変動クラスターアルゴリズム

山口智明, 川島直輝, 岡部豊: Broad Histogram 法の  $\pm J$  イジングモデルへの応用(2)

石塚潤一: 非平衡緩和法によるランダム磁場中のイジングモデルの解析

川島直輝, 原田健自: Cubic Asymmetry のある  $S = 2$  ハイゼンベルクモデルの量子モンテカルロ法による相図決定

大塚博巳: 1次元異方的拡張ハバードモデルの基底状態 II

日本物理学会第55回年会 2000年9月22日～9月25日(新潟大学)

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2次元希釈イジングモデルの解析

石塚潤一: 非平衡緩和法によるランダム磁場中の物理モデルの解析 III

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

上野大輔, 川島直輝: Cubic 異方性のある古典スピンモデルのモンテカルロシミュレーション

大塚博巳: 量子 Monte Carlo 法による1次元異方的拡張 Hubbard モデルの研究

京都大学基礎物理学研究所短期研究会「モンテカルロ法の新展開2」

2000年10月30日～11月1日(京大基研)

岡部豊: 新しいモンテカルロ法の試みのあれこれ

富田裕介, 岡部豊: 確率変動クラスターアルゴリズムの 3D q-state Potts モデルへの適用

川島直輝: ループ・クラスタアルゴリズムの最近の進展

## 国際会議

The 22th Academia Sinica workshop on statistical physics and numerical simulation,  
Academia Sinica, Taipei, Taiwan, June 26-27, 2000

Y. Okabe: Finite-size Scaling for the Ising Model on the Möbius Strip and the Klein Bottle  
(invited paper)

Y. Okabe: Probability-changing Cluster Algorithm for Potts Models (invited paper)

The 4th international conference on Monte Carlo and quasi-Monte Carlo methods  
in scientific computing, Hong Kong, Nov. 27 – Dec. 1, 2000

Naoki Kawashima: Cluster algorithms in physics — Markov chains on space of graphs — (invited  
paper)

Conference on Computational Physics 2000, Gold Coast, Australia, December 3-8, 2000

Y. Okabe: Effects of Shape and Boundary Conditions on Finite-Size Scaling of the Ising Model  
(invited paper)

H. Otsuka: Phase diagrams of the one-dimensional anisotropic extended Hubbard model

14th Annual Workshop on Recent Developments in Computer Simulation Studies  
in Condensed Matter Physics, Georgia, U.S.A, February 19-23, 2001

Y. Okabe: Application of Probability-changing Cluster Algorithm (invited paper)

Dagstuhl Seminar — Algorithmic Techniques in Physics —, Saarbrücken, Germany,  
Feb.2-Mar.2, 2001

Naoki Kawashima: Renormalization and Optimization

## 3) 著書等

岡部豊 : 「統計力学」(裳華房テキストシリーズ)裳華房

# 非線形物理研究室

## 1. 研究活動の概要

### 1) カオスのトンネル効果の発生機構と複素領域における記号力学系の構成

動的障壁が存在する場合において見いだされた“カオスのトンネル効果”がエネルギー障壁をもつ系に対しても全く同じ機構で起こることを明らかにした。また、系のトポロジカルエントロピーで特徴づけられる実カオスが存在しない場合でも、複素位相空間内のホモクリニック交差の発生により、カオスのトンネル効果の諸特性である複雑な振動構造が生じ得ることを見出した。さらに、複素空間内の記号力学系の構成とそれをもとにしたトンネル波動関数を近似する複素半古典和の半経験的和則の導出を行った。

### 2) 多重積分におけるストークス現象と超漸近展開

複素エノン写像の半古典論を exact WKB 法の観点から議論した。特に、エノン写像の量子ブローパゲータを定義する多重積分が満たす高階微分方程式を導出し、複素エノン写像の exact WKB 解析の問題が Aoki-Kawai-Takei の提唱する高階微分方程式のストークス現象の問題に帰着されることを示した。また、複素半古典論を実行する際の鞍点解の寄与・非寄与問題を決定する際に、ストークスグラフの幾何学を考察することが有効であることを示し、その妥当性を超漸近展開の手法を用いて実証した。

### 3) 平面ビリヤードの等スペクトル問題

一定の building block の折り返しによって作られる「折り返し平面多角形」内の固有値列に対する等スペクトル問題（“太鼓の形を聞き分けることはできるか？”）と、対応する同じ多角形内の周期軌道スペクトル（領域内を運動する古典ビリヤード球の周期軌道の長さのスペクトルを短い順に並べたもの）に対する等スペクトル問題が等価であること、すなわち、形の異なる等スペクトル対は、同時に等周期軌道スペクトルを持つことを厳密に証明した。

### 4) 多項式摂動のある多自由度系の量子力学

非可積分な量子力学における多自由度効果を調べるための数値スキームの開発を行った。多自由度非可積分系には、「アーノルド拡散」など多自由度古典系固有の現象の存在や、動的局在・スカー、といった自由度に依存して現れるさまざまな量子局在現象が知られており、興味の対象は数多い。ここでは、多自由度量子系を解析する準備段階として、系の近可積分性を利用したシンプレクティック積分法を用いた新しい数値スキームの開発を行い、 $\phi^4$  モデルに対してその有効性を確かめた。

### 5) 保測エノン写像における非自明なマルコフ分割の構成

多項式自己同型写像の標準型であるエノン写像は 2 次元の最も単純な力学系であり、カオス発生の基本機構であるスメールの馬蹄型力学を自然に実現する。しかしながら、M. Hénon がその写像を提出して以来 30 年近く経つ現在に至っても未だその全貌解明にはほど遠く、さまざまな試行錯誤が続いている。ここでは、エノン写像に見出される非自明な双曲領域でのマルコフ分割を、

ホモクリニック点の分岐構造の問題と結びつけることにより，その系統的・機械的構成法を提案した．

#### 6) 内部自由度をもつ大自由度ハミルトン系の遅い緩和の起源

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

#### 7) 弱い測定の半古典解析，複素古典軌道の測定可能性

半古典論では，古典論で実の値を取っていた物理量が，複素数の値を取りうるようになる．これらが，近似理論の作りだした虚構ではなく，“観測可能な”物理量に直接対応することを示すことを試みた．量子干渉の発現する時間 scale (“Ehrenfest time”) 以前において，複素数の値を取る軌道は，“弱い測定”と呼ばれる手続きで，原理的に観測可能であることを明らかにした．

## 2. 研究業績

### 1) 論文

A. Shudo and K.S. Ikeda: Complex trajectory description for chaotic tunneling, Prog. Theor. Phys. Suppl. **139** (2000) 246-256.

T. Harayama, A. Shudo and S. Tasaki: A functional equation for semiclassical Fredholm determinant for strongly chaotic billiards, Prog. Theor. Phys. Suppl. **139** (2000) 460-469.

### 2) 学会講演

日本物理学会 2000 年春の分科会 2000 年 3 月 22 日～ 3 月 25 日 (関西大学)

岡田雄一郎, 首藤啓: 多角形ビリヤードの等スペクトル問題.

大西孝明, 首藤啓, 池田研介, 高橋公也: Scattering map model における chaotic tunneling.

日本物理学会第 55 回年次大会 2000 年 9 月 22 日～ 9 月 25 日 (新潟大学)

岡田雄一郎, 首藤啓: 多角形ビリヤードの等スペクトル問題 II.

早稲田大学シンポジウム 複雑系:理論と新技術— 人文・社会科学、工学、自然科学の交流 —  
2000 年 5 月 1 日～ 5 月 2 日 (早稲田大学)

大西孝明, 首藤啓, 池田研介, 高橋公也: 散乱マップ系におけるカオティックトンネリング.

科研費研究会「撞球問題の 100 年」2000 年 4 月 27 日～ 4 月 28 日 (広島大学)

首藤啓: 量子ビリヤードにおける外側・内側問題と半古典論.

数理解析研究所研究会「複素力学系と関連分野の研究」2000 年 6 月 13 日～ 6 月 16 日 (京都大学)

首藤啓: カオスのトンネル効果と複素力学系.

東工大数学教室談話会 2000年7月3日 (東京工業大学)

首藤啓: エノン写像のストークス幾何と複素力学系.

分子科学研究所短期研究会「超光子場の化学」2000年9月4日～9月5日 (分子研)

首藤啓: 周期摂動と複素軌道と用いたトンネル現象.

数理解析研究所研究会「力学系と微分幾何学」2000年9月6日～9月7日 (京都大学)

首藤啓: エノン写像の exact WKB 量子化に向けて.

第9回「非平衡系の統計物理」シンポジウム 2001年1月10日～1月12日 (筑波大学)

田中篤司: Semiclassical interpretation of weak values.

数理解析の諸問題と力学系 2001年3月6日～3月8日 (東京工業大学)

田中篤司: WKB 法における複素古典軌道と弱い測定.

### 国際会議

QLCW2000 ATR Workshop on Quantum and Laser Chaos, Nov. 7–10, 2000 (ATR Adaptive Communications Research Laboratories)

Y. Okada and A. Shudo: On Equivalence Between Isospectrality and Iso-length Spectrality.

T. Onishi, A. Shudo, K.S. Ikeda, and K. Takahashi: Mechanism of tunneling due to chaos in complex phase space.

A. Tanaka: A semiclassical approach to multicomponent systems.

### 3) 学会誌等

首藤啓, 石井豊, 池田研介: カオスのトンネル効果と複素力学系, 研究集会『数理解析の諸問題と力学系』報告集 139–154.

首藤啓, 池田研介: 量子エノン写像のストークス幾何, 数理解析研究所講究録 1133 『Painleve 系, 超幾何系, 漸近解析』53–67.

首藤啓, 池田研介: 半可積分極限と量子エノン写像のストークス幾何, 数理解析研究所講究録 1168 『完全最急効果法』55–65.

首藤啓, 池田研介: エノン写像の exact WKB 量子化に向けて, 数理解析研究所講究録 1180 『力学系と微分幾何』48–58.

# 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) CeB<sub>6</sub> の四重極相転移における多重極相互作用と揺らぎ

ここ数年の研究によって、CeB<sub>6</sub> の四重極秩序相における各磁場方向に対する秩序変数が確立し、同時に隠れた八重極モーメントの重要な役割が解ってきた。一方で、CeB<sub>6</sub> では転移点近傍での秩序変数の大きな熱揺らぎの存在が実験から示唆されており、揺らぎを無視した平均場による近似解からのずれは定量的には小さくない。また、理論的にも、様々な多重極自由度間の競合によって、通常の磁性体とは異なる大きな熱的及び量子的揺らぎが生じることが予想できる。従って、基礎モデルがほぼ確立した現段階で、次のステップは、実験との定量的比較を視野に入れ、現実的な多重極相互作用に対して平均場近似を越えたより精密な解析を行う事である。本年度は、相転移におけるランダウ理論の立場で、平均場解からの  $d^{-1}$  補正を計算し、弱磁場領域で大きな多重極揺らぎが確かに存在することを示した。様々な物理量における揺らぎの影響とその実験との比較、またより高次の補正などについて、現在研究を進めている。[椎名、酒井、斯波(東工大)]

### 2) 稀土類化合物におけるイオン間相互作用の起源

前項に述べた CeB<sub>6</sub> では八重極型相互作用が重要な役割を果たしたり、Yb<sub>4</sub>As<sub>3</sub> では外部磁場に対する  $g$ -因子は際立って異方的であるにもかかわらず、励起スペクトルのエネルギー自体は等方的な交換相互作用により記述出来ることが神木らの非弾性磁気散乱により示されているなど、従来の稀土類イオン間相互作用の常識を覆す例が最近見い出されるようになってきた。 $c$ - $f$ 混成と呼ばれる共有結合に起源を持つイオン間相互作用に於ては、高次多重項間の相互作用が小さいという今までの常識は成り立たないこと、むしろ高次項と低次の磁気双極子相互作用等の結合常数が等しくなる等の隠れた対称性があることを示した。Yb<sub>4</sub>As<sub>3</sub> の低温電荷秩序相においては、Yb イオンサイトの反転対称性が失われ、一様磁場が反強的な磁化と結合して興味ある励起スペクトルを生じる可能性が指摘されていたが、低エネルギー有効ハミルトニアンにはこのような結合の起源となるジャロシンスキー・守谷型相互作用を包含する形である種の回転対称性のあること、一方、高エネルギー励起の部分は従来型の大きな結晶場異方性をもつハミルトニアンで矛盾なく解析可能であること等を示した。また、この物質では  $c$ -軸に垂直な磁場により、 $c$ -軸方向に振動する磁化の誘起される可能性があり、この観測により、他の方法では得難い電子状態にたいする情報の得られる可能性を指摘した。[酒井、椎名、神木、斯波(東工大)、青木(東北大)、落合(東北大)、上田(東大)、竹ヶ原(弘前大)、播磨(阪大)]

### 3) V 酸化物における軌道自由度

V 酸化物中の V イオンは 1 つかないしは 2 つかの  $t_{2g}$  価電子を持ち、様々な結晶構造に応じて多様な軌道自由度の存在が予想されている。なかでも最も有名なのが V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> であり、半世紀以上にもわたる長い研究の蓄積がある。最近、このいわば古典的な系が、金属絶縁体転移や軌道自由度に

関連して再び大きな注目を集め、理論実験両面からその複雑な物性の再検討が始められた。本年度の課題として、我々は  $V_2O_3$  の絶縁相における磁気構造とそれにもなう  $t_{2g}$  電子の軌道状態に焦点を絞り、低温相の秩序変数を明らかにする事を目指した。複数の V イオンが関与した新奇な分子軌道の形成が問題の鍵であり、分子間相互作用の詳しい解析から、現実的なパラメータ領域で  $V_2O_3$  の複雑な磁気構造が分子軌道秩序とともに安定相となることを示した。これらの軌道状態に基づいて有効スピン間相互作用や局所スピン異方性定数を計算し、実験との定性的な一致を得た。[椎名、Mila(ETH), Zhang(ETH), Rice(ETH)]

#### 4) 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。量子ドットでは、電子間のクーロン相互作用が重要になり、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、人工の磁性イオンと見做すことが可能な状態も生じる。このスピンはリード内の伝導電子と結合し、いわゆる近藤効果により、温度降下につれ強い散乱を生じ、やがては一重項形成により消失して、散乱を生じない状態に移行することが予想される。低温で急激におきるこの状態変化に対応して、トンネル効果がどのような振舞いを示すか、実験と実際的な形で比較可能な計算は、従来無かった。本研究では、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た。これにより、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た。また、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。直列2ドット系の量子転移の絡んだトンネル異常や、予想外に偶数電子系でも現れた低温増大などの起源の理論的解明を行っている。[酒井、泉田 (ERATŌ)]

#### 5) 光誘起磁気相転移と緩和の理論

ある種の有機化合物や、磁性イオンを含む半導体では、光の照射下で磁性的性質が急激に変化するものがある。光の照射量に臨界値が見られたり、光子一個にたいして、変化するイオンの数が数十から数百個になることが知られ、一種の相転移が発生している。従来の、温度や磁場等のような一様な外場の変化による転移でなく、電子状態のある一部を、光によりピンポイント的に励起することにより、相転移を発生させている意味で、電子状態の役割がより明確に現れてくる。また、今後、光による物性の制御の可能性を秘める現象として、注目される。このような系の振舞いをいかにモンテカルロシミュレーション法にのせ、解析すべきか、様々な研究を行っている。代表的物質のひとつである、Mn をドーブした GaAs 等の希薄磁性半導体における、磁気ポーラロン状態についての研究を行い、低温で自発強磁性磁化が急に減少することなどを明らかにし、この物質の示す磁化の特徴の起源の解明を行った。また、鉄ピコリルアミン錯体の低スピン高スピン転移におけるドメイン形成の理論的研究を進めている。[酒井、石井、徳江、西澤 (GE), 鈴木 (広島大)]

#### 6) f-電子系の高分解能光電効果の解析

光電子効果の分解能が飛躍的に改善され、その解析には電子間相互作用と、温度効果を含めた、精密な計算による解析が必要になってきている。我々は、NCA 法と呼ばれる標準的な計算法を、実際の物質に応じてフレキシブルに計算できるパッケージとしてコードして、提供し、光電効果や磁気励起、静的磁気測定等と、総合的に解析すべきことを提唱している。本研究は実験家とと

もに、CePdAs や CeB<sub>6</sub>、CeRu<sub>2</sub> 等の高分解能光電効果の実験を解析したものである。従来の研究との積み重ねにより、近藤温度の比較的低い場合には、バンド計算や非共鳴実験でのデータをもとに評価した、c-f 混成により、一不純物モデルでフェルミ準位近傍の低エネルギー構造を再現できること、近藤温度の高い系ではそれが不可能で、f 電子にバンド効果を取り入れる必要性のあること等が一般的であることが明らかになった。[岩崎(阪大) 関山(阪大) 菅(阪大) 酒井]

## 2. 研究業績

### 1) 論文

R. Shiina, H. Shiba and O. Sakai: Theory of Antiferro-Quadrupolar Ordering in a Weak-Crystal-Field System TmTe, *Physica B* **284-288** (2000) 1335-1336.

H. Shiba, O. Sakai and R. Shiina: Nature of Ce-Ce Interaction in CeB<sub>6</sub>: Importance of AF Octupolar Moments, *Physica B* **281-282** (2000) 477-478.

H. Shiba, K. Ueda and O. Sakai: Effective Hamiltonian for Charge-Ordered Yb<sub>4</sub>As<sub>3</sub>, *J. Phys. Soc. Jpn.* **69** (2000) 1493-1497.

O. Sakai, M. Kohgi, H. Shiba, A. Ochiai, H. Aoki, K. Takegahara and H. Harima: Local Symmetry and Crystalline Field Effects in Charged-Ordered Yb<sub>4</sub>As<sub>3</sub>, *J. Phys. Soc. Jpn.* **69** (2000) 3633-3641.

F. Mila, R. Shiina, F.-C. Zhang, A. Joshi, M. Ma, and T. M. Rice: Orbitally Degenerate Spin-1 Model for Insulating V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, *Phys. Rev. Lett* **85** (2000) 1714-1717.

N. K. Sato, N. Aso, K. Miyake, R. Shiina, P. Thalmeier, G. Varelogiannis, G. Geibel, F. Steglich, P. Fulde and T. Komatsubara: Direct Evidence for Strong Coupling of Magnetic Excitons and Heavy Quasiparticles in the Superconductors UPd<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>, *Nature* **410** (2001) 340-343.

R. Shiina, F. Mila, F.-C. Zhang, and T. M. Rice: Atomic Spin, Molecular Orbitals, and Anomalous Antiferromagnetism in Insulating V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, *Phys. Rev. B* **63** (2001)144422-1-16.

O. Sakai, Y. Shimizu and S. Suzuki: Effect of Lattice Distortion on non-Fermi Liquid State of Two Channel Kondo Model, *Physica B* **281-282** (2000) 468-469.

Y. Shimizu, O. Sakai and A. C. Hewson: Effect of Band Dispersion for Renormalization Gap on Periodic Anderson Model in Infinite Dimensions, *Physica B* **281-282** (2000) 317-318.

Y. Shimizu, O. Sakai and A. L. Hewson: The Effect of Band Dispersion and Interactions on the Excitation Gaps in the Periodic Anderson Model in Infinite Dimensions, *J. Phys. Soc. Jpn.* **69** (2000) 1777-1987.

W. Izumida and O. Sakai: Kondo Effects in Electron Tunneling through Quantum Dot, *Physica B* **281-282** (2000) 32-33.

W. Izumida and O. Sakai: Kondo Effect in Double Quantum Dot Systems, *Physica B* **284–288** (2000) 1764-1765.

W. Izumida and O. Sakai: Two-Imupurity Kondo Effect in Double-Quantum-Dots Systems - Effect of Interdot Kinetic Exchange Coupling -, *Phys. Rev. B* **62** (2000) 10260-10267.

Y. Kaneta, S. Iwata, T. Kasuya and O. Sakai: Theoretical Calculation for the Fermi Surfaces of CeSb in the Ferromagnetic and Ferrimagnetic AFF1 Phases, *J. Phys. Soc. Jpn.* **69** (2000) 2599-2576.

K. Nishizawa, O. Sakai and S. Suzuki: Magnetic and Transport Properties of Low Density Carrier Ferromagnetic Semiconductors, *Physica B* **281-282** (2000) 404-405.

T. Iwasaki, S. Suga, S. Imada, A. Sekiyama, K. Matsuda, M. Kotsugi, K.-S. An, T. Muro, S. Ueda, T. Matsushita, Y. Saitoh, T. Nakatani, H. Ishii, Osamu Sakai, R. Takayama, T. Suzuki, T. Oguchi, K. Katoh and A. Ochiai: Bulk and Surface electronic Structure of CePdX(X=As,Sb) Studied by 3d-4f Resonance Photoemission, *Phys. Rev. B* **61** (2000) 4621-4628.

A. Sekiyama, S. Suga, S. Imada, H. Takagi, T. Nanba, R. Takayama, O. Sakai and S. Kunii: Effect of a Crystalline Electric Field on Photoemission Spectra of CeB<sub>6</sub>, *Physica B* **281-282** (2000) 550-552.

K. Matsuda, A. Sekiyama, S. Suga, S. Imada, Y. Saitoh, T. Matsushita, S. Ueda, H. Harada, T. Iwasaki, K. Kotsugi, M. Hedo, Y. Onuki, E. Yamamoto, Y. Haga, R. Takayama and O. Sakai: High-resolution Resonant Photoemission Study of CeRu<sub>2</sub>, *Physica B* **281-282** (2000) 729-730.

## 2) 学会講演

日本物理学会春の分科会 2000年3月22日～3月25日 (関西大学)

椎名亮輔, F. Mila, F.-C. Zhang and T. M. Rice : V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の分子軌道状態と異常磁性相

酒井治、小川哲生、越野和樹 : 光励起による high-spin low-spin 転移のドメイン形成に関するモンテカルロシミュレーション

斯波弘行、上田和夫、酒井治 : Yb<sub>3</sub>Sb<sub>4</sub> の構造と有効ハミルトニアン

石山文彦、金田安則、酒井治 : CeX のダブルレイヤー構造 (2)

日本物理学会第55回年会 2000年9月22日～9月25日 (新潟大学)

酒井治、小川哲生、越野和樹 : 光励起による low-spin high-spin 転移における格子歪みとの結合効果についてのモンテカルロシミュレーション

石山文彦、酒井治 : CeSb の光学伝導度

酒井治、斯波弘行、上田和夫 : Yb<sub>3</sub>Sb<sub>4</sub> の電荷秩序状態における有効ハミルトニアン (シンポジウム)

日本放射光学会 2001年1月12日～1月14日 (広島大学)

椎名亮輔：V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の異常磁性と分子軌道状態の理論

### 国際会議

The International Conference on the Physics and Application of Spin-Related Phenomena in Semiconductors, Sendai, September,13-15, 2000

S. Suzuki and O. Sakai: Magnetic Interaction in Low Density Carrier Ferromagnetic Semiconductors.

International Symposium on New Developments in Strongly Correlated Electron Phase under Multiple Environment, Osaka, November 6-8, 2000

O. Sakai and W. Izumida: Kondo Effect in Tunneling Phenomena through Quantum Dots. (Invited talk)

R. Shiina, F. Mila, F.-C. Zhang and T. M. Rice: Atomic Spin, Molecular Orbitals, and Anomalous Antiferromagnetism in Insulating V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Mini-Workshop: Recent Progress in Spin-Fermion Coupled Systems, Tokyo, (Aoyama Gakuin Univ.) September 16. 2000

O. Sakai: Magnetic Interaction in Low Density Carrier Ferromagnetic Semiconductors. (Invited talk)

### 3) 学会誌等

なし

# 高エネルギー実験研究室

## 1. 研究活動の概要

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

### 1) 電子-陽電子線形加速器 JLC の開発研究

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

#### (1) レーザーコンプトン散乱による偏極陽電子の生成

われわれはこれまで、将来のリニアコライダー(LC)において、電子とともに陽電子の偏極が、標準理論の精密検証および標準理論を超える新しい現象の探求に重要な役割を果たすことを指摘してきた。都立大学・KEK・早稲田大学の共同研究グループは、偏極陽電子の生成法として、レーザー・コンプトン散乱による新しい方法を提案し、ATFを用いて一連の基礎実験を進めてきた。現在、本グループは、偏極陽電子ビームの実験研究に取り組む唯一のグループである。円偏光したレーザー光をATFダンピングリングからの電子ビーム(1.26GeV、 $6 \times 10^9 e^-/\text{bunch}$ )によって後方コンプトン散乱させる。このとき、入射レーザー光を円偏光させておけば、散乱ガンマ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、高エネルギー(数10MeV)偏極陽電子を発生させることができる。レーザー光は、YAGレーザー、GCR-18Sからの2倍高調波(532nm = 2.33eV)で、最大出力300mJ/バンチ、パルス幅7ns、広がり角0.4mradである。15cmの短焦点チェンバーにより、レーザーを7 $\mu\text{m}$ まで絞り込み、後方コンプトン散乱した線、( $2 \times 10^5/\text{パルス}$ )を観測した。現在、線および陽電子の偏極度を測定するためのポラリメーターの設計と製作が進んでいる。

#### (2) 日米科学技術協力事業

平成10年度から、日米科学技術協力事業に採択され、BNL研究所とともに、光子ビームと電子ビームの衝突技術の高度化を進めている。とくに、レーザー光の逆コンプトン散乱によるピコ秒X線生成は、レーザーシンクロトロン光源(LSS)として、今後広範な研究領域への応用が期待されている。BNLにおいて、短焦点コンプトンチェンバーを製作し、ギガワット(GW)炭酸ガスレーザーにより、パルスあたり世界最高強度のX線(2.7 $\mu\text{m}$ )生成に成功した。現在テラワット(TW)レーザーの最終調整の段階にあり、1000倍以上の強度増強を見込んでいる。このような超高密度レーザーによって、電磁相互作用の非線形効果という興味深い現象の探索が可能になる。

通常、レーザーの衝突距離は、レーザ長で制限されるため数 mm 程度であるが、これを 100 倍以上拡大し、非線形効果を抑制しつつ、LSS の強度の飛躍的増大を図るための基礎研究が、ロシア、イスラエルとの国際共同によって始められた。すなわち、毛細管中にプラズマを発生させ、そのレンズ作用でレーザーの発散を押さえながら、逆コンプトン散乱の衝突効率を向上させるのである。長さ 5cm、プラズマ密度  $10^{17}/\text{cm}^3$  のプラズマ生成に成功し、BNL での実験に向けて準備が進んでいる。

### (3) 単結晶を用いた陽電子源の開発

高エネルギー衝突型加速器の陽電子源としては通常、高エネルギー電子を W 標的にあて、電磁シャワーで発生する陽電子を用いる。本研究では、標的に重い金属の単結晶を使用して陽電子生成効率をあげようというものである。高エネルギー電子が結晶軸に平行に入射すると、電子は結晶の軸ポテンシャルに捕獲されて螺旋運動をおこない、強力なチャンネリング放射を発生する。このチャンネリング放射の強度は、通常の制動放射強度を大きく上回る。したがって、この放射が電子・陽電子対をつくるとき、陽電子の強度が増大すると期待される。本研究の目的は、このような過程での陽電子生成効率の増加を実験的に検証し、実際の標的ステーションへ単結晶を導入する場合の諸問題を、KEK-Linac からの 8-GeV 電子ビームを使って定量的に明らかにすることである。

2000 年 9 月に KEK-Linac からの 8-GeV 電子ビームを用いて実験を行った。実験では厚さ 2.2 mm のタングステン単結晶をゴニオメーターに搭載し、結晶の  $\langle 111 \rangle$  軸を電子ビームの入射角に一致させた時に陽電子生成の増大が見られた。電子の入射角を  $\langle 111 \rangle$  軸から 50mrad 以上大きく外した時の陽電子生成と比較すると約 5 倍の増大であることが分かった。これは、1GeV 以下の電子を用いた場合に較べると 2 ~ 3 倍の増大率の上昇であった。今後は、陽電子の生成数の絶対値を測ることが出来るよう測定法の改善を行って実験を継続する。

### (4) 回折放射によるビーム診断法の開発

将来のリニアコライダーや FEL の開発のためにはより高品質の電子ビームが求められており、遷移放射光 (OTR) による電子ビームの計測にとどまらず、よりすぐれた非破壊的な電子ビーム診断法の開発が必要である。本研究は、回折放射光 (ODR) を計測することによる電子ビームの非破壊診断法の開発を行うことを目的とする。ODR は荷電粒子が真空中で薄い導体標的の近傍を通過する際に発生する。ビームは標的の近傍を通過するのであるから、OTR の生成のようなビームに対する破壊的な影響は全く無い。

ODR の基本的な特性を測定するために、KEK-ATF の電子ビームを用いて予備的な実験を行った。導体標的の位置制御装置を製作し、標的位置制御の測定を行った。下流に設置してある線検出器で線を計数しながら標的位置を変化させて測定を行い、標的の位置設定精度として約 5 ミクロンを得た。今後は、光学系の調整と校正のために OTR を計測する。良く知られている OTR の特性から、計測システムの角度やエネルギーの分解能を確認することができる。さらに、同じ光学系、計測システムを用いて ODR の精密測定ための準備を行うことにしている。

## 2) 陽電子科学の推進

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

### (1) ポジトロニウムのレーザー冷却

ボーズアインシュタイン凝縮(以下 BEC と略す)は、すべての原子が最低の量子状態に落ち込むという現象で、今から 70 年前アインシュタインによって予言された。電子・陽電子の束縛状態としての「ポジトロニウム(Ps)」は、あらゆる原子の中でもっとも質量の小さいエグゾティック・アトムであり、したがって、ド・ブROI波長が長いために、通常原子に比べてはるかに高い温度で凝縮を起こす。しかし、Ps の寿命はスピン三重項(オルソポジトロニウム)で 142ns と短く、急速に冷却しなければならないという技術的な困難が伴う。我々は、Ps による BEC 生成のための基礎研究として、レーザー冷却法の開発を進めてきた。これは、レーザーによる Ps の  $1s \rightarrow 2p$  励起を利用して、寿命程度の時間内に Ps を 1K 以下まで冷却する手法である。

Ps 生成には、すでに実用化されている陽電子ビーム生成装置からの陽電子ビームを利用することとし、長パルスレーザー(Cr:LiSAF)の開発を行った。これは、Ps 寿命程度の長いパルス幅(160nsec)、ドップラー補償のための広いバンド幅(140pm)、60mJ のエネルギー、繰り返しが 25Hz という、特殊なレーザーである。レーザー冷却で重要なことは、生成直後の Ps のエネルギーが低いこと、および、効率良く標的 surface から引き出すことである。われわれは、熱化した Ps に注目し、その生成率を確認するために、飛行時間法測定装置を製作し 30meV(室温に相当)ほどのエネルギーをもつ超低速 Ps の生成実験を行った。ターゲット(Mo)を、1200 度 C まで過熱し、熱化陽電子の生成率の向上を観測するとともに、高温におけるオルソ Ps の異常発生を観測し、その確認を進めている。

### (2) 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  $\alpha^7$  と  $\alpha^8$  の高次 QED 過程の検証を目的としている。基底状態のポジトロニウムのハイパーファインエネルギー差に於いて 6 の QED 計算値が実験値と 3 標準偏差で一致しないとの報告がある。ポジトロニウムの 4 光子、5 光子崩壊過程の我々の測定結果をさらに高統計且つ高 S/N で測定を行う為の準備研究を行った。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の開発を行った。その結果、20% の高効率で  $^{22}\text{Na}$  放射線源で発生した陽電子がターゲットへ導かれた。ターゲット入射前に陽電子の通過時間信号を得る為の薄いプラスチックシンチレータによる弱い光を検出するトリガーカウンター系を製作した。

### 3) 電子-陽子衝突型加速器 HERA による ZEUS 国際共同実験

ドイツ電子シンクロトロン研究所(DESY)の電子-陽子衝突型加速器(HERA)は 2000-2001 年にかけて次のような大幅な性能向上を行っている；

- 衝突点を改造して輝度を現在の 5 ~ 7 倍に上げる
- 電子または陽電子ビームを縦偏極させる

HERA の性能向上によって、5 年間で電子/陽電子と、偏極度 70% で右巻きと左巻き、の全ての組み合わせで、それぞれ約  $100\text{pb}^{-1}$  の積算ルミノシティに相当する衝突データが集積できる。2000 年以降の HERA の性能アップで期待されるルミノシティの増強に加え、縦偏極した電子/陽電子と陽子の衝突データを用いて、電弱相互作用の精密測定を行うことができる。このような研究のためには電子ビームの偏極度を 2% 以下の精度で決定しなければならない。そのために本研究では、偏極度測定装置の光子カロリメータの前面に位置感応型の光子検出器を設置する。検出器が設置される場所が HERA の周回リング・トンネルの内部であるため強いシンクロトロン

放射を浴びることから、検出器素材として高い放射線耐性をもつシリコンマイクロストリップ素子を用いる。さらに放射線損傷によりシリコンマイクロストリップ検出器の位置情報に歪みが生じた場合、それを検知し、位置情報を校正するための手段として、シンチレーションファイバーを用いたトリガーシステムを設置する。

2000年8月にHERAのトンネルで、偏極度測定装置の全面にシンチレーションファイバーを用いたトリガーカウンターとシリコンマイクロストリップ検出器を置き、実際にHERAが運転しているもとの検出器の初期テストを行った。本テストのためにプロトタイプ検出器を製作した。データ解析の結果あきらかになった問題点を解明して、2001年2月にDESYの電子シンクロトロンによる電子ビームを用いて再度ビームテストを行った。改善されたシンチレーションファイバーを用いたトリガーカウンターとマイクロストリップ検出器によりデータを収集して解析し、トリガーカウンターの位置精度は44ミクロンであった。これはシリコンマイクロストリップ検出器の位置情報を校正するのに十分な精度である。また、トリガーカウンターとシリコンマイクロストリップ検出器による位置データおよび光子カロリメータの位置情報との間に期待通りの相関が見られた。このテストの結果、トリガーカウンターとシリコンマイクロストリップ検出器を含めた偏極度測定装置全体の性能が計画されたとうりであることが確認できた。今後は本実験に向けた装置の製作を行う。

#### 4) メカノ核反応

重水素ガス雰囲気中に於ける圧電物質リチウムニオベートの粉碎過程での微量中性子発生実験をバックグラウンドの低い横須賀市長坂の立教大学原子力研究所地下実験室で行った。統計量は全く不十分で更なる実験が必須であるが、以前の東京大学宇宙線研究所鋸山微弱放射能測定施設の地下実験室の中性子発生量と矛盾しない結果が得られつつある。

#### 5) 超高エネルギーニュートリノ検出器の基礎研究

活動銀河核等から放出されると予想されている超高エネルギーニュートリノ ( $10^{15}$  電子ボルト以上) を検出することで、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109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可能性がある。もしそう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。

自然に存在する電波に対して透明度の良い岩塩鉱を利用する為に、世界数ヶ所の岩塩鉱調査を行い、岩塩試料を入手した。撮動空洞共振器法と基準金属板自由空間法により吸収長測定を行った。その結果、良好な岩塩試料に於いては100MHzで300mの吸収長得られ、岩塩鉱が超高エネルギーニュートリノ検出器の電波伝播媒質としての可能性が示された。一方、アスカラヤン効果を確かめる為に、高エネルギー電子加速器ビームを岩塩に照射した時の電波検出の予備実験を行った。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

K. Dobashi, T. Hirose, t. kobuku, T. Kumita, Y. Kurihara, T. Muto, T. Omori, T. Okugi, J. Urakawa: Generation of positron via pair creation from Compton scattered gamma-rays, Nucl. Inst. & Meth. Phys. Res. A 437(1999)169

T.Kumita, M.Chiba, R.Hamatsu, M.Hirose, T.Hirose, M.Irako, N.kawasaki, J.Yang: Design of a polarimeter for slow e+ beams, Nucl. Instr. Meth. A 440 (2000) 172-180

H. Iijima. T. Hirose, M. Irako, T. Kumita et al.: Laser cooling suystem of ortho-positronium, Nucl. Inst. & Meth. Phys. Res. A 455 (2000)104-108

T.Okugi, H.Hayano, K.Kubo, T.Naito, N.Terunuma, J.Urakawa, T.Hirose, F. Zimmermann and T. Raubenheimer: Evaluation of vertical emittance in KEK-ATF by utilizing lifetime measurement, Nucl. Inst. & Meth. Phys. Res. A 455(2000) 207-212

S. Kashiwagi, M. Washio, T. Kobuki, R. Kuroda, I. Ben-Zvi, I.V. Pogorelski, K. Kushe, J. Skaritka, V. Yakimenko, X.J. Wang, T. Hirose, T. Muto, K. Dobashi, J. Urakawa, T. Omori, T. Okugi, A. Tsunemi, D. Cline, T.Liu, and P. He: Observation of high intensity X-rays in inverse Compton scattering experiment, Nucl. Inst. & Meth. Phys. Res. A. 455(2000)36

K. Dobashi, A. Higurashi, T. Hirose, t. kobuku, T. Kumita, Y. Kurihara, T. Muto, T. Omori, T. Okugi, J. Urakawa and M. Washio: Design of polarized positron generation system, Nucl. Inst. & Meth. Phys. Res. A. 455(2000)32

I. V. Pogorelski, I. Ben-Zvi, X.J. Wang and T. Hirose: Femtosecond laser synchrotron sources based on Compton scattering in plasma channels, Nucl. Inst. & Meth. Phys. Res. A. 455(2000)176

T. Hirose: Polarized positron source for the future linear collider, JLC, Nucl. Inst. & Meth. Phys. Res. A. 455(2000)15

I. V. Pogorelski, I. Ben-Zvi, T. Hirose et al.: Demonstaration of  $8 \times 10^{18}$  photons/second peaked at 1.8 A in relativistic Thomson scattering experiment, Phys.Rev. ST Accel. Beams 3-090702 (2000)1-8

VENUS Collaboration, M.Chiba, T.Hirose, E.K.Matsuda, et al.: Search of  $J/\psi$  production in the Two-photon Process at TRISTAN, Phys. Lett. B501 (2001) 183-190

M. Chiba, T. Fujitani, J. Iwahori, M. Kawaguti, M. Kobayashi, S. Kurokawa, Y. Nagashima, T. Omori, S. Sugimoto, M. Takasaki, F. Takeuchi, Y. Yamaguchi and H. Yoshida, Antiproton-nucleon Annihilation into  $\pi^0 M$  and  $\eta M$  with  $M=\eta, \omega, \rho$ , and  $\pi$  in Antiproton-deuterium annihilation at rest, Jour. Phys. Soc. of Japan 69: 1356-1365, 2000.

M. Andreyashkin, M. Inoue, H. Hakagawa, K. Yoshida, H. Okuno, R. Hamatsu, H. Kojima, M. Masuyama, T. Miyakawa, K. Umemori, A. Potylitsin, I Vnukov, Y. Takashima, S. Anami, A. Enomoto, K. Furukawa, T. Kamitani, Y. Ogawa, S. Ohsawa: Enhancement of the characteristic X-ray yield from oriented crystal irradiated by high energy electrons, Nucl. Inst. and Methods in Phys. Res. B173 (2001) 142-148

ZEUS Collaboration, J. Breitweg et al.: Measurement of dijet cross sections for events with a leading neutron in photoproduction at HERA, Nucl. Physics B596 (2001) 3-29

ZEUS Collaboration, J. Breitweg et al.: Measurement of  $\omega$  electroproduction at HERA, Phys. Letters B487 (2000) 3-4

ZEUS Collaboration, J. Breitweg et al.: Measurement of the proton structure function  $F_2$  at very low  $Q^2$  at HERA, Phys. Letters B487 (2000) 1-2

ZEUS Collaboration, J. Breitweg et al.: Search for resonances decaying to  $e^+$ -jet in  $e^+p$  interactions at HERA, The European Phys. Jour. C16 (2000) 253-262

ZEUS Collaboration, J. Breitweg et al.: Measurement of diffractive photoproduction of vector mesons at large momentum transfer at HERA, The European Phys. Jour. C14 (2000) 213-238

## 2) 国際会議報告

T. Hirose: Generation of polarized positrons, Proc. of Int. Conf. on Super Strong Field Laser Interaction, "Laser '99" (Quebec, Canada, December 13-17, 1999), (2000)294-299

## 3) 学会講演

日本物理学会第55回年次大会(新潟大学)2000年9月22日~9月25日

陽電子パンチビームによる熱化ポジトロニウムの生成

和田数幸, 阿曾沼孝仁, 飯島北斗, 五十子満大, 門屋謙太郎, 汲田哲郎, 笹原和俊, 広瀨立成, 松本文平, N.N.Mondal

静磁場を利用した陽電子蓄積型パルス化装置の開発 IV

阿曾沼孝仁, 飯島北斗, 五十子満大, 門屋謙太郎, 汲田哲郎, 笹原和俊, 広瀨立成, 松本文平, 和田数幸, N.N.Mondal

JLC 偏極の為の陽電子開発 I-レーザーコンプトン実験の概要とレーザー装置-

酒井いずみ, 広瀨立成, 土橋克広, 福田将史, 神谷好郎, 鷲尾方一, 日暮愛子, 小吹智章, 大島崇, 青木哲, 清川順治, 奥木敏行, 栗原良将, 大森恒彦

JLC の為の偏極陽電子開発 II-ビーム光学による電子ビームの最適化-

日暮愛子, 広瀨立成, 土橋克広, 酒井いずみ, 福田将史, 神谷好郎, 鷲尾方一, 小吹智章, 大島崇, 青木哲, 浦川順治, 奥木敏行, 栗原良将, 大森恒彦

JLC の為の偏極陽電子開発 III -コンプトン散乱ファンマ線の測定-

福田将史, 広瀨立成, 土橋克広, 酒井いずみ, 神谷好郎, 鷲尾方一, 日暮愛子, 小吹智章, 大島崇, 青木哲, 浦川順治, 奥木敏行, 栗原良将, 大森恒彦

JLC の為の偏極陽電子開発 IV-ルミノシティ計算のモデルと予想値, 将来計画-

土橋克広, 広瀬立成, 酒井いずみ, 福田将史, 神谷好郎, 鷲尾方一, 日暮愛子, 小吹智章, 大島崇, 青木哲, 浦川順治, 奥木敏行, 栗原良将, 大森恒彦

岩塩を用いた超高エネルギーニュートリノ検出器の基礎研究

千葉雅美, 安田修, 西村拓郎, 上條敏生, Athar Husain, 犬塚将英, 池田真帆, 川木美穂

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

レーザー・ビーム散乱における非線型効果の検証

神谷好郎, 広瀬立成, 汲田哲郎, 浦川順治, 横谷馨, 大森恒彦, 柏木茂, 鷲尾方一, Igor Pogorelsky, Ilan Ben - Zvi, Karl Kusche, Vitaly Yaklmenko

タンゲステン単結晶を用いた陽電子源の開発

笹原和俊, 穴見昌三, 榎本収志, 古川和朗, 柿原和久, 紙谷孫哉, 小川雄二郎, 大沢哲, 大越隆夫, 諏訪田剛, 奥野英城, 浜津良輔, 梅森健成, 藤田貴弘, 吉田勝英, V. Abably, A.P. Potylitsin, I.E. Vnuov

電子・陽電子多重光子消滅実験用永久磁石陽電子輸送におけるトリガーカウンターシステム

津川天祐, 千葉雅美, 西村拓郎, 尾形亮助

回折輻射による低エミッタンスビーム測定

武藤俊哉, 浜津良輔, 広瀬立成, 浦川順治, 奥木敏行, 久保浄, 栗木雅夫, 黒田茂, 照沼信浩, 内藤孝, 早野仁司, A. Potylitsyn, G. Naumenko, P. Karataev, N. Potylitsyna, I.E. Vunkov

JLC の為の偏極陽電子開発 V -コンプトン散乱ガンマ線の生成実験と将来計画-

酒井いずみ, 広瀬立成, 土橋克広, 福田将史, 鷲尾方一, 日暮愛子, 青木哲, 飯村隆志, 浦川順治, 大森恒彦, 栗原良将, 奥木敏行

JLC の為の偏極陽電子開発 VI -ビーム光学による電子ビームの最適化-

日暮愛子, 広瀬立成, 土橋克広, 酒井いずみ, 福田将史, 鷲尾方一, 青木哲, 飯村隆志, 浦川順治, 大森恒彦, 栗原良将, 奥木敏行

JLC の為の偏極陽電子開発 VII -偏極度測定装置の開発-

福田将史, 広瀬立成, 土橋克広, 酒井いずみ, 鷲尾方一, 日暮愛子, 青木哲, 飯村隆志, 浦川順治, 大森恒彦, 栗原良将, 奥木敏行

JLC のための偏極陽電子開発 VIII -遮蔽効果を考慮した物質中での散乱断面積の解析-

飯村隆志, 近匡, 広瀬立成, 土橋克広, 酒井いずみ, 福田将史, 鷲尾方一, 日暮愛子, 青木哲, 浦川順治, 大森恒彦, 栗原良将, 奥木敏行, LeVietDung

JLC の為の偏極陽電子開発 IX -JLC の為の陽電子ビームキャプチャーの設計-

青木哲, 広瀬立成, 土橋克広, 酒井いずみ, 福田将史, 鷲尾方一, 日暮愛子, 飯村隆志, 浦川順治, 大森恒彦, 栗原良将, 奥木敏行

Weak laser propagation in plasma channel

D.G.Lee, 広瀬立成, 横谷馨

オルソポジトロニウムのレーザー冷却1：モンテカルロシミュレーションによるレーザー冷却システムの設計

飯島北斗，阿曾沼孝仁，五十子満大，梶田雅稔，門屋謙太郎，汲田哲郎，広瀬立成，松本文平，藪博之，和田数幸

オルソポジトロニウムのレーザー冷却2：低速陽電子ビームラインの開発

松本文平，阿曾沼孝仁，飯島北斗，五十子満大，門屋謙太郎，汲田哲郎，広瀬立成，和田数幸，N.N.Mondal

オルソポジトロニウムのレーザー冷却3：陽電子蓄積型パルス化装置の開発

阿曾沼孝仁，飯島北斗，五十子満大，門屋謙太郎，汲田哲郎，広瀬立成，松本文平，和田数幸

オルソポジトロニウムのレーザー冷却4：Time-Of-Flight 法による熱脱離-ポジトロニウムの速度測定-

門屋謙太郎，松本文平，阿曾沼孝仁，飯島北斗，五十子満大，汲田哲郎，広瀬立成，和田数幸，N.N.Mondal

オルソポジトロニウムのレーザー冷却5：長パルス・レーザーシステムの開発

和田数幸，阿曾沼孝仁，飯島北斗，五十子満大，門屋謙太郎，汲田哲郎，小林克行，広瀬立成，松本文平

第37回理工学における同位元素研究発表会（日本青年館）2000年7月3日～7月5日

都立大学における低速陽電子ビームラインの現状

門屋謙太郎，広瀬立成，五十子満大，汲田哲郎，飯島北斗，松澤邦裕，阿曾沼孝仁，和田数幸

第37回理工学における同位元素研究発表会（日本青年館），2000年7月5日

重水素ガス中での圧電物質破壊における微量中性子の測定

伊藤理恵子，内海倫明，石井達也，浅沼寛，荒巻勇人，榎本泰久，大久保賢，千葉雅美，藤井政俊，福田将史，白川利明，白石文夫

#### 国際会議

M. Chiba, T. Kamijo, M. Kawaki, A. Fusain, M. Inuzuka, M. Ikeda, O. Yasuda, Study of Salt Neutrino Detector, RADHEP2000, First International Workshop on Radio Detection of High-Energy Particles, UCLA Faculty Center, University of California, Los Angeles, November 16-18, 2000.

#### 4) 学会誌等

広瀬立成：国際会議報告「レーザー・ビーム相互作用における新しい展望—レーザー・コンプトン散乱の基礎的課題と応用—」，日本物理学会誌 55（2000）216-217

#### 5) 著書

広瀬立成：最新情報・用語時点「データパル 2000」：(小学館)；分担執筆

# 宇宙物理実験研究室

## 1. 研究活動の概要

2000年2月の打ち上げに失敗したX線天文衛星ASTRO-Eは、2005年初頭の打ち上げを目指して再スタートすることが正式に決定された。一方1993年に打ち上げられた「あすか」は起動高度の低下に伴い2000年7月に姿勢制御が不調となり観測機器を停止、2001年3月に地球大気に再突入し8年におよぶ寿命を終えた。当研究室が開発に参加した撮像型蛍光比例計数管 (GIS: Gas Imaging Spectrometer) 2台は、全く性能を劣化させることなく動作を続けた。これは軌道上での性能劣化が深刻なCCDと対比すべきGISの大きな特徴である。当研究室は、「あすか」のデータ解析を進め、一般公募を開始しているChandra、XMM-Newtonなどの衛星への観測提案を行った。実験では、宇宙研との共同によるTES型マイクロカロリメータの開発、新しい冷凍機材料の開発、ASTRO-E II へ向けたフィルターホイールの検討などを始めた。

### 1) 「あすか」による銀河・銀河団の観測

「あすか」による銀河団の温度分布、重元素分布のマッピング観測の解析を、ここ数年都立大が中心となって進めている。昨年度のVirgo Clusterの広域マッピングの解析に続き、今年度はA1060, AWM 7, Cen cluster, Perseus cluster の4銀河団の温度分布を詳細に解析し、その結果は古庄の博士論文としてまとめられた。A1060とAWM 7が比較的等温性の良い分布を示すのに比べ、CenおよびPerseusでは顕著な温度分布が見られ、その全貌が今回始めて示された。Cen clusterは中心からやや南東領域に直径300 kpcほどの高温領域があることが知られていたが、中心の低温成分を差し引いた上で銀河団全体の温度分布を作ったところ、高温領域は銀河団中心を含むはるかに広い範囲を覆うことがわかった。一方Perseusでは、中心から東に半径1 Mpcにも及ぶ巨大な低温領域があり、それを取り巻くようにリング状の高温領域が存在する。CenもPerseusもサブクラスターと見られる領域を中心に温度構造が広がっており、サブクラスターの落ち込みによって周囲のガスが衝撃波加熱されたことを強く示唆するものである。銀河団が成長する過程で、このような銀河団同士の衝突・合体が起き、衝撃波による加熱が銀河団の広い領域で発生したことを観測から裏付ける結果といえる。

なお、A1060についてはChandraの観測が、AWM 7についてはXMM-Newtonの観測が都立大グループをPIとして採択されており、数ヶ月のうちに実施される予定である。

### 2) 「あすか」によるX線背景放射の観測

Lockman hole領域の260 ksecにおよぶ長時間観測データと、ROSATディープサーベイの結果とを比較し、2-10 keV領域でのX線スペクトルが $L_X$ や $z$ とともにどのように変化するかを調べた。その結果、2型の活動銀河 (AGN) は1型よりも硬いスペクトルを示し、 $N_H = 10^{22-23} \text{ cm}^{-2}$ の吸収に対応すること、 $3 \times 10^{-14} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (2-7 keV) のフラックスでは背景放射への2型AGNの寄与は半分以上であること、また $z = 1 - 2$ の範囲ではX線光度が $3 \times 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$ 以上の2型AGNの数は1型に比べ有意に少ないことなどが新たにわかった。この結果は「あすか」の広域サーベイ観測で得られた結果を支持し、それをさらに暗いソースまで推し進めるもので、 $z = 1 - 2$ における活動銀河の進化のシナリオに新たな制限を与えるものである。

「あすか」の観測したいろいろな空から点源を差し引いて、背景放射の強度とスペクトルがどの程度の非一様性を示すかを調べる研究も始めている。

### 3) 超伝導トンネル接合検出器の開発

将来のX線天文学への応用をめざして、直列接合型の超伝導トンネル接合 (STJ) 検出器の開発実験を開発者・倉門氏の協力を得て進めた。4素子をペアにしてX, Y方向から向かい合わせに配置した素子を用い、 $\alpha$ 線源による一分解能の測定を行った。0.5 mmの間隔を置いて3行3列に9個の穴のあいたコリメータを通して $\alpha$ 線を入射させ、各素子で検出されたパルス時間の遅れを用いて位置情報を求めたところ、9個のピークを明確に分離することができた。X線で位置分解能を出すことはこれからの課題だが、素子の配置や信号読み出しの方法についてはこの方式で満足できることが示された。

### 4) TES カロリメータおよび SQUID の開発

昨年度に引き続き宇宙研、早稲田大学と共同で TES 型カロリメータ (Transition Edge Sensor) の開発を行なった。早稲田大学で電子ビーム蒸着によって製作された 1 mm 角の Ti-Au (100/80 nm) 二層薄膜を温度計とし、X線吸収体を取り付けて測定を行なった。薄膜の超伝導転移温度は約 0.2 K、抵抗変化の勾配を表す  $\alpha$  は 10-20 程度であり、TES 素子としてはまだ改良すべき点の多いものである。X線吸収体として 0.5 mm 角 15  $\mu$ m 厚の Sn をエポキシ接着した。得られた Fe-55 に対するエネルギー分解能 99 eV であり、まだ目標としている数 eV には及んでいない。この結果の解析から素子の  $\alpha$  や転移温度だけでなく、測定系によるノイズの寄与が約 80 eV もあり、分解能を制限する大きな要素であることがわかった。これに対して SQUID アンプを用いることで、信号読み出しに伴うノイズを低減する一方、TES 自身のフォノンノイズを低減するための検討も進めている。TES 素子については、その後  $\alpha$  の大きなものが製作されてきており、今後エネルギー分解能の向上が期待される。また、これと平行して 4 入力 SQUID の試作がセイコーインスツルメントの協力を得て進められた。

### 5) 断熱消磁冷凍機の検討

従来のミョウバン系に変わるより安定な断熱消磁冷凍機材料として、Er<sup>3+</sup> を 30% ドープしたガーネット系の YAG (Yttrium-Aluminium Garnet) をテストした。電子物性研究室の協力を得て、低温化での比熱や磁化の測定を、最大 8 T の磁場のもとで測定したところ、この材料が 0.1 K 程度までは断熱消磁冷凍機として使用可能であることがわかった。ASTRO-E に使用されている鉄ミョウバンに比べると、同じ冷却性能を実現するためには約 7 倍の質量が必要となるが、機械的な安定性や密封容器への封入が不要であることを考えると、今後広い応用範囲が期待される。また Er をドープした素材は、X線や  $\gamma$  線入射による磁化変化を SQUID で検出するマグネティックカロリメータとして応用できる可能性があり、その方向の実験も進めようとしている。

### 6) ASTRO-E II への検討

ASTRO-E II 計画は、2005 年初頭の再打ち上げを目指した開発が、2001 年 4 月より正式にスタートする。都立大グループは主検出器マイクロカロリメータ (XRS) とフィルターホイール (FW) の開発を受け持つ予定であるが、特に FW を利用して、軌道上で XRS のキャリブレーションソースをオンオフすることが新たに要請されている。しかし、単純に FW 上に放射線源を置くと要求される強度が強くなりすぎるため、キャピラリー光学系を利用して、比較的弱い線源からの X 線を XRS 上に就航させる方式を検討している。また、単色の X 線ビームを用いた測定が ASTRO-E II だけでなく検出器開発においても必要となるため、Manson X 線発生装置と二結晶分光器を組み合わせたモノクロメータを製作し、10 eV 以下の単色度の X 線が得られることを確かめた。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

Y. Ueda, Y. Ishisaki, T. Takahashi, K. Makishima, T. Ohashi: The ASCA Medium Sensitivity Survey (the GIS Catalog Project): Source Catalog, *Ap. J. Suppl.* **133** (2001) 1-52.

R. Shibata, K. Matsushita, N. Y. Yamasaki, T. Ohashi, M. Ishida, M., K. Kikuchi, H. Böhringer, H. Matsumoto: Temperature Map of the Virgo Cluster of Galaxies Observed with ASCA, *Ap. J.* **549** (2001) 228-243.

Y. Fukazawa, K. Nakazawa, N. Isobe, K. Makishima, K. Matsushita, T. Ohashi, T. Kamae: Detection of Excess Hard X-Ray Emission from the Group of Galaxies HCG 62, *Ap. J. Letters* **546** (2001) L87-L90.

N. Y. Yamasaki, T. Ishikawa, T. Ohashi: ASCA Observation of the Lyman-Limit Quasar PKS 2145+067, *Publ. Astron. Soc. J.* **52** (2000) 763-767.

K. Matsushita, Y. Ohashi, K. Makishima: Metal Abundances in the Hot Interstellar Medium in Early-Type Galaxies Observed with ASCA, *Publ. Astron. Soc. J.* **52** (2000) 685-710.

T. Furusho, N. Y. Yamasaki, T. Ohashi, Y. Saito, W. Voges: X-Ray Observation of the Lynds 1157 Dark Cloud Region with ASCA, *Publ. Astron. Soc. J.* **52** (2000) 677-684.

R. L. Kelley, M. D. Audley, K. R. Boyce, R. Fujimoto, K. C. Gendreau, Y. Ishisaki, D. McCammon, T. Mihara, K. Mitsuda, S. H. Moseley, D. B. Mott, F. S. Porter, C. K. Stahle, A. E. Szymkowiak: The Microcalorimeter Spectrometer on the ASTRO-E X-Ray Observatory, *Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. A*, **444** (2000) 170-174.

### 2) 国際会議集録

Y. Yokoyama, S. Shoji, Shuichi, K. Mitsuda, R. Fujimoto, T. Miyazaki, T. Oshima, M. Yamazaki, N. Iyomoto, K. Futamoto, Y. Ishizaki, T. Kagei: Improvements of an X-Ray Microcalorimeter for Detecting Cosmic Rays, *SPIE*, **4230** (2000) 58-65.

A. N. Parmar, T. Peacock, M. Bavdaz, G. Hasinger, M. Arnaud, X. Barcons, D. Barret, A. Blanchard, H. Böhringer, M. Cappi, A. Comastri, T. Courvossier, A. C. Fabian, R. Griffiths, P. Malaguti, K. O. Mason, T. Ohashi, F. Paerels, L. Piro, J. Schmitt, M. van der Klis, M. Ward: XEUS - The X-ray Evolving Universe Spectroscopy Mission, "Large Scale Structure in the X-ray Universe", eds. Plionis, M. & Georgantopoulos, I., Atlantisciences, Paris, France (2000) 295-302.

### 3) 学会講演

日本物理学会 2000 年春の分科会 2000 年 3 月 30 日 ~ 4 月 2 日 (近畿大学)

伊藤千枝、藤本弦、宮崎利行、大橋隆哉、山崎典子、石崎欣尚、久志野彰寛、影井智宏、満田和久、藤本龍一、大島泰、山崎正裕、庄子習一、工藤寛之、横山雄一：TES 型 X 線マイクロカロリメータの開発 II - Mo/Au TES の試作とその特性評価 -

日本天文学会 2000 年春季年会 2000 年 3 月 30 日 ~ 4 月 2 日 ( 東京大学 )

柴田 亮、大橋隆哉、山崎典子、松下恭子、他 Virgo Project チーム : 「あすか」衛星による「おとめ座」銀河団の広域マッピング観測

古庄多恵、石崎欣尚、藤本龍一、満田和久、Damian Audley, Keith Gendreau, Richard Kelley, and XRS Team : ASTRO-E 衛星搭載 XRS 検出器の地上較正実験による性能評価 II

山崎典子、古庄多恵、石崎欣尚、大橋隆哉、小川原嘉明、満田和久 : Astro-E 衛星搭載フィルターホイールの現状

電気学会東京支部連合研究会 原子力研究会 「超低温放射線計測技術」 2000 年 9 月 12 日 ( 工学院大学新宿校舎 )

石崎欣尚、山崎典子、大橋隆哉、久志野彰寛、影井智宏、広池哲平、宮崎利行、大島泰、山崎正裕、二元和朗、満田和久、藤本龍一、庄子習一、工藤寛之、横山雄一 : 衛星搭載を目指した TES 型 X 線マイクロカロリメータシステムの開発 II

久志野彰寛、青木勇二、矢沢孝 : 断熱消磁冷凍機への応用を目指した YAG+Er の比熱測定

日本物理学会第 55 回年会 2000 年 9 月 22 日 ~ 25 日 ( 新潟大学 )

石崎欣尚、山崎典子、大橋隆哉、久志野彰寛、影井智宏、広池哲平、宮崎利行、大島泰、山崎正裕、二元和朗、満田和久、藤本龍一、庄子習一、工藤寛之、横山雄一 : TES 型 X 線マイクロカロリメータの開発 III - 開発の現状と展望 - .

影井智宏、大橋隆哉、山崎典子、石崎欣尚、久志野彰寛、広池哲平、満田和久、藤本龍一、宮崎利行、大島泰、山崎正裕、二元和朗、庄子習一、工藤寛之、横山雄一 : TES 型 X 線マイクロカロリメータの開発 IV - 希釈冷凍機内の SQUID 読み出し系構築 - .

久志野彰寛、青木勇二、並木孝洋、石崎欣尚、山崎典子、佐藤英行、大橋隆哉、満田和久、矢沢孝 : 断熱消磁冷凍機への応用を目指した  $Y_{2.1}Er_{0.9}Al_5O_{12}$  の特性評価 .

日本天文学会 2000 年秋季年会 2000 年 10 月 5 日 ~ 7 日 ( 群馬県総合教育センター )

石崎欣尚、影井智宏、大橋隆哉、菊池健一 : 「あすか」衛星 GIS 検出器の軌道上バックグラウンドの推移

山崎正裕、満田和久、藤本龍一、伊予本直子、宮崎利行、大島泰、二元和朗、庄子習一、工藤寛之、横山雄一、大橋隆哉、山崎典子、石崎欣尚、伊藤千枝、藤本弦、影井智宏 : TES 型 X 線マイクロカロリメータと SQUID アンプ読みだし系の開発

松下恭子、大橋隆哉、牧島一夫、中澤和洋、磯部直樹、深沢泰司 : 銀河群からの硬 X 線成分の検証

古庄多恵、影井智宏、石崎欣尚、山崎典子、大橋隆哉、柴田亮、江澤元 : 「あすか」による A1060 銀河団のマッピング観測

久志野彰寛、山崎典子、大橋隆哉、柴田亮、菊池健一：Fossil Galaxy Group – RX J1340.6+4018  
の ASCA による観測

超高エネルギーガンマ線天体研究会 2000年11月30日(東京大学宇宙線研究所)

山崎典子：The Non-Thermal Emission from the Clusters of Galaxies

元素の起源と初期宇宙・銀河の進化研究会 2001年1月22日～24日(上智大学)

大橋隆哉：銀河・銀河団のX線元素分析

### 国際会議

HEAD AAS, Hawaii, USA, Nov. 5–10, 2000

M. D. Audley, K.A. Arnaud, K.C. Gendreau, K.R. Boyce, C. M. Fleetwood, R. L. Kelley, R. A. Keski-Kuha, F.S. Porter, C. K. Stahle, A. E. Szymkowiak, J. L. Tveekrem, R. Fujimoto, K. Mitsuda, Y. Ishisaki, T. Mihara: The ASTRO-E/XRS Blocking Filter Calibration

X-ray Astronomy 2000, Palermo, Italy, Sept. 4–8, 2000

R. Shibata, M. Ishida, K. Matsushita, H. Boehringer, N. Y. Yamasaki, T. Ohashi, K. Kikuchi, H. Matsumoto: Distributions of the Temperature and Metal Abundance in the Virgo Cluster of Galaxies

New Century of X-ray Astronomy, Yokohama, Japan, March 6–8, 2001

T. Ohashi, T. Furusho, N. Y. Yamasaki, R. Shibata, T. Kagei, Y. Ishisaki, K. Kikuchi, H. Ezawa, Y. Ikebe: Cluster Evolution Implied from the Temperature and Metallicity Distribution Observed with ASCA

M. D. Audley, K. A. Arnaud, K. C. Gendreau, K. R. Boyce, C. M. Fleetwood, R. L. Kelly, R. A. Keski-Kuha, F. S. Porter, C.K.Stahle. A. E. Szymkowiak, J. L. Tveekrem, R. Fujimoto, K. Mitsuda, Y. Ishisaki, T. Mihara: The XRS Blocking Filter Calibration

R. Fujimoto, K. Mitsuda, N. Iyomoto, M. D. Audley, T. Miyazaki, T. Oshima, M. Yamazaki, K. Futamoto, Y. Ishisaki, N. Yamasaki, T. Ohashi, T. Kagei, A. Kushino, T. Hiroike, S. Shoji, H. Kudo, Y. Yokoyama: Status of X-Ray Microcalorimeter Development at ISAS

T. Furusho, N. Y. Yamasaki, T. Ohashi, R. Shibata, T. Kagei, Y. Ishisaki, K. Kikuchi, H. Ezawa, Y. Ikebe: ASCA Temperature Maps of Four Clusters of Galaxies: Abell 1060, AWM 7, the Centaurus Cluster, and the Perseus Cluster

Y. Ishisaki, Y. Ueda, A. Yamashita, T. Ohashi, I. Lehmann, G. Hasinger: ASCA Deep Survey of the Lockman Field

Y. Ishisaki, N. Y. Yamasaki, T. Ohashi, T. Kagei, T. Miyazaki, K. Mitsuda, R. Fujimoto, N. Iyomoto, T. Oshima, M. Yamazaki, K. Futamoto, D. Audley, S. Shoji, H. Kudo, Y. Yokoyama: Development of a TES Microcalorimeter System for the Future X-Ray Mission

A. Kushino, Y. Ishisaki, Y. Ueda, T. Ohashi: Investigation of Large-scale Cosmic X-Ray Background with ASCA

K. Makishima, Y. Fukazawa, Y. Ikebe, K. Matsushita, K. Nakazawa, T. Ohashi, T. Tamura, H. Xu: Physics of the Central Regions of Clusters of Galaxies

T. Miyazaki, M. Yamazaki, K. Futamoto, K. Mitsuda, R. Fujimoto, N. Iyomoto, T. Oshima, D. Audley, Y. Ishisaki, N. Yamasaki, T. Ohashi, T. Kagei, S. Shoji, H. KUdo, Y. Yokoyama: AC Calorimeter Bridge; a New Multi-Pixel Readout Method for TES Calorimeter Arrays

T. Oshima, M. Yamazaki, K. Mitsuda, R. Fujimoto, N. Iyomoto, M. D. Audley, T. Miyazaki, K. Futamoto, Y. Ishisaki, N. Yamasaki, T. Ohashi, T. Kagei, A. Kushino, T. Hiroike, S. Shoji, H. Kudo, Y. Yokoyama: Performance of SII SQUID Amplifiers

M. Tashiro, K. Ebisawa, T. Ezoe, Y. Fukazawa, T. Furusho, E. Idesawa, M. Ishida, Y. Ishisaki, H. Kubo, A. Kubota, K. Makishima, T. Ohashi, N. Y. Yamasaki, T. Yaqoob, ASCA GOF, and the ASCA GIS Team: Nearly-Final In-Orbit Calibration of the GIS onboard ASCA

Y. Ueda, M. Akiyama, Y. Ishisaki, K. Makishima, R. Mushotzky, T. Oahshi, K. Ihta, T. Takahashi, W. Watanabe, T. Yamada: The ASCA Medium Sensitivity Survey: Source Catalog and Optical Identification

S. Watanabe, T. Takahashi, Y. Ueda, Y. Ishisaki, M. Akiyama, T. Yamada, K. Ohta and R. Mushotzky: Chandra Observations of Hard X-Ray Sources Discovered with ASCA

N. Y. Yamasaki, A. Kushino, Y. Aoki, Y. Ishisaki, T. Ohashi, K. Mitsuda: Measurement of the Specific heat of Er-Doped YAG and Its Application to the X-Ray Astronomy

Japan/Germany Workshop on Clusters of Galaxies, Yokohama, Japan, March 5, 2001

T. Furusho: Temperature Structures in Bright Near-by Clusters

The XXIst Moriond Astrophysics Meeting, Les Arcs, France, March 10–17, 2001

T. Ohashi: The ASTRO-E II Mission (Invited Talk)

# 原子物理学研究室

## 1. 研究活動の概要

平成 12 年 10 月に筑波大学助教授より東俊行氏を本研究室助教授に迎え、本研究室の研究領域がさらに拡がり、以下に示す研究活動が行われた。

### 1) 極低温ヘリウム気体中におけるイオン移動度の測定

液体ヘリウムあるいは液体窒素によって冷却できるイオン入射型移動管質量分析装置を開発し、気体温度 2 K, 4.3 K および 77 K におけるヘリウム気体中でのイオン移動度の測定を行っている。平成 12 年度は 11 年度に引き続き主に  $O_2^+$  イオンについて測定を行った。 $O_2^+$  の基底状態は  $X^2\Pi_g$  であるが  $a^4\Pi_u$  という準安定励起状態が存在する。イオン移動度はイオンと気体分子との間の相互作用ポテンシャルによって決定されるので、当然のことながら電子状態にも依存すると考えられる。77 K における測定では弱電場領域において二つの電子状態の移動度が明瞭に分離して観測された。直感的には電子雲の広がりの大きな準安定状態の方が大きな衝突断面積を持つために移動度は小さくなると考えられる。このことを実験的に確かめるため、電子衝撃型イオン源に Ar ガスを導入し電荷移行反応によって準安定状態を失活させることで検出されるイオンの電子状態を特定する方法を考案した。その結果、当初の予想通りに準安定状態の移動度の方が基底状態よりも小さいことが明らかとなった。4.3 K での測定でも電子状態による分裂が観測されたが、移動度の気体温度に対する依存性は簡単には理解することができなかった。そこで現在、イオン種を他の分子イオンに変えて、この新たな課題に取り組んでいる。また、平成 12 年度はヒーターを用いることで気体温度を制御することを試みた。液体ヘリウム冷却時に 10 K、液体窒素冷却時に 90 K まで温度を上げることに成功した。今後は 2 K から 100 K までの任意温度における測定を行っていく予定である。

### 2) 相対論的多価イオンによる干渉性共鳴励起の研究

核子あたり数 100 keV 以上の高速イオンが、単結晶中を結晶軸あるいは結晶面にほぼ平行に入射した場合、通過イオンは、原子列や原子面の原子と衝突することなく、その隙間を進む。これは一般にチャネリングと呼ばれている。単結晶中をチャネリングする高速のイオンは、さらに結晶の周期ポテンシャルを振動磁場（疑似光子）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干渉性共鳴励起 (Resonant Coherent Excitation: RCE) と呼ばれている。我々は、放射線医学研究所 HIMAC 加速器において、水素様（軌道電子を原子核の周りに一つ持つ）核子あたり数 100 MeV すなわち相対論的エネルギーの重イオンによる RCE 実験を、結晶通過後のイオンの電荷、放出 2 次電子および脱励起 X 線観測を通じて行っている。その結果、最近、高いコヒーレンスに基づく狭い共鳴幅や、強い振動電場による大きな共鳴という利点を生かした、精密な原子分光のデータを、次々と供給しはじめている。すなわち、重イオン中の電子準位の、相対論効果に基づく軌道・スピン相互作用や、ラムシフト、結晶内強電場によるシュタルク効果を観測している。平成 12 年度は、これらの結果を踏まえて、原子準位の精密分光を中心に (1)  $n=2$  準位への励起からより高い  $n=3,4,5$  準位への共鳴励起、(2) 軌道電子が 1 個である水素様イオンから 2 個のヘリウム様イオン、3 個のリシウム様イオンの共鳴励起、(3) より重い Fe イオンの共鳴励起実験を行った。

### 3) 相対論的多価イオン衝突による電子放出機構の研究

高速イオン・固体衝突によって放出される、入射イオンと同じ速度で前方に放出される2次電子のエネルギー分布は、カスプ型のピークを形成することが観測され、コンボイ電子と呼ばれている。入射イオンのエネルギーが相対論的な領域では、入射イオンの電子損失(イオン化)の際、飛び出した電子の多くがコンボイ電子とオテ放出され、ヒイオン非平衡電荷状態を反映したイオン化機構の重要な情報を含んでいる。高速重イオンと物質との衝突で生じる2次電子のうち、入射イオンと同じ速度で前方に放出される「コンボイ電子」の相対論的エネルギー領域における生成機構を解明することを目的として、平成12年度は放射線医学研究所 HIMAC 加速器において、(1) 390 MeV/u Ar<sup>17+</sup> (H-like) を炭素薄膜に入射した際、および(2) 460 MeV/u Fe<sup>25+</sup> (H-like), Fe<sup>24+</sup> (He-like), Fe<sup>23+</sup> (Li-like) イオンを炭素薄膜に入射した際のコンボイ電子エネルギー幅の膜厚依存性測定を行った。その結果、コンボイ電子のエネルギー分布幅が、基底状態あるいは励起状態の各準位のどこからイオン化した結果生成されるかというイオン化機構の重要な情報を含んでいることが、判明した。

### 4) 低エネルギー多価イオンの電荷移行反応断面積の絶対値測定

本研究室で独自に開発した小型多価イオン源(Mini-EBIS)と高周波技術を応用したイオンビームガイド(OPIG)を組み合わせた実験技術は、測定の困難と言われた1keV以下の低エネルギー領域における低エネルギー多価イオン衝突実験を可能にし、これまでに多数の原子分子を標的とする多価イオン衝突系における一電子および多電子捕獲過程の反応断面積の絶対値を系統的に測定することを継続している。蓄積された断面積データは原子物理および関連分野の基礎データとして利用され、とりわけ核融合プラズマ中の不純物イオンの挙動を把握するための基礎データとして重要視されている。平成11年度には、国連のIAEAが主催する国際プロジェクトの一員として、核融合プラズマに最も関連のあるC<sup>q+</sup>, N<sup>q+</sup>, O<sup>q+</sup> - He, H<sub>2</sub> 衝突系(q=2-6)における一電子および二電子移行反応断面積の系統的測定を実施した。

### 5) 低エネルギー多価イオン衝突における分子崩壊過程の研究

多価イオン・分子衝突において、一電子および多電子捕獲過程が起こると電子を引き抜かれた分子は崩壊する。この多価イオン衝突における分子の崩壊過程は極めて複雑で、今日まで理論的にも実験的にも未だ充分な解明がなされていない。このため、衝突後の多価イオンの電荷状態やエネルギー状態を分析できるエネルギーアナライザーと分子崩壊によるフラグメントの質量や電価や運動エネルギーを分析する一対のイオンビームガイドを配置した三粒子同時計測用実験装置を開発し、低速多価イオンと二原子分子衝突における衝突後の多価イオンおよび標的分子のフラグメント対の全粒子を同時計測して複雑な分子崩壊過程を詳細識別する新しい実験法を確立させた。平成11年度にこの三粒子同時計測新実験法を用いて、<sup>3</sup>He<sup>2+</sup>-CO, Kr<sup>8+</sup>-CO, N<sub>2</sub> 衝突系における複雑な分子崩壊の詳細な反応過程が解明され、<sup>3</sup>He<sup>2+</sup>-CO 衝突系の二電子捕獲過程では衝突エネルギーの減少に伴い電子を放出する分子の崩壊過程の割合が減少していくが、Kr<sup>8+</sup>-CO, N<sub>2</sub> 衝突系では反対に電子を放出する分子崩壊過程の割合は衝突エネルギーの減少に伴い増大し崩壊過程が複雑化していくなどの興味深い知見や、多価イオン-分子衝突で衝突エネルギーの減少に伴い観測されるフラグメントイオン対ピークが分離するという新現象を発見し、複雑な分子崩壊過程の衝突ダイナミクスを理解するに重要な足掛かりを得た。平成12年度には、複雑な分子崩壊過程における衝突ダイナミクスの解明を目的に、散乱角依存やエネルギー分析を組み合わせた多次元同時

計測技術を導入してインパクトパラメーター依存測定を可能とする実験装置開発と実験技術開発に取り組んだ。

## 6) 多価イオンと物質との相互作用の研究

平成5年度から7年度の三年間にわたって行われた重点領域研究「多価イオン原子物理学」の大きな柱として、14.25 GHzのマイクロ波を用いた電子サイクロトロン共鳴型多価イオン源(ECRIS)が我々の研究室に建設された。この世界最高水準の多価イオン源を用いて、4つの異なる種類の実験的研究が並行して進められている。

### 1) 電子衝突による多価イオンの励起過程の研究

トロイダル型電子エネルギー分析器を独自に開発し、実験的に極めて困難な多価イオンによる電子の微分散乱断面積の測定を行っている。最終的な目標は非弾性衝突過程、すなわち多価イオンの電子励起過程であるが、その準備段階として $\text{Ar}^{7+}$ および $\text{Ar}^{8+}$ に対する相対的な弾性微分散乱断面積の測定に平成11年度に初めて成功した。微分散乱断面積は散乱角度が大きくなるにつれて指数関数的に急激に小さくなるため、大きな散乱角になるほど測定はより困難を極める。平成12年度は同じ衝突系について測定を継続し、散乱角度をこれまでの $84^\circ$ より $105^\circ$ にまで大きく広げることができた。理論計算によれば大きな角度では古典的なRutherford公式とのずれが顕著になると予想されている。我々の測定結果にも古典論では説明できない構造が現れており、現在、理論研究者の協力を得て検討を加えているところである。

### 2) 多価イオンと分子の衝突によるクーロン爆発の研究

多価イオンによって瞬間的に多数の電子を奪われた分子は、中性の時の分子構造を保ったままで多価の分子イオンとなる。通常、多価分子イオンは極めて不安定であるため、直ちに原子間のクーロン斥力によって爆発的な解離を起こす。従って、この時に全ての解離イオンの運動量ベクトルが測定できれば、逆算によって解離直前の分子構造が判るはずである。平成12年度は標的を $\text{CS}_2$ に変えた測定を行っただけでなく、直径120 mmの大型二次元検出器を開発して解離フラグメントイオンの捕集効率を向上した。また、飛行時間スペクトルのデータ解析アルゴリズムを大幅に改良することにより、2 nsという優れた時間分解能を達成することに成功した。

### 3) 多価イオンの電荷移行反応によって生成した励起状態の分光学的研究

多価イオンと気体分子との衝突における電荷移行反応では多くの場合、移行した電子は多価イオンの外殻軌道に捕獲される。生成された励起状態の磁気副準位分布は電荷移行の反応機構を理解する上で重要である。外部磁場の無い状態ではエネルギーの縮退した磁気副準位を分離することは不可能であるが、放出される発光の偏光度を測定することで、分布に関する情報が得られる。これまでにヘリウム様イオンである $\text{O}^{6+}$ と $\text{N}^{5+}$ を入射イオンとしてHeまたは $\text{H}_2$ との一電子移行反応で生成した $1s^2 3p$ 状態に関する測定を行ってきた。平成12年度は同じ電子配置を持つ $\text{C}^{4+}$ を用いた実験を行った。 $\text{C}^{4+}-\text{H}_2$ の衝突系についてはこれまでに2件の報告があるが、それらの結果は互いに大きく食い違っていた。我々の結果はそのうちの一方に比較的良く一致したが、測定精度は以前のものよりも遙かに高く、従来よりも信頼できる結果と考えられる。

### 4) 多価イオンによる固体表面のスパッタリングの研究

大きな運動エネルギーを持った粒子が固体表面に照射されたときに表面を構成する粒子が叩き出

される現象はスパッタリングと呼ばれている。放出される原子の大部分は電氣的に中性であるが、一部は電荷を持ったイオンとしても放出される。この二次イオンの生成機構は固体表面での素過程として重要と考えられるので、ウィーン・フィルター型速度選別器と静電型エネルギー分析器を組み合わせた二次イオン分析装置を製作して実験を行ってきた。平成12年度は装置に大規模な改造を行い、信頼性のあるデータが得られるように様々な工夫を凝らした装置を開発した。その結果、多価の Ar イオンを Al 多結晶表面に照射した時に放出される  $Al^+$ 、 $Al^{2+}$ 、および  $Al_2^+$  の運動エネルギー分布の測定に成功した。二価イオンに関しては他の報告例も少なく、理論的にもまだ生成機構が明らかではないので、貴重な結果が得られたと考えている。

#### 5) 二次元位置敏感型検出器の開発

バックギャモン・アノードを用いた二次元位置敏感型検出器では、増倍した電子雲を十分な大きさにまで広げる必要がある。ところが磁場中では電子は磁力線に巻き付いて広がらないためにこの方式を用いることはできないと考えられていた。そこで真空中を飛行させて自然に電子雲を広げるのではなく、高抵抗フィルムとアノードを組み合わせて鏡像電荷を利用することで電荷を適当な大きさに拡散させるという新しい方式を開発した。この検出器は外部磁場の影響を受けない上、従来形式のよりもコンパクトで使い勝手が良いので、種々の実験への応用が期待される。

#### 7) 流体系と生物系におけるゆらぎとカオスの実験的研究

##### 1) 水滴落下系のカオス

水道の蛇口から滴り落ちる水滴の落下現象は、カオスを示す低次元力学系の具体例として良く知られている。我々はこれまで、落下間隔の時系列解析から、系のほぼ完全な分岐図を得ている。しかし、この系のカオス的振る舞いの本質は、蛇口にぶら下がった水滴の振動運動にあり、これは落下間隔だけからは知り得ない。そこで、高速ビデオカメラを用いて落下する水滴を撮影し、その画像から水滴の輪郭を抽出し、重心の運動の状態空間軌道を得た。さらに、軌道のポアンカレ断面を解析することによって、実験系としては初めて、この系の複雑で多様な振る舞いを記述する写像関数を得た。この写像関数が単峰であることから、系の振る舞いは複雑であっても、本質的にはロジスティック系の分岐現象に類似することが明らかにされた。

##### 2) 心臓神経系の非線形力学

心臓の拍動は、脳、自律神経およびペースメーカー神経細胞などからなる非線形回路の出力と考えることができる。この回路の力学系としての性質をイセエビ (*Panulirus japonicus*) およびアメリカザリガニ (*Procambarus clarkii*) を用いて実験的に調べた。これまでに、回路の遅延特性を決める重要な要素である神経伝達物質の放出・回収機構を記述する簡単なモデルを構築した。今年度はこのモデルを用いて心拍時系列データの解析を行い、イセエビでは自律神経の心拍制御様式が bi-stable であるのに対し、アメリカザリガニでは、より多様な制御様式が見られることを明らかにした。一方、乱雑な心拍変動が、非線形回路による決定論的なカオスであるか確率論的なものであるかはいまだに結論が出ていない。統計物理理論研究室と共同で、イセエビの心拍変動データを対象として決定論性の解析を行った。まだ解析データ数は少ないが、決定論性は見出されていない。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

H. Tanuma, H. Hidaka, and N. Kobayashi: Swarm study of  $\text{Kr}^{2+}$  ions in helium gas at very low temperature, *The Physics of Electronic and Atomic Collisions* (AIP, 2000) p. 699-703.

H. Tanuma, M. Sakamoto, H. Fujimatsu, and N. Kobayashi: Very low temperature drift tube mass spectrometer, *Rev. Sci. Instrum.* **71** (2000) 2019-2024.

Z. Wang, J. Matsumoto, H. Tanuma, A. Danjo, M. Yoshino, and N. Kobayashi: Differential cross section measurements for elastic scattering of electrons by highly charged argon ions, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **33** (2000) 2629-2640.

H. Tanuma, H. Fujimatsu, and N. Kobayashi: Ion mobility measurements and thermal transpiration effects in helium gas at 4.3 K, *J. Chem. Phys.* **113** (2000) 1738-1744.

H. Tanuma, T. Hayakawa, C. Verzani, H. Kano, H. Watanabe, B. D. DePaola, and N. Kobayashi: Polarization spectroscopy of  $\text{O}^{5+}(1s^23p)$  states produced in the collisions of  $\text{O}^{6+}$  with He and  $\text{H}_2$ , *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **33** (2000) 5091-5098.

T. Ito, Y. Takabayashi, T. Azuma, Y. Yamazaki, K. Komaki, S. Datz, E. Takada, and T. Murakami: De-excitation X-rays from resonant coherently excited 390 MeV/u hydrogen-like Ar ions, *Nucl. Instr. Meth. B* **164-165** (2000) 68-73.

T. Yazawa, T. Katsuyama and K. Kuwasawa: Time-series analysis of intervals of heart beat of Japanese spiny lobster, *Panurilus japonicus*. *Comp. Biochem. Physiol.*, **38** (2000) 127.

### 2) 学会講演

日本物理学会 2000年春の分科会 2000年3月22日～3月25日(関西大学)

金安達夫, 松田杏子, 奥野和彦, 小林信夫, 吉野益弘: 低速  $\text{Kr}^{8+}$  衝突における二原子分子の崩壊過程.

西出龍弘, 北村友和, Firoz Rajgara, 城丸春夫, 阿知波洋次, 小林信夫: 多価イオン衝突による  $\text{CS}_2$  のクーロン爆発.

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

日高宏, 田沼肇, 小林信夫: 電荷移行反応の競争過程としてのヘリウムクラスター生成.

早川雄博, R. A. Lomsadze, C. J. Berzani, 渡辺裕文, 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 II.

石井邦和, 田辺朋拓, R. A. Lomsadze, 奥野和彦: 低エネルギー多価イオンの電荷移行反応 XXI,  $\text{C}^{q+}$  ( $q=2-5$ ) + He,  $\text{H}_2$  衝突系における一電子および二電子捕獲断面積.

増永拓也, 清野健, 駒井美知子, 勝山智男, 淵上信子: 水滴落下系アトラクタにおける見かけ上の多重構造.

第 11 回日本比較生理化学会 2000 年 8 月 3 日 ~ 5 日 (山口大学)

矢澤徹, 勝山智男, 桑沢清明: イセエビ心拍の時系列解析.

原子衝突研究協会第 25 回研究会 2000 年 8 月 29 日 ~ 8 月 31 日

(岡崎国立共同研究機構岡崎コンファレンスセンター)

東俊行, 伊藤高臣, 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: H-like イオン基底状態から  $n=3$  準位への励起.

早川雄博, C. Verzani, R. A. Lomsadze, 渡辺裕文, 田沼肇, 小林信夫: 電荷移行によって生成した励起状態の偏光分光.

石井邦和, Bilgehan Gür, 奥野和彦: 低速 CNO 多価イオン He, H<sub>2</sub> 衝突における一電子および二電子捕獲反応断面積.

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

西出龍弘, 北村友和, Firoz Rajgara, 城丸春夫, 阿知波洋次, 小林信夫: 多価イオン衝突による CS<sub>2</sub> のクーロン爆発の 3 次元速度解析.

比嘉修, 田沼肇, 小林信夫: 多価イオン-固体衝突による二次イオンの運動エネルギー分布の測定.

金安達夫, 松田杏子, Michael Ehrich, 吉野益弘, 奥野和彦: 低速 Kr<sup>8+</sup> 衝突における N<sub>2</sub> 分子の崩壊過程とコリジョンダイナミクス.

神野智史, 日高宏, 田沼肇, 小林信夫: He ガス中における O<sub>2</sub><sup>+</sup> の移動度.

日本物理学会第 55 回年次大会 2000 年 9 月 22 日 ~ 9 月 25 日 (新潟大学)

金安達夫, 松田杏子, Michael Ehrich, 吉野益弘, 奥野和彦: 低速 Kr<sup>8+</sup> 衝突における N<sub>2</sub> 分子の崩壊過程とコリジョンダイナミクス.

遠藤厚身, 石井邦和, 奥野和彦: 低エネルギー多価イオンの電荷移行反応 XXII, N<sup>q+</sup> (q=2-6) + He, H<sub>2</sub> 衝突系における一電子および二電子捕獲断面積.

石井邦和, Bilgehan Gür, 奥野和彦: 低エネルギー多価イオンの電荷移行反応 XXIII, O<sup>q+</sup> (q=2-6) + He, H<sub>2</sub> 衝突系における一電子および二電子捕獲断面積.

早川雄博, 渡辺裕文, 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 III

神野智史, 日高宏, 田沼肇, 小林信夫: ヘリウム気体中における準安定 O<sub>2</sub><sup>+</sup> の移動度.

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

比嘉修, 田沼肇, 小林信夫: 多価イオン-固体衝突による二次イオンの運動エネルギー分布測定.

高林雄一, 伊藤高臣, 東俊行, 小牧研一郎, 山崎泰規, 高田栄一, 村上健: 相対論的重イオンビームによるコンボイ電子生成: 入射イオン電荷数依存性.

伊藤高臣, 高林雄一, 東俊行, 小牧研一郎, 山崎泰規, 高田栄一, 村上健: 相対論的多価イオンの干渉性共鳴励起 II: 高分解能原子分光の可能性.

ミュオン科学 2001 シンポジウム 2001 年 1 月 26 日 (高エネルギー物理学研究所)

東俊行: 大強度ミュオンビームの固体内原子衝突物理における利用.

### 国際会議

DPG spring meeting, (April, Bonn, 2000)

M. Ehrich, T. Kaneyasu, K. Okuno and H. O. Lutz; Fragmentation von zweiatomigen molekülen in strößen mit sehr langsamen, hochgeladenen ionen ( $E < 200$  eV/u).

M. Ehrich, U. Werner, H. O. Lutz, T. Kaneyasu and K. Okuno: Umladungs-prozesse und fragmentation von  $N_2$  in strößen mit langsamen  $Kr^{8+}$  -ionen.

The 10th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions, (August 2000, Berkley)

T. Azuma: Resonant coherent excitation of hydrogen-like Ar ions to the  $n=3$  states, (Invited talk).

T. Kaneyasu, K. Matsuda, M. Ehrich, M. Yoshino, and K. Okuno: Fragmentation of  $N_2$  and post collision effects in slow electron capture collisions of  $Kr^{8+}$  ion below 200 eV/amu (Poster).

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

T. Hayakawa, R. A. Lomsadze, C. Verzani, H. Watanabe, H. Tanuma, B. D. DePaola, and N. Kobayashi: Polarization spectroscopy of  $N^{4+}(1s^23p)$  states produced in collisions of  $N^{5+}(1s^2)$  - He,  $H_2$ , (Poster).

T. Nishide, F. A. Rajgara, T. Kitamura, H. Shiromaru, Y. Achiba, and N. Kobayashi: Dissociation of highly charged  $CS_2$  formed by low energy collisions with HCl, (Poster).

The 2nd IAEA Research Co-ordination Meeting on Charge Exchange Cross Section Data for Fusion Plasma Studies, (September 25-26, 2000, Vienna)

K. Okuno: Charge changing cross sections of multiply charged C, N and O ions colliding with He and  $H_2$  at low energies below 1 keV/amu, (Invited talk).

The fourth Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics,  
(October 12-18, 2000, Taipei)

K. Okuno: Topics of low energy charge transfer reactions in collisions of multiply charged ions with atoms and molecules, (Invited talk).

H. Tanuma, J. Matsumoto, T. Hayakawa, O. Higa K. Fukuda, T. Nishide, T. Kitamura, H. Shiromaru, M. Yoshino and N. Kobayashi: Present status of highly charged ion experiments with ECR ion source at TMU, (Invited talk).

H. Shiromaru, T. Nishide, T. Kitamura, F. A. Rajgara, Y. Achiba and N. Kobayashi: Coulomb explosion imaging study at TMU, (Poster).

Europysics conference, ( February, 2001)

M. Ehrich, U. Werner, H. O. Lutz, T. Kaneyasu and K. Okuno: Polarization of N<sub>2</sub>-molecules in very slow collisions with Kr<sup>8+</sup>-ions.

International Congress of Theoretical and Applied Mechanics,  
(August 27-September 2, 2000, Chicago)

K. Kiyono, T. Katsuyama, T. Masunaga and N. Fuchikami: The dripping faucet as a chaotic dynamical system, (Lecture).

Dynamical Aspect of Complex Systems from cells to brain,  
(November 29-December 1, 2000, Sendai)

T. Katsuyama and T. Yazawa: A heartbeat fluctuation in freely moving spiny lobster; *Panurilus japonicus*, (Poster).

ICAP-2000, International Conference of Atomic Physics, (June 4-9, 2000, Florence)

T. Ito, Y. Takabayashi, T. Azuma, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada, and T. Murakami: Resonant coherent excitation as a high precision spectroscopy of highly charged ions, (Poster).

Special Seminar at Tata-institute of fundamental research,  
(March 20-21, 2001, Mumbai)

T. Azuma: Cancer therapy using heavy ion beams from a synchrotron accelerator in Japan, (Invited talk).

T. Azuma: Resonant coherent excitation of atoms in heavy ion collisions at high energy, (Invited talk).

### 3) 学会誌等

T. Azuma, T. Ito, Y. Takabayashi, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada, and T. Murakami: Resonant coherent excitation of hydrogen-like Ar ions into the  $n=3$  states, *At. Coll. Res. Jpn.* **26** (2000) 16-18.

M. Imai, M. Sataka, S. Kitazawa, K. Kawatsura, K. Komaki, H. Shibata, H. Tawara, T. Azuma, Y. Kanai, and Y. Yamazaki: Angular momentum distribution of sulfur Rydberg states produced through foil penetration, *At. Coll. Res. Jpn.* **26** (2000) 46-47.

Y. Takabayashi, T. Ito, K. Komaki, Y. Yamazaki, T. Azuma, E. Takada, and T. Murakami: Convoy electron production in collisions of 460MeV/u Fe ions with carbon foils — initial charge state dependence, *At. Coll. Res. Jpn.* **26** (2000) 48-49.

T. Nishide, T. Kitamura, F. A. Rajgara, H. Shiromaru, Y. Achiba, and N. Kobayashi: 3-D velocity vectors of fragment ions formed by collision of  $\text{Ar}^{q+}$  ( $n=6,8$ ) with  $\text{CS}_2$ , *At. Coll. Res. Jpn.* **26** (2000) 52-53.

S. Jinno, H. Hidaka, H. Tanuma, and N. Kobayashi: Mobility of metastable  $\text{O}_2^+$  ions in helium gas at very low temperature, *At. Coll. Res. Jpn.* **26** (2000) 54-55.

T. Hayakawa, H. Tanuma, N. Kobayashi, R. A. Lomsadze, C. Verzani, B. DePaola and H. Watanabe: Polarization spectroscopy of charge transfer processes in collisions of  $\text{N}^{5+}$  with He and  $\text{H}_2$ , *At. Coll. Res. Jpn.* **26** (2000) 56-57.

K. Ishii, R. A. Lomsadze and K. Okuno: Single- and double-charge changing cross sections of  $\text{C}^{q+}$  ( $q=2-5$ ) with He and  $\text{H}_2$ , *At. Coll. Res. Jpn.* **26** (2000) 58-59.

T. Kaneyasu, K. Matsuda, K. Okuno, M. Ehrich, and M. Yoshino: Fragmentation of  $\text{N}_2$  in slow electron capture collisions of  $\text{Kr}^{8+}$  ion at energies below 200eV/u, *At. Coll. Res. Jpn.* **26** (2000) 60-61.

T. Ito, Y. Takabayashi, T. Azuma, K. Komaki, Y. Yamazaki, E. Takada, and T. Murakami: Resonant coherent excitation as a high precision spectroscopy of highly charged ions, *At. Coll. Res. Jpn.* **26** (2000) 101-102.

清野健, 勝山智男: 水滴落下系のカオス (解説) *日本物理学会誌* **55** (2000) 247-256.

# 光物性研究室

## 1. 研究活動の概要

### 1) 外場誘起 MCD 測定による磁気秩序の前駆状態の研究

これまでの放射光を用いた内殻励起磁気円二色性 (MCD) の測定は主として磁気秩序のある状態について、局所的磁気モーメントを測定したのがほとんどである。我々は、近年の放射光源の高輝度化と高安定化を前提にして、磁気秩序のない状態においても外部磁場に誘起された微小な MCD が観測されることを初めて明らかにしてきた。この微小な MCD はある意味でバルク帯磁率と類似しているが、原子選択的に局所的磁気モーメントを観測しているという点で、バルク帯磁率と異なる振る舞いを示すことが期待される。我々は、典型的な近藤物質である  $\text{CePd}_3$  ( $T_K$  約 150K) について温度を変えて Ce3d 内殻励起にともなう MCD を測定してその逆数を温度に対してプロットしたところ、バルク帯磁率の逆数プロットとは著しく異なる結果を得た。すなわち、その振る舞いは、 $T_K$  が 20K 程度の希薄近藤合金に似ていることが見出された。これはコヒーレント近藤系の「近藤温度」とはそもそも何であるのかという基本的な疑問を投げかける結果である。同様の測定を充填型スクッテルダイトである  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  にたいして行ったところ、やはりバルク帯磁率とは異なった結果を示し、MCD の逆数プロットの曲線が近藤的な振る舞いをも示唆している。このことは、この物質の低温における異常な磁氣的振る舞いの前駆状態と関連していると思われる。

### 2) $\text{RFe}_4\text{P}_{12}$ (R= La, Ce, Pr) の共鳴光電子分光

充填スクッテルダイト型構造を持つ希土類化合物  $\text{RFe}_4\text{P}_{12}$  (R=希土類) は、様々な興味深い性質を持つ。そこで、 $\text{RFe}_4\text{P}_{12}$  (R= La, Ce, Pr) の 4f 電子状態を調べるために共鳴光電子分光を高エネルギー加速器研究機構フォトンファクトリーの BL-11D で行った。共鳴 ( $h\nu=122$  eV 又は  $h\nu=124$  eV) と非共鳴 ( $h\nu=114$  eV 又は  $h\nu=115$  eV) スペクトルを測定し、それらの差から希土類 4f 光電子スペクトルを求めた。 $\text{CeFe}_4\text{P}_{12}$  の 4f スペクトルでは、フェルミ準位近くに強い  $f^1$  ピークが観測された。スペクトルの解析から 4f 電子数は 0.85 と見積もられ、価電子との混成が強いことが分かった。 $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  の 4f スペクトルでは、他の化合物と比べ 4f のエネルギー位置が極端に深いにもかかわらず混成が強いことが分かった。このような特殊な電子状態がこの化合物の興味深い物性と関連していると考えられる。

### 3) 内殻励起発光 MCD 測定による磁性研究

内殻励起発光 MCD とは、磁性体試料に吸収端近傍のエネルギーを持つ円偏光を入射したとき、入射円偏光のヘリシティによって試料からの発光スペクトルに違いが生じる現象であり、磁性研究の有力な手段として将来大きな発展が見込まれている。我々は、Gd の 4d-4f 内殻励起励起発光 MCD を高エネルギー加速器研究機構フォトンファクトリーの BL-28A で行った。これは、希土類元素の 4d-4f 内殻励起発光 MCD としては世界で初めて行われた実験である。希土類元素の 4d-4f 吸収スペクトルは多重項分裂により複雑なピークが生じるが、発光スペクトルおよびその MCD は共鳴励起する多重項状態によって多彩に変化することが分かった。また、発光 MCD 測定によって見積もられた磁気モーメントは、全光電子収量法による吸収 MCD 測定で見積もられた磁気モーメントよりもはるかに大きいことが分かった。これは、発光 MCD 測定では、光

の平均自由行程が長いため、バルク内部の磁化を測定できているもの考えられる。一方、吸収 MCD 測定では光電子の平均自由行程が短いため試料の表面磁化のみを測定していたと考えられる。

#### 4) X 線小角回折による筋収縮の分子機構の研究

昨年度に継続してムラサキイガイ前足糸牽引筋 (ABRM) の時分割 X 線回折実験をシンクロトロン放射光を用いて行った。前回までは、弛緩状態の回折像に空気によるバックグラウンドの散漫散乱が強く出ていたが、この点を改良して筋肉試料以外から出るバックグラウンド散乱の強度を全体的に一定に保ち、回折強度の比較を行い易くした。また、刺激終了後にキャッチ状態を生じないように、アセチルコリンとセロトニンを共に含む溶液を用いて刺激を行い、アセチルコリンのみで刺激した場合と同様な回折像の変化を観察した。即ち、張力が上昇するとアクチンフィラメントの構造周期に従ったミオシン頭部の配置を示す層線反射が現われ、これは、キャッチ状態の前駆的な変化ではなく、活性化状態の一般的な特徴であることを示した。全体的に昨年度よりも良質の実験結果が得られたので、現在、構造周期や回折強度の測定を行って、張力発生による構造変化を調べている。

#### 5) フラーレンを内包したカーボンナノチューブの光物性

直径を制御して生成した単層カーボンナノチューブに化学処理により穴をあけ、内部にフラーレンを高密度充填することに成功した。これは炭素の新たな固体相と考えることができる。理論的な予想では、内部の  $C_{60}$  チェーンは 1 位次元金属となるが、実際にはパイエルス不安定性により構造緩和して、絶縁体になると考えられている。事実、TEM 観察や電子線回折で重合体が観測されているが、それは上記の電子構造に起因すると思われる。ヘリウム温度でのラマン散乱や光吸収でも、オリゴマーの存在を示す結果が得られ、さらに室温においては、レーザー光照射により、ナノチューブ内部に一次元のポリマーが形成されることがわかった。 $C_{60}$  以外のフラーレンでは、さらに多彩な振舞いを見せ大変興味深い。現在この新物質の物性研究を重点的に行うため、国内および海外の研究グループと共同研究を進めている。

#### 6) 2 光子相関法による 2 次コヒーレンスの評価

まず、軟 X 線放射光を用いた 2 光子強度相関実験では、コヒーレント長を周波数  $f$  で変調し、相関信号の  $3f$  成分を抽出するという、世界的にもユニークな方法を継続するとともに、変調周波数を 3 通りに変えた測定をも行った。これから見積もられる蓄積電子ビームの瞬間的エミッタンスは 3 通りの異なった値が得られたが、これは蓄積ビームの何らかの不安定性と関連している可能性があり、ビーム診断技術しても開発の余地があると期待される。一方、光子計数法による 2 光子相関を特定のエレクトロニクス (TAC) を用いて実行するために、可視レーザー光から磨りガラスを用いて疑似カオス光成分を発生させ、それを光源とした同期相関実験により TAC に特有なシミュレーション実験を行った。このような系統的研究は可視光にたいしてさえ従来なされておらず、それ自身で極めて意義のある結果であるが、この結果をも踏まえて、実際に軟 X 線放射光を用いた光子計数型の 2 光子相関実験をも試みた。また、蓄積リングにおける蓄積ビームの量子効果について理論的解析を行った。この量子効果は、将来、硬 X 線領域での 2 光子相関実験で観測される可能性があり、また自由電子レーザーについても、ある種の量子限界を与えると予想されることを明らかにした。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

Y. Maniwa, Y. Kumazawa, Y. Saito, H. Tou, H. Kataura, H. Ishii, S. Suzuki, Y. Achiba, A. Fujiwara and H. Suematsu Gas Strage in Single-Walled Carbon Nanotubes Mol. Cryst. and Liq. Cryst. 340 (2000) 671-676.

Y. Saitoh, H. Kimura, Y. Suzuki, T. Nakatani, T. Matsushita, T. Muro, T. Miyahara, M. Fujisawa, K. Soda, S. Ueda, H. Harada, M. Kotsugi, A. Sekiyama and S. Suga: Performance of a very high resolution soft x-ray beamline BL25SU with a twin-helical undulator at Spring-8, Rev. Sci. Instr. **71** (2000) 3254-3259.

H. Sakamoto, H. Tou, H. Ishii, Y. Maniwa, E. A. Reny and S. Yamanaka: NMR studies of superconducting  $\text{Ba}_8\text{Ag}_x\text{Si}_{46-x}$  ( $x = 0.6$ ), Physica C 341-348 (2000) 2135-2136.

H. Ishii, T. Miyahara, Y. Takayama, K. Maruyama, M. Hirose, H. Miyauchi and T. Koide: Magnetic Circular Dichroism of Gd/Co Multilayers in Gd 3d and Co 2p Core Excitation Regions, Photon Factory Activity Report **No.17** (2000) 114.

M. Hirose, K. Maruyama, H. Ishii, Y. Takayama, T. Miyahara, H. Miyauchi, T. Koide, H. Sugawara and H. Sato: MCD Spectra of  $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{Fe}_4\text{P}_{12}$ , Photon Factory Activity Report **No.17** (2000) 136.

Y. Takayama, N. Takaya, H. Shiozawa, T. Miyahara, R-Z. Tai and K. Namikawa: Measurement of the first-order spatial coherence of undulator radiation and estimation of emittance, Photon Factory Activity Report **No.17** (2000) 319.

K. Suenaga, E. Sandre, C. Colliex, C. J. Pickard, H. Kataura, and S. Iijima: Electron energy-loss spectroscopy of electron states in isolated carbon nanostructures, Phys. Rev. B **63** (2001) 165408-165411.

A. Fujiwara, K. Ishii, H. Suematsu, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki and Y. Achiba: Gas adsorption in the inside and outside of single-walled carbon nanotubes, Chem. Phys. Lett. **336** (2001) 205-211.

N. Minami, S. Kazaoui, R. Jaquemin, H. Yamawaki, K. Aoki, H. Kataura, Y. Achiba: Optical properties of semiconducting and metallic single wall carbon nanotubes: effects of doping and high pressure, Synth. Metals **116** (2001) 405-409.

R. Sen, Y. Ohtsuka, T. Ishigaki, D. Kasuya, S. Suzuki, H. Kataura and Y. Achiba: Time period for the growth of single-wall carbon nanotubes in the laser ablation process: evidence from gas dynamic studies and time resolved imaging, Chem. Phys. Lett. **332** (2000) 467-473.

R. Jacquemin, S. Kazaoui, D. Yu, A. Hassanien, N. Minami, H. Kataura and Y. Achiba: Doping mechanism in single-wall carbon nanotubes studied by optical absorption, Synthetic Metals **115** (2000) 283-387.

Y. Ando, X. Zhao, H. Kataura, Y. Achiba, K. Kaneto, M. Tsuruta, S. Uemura, S. Iijima: Multiwalled carbon nanotubes prepared by hydrogen arc, *Diamond and Related Materials* **9** (2000) 847-851.

S. Kazaoui, N. Minami, H. Yamawaki, K. Aoki, H. Kataura, and Y. Achiba: Pressure dependence of the optical absorption spectra of single-walled carbon nanotube films, *Phys. Rev. B* **62** (2000) 1643-1646.

H. Kataura, Y. Kumazawa, Y. Maniwa, Y. Ohtsuka, R. Sen, S. Suzuki and Y. Achiba: Diameter Control of Single-Walled Carbon Nanotubes, *Carbon* **38** (2000) 1691-1697.

H. Kataura, Y. Kumazawa, N. Kojima, Y. Maniwa, I Umezu, S. Masubuchi, S. Kazama, Y. Ohtsuka, S. Suzuki and Y. Achiba: Resonance Raman Scattering of Br<sub>2</sub> Doped Single-Walled Carbon Nanotube Bundles, *Molecular Crystals and Liquid Crystals* **340** (2000) 757-762.

## 2) 国際会議報告

T. Miyahara and Y. Takayama: Are the stored currents in an electron storage ring classical or non-classical?, *Nucl. Instr. and Meth.* **A455** (2000) 202-206.

Y. Takayama, H. Shiozawa, N. Takaya, T. Miyahara and RenZhong Tai: Electron-beam diagnosis with Young's interferometer in soft X-ray region, *Nucl. Instr. and Meth.* **A455** (2000) 217-221.

Y. Ando, X. Zhao, H. Kataura, Y. Achiba, K. Kaneto, S. Uemura and S. Iijima: Physical Properties of Carbon Nanografibers, *Transactions of the Materials Research Society of Japan* **25** (2000) 817-820.

H. Kataura, Y. Maniwa, S. Masubuchi, S. Kazama, X. Zhao, Y. Ando, Y. Ohtsuka, S. Suzuki, Y. Achiba and R. Saito: Bundle Effects of Single-Wall Carbon Nanotubes, *AIP Conference Proceedings* **544** (2000) 262-265.

S. Kazaoui, N. Minami, R. Jacquemin, H. Kataura and Y. Achiba: Doping Behavior of Single-Wall Carbon-Nanotube Thin Films as Probed by Optical Absorption Spectroscopy, *AIP Conference Proceedings* **544** (2000) 400-403.

H. Kataura, Y. Achiba, X. Zhao and Y. Ando: Resonance Raman Scattering of Multi-Walled Carbon Nanotubes, *MRS Proceedings* **593** (2000) 113-118.

R. Sen, Y. Ohtsuka, T. Ishigaki, D. Kasuya, S. Suzuki, Y. Achiba and H. Kataura: Diameter Control in the Formation of Single-Wall Carbon Nanotubes, *MRS Proceedings* **593** (2000) 51-56.

## 3) 学会講演

日本物理学会 2000年春の分科会 2000年3月22日～3月25日 (関西大学)

宮原恒あき：高いボーズ縮重度をもつ軟X線の利用。

石井広義，丸山健一，広瀬正晃，高山泰弘，宮原恒あき，室隆桂之，齋藤裕児，宮内洋司，小出常晴：Gd-Co 多層膜の内殻吸収 MCD II .

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

片浦弘道，真庭豊，鈴木信三，阿知波洋次，増淵伸一，風間重雄：単層カーボンナノチューブの光学的性質に及ぼすバンドルの効果 II .

谷津義徳，不藤平四郎，布川正史，安正宣，岩佐義宏，三谷洋興，片浦弘道，阿知波洋次：アルカリ金属ドープ単層カーボンナノチューブの遠赤外スペクトル .

阿知波洋次，鈴木信三，片浦弘道，石垣敏信，大塚洋介：フラーレン及び単層ナノチューブ成長のその場観察 .

鈴木信三，大塚洋介，石垣敏信，片浦弘道，阿知波洋次：ナノチューブ成長における金属の果たす役割 .

藤原明比古，壽榮松宏仁，片浦弘道，阿知波洋次，鈴木信三，真庭豊：単層カーボンナノチューブのガス吸着特性 .

日本物理学会第 55 回年会 2000 年 9 月 22 日～9 月 25 日（新潟大学）

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

高山泰弘，篠田元樹，大部健司，李徹，石井広義，宮原恒あき，岡本淳：発光 MCD 測定装置の立ち上げおよび性能評価 .

塩澤秀次，大部健司，李徹，高山泰弘，宮原恒あき，RenZhong Tai，並河一道，安藤正海，山本樹，浦川順治，早野仁司：放射光の二次コヒーレンスの測定 III .

平原佳織，坂東俊治，末永和知，菊池耕一，片浦弘道，阿知波洋次，岡崎俊也，加藤治人，篠原久典，飯島澄男：単層ナノチューブに内包された様々なフラーレン一次元結晶の電子顕微鏡による評価 .

片浦弘道，鈴木信三，真庭豊，菊地耕一，兒玉健，末永和知，平原佳織，飯島澄男，阿知波洋次：ナノチューブに内包された 1 次元フラーレンチェーンの光物性 .

藤原明比古，松岡康行，壽榮松宏仁，小川直毅，宮野健次郎，片浦弘道，阿知波洋次，鈴木信三，真庭豊：単層カーボンナノチューブの光伝導 .

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

水野秀平，市田正夫，片浦弘道，阿知波洋次，中村新男：ポリマー中に配向させた単層カーボンナノチューブの光学異方性 .

市田正夫, 水野秀平, 斎藤弥八, 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クーロン効果のチューブ径依存性.

谷津義徳, 不籐平四郎, 布川正史, 安正宣, 岩佐義宏, 三谷忠興, 片浦弘道, 阿知波洋次: アルカリ金属ドープ単層カーボンナノチューブバンドルのインタ-カレ-ション過程.

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

第14回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム 2001年1月12日~14日 (広島大学)

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

篠田元樹, 大部健司, 李徹, 高山泰弘, 石井広義, 宮原恒あき, 岡本淳: 発光 MCD 装置の製作と評価

第19回フラーレン総合シンポジウム 2000年7月27日~28日 (桐生市民文化会館)

水野秀平, 市田正夫, 片浦弘道, 阿知波洋次, 中村新男: ポリマー中に配向させた単層カーボンナノチューブの光学異方性.

片浦弘道, 鈴木信三, 真庭豊, 平原佳織, 末永和知, 飯島澄男, 阿知波洋次: フラーレンを内包したナノチューブの光学的性質.

岡崎俊也, 加藤治人, 篠原久典, 坂東俊治, 平原佳織, 末永和知, 片浦弘道, 阿知波洋次, 飯島澄男: 気相反応によるフラーレン内包単層チューブの高収率合成.

飯島澄男, 岡崎俊也, 加藤治人, 篠原久典, 坂東俊治, 平原佳織, 末永和知, 片浦弘道, 阿知波洋次: フラーレン内包単層カーボンナノチューブの新しい展開.

平原佳織, 坂東俊治, 末永和知, 菊池耕一, 片浦弘道, 阿知波洋次, 岡崎俊也, 加藤治人, 篠原久典, 飯島澄男: フラーレン一次元結晶の電子線回折による評価.

趙新洛, 安藤義則, 片浦弘道, 阿知波洋次, 滝沢守雄, 坂東俊治, 飯島澄男: 多層カーボンナノチューブのブリージングモード.

S. Kazaoui, N. Minami, H. Yamawaki, K. Aoki, H. Kataura, Y. Achiba: Single-Walled Carbon-Nanotubes under Pressure Investigated by Optical Spectroscopy.

片浦弘道, 鈴木信三, 真庭豊, 阿知波洋次, 増淵伸一, 風間重雄, 趙新洛, 安藤義則: カーボンナノチューブにおける層間相互作用.

R. Sen, Y. Ohtsuka, T. Ishigaki, D. Kasuya, S. Suzuki, H. Kataura, Y. Achiba: Effect of Target Environment and Gas Flow Rate on the Diameter Distribution of Single-Walled Carbon Nanotubes.

市田正夫, 水野秀平, 齋藤弥八, 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クーロン効果のチューブ径依存性.

R. Sen, A. Govindaraj, S. Suzuki, H. Kataura, Y. Achiba: Encapsulation and Hollow Onion-like Nanoparticles of  $WS_2$  and  $MoS_2$ .

藤原明比古, 壽榮松宏仁, 片浦弘道, 阿知波洋次, 鈴木信三, 真庭豊: カーボンナノチューブのガス吸着特性.

谷津義徳, 岩佐義宏, 不藤平四郎, 三谷忠興, 片浦弘道, 阿知波洋次: 単層カーボンナノチューブのインターカレーション相.

第20回フラーレン総合シンポジウム 2001年1月22日~23日  
(岡崎コンファレンスセンター)

片浦弘道, 平原佳織, 飯島澄男, 兒玉健, 菊池耕一, 鈴木信三, 阿知波洋次: フラーレン peapod の共鳴ラマン散乱.

鈴木信三, 山口浩史, Rahul Sen, 片浦弘道, Wolfgang Kättschmer, 阿知波洋次: 高温レーザー蒸発法によって生成した炭素クラスターの LIF イメージング.

伊藤崇芳, 谷津義徳, 岩佐義宏, 三谷忠興, 片浦弘道, 阿知波洋次: カリウムをドーブした peapod のラマン散乱.

藤原明比古, 松岡康行, 壽榮松宏仁, 小川直毅, 宮野健次郎, 片浦弘道, 阿知波洋次, 鈴木信三, 真庭豊: 単層カーボンナノチューブの光伝導.

日本生物物理学会第38回年会 2000年9月10日 9月13日(東北大学川内北キャンパス)

田嶋佳子, 三島久典, 牧野浩司, 若林克三: 軟体動物平滑筋の活性化過程における  $59 \text{ \AA}$  X線反射強度の時分割測定.

筋収縮・細胞運動研究会2000年度年会 2000年12月8日 12月9日(帝京大学医学部)

田嶋佳子: 軟体動物平滑筋の収縮に伴う  $59 \text{ \AA}$  X線反射強度の変化.

フォトンファクトリー研究会 [ X線, 中性子線小角散乱/回折によるサイエンスの新しい展望 ]

2000年12月19日 12月20日(高エネルギー加速器研究機構)

田嶋佳子: X線回折で見た軟体動物平滑筋のキャッチ状態の構造.

## 国際会議

7th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation, Aug. 21-25, 2000, Berlin, Germany.

Y. Takayama, H. Shiozawa, N. Takaya, T. Miyahara, R. Z. Tai: Measurement of the first and second order spatial coherence of synchrotron radiation.

SPring-8 International Workshop on 30m Long Straight Section, Nov. 10-11, 2000, Hyogo, Japan.

T. Miyahara: Trichromator for multi-beam modulation spectroscopy to detect nonlinear effects.

Y. Takayama: First and second order coherence of synchrotron radiation.

International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals 2000, Jul. 15-21, 2000, Gastein, Austria.

H. Kataura, Y. Maniwa, T. Kodama, K. Kikuchi, K. Suenaga, S. Iijima, S. Suzuki and Y. Achiba: High yield fullerene encapsulation in single-wall carbon nanotubes.

25th International Conference on the Physics of Semiconductors, Sep. 17 - 22, 2000, Osaka, Japan

H. Kataura, Y. Maniwa, T. Kodama, K. Kikuchi, K. Suenaga, S. Iijima, S. Suzuki, and Y. Achiba: Optical properties of fullerenes encapsulated in single-wall nanotubes. (invited paper)

M. Ichida, S. Mizuno, S. Kuno, Y. Saito, H. Kataura, Y. Achiba, and A. Nakamura: Coulomb effects on the fundamental optical transition in single-walled carbon nanotubes.

2000 Fall Materials Research Society Meeting, Nov. 27 - Dec. 1, 2000 Boston, Massachusetts, USA

H. Kataura, Y. Maniwa, K. Hirahara, K. Suenaga, S. Iijima, T. Kodama, K. Kikuchi, S. Suzuki and Y. Achiba: Optical properties of one-dimensional fullerene chains encapsulated in single-wall carbon nanotubes.

S. Iijima, S. Bandow, K. Hirahara, K. Suenaga, T. Okazaki, H. Kato, H. Shinohara, H. Kataura and Y. Achiba: One-dimensional crystals of fullerene formed inside single-wall carbon nanotubes.

S. Suzuki, R. Sen, H. Yamaguchi, T. Ishigaki, Y. Ohtsuka, Y. Achiba, H. Kataura: Time and space evolution of emitting carbon particles - correlation with the formation of fullerenes and carbon nanotubes.

R. Sen, H. Kataura, Y. Ohtsuka, T. Ishigaki, S. Suzuki and Y. Achiba: Effect of temperature gradient near the target and gas flow rate on the diameter distribution of single-walled carbon nanotubes grown by the laser ablation technique.

Y. Iwasa, H. Fudou, Y. Yatsu, T. Mitani, H. Kataura and Y. Achiba: Intercalation processes of single walled carbon nanotube ropes as investigated by spectroscopic probes.

2000 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies, December 14-19, 2000, Honolulu, HI, USA

S. Suzuki, T. Ishigaki, Y. Ohtsuka, R. Sen, H. Kataura, Y. Achiba, W. Krätschmer: In situ observation of emission from carbon nanoparticles: Correlation with the formation process of fullerenes and carbon nanotubes.

R. Sen, A. Govindaraj, S. Suzuki, H. Kataura, Y. Achiba: Encapsulated and hollow onionlike structures of WS<sub>2</sub> and MoS<sub>2</sub>.

Y. Iwasa, H. Fudo, Y. Tatsu, T. Mitani, Y. Achiba, H. Kataura: Intercalated single-walled carbon nanotubes: Phase stability and electronic properties. (invited paper)

H. Kataura, Y. Maniwa, T. Kodama, K. Kikuchi, K. Suenaga, S. Iijima, S. Suzuki, Y. Achiba: Optical properties of single-walled nanotubes encapsulating specific fullerenes. (invited paper)

International Symposium on Nanonetwork Materials, Jan. 15-18th, 2001, Kamakura, Japan

M. Ichida, S. Mizuno, H. Kataura, Y. Achiba, A. Nakamura: Optical Anisotropy of Aligned Single-Walled Carbon Nanotubes in Polymer.

A. Fujiwara, Y. Matsuoka, H. Suematsu, N. Ogawa, K. Miyano, H. Kataura, Y. Achiba, S. Suzuki, Y. Maniwa: Photoconductivity of Single-Walled Carbon Nanotubes.

S. Kazaoui, N. Minami, H. Kataura, Y. Achiba: In-situ Spectroelectrochemical Study of Single Wall Carbon Nanotubes.

K. Nomura, M. Osawa, K. Ichimura, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki, Y. Achiba: STM/STS on Carbon Nanotubes at Low Temperature.

R. Sen, S. Suzuki, H. Kataura, Y. Achiba: Gas Dynamic and Time Resolved Imaging Studies of Single-Wall Carbon Nanotubes Growth in the Laser Ablation Process.

S. Suzuki, H. Yamaguchi, R. Sen, H. Kataura, W. Krätschmer, Y. Achiba: Time and Space Evolution of Carbon Species Generated with a Laser Furnace Technique.

Y. Achiba, S. Suzuki, R. Sen, H. Kataura: Growth of Fullerenes and Single Wall Nanotubes Revealed by Time Resolved Spectroscopy. (invited paper)

H. Kataura, T. Kodama, K. Kikuchi, K. Hirahara, S. Iijima, S. Suzuki, W. Kratschmer, Y. Achiba: Optical Properties of Fullerene-Peapods.

T. Ito, Y. Yatsu, H. Fudo, Y. Iwasa, T. Mitani, H. Kataura, Y. Achiba: Intercalation of SWNTs and Peapods with Alkali Metals

R. Sen, A. Govindaraj, K. Suenaga, S. Suzuki, H. Kataura, Y. Achiba: Encapsulated and Hollow Onion-Like Nanoparticles of WS<sub>2</sub> and MoS<sub>2</sub>.

S. Masubuchi, H. Masubuchi, S. Kazama, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki, Y. Achiba: The Effect of Solvent on Thermoelectric Power in Single-Wall Carbon Nanotubes.

H. Kuzmany, M. Hulman, W. Plank, A. Grueneis, C. Kramberger, H. Peterlik, M. Mannsberger, T. Pichler, H. Kataura: Quantum Oscillations for the Spectral Moments of Raman Spectra from SWCNT.(invited paper)

A. Grüneis, M. Hulman, Ch. Kramberger, Th Pichler, H. Peterlik, H. Kuzumany, H. Kataura, Y. Achiba: Oscillatory behavior of Raman modes in SWNT.

X. Liu, T. Pichler, M. Knupfer, M.S. Golden, J. Fink, D.A. Walters, M.J. Bronikowski, R.E. Samlley, H. Kataura: Electronic structure of pristine and fullerene-filled SWCNT from high resolution EELS.

H. Kataura, Y. Maniwa, T. Kodama, K. Kikuchi, K. Hirahara, K. Suenaga, S. Iijima, W. Krätschmer, S. Suzuki, Y. Achiba: Optical properties of fullerene-peapods. (invited paper)

T. Pichler, W. Plank, A. Grüneis, H. Kuzumany, H. Kataura, Y. Achiba: Photosensitive resonance Raman scattering of pristine and potassium doped C<sub>60</sub> peapods. (invited paper)

M.S. Golden, X. Liu, T. Pichler, M. Knupfer, J. Fink, D. Walters, M.J. Bronikowski, R.E. Samlley, H. Kataura: Optical properties and electronic structure of pristine, exohedrally and endohedrally doped SWCNT. (invited paper)

#### 4) 科学研究費等報告

片浦弘道：共鳴ラマン散乱による単層カーボンナノチューブの電子状態の研究（基盤研究C(2)研究成果報告書）

#### 5) 学会誌等

片浦弘道：フラーレンを内包したカーボンナノチューブ，*固体物理* **36** (2001) 231-239.

片浦弘道：カーボンナノチューブの光吸収とラマン散乱，*光学* **30** (2001) 105-110.

#### 6) 著書

Riichiro Saito and Hiromichi Kataura: Carbon Nanotubes, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2001), (Chapter Optical Properties and Raman Spectroscopy of Carbon Nanotubes, 213-247)

# ミクロ物性研究室

## 1. 研究活動の概要

### 1) 超伝導およびナノクラスター凝縮体の物性研究：

我々は、ナノメートルサイズの特徴的な構造を有する物質系の物性について、核磁気共鳴 (NMR)、磁化測定、電気伝導度測定、X線回折実験などの方法を用いて研究している。2000年度(平成12年度)における研究活動の概要は次のとおりである。

なお、本年度も文部省科学研究費特定領域研究A、基盤研究C、奨励研究、住友財団基礎科学研究助成、日本学術振興会日仏科学協力事業、未来開拓学術推進事業、および科学技術振興事業団戦略的基礎研究の直接および間接的に援助を受けた。また学内および学外の多数の方々と共同研究を行っていただいた。X線を用いた実験は以下の課題のもとに高エネルギー加速器研究機構(KEK PF)および高輝度光科学研究センター(SPring-8)の共同利用施設において行なわれた。

- ・アルカリ C<sub>60</sub> 化合物におけるアルカリイオンの配置秩序の研究 (SPring-8)
- ・フラーレン内包カーボンナノチューブの構造 (SPring-8)
- ・アルカリ金属を吸蔵したゼオライト LTA における超格子構造の安定性 (SPring-8)
- ・アルカリ金属を吸蔵したゼオライト LTA の構造研究 (KEK PF)
- ・アルカリ金属を吸蔵したゼオライト LTA の局所構造 (KEK PF)
- ・カーボンナノチューブなどの炭素ナノ構造物質の研究 (KEK PF)

#### (ア)ゼオライトの空隙内に形成された電子系の研究

ゼオライトの結晶は、周期的に配列したナノメートルサイズの空隙を有し、各種の原子・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では、アルカリ金属を吸蔵して、その最外殻 s 電子が空隙内に広がり、“空隙原子”を形成する。したがって、ゼオライト内には空隙原子の結晶が形成されていると考えることができる。本年度は昨年度に続けて、アルカリ金属を吸蔵したゼオライト LTA の強磁性発現機構とアルカリ・ソーダライトの反強磁性発現機構の研究を行った。また、カリウムゼオライト FAU 系において物性の探索をおこなった。ゼオライト LTA における磁性の研究では、磁気相図および磁性発現における p 的空隙原子軌道の自由度の重要性を議論した。

#### (イ)カーボンナノチューブの構造と電子状態

カーボンナノチューブの電子状態は、炭素原子の共有結合ネットワークのトポロジーに支配される。したがって、その構造は極めて重要である。しかし、多層チューブの構造はまだよく分かっていない。通常得られる多層チューブの殆どは、理想的な同心円筒構造とは大分異なっているだろうと考えられている。我々は X 線回折実験を行ない、水素中アーク放電法により得られた試料を調べ、多数の閉じたチューブが存在していることを示すことに成功した。試料は名城大・安藤等により合成された。単層チューブの X 線回折実験も進行している。

#### (ウ)シリコンネットワーク固体の電子状態

シリコンクラスレート超伝導体 Ba<sub>8</sub>Si<sub>46</sub> とそのシリコンの一部を銀に置換した試料の電子状態お

よび超伝導状態を NMR により研究した。

#### (エ) アルカリ C<sub>60</sub> 化合物の電子状態

本年度は、格子定数の小さい領域の Li<sub>x</sub>CsC<sub>60</sub> の電子状態を NMR 実験により集中的に調べた。

#### (オ) 新規 2 次元超伝導体 -HfNCl の超伝導状態、電子状態の研究

本システムでは、Hf と N がつくる二重八ニカム構造の二次元シートが積み重なり、その層間に広い 2 次元“ ナノ ”スペースが形成される。Li と有機分子 THF を挿入した系では、Li から二重八ニカムネットワークへ電子がドーピングされ、26K の超伝導体になる。フレーク状の小さな結晶をプレスして配向し、磁化測定、NMR 測定を行い、二次元的な超伝導特性を明らかにした。また、高い転移温度に対してフェルミ面電子状態密度が異常に小さいこと、電子格子相互作用および電子間相互作用も小さく二次元自由電子ガスに近いことを明らかにした。超伝導機構として、従来のフォノン機構や磁氣的相互作用によるのではない可能性が議論された。(PRB に掲載および PRL に掲載予定)

#### (カ) MgB<sub>2</sub> 超伝導体の研究

2001 年 1 月、青山学院大学秋光グループにより、超伝導転移温度 39K の新超伝導体 MgB<sub>2</sub> が発見された。我々は、北陸先端大岩佐グループにより作製された試料について、高分解能超伝導電磁石を用いた NMR 実験を行なった。

(キ) Li を層間を含む 2 次元 C<sub>60</sub> ポリマーの NMR 実験を行ない、C<sub>60</sub> ポリマーのネットワーク構造と Li の結晶内原子拡散運動について有用な情報を得ることに成功した。

## 2) 主に電子スピン共鳴法による研究

電子スピン共鳴 (ESR) 法を中心手段にして幾つかの興味ある物質について研究を進めている。通常は市販の X - バンド (10 GHz) や Q - バンド (36 GHz) スペクトロメーターが使われることが多い。これらの装置は感度が高く、有用であるが、本研究室では測定周波数を 10 ~ 24,000 MHz にわたって変えられる手製のスペクトロメーターを用い、パラメーターとして温度、周波数、圧力を変え、電子状態のユニークな情報を得ることを目的としている。

この種の研究が可能な研究グループは、単一の研究室としては世界的に見ても殆ど例がない。本研究手段の特徴を幾つかあげてみよう。低次元電子系では、スピン担体の微視的なダイナミクスの異方性を定量的に見積れ、多結晶試料にも適用できる非常にユニークな特徴がある。また、同一試料内の核スピンと電子スピンを同一周波数で観測すれば、試料内の反磁性に影響されずに電子スピン磁化率を測定できる。加圧下での ESR 実験も可能で、格子定数を変え、電子間、電子格子間の相互作用を変調し、物性発現に寄与する相互作用を調べられる。以下に今年度行われた研究の概要を整理する。

ア) 導電性高分子についてかなり長期にわたり研究を続けてきたが、今までに得られた実験結果を整理する機会を得た。周波数可変 ESR から得られる情報を整理すると、信号強度からは反磁性などを含まない純粋なスピン磁化率が得られる。共役高分子に導電性を付加するにはドーピン

グを要するが、ドーパントの反磁性差し引きから来る曖昧さを除けるメリットを持つ。ESR 線幅からはスピンを持つ電荷担体のダイナミクスが反映されるので、電荷輸送の情報が得られる。十分にドーブした、ポリアセチレン、ポリパラフェニレン、ポリアニリン、ポリパラフェニレンピニレン、ポリピロール、ポリチオフェンのデータから大きく分類して2つに分けることが出来る。一般的に、高温領域では金属に特有なパウリ磁化率が主で、低温領域では局在スピンのキュリー磁化率が支配的になる。2つのカテゴリーで特徴的なのは、両者が単純な和である場合と、連続的に移り変わるクロスオーバーを示す場合である。この分類は、線幅から得られる電荷担体のダイナミクスにも反映されていることが確認できる。和で表される場合は、金属的になる結晶領域と局在ポーラロンを持つ非結晶領域の混在で説明され、クロスオーバーは一様な結晶であるが、乱れが多く低温でアンダーソン局在が試料全体で起こるためと理解できる。

イ) フラーレンが1次元的に繋がった斜方晶  $Rb_1C_{60}$  ポリマー相の解析も継続して進めてきた。この系は常圧では 50 K で磁化率に異常が報告されている。圧力下 ESR と共に、バークレーの Zettl らの圧力下電気抵抗の結果を併せて解析を進めた結果、この系は、モット・ハバード型絶縁体・金属転移で理解できることが分かった。アルカリ金属から電子が一つ  $C_{60}$  に移った Half-filled のこの系は、モット・ハバード転移に対して不安定である。また、この系のように  $C_{60}$  上のスピンの3角格子を組み、スピンのフラストレーションが強い場合には反強磁性絶縁体ではなく、反強磁性金属相になることも理論的に予測されている。次項の TDAE- $C_{60}$  の高圧下のポリマー化のデータとも合わせ解析すると、 $C_{60}$  分子同士が2本の1重結合で繋がった高分子鎖は、鎖間相互作用が無い場合には1次元絶縁体になると結論される。

最近になって、従来は単純な金属と理解されていた  $K_1C_{60}$  が、十分徐冷をすると、 $Rb_1C_{60}$  と非常に似た物性を示すことが明らかになってきており、圧力下の振る舞いを調べることにより、アルカリ金属を変えた一価の化合物系を整理して理解できる可能性が出てきたので、統一的な実験を進める準備をしている。

ウ)  $C_{60}$  を構成要素とするもう一つの磁性体、TDAE- $C_{60}$  の単結晶の ESR を昨年引き続き調べた。この系は純粋な有機系の強磁性体としては最も高い転移温度 16 K を示すことから活発な研究が行われてきた。昨年度、十数 kbar まで圧力を加え、強磁性転移温度の変化を調べた結果、ほぼ2次関数的な圧力による減少を示し、9 kbar 程度で転移温度が 2 K 以下になる事を見出した。ESR 線幅の温度依存性とコンシステントで、かつ、定量的にも合理的な転移温度を与える電総研の川本氏のモデルで解析し、協力的なヤン・テラー相互作用で歪んだ  $C_{60}$  ボールのスピン系が、反強磁性的な軌道秩序を生じている場合に、2バンドのモット・ハバードモデルにより観測された強磁性転移温度の静水圧力依存性が説明できることが分った。それと同時に、10 kbar 以上の圧力を加えると、 $Rb_1C_{60}$  と同じ、2本の1重結合で繋がった高分子になることを見出した。

エ) 等方的な構造を持つが、やはり反強磁性相転移がからむ系として、アルカリ金属をドーブしたアルカリ - 電子 - ソーダライトの研究も昨年度に引き続き進めた。これは、UCSB のスルダノフ博士との共同研究である。この系も 50 K を境に磁化率や ESR 線幅の異常が見られる。今年度は、Na と K をドーブした SES と KES の圧力下における磁化率を詳しく調べ、キュリーワイス温度の変化を測定した。その結果、どちらの系も圧力はキュリーワイス温度を下げることが分かった。キュリー温度との関係を解析しており、アルカリイオンにトラップされた s-電子の波動

関数の広がりとの関係が興味深い。

オ) 一次元的な DMe-DCNQI (ジメチル-ジシアノキノンジイミン) スタックと Li イオンのスタックから成る  $\frac{1}{4}$ -filled の一次元電子系結晶、(DMe-DCNQI)<sub>2</sub>Li は 65 K のスピンパイエルス (SP) 基底状態を持つ。周波数可変 ESR を適用して電子状態を調べた。その結果、キュリースピンが 1 次元的な拡散運動をしていることから、 $T_{SP}$  以下の低温で現れるキュリー的な磁化の起源が、DCNQI 分子が 4 枚周期で作るシングレットドメインの可動なドメインウォールであることが分かってきた。

カ) 中性 - イオン性の境界近くにいる有機結晶、(BEDT-TTF)(ClMe-TCNQ) (ビスエチレンジチオ - テトラチアフルバレン) (クロルメチル - テトラシアノキノジメタン) は、TTF-CA に代表される、中性 - イオン性転移を示す系である。この系の特徴は、2 次元的な波動関数の重なりを生む BEDT-TTF を含むため、スピンパイエルス (SP) 基底状態が起こりにくいと予想される。しかし、圧力下で起こる中性イオン性転移を ESR で調べると、9 kbar あたりでは 300 K 近辺で SP 基底状態に落ちることが見出された。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

K. Mizoguchi, T. Takanashi, H. Sakamoto, Lj. Damjanovic and V. I. Srdanov: Pressure effect on antiferromagnetic transition in alkali-electro-sodalite, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **341**, (2000) 467-472.

K. Mizoguchi: ESR study in advanced materials with new parameters: Frequency and Pressure, *J. Korean Phys. Soc.* **36**, (2000) 360-365.

H. Sakamoto, S. Kobayashi, K. Mizoguchi, M. Kosaka and K. Tanigaki: Electronic states in Rb<sub>1</sub>C<sub>60</sub> studied by ESR under pressure, *Phys. Rev. B* **62**, (2000) R7691-7694.

H. Sakamoto, H. Tou, H. Ishii, Y. Maniwa, E.A. Reny and S. Yamanaka: NMR studies of superconducting Ba<sub>8</sub>Ag<sub>x</sub>Si<sub>46-x</sub> (x=0-6), *Physica C* **341-348**, (2000) 2135-2136.

H. Tou, Y. Maniwa, Y. Iwasa, H. Shimoda, T. Mitani: NMR Evidence for Mott-Hubbard Localization in (NH<sub>3</sub>)K<sub>3</sub>C<sub>60</sub>, *Phys. Rev. B* **62**, (2000) R775-R778.

H. Tou, Y. Maniwa, T. Koiwasaki, and S. Yamanaka: Evidence for Quasi-Two-Dimensional Superconductivity in Electron-Doped Li<sub>0.48</sub>(THF)<sub>y</sub>HfNCl, *Phys. Rev. B* **63**, (2001) 020508(R)1-4.

H. Tou, D. Omata, Y. Maniwa, K. Itoh and S. Yamanaka: NMR studies of layered superconductor Li<sub>0.48</sub>(THF)<sub>y</sub>HfNCl, *Physica C* **341-348**, (2000) 2139-2140

H. Tou, N. Muroga, Y. Maniwa, H. Shimoda, Y. Iwasa, and T. Mitani: Mott transition with antiferromagnetic ordering in ammoniated alkali C<sub>60</sub> superconductors: NMR studies, *Physica B* **281&282**, (2000) 1018-1020.

Yutaka Maniwa, Yoshinori Kumazasa, Yumi Saito, Hideki Tou, Hiromichi Kataura, Hiroyoshi Ishii, Shinzou Suzuki, Yohji Achiba, Akihiko Fujiwara, Hiroyoshi Suematsu: Gas Storage in Single-Walled Carbon Nanotubes, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **340**, (2000) 671-676.

Yutaka Maniwa, Hirokazu Sakamoto, Hideki Tou, Yuji Aoki, Hideyuki Sato, Fumihiko Shimizu, Hitoshi Kawaji and Shoji Yamanaka: NMR Studies of silicon clathrate compounds, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **341**, (2000) 497-502.

H. Kataura, Y. Kumazawa, Y. Maniwa, Y. Ohtsuka, R. Sen, S. Suzuki and Y. Achiba: Diameter control of the single-walled carbon nanotubes, *Carbon* **38**, (2000) 1691-1697.

H. Kataura, Y. Kumazawa, N. Kojima, Y. Maniwa, I. Umezu, S. Masubuchi, S. Kazama, Y. Ohtsuka, S. Suzuki and Y. Achiba: Resonance Raman scattering of Br<sub>2</sub> doped single walled carbon nanotube bundles, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **340**, (2000) 757-762.

Akihiko Fujiwara, Kenji Ishii, Hiroyoshi Suematsu, Hiromichi Kataura, Yutaka Maniwa, Shinzou Suzuki, and Yohji Achiba: Gas adsorption in the inside and outside of single-walled carbon nanotubes, *Chem. Phys. Lett.* **336**, (2001) 205 - 211

## 2) 学会講演

日本物理学会 2000年春の分科会 2000年3月22日～3月25日 (関西大学)

坂本浩一、小林成徳、溝口憲治、小坂真由美、谷垣勝巳：Cs<sub>1</sub>C<sub>60</sub>の物性に対する圧力の影響。

町野正佳、溝口憲治、坂本浩一、徳本圓、川本徹、A. Omerzu、D. Mihailovic：圧力下でのTDAE-C<sub>60</sub>のESR。

小林成徳、坂本浩一、溝口憲治、小坂真由美、谷垣勝巳：Rb<sub>1</sub>C<sub>60</sub>の圧力下でのESR II。

加藤穰、溝口憲治、坂本浩一、風間重雄、増淵伸一、染谷英明：ポリピロールのESR：濃度依存性。

北詰恵一、藤秀樹、真庭豊、小坂真由美、谷垣勝巳：sc-C<sub>60</sub>超伝導体のNMRによる電子状態の研究。

藤 秀樹、真庭豊、小俣大介、伊藤康次郎、山中昭司：2次元層状超伝導体Li<sub>0.48</sub>-HfNClのNMRによる研究II。

吉良弘、藤秀樹、清水文比古、真庭豊、村上洋一：KとNaを吸蔵したLTAの物性V。

日本物理学会第55回年次大会 2000年9月22日～9月25日(新潟大学)

藤 秀樹、真庭豊、伊藤康次郎、山中昭司：層状超伝導体Li<sub>0.48</sub>(THF)<sub>y</sub>HfNClの異常超伝導特性(磁化率、NMR)。

吉良弘、藤秀樹、真庭豊、村上洋一：KとNaを吸蔵したLTAの物性VI。

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

北詰恵一、藤秀樹、真庭豊、小坂真由美、谷垣勝己: 格子定数の小さい  $C_{60}$  超伝導体の NMR による研究.

池尻英雄、藤秀樹、真庭豊、安川雅啓、山中昭司:  $Li_x-C_{60}$  ポリマーの NMR.

真庭豊: ゼオライト強磁性体の NMR (シンポジウム講演).

坂本浩一、小林成徳、町野正佳、溝口憲治、小坂真由美、谷垣勝己、川本徹、徳本圓、A. Omerzu、D. Mihailovic :  $C_{60}$  強磁性体の発現機構 (シンポジウム講演).

溝口憲治: 導電性高分子の電子状態 (シンポジウム講演).

町野正佳、溝口憲治、坂本浩一、石井知彦、徳本圓、川本徹、A. Omerzu、D. Mihailovic : 圧力下での TDAE- $C_{60}$  の ESR .

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

平岡牧、坂本浩一、溝口憲治、加藤礼三:  $(DM-DCNQI)_2Li$  の磁気共鳴 .

## 国際会議

Int. Conf. on Synthetic Metals (ICSM'00), Badgastein, Austria, July 15-21, 2000

K. Mizoguchi: Electronic states in conjugated polymers studied by electron spin resonance. (Invited talk)

K. Mizoguchi, M. Machino, H. Sakamoto, M. Tokumoto, T. Kawamoto, A. Omerzu, D. Mihailovic: Mechanism of ferromagnetism in TDAE- $C_{60}$ .

H. Sakamoto, S. Kobayashi, K. Mizoguchi, M. Kosaka and K. Tanigaki: ESR under pressure on polymer phase  $A_1C_{60}$  ( $A=Rb, Cs$ ). (Oral)

K. Kitazume, H. Tou, Y. Maniwa, M. Kosaka, and K. Tanigaki: Electronic states of superconducting fullerides with small lattice constants: a NMR study.

Y. Maniwa, H. Ikejiri, H. Tou, M. Yasukawa, and S. Yamanaka: NMR of Li-doped  $C_{60}$  polymers. Int. Conf. on Magnetism (ICM2000), Recife, Brazil, August 6-11, 2000

H. Tou, Y. Maniwa, T. Koiwasaki, S. Yamanaka: Magnetic properties of the layered superconductor  $Li_{0.48}(THF)_{0.3}HfNCl$  with  $T_c \sim 26$  K.

H. Tou, Y. Maniwa, K. Mizoguchi, L. Damjanovic, V.I. Srdanov: NMR studies on antiferromagnetism in alkali-electro-sodalite.

H. Kira, H. Tou, Y. Maniwa, Y. Murakami: Magnetic properties of K-absorbing zeolite LTA.  
Int. Symp. on Nanonetwork Materials (ISNM2001), Kamakura, Japan, January 15-18, 2001

H.Tou, N. Muroga, Y. Maniwa, T. Takenobu, H. Shimoda, Y. Iwasa, T. Mitani: NMR studies of ammoniated alkali fullerides International Symposium on Nanonetwork Materials.

Y. Maniwa, H. Ikejiri, H. Tou, S. Masubuchi, S. Kazama, M. Yasukawa and S. Yamanaka: NMR Studies of Alkali-Doped C<sub>60</sub> Polymers International Symposium on Nanonetwork Materials.

K. Kitazume, H. Tou, Y. Maniwa, M. Kosaka and K. Tanigaki: NMR Studies of Alkali-Doped C<sub>60</sub> Superconductors with Small Lattice Constants.

H. Kira, H. Tou, Y. Maniwa, and Y. Murakami: Magnetic properties of K-absorbing Zeolite LTA.

H. Sakamoto, H. Tou, Y. Maniwa, H. Ishii, E. A. Reny, and S. Yamanaka: NMR Studies of Silicon Clathrate Compounds.

K. Mizoguchi, M. Machino, H. Sakamoto, T. Kawamoto, M. Tokumoto, A. Omerzu and D. Mihailovic: Magnetic properties of TDAE-C<sub>60</sub> under pressure.

S. Kobayashi, H. Sakamoto, K. Mizoguchi, M. Kosaka and K. Tanigaki: EPR in RbC<sub>60</sub> under pressure. (Oral)

The 199th Meeting of the Electrochemical Society, Washington, D.C., USA, March 25-29, 2001

K. Mizoguchi, M. Machino, S. Kobayashi, H. Sakamoto, T. Kawamoto, M. Tokumoto, M. Kosaka, K. Tanigaki, A. Omerzu and D. Mihailovic: Pressure study on magnetic fullerides by ESR. (Invited)

H.Tou, K. Kitazume, N. Muroga, Y. Maniwa, T. Takenobu, H. Shimoda, T. Mitani, M. Kosaka, K. Tanigaki, Y. Iwasa: Magnetism and Superconductivity in Ammoniated Alkali Fullerides. (Invited)

### 3) 学会誌等

なし

# 電子物性研究室

## 1. 研究活動の概要

H12年度に於ける当研究室の研究活動は、以下のテーマについて行われた。

### 1) f-電子系強相関伝導物質

希土類やアクチナイド元素を含む物質では、f-電子と伝導電子の強い相関効果に起因する興味深い現象が出現する。それらの内、以下のテーマについて重点的に研究を進めた。

(a) 充填スクッテルダイト  $RT_4X_{12}$  (R:希土類、T:Fe,Ru,Os、X:Pnictogen) の異常物性

この物質系は、R、T、Xの置換により変化に富んだ物性を示し、また優れた熱電特性を示すことから、基礎、応用の両面から研究が盛んに進められている。その結晶構造は、Rと最近接Xとのイオン間距離が長く、Rの最近接Xの数が12と多いという特徴を持つ。前者によりRの4f-電子準位が相対的に低く、2原子間の混成効果は小さいにもかかわらず、後者のためRとXとの実質的な混成効果は大きい。TとXの混成バンドが伝導電子を形成してフェルミ準位近傍に大きな状態密度のピークを生じ、大きな熱電能の可能性を与える。R、T、Xの置換により伝導電子の特性が大きく移り変わり、金属-非金属転移、価数揺動、近藤半導体、重い電子状態等々、この結晶構造の特殊性に起因する変化に富んだ異常物性が現れる。つまり、特異な結晶構造が、物理的異常物性と熱電材料としての特性との両方が現れ得る舞台となっている。我々は、この系の純良単結晶育成を行い、種々の物性測定を行うとともに、学内外のグループと共同研究を行った。その一部を以下に例示する。

(a-1)  $PrFe_4P_{12}$  の重い電子状態と 6.4K 相転移の秩序パラメーター

この物質が、4f 電子の局在性の強い Pr 化合物としては極めて異例な、静止質量の 80 倍を超える重い電子状態を示すことを de Haas-van Alphen (dHvA) 効果の測定により明らかにした。これは、上記のスクッテルダイト構造の特殊性 (12 個の P という大きな配位数による混成効果の増強) として、ある程度理解できる。この事実は、共同研究者らによる、超音波吸収実験、光電子分光実験の結果と矛盾しない。更に、フェルミ面の形状が  $LaFe_4P_{12}$  のものとは大きく異なり、しかも、フェルミ面断面積が顕著に磁場に依存するという興味深い結果を得た。4f 電子が局在していれば、伝導電子の数は変わらず、 $LaFe_4P_{12}$  とフェルミ面は変わらないはずである (実際、 $NdFe_4P_{12}$  の場合はこの予想があてはまることを確認した)。フェルミ面の違いの理由として、4f 電子が遍歴していることによるフェルミ面の根本的な違いが考えられるが、大きなスピン分裂効果の可能性も否定できない。

この物質の、もう一つの特徴は当初は反強磁性転移と考えられていた約 6.4K の相転移である。磁化の異方性は結晶場基底状態が非磁性であることを示唆し、中性子散乱の結果も磁気的秩序の可能性を否定している。この相転移の秩序パラメーターが何なのか、Pr 化合物としての重い電子状態ということを考慮すると、四重極秩序・四重極近藤効果を期待させる結果となっている。更に、広範な物理量の測定を行い、本質の追究を続ける必要がある。

(a-2)  $RRu_4Sb_{12}$  系の単結晶育成と物性評価

この物質系については基本的物性測定の報告はあるものの、多くの問題が残されており、 $RFe_4P_{12}$  の参照系としても詳しい実験が要請されている。我々は、この系についても純良単結晶の育成を試み成功した。dHvA 効果の測定を行い、 $LaRu_4Sb_{12}$  と  $PrRu_4Sb_{12}$  のフェルミ面の形状が類似

し、質量増強も小さいことを確認した。これは、他の物性測定からも予想された  $\text{PrRu}_4\text{Sb}_{12}$  中の f 電子の局在性を確認する実験となった。この事実は、この系の格子定数が  $\text{RFe}_4\text{P}_{12}$  に比較し大きいこと、大きな配位数にも係わらず、混成が小さいとして、同一結晶構造での混成効果の違いとして統一的に理解できる。一方、電気抵抗が低温で非フェルミ液体的振る舞いを示すことが報告されていた  $\text{CeRu}_4\text{Sb}_{12}$  において、電子輸送特性の測定を行った。電気抵抗での約 4K 以下の非フェルミ液体的振る舞いを追試するとともに、同じ温度領域で熱電能に急激な増大が現れることを見出し、この物質の基底状態の異常性を確認した。抵抗、ホール係数、熱電能とも約 100K 以上では温度低下とともに増大し、高濃度近藤系特有の振る舞いを示すが、低温でのホール係数が、 $R_H > 5 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{C}$  と極めて大きくなることから、この物質が重い電子系半金属であることを示唆している。(以上のテーマは、阪大：大貫グループ、播磨尚朝助教授、都立大：神木グループ、宮原グループ、新潟大：後藤・Donniグループ、岩手大：吉澤グループとの共同研究である。)

#### (b) $\text{CeRu}_2\text{Si}_2$ のメタ磁性的振る舞いの一軸性圧力効果

正方対称結晶  $\text{CeRu}_2\text{Si}_2$  は基底状態は非磁性であり、電子比熱係数  $\gamma=350 \text{mJ}/\text{mol}\cdot\text{K}^2$  を持つ重い電子化合物であるが、c 軸方向に 7.7T の磁場を加えるとメタ磁性的に Ce の磁気モーメントが増大することが観測される。このメタ磁性の起源として、結晶異方性を反映した異方的混成効果により、フェルミ面近傍に存在する微妙な準粒子状態密度によるもの、4f 電子の遍歴・局在転移によるもの、等の解釈が試みられているが、未だコンセンサスは得られていない。我々は、異方性制御の観点から一軸性圧力効果が有効であると考え、純良単結晶を育成し一軸性圧力効果の実験を行った。始めに、磁場及び圧力を、結晶の a 軸と c 軸に平行に加える二つの配置で磁気測定を行い、異方性の効果を評価した。帯磁率の温度依存性に与える一軸性圧力効果は極めて異方的で、前者の配置では圧力依存性は小さく、圧力増加に伴う帯磁率の僅かな増加のみが観測された。一方、後者の配置では常圧下で約 10K に観測される帯磁率のピーク温度は 2K/kbar の割合で上昇する。ピーク温度は単純には近藤温度に対比され、c 軸方向の圧力増加に伴う混成効果の増強を示唆する結果となっている。同時に、ピーク値は圧力の増加とともに急激に抑制され、帯磁率の異方性は急激に減少している。常圧下での帯磁率の異方性は、結晶場基底状態の異方性を反映するとされており、上記の結果は c 軸方向の一軸性圧力により、基底状態の異方性が減少することを示している。更に、もう一つの配置(磁場を c 軸、圧力を a 軸に平行)で測定し、以上の結論を更に補強する結果を得た。高磁場磁気抵抗の一軸圧力のメタ磁性転移磁場への異方的効果の観測から、異方的混成に基づく理論的モデルに矛盾しない結果を得た。

## 2) 微小寸法を有する磁性体

これからの物性実験の可能性を開く一つの方向として、最先端技術を積極的に利用した実験領域の開拓が上げられる。以下の二つのテーマは、最先端の薄膜作製技術、微細加工技術を用いて作製されたメソスケールの磁性体や、その超伝導体との複合構造の伝導現象に関するものである。

#### (a) 微小トンネル磁気抵抗素子のノイズスペクトル

薄い酸化膜を二つの強磁性で挟んだトンネル素子は、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抵抗が大きく変化する。この現象の概略は、トンネル確率が、各々の強磁性層に於ける同じスピン方向の電子の状態密度の積に比例するとして説明されているが、多くの理解されない実験事実が残されている。我々は、通常のトンネル磁気抵抗とノイズスペクトルの同時測定を行うことにより、微小な接合領域でのトンネル過程でのノイズの機構の解明、磁気揺らぎの

時間依存性に着目して実験と解析を行った。ノイズスペクトル測定より、 $1/f$  的ノイズの存在を確認し、その温度依存、磁場依存の詳細な実験と解析を行った。また、トンネル断面積の小さな試料に於いて、2レベル揺動の振る舞いを見出し、ドメインの揺らぎによる解釈を与えた。(これは NEC 基礎研・柘植グループとの共同研究である)

#### (b) 単一原子層制御 Au/Fe 人工格子の電子輸送特性

最先端の薄膜作製技術を用いて、伝導電子のスピン拡散距離より小さいスケールを持つ人工格子が作製され、スピンの依存した散乱現象が初めて主役として登場したのが巨大磁気抵抗効果である。最近では、単原子層の Au と Fe を交互に積層した人工格子、更には 1 原子層以下の置換部分原子層からなるものまでが作られるようになった。この場合、もはや各々の Au、Fe 層はバルクのままでありえず、全く新しい物性が期待される。我々は、単原子層 Au/Fe 人工格子、その Fe 層を部分的に Au で置換した人工格子の輸送効果測定を行った。その結果、磁化測定で予想されていた垂直磁化を、全ての試料で確認した。更に、低温領域で Fe 成分の減少に伴う異常ホール係数の符号変化を見出し、スピン分裂した d バンドとフェルミエネルギーの相対位置の変化に伴うものであると解釈した。(これは、東北大金研・藤森・高梨グループとの共同研究である)

上記 2 テーマは、ASET 及び SRC のサポートを受けて行われた。

### 3) 金属酸化物の低次元電子相互作用

3d、4d 遷移金属酸化物の低次元結晶育成と、新奇物理現象の探索を行った。これまで、2次元電気伝導体  $\text{Te}_4\text{Mo}_{20}\text{O}_{62}$ 、1次元反強磁性体  $\text{VOMoO}_4$ 、2次元フェリ磁性体  $(\text{V}_{0.5}\text{Mo}_{0.5})_2\text{O}_5$  を新たに合成した。さらに、1次元反強磁性体  $\text{VOMoO}_4$  の量子力学的不安定性による強い電子格子相互作用と磁氣的、電氣的性質に及ぼす効果の解明を進めている。また、熱電材料としての応用研究も開始した。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

Y. Aoki, M. A. Chernikov, H. R. Ott, H. Sugawara and H. Sato: Thermal Conductivity of  $\text{CeAuAl}_3$ : Evidence of Phonon Scattering by Ce Magnetic Moment Fluctuations, *Phys. Rev. B* **62** (2000) 87-90.

N. V. Baranov, E. Bauer, R. Hauser, A. Galatanu, Y. Aoki, and H. Sato: Field-induced phase transitions and giant magnetoresistance in  $\text{Dy}_3\text{Co}$  single crystals, *Eur. Phys. J. B* **16** (2000) 67-72.

S. R. Saha, H. Sugawara, T. D. Matsuda, Y. Aoki, H. Sato and E. V. Sampathkumaran: Magnetic, Thermal, and Transport Properties of Single Crystals of Antiferromagnetic Kondo-lattice  $\text{Ce}_2\text{PdSi}_3$ , *Phys. Rev. B* **62** (2000) 425-429.

Y. Maniwa, H. Sakamoto, H. Tou, Y. Aoki, H. Sato, F. Shimizu, H. Kawaji and S. Yamanaka: NMR Studies of Silicon Clathrate Compounds, *Mol. Cryst. and Liq. Cryst.* **341** (2000) 497-502.

Y. Tokiwa, H. Harima, D. Aoki, S. Nojiri, M. Murakawa, K. Miyake, N. Watanabe, R. Settai, Y. Inada, H. Sugawara, H. Sato, Y. Haga, E. Yamamoto and Y. Ōnuki: Fermi Surface Properties of  $\text{USi}_3$ , *J. Phys. Soc. Jpn.* **69** (2000) 1105-1112.

H. Honma, Y. Inada, R. Settai, S. Araki, Y. Tokiwa, T. Takeuchi, H. Sugawara, H. Sato, K. Kuwahara, M. Yokoyama, H. Amitsuka, T. Sakakibara, E. Yamamoto, Y. Haga, A. Nakamura H. Harima and Y. Ōnuki: Magnetic and Fermi Surface Properties of the Ferromagnetic Compound  $UGa_2$ , J. Phys. Soc. Jpn. **69** (2000) 2647-2659.

H. Sugawara, Y. Abe, Y. Aoki, H. Sato, M. Hedo, R. Settai, Y. Ōnuki and H. Harima: The Fermi Surface in the Filled Skutterudite  $RFe_4P_{12}$  (R=La and Nd), J. Phys. Soc. Jpn. **69** (2000) 2938-2946.

Y. Aoki, H. R. Sato, H. Sugawara and H. Sato: Anomalous Magnetic Properties of Heusler Superconductor  $YbPd_2Sn$ , Physica C **333** (2000) 187-194.

Y. Aoki, J. Urakawa, H. Sugawara, H. Sato, P.E. Markin, I.G. Bostrem, and N.V. Baranov: Specific heat and magnetocaloric effect study on multiple field-induced phase transitions in  $HoGa_2$ , Phys. Rev. B **62** (2000) 8935-8941.

T. D. Matsuda, H. Sugawara, Y. Aoki, H. Sato, A. V. Andreev, Y. Shiokawa, V. Sechovsky and L. Havela: Transport Properties of the Anisotropic Itinerant-electron Metamagnet  $UCoAl$ , Phys. Rev. B **62** (2000) 13852-13855.

H. Sato, Y. Abe, H. Okada, T. D. Matsuda, K. Abe, H. Sugawara and Y. Aoki: Anomalous Transport Properties of  $RFe_4P_{12}$  (R: La, Ce, Pr, and Nd), Phys. Rev. B **62** (2000) 15125-15130.

Y. Higuchi, H. Sugawara, Y. Aoki and H. Sato: Anisotropic Magnetization in  $DyCo_2$ , J. Phys. Soc. Jpn. **69** (2000) 4114.

D. Aoki, N. Suzuki, K. Miyake, Y. Inada, R. Settai, K. Sugiyama, E. Yamamoto, Y. Haga, Y. Ōnuki, T. Inoue, K. Kindo, H. Sugawara, H. Sato and H. Yamagami: Electronic States of the Antiferromagnet  $UGa_3$ , J. Phys. Soc. Jpn. **70** (2001) 538-346.

H. Wada, Y. Tanabe, M. Shiga, H. Sugawara and H. Sato: Magnetocaloric effects of Laves phase  $Er(Co_{1-x}Ni_x)_2$  compounds, J. Alloys and Compounds **316** (2001) 245-249.

I. Shiozaki, M. Ohashi, M. Koyano and S. Katayama: Low-Dimensional Magnetism and the related Properties of  $VOMoO_4$ , Physica B **288** (2000) 1621-1622.

## 2) 学会講演

日本物理学会春の分科会 2000年3月22日～25日 (関西大学)

湯浅清司、並木孝洋、菅原 仁、青木勇二、佐藤英行：  $Ce_{1-x}La_xFe_2Ge_2$  の電子輸送効果 III .

並木孝洋、浦川淳、菅原 仁、青木勇二、佐藤英行、接待力生、大貫惇睦：  $CeCu_{6-x}Au_x$  (x=0, 0.1) の電子輸送測定 .

菅原 仁、青木勇二、佐藤英行、山口明啓、接待力生、大貫惇睦：  $PrSn_3$  の電子輸送効果 .

松田達磨、阿部敬介、綿貫文人、Shanta Ranjan Saha、菅原 仁、青木勇二、佐藤英 行：  
 $RFe_4P_{12}$  (R=Pr, Nd) における圧力効果 .

阿部敬介、松田達磨、綿貫文人、菅原 仁、青木勇二、佐藤英行： $RT_4Sb_{12}$  の電子輸送特性 .

常盤欣文、播磨尚朝、青木大、野尻さやか、村川政夫、三宅耕作、渡辺なるみ、撰待力生、稲田  
佳彦、菅原 仁、佐藤英行、芳賀芳範、山本悦嗣、大貫惇睦： $USi_3$  の磁気抵抗とドハース・ファン  
アルフェン効果 .

花田玲央、青木勇二、菅原 仁、佐藤英行、小野輝男、宮島英紀、重藤訓志、新庄輝也：強磁性  
細線の磁化状態の多点電圧測定による観察 .

S. R. Saha, H. Sugawara, Y. Aoki, and H. Sato: Magnetic Properties in  $CeT_2X_2$  (T=Ru, Ni,  
Cu and X=Si or Ge) under Uniaxial-stress.

応用磁気学会第46回超伝導マグネティクス専門研究会 2000年7月21日 (早稲田大)

青木勇二、松田達磨、菅原 仁、佐藤英行：熱測定による強相関電子系の研究 .

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

木下日登美、水野友人、森田知也、青木勇二、菅原 仁、佐藤英行、松田和博、三塚 勉、上條  
敦、柘植久尚：強磁性トンネル接合  $NiFe/Al_2O_3/NiFe$  のノイズ測定 .

菅原 仁、松田達磨、阿部敬介、青木勇二、佐藤英行、野尻さやか、稲田佳彦、撰待力生、大貫  
惇睦、播磨尚朝：充填スクッテルダイト  $REFe_4P_{12}$  の de Haas-van Alphen 効果 .

日本物理学会第55回年会 2000年9月22日～25日 (新潟大学)

青木勇二、並木孝洋、松田達磨、阿部敬介、菅原 仁、佐藤英行：充填スクッテルダイト化合物  
 $RFe_4P_{12}$  系の熱物性 .

湯浅清司、岡田英之、阿部幸裕、阿部敬介、松田達磨、青木勇二、菅原 仁、佐藤英行：  
 $La_{1-x}Ce_xFe_4P_{12}$  の電子輸送特性 .

並木孝洋、青木勇二、松田達磨、阿部敬介、菅原 仁、佐藤英行：充填スクッテルダイト化合物  
 $PrFe_4P_{12}$  の磁場中比熱 .

松田達磨、阿部敬介、Shanta Ranjan Saha、並木孝洋、菅原 仁、青木勇二、佐藤英行：  
 $PrFe_4P_{12}$  における圧力効果 II .

菅原 仁、松田達磨、阿部敬介、青木勇二、佐藤英行、野尻さやか、稲田佳彦、撰待力生、大貫  
惇睦： $PrFe_4P_{12}$  のドハース・ファンアルフェン効果 .

阿部敬介、松田達磨、並木孝洋、菅原 仁、青木勇二、佐藤英行、稲田佳彦、撰待力生、大貫惇  
睦： $PrRu_4Sb_{12}$  のドハース・ファンアルフェン効果 .

阿部敬介、松田達磨、綿貫文人、菅原 仁、青木勇二、佐藤英行：PrRu<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> の電子輸送特性．  
中西良樹、清水隆行、菅原 仁、佐藤英行、吉澤正人：PrFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub> における  $T_N$  近傍の弾性異常．  
石井広義、大部健司、篠田元樹、高山泰弘、宮原恒あき、松田達磨、菅原 仁、佐藤英行：  
RFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub>(R=La、Ce、Pr) の共鳴光電子分光．

水野友人、青木勇二、菅原 仁、佐藤英行、高梨弘毅、三谷誠司、藤森啓安：単原子層 Fe/Au 人工格子の電子輸送特性．

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

木下日登美、水野友人、森田知也、青木勇二、菅原 仁、佐藤英行、松田和博、三塚勉、上條敦、  
柘植久尚：NiFe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/NiFe のノイズおよびトンネルスペクトル．

久志野彰寛、青木勇二、並木孝洋、石崎欣尚、山崎典子、佐藤英行、大橋隆哉、満田和久、矢沢孝：  
断熱消磁冷凍機への応用を目指した Y<sub>2.1</sub>Er<sub>0.9</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> の特性評価

#### 物性研究所短期研究会「スクッテルダイト化合物の異常物性と関連する熱電材料」

2000年10月24日～25日（東大物性研）

松田達磨、菅原 仁、Shanta Ranjan Saha、阿部敬介、並木 孝洋、青木勇二、佐藤英行：  
PrFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub> の磁化及び輸送特性の圧力効果．

湯浅清司、岡田英之、阿部幸裕、阿部敬介、松田達磨、青木勇二、菅原 仁、佐藤英行：  
La<sub>1-x</sub>Ce<sub>x</sub>Fe<sub>4</sub>P<sub>12</sub> の電子輸送特性．

阿部敬介、松田達磨、綿貫文人、菅原 仁、青木勇二、佐藤英行：RERu<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> の電子輸送特性．

菅原 仁、松田達磨、阿部敬介、青木勇二、佐藤英行、野尻さやか、稲田佳彦、摂待力生、大貫  
惇睦、播磨尚朝：充填スクッテルダイト化合物におけるドハース・ファンアルフェン効果．

青木勇二、並木孝洋、松田達磨、阿部敬介、菅原 仁、佐藤英行：重い電子系 PrFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub> の異常な  
低温秩序相の熱物性．

岩佐和晃、渡辺靖彦、桑原慶太郎、神木正史、菅原 仁、青木勇二、松田達磨、佐藤英行：  
PrFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub> における低温秩序相のX線回折による観測：電荷自由度における相転移．

中西良樹、清水隆行、松田達磨、菅原 仁、佐藤英行、吉澤正人：超音波による PrFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub> の弾性  
特性の研究．

#### 物性研究所短期研究会「強磁場、高圧下における遷移金属化合物の磁性」

2000年12月14日～15日（東大物性研）

菅原 仁、井上 修、西垣語人、樋口洋介、青木勇二、佐藤英行、辺土正人、摂待力生、大貫  
惇睦、樋口雅彦、長谷川彰：RCO<sub>2</sub>(R=希土類)の純良単結晶育成と物性．

第14回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム 2001年1月12日～14日  
(広島大学)

大部健司、篠田元樹、李徹、高山泰弘、石井広義、宮原恒あき、松田達磨、菅原 仁、佐藤英行：  
RFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub>(R=La、Ce、Pr)の共鳴光電子分光。

物性研究所短期研究会「研究会シリーズ－物質探索と物性研究－」  
2001年3月8日～10日(東大物性研)

佐藤英行、菅原 仁、松田達磨、阿部敬介、青木勇二、野尻さやか、稲田佳彦、撰待力生、大貫  
惇睦、播磨尚朝：充填スクッテルダイト化合物の示す異常な振る舞い－RFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub>, RRu<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub>系を  
中心に－。

国際会議

International Confererece on Magnetism (ICM2000), Recife Brasil, August 6-11, 2000

H. Sugawara, T.D. Matsuda, K. Abe, Y. Aoki, H. Sato, S. Nojiri, Y. Inada, R. Settai and Y.  
Ōnuki: Observation of Heavy Electrons in the Filled Skutterudite PrFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub> via the de Haas-van  
Alphen Effect.

T. D. Matsuda, K. Abe, F. Watanuki, T. Namiki, S. R. Saha, H. Sugawara, Y. Aoki and H. Sato:  
Pressure Effect on the Magnetic Properties in PrFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub>.

S. R. Saha, H. Sugawara, Y. Aoki and H. Sato: Magnetic Properties in CeRu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> and CeNi<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub>  
Under Uniaxial-pressure.

The 4th International Conference on f-electrons (ICFE'4), Madrid Spain, September 17-21, 2000

L. Keller, P. Fischer, T. Herrmannsdörfer, A. Dönni, H. Sugawara, T. D. Matsuda, K. Abe,  
Y. Aoki and H. Sato: Stuructural and Magnetic Properties of RFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub> (R=Pr, Nd) Studies by  
Neutron Diffraction.

International Symposium on New Developments in Strongly Correlated Electron Phase under  
Multiple Environment, Osaka, November 6-8, 2000

Y. Aoki, T. Namiki, T. D. Matsuda, K. Abe, H. Sugawara, H. Sato: Anomalous Ordered Phase  
in the Heavy-Electron PrFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub> studied by Specific Heat.

H. Sugawara, T. D. Matsuda, K. Abe, Y. Aoki, H. Sato, S. Nojiri, Y. Inada, R. Settai, Y. Ōnuki  
and H. Harima: Unusual Heavy Electron State in PrFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub>.

3) 著書等

佐藤英行：「物性物理学」第3章「金属電子論」(朝倉書店)

# 中性子散乱物性物理研究室

## 1. 研究活動の概要

本研究室の2000年度における研究活動のうち、中性子散乱による研究に関しては、国内では、日本原子力研究所において、物性研共同利用12課題、原研との協力研究1課題、およびKEK物質構造研究所において共同利用1課題の研究を行い、また、国外ではフランスのLLB研究所、ヨーロッパ連合のILL研究所およびスイスのPSI研究所において共同研究計5課題、さらにイギリスのRAL研究所においても日英協力事業に基づく1課題の研究を行った。さらに、他のグループとも協力して中性子散乱の新しい技術の開発にも寄与した。中性子散乱以外では、SPring8およびKEK放射光施設において計2課題のX線回折の研究を共同研究により行った。ま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成果のうち主なものの概要を述べる。

### 1) 少数キャリアー強相関系

#### a. Ceモノプニクタイト, $CeX$ ( $X=P, As, Sb, Bi$ )、の電子状態(岩佐, 神木)

Ceモノプニクタイトは、近藤効果に類似の異常な伝導現象とともに、極めて複雑な磁気相図を示すことで知られている。我々は、これまでの中性子散乱による研究により、これらの特異な性質が、キャリアー数が極めて少ないことによって生じた、 $p-f$ 混成効果を媒介とした磁気ポーラロン効果によるものであり、その結果、Ceモノプニクタイト全系における多彩且つ特異な物性が、キャリアー数を主要なパラメータとして統一的に記述できることを明らかにしてきた。この現象をより詳しく研究するため、CePとCeSbについて、サファイア・アンビル型高圧セルを用いた超高压における中性子回折の実験を進め、本年度は最高で3.2GPaまで(CeP)、あるいは5GPaまで(CeSb)の圧力下で、新しい磁気相をいくつか見いだした(原研先端研:長壁豊隆氏との共同研究)

さらに、CeSbおよびCePに関して、前年度来の低温・高圧下(CeP)でのX線回折の実験において観測された、超格子反射の詳しい解析を行った結果、観測された回折パターンが、2種類の異なる対称性を持ったCeイオンの存在に伴う、格子の変調と電荷分布の変調の干渉効果により説明できることが明らかになり、これらの物質の特異な性質が、磁気ポーラロン効果によるものであることがいっそう明らかになった(東北大科研:野田幸男, 菖蒲敬久, 各氏との共同研究)

また、LLB研究所および原研において、低温磁気相で単一メインとなるCeSbの単結晶試料に対するフォノンの測定を行い、前年度発見した局在モード的な新しい励起が、 $p-f$ 混成効果の強い強磁性Ce面内での振動モードであることを見いだした(LLB:J.-M. Mignot, M. Braden, 金材研:北澤英明, 各氏との共同研究)

#### b. $Yb_4As_3$ 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、キャリアー数が極端に少ないにもかかわらず、重い電子異常を示す物質である。これまでの研究の結果、この物質においては、電荷秩序により $Yb^{3+}$ の1次元配列が形成されること、またその結果、系の低エネルギー励起が $S=1/2$ ・一次元ハイゼンベルグ反強磁性体のそれによく近似され、比熱・帯磁率に見られる重い電子異常もこれにより説明できることを明らかにしてきた。さらに、 $Yb^{3+}$ イオン間のジャロシンスキー・守谷相互作用のため、磁場下で1次元鎖内に交替磁場が誘起されるとする押川等の理論を支持する実験結果も得た。本年度は、昨年度に引き続きILL研究所において磁場下の中性子非弾性散乱の実験を行い、磁場下の磁気励起スペクト

ルの詳細な測定を行った。その結果、 $\text{Yb}_4\text{As}_3$  においては、上記の交替磁場が  $S=1/2$ ・一次元ハイゼンベルグ反強磁性に対し、摂動としては扱えない強い効果を及ぼしていることを示唆する実験結果を得た（LLB：J.-M. Mignot，ILL：A. Heiss，新潟大工：落合 明，青木英和，筑波産学協同推進：鈴木 孝，各氏との共同研究）

我々はさらに、 $\text{Yb}_4\text{As}_3$  のフォノンの測定を継続して行い、超音波で観測された音速の  $C_{44}$  モードのソフトニングに対応する、 $[100]$  方向の TA フォノンが、電荷秩序転移の直上の温度でソフトニングを示すことを見いだした（新潟大工：落合 明，青木英和，筑波産学協同推進：鈴木 孝，各氏との共同研究）。

## 2) 希土類化合物における高濃度近藤効果・多重極秩序・電荷密度波

### a. 高濃度近藤系 $\text{Ce}_x\text{La}_{1-x}\text{B}_6$ の新しい秩序相（岩佐，桑原，神木）

$\text{CeB}_6$  は、近藤効果と RKKY 相互作用および  $f$  電子の多重極相互作用の競合系として知られている。最近、 $\text{Ce}_x\text{La}_{1-x}\text{B}_6$  において新たに IV 相と名付けられた未知の相が約 1K 付近の温度で見いだされ、これが新たな多重極秩序相ではないかとして興味を持たれている。我々は、この相の実体を解明するために、 $\text{Ce}_{0.75}\text{La}_{0.25}\text{B}_6$  をターゲットとして 1999 年来、極低温における中性子回折による研究を進めている。これまでに、原研において、単結晶試料あるいは単結晶の  $[111]$  軸方向に 1 軸性圧力を加えた試料、および多結晶試料について実験を行ってきたが、磁気秩序の発見には至らなかった。そこで、本年度は、多結晶中性子回折の実験を、より強力な粉末中性子回折装置のあるスイスの PSI 研究所において行った。その結果、IV 相より低温側 ( $T \leq 1\text{K}$ ) に現れる III 相の磁気散乱は観測することができたが、IV 相においては、これに匹敵する強度の磁気散乱は見られなかった。この結果は、IV 相において磁気秩序があるとしても Ce あたりの磁気モーメントは、III 相のそれよりかなり小さい事を示している。さらに、原研において、 $[100]$  方向に 1 軸性圧力を加えた試料についても実験を行ったが、やはり磁気散乱の観測には至らず、この問題の解明はさらに今後の継続課題となった（PSI：L. Keller，新潟大：A. Dönni，原研先端基礎研：目時直人，小池良浩，長壁豊隆，東北大理：国井 暁，各氏との共同研究）

### b. 重い電子系 $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ の超周期秩序（岩佐，神木）

多彩な物性を示す充填スクッテルダイト鉱化合物のひとつである  $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$  は、重い電子現象を示す Pr 化合物として注目されている。この物質の 6.5 K（零磁場下）で見られる相転移の機構がこれまで謎であったが、低温・磁場中 X 線回折を行った結果、この秩序相で明瞭な超格子反射を観測し、これが主に Fe サイトの変位による格子変調で説明できることを明らかにした。これは、電気抵抗などから指摘されたフェルミ面のネスティングによる超周期構造の形成を支持する実験結果である。磁場下でこの秩序相が消滅したときに重い電子現象が現れるので、この秩序相の真のオーダーパラメータを明らかにする必要がある（電子物性研究室と電総研：李哲虎氏との共同研究）

### c. 磁性-非磁性境界付近の重い電子系化合物の磁気励起（門脇）

重い電子系化合物のなかで反強磁性-非磁性境界の付近に位置するものは、メタ磁性、非フェルミ液体、超伝導などの興味深い性質を示す。本研究は、反強磁性-非磁性境界の非磁性側にある Ce-系の物質の磁気励起、すなわち反強磁性揺動を単結晶試料で調べることを目的としている。メタ磁性を示す  $\text{CeRu}_2\text{Si}_2$  の強磁場中での非弾性散乱スペクトルの変化、非フェルミ液体の振舞を示す  $\text{CeNi}_2\text{Ge}_2$  の磁気揺動と関連物質  $\text{Ce}(\text{Ni}_{0.65}\text{Pd}_{0.35})_2\text{Ge}_2$ ， $\text{Ce}(\text{Ni}_{0.7}\text{Rh}_{0.3})_2\text{Ge}_2$  の磁気構造を研究している（阪大理：河原崎修三，原研：佐藤真直，富山県立大工：福原忠，前沢邦彦，

CEA : J. Flouquet , 物性研 : 石川征靖 , 各氏との共同研究 )

d. 近藤半導体 CeRhAs の電荷密度波状態 ( 岩佐 , 神木 )

CeRhAs は Ce の  $4f$  電子の寄与する近藤半導体であると考えられている . 低温での半導体的な電気抵抗値の増加に加えて , 165 K と 235 K にも電気抵抗の異常が見られ , 何らかの相転移が示唆されていた . 低温 X 線回折実験を行ったところ , それぞれの温度以下で波数ベクトル  $(0, 1/2, 1/2)$  と  $(0, 1/3, 1/3)$  で表される超格子が観測された . この結果は多段の転移が複雑なバンド構造を反映した電荷密度波の形成であることを示唆する . さらにこの転移と近藤ギャップの形成との関連を解明する必要がある ( 広島大 : 高島敏郎 , 電総研 : 李 哲虎 , 各氏との共同研究 )

e.  $\text{Eu}_3\text{Ir}_4\text{Sn}_{13}$  における超周期構造転移と磁気秩序 ( 岩佐 , 桑原 , 神木 )

$\text{Eu}_3\text{Ir}_4\text{Sn}_{13}$  は 10 K と 58 K に二段の相転移を示し , 58 K 以下では波数ベクトルがおおよそ  $(1/2, 1/4, 1/4)$  で表される超周期の結晶構造変調を示すことを過去の X 線実験で見出した . 一方 , 10 K では反強磁気秩序が起きると考えられ , それを実証するために粉末中性子散乱実験を行った . その結果 , 波数ベクトル  $(1, 1/2, 1/2)$  の反強磁気構造による散乱が観測された . この反強磁気構造は 58 K で生じる超周期結晶構造の半分の周期をもつものであり , これら二つの相転移をもたらす電子状態を明らかにする事が次の課題である ( 電子物性研究室との共同研究 )

3) アクチナイド化合物の電子状態

a. 重い電子系強磁性超伝導体  $\text{UGe}_2$  の圧力下磁気形状因子 ( 桑原 , 神木 )

$\text{UGe}_2$  は異方性の強い強磁性体であるが , 系の  $5f$  電子は重い電子の特徴を持ち遍歴的と考えられている . 最近 , この系が , 約 1.2 GPa 前後の圧力下において , 強磁性秩序を保ったまま約 0.8 K で超伝導状態に転移することが報告され , 非常に関心が持たれている . そこで , 我々は中性子散乱用圧力セルを新たに開発し , 偏極中性子回折により約 1.3 GPa の高圧下で磁気形状因子の測定を行った . その結果 , 圧力下での磁気形状因子は前年度に行った常圧下での結果と同様な形をしており , 磁気モーメント分布の相対的な形状に関しては , 常圧下とは大きな差がないことがわかった ( 原研先端基礎研 : 芳賀芳範 , 大貫惇睦 , 東大物性研 : 上床美也 , 各氏との共同研究 )

b.  $\text{URu}_2\text{Si}_2$  における “ 微弱反強磁性状態 ” ( 桑原 )

$\text{URu}_2\text{Si}_2$  における  $T_0 = 17.5$  K での 2 次相転移の機構はこの系の最大の問題点の一つである . 今年度は , 前年度に行った圧力下中性子散乱の結果を踏まえて , 圧力下において放射光を用いた粉末 X 線回折及び NMR の実験を行った . 今年度の最も重要な成果は ,  $T_0$  以下で中性子散乱から観測されていた微少磁気モーメント (  $\sim 0.03\mu_B/U$  ) は , 実は試料中に部分的に形成された約  $\sim 0.2\mu_B/U$  の磁気モーメントによる反強磁性相からくるものであることが NMR 実験により明らかになったことである . この実験事実は  $T_0$  での真の秩序変数が磁気双極子ではないことを非常に強く示唆する ( 北大 : 網塚浩 , 横山淳 , 宮崎志功 , 野崎順 , 姫工大 : 松田和之 , 小堀洋 , 小原孝夫 , 各氏との共同研究 )

c.  $\text{U}_3\text{Pd}_{20}\text{Si}_6$  における局在  $5f$  電子状態 ( 桑原 , 神木 )

$\text{U}_3\text{Pd}_{20}\text{Si}_6$  は比熱測定等により ,  $5f$  電子が局在した傾向を示す新しいウラン化合物である . 我々はイギリスの RAL 研究所においてこの系のパルス中性子非弾性散乱の実験を行い , 結晶場励起の観測に成功した . この結果は  $\text{U}_3\text{Pd}_{20}\text{Si}_6$  の  $5f$  電子が局在していることの直接的な証拠となる . この実験結果の解析から , この系の  $5f$  電子の結晶場状態についてほぼ明らかにすることができた . さらに , この物質の単結晶試料を用いた中性子非弾性散乱の実験を行ったところ ,

局在スピンのハイゼンベルグモデルで説明することのできる，明瞭なスピン波励起の分散を観測することができた．これらの事実は，金属伝導をしめすウラン化合物では極めてまれなことであり，ウラン原子の位置に2つの異なるサイトがある複雑さはあるが，ウラン化合物の5f電子状態を研究する上で興味深い事実である（阪大極限セ：立岩尚之，ロンドン大：J. Allen，K.A. McEwen，ISIS：R. Bewly，原研先端研：目時直人，物性研：阿曾尚文，東北大極低セ：木村憲彰，青木晴善，東北大院理：小松原武美，各氏との共同研究）

#### 4) その他

##### a. 幾何学的フラストレーションを示す磁性体の磁気揺動（門脇）

結晶格子の幾何学的な形によりフラストレーションを示す磁性体は，正三角形や正四面体が基本単位となる結晶格子を持つ物質に見られる。磁氣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，磁氣的相転移を絶対零度まで起こさないもの，有限温度でスピン凍結を起こすもの，スピン液体状態などの量子的基底状態を持つものなどがある，この研究は通常の長距離秩序を示さない系をとり上げてその磁気揺動を解明することを目的としている．金属非金属転移を示すパイロクロア型酸化物  $Y_{2-x}Bi_xRu_2O_7$  の磁気揺動，絶縁体パイロクロア型酸化物  $Tb_2Ti_2O_7$ ， $Ho_2Sn_2O_7$  のスピン相関，スピン 1/2 カゴメ格子  $Cu_3V_2O_7(OD)_2 \cdot 2D_2O$  の磁気揺動を研究している（北大理：松平和之，名大理：佐藤正俊，物性研：広井善二，各氏との共同研究）

##### b. 熱中性子回折装置の開発（桑原，神木）

Sm，Gd，Dyなどの希土類元素，あるいはCdは熱中性子のよい吸収体であるため，これらの元素を含む物質の中性子回折による研究は大変困難であった．しかし，近年これらの物質に関しても，その磁気構造研究の重要性が高まっている．そこで，これらの元素の中性子吸収断面積が1eV程度のエネルギー（波長 $\sim 0.3\text{\AA}$ ）の熱中性子に対しては小さくなることに着目し，このような短波長の中性子を用いた中性子回折実験が可能となるよう，KEKのKENS中性子施設にあるMRP回折装置を大幅に改造した（KEK：新井正敏氏との共同研究）

## 2. 研究業績

### 1) 論文

M. Kohgi, K. Iwasa and T. Osakabe: Physics of low-carrier systems detected by neutron and X-ray scattering: Ce-Monopnictides case, *Physica B*, **281&282** (2000) 417-422.

K. Iwasa, Y. Arakaki, M. Kohgi and T. Suzuki: Crystal-lattice modulations associated with unusual magnetic structures in the low-carrier system CeSb, *Physica B*, **281&282** (2000) 437-439.

T. Osakabe, M. Kohgi, K. Iwasa, M. Kubota, H. Yoshizawa, Y. Haga and T. Suzuki: Magnetic structure of CeAs under high pressure, *Physica B*, **281&282** (2000) 434-436.

K. Iwasa, M. Kohgi, A. Gukasov, J.-M. Mignot, A. Ochiai, H. Aoki and T. Suzuki: Magnetic states of Yb ions in the charge ordered phase of  $Yb_4As_3$  determined by polarized-neutron scattering, *Physica B*, **281&282** (2000) 460-461.

A. Hannan, K. Iwasa, M. Kohgi and T. Suzuki: Crystal-lattice anomaly of CeSb under high pressure induced by magnetic polaron formation, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **69** (2000) 2358-2359.

- O. Sakai, M. Kohgi, H. Shiba, A. Ochiai, H. Aoki, K. Takegahara and H. Harima: Local symmetry and crystal field effects in charge-ordered  $\text{Yb}_4\text{As}_3$ , *J. Phys. Soc. Jpn.*, **69** (2000) 3633-3641.
- M. Kohgi, K. Iwasa, J.-M. Mignot, B. Fåk, P. Gegenwart, M. Lang, A. Ochiai, H. Aoki and T. Suzuki: Staggered field effect on the one-dimensional  $S=1/2$  antiferromagnet  $\text{Yb}_4\text{As}_3$ , *Phys. Rev. Lett.*, **86** (2001) 2439-2442.
- H. Kadowaki, K. Motoya, T. Kawasaki, T. Osakabe, H. Okumura, K. Kakurai, K. Umeo and T. Takabatake: Incommensurate Magnetic Structure of the Heavy Fermion Antiferromagnet  $\text{Ce}_7\text{Ni}_3$ , *J. Phys. Soc. Jpn.* **69** (2000) 2269-2279.
- K. Ohoyama, H. Yamauchi, A. Tobo, H. Onodera, H. Kadowaki and Y. Yamaguchi: Characteristic Magnetic Structure due to Antiferroquadrupolar Ordering in  $\text{Ho}^{11}\text{B}_2\text{C}_2$ , *J. Phys. Soc. Jpn.* **69** (2000) 3401-3407.
- H. Kadowaki, G. Nakamoto and T. Takabatake: Pseudogap of magnetic excitation in Kondo semiconductor  $\text{CeNi}_2\text{Sn}$ , *Physica B* **281&282** (2000) 288-290.
- B Fåk, J Flouquet, G Lapertot, T Fukuhara and H Kadowaki: Magnetic correlations in single-crystalline  $\text{CeNi}_2\text{Ge}_2$ , *J. Phys.: Condens Matter* **12** (2000) 5423-5435.
- T. Homma, E. Yamamoto, Y. Haga, R. Settai, S. Araki, Y. Inada, T. Takeuchi, K. Kuwahara, H. Amitsuka, T. Sakakibara, H. Sugawara, H. Sato, A. Nakamura, Y. Onuki: Magnetic, elastic, transport and fermisurface properties of a ferromagnetic compound  $\text{UGa}_2$ , *Physica B* **281&282** (2000) 195-196.
- K.Kuwahara, A. Okumura, M. Yakoyama, K. Tenya, H. Amitsuka and T. Sakakibara: Elastic constants of  $\text{URu}_2\text{Si}_2$  in magnetic fields, *Physica B* **281&282** (2000) 238-239.
- H. Amitsuka, K. Kuwahara, M. Yakoyama, K. Tenya, T. Sakakibara, M. Mihalik and A.A Menovsky: Non-Fermi-liquid behaviors in  $\text{R}_{1-x}\text{U}_x\text{Ru}_2\text{Si}_2$  ( $\text{R}=\text{Th}, \text{Y}$  and  $\text{La}; x \leq 0.07$ ), *Physica B* **281&282** (2000) 326-331.
- M. Yakoyama, H. Amitsuka, K.Kuwahara, A. Okumura, K. Tenya and T. Sakakibara: Unusual low-temperature behavior of the dilute uranium alloys  $\text{La}_{1-x}\text{U}_x\text{Ru}_2\text{Si}_2$  ( $x \leq 0.07$ ), *Physica B* **281&282** (2000) 395-396.
- M. Matsuda, Y. Kohori, T. Kohara, K. Kuwahara and H. Amitsuka: NMR and NQR studies of  $\text{URu}_2\text{Si}_2$ , *Physica B* **281&282** (2000) 989-990.
- K. Tenya, K. Kuwahara, H. Amitsuka, H. Ohkuni, Y. Inada, E. Yamamoto, Y. Haga, Y. Onuki: Magnetization study in the superconducting mixed state of  $\text{URu}_2\text{Si}_2$ , *Physica B* **281&282** (2000) 991-992.

## 2) 学会講演

日本物理学会春の分科会 2000年3月22日～3月25日（関西大学）

岩佐和晃，神木正史，落合明，青木英和，A. Gukasov，J.-M. Mignot，鈴木孝：Yb<sub>4</sub>As<sub>3</sub>の電荷秩序状態において磁場方向依存性を示す誘起磁気モーメント。

長壁豊隆，舘 紀秀，A. Hannan，神木正史，北澤英明，芳賀芳範，鈴木 孝：Ceモノプニクタイトの超高压下における中性子回折

菖蒲敬久，野田幸男，岩佐和晃，A. Hannan，神木正史：CePの高圧低温下での磁気秩序に伴う格子変調II。

佐賀山基，桑原慶太郎，岩佐和晃，神木正史，芳賀芳範，大貫惇睦，加倉井和久，西正和，中島健次：重い電子系UGe<sub>2</sub>の磁気形状因子と磁気励起。

松田和之，小堀洋，小原孝夫，網塚浩，桑原慶太郎：URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>の高圧下および単結晶のNMR

門脇広明，元屋清一郎，川崎澄，長壁豊隆，奥村肇，加倉井和久，梅尾和則，高畠敏郎：非フェルミ液体的な振舞いを示すCe<sub>7</sub>Ni<sub>3</sub>の中性子散乱。

日本応用磁気学会 第46回超伝導マグネティクス専門研究会「f電子系における最近の話題」  
2000年7月21日（早稲田大学）

岩佐和晃：少数キャリア系の物性 中性子散乱とX線回折で見えてきた磁性と構造。

日本物理学会第55回年会 2000年9月22日～9月25日（新潟大学）

神木正史：Yb<sub>4</sub>As<sub>3</sub>における breather 励起 中性子散乱（シンポジウム講演）

A. Hannan，岩佐和晃，神木正史，鈴木孝：CeSbにおける4f電子軌道秩序のX線回折による直接観測。

菖蒲敬久，野田幸男，岩佐和晃，A. Hannan，神木正史：CePの高圧低温下における4f電子の軌道秩序化の観測。

岩佐和晃，神木正史，J.-M. Mignot，A. Gukasov，B. Fåk，柴田尚和，落合明，青木英和，鈴木孝：Yb<sub>4</sub>As<sub>3</sub>の1次元量子スピンドイナミクスに対する磁場効果の中性子散乱による研究。

松田和之，小堀洋，小原孝夫，網塚浩，桑原慶太郎，松本武彦：URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>の高圧下および単結晶のNMR

福原忠，前沢邦彦，桑井智彦，桜井醇児，門脇広明：Ce(Ni<sub>0.65</sub>Pd<sub>0.35</sub>)<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub>の中性子回折。

安井幸夫，金田昌基，伊藤雅典，原科浩，佐藤正俊，奥村肇，加倉井和久，門脇広明：フラストレートした磁気モーメントをもつTb<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub>の動的磁気特性。

佐藤真直，小池良浩，片野進，目時直人，門脇広明，河原崎修三：重い電子系物質CeRu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>のメタ磁性における磁場誘起強磁性スピン揺らぎ - 強磁場下中性子非弾性散乱実験。

東京大学物性研究所短期研究会「スッテルダイト化合物の異常物性と関連する熱電材料」  
2000年10月24日～10月25日（東京大学物性研究所）

岩佐和晃，渡辺靖彦，桑原慶太郎，神木正史，菅原仁，青木勇二，松田達磨，佐藤英行：  
PrFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub>における低温秩序相のX線回折による観測：電荷自由度における相転移。

第3回極端条件下中性子散乱ワークショップ  
2000年3月13日～3月14日（京都大学原子炉実験所）

岩佐和晃，神木正史，J.-M. Mignot，A. Gukasov，B. Fåk，A. Hiess，P. Gegenwart，M. Lang，  
柴田尚和，落合明，青木英和，鈴木孝：Yb<sub>4</sub>As<sub>3</sub>における電荷秩序形成と磁性 交替磁場効果による一次元磁性の新しい現象。

### 国際会議

International Conference on Magnetism 2000, Recife, Brazil, Aug. 6 - Aug. 11, 2000

K. Iwasa, M. Kohgi, A. Gukasov, J.-M. Mignot, A. Ochiai, H. Aoki and T. Suzuki: Polarized Neutron Study of Anisotropic Magnetic response under Fields in the Charge Ordered Phase of Yb<sub>4</sub>As<sub>3</sub>.

The 1st International Symposium on Advanced Science Reserch (ASR-2000), Tokai, Japan, Oct. 31 - Nov. 2, 2000

K. Iwasa, M. Kohgi, A. Gukasov, J.-M. Mignot, N. Shibata, A. Ochiai, H. Aoki and T. Suzuki: One-Dimensional Magnetic State in the Charge-Ordered Phase of Yb<sub>4</sub>As<sub>3</sub> Investigated by Polarized-Neutron Measurements.

M. Kohgi, K. Iwasa, J.-M. Mignot, B. Fåk, P. Gegenwart, M. Lang, A. Ochiai and H. Aoki: Spin dynamics of the quantum spin system Yb<sub>4</sub>As<sub>3</sub> under magnetic field.

H. Sagayama, K. Kuwahara, K. Iwasa, M. Kohgi, Y. Haga, Y. Onuki, K. Kakurai, M. Nishi, K. Nakajima and N. Aso: Magnetic Form Factor in UGe<sub>2</sub>.

Int. Conf. on Advanced Neutron Source (ICANS2000), Tukuba, Japan, Nov. 6-9, 2000

H Kadowaki: Design of J-SNS Instruments by Simulation.

### 3) 科学研究費等報告

神木正史：希薄キャリアー強相関係における特異な物理現象の極端条件下の研究，平成11年度科研費（基盤研究B - 旧国際学術研究）研究成果報告書

### 4) 学会誌等

岩佐和晃：偏極中性子回折で見たCePの4f電子波動関数，研究炉ひろば（日本原子力研究所東海研究所研究炉部編集）No.1（2001）7.

神木正史：新しいストライプ状態：磁気ポーラロン結晶，パリティー，vol.16, No.4（2001）35-38.

# 計算システム研究室（情報理学）

## 1. 研究活動の概要

99年度同様、2000年度も引続き国際的な2つの素粒子実験に参加した。ひとつはCERNで2006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。我々は、2000年度はATLAS実験においては初段トリガーシステムの開発を行ない、中心となるVLSIの設計、製作を行なった。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チャーのトリガーエレクトロニクス回路及び読み出し回路（データ収集系）の設計研究をここ数年来継続して行っている。実験は40MHzで起きる陽子陽子衝突現象のうち物理学的な事象のみを抽出、解析し標準模型の中で実験的にその存在が確認されていないヒッグス粒子の探査、B中間子崩壊からのCP非保存の精密測定、トップクォークの物理やさらに4世代目のクォークの存否の確認、標準模型を超えてSUSY、テクニカラーモデルから予想される粒子の探索など多くの物理的解明を意図にして企画されている。トリガーミュオンチェンバーは陽子・陽子衝突で派生するさまざまな粒子のうち、ミュオン（ $\mu$ ）粒子を観測、同定することを目的として設置される。粒子の飛跡は電気信号に変えられ、その信号のみで簡単なパターン認知（レベル1トリガー）を行おうとするものである。

2000年度我々はこのパターン認知の方法を確立、その方法の論理回路への実装および回路のVLSI化を行った。この計画は大学院学生により強力に押し進められている。IC化は東京大学大規模集積システム設計教育センター（VDEC）の制度、設備を利用した。2000年度は4つの専用カスタムチップの制作を行った。このうち4つのVLSIのうち3つはATLASレベル1トリガーで直接利用されるものである。それらは初段処理、Low-pT及びHigh-pTパターン認識用チップである。開発結果は2000年9月にクラコフ（ポーランド）で開催されたLEB2000（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。残りの1つは関連しているが、ATLAS実験には直接使用しないものである。これは上記の3つのVLSIの重要な機能を1つにコンパクトにまとめたもので、動作周波数も40MHzをはるかにしのぎ200MHzで安定稼働する高速のものである。測定器開発テスト、ビームテストなどに利用される。またこのチップは原子核ビーム実験などで利用されるMWPCの読みだし処理用汎用ICとしての機能も備えている。このチップの開発、製作、評価の結果は10月にフランス・リヨンで行なわれたIEEEの原子核科学シンポジウムで発表した。

ATLASトリガー回路は広い領域に分離されて收容される。このため各部分での40MHzのクロックやトリガー信号の同期をとるのに専用エレクトロニクスが必要とされる。当研究室はこの同期回路の設計開発を行い、製作評価を行なった。いわゆるトリガータイミングコントロール（TTC）と呼ばれるエレクトロニクスの高精度信号分配システムを完成させた。

さらに測定器コントロール・モニターシステムの設計の調査研究を行なった。産業界のプロセスコントロールで使われる非常に信頼性の高いCANバスをバックボーンにしたネットワークがその主体である。このネットワークを通常の測定器の制御・モニター以外にさらにフロントエン

ドエレクトロニクス各種状態設定制御にも応用できるように JTAG、I2C 両プロトコルを CAN バス上に伝達させるシステムを完成させた。

## 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。装置の開発、製作 BELLE ディテクタへの組み込みは終了している。現在 BELLE 測定器は 1 日 200 事象/ナノバンのルミノシティでデータを収集している。2000 年 7 月に大阪で開催された ICHEP2000 において 7 つ、同 8 月にオハイオ州立大学で開催されたアメリカ物理学会主催の素粒子部門国際会議で 5 つの成果を BELLE グループとして報告した。

## 2. 研究業績

### 1) 論文

G. Alimonti, H. Aihara, J. Alexander, Y. Asano, A. Bakich, A. Bozek, E. Banas, T. Browder, J. Dragic, C. Fukunaga, A. Gordon, H. Guler, C. Everton, E. Heenan, J. Haba, M. Hazumi, N. Hastings, T. Hara, T. Hojo, T. Higuchi, G. Iwai, H. Ishino, P. Jalocha, K. Korotushenko, J. Kaneko, P. Kapusta, T. Kawasaki, J.S. Lange, Y. Li, D. Marlow, G. Moloney, L. Moffitt, S. Mori, T. Matsubara, T. Nakadaira, T. Nakamura, Z. Natkaniec, S. Okuno, S. Olsen, W. Ostrowicz, J. Shimada, K. Sumisawa, R. Stock, S. Stanic, S. Swain, G. Taylor, F. Takasaki, H. Tajima, K. Trabelsi, N. Tamura, J. Tanaka, M. Tanaka, S. Takahashi, T. Tomura, T. Tsuboyama, Y. Tsujita, G. Varner, K. E. Varvell, Y. Watanabe, H. Yamamoto, Y. Yamada, M. Yokoyama, H. Zhao and D. Zontar: The BELLE silicon vertex detector, Nuclear Instruments and Methods **A453** (2000) 71-77

H. Sakamoto, C. Fukunaga, K. Hasuko, R. Ichimiya, M. Ikeno, H. Kano, T. Kobayashi, H. Kurashige, L. Levinson, N. Lupu, T. Niki, S. Nishida, T.K. Ohska, O. Sasaki, T. Takeshita, D. Toya and B. Ye: Readout system for the ATLAS end cap muon trigger chamber, Nuclear Instruments and Methods **A453** (2000) 430-432

K. Abe et al. (BELLE collaboration): Measurement of The CP Violation Parameter  $\sin 2\phi_1$  in  $B_D^0$  Meson Decays, Physical Review Letters **86** (2001) 2509-2514

K. Abe et al. (BELLE collaboration): Measurement of  $B_D^0 - \bar{B}_D^0$  Mixing Rate from the Time Evolution of Dilepton Events at the  $\Upsilon(4S)$  Physical Review Letters **86** (2001) 3228-3232

### 2) 学会講演

日本物理学会春の分科会 2000年3月30日～4月2日 (近畿大学)

蓮子和巳、福永 力、狩野博之他アトラス日本 TGC エレクトロニクスグループ：ATLAS 前後方  
ミュオントリガーシステムの開発 - 全容.

仁木太一、福永 力、狩野博之他アトラス日本 TGC エレクトロニクスグループ：ATLAS 前後方  
ミュオントリガーシステム用 ASIC の開発 - ASIC 初段回路.

狩野博之、福永 力他アトラス日本 TGC エレクトロニクスグループ：ATLAS 前後方ミュオン  
トリガーシステム用 ASIC ( data selection ) の開発.

### 国際会議

6th Workshop on Electronics for LHC Experiments (LEB 2000), Cracow, Poland,  
11-15 Sep. 2000

H. Kano, C. Fukunaga, M. Ikeno, O. Sasaki, R. Ichimiya, H. Kurashige, S. Nishida, H. Sakamoto,  
Y. Hasegawa, K. Hasuko, Y. Katori, T. Kobayashi, T. Niki and D. Toya: Custom Chips Developed  
for the Trigger/Readout System of the ATLAS End-cap Muon Chambers

K. Hasuko, C. Fukunaga, Y. Hasegawa, R. Ichimiya, M. Ikeno, H. Iwasaki, H. Kano, Y. Katori, T.  
Kobayashi, H. Kurashige, L. Levinson, N. Lupu, T. Niki, S. Nishida, T.K. Ohnska, H. Sakamoto,  
O. Sasaki, S. Tarem and D. Toya: First-Level Endcap Muon Trigger System for ATLAS

IEEE Nuclear Science Symposium 2000 (NSS2000), Lyon, France, 10-15 Oct. ,2000

H. Kano, C. Fukunaga, M. Ikeno, O. Sasaki, K. Sato and S. Matsuura: An MWPC readout chip  
in high rate environment

ATLAS Endcap Muon Trigger Electronics Workshop, Kyoto, Japan, 26-30 Oct. ,2000

K. Tanaka: Low  $p_T$  Trigger Electronics

H. Kano: High  $p_T$  Trigger Electronics

Y. Ishida: Trigger Timing Control Electronics

K. Tanaka: System Link – LVDS

Y. Ishida: System Link – G-link

### 3) 学会誌等

なし

## 編集後記

今年度は、南方 2000 年度教室主任の陣頭指揮の元、編集作業は迅速に進み、六月の半ばにはほぼ校正が終了する段階に達しました。これは、導入 2 年目になった  $\text{\TeX}$  が改訂を重ね、各研究室においてほとんどトラブルなく動作し、編集作業のほぼすべてを電子化することができたことが大きな要因です。さらに、PDF ファイルにすることによってその内容を教室のホームページに置くことや、冊子以外に CD 化することも時間の問題と考えます。その一方で、編集委員会で定めたページ数の超過や「国内外の研究グループとの共同研究活動」の新設といった問題で、編集委員会の手際の悪さから物理教室構成員の方にご迷惑をおかけすることになってしまいました。年次報告の「器」部分の作成について省力化が進んだ分、編集作業をより時間をかけた肝心の「中味」の議論に振り向けるべきであるということが来年にも引き継がれる課題でしょう。

大学改革の真っ直中、都立大物理教室がどう発展して行くのか、どう生き延びてゆくのか議論される今、前号の都立大創立 50 周年記念号に引き続き、この号も含めて、年次報告の意味づけを、再認識、再確認しなければならない節目に来ているようです。特に、年次報告の目的の一つである外部の人に物理教室の活動を知らせるという役割がより重要となってきたことは明らかです。この外部の人という言葉が研究者仲間という社会に閉じたものではなく、より広く、学生、さらには都民や一般の人々を指すようになり、年次報告は「いったい物理教室で我々の税金はどう有意義に使われているのか」を知らせる手段としての性格を重視するように変化してゆくことになるでしょう。これは、昨今良く耳にする *accountability* を意識したものです。

個人的には、2000 年度途中からこの教室に仲間入りさせていただきました。昨年度の年次報告を真剣に目を通した読者のひとりには、何を隠そう当時この物理学教室のポストへ応募しようとしていた私でした。今回の編集委員会の中では、実際の編集作業をしていただいた桑原委員と全体の方向を決める作業を担当された南方、奥野両委員の間で、私はあまり大したこともできなかったのですが、物理教室全体の「文化」を知る上では格好の機会を得ることができました。年次報告の内容をこのように真摯に物理教室構成員で議論するというのも、すばらしい「文化」のひとつと考えます。年次報告のうわべを飾る表層的なことよりも、実は中に詰まったこのような「文化」をいかに熟成させてゆくかが、年次報告ひいては物理教室の発展のための鍵であることは間違いありません。

( 東記 )

平成 12 年度年次報告編集委員  
南方久和 ( 2000 年度教室主任 )  
奥野和彦  
東 俊行  
桑原慶太郎