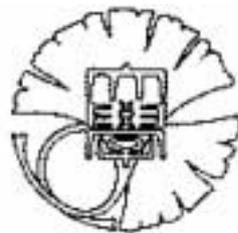

ISSN 0910-0709

Department of Physics
School of Science
University of Tokyo

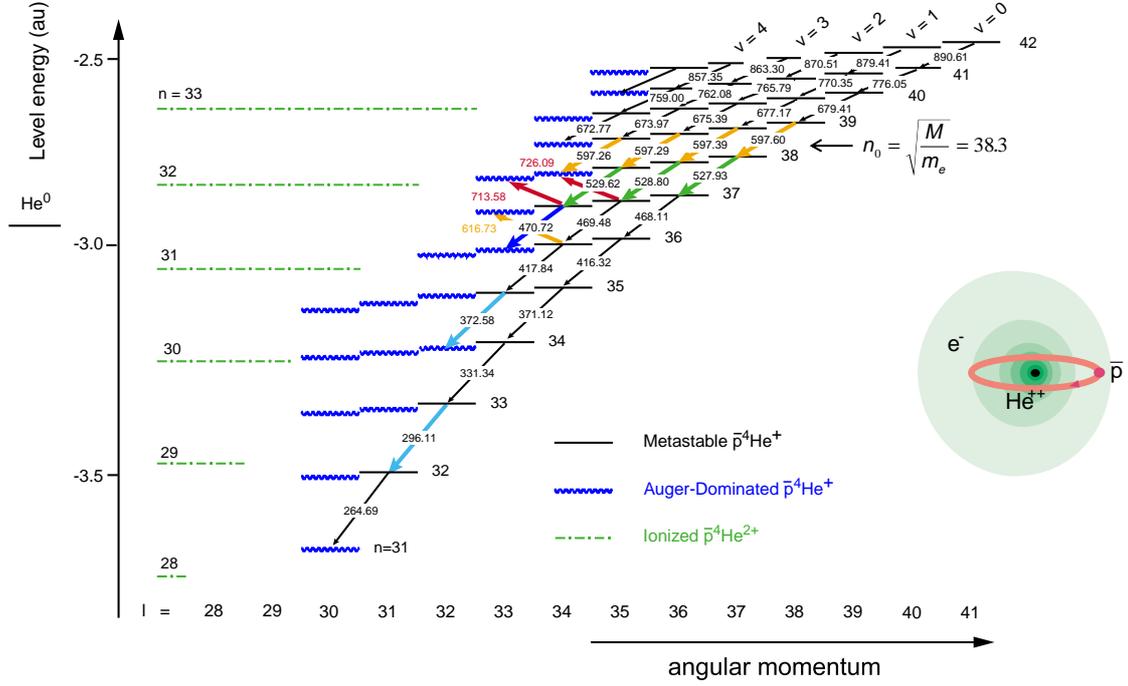
Annual Report
2000

平成12年度 年次研究報告



東京大学 大学院 理学系研究科・理学部
物理学教室

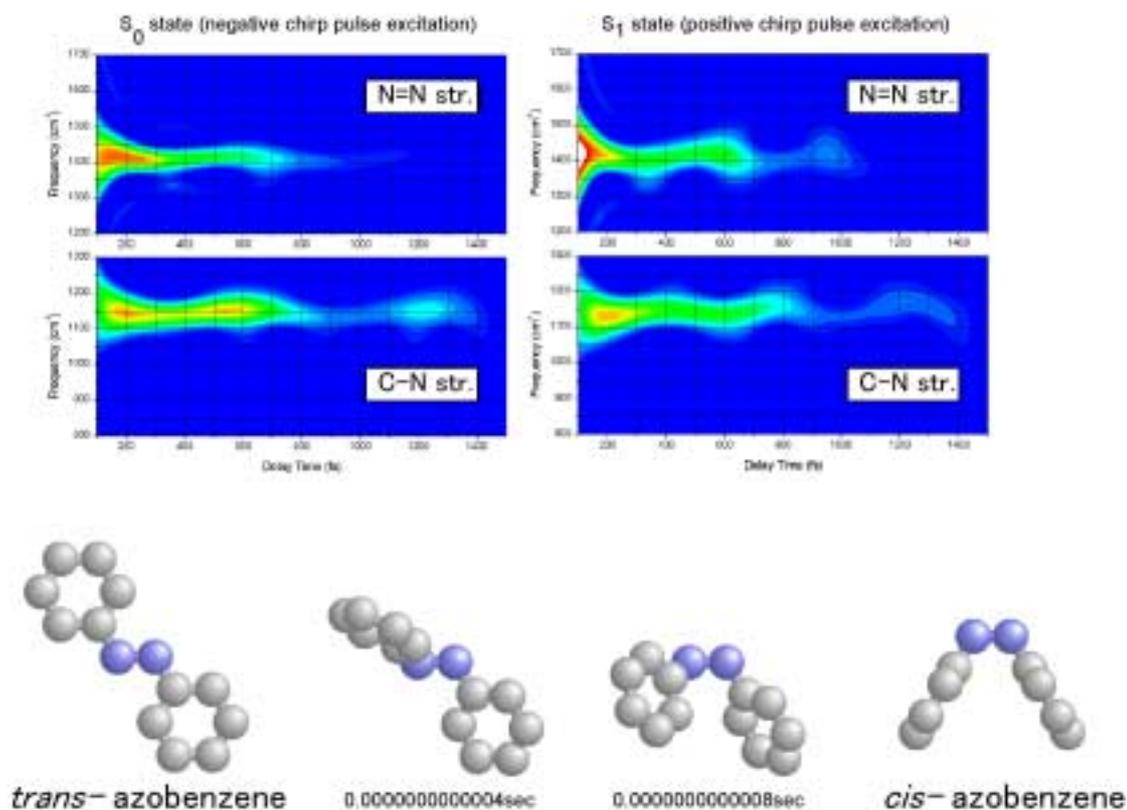
Laser Spectroscopy of Antiprotonic Helium



Antiprotonic helium, an exotic 3-body system consisting of a helium nucleus, an antiproton, and an electron ($\bar{p}\text{He}^{++}e^- \equiv \bar{p}\text{He}^+$), is formed when antiprotons are stopped in helium medium. The negatively charged antiprotons replace one of the electrons of a helium atom, and are then captured into highly excited states with principal quantum numbers of $n_0 \sim 38$. The Figure shows the energy level diagram of the antiproton in $\bar{p}\text{He}^+$ (black and blue lines) as well as in the $\bar{p}\text{He}^{++}$ ion (green lines).

Because the energy difference between adjacent levels at $n \sim 38$ is only 2 eV, while the ionization energy of helium is ~ 25 eV, antiprotons initially captured in highly excited angular momentum states (denoted by black lines) can only deexcite via radiative transitions (symbolized by black arrows) until they reach a state from where an Auger transitions becomes faster than the radiative transitions (blue wavy lines). Using laser spectroscopy, transitions of the antiproton between metastable and short-lived levels can be stimulated, and the subsequent annihilation of the antiproton with the nucleus can be used as a signature for the resonance condition. In this way in total 13 laser transitions in $\bar{p}^4\text{He}^+$ (marked by coloured arrows) and 3 in $\bar{p}^3\text{He}^+$ could be observed at CERN in Geneva, three of them in 2000 at the newly built Antiproton Decelerator (AD). In some cases, metastable levels have been transformed into short-lived ones by adding hydrogen molecules that destroy the metastability in collisions. With the newly found transitions in the UV region at $\lambda = 372$ nm and 296 nm, all the initially populated levels have now been observed. The highlight of the measurements in 2000 was the determination of the zero-density wavelength of four transitions with an accuracy down to 1.3×10^{-7} that showed overall agreement with three-body QED calculations at a level of better than 5×10^{-7} . From this agreement, a CPT test on the equality of proton and antiproton charge and mass of $< 6 \times 10^{-8}$ relative deviation can be inferred. (Hayano Group, I. §2.1)

Real-time observation of molecular vibrational structure during a chemical reaction process



The world shortest visible pulses of 4.7-fs duration from a noncollinear optical parametric amplifier (NOPA) with pulse-front matching were used to observe molecular structure during chemical reaction. The NOPA is a very useful light source for ultrafast spectroscopy on an extremely short time scale. Azobenzene was used as an example to show how powerful the laser is for the determination of the chemical reaction path. Changes in instantaneous molecular vibrational frequency have been analyzed with spectrograms obtained by the time-frequency analysis method of optimal kernel using the Fourier transformation of the time dependent induced transmittance changes probed at 2.18 eV. Top and bottom left panels show the time dependent frequencies of N=N and C-N stretching mode, respectively, in the ground state selectively excited by using negatively chirped pulses. While top and bottom right panels are frequencies of the molecule in the excited state selectively excited by positively chirped pulses. The spectrogram clearly exhibits the vibronically non-equilibrium state characterized by the modulations of instantaneous frequency and amplitude. Especially the C-N and N=N stretching frequencies in the excited state are highly modulated with anti-phase relation. The period of the modulation is about 300-350 fs and it is considered to be torsional mode, which is the precursor vibration of the trans-cis isomerization. The reaction is schematically shown at the bottom of the photograph. (Kobayashi Group, I. §6.1)

序

平成 12 年度の東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・理学部物理学科の年次報告をお届け致します。この冊子が、物理学教室で行われている活発な研究教育の現状を知って頂く手がかりとなれば幸いです。

本年度は寿栄松教授と若林教授の二人の教授が定年退官されました。寿栄松教授と若林教授は、それぞれ、物性実験と生物物理の分野ですぐれた業績をあげられ、世界的にも高く評価される研究をすすめてこられました。寿栄松先生はご専門の研究で活躍される一方、物理学科長・専攻長、東京大学評議員、理学系研究科長などを歴任され、本学の運営に多大な貢献をされました。また若林先生は筋収縮の分子機構を解明する研究で、常に世界の最先端をリードしてこられました。両先生の多年にわたる研究・教育におけるご功績と教室運営へのご貢献にたいして、深く感謝申し上げます。物理学教室にとって大変に残念なことは、折戸周治教授が平成 12 年 1 月にご逝去されたことです。折戸教授は素粒子物理国際研究センター長として、加速器による高エネルギー物理学の国際的なリーダーとして、これからますます研究の発展が期待されておりましただけに、その御逝去は物理教室にとりまして痛恨の極みであります。

この年度には佐野雅己教授が東北大学から、初田哲男教授が京都大学から、櫻井博儀助教授が理化学研究所から、岡本徹助教授が学習院大学から、それぞれ着任されました。佐野教授の専門は流体物理学および非線形現象、初田教授の専門はハドロン物理学を中心とした原子核理論、櫻井助教授の専門は原子核実験、特に不安定核の研究、岡本助教授の専門は 2 次元電子系などを中心とする物性物理学の実験です。これらの若い優秀な教官の方々を平成 12 年度に迎えることが出来たのは、物理学教室として誠に喜ばしいことでもあります。

本年度は若林教授が筋収縮の分子機構の三次元構造に基づく研究によって内藤記念科学振興賞を受賞され、小林孝嘉教授が超短パルスレーザーの新設計と開発およびそれをを用いた分子分光への応用と高分子の非線形光学過程の研究によってアメリカ光学会フェローとなりました。さらに上坂友弘洋博士が井上研究奨励賞と原子核談話会新人賞を、板橋健太博士が原子核談話会新人賞を、深沢泰司博士が日本天文学会欧文誌論文賞を受賞されました。

物理学専攻では幸いにして、今年度から 3 年間にわたって、教育研究拠点形成支援経費が配分されることになりました。十分とはいえませんが、一般的に厳しい会計状況の中で大変に有り難い支援を頂けたことは幸いです。昨年度の年次報告の中でも触れましたが、物理学教室では現在大きなカリキュラム改革が年次進行中であり、平成 12 年度から授業一コマの授業時間が 90 分に短縮されました。これは学生の現実的な持続力集中力を配慮したのですが、同時に時間割りに柔軟性をもたせられるなど、種々の長所を持つものと期待しています。また昨年度は物理学専攻のホームページの整備が、大幅にすすみました。教務関係の手続きの多くは、ネットワークを介して迅速に行われるようになり、学生、教務担当事務、教官ともにこの電算化から大きなメリットを受けています。この整備を精力的に進められた早野専攻主任（平成 12 年度）に感謝申し上げます。

さて東京大学では、平成 13 年度から教官定年年令の段階的な引き上げが決定されましたが、これに対応して理学系研究科では教官が引き続いて高い活動度を保つために、教官の活動に対する適切な評価システムを導入すること、また教官人事は原則として公募によることを合意しました。物理学教室としては、従来からこのような趣旨にかなった運営を行ってきたところではありますが、さらにこの合意に適合するシステムを採用することを決意いたしました。

平成 12 年度は独立法人化へむけての東大としての対応が模索され、様々な試案が急速に具体性を持ち検討されはじめた年ということができます。憲章委員会、法人化対応委員会などで、全学として現実的な検討がはじまりました。物理学という自然科学の最も基礎的な領域では、自由な発想に基づく深く高度な学術研究を教育と表裏一体として推進する必要があります。私たちはこれを可能としてきた環境を守りぬき、さら

に一層の改良がなされるように努力を傾けねばならないと思っています。物理学専攻の使命の一つは、物理学の先端分野での高度な研究を通して人類の知的財産に貢献することでありますが、一方では、こうした研究成果やその意義を一般社会へ情報発信し、広く国民の理解を得ることも強く求められてきております。また高度な科学技術社会の発展をささえる物理学的な素養をもったすぐれた人材の育成は、第一線での研究体験を通してはじめて達成できることも強調すべきでしょう。上に述べた法人化問題の社会的背景とも関連しますが、多額の国費を要する基礎科学の推進がなぜ必要であるのか、一般の国民にも十分な説得力をもって語られる努力が必要であると思います。

物理学を基礎として生み出された様々な科学技術は、電子情報通信技術、生命科学技術などに見られるように、現在、人類がかって経験したことのないすさまじい速度で発展・普及し、社会に大きな変革を与えています。一方では、21世紀以降に人類が直面するであろう危機は、環境問題、エネルギー問題、人口問題をはじめあまりにも大きいといわなければなりません。こうした社会的背景のもとで、物理学はどのような新たな問題に取り組むべきなのでしょう？また物理学教室では、どのような人材を育て、社会に送りだすべきなのでしょう？さらにその重要性を、社会に対してどのように発信すべきなのでしょう？このような問題についても視野におきつつ、物理学教室における研究教育の一層の発展に、教室の全構成員とともに努力していきたいと存じます。

この年次報告は長谷川修司助教授の大変なご努力によって、編集作成されたものです。この場を借りて同助教授のご尽力に深く感謝したいと存じます。

2001年5月13日

物理学専攻長

塚田捷

目次

| | | |
|----------|---|-----------|
| I | 研究室別 2000 年度 研究活動報告 | xi |
| 1 | 原子核・素粒子理論 | 1 |
| 1.1 | 原子核理論研究室 (大塚・初田) | 1 |
| 1.1.1 | 原子核構造 | 1 |
| 1.1.2 | ハドロン物理 | 3 |
| 1.2 | 素粒子論研究室 (藤川・江口・柳田・松尾) | 9 |
| 1.2.1 | 超弦理論, M理論 | 9 |
| 1.2.2 | 量子重力 | 11 |
| 1.2.3 | 高エネルギー現象論 | 11 |
| 1.2.4 | 場の理論 | 12 |
| 2 | 原子核・素粒子実験 | 17 |
| 2.1 | 原子核実験研究室 (酒井、早野、櫻井研究室) | 17 |
| 2.1.1 | (n, p) 測定施設を用いた研究 (酒井研究室) | 17 |
| 2.1.2 | 偏極重陽子-陽子弾性散乱の高精度測定と三体力 (酒井研究室) | 18 |
| 2.1.3 | $^{12}\text{C}(\vec{d}, \vec{d}')$ 反応による ^{12}C 高励起状態の研究 (酒井研究室) | 19 |
| 2.1.4 | $\vec{d} + d \rightarrow {}^3\text{He} + n, {}^3\text{H} + p$ 反応の偏極分解能測定 (酒井研究室) | 19 |
| 2.1.5 | 高温・低磁場での偏極陽子固体標的の開発 (酒井研究室) | 19 |
| 2.1.6 | $p+d$ 散乱による超狭幅ダイバリオンの探索 (酒井研究室) | 20 |
| 2.1.7 | $197\text{ MeV}^{12}\text{C}(\vec{p}, \vec{n})^{12}\text{N}$ 反応の SDR 領域の多重極展開 (酒井研究室) | 20 |
| 2.1.8 | 2段階 (p, n) 反応におけるオンシェル近似の吟味 (酒井研究室) | 21 |
| 2.1.9 | CERN-AD における反陽子ヘリウム原子の精密レーザー分光 (早野研究室、ASACUSA プロジェクト) | 21 |
| 2.1.10 | 超低速反陽子ビーム源の開発 (早野研究室、ASACUSA プロジェクト) | 22 |
| 2.1.11 | CERN-AD における反水素生成実験 (早野研究室、ATHENA プロジェクト) | 22 |
| 2.1.12 | 反陽子ヘリウム原子の超微細構造・極超微細構造の理論計算 (早野研究室) | 23 |
| 2.1.13 | パイ中間子の原子核による深い束縛状態の研究 (早野研究室) | 23 |
| 2.1.14 | 位置検出型 Cherenkov カウンターの開発 (早野研究室) | 23 |
| 2.1.15 | ハイパー核の研究 (早野研究室) | 24 |
| 2.1.16 | 重い不安定核ビームの開発 (櫻井研究室) | 24 |
| 2.1.17 | 中性子超過剰核の安定性 (櫻井研究室) | 24 |
| 2.1.18 | 線核分光法による中性子の殻構造研究 (櫻井研究室) | 24 |
| 2.1.19 | Ge Telescope 開発 (櫻井研究室) | 26 |
| 2.1.20 | 核分光法を用いた陽子過剰核の核構造研究 (櫻井研究室) | 26 |
| 2.1.21 | 中性子ハロー核の分解反応 (櫻井研究室) | 26 |
| 2.1.22 | 中性子過剰核の融合反応 (櫻井研究室) | 27 |
| 2.1.23 | 天体核反応の断面積測定 (櫻井研究室) | 27 |
| 2.2 | 駒宮研究室 | 36 |
| 2.2.1 | 最高エネルギー電子・陽電子コライダー LEP を用いた OPAL 実験 | 36 |
| 2.2.2 | 電子・陽電子リニアコライダー JLC 計画 | 37 |
| 2.2.3 | 気球搭載型超伝導スペクトロメータ BESS による宇宙粒子線の観測 | 38 |
| 2.3 | 衰輪 研究室 | 43 |
| 2.3.1 | ポロメーターを用いた暗黒物質の直接検出実験 | 43 |
| 2.3.2 | アクシオンヘリオスコープ実験 | 43 |

| | | |
|----------|-------------------------------------|-----------|
| 2.3.3 | 太陽以外の天体を観測する | 44 |
| 2.3.4 | 検出器開発 | 45 |
| 2.4 | 相原研究室 | 46 |
| 2.4.1 | B 中間子崩壊における CP 非対称の測定 | 46 |
| 2.4.2 | B 中間子の寿命の精密測定 | 46 |
| 2.4.3 | $B^0 - \bar{B}^0$ 混合現象の精密測定 | 46 |
| 2.4.4 | チャーム中間子の寿命と $D^0 - \bar{D}^0$ 混合の測定 | 47 |
| 2.4.5 | B 中間子のきわめて稀な崩壊の探索と測定 | 48 |
| 2.4.6 | 第二世代シリコンバーテックス検出器の開発と設計 | 48 |
| 3 | 物性理論 | 50 |
| 3.1 | 和達研究室 | 50 |
| 3.1.1 | ボース・アインシュタイン凝縮 | 50 |
| 3.1.2 | スピン系 | 50 |
| 3.1.3 | 強相関電子系 | 50 |
| 3.1.4 | 非線型波動 | 51 |
| 3.1.5 | 結び目理論 | 51 |
| 3.1.6 | 量子多体系 | 51 |
| 3.1.7 | 量子計算と量子情報 | 52 |
| 3.1.8 | 力学系 | 52 |
| 3.2 | 塚田研究室 | 55 |
| 3.2.1 | 固体表面および吸着系の電子状態 | 55 |
| 3.2.2 | 原子間力顕微鏡の理論 | 55 |
| 3.2.3 | 計算物性物理 | 56 |
| 3.2.4 | ナノ構造の物理 | 56 |
| 3.3 | 青木研究室 | 61 |
| 3.3.1 | 超伝導 | 61 |
| 3.3.2 | 強磁性 | 61 |
| 3.3.3 | 表面・界面における電子相関効果 | 62 |
| 3.3.4 | 分数量子ホール効果 | 63 |
| 3.3.5 | その他 | 64 |
| 3.4 | 小形研究室 | 68 |
| 3.4.1 | 高温超伝導の理論 | 68 |
| 3.4.2 | d 波超伝導体における不純物および磁束近傍の電子状態 | 68 |
| 3.4.3 | p 波超伝導体 | 69 |
| 3.4.4 | 2 次元スピン系でのスピン励起 | 69 |
| 3.4.5 | 低次元有機物質に関する理論 | 69 |
| 3.4.6 | フラストレーションのある系での電子状態 | 69 |
| 4 | 物性実験 | 73 |
| 4.1 | 壽榮松研究室 | 73 |
| 4.1.1 | ナノチューブの構造および局所伝導度の観測 | 73 |
| 4.1.2 | カーボンナノチューブの光伝導 | 74 |
| 4.1.3 | フラーレン希土類化合物における巨大磁気抵抗 | 74 |
| 4.2 | 長澤研究室 | 77 |
| 4.2.1 | 半導体結晶の励起系に関わる線形、非線形光学現象の分光学的研究 | 77 |
| 4.2.2 | ゼオライト単結晶中のカーボンナノチューブの分光学的研究 | 78 |
| 4.3 | 樽茶研究室 | 81 |
| 4.3.1 | 人工原子の電子状態の研究 | 81 |
| 4.3.2 | 人工二原子分子の電子状態の研究 | 82 |
| 4.3.3 | 一次元電子系の電子間相互作用の研究 | 83 |
| 4.3.4 | 表面敏感走査プローブを用いた状態密度の空間分布測定法の開発 | 83 |
| 4.3.5 | ホットエレクトロンのスピンバルブ効果 | 83 |
| 4.4 | 藤森研究室 | 87 |
| 4.4.1 | 超伝導、金属-絶縁体転移 | 87 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.4.2 | 磁性体 | 88 |
| 4.4.3 | 低次元系 | 88 |
| 4.4.4 | 近藤格子、重い電子系 | 89 |
| 4.5 | 長谷川研究室 | 96 |
| 4.5.1 | 表面電子輸送 | 96 |
| 4.5.2 | 表面超構造と相転移 | 97 |
| 4.5.3 | 表面電子励起 | 97 |
| 4.5.4 | 原子層・分子層の成長 | 97 |
| 4.6 | 福山研究室 | 102 |
| 4.6.1 | 超低温走査トンネル顕微鏡の開発研究 | 102 |
| 4.6.2 | 2次元吸着希ガス固体のSTM観察 | 103 |
| 4.6.3 | 低温STMによる異方的超伝導体 Sr ₂ RuO ₄ の研究 | 104 |
| 4.6.4 | ³ He単原子層膜の2次元核磁性の研究 | 104 |
| 4.6.5 | 2次元固体 ³ Heにおける量子スピン液体状態の研究 | 106 |
| 4.7 | 岡本研究室 | 108 |
| 4.7.1 | 強相関2次元系 | 108 |
| 4.7.2 | 量子ホール効果 | 108 |
| 5 | 一般物理理論 | 110 |
| 5.1 | 宇宙理論研究室(佐藤、須藤) | 110 |
| 5.1.1 | 初期宇宙論、相対論 | 110 |
| 5.1.2 | 観測的宇宙論 | 111 |
| 5.1.3 | 超新星・高密度天体 | 113 |
| 5.1.4 | その他 | 115 |
| 6 | 一般物理実験 | 119 |
| 6.1 | 小林研究室 | 119 |
| 6.1.1 | サブ5fs実時間分光 | 119 |
| 6.1.2 | 新しい分光装置の開発 | 121 |
| 6.1.3 | 量子光学・量子情報 | 122 |
| 6.2 | 牧島研究室 | 129 |
| 6.2.1 | 「あすか」衛星とGIS装置 | 129 |
| 6.2.2 | 「ようこう」衛星を用いた研究 | 129 |
| 6.2.3 | コンパクト天体の観測的研究 | 129 |
| 6.2.4 | 星間・銀河間空間での粒子加速 | 130 |
| 6.2.5 | ASTRO-E衛星の回復と硬X線検出器(HXD)の再製作 | 130 |
| 6.2.6 | 将来に向けての開発など | 131 |
| 6.3 | 高瀬研究室 | 135 |
| 6.3.1 | TST-2実験 | 135 |
| 6.3.2 | 原研との共同研究 | 137 |
| 6.3.3 | 核融合研との共同研究 | 137 |
| 6.3.4 | プリンストンにおける共同研究 | 138 |
| 6.4 | 坪野研究室 | 142 |
| 6.4.1 | レーザー干渉計を用いた重力波の検出 | 142 |
| 6.4.2 | 相対論の基礎実験 | 143 |
| 6.4.3 | 熱雑音の研究 | 144 |
| 6.4.4 | 精密計測の研究 | 144 |
| 6.5 | 佐野研究室 | 148 |
| 6.5.1 | 乱流と散逸大自由度系の研究 | 148 |
| 6.5.2 | 非線形系としての生命システム | 149 |
| 6.6 | 山本研究室 | 152 |
| 6.6.1 | 観測装置の開発・改良 | 152 |
| 6.6.2 | 星間物質の観測的研究 | 153 |
| 6.6.3 | 実験室分子分光 | 155 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 6.7 | 酒井広文 研究室 | 158 |
| 6.7.1 | 2次元イオンイメージング装置の開発 | 158 |
| 6.7.2 | 中性分子の配列制御に関する数値シミュレーション | 158 |
| 6.7.3 | 中性分子の配列制御の試み | 159 |
| 6.7.4 | 分子内波束の干渉に関する数値実験 | 160 |
| 6.7.5 | フェムト秒レーザー光による N ₂ および O ₂ 分子のクーロン爆裂におけるナノ秒 Nd:YAG レーザー光の役割 | 160 |
| 6.7.6 | フェムト秒レーザーパルスによる D ₂ 分子の非段階的 2 重イオン化 | 160 |
| 7 | 生物物理 | 163 |
| 7.1 | 若林研究室 | 163 |
| 7.1.1 | ナノ構造解析のための電子顕微鏡法と画像解析法の開発 | 163 |
| 7.1.2 | タンパク質工学及び生化学的手法を用いたモータータンパク質の研究 | 163 |
| 7.1.3 | 原子レベルでの構造研究 (X線結晶解析・電子顕微鏡法) | 164 |
| 7.1.4 | 電子顕微鏡法を使ったタンパク質の構造研究 | 165 |
| 7.1.5 | 計算機を用いたタンパク質の構造研究 | 166 |
| 7.2 | 桑島研究室 | 168 |
| 7.2.1 | 蛋白質工学を用いた蛋白質のフォールディング研究 | 168 |
| 7.2.2 | 細胞内での蛋白質フォールディングに関する分子シャペロンの作用機構 | 169 |
| 7.2.3 | 新しい高速反応測定法を利用した蛋白質のフォールディング研究 | 170 |
| 7.3 | 能瀬 研究室 | 174 |
| 7.3.1 | 神経配線形成の分子機構 | 174 |
| 7.3.2 | シナプス形成の分子機構 | 176 |
| 8 | 技術部門 | 178 |
| 8.1 | 技術部門 | 178 |
| 8.1.1 | 実験装置試作室 | 178 |

II Summary of group activities in 2000 179

| | | |
|----|--|-----|
| 1 | Theoretical Nuclear Physics Group | 181 |
| 2 | Theoretical Particle and High Energy Physics Group | 183 |
| 3 | Sakai Group | 186 |
| 4 | Hayano Group | 187 |
| 5 | Sakurai Group | 188 |
| 6 | Komamiya group | 189 |
| 7 | Minowa-Group | 190 |
| 8 | Aihara Group | 191 |
| 9 | Wadati Group | 192 |
| 10 | Tsukada Group | 193 |
| 11 | Aoki Group | 194 |
| 12 | Ogata Group | 195 |
| 13 | Suematsu Group | 197 |
| 14 | Nagasawa Group | 198 |
| 15 | Tarucha Group | 199 |
| 16 | Fujimori Group | 200 |
| 17 | Hasegawa Group | 201 |
| 18 | Fukuyama Group | 202 |
| 19 | Okamoto Group | 203 |
| 20 | Theoretical Astrophysics Group | 204 |
| 21 | Kobayashi Group | 206 |
| 22 | Makishima Group | 207 |
| 23 | Takase Group | 208 |
| 24 | Tsubono Group | 209 |
| 25 | Sano Group | 210 |

| | | |
|----|----------------------------------|-----|
| 26 | Yamamoto Group | 211 |
| 27 | Sakai (Hirofumi) Group | 212 |
| 28 | Wakabayashi Group | 213 |
| 29 | Kuwajima Group | 214 |
| 30 | Nose Group | 215 |
| 31 | Nose Group | 216 |

III 2000年度 物理学教室全般に関する報告 217

| | | |
|----------|---|------------|
| 1 | 学部講義概要 | 219 |
| 1.1 | 2年生 冬学期 | 219 |
| 1.1.1 | 物理数学 I : 松尾 泰 | 219 |
| 1.1.2 | 解析力学 : 塚田 捷 | 219 |
| 1.1.3 | 量子力学 I : 大塚 孝治 | 219 |
| 1.1.4 | 電磁気学 : 相原 博昭 | 220 |
| 1.1.5 | 物理実験学 : 長谷川修司、能瀬聡直 | 220 |
| 1.2 | 3年生 夏学期 | 220 |
| 1.2.1 | 統計力学 I : 藤川 和男 | 220 |
| 1.2.2 | 量子力学 II : 大塚 孝治 | 221 |
| 1.2.3 | 量子力学 IIa : 初田哲男 | 221 |
| 1.2.4 | 現代実験物理学 I : 長谷川修司、福山寛、桑島邦博 | 221 |
| 1.2.5 | 光学 : 長澤 信方 | 222 |
| 1.2.6 | 計算機 : 早野 龍五 | 222 |
| 1.3 | 3年生 冬学期 | 223 |
| 1.3.1 | 電気力学 : 坪野 公夫 | 223 |
| 1.3.2 | 現代実験物理学 II: 駒宮 幸男、櫻井 博儀 | 223 |
| 1.3.3 | 物理数学 III : 和達 三樹 | 223 |
| 1.3.4 | 統計力学 II : 小形正男 | 224 |
| 1.3.5 | 流体力学 : 佐野 雅己 | 224 |
| 1.3.6 | 物質科学基礎 : 藤森 淳 | 224 |
| 1.3.7 | 量子力学 III : 柳田 勉 | 225 |
| 1.3.8 | 生物物理学 : 桑島 邦博、若林 健之、能瀬 聡直 | 225 |
| 1.4 | 4年生 夏学期 | 225 |
| 1.4.1 | プラズマ物理学 : 高瀬 雄一 | 225 |
| 1.4.2 | 原子核物理学 : 酒井 英行 | 226 |
| 1.4.3 | 一般相対論 : 須藤 靖 | 226 |
| 1.4.4 | 場の量子論 : 江口 徹 | 226 |
| 1.4.5 | 固体物理 I : 青木 秀夫 | 227 |
| 1.4.6 | 素粒子物理学 : 蓑輪 眞 | 227 |
| 1.5 | 4年生 冬学期 | 227 |
| 1.5.1 | 化学物理学 : 山本 智 | 227 |
| 1.5.2 | 宇宙物理学 : 牧島 一夫 | 227 |
| 1.5.3 | 量子光学 : 酒井広文 | 228 |
| 1.5.4 | 固体物理学 II : 樽茶 清悟 | 228 |
| 1.5.5 | 一般相対論続論 : 須藤 靖 | 229 |
| 2 | 各賞受賞者紹介 | 230 |
| 2.1 | 若林健之教授 : 内藤記念科学振興賞 | 230 |
| 2.2 | 小林孝嘉教授 : アメリカ光学会フェローの称号 | 230 |
| 2.3 | 上坂友洋博士 (酒井 (英) 研究室) : 井上研究奨励賞および原子核談話会新人賞 | 230 |
| 2.4 | 板橋健太博士 (早野研究室) : 原子核談話会新人賞 | 230 |
| 2.5 | 深沢泰司博士 (元釜江研究室) : 日本天文学会欧文誌論文賞 | 231 |
| 3 | 人事異動 | 232 |

| | | |
|---|-------|-----|
| 4 | 役務分担 | 233 |
| 5 | 教室談話会 | 234 |

I

研究室別 2000年度 研究活動報告

1 原子核・素粒子理論

1.1 原子核理論研究室(大塚・初田)

原子核理論研究室の概要

原子核研究室では、原子核とハドロンに関係した非常に広範囲の理論的研究を行っている。その活動は主に二つに分けられる。一つは多数の核子から成る量子多体系としての原子核の構造とそれを支配する動力学についての研究であり、ここでは「原子核構造」と呼んでいる分野である。もう一つは、多数のクォーク・グルオンから成る量子多体系としてのハドロンの構造や高温高密度核物質についての研究であり、「ハドロン物理学」と呼んでいる分野である。「核構造」は主に大塚孝治教授・板垣助手及び大学院学生らにより行なわれた。「ハドロン物理学」は主に初田哲男教授・佐々木助手及び博士研究員と大学院学生らにより行なわれた。以下に先ずそれぞれの分野での研究内容の概要を述べ、後で各々のテーマについて個別に説明する。

原子核構造

原子核構造と言われる分野には色々な問題が含まれるが、我々の研究室では

- 1) 確率論的な手法による多体問題の解法
- 2) 不安定核の構造と反応
- 3) 多体問題の代数的方法による解明

の3つのテーマを主に追求している。1番目のものは我々が1994年頃から提唱・発展させ、世界的に見てもオリジナルな理論手法であるモンテカルロ殻模型を中心に展開している。この方法は原子核に於ける量子多体系の解法における大きなブレークスルーとなり、実際の物理系への適用に当っては、記述可能な多体構造の多様性、扱う原子核の幅広さ、さらには原子核以外への応用、のどれを見ても、今後大きな発展が期待されている。2番目のものは、対象として原子核物理学の中で近年最も急速に進歩している分野である。安定核とは、我々の身のまわりの物質を構成している原子核で、陽子数と中性子数が等しいか、あまり異ならない。一方、不安定核とは、それらの数が大きく異なるものを指す。そのため様々な特異な性質を示すことが分かっているが、研究は始まったばかりで、未知の事柄に満ち溢れたフロンティアである。この1年間で大きな進歩があった。原子核でも(陽子或は中性子の数としての)魔

法数があり、原子の場合と同じように構造上決定的な役割を果たす。魔法数は1949年のマイヤー・イエゼンの論文以来変わってなく、安定核ではそれで問題はなかった。しかし、不安定核での魔法数は安定核のそれとは系統的に全く異なるという事実の発見、及び、その原因やその一般性の解明、という成果が得られた。これは、今後の研究の方向性を左右し、進める原動力となる大きな変化である。さらに、いわゆる原子核における分子的構造理論、複数ガウス基底の方法やゆるく束縛された粒子を含んだ殻模型計算などにより、新しい方法論を持ち込んで不安定核の構造・反応の研究を様々に進めている。また、1番目の方法を応用しての研究も行っている。3番目についても、原子核の非軸対称変形と呼ばれる高度に量子的な現象、原子核の磁気的な励起などについて、1番目の研究を用いて進展があった。

ハドロン物理学

ハドロン(陽子、中性子、パイ中間子、やその励起状態)は、クォークとグルオンの束縛状態で、量子色力学(QCD)がその多様な構造や相互作用を支配している。QCDはその本質的な非線形性と強い量子効果のために、そのハミルトニアンからは予想もできないような様々な現象を示す。我々の研究室では、ハドロンの構造、QCDの真空構造と高温高密度における相転移などを、QCDの量子多体問題の観点から理論的に研究している。また、その応用として、宇宙初期の高温プラズマ、中性子星内部の高密度クォーク物質の解明、相対論的重イオン衝突実験におけるクォーク・グルオン・プラズマ生成、高エネルギーハドロン反応における複合グルオンの役割、ハドロンの励起状態スペクトルなど実験・観測量と密接に関係した研究も行っている。

1.1.1 原子核構造

量子モンテカルロ対角化法によるモンテカルロ殻模型

原子核の構造の研究を大別すると(1)単純化された模型による理解、(2)殻模型を基礎とした方法、の二つに分かれる。(2)の立場では、核力から微視的な方法により導いた核子多体系の相互作用を用い、仮定が少ない定式化が可能であり、理論的には非常にすっきりとした第一原理的な記述が可能である。従って、これまでも殻模型計算を行なう努力が数多くなされてきた。たとえば、平均場に基づいた解法、直接対角化による解法、補助場量子モンテカルロ法などがあげられる。平均場に基づいた解法は模型的な仮定が多く入っており、一方、直接対角化による解法は計算機による制約を強く受けている。補助場量子モンテカルロ法による計算は負符号問題を含む多くの問題点を抱えて適用範囲の狭さが大きな難点である。我々のグループが数年来発展させてきた量子モンテカルロ対角化(QMCD)法は、多体問題を解く新解法であるばかりか、有数量子多体系

である原子核の特徴 (例えば、角運動量やアイソスピンの保存など) を非常にうまく取り込むことができる方法であることが明らかになった。その結果、従来全く不可能であった殻模型の問題が解くことができるようになりつつあり、モンテカルロ殻模型という新しい分野を形成しつつある。

この方法論は、高速な計算機の性能をフルに活用できるものであり、特に、パラレル計算機は大変有用となる。昨年度から理化学研究所との共同研究により、独自の大規模並列計算機の運転を行っている。このように、量子モンテカルロ対角化法によるモンテカルロ殻模型を用いての核構造の解明を今後も系統的に進める。具体的な成果は下に示されている通りであるが、質量数が 30 前後での不安定原子核の構造とそこでの魔法数の消失や変貌、pf 殻原子核での球形の状態と大変形及び「超変形」した状態の共存、さらに同じく pf 殻原子核での広範な領域に渡る有効相互作用の決定、質量数が 130 前後の原子核に於ける非軸対称変形の微視的記述、などの研究が行なわれている。特に、F のアイソトープのドリップラインが長く伸びているのは、 $N = 20$ 魔法数の破れとは関係していないように見られていたのを、シェルギャップの減少と結びつけて説明するのに成功した。[36, 1, 2, 3, 1, 5, 20, 21, 6, 23, 24, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 77, 80]

不安定核の新しい魔法数と核力の性質

原子中の電子と同じように、原子核中の陽子や中性子に対しても魔法数がある。それは、球対称な調和振動子ポテンシャルに陽子や中性子が束縛され、さらにスピン・軌道力を受けていると考えれば大体説明できる。実際、メイヤーとイェンゼンはその描像を 1949 年に提唱し、殻模型の基礎を築いた。それ以来、原子核物理学は様々に進歩したのであるが、魔法数は変わらなかった。近年、不安定核が研究されるようになり、陽子数と中性子数が大きく異なる原子核が理論と実験の両面から研究されるようになった。我々は、不安定核での魔法数が安定核のものから系統的にずれることを初めて示し、その原因は強い相互作用 (核力) の基本的な性質にあることも示した。この性質とは、核力のスピン・アイソスピン依存性に基因しており、陽子や中性子間の核力が中間子の交換によるのであれば、必然的に大きな効果として現れるものである。このように基本的で大きな効果を生むプロセスでありながら、その魔法数に対する役割はこれまで認識されてなかった。さらに、このプロセスの重要性は QCD (量子色力学) によって直接説明もできるし、一方、より伝統的で精密な G 行列理論でも説明される。結果として、魔法数は安定核では 2, 8, 20, 28, ... となっていたのが、中性子が陽子よりかなり多い不安定核では、2, 6, 16, 28, 34, ... となることが示された。今後はこのような殻構造に付随して起こる新しい多体構造・励起、さらには元素合成などの天体核物理現象への影響などを調べていくのは大変興味深い。また、不安定核には、上述の核力の性質に基づき、魔法数のみならず、他にも面白い現象が多々あるはず

でそれらを探っていく。以上述べてきたことは、従来のような簡単なものでなく、フォック交換項も含んだ本格的な相対論的多体理論の必要・重要性をも示唆しており、その方向でも考えて行く必要がある。

[4, 58, 59, 60, 61, 62]

Be 同位体のクラスター構造と $1/2^+$ 軌道

中性子過剰な Be 同位体の構造を α クラスター構造を用いて分析した。中性子の $1/2^+$ 軌道が核のクラスター的な変形によってエネルギーシフトを起こすことを微視的に明らかにした。また、この時にスピン軌道相互作用が重要な役割を果たすメカニズムを提唱した。[7]

殻模型による集団運動状態の研究

モンテカルロ的手法の導入により、中重核領域における殻模型による微視的な核構造の研究がすすんできた。その手法の一つとして、固有状態を一般化されたクーパー対基底の線型結合によって記述するモンテカルロ殻模型法を発展させた。これを用いて、バリウムの同位体において中性子数増加による集団運動状態の遷移の様子を和則を通じて解析した。さらに、 ^{132}Xe を例とした非軸対象状態についての記述をおこなった。[38, 91, 1, 73]

psd 殻領域の弱い束縛系での殻模型計算

主に psd 殻領域の不安定核の構造を殻模型に基づいて研究した。安定核において成功してきた殻模型も、中性子過剰核などの核子の束縛の弱い系を説明することは難しい。不安定核領域で顕著になる、これまで取り入れられてこなかった性質を考慮にいれた殻模型計算を行うことを目指している。

psd 殻においては、 $p_{1/2}$ - $p_{3/2}$ 間の有効相互作用を修正した上で計算を行い、中性子過剰核のエネルギー準位の変化を調べた。また、連続状態との結合も考慮に入れた計算も行い、ドリップライン上の核である ^{24}O の励起状態を求めた。[70, 75, 79, 87]

現実的な相互作用による粒子数保存 HFB 計算

粒子数射影を施した Hartree-Fock-Bogoliubov 計算は、主には多重極相互作用のような単純な相互作用についてしか行われてこなかった。本研究では、一般の 2 体相互作用について粒子数保存 HFB 計算を行う計算機コードを開発し、陽子-中性子間の対相関が影響しない場合には球形核のエネルギーを比較的正しく与えることを確認した。2 体相互作用を 1 体相互作用の 2 乗に分解することにより、計算の簡略化、効率化を図った点が独創的である [39, 88]。

3 α の高分子構造

これまでの安定な原子核には有り得なかった発達した分子的な状態の存在を中性子過剰核において探究した。典型的な例として、3つの α クラスターの周りに過剰な中性子がまつわりついた3 α の直線構造をC同位体において分析し、 ^{16}C において過剰な中性子が分子軌道的な運動をすることで、3 α の直線状態を安定性化させることを明らかにした。また、3 α の正三角形配位が ^{14}C において回転帯として現れ、実験と結びつくことを示した。[41]

複数のガウス一粒子基底による軽い核の構造

一粒子の波動関数をガウシアンによって表した基底を複数用いて波動関数を表現する方法で軽い核の構造を研究した。特に ^8Be 、 ^{10}Be の回転帯(^8Be の 0^+ バンド、 1^- バンド、 ^{10}Be の 0^+ バンド)のエネルギーの計算を行ない、実験値を良く再現した。[89]

1.1.2 ハドロン物理

高温ハドロン物質からの光子放出とレプトン対生成

CERNで行われた核子あたり158GeVのPb+Pb衝突からの直接光子観測(WA98実験)、及びPb+Au衝突からのレプトン対観測(CERES実験)から、高温ハドロン物質についてどのような情報が得られるかを、相対論的流体力学と光子・レプトン対生成素過程の計算にもとずいて研究した。その結果、温度が200MeV程度の強く相互作用する高温ハドロン物質が実験的に生成されている傍証を得た。[17, 18, 66]

カラー分子動力学と高密度核物質

中性子星の最中心部では、中性子物質からハイペロン物質、そしてクォーク物質への相変化が実現している可能性がある。この相変化を一つの枠組みで記述するために、クォークのカラー自由度をあらわに考慮したクォーク多体系の分子動力学(カラー分子動力学法)を開発し、数値シミュレーションを行った。その結果、核物質からクォーク物質への相変化には、3次元実空間における核子のパーコレーションと共に、ハドロンのカラー空間における励起が重要な因子となっている事がわかった。更に、このカラー分子動力学法を有限核に適用し、原子核がよりミクロな自由度であるクォークからどのように構成されているかについても研究した。[9, 10]

ハドロン物質中での強い 中間子相関

有限温度密度のハドロン媒質中では、カイラル対称性が部分的に回復する事が知られている。我々は、

これに伴って媒質中でのカイラル凝縮の揺らぎが増大し、アイソスピン0、スピン0のチャンネルでの π 中間子間相互作用に特異性が現れる事を指摘した。更にこの現象が、相対論的重イオン衝突実験における2光子不変質量分布や、ハドロン-原子核反応における 2π 不変質量分布において、閾値近傍での巨大ピークとして現れる事を示した。後者については、 π -原子核反応を用いてCHAOSグループにより観測されている閾値近傍でのピークとの関連を検討した。[11, 64, 66]

格子QCD数値実験による核子励起状態の研究

Domain Wall Fermion(DWF)の定式化を用いた格子QCD数値実験を用いて、核子の励起状態の研究を世界に先駆けて行った。核子と逆の負パリティを持つ最低励起状態 $N^*(1535)$ と核子 $N(940)$ の大きな質量差が正確に再現できた。核子と同じ正パリティを持つ第一励起状態 $N'(1440)$ についても計算を行い、クォーク質量が仮想的に重い場合に相当する数値実験において、その質量が N^* よりも重くなることを指摘した。[12, 34, 68, 93]

格子QCD数値実験による核子構造関数の研究

核子スピクライシスの問題と関連した g_1 構造関数の1stモーメント(核子軸性電荷)を格子QCD数値実験で精密に測定することを目的とする。核子構造関数の数値実験を遂行する上でその数値計算の信頼度の指標となる中性子ベータ崩壊定数を測定した。この崩壊定数は軸性カレントを核子状態で挟んだ行列要素として定義できる点から、格子場における「カイラル対称性」と深く関係するべきで、測定結果はそれを強く示唆している。DWFは格子場上でカイラル対称性を保持可能にするための定式化であり、これを用いた格子QCD数値実験は核子構造関数の研究に不可欠であることが結論付けられる。[68, 85]

QCDにおけるdiffractive過程とグルーオンの力学

高エネルギーのdiffractive過程を調べることで、QCDにおけるグルーオン力学やベクトル中間子の分布関数などの研究を行った。とくにグルーオンが媒介するクォーク対と核子の相互作用を系統的に研究し、グルーオンの横運動量の効果を考慮したものを計算した。この効果を考慮すると、diffractiveな $J/\psi, \psi'$ の断面積の比がよく再現できることを示した。[8, 10, 15, 25, 28, 29, 32, 35, 45, 30, 94]

Diffractional J/ψ 生成におけるカラー・ダイポール描像の有効性の研究

近年、HERA (DESY) の高エネルギー (陽) 電子-陽子衝突実験で可能となった様々なエクスクルーシブ diffractive 過程 (レッジ極限で主要になる前方向散乱過程) に着目した。この散乱過程により、陽子内部の small- x 領域におけるグルーオン分布や、(陽) 電子から放出された光子のハドロン化に伴い生成されるベクトル中間子 (本研究では ψ , v 粒子を扱う) の内部構造の情報を引き出すことができる。本研究ではこのようなベクトル中間子のハドロン化前駆段階において、クォーク・反クォーク対状態が作るカラー・ダイポール描像の有効性について詳しく研究を行った [14]。また次にこのような描像を用いて、偏極 (陽) 電子-陽子散乱のスピン・アシンメトリーから得られる偏極グルーオン分布について研究を行った [31, 33, 42, 46, 72, 84]。

有限温度におけるクォーク波動関数の繰り込みのカイラル相転移に対する役割

有限温度でのシュウィンガー・ダイソン方程式を運動量と振動数に依存したクォーク波動関数の繰り込みを考慮して、同時反復法を用いて数値的に解き、その効果がカイラル凝縮・CJT 有効ポテンシャルの温度変化にどのように影響するかを調べた。計算の結果、クォーク波動関数の繰り込みを考慮しない場合に比べて、カイラル対称性の回復する温度が下り、またその温度は格子量子色力学計算で予想される温度とほぼ一致する事が示された。またカイラル凝縮やパイ中間子の崩壊定数の温度依存性も格子量子色力学計算で予想されるものに近づいた。[86]

核子の静的性質に対する軸性ダイクォークの役割

NJL 模型の枠組みで、相対論的 Faddeev 方程式を使って、核子の静的性質について計算し、Goldberger Treiman (GT) relation について調べた。ここでは、scalar diquark (0^+ , $T = 0$) だけではなく、axial vector diquark (1^+ , $T = 1$) の自由度も取り入れている。また、核子の静的性質として、核子のスピンに対するクォークのスピン寄与、 g_A , $g_{\pi NN}$ を定量的に評価し、GT relation の破れについて議論した。[74]

カラー超伝導におけるクォーククーパー対の空間的な構造の密度変化

高密度でダイナミカルに生成されるクォーク対凝縮を記述するギャップ方程式を、特に内部量子数として $J = 0$, Parity = +, aligned helicity をもったクォーク対を仮定し、perturbative に導いた。さらに、その非線形積分方程式を数値的に扱ってギャップの運動量依存性 (対の空間的な構造) を広範な密度領域にお

いて明らかにした。また、Fermi 面のぼやけが soft な磁気グルーオンを介した散乱による振幅の特異性を弱める効果が、磁気モードのランダウ減衰による効果よりも弱いことを数値的にも明らかにした。

[76, 92]

最大エントロピー法を用いた格子 QCD におけるスベクトル関数の研究

量子色力学 (QCD) におけるスペクトル関数は、ハドロンの性質を理解する上で基本的な物理量である。しかし、格子 QCD でのスペクトル関数の研究は、数値計算的な困難に阻まれ、これまであまりなされて来なかった。本研究では、最大エントロピー法 (Maximum Entropy Method) によるデータ解析の方法を用いることによってこの困難を回避し、 $\beta = 6/g^2 = 6.47$ で格子サイズ $40^3 \times 30$ のゼロ温度における格子 QCD 数値実験に関してハドロンのスペクトル関数の研究を行った。また、最大エントロピー法における解の一意性、誤差評価の方法などについての理論的検討を行い、この方法の格子 QCD への応用に関してレビューを書いた。

[16, 40]

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Collective Excitations of Nuclei in The Monte-Carlo Shell Model, N. Shimizu, T. Otsuka, T. Mizusaki and M. Honma, Phys. Rev. Lett. **86**, 1171 (2001).
- [2] T. Mizusaki, T. Otsuka, B.A. Brown and M. Honma : Spherical-deformed shape coexistence for the pf shell in the nuclear shell model, Physical Review **C 63**, 044306 (2001).
- [3] Y. Utsuno, T. Otsuka, T. Mizusaki and M. Honma : Extreme location of F drip line and disappearance of the $N=20$ magic structure, Physical Review **C**, 印刷中
- [4] T. Otsuka, R. Fujimoto, Y. Utsuno, B.A. Brown, M. Honma and T. Mizusaki : Magic numbers in exotic nuclei and spin-isospin properties of NN interaction, Physical Review Letters, 投稿中
- [5] T. Otsuka, M. Honma, T. Mizusaki, N. Shimizu and Y. Utsuno : Monte Carlo Shell Model of Atomic Nuclei, Progress of Particle and Nuclear Physics, (Elsevier, Amsterdam, 2001), 印刷中
- [6] T. Otsuka : Monte Carlo Shell Model, Nuclear Physics **A**, (2001), 印刷中
- [7] N. Itagaki, S. Okabe, and K. Ikeda, Important role of the spin-orbit interaction in forming the $1/2^+$ orbital structure in Be isotopes, Phys. Rev. **C62**, 034302 (2000).
- [8] K. Suzuki, A. Hayashigaki, K. Itakura, J. Alam and T. Hatsuda; Validity of the color dipole approximation for diffractive production of heavy quarkonium, Physical Review **D62**, 031501 (2000).

- [9] A. Ishihara, M. Kimura, A. Suzuki, K. Suzuki : Charge symmetry breaking in neutron star matter, *Phys. Rev.* **C61**, 034004 (2000)
- [10] K. Suzuki, H. Hayashigaki, K. Itakura, J. Alam, T. Hatsuda : Validity of the color dipole approximation for diffractive production of heavy quarkonium, *Phys. Rev.* **D62**, 01501(R) 1-4 (2000)
- [11] T. Maruyama and T. Hatsuda : Color Molecular Dynamics for High Density Matter, *Phys. Rev.* **C61**, 062201 (2000).
- [12] D. Jido, T. Hatsuda and T. Kunihiro : Chiral Symmetry Realization for Even Parity and Odd Parity Baryon Resonances, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 3252 (2000).
- [13] T. Maruyama, T. Hatsuda and S. Chiba : Color Molecular Dynamics Simulation of Nuclei and Dense Matter, *Nucl. Phys.* **A681**, 72 (2001).
- [14] Shoichi Sasaki, Tom Blum and Shigemi Ohta, A Lattice Study of the Nucleon Excited States with Domain Wall Fermions. To be published in *Phys. Rev. D*, (hep-lat/0102010)
- [15] M. Asakawa, T. Hatsuda, and Y. Nakahara : Maximum Entropy Analysis of the Spectral Functions in Lattice QCD : to appear in *Prog. Part. Nucl. Phys.* **47** (2001).
- [16] J. Alam, A. Hayashigaki, K. Suzuki, and T. Hatsuda : Diffractive phi and rho production in a perturbative QCD model, *Physical Review* **D63**, 114023 1-6 (2001)
- [17] D. Jido, T. Hatsuda and T. Kunihiro : In-Medium π - π Correlation induced by Partial Restoration of Chiral Symmetry, *Phys. Rev.* **D63**, 011901 (2001).
- [18] J. Alam, S. Sarkar, T. Hatsuda, T. Nayak and B. Sinha : Photons from Pb-Pb Collisions at CERN SPS, *Phys. Rev.* **C63**, 021901 (2001).
- [19] J. Alam, S. Sarkar, P. Roy, T. Hatsuda, and B. Sinha : Thermal Photons and Lepton Pairs from Quark Gluon Plasma and Hot Hadronic Matter, *Ann. Phys.* **286**,159 (2001).
- (会議抄録)
- [20] T. Otsuka : Collective Excitations of Nuclei in the Monte-Carlo Shell Model, in *Proc. of Int. Symposium "Quasiparticle and Phonon Excitations in Nuclei"*, (World Scientific, Singapore, 2000).
- [21] T. Otsuka, T. Mizusaki and M. Honma : $N = Z$ Nuclei Studied by the Shell Model, in *Proc. of Int. Workshop PINGST 2000 - Selected Topics on $N = Z$ Nuclei*, (Lund Inst. Technology, Lund, 2000).
- [22] T. Otsuka, Y. Utsuno, T. Mizusaki and M. Honma : Exotic Nuclei in the Monte Carlo Shell Model calculations, *Nucl. Phys.* **A 685**, 100c (2001), (*Proc. of 7th Int. Conf. on Nucleus-Nucleus Collisions*).
- [23] T. Otsuka, Y. Utsuno, T. Mizusaki and M. Honma : Shell model results for neutron-rich nuclei, *Nucl. Phys.* **A 682**, 155c (2001), (*Proc. of Nuclear Structure 2000 Conference*).
- [24] T. Otsuka, Y. Utsuno, M. Honma and T. Mizusaki : Structure of Unstable Nuclei, *Progress of Part. Nucl. Phys.* **46**, 155 (2001), (*Proc. of Int. School on Nuclear Physics; 22nd Course "Radioactive Beams for Nuclear and Astro Physics"*).
- [25] K. Suzuki, E. Hiyama, H. Toki, M. Kamimura: Constituent quark model for baryons with strong quark-pair correlations and non-leptonic weak transitions of hyperon, proceedings of KEK-Tanashi International Symposium on Physics of Hadrons and Nuclei, Tokyo, Japan, 14-17 Dec 1998: *Nucl. Phys.* **A670**, 307-311 (2000)
- [26] N. Itagaki, S. Okabe, and K. Ikeda Molecular-orbital structure in Be isotopes, in *Proc. of the Int. Conf. "Exotic Nuclear Structures"*, ed. Zs Dombradi and A. Krasznahorkay (2000), 359-362.
- [27] N. Itagaki and S. Okabe, Structures on Be Nuclei by a New Molecular Orbital Approach, in *Proc. of the Int. Conf. "Few-body Problems in Physics 99"*, ed. S. Oryu, M. Kamimura, S. Ishikawa, Springer-NewYork (2000), 145-148.
- [28] K. Suzuki, E. Hiyama, H. Toki, M. Kamimura : Roles of quark-pair correlations for baryon structure and non-leptonic weak transitions of hyperon, proceedings of the 1ST ASIA PACIFIC CONFERENCE ON FEW-BODY PROBLEMS IN PHYSICS, Noda, Kashiwa, Japan, 23-25 Aug 1999, *Few-body Systems supplement* **12**, 209 (2000)
- [29] N. Nakajima, K. Suzuki, H. Toki, K.-I. Kubo : Analyzing powers in inclusive pion production at high-energy and nucleon spin structure, *Nucl. Phys.* **A663**, 573c-577c (2000)
- [30] K. Suzuki, N. Nakajima, H. Toki, K.-I. Kubo: Hadronization dynamics of quarks and spin polarizations of hyperons produced in photon and electron induced reactions, proceedings of Spins in nuclear and hadronic reactions, edited by T. Suzuki, H. Yabu (World Scientific)
- [31] A. Hayashigaki, K. Suzuki, J. Alam and T. Hatsuda; Polarized gluon distribution function of nucleon in diffractive leptonproduction of charmonium, *International Workshop on Diffraction in High-Energy Physics (Cetraro, Italy, September 2-7, 2000)*, To be published in *Nuclear Physics B*.
- [32] K. Suzuki: T-odd quark fragmentation function and transverse spin asymmetries in the pion production, proceedings of Circum-Pan-Pacific RIKEN Symposium on High Energy Spin Physics (Pacific Spin 99), Wako, Japan, 4-6 Nov 1999,, *RIKEN Rev.*28, 105-109 (2000)

- [33] A. Hayashigaki and K. Suzuki; Polarized gluon distribution function of nucleon in diffractive lepton production of charmonium, 14th International Spin Physics Symposium (Osaka University, Osaka, Japan, October 16-21, 2000), To be published in American institute of physics.
- [34] Shoichi Sasaki : N^* Spectrum in Lattice QCD, in Proc. of the Int. Conf. "NSTAR2000", ed. V.D. Burkert, L. Elouadrhiri, J.J. Kelly, R.C. Minehart, (World Scientific, 2001), 378-387.
- [35] K. Suzuki and K. Itakura: Constraints on color dipole nucleon cross-section from diffractive heavy quarkonium production, proceedings of DIFFRACTION 2000: International Workshop on Diffraction in High-energy and Nuclear Physics, Cetraro, Cosenza, Italy, 2-7 Sep 2000. Nucl. Phys. Proc. Suppl. **99**, 230-233 (2001)
- (国内雑誌)
- [36] 大塚孝治: 特集「物理科学、この1年」モンテカルロ殻模型による原子核構造パリティ、15巻、104-106ページ、丸善、2000年。
- [37] 初田哲男: 物質とは何か - ドルトンの原子論からクォーク・グルオン・プラズマへ -, 数理科学、39巻3号、5 - 12ページ、サイエンス社、2001年。
- (学位論文)
- [38] N.Shimizu : Quadrupole Collective States in the Monte-Carlo Shell Model, 博士論文.
- [39] T. Matsuo: Number-projected HFB calculation with realistic interactions, 修士論文.
- [40] 佐々木潔 : 最大エントロピー法を用いた格子 QCD におけるスペクトル関数の研究, 修士論文.
- [41] K. Maeda : Molecular-orbital structure in ^{14}C , 修士論文.
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [42] A. Hayashigaki, K. Suzuki, J. Alam and T. Hatsuda; Polarized gluon distribution function of nucleon in diffractive lepton production of charmonium, International Workshop on Diffraction in High-Energy Physics (Cetraro, Italy, September 2-7, 2000).
- [43] N. Itagaki, S. Okabe, and K. Ikeda: Molecular-orbital structure in Be isotopes, Int. Conf. on "Exotic Nuclear Structures", May. 15-20, 2000, Debrecen, Hungary.
- [44] N. Itagaki, S. Okabe, and K. Ikeda: Molecular-orbital structure in neutron-rich Be and C isotopes, NATO advanced study institute "Nuclei far from stability and Astrophysics", Aug. 28- Sep. 8, 2000, Predeal, Romania.
- [45] K. Suzuki: Polarization of Hyperons in Photon induced Reaction at High Energy, 14th International Spin Physics Symposium, Osaka, October 16-21
- [46] A. Hayashigaki and K. Suzuki; Polarized gluon distribution function of nucleon in diffractive lepton production of charmonium, 14th International Spin Physics Symposium (Osaka University, Osaka, Japan, October 16-21, 2000).
- [47] N. Itagaki, K. Maeda, T. Otsuka, S. Okabe, K. Ikeda, and I. Tanihata: Molecular-orbital structure in Be and C isotopes, Int. Sym. on "Perspectives in Physics with Radioactive Isotope Beams 2000" Nov. 13-16, 2000, Hayama, Japan.
- [48] N. Itagaki, K. Maeda, T. Otsuka, S. Okabe, K. Ikeda, and I. Tanihata: Molecular-orbital structure in Be and C isotopes, RIKEN Sym. on "Physics at Drip Lines" Feb. 13-15, 2001, Wako, Japan.
- [49] N. Itagaki, K. Maeda, T. Otsuka, S. Okabe, K. Ikeda, and I. Tanihata: Molecular-like structure in light neutron-rich nuclei, Int. Sym. on "ISOL'01" Mar. 11-14, 2001, Oak Ridge, USA.
- 招待講演
- [50] T. Otsuka : Monte Carlo shell model, Int. Conf. Bologna 2000 - Structure of the Nucleus at the Dawn of the Century, May 29 - June 3, 2000, Bologna, Italy.
- [51] T. Otsuka, T. Mizusaki and M. Honma : $N = Z$ Nuclei Studied by the Shell Model, Int. Workshop PINGST 2000 - Selected Topics on $N = Z$ Nuclei, June 6-10, 2000, Lund, Sweden.
- [52] T. Otsuka, M. Honma, T. Mizusaki, Y. Utsuno and N. Shimizu : New Facet of Nuclear Physics, Int. Symp. on Strong Correlations in Many-body Systems, June 26 - 30, 2000, Nikko, Japan.
- [53] T. Otsuka, Y. Utsuno, T. Mizusaki and M. Honma : Exotic Nuclei in the Monte Carlo Shell Model calculations, 7th Int. Conf. on Nucleus-Nucleus Collisions, July 3 - 7, 2000, Strasbourg, France.
- [54] T. Otsuka, Y. Utsuno, T. Mizusaki and M. Honma : Shell model results for neutron-rich nuclei, Nuclear Structure 2000 Conference, Aug. 15-19, 2000, East Lansing, U.S.A.
- [55] T. Otsuka : Present and future nuclear shell model, NATO ADVANCED STUDY INSTITUTE "Nuclei Far from Stability and Astrophysics." Aug. 28 - Sep. 8, 2000, Predeal, Romania.
- [56] T. Otsuka, Y. Utsuno, M. Honma and T. Mizusaki : Structure of Unstable Nuclei, Int. School on Nuclear Physics; 22nd Course "Radioactive Beams for Nuclear and Astro Physics", Sep. 16 - 24, 2000, Erice, Italy.
- [57] T. Otsuka : Monte Carlo Shell Model mass predictions, 2nd Euroconference on Atomic Physics at Accelerators: Mass Spectrometry, Sep. 19 - 23, 2000, Cargese, France.

- [58] T. Otsuka, Y. Utsuno, R. Fujimoto, B.A. Brown, M. Honma and T. Mizusaki : Frontiers and challenges of the nuclear shell model, Int. Symp. on Perspectives in Physics with Radioactive Isotopes Beams 2000, Nov. 13 - 16, 2000, Hayama, Japan.
- [59] T. Otsuka : Recent topics of nuclear shell model, Institute for Nuclear Theory program INT-00-3 "Nuclear Structure for the 21st Century", Oct. 2 - Dec. 10, 2000, Seattle, U.S.A.
- [60] T. Otsuka, Y. Utsuno, R. Fujimoto, B.A. Brown, M. Honma and T. Mizusaki : Effective interactions and magic numbers, RIKEN Symp. "Physics at Drip Lines", Feb. 13 - 15, 2001, Wako, Japan.
- [61] T. Otsuka : Recent Developments of the Nuclear Shell Model, Int. Symp. on Nuclear Structure Physics - NP2001, Mar. 4 - 8, 2001, Goettingen, Germany.
- [62] T. Otsuka : Large-scale shell model calculations, ISOL'01 Conference, Mar. 11 - 14, 2001, Oak Ridge, U.S.A.
- [63] N. Itagaki, S. Okabe, and K. Ikeda: Cluster structure in light neutron-rich nuclei, Korea Physical Society meeting, Apr. 28-29, 2000, Seoul, Korea.
- [64] T. Hatsuda : Chiral Symmetry Restoration and the Sigma Meson, Workshop on "Possible Existence of the Sigma Meson and its Implication to Hadron Physics" (Sigma-Meson 2000), June 12-14, 2000, Kyoto, Japan.
- [65] T. Hatsuda : Spectral Functions of Hadrons in QCD, 13th Nuclear Physics Summer School and Symposium (NuSS 2000), June 22-24, 2000, Pusan, Korea.
- [66] T. Hatsuda : Spectral Change of Hadrons and Chiral Symmetry, 15th International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (QM2001), Jan. 15-20, 2001, New York, USA.
- [67] T. Hatsuda : Maximum Entropy Analysis of the Spectral Functions in Lattice QCD, International Symposium on Hadrons and Nuclei, Feb. 20-22, 2001, Seoul, Korea.
- [68] Shoichi Sasaki : Lattice Study of Nucleon Properties with Domain Wall Fermions, Int. Conf. "THE PHYSICS OF EXCITED NUCLEONS" March 7-10, 2001, Mainz, Germany
- (国内会議)
- 一般講演
- [69] 板垣 直之、中性子過剰核の分子的構造・これからの方法論、理研理論グループ主催テンソル力研究会 (理研、和光、2000年8月).
- [70] 藤本林太郎、大塚孝治、B.A.Brown、宇都野穰、R.Kanungo、小沢顕、谷畑勇夫 : Oxygen の一粒子波動関数と密度分布、CNS/RIKEN 共催 「低エネルギー RI ビームの物理」研究会、(理研、和光、2000年8月)
- [71] 板垣 直之、前田 国敏、大塚 孝治、岡部 成玄、池田 清美、 3α 系の周りでの分子軌道、日本物理学会年第 55 回次会 (新潟大学、新潟、2000年9月)
- [72] 林垣 新、鈴木克彦、Jan-e Alam、初田哲男: Polarized gluon distribution function of nucleon in diffractive leptonproduction of charmonium, 日本物理学会第 56 回年会 (新潟大学、新潟、2000年9月)
- [73] 清水 則孝、大塚 孝治、水崎 高浩、本間 道雄: 集団運動状態の対相関、和則による解析、日本物理学会 秋の分科会 (新潟大学、2000年9月)
- [74] 峯尾 浩文、ペンツ ウォルフガング、矢崎 紘一: Goldberger-Treiman relation & axial coupling constant based on the Faddeev approach in the NJL model, 日本物理学会、秋の年会 (新潟大学、2000年9月)
- [75] 藤本林太郎、大塚孝治、B.A.Brown、宇都野穰 : N~16 原子核の一粒子状態と密度分布、日本物理学会 2000 年秋の分科会 (新潟大学、新潟、2000年9月)
- [76] 阿武木 啓朗、初田 哲男、板倉 数記 : カラー超伝導におけるクーパー対の空間的構造、日本物理学会 第 55 回年次大会 (新潟大学、新潟、2000年9月)
- [77] 大塚 孝治、瀬部 孝、有馬 朗人: ^{16}O とその近傍核の構造と魔法数の破れ、理研-RCNP 研究会「Exotics in Hardon Many Body Systems」(奈良、2000年11月)
- [78] 板垣 直之、前田 国敏、大塚 孝治、岡部 成玄、谷畑 勇夫、中性子過剰核の高分子状態、理研-RCNP 研究会「Exotics in Hardon Many Body Systems」(奈良、2000年11月)
- [79] 藤本林太郎、大塚孝治、B.A.Brown、宇都野穰、R.Kanungo、小沢顕、谷畑勇夫 : 一粒子波動関数と密度分布、理研-RCNP 研究会「Exotics in Hadron Many Body Systems」(奈良県新公会堂、奈良、2000年11月)
- [80] T. Otsuka, M. Honma, T. Mizusaki, Y. Utsuno, N. Shimizu: Frontiers and perspectives of nuclear shell model, 原研物質科学シンポジウム「タンデム領域の重イオン科学研究会」(原研、2001年1月)
- [81] N. Itagaki, K. Maeda, T. Otsuka, S. Okabe, K. Ikeda and I. Tanihata, Cluster structure in light neutron-rich nuclei, 理研冬の学校「In-beam gamma-ray spectroscopy with RI beams」(津南、新潟、2001年1月)
- [82] N. Itagaki, S. Okabe, K. Ikeda and I. Tanihata, Cluster structure in light neutron-rich nuclei, 京大基研国際ミニワークショップ「Nuclear structure of unstable nuclei」(京大基研、京都、2001年2月)
- [83] 板垣 直之、前田 国敏、岡部 成玄、大塚 孝治、池田 清美、「ドリップライン近傍の Be 同位体の束縛機構」日本物理学会第 56 回年次会 (中央大学、多摩、2001年3月)
- [84] 林垣 新、鈴木克彦: Polarized diffractive leptonproduction of heavy quarkonium, 日本物理学会第 57 回年会 (中央大学、2001年3月).
- [85] 佐々木勝一、Tom Blum、太田滋生 : Lattice Study of Nucleon Properties with Domain Wall Fermions,

- 日本物理学会 2001 年春の年会 (中央大学、東京、2001 年 3 月)
- [86] 池田 貴 : Chiral phase transition at finite temperature in the framework of the Schwinger-Dyson equation, 日本物理学会 2001 年春の分科会 (中央大学、東京、2001 年 3 月)
- [87] 藤本林太郎、大塚孝治、鈴木俊夫 : 弱い束縛系での殻模型、日本物理学会 2001 年春の分科会 (中央大学、八王子、2001 年 3 月)
- [88] 松尾利明、大塚孝治: 粒子数保存 HFB 計算による不安定核の構造, 日本物理学会 2001 年春の分科会 (中央大学、八王子、2001 年 3 月).
- [89] 広瀬俊亮、板垣直之、大塚孝治、春山征吾、Kalman Varga : Be 同位体の変形状態, 日本物理学会 2001 年春の分科会 (中央大学、東京、2001 年 3 月)
- [90] 板垣 直之、大塚 孝治、岡部 成玄、池田 清美、谷畑 勇夫、「Cluster approach on neutron-rich nuclei」理研研究会「不安定核物理に向けて」(理研、和光、2001 年 3 月)

招待講演

- [91] 大塚 孝治 清水 則孝 : モンテカルロ殻模型の計算手法と Alphleet Project, 未来開拓学術研究推進事業「計算科学」ワークショップ「計算科学におけるアルゴリズム」, (筑波大学計算物理学研究センター, 2000 年 6 月)
- [92] 阿武木 啓朗、初田 哲男、板倉 数記 : Diffuse Fermi surface and momentum dependent gap in 2-flavor color superconductivity, 基研研究会「Chiral Symmetry Aspects in Hot and Dense QCD」招待講演 (基礎物理学研究所、京都、2001 年 3 月)
- [93] 佐々木勝一 : Nucleon Excited States in Lattice QCD, 日本物理学会 2001 年春の年会 (中央大学、東京、2001 年 3 月)
- [94] 鈴木克彦 : Hard Diffractive Processes in QCD and the Interaction of Color-dipole with Nucleon and Nucleus at Low-x, 日本物理学会 2001 年春の年会 (中央大学、東京、2001 年 3 月)

1.2 素粒子論研究室 (藤川・江口・柳田・松尾)

素粒子論研究室では、物質の基本的構成要素とその間に働く相互作用の解明を目指して研究が続いている。基礎的なテーマである超弦理論や超対称性を持つ場の理論の様々な理論的な可能性の追求と同時に、高エネルギー物理や宇宙線物理に関する実験的な検証あるいは宇宙物理的な応用が研究されている。さらには、連続及び格子上の場の理論の定式化の改良や応用も重要なテーマになっている。

1.2.1 超弦理論, M理論

(カラビ・ヤウ多様体上への) コンパクト化

江口、菅原は、孤立有理特異点を持つ Calabi-Yau 多様体に compact 化された superstring theory における BPS D-brane の解析を boundary CFT を用いて行った。supersymmetric な boundary state を用いて、D-brane の period (central charge) 及び、open string Witten index を計算し、その結果と幾何学的な計算をつきあわせることにより、boundary state と特異 Calabi-Yau の supersymmetric cycle の同定を行った [38, 105]。

4次元 $N = 2$ 超対称ゲージ理論のサイバーク・ウイッテン解を超弦理論の観点から導出する試みは幾つかあるが、特に退化したカラビヤウ多様体上にコンパクト化された弦理論を用いる方法が有力である。江口は菅野 (広大) と共に F_2 上のカノニカル束にコンパクト化されたタイプ II 型弦理論を調べ、その振幅から $M^4 \times S^1$ 上の 5次元ゲージ理論の低エネルギー有効理論が正確に決定できる事を示した。この有効理論のプレポテンシャル \mathcal{F} は S^1 の半径 R が零の極限では $N = 2$ 超対称ゲージ理論のサイバーク・ウイッテン解に一致し、 $R \rightarrow \infty$ の極限では知られた 5次元理論の解に一致する。

弦理論のカラビヤウコンパクト化において特異性をもった内部空間を共形場理論の言葉で書いて代数的に実現してしまう立場をとるのは自然である。このとき $K3$ 空間の ADE 型の特異点が共形場理論のモジュラー不変量の ADE 分類に同定されているが、非対角な場合には自明ではない。那珂と野崎はそのさらなる証拠として、幾何的な考察より示唆される共形場理論の指標に関する恒等式を見出し、厳密な証明を与えた [27]。

ALE 空間上の D ブレインを考えると、quiver ゲージ理論のモジュライ空間により代数的に BPS 状態が得られるが、解析はモジュライ空間の一部に限られていた。那珂と羽柴 (京大基研) は物理的に場の理論の立場から証明が最近得られたミラー対称性のアイデアを適用することにより、BPS 状態とその安定性を幾何学的に解析し、モジュライ空間全体に適用する枠組みを与えた [28]。

浅野は夏梅誠氏 (KEK) と共に、摂動論的な弦理

論の量子化に関して、no-ghost 定理が成立する背景時空の条件を調べた [2]。

酒井は修士論文において、 $N = 2$ 超対称ゲージ理論 (Seiberg-Witten 理論) を超弦理論のカラビ・ヤウ多様体コンパクト化によって実現し解析する方法についてまとめた [70]。

位相的弦理論

江口は以前に堀、Xiong と共に位相的弦理論を調べその分配関数が無限個の微分演算子によって消されることを提案した。これらの演算子はピラソロ代数の交換関係をもつため、量子コホモロジーのピラソロ予想と呼ばれる。江口は今年度 Getzler (Northwestern 大)、Xiong (北京大) と共に、プライマリー場を 2 つ持つ位相的弦理論を調べ種数が 2 の分配関数 \mathcal{F}_2 を完全に決定した。 \mathcal{F}_2 はピラソロ条件を満たしている。

n 次元空間の研究は、素粒子理論、超弦理論、数学の各幾何の分野で基本的かつ重要で有る。宇宙が n 次元空間の数学で記述される以上、 n 次元の図形を構成、観察することは必須。小笠は、 n 次元 knot の未解決問題を解決した。 n 次元 knot の新しい例を見つけた。

ブレーン ダイナミクス、タキオン凝縮

松尾と藤は行列弦模型を開いた弦の場合に拡張した。行列弦模型においては多体振幅やモジュライの積分などがオービフォールドを定義する離散群 (この場合は S_N) の和として再現されるが、離散群のたしあげの計算を厳密に遂行した結果、開いた弦の位相的に異なる世界面のたしあげが行われることを確認した。[23]

3次元の Chern-Simons 理論は、豊富な相構造やさまざまなソリトン解をもち、また、量子ホール効果などとも関係する興味深い理論である。今村は、弦理論において $\mathcal{N} = 2$ の超対称 Maxwell-Chern-Simons 理論を実現するための一つの方法として、0 でない B-場の背景上の D2-brane を用いる方法を解析し、実際に場の理論から期待されるポテンシャルが正しく得られることを示した。[13]

北尾は阪大の太田と共に 3D で Chern-Simons 理論が実現されるような Type IIB の brane の配位においてそのスペクトルや $SL(2, \mathbb{Z})$ 変換性を調べた [18]。

一般に Non-BPS 状態はタキオン凝縮といわれるプロセスを通じて崩壊してしまうが、タキオン場がソリトニックな配位を持つときは元のブレーンよりも低い次元のブレーンが残ると考えられている。那珂、高柳、上杉は共形場理論の marginal deformation で扱えるブレーン-反ブレーン系に対して実際に上の仮説が成り立つことを Boundary State の手法を用いて具体的にかつ厳密に確かめた。またそのような方法はより高次元のブレーン系やオービフォールド上のブレーン系にたいしても同様に拡張できることが分かった [47]。しかし一般のタキオン凝縮においては超弦理論の共形不変性は自然にやぶれてしまう

ため、弦の場の理論が必要となる。高柳、寺嶋、上杉は Boundary String Field Theory を用いてブレーン-反ブレーン上の Off-shell 有効作用を決定し、それによって厳密にタキオン凝縮を記述できることがわかった。さらにブレーン-反ブレーン系および非 BPS Dブレーンの作用のうち Wess-Zumino 項と言われる項は数学で知られている "Superconnection" を用いて書かれることが分かった [48]。

ここ数年、非可換幾何の弦理論への応用に関する研究が進展していて、特に D-brane そのものを非可換幾何特有のソリトンと見なせることが指摘されてきている。そこで疋田、野崎、高柳は、非可換幾何におけるソリトンとしてのタキオン凝縮の記述を、fuzzy 球面に応用し、群多様体上 (特に SU(2) Wess-Zumino-Witten モデル) の不安定な D-brane の力学を調べた [41]。

最近、弦の場の理論のタキオン凝縮への応用が盛んに議論されているが、背景が曲がっている場合に特有の現象についてあまり理解されていない。そこで高柳は、その例としてオービフォルド上の brane-antibrane 系を Boundary string field theory の立場で研究し、崩壊後に幾何学的に非自明な配位にある fractional brane がどのように生成するかを決定した [42]。

近年、曲がった時空の上での D-brane の理論が活発になされている。しかし、実際知られているのは coset space の上や超重力理論の場との線形の結合などのみである。一方、超時空形式では抽象的であるが、厳密に超対称的な D-brane の作用が知られている。そこで、澁佐は去年に引き続き supermembrane の超重力理論の場との線形の結合を知るために 1 次元超時空の構造を調べ、特に "Gauge completion" の方法を使い、知られていなかった、反交換座標の 2 次の成分のいくつかを求めた [36]。さらにそのオーダーまでの一般解も導き出した。[62]。

大森は修士論文において開弦の場の理論におけるタキオン凝縮に関する最近の研究について review した [68]。

非可換幾何

松尾は非可換な場の理論で定義される新しいソリトン解に対する位相的なチャージがオペレーター理論の K 群で分類できることを提唱した。特にタキオン凝縮が起き高い次元のブレーンから低い次元のブレーンが生成されたとき、低い次元のブレーン上のゲージ場の配位が射影演算子を用いてどのように定義されるべきかを議論した。[24]

松尾と澁佐は M 理論における非可換性について、開いた膜の端に現れる弦を用いて議論を行った。この弦の運動は Hopf 項で支配されており超流動流体に現れる渦糸と同じ作用を持つ。特に拘束系の正準量子化を行うと体積を不変にする変形を生成することを示した。またそれを高次元に一般化し南部括弧式との関係を議論した。[25]

松尾と高柳は I. Bars (USC), 梶浦 (東大数理) と共同で非可換トーラス上における非可換ソリトンの

具体型を構成した。また非可換平面の場合とは異なりチャージが飛び飛びではなく稠密な実数集合になることを議論しそれが一種の不安定性を引き起こすのではないかと指摘した。また弦理論の摂動的な対称性である T 変換に対する不変性を示した。[26]

疋田、野崎、菅原は、SU(2) WZW 模型における D-brane の研究を行った。様々な multiple D0-brane の配位を Wilson line を用いることで boundary state として実現し、特に fuzzy sphere に対応した非可換な D0-brane の配位が、共形不変な境界条件を満足し、spherical D2-brane を記述する Cardy state に帰着することを示した。更に supersymmetric な拡張を与えることで、NS5 background 上の D-brane を調べ、brane の BPS、non-BPS の配位と fuzzy sphere configuration の関係などを tachyon condensation の観点から議論した [127]。

川野は、高橋とともに、反対称テンソル場 (B 場) が背景場に入っている時空での浅川 九後 高橋の開閉混合弦の場の理論が、非可換空間上のものと可換空間上のものの二種類作れ、それらは変数変換によって同等になっていることを示した [17]。

D-brane 上の有効理論は、その上に一定の電磁場が存在する時には、非可換幾何上のゲージ理論で記述されることが知られている。この物理系は、背景場として電磁場を持たせた可換な空間上の理論と等価であることが予想されている。また、複数の D-brane が存在する場合の有効理論としては、Tseytlin によって提唱された non-Abelian Born-Infeld 作用があるが、まだ結論はでていない。そこで、この作用に対して可換と非可換の間の等価性が存在を示すことは重要であると考えられる。寺嶋 (靖) は、この等価性を場の強さの微分を落とす近似で示した [44]。

また、最近、重力を含まない弦理論である、非可換開弦とその M 理論的な対応物である OM 理論が発見された。川野と寺嶋 (靖) は、弦理論である非可換開弦と場の理論である非可換空間上のゲージ理論の間の S 双対性を、OM 理論のトーラス上へのコンパクト化を使って導出することに成功した [45]。

寺嶋 (靖) と浜中は、インスタントン、モノポール、渦を題材に、非可換 BPS 方程式を不変に保つ、非可換空間特有の変換を見出し、既知の非可換 BPS ソリトンから、さまざまな新しい非可換 BPS ソリトンの厳密解を構成した [11]。

市川は修士論文 [66] で非可換幾何学の数学的な側面及び、非可換ソリトンや非可換場の理論について近年行われている諸研究等についてのレビューを行った。

AdS/CFT 対応

疋田、菅原は、京大基研の細道とともに、AdS₃ 上の string theory を、Liouville theory like な自由場表示を用いることで解析を行い、AdS₃/CFT₂ 対応から期待される高い (space-time の意味での) R-charge を持ったカイラル・プライマリーが自然に構成できることを示した。また、space-time CFT の symmetric orbifold の構造と spectral flow の関係について議論

を行った [37, 94, 95]。

F 理論

最近、F 理論の K3 空間にコンパクト化と呼ばれる IIB 型超弦理論の特殊なコンパクト化された理論は、さらに、NSNS B 場を入れることによって、 $Sp(2n)$ のような ADE 型以外のゲージ群を持つことができる事が示唆された。羽柴、細道、寺嶋 (靖) は、これを、弦接合と呼ばれる弦と D ブレーンの複合系を使うことによって示すことに成功した [46]。

1.2.2 量子重力

橋本は、ホーキング-テュロック・インスタントンの作用を計算する一つの方法として、ホーキング-テュロック特異性が 5 次元時空におけるボルトと見なせることを示し、特異点の作用に対する寄与をそれによって計算した [12]。

漸近的に 3 次元反ドジッター空間になる時空において漸近的対称性の Poisson 括弧による代数には Brown-Henneaux 中心電荷があらわれることが知られている。寺嶋 (容) は正準形式によって求められていたこの中心電荷を経路積分の定式化から導出し、用いる変数変換によっては経路積分の境界条件から中心電荷が生じることを示した [43]。さらに上記の結果を、重力理論での表面項の取り扱いやブラックホールのエントロピーへの応用などのレビューも含め、博士論文にまとめた [63]。

西川は修士論文で次のレビューをした。S 行列の Lorentz 不変性を使えば時空の曲がりを仮定しなくても Einstein 方程式が導ける。また有効理論によればたとえ基礎理論が不明でも重力ポテンシャルの r^{-3} 項までが計算できる。標準理論を曲率や撥率のある座標系で書くとどうなるかや、理論に必然的に含まれる曖昧さ (真性特異点、摂動的拘束条件など) について考察した。[67]

1.2.3 高エネルギー現象論

素粒子論的宇宙論

浅賀、柳田は、強い相互作用の CP 問題の解決策であるアクシオン模型を考えると、超重力模型で言われるグラビティーノ粒子の宇宙論的困難が解決されることを示した [1]。

宇宙のバリオン生成機構として、超対称理論に存在する、バリオンあるいはレプトン数を持つスカラー場のコヒーレントな運動を利用した Affleck-Dine baryo/leptogenesis という方法が存在する。浅賀、藤井、濱口、柳田は近年のニュートリノ振動実験から、最も興味深い Affleck-Dine leptogenesis について、宇宙初期の有限温度効果も含めた解析を行い、ニュートリノの質量に対する厳しい制限を得た [34]。

藤井、濱口、柳田は上記の機構について、全ての有限温度効果を加えた再解析を行った。その解析で、宇宙のバリオン数が最も軽いニュートリノの質量だけで決定されること、更にこの機構が将来の neutrinoless double beta decay の観測を通じて検証可能な事を発見した。また、必要とされる非常に軽いニュートリノを自然に説明できる方法も提案した。[35]。

藤井は修士論文の中で Affleck-Dine baryo/leptogenesis について、宇宙初期の有限温度効果を含めた解析と Q-ball 生成に伴う宇宙論的な制限を調べた [64]。

近年の宇宙論的観測から、宇宙定数がゼロでない正の値をとっていることが示唆されている。その宇宙定数が仮想的スカラー場のポテンシャルエネルギーからくるとした場合、そのポテンシャルは電弱ゲージ場のインスタントン効果によるものと考えるのが自然であることが知られている。野村 (泰)、渡利、柳田は、電弱ゲージ場のインスタントン効果を超対称性理論の場合について調べ、そのポテンシャルエネルギーが宇宙定数の観測値にちょうどよいことを発見した [49]。さらにその一致が起きる理由についても、考察した [58]。

インフレーションをひきおこす物理は、この自然の基本スケールでの物理に関する情報を含んでいる。渡利、柳田は、ハイブリッドインフレーションモデルにおいては、 $N=2$ の超対称性を課することができ、さらに、それによってモデルのいくつかの困難を同時に解決できるかもしれない、という示唆的な結果を得た [51]。

井沢は、時間方向に進展する通常の空間のインフレーションが平らな空間を実現するように、高次元方向に進展する時空間の「インフレーション」が平らな背景時空を選択することによる微小な宇宙定数の自然な実現を考えた [15]。

宇宙項問題の解決への糸口は、観測されている四次元の宇宙項を、理論の積分定数として導き出せるか、というところにあると言える。早川と井沢はこのことを、正の宇宙項を持つ六次元時空を warped コンパクト化するモデルを考えることで、実現した [14]。3-brane と、背景場であるゲージ場を導入することで全時空が正則であることが可能となった。

早川は修士論文において、高次元場の理論の中で特に brane や、warped metric に焦点をあて、それらの重力理論における取り扱い方を示した。また高次元理論が現象論の諸問題を解決するための手段としてどのように利用され得るか、階層性問題と宇宙項問題に着目して、紹介した [65]。

超対称模型では R-パリティという対称性が保存するならば最も軽い超対称粒子 (LSP) は安定になるので、宇宙のダークマターの候補になる。超対称性の破れの Gauge-Mediation 模型では LSP は gravitino (重力子の超対称粒子) である。浅賀、濱口、鈴木は Gauge-Mediation 模型において、スカラー τ 粒子が gravitino の次に軽い超対称粒子である場合の LSP gravitino の残存量を計算した。その結果、宇宙の再加熱温度に $10^9 - 10^{10} \text{ GeV}$ という上限がつくことが分かった [39]。これは宇宙のバリオン数がレプトン数から作られるというシナリオを支持するもので

ある。

重力は全ての場の間に相互作用を引き起こすので、インフラトンは少なくとも重力相互作用により超対称性の破れの効果を受ける。この効果によりインフレーションが起こらなくなる可能性があるが、鈴木と渡利は超重力理論の枠内でこの効果を計算し、いくつかのインフレーションモデルにおいてはそのパラメータに制限がつくことを示した [40]。

超対称統一理論

単純な超対称標準模型は、実験的には小さな割合でしか起こらない過程である FCNC (Flavor-Changing Neutral Current) が非常に大きな割合で起こると予想してしまう。野村(泰)、柳田は超対称性を破る場と標準模型の場が高次元で異なる ($3 + 1$) 次元部分空間に局在化しているために、上記の問題が回避される模型を構築した [29]。この模型では、超対称性の破れは高次元に置かれた $U(1)$ ゲージ相互作用により標準模型のセクターに伝えられ、 μ 項と呼ばれるヒッグス粒子の超対称質量が現象論的に望ましい値をとることが示される。

超対称性の破れの伝達機構の有効な一つとして、アノマリー伝達機構が知られている。川崎(初期宇宙センター)、渡利、柳田は、この伝達機構の場合には一般に、高エネルギーの物理の効果が現在の真空の不安定性をひきおこすことを指摘した。しかしながらその不安定性は、宇宙の歴史の時間スケールの中では、十分に小さなものであることを示した [50]。

超共形異常の効果で超対称性の破れを伝える機構は、高エネルギーの物理によらずスフェルミオンの質量の縮退が得られ、FCNCの問題がなく非常にいい性質を持っているが、最も単純な模型では、スレプトンがタキオンになってしまう問題がある。北澤(都立大)、丸、岡田(KEK)は、 $U(1)_R$ ゲージ対称性で超対称性の破れを伝える新しい模型を構成し、この問題を解決した [19, 20, 21]。

丸、坂井(東工大)、阪村(東工大)、杉坂(東工大)は、異なる超対称性を保つ BPS ドメイン壁が共存する系において、1つの壁の上にどのようにその破れの効果が現れるかを考察した。系全体として超対称性が非常に強く破れていても、壁の上に誘起される効果は壁の間の距離に対して指数関数的に抑制されることがわかった [22]。

レプトンフレーバー物理

太陽、大気ニュートリノに加えて、LSND で観測されているニュートリノ振動も説明しようとする、少なくとも 4 世代のニュートリノが必要になる。最近、LSND の実験結果を受けて、ほとんど電弱相互作用をしない重い (~ 1 eV) ニュートリノと他の 3 世代の軽いニュートリノ (e, μ, τ ニュートリノを主な成分とする) とで構成されるような、 $(1 + 3)$ 階層性と呼ばれる質量階層性が再び注目を浴びている。浜口、柳田は、F. Borzumati(KEK) と共に、この $(1 + 3)$

階層性を超対称性を用いて巧みに説明する模型を提案した [10]。

野村(大)は昨年度までの研究で、最近の太陽、大気ニュートリノ振動の実験結果を考慮に入れた上で、 $\mu \rightarrow e\gamma$ や $\tau \rightarrow \mu\gamma$ などのレプトンフレーバー数を破る稀過程に関して詳細に調べてきたが、今年度も研究会でこれらの成果を発表した [55, 77]。また、これらの結果とともに、JLC などの将来の電子陽電子型加速器実験でレプトンフレーバー数を破る過程がどの程度まで観測可能かをあわせて議論し、学位論文にまとめた [60]。

1.2.4 場の理論

格子ゲージ理論

藤川は Ginsparg-Wilson の関係式を代数的に一般化し、その代数関係の無限個の解の具体的な構成法を与えた [5]。これらの演算子は整数 k でラベルされており、 $k = 0$ とすると通常の overlap 形式の演算子に帰着する。これらの全ての演算子は doubling を含まず、正しい連続極限を与える。

藤川と石橋は一般化された Ginsparg-Wilson の関係式の無限個の解についての性質を調べた。はじめに、カイラル量子異常の具体的な計算を行い、連続極限でカイラル量子異常の係数が格子理論特有のパラメーターによらず、連続理論の値に一致し、指数定理が成立することを証明した [7]。次に、連続極限のユニバーサリティーやカイラルゲージ理論のアノマリーの解析に重要な局所性の性質を詳細に調べ、相互作用がない場合については、演算子の singularity に注目し、相互作用がある場合については、演算子のノルムの評価などを行い、局所性の証明を与えた [8]。

ゲージ理論の量子化

ゲージ場の質量項は一般にゲージ対称性を破るが、藤川と寺嶋(容)は、このような質量項をゲージ固定項として理解できることを示した [6, 52]。これは、質量項を持つゲージ場を、質量が 0 のゲージ場にゲージ固定項が付け加わったものとして理解できる可能性を与えるものである。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] T. Asaka and T. Yanagida, "Solving the gravitino problem by axino", Phys. Lett. **B494**, 297 (2000).
- [2] M. Asano and M. Natsuume, "The no-ghost theorem for string theory in curved backgrounds with a flat timelike direction," Nucl. Phys. **B588**(2000)453.
- [3] Tohru Eguchi, Hiroaki Kanno, "Five-Dimensional Gauge Theories and Local Mirror Symmetry", Nucl.Phys. **B586** (2000) 331-345

- [4] Tohru Eguchi, Ezra Getzler, Chuan-Sheng Xiong, "Topological gravity in genus 2 with two primary fields", to appear in *Adv. Theor. Math. Phys.*
- [5] K. Fujikawa: "Algebraic generalization of the Ginsparg-Wilson relation", *Nucl. Phys.* **B589** (2000)487.
- [6] K. Fujikawa and H. Terashima: "Quantum and Classical Gauge Symmetries in a Modified Quantization Scheme", *Int. Journal of Mod. Phys. A* (in press), hep-th/0004190.
- [7] K. Fujikawa and M. Ishibashi: "Chiral anomaly for a new class of lattice Dirac operators", *Nucl. Phys.* **B587** (2000)419-441.
- [8] K. Fujikawa and M. Ishibashi: "Locality properties of a new class of lattice Dirac operators", *Nucl. Phys. B* (in press), hep-lat/0102012.
- [9] K. Fujikawa: "Aspects of Anomalies in Field Theory", *Int. Journal of Mod. Physics*, **A16**(2001) 331.
- [10] F. Borzumati, K. Hamaguchi and T. Yanagida: "Supersymmetric seesaw model for the (1+3)-scheme of neutrino masses", *Phys. Lett. B* **497** (2001) 259.
- [11] M. Hamanaka and S. Terashima, "On exact non-commutative BPS solitons," *JHEP* **0103** (2001) 034 [hep-th/0010221].
- [12] Masashi Hashimoto: "Action of singular instantons of Hawking-Turok type", *Phys. Rev.* **D63** (2001) 043510.
- [13] Y. Imamura: "A D2-brane realization of Maxwell-Chern-Simons-Higgs systems", *JHEP* **0102** (2001) 035.
- [14] S. Hayakawa and K. I. Izawa: "Warped compactification with an Abelian gauge theory," *Phys. Lett. B* **493**, 380 (2000) [hep-th/0008111].
- [15] K.-I. Izawa: "Quintessential Brane and the Cosmological Constant", *Prog. Theor. Phys.* **105** (2001) 185.
- [16] T. Kawano and T. Takahashi, "Open String Field Theory On Noncommutative Space," *Prog. Theor. Phys.* **104**, 459 (2000).
- [17] T. Kawano and T. Takahashi, "Open-Closed String Field Theory In A Background B -Field," *Prog. Theor. Phys.* **104**, 1267 (2000).
- [18] T. Kitao and N. Ohta: "Spectrum of Maxwell-Chern-Simons Theory Realized on Type IIB Brane Configurations", *Nucl.Phys.* **B578** (2000) 215.
- [19] N. Kitazawa, N. Maru and N. Okada: "Dynamical Supersymmetry Breaking with Gauged $U(1)_R$ Symmetry" *Phys. Rev.* **D62** (2000) 077701.
- [20] N. Kitazawa, N. Maru and N. Okada: "Models of Dynamical Supersymmetry Breaking with Gauged $U(1)_R$ Symmetry" *Nucl. Phys.* **B586** (2000) 261.
- [21] N. Kitazawa, N. Maru and N. Okada: "Remediation of Dynamical Supersymmetry Breaking" *Phys. Rev.* **D63** (2000) 015005.
- [22] N. Maru, N. Sakai, Y. Sakamura and R. Sugisaka: "SUSY Breaking by Overlap of Wave Functions in Coexisting Walls" *Phys. Lett.* **B496** (2000) 98.
- [23] Hiroyuki Fuji, Yutaka Matsuo: "Open String On Symmetric Product", *Int. J. Mod. Phys.* **A16** (2001) 557-608, hep-th/0005111.
- [24] Yutaka Matsuo: "Topological Charges Of Non-commutative Soliton", *Phys. Lett.* **B499** (2001) 223-228, hep-th/0009002.
- [25] Y. Matsuo, Y. Shibusa: "Volume Preserving Diffeomorphism And Noncommutative Branes", *JHEP* **0102** (2001) 006, hep-th/0010040 .
- [26] I. Bars, H. Kajiura, Y. Matsuo, T. Takayanagi: "Tachyon Condensation On Noncommutative Torus", *Phys. Rev.* **D63** (2001) 86001, hep-th/0010101.
- [27] M. Naka and M. Nozaki: "Singular Calabi-Yau Manifolds and ADE Classification of CFTs", *Nucl. Phys.*(2001) **B599** 334.
- [28] J. Hashiba and M. Naka: "Landau-Ginzburg Description of D-branes on ALE Spaces", *Nucl. Phys.*(2001) **B599** 361.
- [29] Y. Nomura and T. Yanagida, "Bulk $U(1)$ Messenger", *Phys. Lett.* **B487** (2000) 140.
- [30] E. Ogasa: "The projections of n -knots which are not the projection of any unknotted knot!! Journal of knot theory and its ramifications (2001)
- [31] E. Ogasa: "Nonribbon 2-links all of whose components are trivial knots and some of whose braidings are nonribbon knots" *Journal of knot theory and its ramifications* (印刷中)
- [32] Y. Sugawara: "Topological String on $AdS_3 \times \mathcal{N}$ ", *Nucl. Phys.* B576 (2000) 265-284.
- [33] T. Eguchi and Y. Sugawara: "Modular Invariance in Superstring on Calabi-Yau n -fold with $A-D-E$ Singularity", *Nucl. Phys.* B577 (2000) 3-22.
- [34] T. Asaka, M. Fujii, K. Hamaguchi and T. Yanagida, "Affleck-Dine leptogenesis with an ultralight neutrino," *Phys. Rev. D* **62**, 123514 (2000).
- [35] M. Fujii, K. Hamaguchi and T. Yanagida, "Reheating-temperature independence of cosmological baryon asymmetry in Affleck-Dine leptogenesis," *Phys. Rev. D* **63**, 1235XX (2001), hep-ph/0102187.
- [36] Shibusa Yuuichirou: "A component of superconnection of 11-dimensional curved superspace at second order in anticommuting coordinates". *Prog. Theor. Phys.* **104** (2000) 249
- [37] Y. Hikida, K. Hosomichi and Y. Sugawara: "String Theory on AdS_3 as Discrete Light-Cone Liouville Theory", *Nucl. Phys.* B589 (2000) 134-166.
- [38] T. Eguchi and Y. Sugawara: "D-branes in Singular Calabi-Yau n -fold and $N = 2$ Liouville Theory", *Nucl. Phys.* B598 (2001) 467-491.

- [39] T. Asaka, K. Hamaguchi and Koshiro Suzuki, "Cosmological gravitino problem in gauge-mediated supersymmetry breaking models", *Phys.Lett.***B490**:136-146,2000.
- [40] Koshiro Suzuki and T. Watari, "Constraints on inflation models from supersymmetry breakings", *Phys.Lett.***B506**:231-237,2001.
- [41] Y. Hikida, M. Nozaki and T. Takayanagi, "Tachyon condensation on fuzzy sphere and non-commutative solitons," *Nucl. Phys. B* **595** (2001) 319.
- [42] T. Takayanagi, "Holomorphic tachyons and fractional D-branes," hep-th/0103021, to be published in *Nucl. Phys. B*.
- [43] H. Terashima: "The Brown-Henneaux's central charge from the path-integral boundary condition", *Phys. Lett.* **B499**, 229 (2001).
- [44] S. Terashima, "The non-Abelian Born-Infeld action and noncommutative gauge theory," *JHEP* **0007** (2000) 033
- [45] T. Kawano and S. Terashima, "S-duality from OM-theory," *Phys. Lett. B* **495** (2000) 207
- [46] J. Hashiba, K. Hosomichi and S. Terashima, "String junctions in B field background," *JHEP* **0009** (2000) 008
- [47] M. Naka, T. Takayanagi and T. Uesugi: "Boundary State Description of Tachyon Condensation", *JHEP* **0006** (2000) 007, hep-th/0005114.
- [48] T. Takayanagi, S. Terashima and T. Uesugi: "Brane - Antibrane Action from Boundary String Field Theory", *JHEP* **0103** (2001) 019, hep-th/0012210.
- [49] Y. Nomura, T. Watari and T. Yanagida, "Quintessence axion potential induced by electroweak instanton effects," *Phys. Lett. B* **484** (2000) 103 [hep-ph/0004182].
- [50] M. Kawasaki, T. Watari and T. Yanagida, "Vacuum instability in anomaly mediation models with massive neutrinos," *Phys. Rev. D* **63** (2001) 083510 [hep-ph/0010124].
- [51] T. Watari and T. Yanagida, "N = 2 supersymmetry in a hybrid inflation model," *Phys. Lett. B* **499** (2001) 297 [hep-ph/0011389].
- (会議抄録)
- [52] K. Fujikawa and H. Terashima: "Quantum and Classical Gauge Symmetries", *Proceedings of International Conference on High Energy Physics, Osaka, July 2000* (in press). hep-th/0009097.
- [53] 浜中 真志:『非可換ソリトンの厳密解の構成法』, 基礎研究会「場の量子論の基礎的諸問題と応用」研究会報告, 素粒子論研究 (掲載予定)
- [54] 浜中 真志: "Exact BPS Solitons in Noncommutative Gauge Theories," 基礎研究会「ストリング理論と場の理論における非可換幾何」研究会報告, 素粒子論研究 (掲載予定)
- [55] D. Nomura, "Lepton Flavor Violation and Supersymmetric Models with Right-handed Neutrino". To appear in *Proc. of the Joint U.S./Japan workshop on "New Initiatives in Lepton Flavor Violation and Neutrino Oscillations with Very Intense Muon and Neutrino Sources"*, World Scientific Publishing.
- [56] Y. Sugawara: "Topological String on $AdS_3 \times \mathcal{N}$ ", in the proceedings of the international workshop on "Frontiers of Theoretical Physics - A General View of Theoretical Physics at the Crossing of Centuries", Eds. F. Sakata, K. Wu and E.-G. Zhao, World Scientific, 2000.
- [57] 渡利 泰山: "Quintessence Axion Potential induced by Electroweak Instanton Effects", 基礎物理学研究所 2000年度前期研究会「素粒子物理学の新展開」, 素粒子論研究.
- [58] T. Watari, "Quintessence Axion Potential from Electroweak Instantons", *COSMO 2000*, World Scientific から会議抄録が出版される.
- (国内雑誌)
- [59] 井沢 健一: 「自発的に破れる超対称性の実現」, *日本物理学会誌* **55** (2000) 290.
- (学位論文)
- [60] D. Nomura, "Lepton Flavor Violation in Supersymmetric Standard Models".
- [61] Y. Nomura, "A Solution to the Flavor-Changing Neutral Current Problem in the Supersymmetric Standard Model".
- [62] Shibusu Yuuichirou: "M(embrane)-theory on 11-dimensional supergravity backgrounds".
- [63] H. Terashima: "Path integral derivation of the Brown-Henneaux's central charge".
- (修士論文)
- [64] M. Fujii, "Affleck-Dine Baryogenesis And Q-Balls".
- [65] 早川 祥子: 「高次元時空のワープト コンパクト化とその物理」
- [66] 市川 憲人: 「弦理論の非可換幾何学的側面」
- [67] 西川美幸: 「Quantum Gravity with Minimal Assumptions」
- [68] K. Ohmori: "Study of Tachyon Condensation using String Field Theory"
- [69] 落合文四郎: 「Higgs 粒子の質量の理論上の制限」
- [70] 酒井 一博: 「超対称ゲージ理論の超弦理論による実現」
- (著書)
- [71] 藤川和男: 「経路積分と対称性の量子的破れ」(岩波書店, 2001)
- < 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [72] T. Asaka: "Gravitino Problem and Reheating Temperature in Gauge-mediated Supersymmetry Breaking", The 8th International Conference on Supersymmetry in Physics, CERN, Geneva, Switzerland, 2000.
- [73] K. Hamaguchi: "Affleck-Dine leptogenesis with an ultralight neutrino," International Workshop on PARTICLE PHYSICS AND THE EARLY UNIVERSE (COSMO-2000), September 4-8, 2000, Cheju Island, Korea.
- [74] Masashi Hamanaka, "Exact Noncommutative BPS Solitons," 5th Winter School of APCTP/KIAS and 9th Haengdang Workshop on Strings and Field Theory, Hanyang University, Korea, December, 2000.
- [75] N. Maru: "Dynamical Supersymmetry Breaking with Gauged $U(1)_R$ Symmetry" 8th International Conference on Supersymmetries in Physics (SUSY2K), CERN, Geneva, Switzerland, June 2000.
- [76] N. Maru: "R-mediation of Dynamical Supersymmetry Breaking" Sendai Phenomenology Workshop "NEW DIRECTIONS TO UNIFIED THEORIES", Tohoku University, Sendai, Japan, October 2000.
- [77] D. Nomura, "Lepton Flavor Violation and SUSY with Right-handed Neutrino", at the Joint U.S./Japan workshop on "New Initiatives in Lepton Flavor Violation and Neutrino Oscillations with Very Intense Muon and Neutrino Sources", October 2-6, 2000, University of Hawaii.
- [78] Koshiro Suzuki: "Lower bound on the reheating temperature in supergravity", New Directions to Unified theories, Tohoku University, Sendai, Japan, October 24, 2001.
- [79] T. Watari: "Quintessence Axion Potential from Electroweak Instantons", International Workshop on PARTICLE PHYSICS AND THE EARLY UNIVERSE (COSMO-2000), KAL hotel, Cheju island, Korea, September, 2000.
- [80] T. Watari: "Origin of Hybrid Inflation Model", Sendai Phenomenology Workshop : New Directions to Unified Theories, Tohoku University, Sendai, Japan, October, 2000.

招待講演

- [81] Tohru Eguchi: "Local Mirror Symmetry and Supersymmetric Gauge Theories", KIAS conference
- [82] Tohru Eguchi: "Symplectic Geometry and Mirror Symmetry", 8/14-18, 2000, Seoul, Korea
- [83] K. Fujikawa: "History and Foundation of Anomalies",

"Index Theorem and Chiral Anomaly on the Lattice", Workshop on New Development in Lattice Gauge Theory, Center for Subatomic Structure of Matter, University of Adelaide, April 2000.

- [84] K. Fujikawa: "Quantum and Classical Gauge Symmetries" International Conference on High Energy Physics, Osaka, July 2000.
- [85] 寺嶋 靖治: "S-Duality from OM-Theory", APCTP-Yonsei Joint Summer Workshop on Noncommutative Field Theories, Yonsei University, Seoul, Korea, August, 2000

(国内会議)

一般講演

- [86] 浅野 雅子: "Analysis of branes in the Kaluza-Klein monopole background by supergravity," 日本物理学会第 55 回年次大会, 新潟大学, 2000 年 9 月.
- [87] K.Hamaguchi: "Leptogenesis in an inflationary universe," 「素粒子物理学の新展開」, 京都大学基礎物理学研究所, 2000 年 7 月.
- [88] 浜中 真志: 『非可換ソリトンの厳密解の構成法』, 「場の量子論の基礎的諸問題と応用」, 京都大学基礎物理学研究所, 2000 年 12 月.
- [89] Masashi Hamanaka : "Exact Noncommutative BPS Solitons," Winter School in Niseko, 2001 年 1 月 (Poster Session).
- [90] 浜中 真志: 『非可換ゲージ理論におけるソリトン解』, 「可積分系研究の現状と展望」, 京大館, 2001 年 2 月.
- [91] 浜中 真志: 『非可換 BPS ソリトンの厳密解の構成法』, 日本物理学会, 中央大学多摩キャンパス, 2001 年 3 月.
- [92] 石橋 真人: 『One-loop analyses of lattice QCD with the overlap Dirac operator』, 日本物理学会, 新潟大学, 2000 年 9 月
- [93] 石橋 真人: 『一般化された Ginsparg-Wilson 関係式をみたく Dirac 作用素の性質』, 日本物理学会, 中央大学, 2001 年 3 月
- [94] 疋田泰章: 『 AdS_3 空間上の弦理論とその自由場表示』, 場の理論 2000, 京都大学基礎物理学研究所, 2000 年 7 月
- [95] 疋田泰章: 『String Theory on AdS_3 as Discrete Light-Cone Liouville Theory』, 日本物理学会, 新潟大学, 2000 年 9 月
- [96] 川野 輝彦: 『String Field Theory in the Background B-Field』, 日本物理学会, 新潟大学, 2000 年 9 月
- [97] 川野 輝彦: 『S-Duality from OM-Theory』, 日本物理学会, 中央大学, 2001 年 3 月
- [98] 丸 信人: 『Manifestation of SUSY Breaking in Co-existing Walls』 日本物理学会, 中央大学, 2001 年 3 月.
- [99] 那珂 通博: 『ヒルツェブルフ曲面のローカルミラー対称性』, 日本物理学会, 新潟大学, 2000 年 9 月
- [100] 那珂 通博: 『特異カラビヤウ多様体と共形場理論の ADE 分類』, 日本物理学会, 中央大学 2001 年 3 月

- [101] 野崎真利: 「Gepner モデルの boundary state の構成とその応用」, 「場の理論 2000」, 京都大学基礎物理学研究所, 2000 年 7 月
- [102] 野崎真利: 「Gepner モデルの Boundary state の構成とその応用」, 日本物理学会, 新潟大学, 2000 年 9 月
- [103] 野崎真利: 「Tachyon condensation on fuzzy sphere and noncommutative solitons」, Sapporo Winter School in Niseko '01, 北海道 虻田郡 ニセコ町, 2001 年 1 月 (ポスターセッション)
- [104] 野崎真利: 「From D0-branes to D2-brane on noncommutative sphere」, 日本物理学会, 中央大学, 2001 年 3 月
- [105] 菅原祐二: 「D-branes in Singular Calabi-Yau Compactification and Liouville Theory」, 日本物理学会 2000 年度第 55 回年次大会 9 月 22 日 (金) - 9 月 25 日 (月), 新潟大
- [106] 鈴木 功至郎: 「Cosmology in gauge-mediated supersymmetry breaking models」, 日本物理学会 2000 年 春の分科会, 近畿大学, 2000 年 4 月 2 日.
- [107] 鈴木 功至郎: 「Gauge mediation 模型における gravitino 問題」, 基研 2000 年度前期研究会「素粒子物理学の新展開」, 京都大学基礎物理学研究所, 2000 年 7 月 17 日.
- [108] 高柳 匡: 「ALE 空間における String Creation と Quiver ゲージ理論の Renormalization flow」, 場の量子論 2000, 京都大学基礎物理学研究所, 2000 年 7 月.
- [109] 高柳 匡: 「ALE 空間における String Creation と Quiver ゲージ理論の Renormalization flow」, 日本物理学会, 新潟大学 2000 年 9 月.
- [110] 高柳 匡: 「Fuzzy sphere におけるタキオン凝縮」, 日本物理学会, 中央大学 2001 年 3 月.
- [111] 寺嶋 靖治: 「On the Equivalence between Noncommutative and Ordinary Gauge Theories」, 場の理論 2000, 京都大学基礎物理学研究所, 2000 年 7 月
- [112] 寺嶋 靖治: 「非可換空間上の超対称理論と超場」, 日本物理学会, 中央大学, 2001 年 3 月
- [113] 上杉 忠興: 「Boundary State とタキオン凝縮」, 場の量子論 2001, 京都大学基礎物理学研究所, 2000 年 7 月
- [114] 上杉 忠興: 「Brane-Antibrane Action from Boundary String Field Theory」, Sapporo Winter School in Niseko '01, ニセコアンヌプリ, 2001 年 1 月
- [115] 上杉 忠興: 「ブレーン-反ブレーンの有効作用と背景によらない弦の場の理論 (BIOSFT)」, 日本物理学会, 中央大学, 2001 年 3 月
- [116] 渡利 泰山: 「Mass Generation for an Ultralight Axion」, 日本物理学会, 近畿大学, 2000 年 4 月.
- [117] 渡利 泰山: 「Quintessence Axion Potential induced by Electroweak Instanton Effects」, 素粒子物理学の新展開, 京都大学基礎物理学研究所, 2000 年 7 月.
- [118] 渡利 泰山: 「N=2 Supersymmetry in a Hybrid Inflation Model」, 日本物理学会, 中央大学, 2001 年 3 月.
- 招待講演
- [119] Tohru Eguchi: 「Quantum cohomology and structure of topological string theory」, International workshop on physics and combinatorics, 8/21-26, 2000, Nagoya
- [120] Tohru Eguchi: 「Boundary states and D-branes in singular Calabi-Yau manifolds」, workshop on 「Modular invariance, ADE, Subfactors and Geometry of Moduli Spaces」, Kyoto, 11/26-12/2, 2000.
- [121] 浜中 真志: 「Exact BPS Solitons in Noncommutative Gauge Theories」, 「ストリング理論と場の理論における非可換幾何」, 京都大学基礎物理学研究所, 2001 年 2 月.
- [122] 井沢 健一: 「The Power of Higher Dimensions」, RESCEU 研究会「ブレーンワールド」, 2001 年 1 月 9-10 日.
- [123] 丸 信人: 「R-mediation of Dynamical Supersymmetry Breaking」, ニュートリノ研究会「ニュートリノ振動は統一理論に何を要求するか II」, 京都大学理学部, 2001 年 2 月.
- [124] 松尾 泰: 「弦理論におけるソリトンとその幾何学」, 集中講義 (立教大学) 2000 年 10 月
- [125] 松尾 泰: 「Geometrical Aspects of Noncommutative Soliton」, 「ストリング理論と場の理論における非可換幾何」 (京都大学基礎物理学研究所, 2001 年 2 月)
- [126] 松尾 泰: 「Introduction of D-brane to Mathematician」, 「Noncommutative branes and volume preserving diffeomorphism」, International Workshop on Noncommutative Geometry and String Theory, (Keio University, March 2001)
- [127] 菅原祐二: 「Wilson Line in $SU(2)$ WZW model and Spherical D-brane」, Workshop on Noncommutative Geometry and String Theory, 3 月 16 日 (金) - 3 月 22 日 (木), 慶応大
- [128] 高柳 匡: 「Tachyon condensation in superstring theory」, 特定研究総括研究会, 東京, 2001 年 2 月.
- [129] 高柳 匡: 「Noncommutative geometry in $SU(2)$ WZW-model via tachyon condensation」, 弦理論と場の理論における非可換幾何, 京都大学基礎物理学研究所, 2001 年 2 月.
- [130] 寺嶋 靖治: 「OM theory」, Summer Institute 2000, 日経連人材開発センター富士研修所, 1999 年 8 月
- [131] 寺嶋 靖治: 「Noncommutative Open String (NCOS) and OM Theory」, ストリング理論と場の理論における非可換幾何, 京都大学基礎物理学研究所, 2001 年 2 月
- [132] 寺嶋 靖治: 「A Construction of Commutative D-branes from Lower Dimensional Non-BPS D-branes」, KEK 理論研究会 2001, 高エネルギー加速器研究機構, 2001 年 3 月

2 原子核・素粒子実験

2.1 原子核実験研究室(酒井、早野、櫻井研究室)

原子核実験研究室は、酒井研究室、早野研究室、櫻井研究室の三研究室から構成され、密接に連絡を取りながら、原子物理学、素粒子物理学などとの境界分野も含めた領域において、原子核物理学を中心とした実験的研究を行なっている。

酒井研究室では、原子核のスピン・アイソスピン自由度に着目し、ハドロン多体系としての原子核の構造や核子間の相互作用の研究を中心に行っている。実験装置として、偏極イオン源、偏極標的、散乱粒子の偏極度を測定する偏極度計などの開発を進めて来た。今年度は、核子-重陽子散乱における核子間三体力の研究、6クォークで構成される粒子であるダイバリオンの探索、ガモフテラー遷移強度の精密測定による核内クォーク自由度の研究などを行った。

2000年6月26-29日に日光に於いて日蘭シンポジウム「多体系の強相関現象(原子核と電子凝縮系を中心に)」を主催した。講演・参加者は、46名(オランダ側21名、日本側25名)であった。このシンポジウムは、1999年に締結された本学とグローニンゲン大学(オランダ)間の学術交流協定ならびに日蘭交流400年を記念するものである。講演の詳細についてはホームページ <http://tkynx0.phys.s.u-tokyo.ac.jp/scms/> を参照のこと。尚、このシンポジウムは東京大学ならびに日本学術振興会からの援助を受けた。

早野研究室では、ジュネーブにあるCERN研究所において2000年7月に稼働を始めた反陽子減速器(AD)を利用した反陽子を含むエキゾチック原子の研究-ASACUSAプロジェクト(Atomic Spectroscopy and Collisions Using Slow Antiprotons)-を中心課題に据えている。またADにおいて大量の反水素を生成し、その性質を精密に調べることでよりCPT不変性の検証を目指したATHENAプロジェクトにも参加している。

さらに核物質中での中間子の質量変化を調べるために、鉛原子核中に深く束縛された、パイ中間子原子を生成させる実験をドイツ、ダルムシュタットのGSI研究所で、1996年以来おこなってきた。2001年度からは、錫の同位体標的を用いた実験を行う予定である。

櫻井研究室では、天然に存在する安定核よりも中性子数や陽子数が極端に多い不安定核を生成し、そ

の高アイソスピンに由来するエキゾチックな性質を探る実験研究を行っている。特に中性子過剰核に現れる特異な現象に着目し、中性子過剰核のハロー構造や殻構造の変化(魔法数の喪失など)、核反応を用いた動的性質の研究を進めている。また、天体現象で重要な役割を果たす不安定核による核反応の研究にも取り組んでいる。実験は、主に理化学研究所の不安定核ビーム装置RIPS(RIKEN Projectile-fragment Separator)で生成された不安定核ビームを利用して

2.1.1 (n, p) 測定施設を用いた研究(酒井研究室)

大阪大学核物理研究センターにおいて、偏極中性子ビームを生成する(n, p)測定施設の建設を進め、今年度全系を完成した。エネルギーのそろった単色中性子ビームを ${}^7\text{Li}(p, n)$ 反応によって生成し、(n, p)反応標的に照射する。出射陽子の運動量は大口径スペクトロメータで測定する。エネルギー分解能および散乱角分解能の向上のため、スペクトロメータ入口に新たにMWDCを設置した。

この施設を利用して、 β_+ 側ガモフテラー遷移強度の精密測定、中性子-重陽子弾性散乱による三体力研究、および高分解能(p, n)反応測定の実験が行われた。

ガモフテラー遷移強度のクエンチング機構の研究

原子核の構造が核子以外の自由度、とりわけクォーク自由度の影響を受けるかどうかは、原子核物理学の基本的な研究課題である。特にガモフテラー型遷移については、遷移強度の和則値からの減少(クエンチング)と呼ばれる現象が報告されており、核子の励起状態であるデルタ粒子の関与が指摘されている。

和則値は β_- 側反応の遷移強度と β_+ 側反応の遷移強度の差で表される。我々は、クォーク自由度の関与の度合を数%の精度で決定することを目的として、既に測定した β_- 側の ${}^{90}\text{Zr}(p, n){}^{90}\text{Nb}$ 反応の結果と合わせるべく β_+ 側の ${}^{90}\text{Zr}(n, p){}^{90}\text{Y}$ 反応の遷移強度の高精度測定を行った。

入射エネルギー300 MeVにおいて、励起エネルギー60 MeVまでの二階微分散乱断面積を散乱角 $\theta = 0^\circ - 13^\circ$ にて取得した。得られた励起エネルギースペクトルを図2.1 aに示す。今後の解析では、得られた二階微分散乱断面積の角度分布に対して多重展開の手法を用い、 β_+ 側ガモフテラー遷移強度の励起エネルギー分布を精度よく求める予定である。[42, 91, 122]

偏極中性子-重陽子弾性散乱測定による三体力の検証

近年、少数核子系での三体力の研究が世界的な注目を集めている。我々は中間エネルギー領域に於け

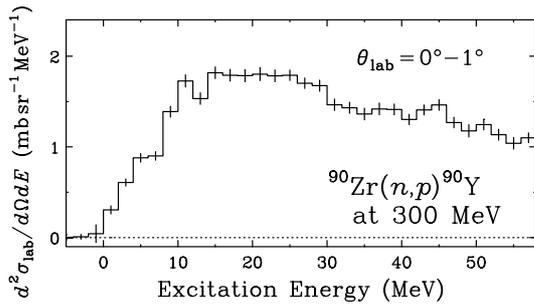


図 2.1 a: Double differential cross sections of the $^{90}\text{Zr}(n, p)^{90}\text{Y}$ reaction at 300 MeV.

る偏極重陽子-陽子弾性散乱の高精度測定を行ない、三体力の効果を示す重要な結果を得た (2.1.2 節を参照)。しかし実験値との比較を行っている三体力を含むファデーエフ理論計算には、計算の困難さからクーロン力を取り入れる事が出来ていない。そこで我々は、クーロン力を含まない三核子系散乱である偏極中性子-重陽子弾性散乱の測定を行い、直接ファデーエフ理論計算と比較した。

実験は、 (n, p) 測定施設において 250 MeV 偏極中性子ビームを用いて行った。重陽子標的には我々が製作した重陽子化ポリエチレン (CD_2) を使用した。重心系で $85^\circ \sim 180^\circ$ の領域の微分散乱断面積およびベクトル偏極分解能を測定した。実験結果を図 2.1 b に黒丸で示した。細線は 2 種類の最新の 2 核子間力を用いたファデーエフ計算で、これに三体力を取り入れた計算が太線である。微分散乱断面積については、三体力を含んだ計算の方が実験値を比較的良く再現するがまだ実験値を下回っている。この差が生じる理由として、1 核子当たりのエネルギーが高くなったことによる相対論的効果が、計算に取り入れられていないことが考えられる。ベクトル偏極分解能に関しては、統計誤差が大きく計算との比較は難しいが、角分布がどの計算とも異なる傾向を示しているため、理論の改善が必要と考えられる。[63, 80, 92, 120, 121, 122, 128]

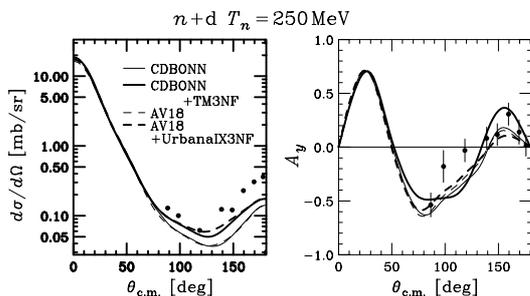


図 2.1 b: Measured cross sections and vector analyzing powers for the $\bar{n}d$ elastic scattering at 250 MeV and the results of the Faddeev calculations.

300 MeV における高分解能 (p, n) 反応測定のテスト実験

中間エネルギーにおける (p, n) 反応の中性子エネルギー測定は、飛行時間測定法 (TOF 法) を用いるのが一般的である。この場合、飛行時間測定の時間分解能がエネルギー分解能を決めることになる。我々は異なる手法として、 (n, p) 測定施設を利用した (p, n) 反応の高分解能測定を試みた。通常中性子生成標的を置く位置に、 (p, n) 標的として ^{12}C を置き、300 MeV の陽子ビームを入射した。出射中性子は (n, p) 標的位置に置いたポリエチレン中の陽子と散乱を起こす。陽子との散乱点から (p, n) 反応の散乱角を、反跳陽子のエネルギーと散乱角から中性子のエネルギーを決定する。反跳陽子の散乱角は 2 台の MWDC を用いて測定し、エネルギーは大口径スペクトロメータで測定する。

得られたエネルギー分解能は半値全幅で 680 keV であり、このエネルギー領域において得られた世界最高エネルギー分解能である。大阪大学核物理研究センターの中性子コースにおける TOF 法測定のエネルギー分解能は 1.7 MeV であり、はるかに高分解能が実現できていることが分かる。分解能の大部分は陽子ビームのエネルギー幅から来ているため、エネルギー分散型ビームを使うなどの工夫でさらに分解能向上を図ることが可能である。

2.1.2 偏極重陽子-陽子弾性散乱の高精度測定と三体力 (酒井研究室)

三体力の存在を明確に示す結果は ^3H (三核子系の束縛状態) の束縛エネルギー以外には存在しなかったが、近年三体系を厳密に取り扱うファデーエフ理論の計算技術が発展し、非束縛系における三体力の検証が可能になった。なかでも核子-重陽子弾性散乱は最も簡単な非束縛の三核子系であることから、三体力の動的な性質を調べる上で注目され、理論的解析が進められている。実験的な検証を行うには高精度測定が必須である。我々は三体力の検証を行うべく、中間エネルギーにおいてファデーエフ理論との比較に耐えうる高精度測定を行った。

実験は理化学研究所のリングサイクロトロン施設の偏極重陽子ビームを用いて行い、微分散面積とスピン観測量 (偏極分解能、偏極移行量) を測定した。微分散面積の統計誤差は 1.3% 以下、系統誤差は 2% という高精度なデータを取得した。

測定結果の一部と最新のファデーエフ計算を図 2.1 c に示す。微分散面積については、三体力を含まない計算結果は最小値をとる角度範囲で実験値をかなり下回っているが、三体力を加えることで微分散乱断面積を見事に再現することが分かった。これは三体力の存在を明確に示す結果である。これに対しスピン観測量 A_{yy} については、理論値が実験値を再現しているとは言い難い。現在取り扱っている三体力のスピン依存部分に問題のある事が示唆される。[4, 31, 32, 39, 40, 79, 121]

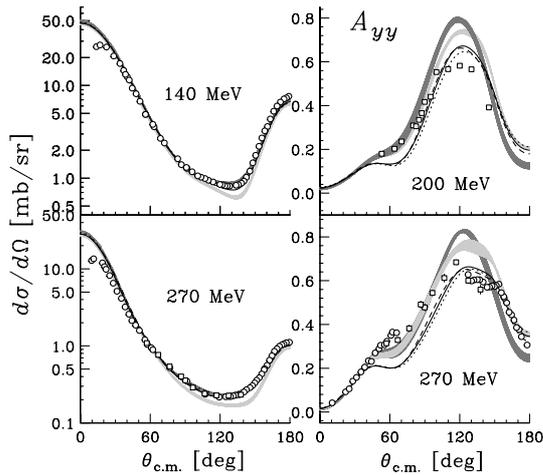


図 2.1 c: Cross sections and the analyzing powers A_{yy} for the d - p elastic scattering with statistical errors. The gray (black) shaded band is the result of the Faddeev calculations without (with) Tucson Melbourne three body force. Thin lines are the predictions incorporating other three body force models.

2.1.3 $^{12}\text{C}(\vec{d}, \vec{d}')$ 反応による ^{12}C 高励起状態の研究 (酒井研究室)

原子核の集団励起状態は、核子多体系である原子核の重要な性質の1つであり、ガモフテラー共鳴(GTR)や巨大双極子共鳴など多くの状態が研究されている。これらの研究は、主に1粒子1空孔状態として表される1フォノン励起状態を対象としているが、近年2重巨大双極子共鳴、2重荷電類似共鳴など2フォノンが励起された状態である2重巨大共鳴の存在が確立してきた。しかし、中間エネルギー領域で顕著に励起されるGTRが2重に励起された、2重ガモフテラー共鳴(DGTR)についてはまだ観測された例がない。

励起状態の探索には、その状態の特定に適した反応を用いることが本質的である。われわれは (\vec{d}, \vec{d}') 反応に着目した。入射する重陽子と出射する重陽子の両方のスピンを観測すれば、散乱平面に垂直な方向のスピンの反転確率を測定することができる。重陽子はスピン1を持つことから、1重ならびに2重スピンの反転が可能である。この2重スピンの反転の確率(S_2)は2フォノン励起状態に関する情報を担っているものと期待できる。1重スピンの反転確率は核力の V_σ 項と密接に関係しているため、 V_σ に関する情報を引き出す上でも有用である。

実験は理化学研究所の270 MeVの偏極重陽子ビーム、スペクトロメータSMART、および焦点面重陽子偏極度計(DPOL)を用いて行った。 ^{12}C を標的に選び、DGTRの存在する可能性のある30 MeV付

近の励起エネルギーを中心に50 MeVまでの測定を行った。実験の結果得られた S_2 の値は、50 MeV以下の励起エネルギー領域においてほぼ0で顕著な構造は見られず、DGTRを励起することはできなかった。[62, 82, 86, 129]

2.1.4 $\vec{d} + d \rightarrow {}^3\text{He} + n, {}^3\text{H} + p$ 反応の偏極分解能測定 (酒井研究室)

${}^3\text{He}$, ${}^3\text{H}$ 核の高運動量領域における構造はよく理解されていない。高運動量領域($k \geq 300$ MeV/c)における ${}^3\text{He}$ 核内核子運動量分布は、 ${}^3\text{He}(p, 2p)d$ 、 ${}^3\text{He}(p, pd)p$ 反応などの実験から得られているが、ファデーエフ計算はこの実験値を再現することができない。一方、運動量分布のスピンの構造の研究はほとんどなされておらず、測定例は非常に少ないのが現状である。 ${}^3\text{He}$, ${}^3\text{H}$ 核の高運動量領域におけるスピンの運動量分布について詳細な情報を得ることは、これらの核の構造や核力の短距離成分を理解する上で重要である。

そこで、我々は $\vec{d} + d \rightarrow {}^3\text{He} + n, {}^3\text{H} + p$ 反応のベクトル及びテンソル偏極分解能 $A_y, A_{xx}, A_{yy}, A_{xz}$ の測定を行った。1核子交換近似によると、これらの物理量は ${}^3\text{He}({}^3\text{H})$ 核の波動関数のモデルに強く依存することが知られている。実験は、理化学研究所のリングサイクロトロン施設を用いて行った。270, 200, 140 MeVの偏極重陽子ビームと CD_2 標的を用い、広い角度範囲($0^\circ \sim 180^\circ$)について測定した。測定は主に ${}^3\text{H} + p$ のチャンネルについて行ったが、 0° 及び $E_d = 270$ MeVでの前方角においては ${}^3\text{He} + n$ のチャンネルのデータも取得した。2つのチャンネルでの測定結果の比較により、荷電対称性の破れに関する議論も行う予定である。

2.1.5 高温・低磁場での偏極陽子固体標的の開発 (酒井研究室)

近年、不安定核の構造・性質の研究が大きな関心を集めている。不安定核のビームと偏極陽子ターゲットを用いた逆運動学法の散乱実験を行なうことができれば、偏極分解能等のスピン依存量を測定することで、不安定核の性質などについて重要な情報を引き出すことができると期待される。このような実験を目的として、我々は偏極陽子固体標的の開発を行っている。

小さい運動量をもつ反跳陽子の検出が重要であるため、標的付近を低磁場に保つことが肝要である。低磁場(~ 1 kG)中で高い陽子偏極を得るため、ペンタセン分子($\text{C}_{22}\text{H}_{14}$)の光励起三重項状態に現れる整列と、この整列をマイクロ波の照射と外磁場の掃引によって陽子偏極に移すIntegrated Solid Effect (ISE)法を用いる。この方法は比較的高温中(~ 80 K)でも高い陽子偏極度が得られるという利点がある。

長い陽子偏極緩和時間を持つ標的単結晶を生成す

るため、ホスト化合物の純化装置および単結晶生成装置を作成し、ナフタレン+ペンタセン(ペンタセン濃度 0.01 mol%) および p-タフェニール+ペンタセン(同 0.01 mol%) の単結晶の生成に成功した。

偏極実験装置は、電磁石、パルス化レーザーシステム、マイクロ波システム、および磁場掃引システムから成る。偏極度は 90 度パルス NMR 法によって測定する。3 kG: 常温の条件下で p-タフェニール+ペンタセンの単結晶を用いた実験を行なったところ、 $0.38 \pm 0.14\%$ の陽子偏極度と 18 分のビルドアップタイムを得た。この偏極度は熱平衡状態の約 3000 倍である。今後は液体窒素温度 (77 K) で高い陽子偏極が得られると期待されるナフタレン+ペンタセンの単結晶を用いた実験、レーザーシステムの強化、ビームを用いた実験に使用するための開発を行う予定である。[61, 84, 138]

2.1.6 $p+d$ 散乱による超狭幅ダイバリオンの探索 (酒井研究室)

ダイバリオンとは、クォーク 6 つにより構成される複合粒子である。核子やラムダ粒子などのバリオンがクォーク 3 個から成るため、ダイバリオンはバリオン 2 個に相当するクォークが結び付いた特殊な状態であると言える。過去 30 年に渡ってダイバリオンの探索が精力的に行われてきたが、陽子-陽子系の 2 つの共鳴状態がダイバリオンである可能性が示唆されているのみで、決定的な存在証拠は見つかっていない。ダイバリオン探索は、新粒子の発見という興味のみならず、クォーク系を記述する QCD 理論に強い制限を与えることができるという意味でも重要である。

近年、モスクワのグループが陽子-重陽子散乱のスペクトルから、幅の狭い励起状態を 2 つ発見し、超狭幅ダイバリオンである可能性を報告した。超狭幅ダイバリオンとは、パウリ原理により 2 核子系への崩壊が禁止され、質量が小さいことから π 粒子放出崩壊も禁止されるダイバリオンであり、1 keV 以下という非常に狭い幅を持つと予言されている。しかし、モスクワの実験ではバックグラウンドが多いため、狭い励起状態の存在は決定的とは言えない。このため我々は、大阪大学核物理研究センターの 300 MeV 陽子ビームと 2 台の磁気スペクトロメータを用い、ダイバリオン候補の 1 つについてさらにエネルギー分解能を上げた測定を行った。モスクワの実験の分解能 $3 \text{ MeV}/c^2$ に比較して非常によい分解能 $0.7 \text{ MeV}/c^2$ が得られた。

実験の結果、重陽子放出崩壊チャンネル、陽子・中性子放出崩壊チャンネルともに、ダイバリオンの存在が報告された $1905 \text{ MeV}/c^2$ の質量領域にはピークは観測されなかった。ダイバリオン励起の上限は、モスクワグループが報告している生成断面積の数分の 1 以下であると考えられる。[136]

2.1.7 $197 \text{ MeV } ^{12}\text{C}(\vec{p}, \vec{n})^{12}\text{N}$ 反応の SDR 領域の多重極展開 (酒井研究室)

原子核物理学の重要な研究課題の一つに、原子核の集団運動によって引き起こされる巨大共鳴がある。スピン反転双極子巨大共鳴 (SDR) はオペレータ $\sigma\tau$ 、遷移量子数 $\Delta L = \Delta S = 1$ 、 $\Delta T = 1$ を持ち、 $J^\pi = 0^+$ 核からの励起状態としては $J^\pi = 0^-, 1^-, 2^-$ の 3 通りの量子数を取り得る。互いに鏡像核の関係にある ^{12}N と ^{12}B の核における SDR は、励起エネルギー $\sim 4 \text{ MeV}$ と $\sim 7 \text{ MeV}$ に 2 つの比較的幅の狭いピークとして観測される。これまでの観測により 4 MeV 付近の共鳴状態は 2^- と 4^- の 2 つの成分からなることが確定しているが、7 MeV の共鳴状態については 1^- と 2^- のどちらが優勢であるかは実験結果により異なり、明確でない。

そこで我々は、197 MeV での $^{12}\text{C}(\vec{p}, \vec{n})^{12}\text{N}$ 反応の測定で得られた微分断面積、偏極能 P 、偏極分解能 A_y 、偏極移行量 D_{NN} のスペクトルを基にして、多重極展開 (MDA) の手法で SDR 領域の J^π の分布を調べた。MDA は、微分断面積の角度分布が ΔL の違いによって特徴的な形を持つことを利用して、微分断面積の実験値を最も良く再現するように、各励起エネルギー毎の ΔL 成分を分解する方法である。しかし、今回は同じ $\Delta L = 1$ を持つ $0^-, 1^-, 2^-$ を分解することが目的であるため、断面積だけでなく上記のスピン観測量の実験値をも再現させるという操作を補助的に取り入れて計算を行った。その結果、スピン観測量をある程度この計算で再現することができ、実験で確定している 4 MeV の共鳴状態 (2^- が主成分) も再現する解を得た。その結果、7 MeV のピークは巨大双極子共鳴 (GDR: $\Delta L = 1$, $\Delta S = 0$) を主とする 1^- と SDR の 2^- が共存していること、3~11 MeV の範囲に 0^- が連続的に分布している可能性があることが明らかになった。断面積と D_{NN} についての結果を図 2.1 d に示す。[137]

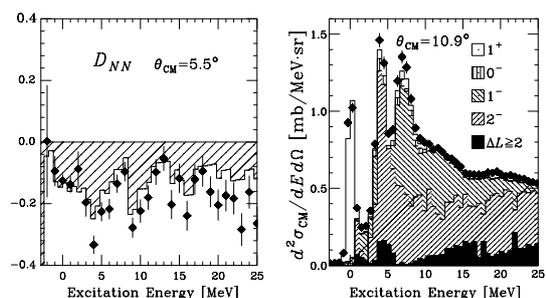


図 2.1 d: Obtained MDA results (histograms) in comparison with the experimental results.

2.1.8 2段階 (p, n) 反応におけるオンシェル近似の吟味 (酒井研究室)

中間エネルギー領域の (p, n) 反応において、スピン移行演算子の向きにしたがって断面積を分解し、陽子と原子核内核子の相互作用を媒介する力としての中間子の性質を探る研究は、原子核物理学にとって重要である。

出射粒子のエネルギースペクトルを測定して、エネルギー移行量に関する微断面積を調べてみると、60 MeV 程度のところに、準弾性散乱と呼ばれる幅が広くて大きなピークがある。そこでは、入射した陽子は原子核内の核子と1回だけ相互作用し、他の核子は反応に関与しないような過程が重要な寄与をしていると考えられている。

π 中間子が媒介するとされるスピン縦断面積 ID_q では、図 2.1 e のように、エネルギー移行量の小さい領域で歪曲波インパルス近似 (DWIA) の計算は実験値とほぼ一致しているが、エネルギー移行量が大きくなるにしたがって、実験値より小さくなる。また、 ρ 中間子が媒介するとされるスピン横断面積 ID_p では、全体的に半分程度の計算値にしかならない。我々はこれらの領域で入射粒子が核内核子と2回衝突する過程が重要なのではないかと考え、その過程を考慮に入れて、これまで計算してきた。

我々は、2段階過程の断面積を歪曲波を使って直接計算することはせずに、平面波を使って1段階過程と2段階過程の相対的な寄与を求め、それから歪曲波による2段階過程の断面積を推測した。入射粒子と出射粒子の平面波による記述によって、1段階過程では吸収がなくなったので、2段階過程でも中間状態の粒子の伝播を表すグリーン関数から吸収を取り除いた。この操作によって数値積分は困難になり、オンシェル近似を適用しなければならなかった。

このような理論的枠組で相対的寄与を計算すると、2段階過程はやはり重要であることがわかった。しかし、グリーン関数に適用したオンシェル近似は信頼性が低く、この結果は信用できるものではない。そこで、数値積分ができる程度まで、グリーン関数に吸収を戻し、積分領域を全運動量移行空間まで拡張して、積分を実行した。その結果、オンシェル近似を適用しない場合には、これまでの2倍程度、2段階過程からの寄与があることがわかった。

2.1.9 CERN-AD における反陽子ヘリウム原子の精密レーザー分光 (早野研究室、ASACUSA プロジェクト)

2000年度、我々は反陽子減速器 AD を用いて長寿命反陽子ヘリウム原子を大量に生成して、その高精度レーザー分光を行うことに成功した [65, 123, 124, 140, 145, 151, 152, 153, 157, 166, 172, 173]。主な成果としては

- 紫外波長領域に存在する二つの共鳴線を発見して、その遷移エネルギーを 1.3×10^{-7} の精

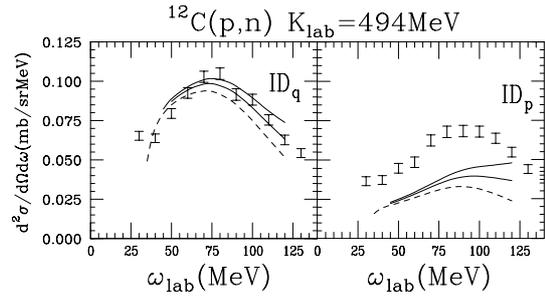


図 2.1 e: ID_q and ID_p for the $^{12}\text{C}(p,n)$ reaction at 494 MeV. The dashed lines are the results with DWIA, and the solid lines are the theoretical results in which the effect of the two-step processes are included. The lower (upper) solid lines represent the results with (without) the on-energy shell approximation.

度で測定した。得られた実験値は最新の三体系 QED 計算の結果とよく一致している。この事実は反陽子の質量と電荷が、陽子のものと 6×10^{-8} の精度で一致することを示唆している (図 2.1 f)。

- 百ピコ秒以下という、極めて短い寿命をもったエネルギー準位を測定することに成功した。
- 反陽子のもつ軌道角運動量 ℓ と電子のスピン s との相互作用によって、反陽子ヘリウム原子の準位はいわゆる「超微細構造」をもつ。超微細構造のためにレーザー共鳴線も分裂することを利用し、我々は「レーザー/マイクロ波三重共鳴法」という特殊な方法を用いて超微細構造間にマイクロ波遷移を起こしそれを観測することを試みた。その結果最新の理論が予測する共鳴周波数において、確かにマイクロ波による遷移の効果があることを認めることができた [140]。
- 反陽子ヘリウム原子は、普通のヘリウム原子と衝突しても影響を受けないのに、微量の水素分子や重水素分子と衝突すると即座に破壊されるという奇妙な性質をもっている。我々は重水素分子によってこの破壊のおこる反応断面積を詳しく測定した。
- 反陽子ヘリウム原子が生成時に、どのような結合エネルギーと角運動量をもっているかを系統的に調べた。その結果、多くの原子が主量子数 $n = 37-40$ 付近に局存している事が判明した。

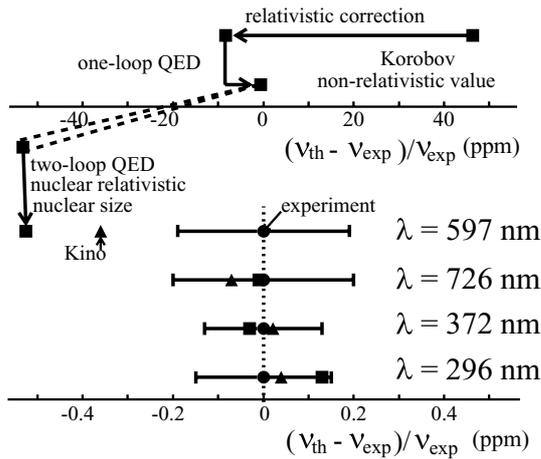


図 2.1 f: Relative deviation of experimental and theoretical transition frequencies for four different laser transitions. The error bars denote the experimental errors. The theoretical values of two authors, V. I. Korobov of Dubna (Russia), and Y. Kino of Tohoku University (Japan) are shown. The upper part shows the situation as of 1996, where in addition to the non-relativistic energy two correction were calculated, the relativistic correction due to the motion of the electron, and the first order QED correction, the one-loop Lamb shift. The agreement for one transition at $\lambda = 597$ nm was in the order of one ppm. In the lower part, our new results from the AD are compared to new calculations of both theoreticians that include higher-order QED corrections up to order α^4 . Except for the 597 nm line, an excellent agreement of less than the experimental error (the smallest being $\sim 1.3 \times 10^{-7}$ is observed. This is the first time that 3-body QED calculations in a molecule-like system with two heavy “nuclei” have been calculated to such a precision. From the observed agreement and the fact that the calculations made use of the better known numerical value of the proton mass, we can infer a CPT limit on the equality of proton and antiproton charge and mass of $< 6 \times 10^{-8}$, a factor 8 better than our previous results and almost two orders of magnitude better than previous values obtained from X-ray spectroscopy of heavy antiprotonic atoms.

2.1.10 超低速反陽子ビーム源の開発 (早野研究室、ASACUSA プロジェクト)

将来、反水素 (\bar{H}) やプロトニウム ($\bar{p}p$) 等の反陽子原子を大量に生成して、これらの原子の分光をおこなうには、10 eV 程度のエネルギーをもった大強度の単色反陽子ビームが不可欠である。現在、線形

減速器 (Radio Frequency Quadrupole Decelerator、略称 RFQD) とペニングトラップを用いて、このような反陽子ビーム源の開発を進めている。

線形減速器 (RFQD は、全長 2メートル、直径 20 cm の高周波管 (共鳴周波数 $f=200$ MHz、入力パワー数メガワット) から構成されている。この装置は $T = 6$ MeV というエネルギーの高い反陽子を 15–150 keV まで効率よく減速する性能をもっている。昨年度、実際に 15 keV 以下の反陽子パルスビームを安定に生成することに成功した。

ペニングトラップは直径 30mm、全長 400mm で、多数の円筒型電極を並べた構造をしており、円筒電極の中心軸方向に一様な強磁場と深さ 10–100 V の調和振動子型の静電ポテンシャルによって荷電粒子 (電子、反陽子、等) を長時間閉じ込めることができる。また閉じ込められた荷電粒子はトラップからビーム状に引き出すことが可能である。ペニングトラップに入射される高エネルギー (~ 15 keV) の反陽子は電子冷却法によって環境温度 (< 0.1 eV) まで冷却される。これまでに 10^{6-7} 個の H^- イオン (~ 100 eV) を反陽子の代わりにトラップに入射し、電子冷却をおこない、直径数ミリ、パルス幅 500 ナノ秒のビームとして引き出すことに成功した [141, 142, 144]。

2.1.11 CERN-AD における反水素生成実験 (早野研究室、ATHENA プロジェクト)

CPT 対称性の精密検証は現代物理学の基本課題の一つである。我々は、新たに建設された CERN の反陽子減速器 AD において、反水素を用いた CPT 対称性検証へ向けた研究を昨年度より開始した (AD-1: ATHENA 実験)。これまで既に、CERN - LEAR および、Fermilab において高速の反水素が生成されているが、これらはほぼ生成と同時に消滅しており、精密な測定を行うことはできなかった。我々は、まず大量の反水素を超低速で生成することを第一の目標としている。

ATHENA 実験は 3 つのペニング型トラップ (反陽子、陽電子、および再結合トラップ) と、それらの制御系、および診断・検出系から構成されている。2000 年度には、AD からの 100 MeV/c の反陽子を反陽子トラップで捕獲することに成功した。これまでのところ、AD ビーム 1 ショット当たり、約 6000 から 8000 個程度の反陽子をトラップできている。これはトラップに注入された反陽子の数と比較すると約 0.1% のトラップ効率である。さらに、あらかじめトラップ内に蓄積しておいた電子と相互作用させることにより、反陽子の電子冷却にも成功した。陽電子トラップにおいては 1 分当たり約 100 万個の陽電子を窒素バッファガス法によって蓄積しており、さらにこれらを 10% 以上の効率で再結合トラップに移動させることができた。また、シンチレータ、Si ビームモニター等の外部検出系とともに、今年度は Si バージェック検出器および CsI ガンマ検出器から成る反水素検出装置のコミッシュニングも行った [64, 131, 143, 156, 158]。

2001年度には、いよいよ、反陽子と陽電子を再結合トラップで混ぜ合わせることに、低速反水素の生成をめざす。生成された中性反水素はトラップポテンシャルを感じないためトラップ壁にぶつかり消滅し、この事象を反水素検出器で検出することによって反水素生成を同定する。

2.1.12 反陽子ヘリウム原子の超微細構造・極超微細構造の理論計算 (早野研究室)

CERNの反陽子減速器(AD)において、レーザー・マイクロ波三重共鳴分光法をもちいて反陽子ヘリウム原子の超微細構造の精密測定が進められている。この精密測定から、低い精度(0.3%)で決定されている反陽子の磁気モーメントを改良することができる。そのために、組替えチャネル結合法を用いて、超微細構造・極超微細構造の精密計算をおこなった。

極超微細相互作用は、スピン軌道結合相互作用、スピン接触相互作用、テンソル相互作用の和で与えられる。組替えチャネル結合波動関数を用い、1次の摂動論に基づいて $(v, J) = (1, 35)$ 状態の超微細構造・極超微細構造を計算した。ここで、 v は振動量子数、 J は全角運動量量子数である。まず、超微細構造分裂エネルギーは12.908648 GHzと求められた。坂口らの実験(2000年夏)結果12.910(10) GHzと良く一致している。そして、極超微細構造も含めた2つの分裂エネルギーは12.898977と12.926884 GHzと求められた。計算精度は相互作用のモデルの精度、約50 ppm以上である。BakalovとKorobovの理論計算と比較すると、両分裂エネルギーに対し200 ppmのずれがある。しかし、このずれはKorobovの最近の計算によって3 ppmまで改善されている。したがって、さらに精密な実験がおこなわれれば、反陽子の磁気モーメントを3 ppmの精度で決定することができる[19, 132, 139, 154, 155]。

決定された反陽子の磁気モーメントを陽子のそれと比較することにより、CPT対称性の検証をおこなうことができる。そこで、陽子の磁気モーメントの精度10 ppbまで計算精度を改良する予定である。また、他の状態の超微細構造・極超微細構造の計算もおこない、反陽子ヘリウム原子の物性を解明する。

2.1.13 パイ中間子の原子核による深い束縛状態の研究 (早野研究室)

1996年、1998年にGSIドイツ重イオン研究所において行った実験によって、我々は世界で初めて鉛原子核中に深く束縛されたパイ中間子 $1s, 2p$ 状態の分光に成功した。これらの中重核($A > 40$)での $1s, 2p$ 状態はパイ中間子-原子核相互作用の高精度なプローブとなることが予想されていたが、従来のX線分光による実験手法では観測不可能な領域にあった。実験は無反跳条件での $(d, ^3\text{He})$ 核子ピックアップ反応

を用いた。この反応によってパイ中間子は標的核近傍に於いて生成され $1s, 2p$ 状態に直接植え込まれる。そしてパイ中間子の束縛エネルギーが ^3He の磁気スペクトロスコピーを行うことによって高精度に観測できる。我々は得られたスペクトルの入念な解析を行いパイ中間子の束縛エネルギーと幅を決定した。さらにそこから、これまでの実験結果及び理論計算では不定性の大きかったパイ中間子-原子核の光学ポテンシャルのパラメータを実験的に決定し光学ポテンシャルを導出した。その結果原子核中でのパイ中間子の質量が真空中に比べて約 $26\text{MeV}/c^2$ 程重くなっている事を突き止めた[14, 15]。今春我々は、新たに錫同位体標的を用いて非常に広い領域($^{124}\text{Sn} \sim ^{112}\text{Sn}$)で同じく無反跳条件での $(d, ^3\text{He})$ を用いて光学ポテンシャルの連続測定を行い同位体依存項(\sim アイソベクター項)の高精度測定を計画しており、目下直前の準備を行っている。

このアイソベクター項はGell-mann-Oaks-Renner理論、またはTomozawa-Weinberg理論からカイラル対称性の破れのオーダーパラメータを与え、また現代物理学の基本課題の一つである核物質中に於ける中間子の質量変化の問題に数少ない実験的証拠を提出することができると期待している。

2.1.14 位置検出型Cherenkovカウンターの開発 (早野研究室)

2000年末に、2002年にGSIにおいて行われる予定である $\eta - \omega$ 中間子の原子核中での質量変化の実験の中心的な役割を担う位置検出型のCherenkovカウンターの試作機の製作、及び性能評価実験がKEKにおいて行われた。

$\eta - \omega$ 中間子の実験は無反跳条件に於ける $(d, ^3\text{He})$ 反応を用いて行われ、 ^3He は磁気分光器を用いて選択される。この反応を用いる場合、重陽子の標的中に於ける崩壊に由来するほぼ等しい磁気剛性を持つ陽子によるおよそ 10^8 /秒のバックグラウンドが予想される。このバックグラウンドの下、反応の二階微分断面積 $\frac{d^2\sigma}{dE d\Omega}$ の決定のために ^3He の入射位置情報を得る事が不可欠である。この位置検出型Cherenkovカウンターはそのような要求に応え得る検出器として開発されたものである。

この検出器は従来のCherenkov検出器とは逆に、速度が小さい粒子の選択的な検出を行い、また、 10^8 /秒という高い飛来率の状況下での粒子の入射位置の検出が可能である。

性能評価実験の解析は依然として進行中であるが、 $1.66\text{GeV}/c$ の運動量を持つ陽子に対して、位置分解能(σ)として、4.0mmという値が得られている。

2001年度は本実験用のカウンターの製作が予定されており、さらなる高位置分解能が期待される。

2.1.15 ハイパー核の研究 (早野研究室)

原子核内に核子以外のバリオン (Λ , Σ , Ξ 等) が結合しているような系をハイパー核と呼ぶ。谷田は、国内外の研究者と協力してハイパー核の研究を行っており、新聞報道もなされるなど大きな成果をあげている [21, 22, 23, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 57, 98, 133, 134, 170, 171, 179, 180, 181]。

2.1.16 重い不安定核ビームの開発 (櫻井研究室)

軽い中性子過剰核研究では中性子ハローや中性子スキン、魔法数の消失、新魔法数の出現など、安定核にはなかった性質が次々と見出されてきた。この研究をより重い領域の原子核に発展させることで、新たな核構造上の発見のみならず、中重領域中性子過剰核の関与する超新星爆発時における元素合成過程の理解の進展も期待できる。しかし、既存の重イオン施設では、一次ビームに用いる高エネルギー、高強度重イオンビームを質量数の大きな原子核で得ることが困難であるため、安定線から遠く離れた重い不安定核ビームを効率よく生成することができなかった。現在、重い不安定核ビームの高強度化を狙い、理研の RI Beam Factory など世界の主要な研究施設で重イオン加速器や不安定核ビーム生成装置の更新、新規建設が計画されている。[55, 125, 127, 169, 174, 176, 177, 178]

我々はそれに先立ち、既存の施設の性能を最大限に引き出す事で、これまでの約2倍の質量数にあたる、質量数 80 程度の不安定核ビームを生成する開発研究を行っている。本年度は理化学研究所の AVF およびリングサイクロトロンとの組合せで加速できる最も質量数の重い ^{86}Kr (66 A MeV) を一次ビームに用い、将来へ向けた基礎データとして中性子過剰核の生成断面積と荷電状態分布を測定した。 ^{86}Kr は $N=50$ の中性子過剰核の生成が可能であることから、 $N=50$ 魔法数の研究への道を拓く。目的とする二次ビームと同じ中性子数の一次ビームを用いるとアイソトープ純度が極端に向上するというのも利点としてあげられる。

今回の測定では $N=50$ 同調核、 ^{82}Ge , ^{81}Ga , ^{80}Zn 及び $Z=28$ の Ni 同位体 $^{71}\sim^{76}\text{Ni}$ の生成断面積を求めた。この結果は、半経験公式 EPAX の予測よりも小さく、測定値を再現するためには、同公式中の U パラメータを 1.5 から 1.7 へ変更する必要があることが分かった。また、二重閉殻核 ^{78}Ni の生成断面積は $0.3\sim 0.5$ pb 程度以下と見積もられた。

^{86}Kr ビームの Be 標的 (厚さ $97\text{mg}/\text{cm}^2$) 通過後の荷電状態の分布を測定した。36, 35, 34 価の割合はそれぞれ、89%, 11%, 0.3% であった。これは計算コード global の予想と合致する。

実際の応用として ^{84}Se ビームを生成し、クーロン励起実験を行った。

2.1.17 中性子超過剰核の安定性 (櫻井研究室)

中性子超過剰核の存在やその安定性は高アイソスピンに依拠する核構造の変化、有効核力の異常などを理解する上で基礎をなすものである。この観点から未開の中性子ドリップ線近傍核に関して、新同位元素探査、質量、寿命及び遅発中性子放出確率の測定を試みている。[58, 167, 174]

フランス・GANIL 研究所で $N=20\sim 28$ 領域の中性子過剰核の質量測定を行った。この結果、中性子過剰な Cl, S, P 同位体の質量から、 $N=28$ 魔法数の破れが明らかとなった。さらに中性子過剰な Mg 同位体の中性子分離エネルギー (S_{2n}) の振舞いを Al や Si 同位体と比較すると、 $N=23, 24$ の $^{35, 36}\text{Mg}$ で S_{2n} が急速に減少することがわかった。Mg 同位体の質量測定は ^{36}Mg までだったが、この傾向から Mg 同位体の中性子ドリップ線は従来考えられていた $N=28$ の ^{40}Mg ではなく、我々が過去に見出した $N=26$ の ^{38}Mg である可能性が高いといえる [27]。

Ne から Mg 同位体の中性子ドリップ線を一挙に確定する目的で新同位元素探査実験を計画しており、この実験で ^{40}Mg の粒子安定性の問題を実験的に検証することが可能となる。

2.1.18 線核分光法による中性子の殻構造研究 (櫻井研究室)

線核分光法は質量測定と並んで有力な殻構造研究の手法である。適当な核反応で原子核の励起準位を生成し、脱励起する際の線のエネルギーと絶対強度を測定することで、励起準位の励起エネルギー、スピン・パリティ、電磁遷移強度等の知見が得られる。原子核の励起状態のうち、原子核の回転や振動運動に対応する低励起 $2^+, 4^+$ 準位や、Major Shell を超える励起に対応する 1^- 状態は、その励起エネルギーや基底状態とを結ぶ行列要素が、基底状態の変形度や密度分布、波動関数の配位混合など、閉殻構造の度合を強く反映するため、殻構造研究のよい探針である。対象となる不安定核の種類や得られるビーム強度に応じて、様々な測定方法や励起方法を用いた研究を行っている。また、より広い領域の原子核の多様な物理量を測定すべく、新しい手法の開発も行っている。以下に、現在取り組んでいるテーマを測定方法で分類して述べる。[126]

クーロン励起法

クーロン励起法は反応機構がよく分かっているため、核構造研究の優れた手法として、これまでに多くの不安定核に適用されてきた。本年度は、研究対象をこれまでの質量数 40 以下の領域から一挙に質量数 80 領域にまで拡大し、中性子数が魔法数 50 の中性子過剰核である ^{84}Se のクーロン励起実験を行った。クーロン励起反応断面積から、電気四重極遷移

確率を導出し、 $N=50$ 魔法数に起因する閉殻構造の中性子過剰領域での振舞いを議論することが主目的である。 ^{84}Se の生成には、RIPS では初めてとなる ^{86}Kr ビーム (66 AMeV, $\sim 0.5\text{pnA}$) の入射核破碎反応を用いた。これまでに ^{84}Se の第一励起状態 (2^+) からの脱励起に対応する線 (1455keV) を確認しており (図 2.1 g)、今後の解析で電気四重極遷移確率を導出する予定である。

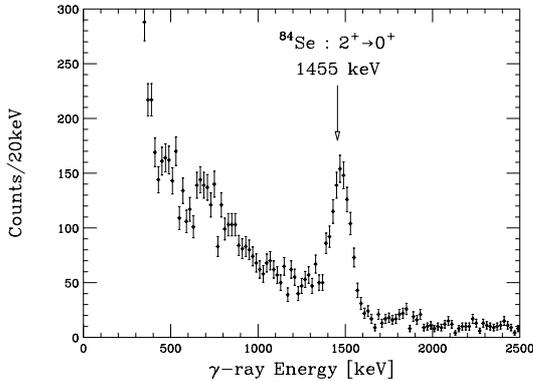


図 2.1 g: ^{84}Se のクーロン励起実験で得られた線スペクトル。1455 keV のピークは ^{84}Se の第一励起状態 2^+ から基底状態への遷移に対応する。

陽子非弾性散乱

中間エネルギーでのクーロン励起法が可能な原子核は原子番号 Z が 10 程度以上の原子核に限られる。これよりも Z の小さな原子核では、クーロン力による励起に比べて核力による励起が無視できなくなり、核力反応機構の不定性のため、核構造の議論に曖昧さが残るからである。このような原子核に対しては、核力励起の中でも反応機構が比較的良好に分かっている陽子非弾性散乱から変形長を求める方法をとった。

^{12}Be の陽子非弾性散乱実験をクーロン励起実験と組み合わせることで、 ^{12}Be が大きく変形していること、基底状態の波動関数に強い配位混合があること、 1^- 準位が低い励起状態に存在することを明らかにした。これらはどれも、 $N=8$ の殻構造が ^{12}Be で破れていることを示している。[24, 25, 60, 100, 115, 163]

また、 ^{32}Mg の陽子非弾性散乱を行い、これから得られた変形度が、クーロン励起実験で得られた変形度よりもやや小さいことを見いだした。前者が中性子の分布により敏感で、後者が本質的に陽子の分布を反映していることから、この結果は、 ^{32}Mg の陽子分布と中性子分布に違いがある可能性を示すものである。

これと同時に陽子非弾性散乱は、原子核を励起させる最も効率のよい方法であるという点でも重要である。標的の質量数が小さいため、同じエネルギー損

失を与える重い (例えば鉛) 標的と比べて標的中の原子数を 2 桁多くすることが出来るからである。この特長を生かせば、ビーム強度が微弱であるためにこれまででは実験ができなかった、安定線から遠く離れた原子核の未知の低励起状態、特に偶々核の 2^+ 状態を観測するために強力な手法となる。今年度は ^{20}C , ^{24}O , ^{30}Ne による測定を行い、各々 2^+ 状態からと思われる線を観測した。

Doppler Shift Attenuation 法による励起状態の寿命測定

軽い不安定核の電気四重極遷移確率を測定するもう一つの方法として、Doppler Shift Attenuation (DSA) 法による励起状態の寿命測定を本年度新たに提案した。励起状態の寿命はモデルに依存せず遷移確率に直接結び付くため、陽子非弾性散乱で依然として残っていた不定性を完全に除去することができる。

励起状態の典型的寿命は 10^{-12} 秒程度と、検出器の時間分解能よりも遥かに短いので、直接測定することはできない。DSA 法では、高速 ($\beta \simeq 0.3$) で運動する原子核が、標的中で速度を減衰させつつ励起、脱励起を起こす過程で放出される γ 線のエネルギースペクトルの形状から寿命を導出する。 γ 線のエネルギーは、放出された時点での原子核の速度に応じたドップラーシフトを受けるため、寿命を反映した分布形状となるのである。この時、ドップラーシフトによって広がる γ 線の巾は約 100 keV と小さいが、2 keV という高分解を誇る Clover Ge 検出器を用いることで分布の測定を実現する。

この手法で ^{12}Be , ^{16}C の第一励起状態の寿命を測定する実験を 2001 年度秋に計画している。中性子過剰核では、中性子と陽子のデカップリングにより両密度分布が異なる可能性が指摘されている。特に ^{16}C は、陽子分布がオブレート変形、中性子分布がプロレート変形をしているというモデル計算がある。電気四重極遷移確率は陽子密度分布を反映しており、中性子密度分布に敏感な陽子非弾性散乱の断面積と組み合わせることで、中性子分布と陽子分布の形状を個別に決定することができる。

不安定核ビーム破碎反応法

破碎反応によって生成された不安定核はある確率で励起状態にあると考えられ、そこからの脱励起 γ 線を測定することによって核分光を行うことが可能である。この方法を不安定核ビームに対して初めて適用し、不安定核ビーム破碎反応法を開発した。

この方法は、これまでに述べた方法と比べて多彩な励起準位の研究に供することができるという特長を持つ。従来の方で使う励起方法は、どれも第一励起準位を選択的に強く励起するため、その他の準位の研究には適していない。それに対して不安定核ビーム破碎反応法は、第一励起準位以外の高励起、高スピン状態を励起することが可能である。さらに、二次ビームの不安定核を破碎させることにより、一

次ビームを用いた従来の手法と比べ、より中性子過剰な原子核の性質を調べることができる。

不安定核ビーム破碎反応法は、 ^{34}Mg の核構造研究に初めて適用した。不安定核 ^{36}Si をビームとし、 ^{34}Mg からの未知の γ 線ピークを 2 本観測することに成功し、この結果は本年度論文となった。[28, 99, 102, 110]

^{36}Si の破碎反応での、励起(または基底)準位の生成確率が、その準位の励起エネルギー及びスピンの依存することが分かりつつある。今後、この関係を明らかにし、未知の励起状態に対するスピン決定法を確立したい。[59]

不安定核ビーム破碎反応法をさらに中性子過剰な $N=28$ 近傍核へと適応させるため、より重いビームを用いた実験を理化学研究所に申請した。

2.1.19 Ge Telescope 開発 (櫻井研究室)

線の測定は不安定核研究の強力な手段であり、これまで多くの成果が得られている。現在、対象とする原子核や励起方法は多様化する方向にあるが、それに伴って、線検出器の高分解能化、高効率化が重要になる [175]。櫻井研究室では、次世代の不安定核線分光用検出器として、現在使用している $\text{NaI}(\text{Tl})$ シンチレータに比べて 10 倍以上のエネルギー分解能を持つハイブリッド Ge 検出器の開発を推めている。

光速の 30% 程度の速さで運動する重イオンからの γ 線が測定対象であるため、エネルギー分解能を向上させるためには、固有分解能の高い検出器を使う事に加えて精度よいドップラーシフト補正を行うことが必須である。そのためには、線の放出角度、すなわち、検出位置を精度よく決定する性能を有することが必要である。開発中の検出器はストリップ型の位置感能平行平板型 Ge 検出器 (50 mm×50 mm×20 mm, 2 mm strip) とその背後に設置した同軸型 Ge 検出器 (直径 70 mm, 長さ 70 mm) からなる。ストリップ型検出器でコンプトン散乱し、散乱線が背後の同軸型 Ge 検出器で吸収される事象に対して、両検出器のエネルギー出力の和から線の全エネルギーを、ストリップ型検出器での検出位置から線の放出角度を決定する。ストリップ幅 (2 mm) の精度で位置を決定し、検出器を 2 次標的から 10 cm の距離に設置した場合に、20 mrad の角度分解能が得られる。核子あたり 50 MeV の粒子 ($\beta \sim 0.3$) から放出された線のエネルギーを最も悪い条件 (90 度方向) でも 0.7% の分解能で測定することができる。

2.1.20 核分光法を用いた陽子過剰核の核構造研究 (櫻井研究室)

^{24}Si の崩壊 – ^{24}Al の核構造

遅発陽子のエネルギー測定により陽子過剰核 ^{24}Al の構造研究を行った。従来の手法では、分岐比の小さい遷移に伴う陽子エネルギーを正確に測定することが困難であった。その大きな理由は陽子エネル

ギー測定用の検出器に線も入り、これが大きなバックグラウンド要因となるからである。線と陽子とではその dE/dx が大きく異なることに着目し、 $dE-E$ で構成された検出器群を用いてこの困難を克服する手法を開発した。この方法を ^{24}Si に適用し、娘核の ^{24}Al の励起状態を新たに二つ発見した。[29]

^{46}Cr の崩壊 – ウィグナー超多重項理論の検証

陽子数 Z 、中性子数 N が共に偶数の核で $N=Z-2$ 、 $A=4n+2$ (n は任意の整数) を満たす軽い核は非常に強いガモフテラー (GT) 遷移で崩壊することが知られている。 sd 殻領域の核ではスピン・軌道分離が小さいことから、これをウィグナーの超多重項理論で理解することができる。しかし、この傾向が sd 殻を超えた fp 殻の原子核、 ^{42}Ti でも観測されていることは驚きである。我々はこれよりもさらに重い ^{46}Cr に注目し、 ^{46}Cr の GT 崩壊を調べる実験を提案した。生成した ^{46}Cr を止め、そこから放出される線と線の同時測定を行い、 ^{46}Cr の GT 遷移強度を導出する。

2.1.21 中性子ハロー核の分解反応 (櫻井研究室)

弱く束縛した中性子過剰核の核構造研究には分解反応が有用である。束縛エネルギーが小さいため、鉛や炭素標的で容易に非束縛状態に励起され、荷電粒子と中性子に分解される。これらの粒子の運動量を測定し、不変質量を組むことにより、分解反応断面積の相対エネルギースペクトルを得ることができる。

中性子ハロー核のクーロン分解反応では、弱く束縛された中性子が連続状態へ直接励起する直接分解反応が支配的である。その励起スペクトルの形状はハロー中性子の波動関数のフーリエ変換に対応しているため、ハロー構造を研究する優れたプローブとなる。これまでに、ハロー核の候補であった ^{19}C が実際にハロー構造を持つことを示すことに成功している。

今後、この方法でより詳細かつ定量的に信頼性のある核構造の議論を行うためには、分解反応の測定から核構造の情報を引き出す際に用いるモデルの妥当性を検討することが望ましい。そのために、構造が単純でよく分かっている 1 中性子ハロー核である ^{11}Be の鉛と炭素標的による分解反応の高統計、高精度測定を行った。これまでの解析で、現在大きな議論となっている鉛標的を用いた分解反応での核力の寄与除去問題について結果が得られている。

クーロン分解反応断面積は鉛など原子番号の大きい標的による分解反応断面積から、核力成分を差し引くことで導出している。その時、核力による分解の断面積はモデルを介して見積っており、そのモデル依存性が最終的なクーロン分解反応断面積の不定性の源となっている。今回の鉛による分解反応で得られたデータでは、衝突係数が核半径よりも十分大

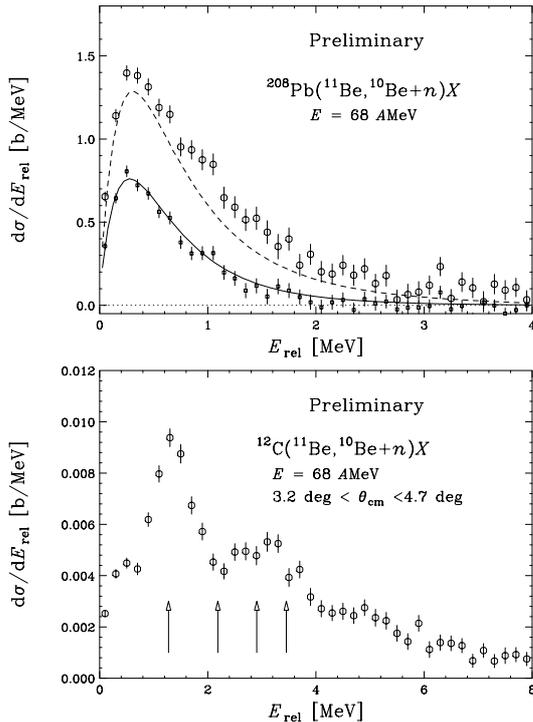


図 2.1 h: ^{11}Be 分解反応断面積の相対エネルギースペクトル。鉛標的(上)と炭素標的(下)によるもの。下図中の矢印は、既知の共鳴状態のエネルギーを示す。

きい事象のみを選択し、核反応の混じりを抑制したスペクトルを得ることができた(図 2.1 h)。丸が衝突係数にカットをかけないもの、四角が衝突係数 30 fm 以上のイベントを選択したものである。点線と実線はそれぞれに対応する直接分解反応メカニズムを用いた計算値で、分光学的因子 0.65 を仮定している。衝突係数のカットをかけることで、実験値と計算値が見事に一致し、純粋なクーロン力による分解反応が抽出できたことが分かる。

一方で、以前はバックグラウンドとして扱われていた核力励起を積極的に生かし、共鳴状態の分光を行う方法にも新たに取り組んでいる。標的に Z が小さくクーロン力の無視できる炭素を用いることで、核力による $0^+, 2^+$ 遷移を観測することができる。図 2.1 h は、炭素標的による分解反応で得られた相対エネルギースペクトルである。直接分解反応による巨大な 1^- 遷移で占められていたクーロン分解反応の場合とは異なり、細かい構造を持つスペクトルが得られた。観測されたピークの位置は、既知の共鳴状態に対応している。今後この手法を用いて、ドリフライン近傍核の未知の共鳴状態の研究を進めていきたい。

2.1.22 中性子過剰核の融合反応 (櫻井研究室)

中性子過剰核を用いた核融合反応は中性子過剰核の関与する核反応機構への興味のみならず、超重元素生成の観点からも関心が持たれている。特に中性子ハロー核やスキン核等の、中性子の束縛が弱い中性子過剰核においては、ハローによる核半径の増大とクーロン障壁の低下から断面積の増大が見込まれる。更に動的な効果として、ソフト E1 モード、中性子分解反応、および中性子移行とのチャンネル結合によりクーロン障壁以下のエネルギー領域での断面積の増減が議論されている。このような中性子過剰核に特有な核融合反応機構を検証することを目的として、中性子スキンを持つ $^{6,8}\text{He}$ と ^{40}Ar とのクーロン障壁近傍エネルギーでの核融合反応断面積の測定を行った。

RIPS で生成される二次ビームをクーロン障壁近傍まで減速させて、MUSIC 型ガス検出器に照射した。この測定器は検出ガスがそれ自身で標的としても機能し、入射粒子および反応生成物として生じる荷電粒子の三次元飛跡を得る事ができる。このような、高検出効率と高標的密度を同時に満足させる実験方法を用いることで、元来は困難であった弱強度かつ広エネルギー分布の不安定核ビームによる融合反応実験を可能にした。

本年度は昨年度に引続きデータ解析を進めた。これまでの解析で、低いエネルギーの蒸発残留核がガス中で止まる直前には、電子的阻止能だけではなく、核的阻止能の効果が重要になり、それによって測定効率が著しく変化することが明らかになった。この効果を取り入れ、さらに蒸発チャンネルの分布および蒸発中性子の角度分布なども考慮したシミュレーションを行い、測定効率の見積りを行っている。

なお、これと並行して過去に測定した核融合反応 ($^{27,29,31}\text{Al} + ^{197}\text{Au}$) の測定データに関して考察を進めた。実験データは、非弾性散乱を考慮したチャンネル結合計算では再現できず、クーロン障壁以下のエネルギーで、非弾性散乱以外のチャンネルの寄与があることが示唆された。そこで、中性子分離エネルギーとクーロン障壁分布を関係づけて解釈する Stelson 模型により中性子移行の効果を取り入れたところ、チャンネル結合計算と実験データとのずれを大幅に改善することができた。これは、核融合反応への中性子移行の寄与が重要であることを示している。当研究に関しては現在投稿論文を準備中である。[105, 160, 164]

2.1.23 天体核反応の断面積測定 (櫻井研究室)

初期宇宙、恒星内部の燃焼サイクル、超新星爆発といった個々の天体現象に関わる核反応断面積はエネルギー収支および元素合成過程を理解する上で基礎的な量である。とりわけ高温、高密度過程では平均自由時間が短くなり、この時間と不安定核の寿命が競合すると、不安定核が反応過程で大きな役割を

担うことになり、不安定核ビームを用いた断面積測定が望まれる。

ビーム強度が低く、エネルギーの高い(数10 AMeV)不安定核ビームの場合には、天体現象で特徴的なエネルギー(数10 keV~1 MeV)での直接測定は極めて困難で、新たな実験手法を適用する必要がある。我々は不安定核ビームを用いて天体現象に関わる放射性捕獲断面積の間接測定を行っており、二つの方法、クーロン分解反応法とANC法、を用いている。[168]

クーロン分解反応法

クーロン分解反応法は、逆反応学を用いた手法で、 $A(p,\gamma)B$ といった陽子捕獲断面積の場合、 B 核のクーロン分解反応 $^{208}\text{Pb}(B,A+p)^{208}\text{Pb}$ を測定する方法である。この断面積から仮想光子理論を用いて陽子捕獲反応の断面積を導出することができる。この方法は、仮想光子数および詳細釣合から断面積が6~8桁程度増大し、また、エネルギーの高いビームを使用することから、標的厚、検出効率の点でも有利となり、収量を大幅に稼ぐことができる。

クーロン分解反応法によって太陽ニュートリノ問題に関連した $^7\text{Be}(p,\gamma)^8\text{B}$ 反応や hot-pp chain に寄与する陽子捕獲断面積を調べてきた。本年度はより重い核への拡張の第一歩として、新星などでの燃焼過程 rp-process で重要な働きをする $^{22}\text{Mg}(p,\gamma)^{23}\text{Al}$ 反応の断面積を求めめるため、 ^{23}Al のクーロン分解を測定する実験を行った。

この他にも、天体現象に深くかかわる核子捕獲反応断面積の決定を目的として、 ^{15}C , ^{13}O , ^{15}O , ^{14}O , ^{13}N のクーロン分解反応断面積を測定し、現在解析を進めている。[106, 107, 108, 111]

ANC 法

ANC 法は核子移行反応断面積から捕獲反応断面積を求める方法である。例えば、太陽温度における ^7Be の陽子捕獲反応は原子核外縁部で起こると考えられ、その反応断面積は捕獲された陽子の ^8B 中での波動関数の外縁部での振幅 (ANC: Asymptotic Normalization Constant) から導出することができる [56, 103, 109, 114, 161]。ANC を求めるために、やはり原子核外縁部で起こる、低エネルギー ($E=10\sim 20$ MeV) での陽子移行反 ($^7\text{Be}(d,n)^8\text{B}$) の前方角微分散乱断面積を利用するというのが、この方法の原理である。この方法は、エネルギーを核子当たり 10 MeV 程度と比較的高くできるため、断面積が大きくなる上に、厚い標的を利用できるという利点を持つ。

我々は RIPS で得られる ^7Be , ^8B ビームを用いて、 $^7\text{Be}(d,n)^8\text{B}$, $^8\text{B}(d,n)^9\text{C}$ の測定を行った。本年度はデータ解析をほぼ終了し、投稿論文を準備中である。[113]

<受賞>

[1] 上坂友洋、第17回井上研究奨励賞、井上科学振興財

団、2001年2月2日。

- [2] 上坂友洋、原子核談話会新人賞、原子核談話会・核物理委員会、2001年3月28日。
- [3] 板橋 健太、原子核談話会新人賞、原子核談話会・核物理委員会、2001年3月28日。

<報文>

(原著論文)

- [4] H. Sakai, K. Sekiguchi, H. Witała, W. Glöckle, M. Hatano, H. Kamada, H. Kato, Y. Maeda, A. Nogga, T. Ohnishi, H. Okamura, N. Sakamoto, S. Sakoda, Y. Satou, K. Suda, A. Tamii, T. Uesaka, T. Wakasa, and K. Yako: Precise measurement of dp elastic scattering at 270 MeV and three-nucleon force effect, *Phys. Rev. Lett.* **84** (2000) 5288-5291.
- [5] H. Kamada, T. Uesaka, W. Glöckle, H. Sakai, S. Gojuki, K. Itoh, T. Ohnishi, H. Okamura, N. Sakamoto, S. Sakoda, Y. Satou, K. Sekiguchi, K. Suda, A. Tamii, T. Wakasa, H. Witała, and K. Yako: A Model for the $^3\text{He}(\vec{d},p)^4\text{He}$ Reaction at Intermediate Energies, *Prog. Theor. Phys.* **104** (2000) 703-708.
- [6] S. Nakayama, *et al.*: Soft Dipole Resonance in the Neutron-Skin Nucleus ^6He , *Phys. Rev. Lett.* **85** (2000) 262-265.
- [7] H.K.T. van der Molen, *et al.*: Structure of the $11/2^-$ analog state in ^{91}Nb populated by the $^{90}\text{Zr}(\alpha,t)$ reaction, *Phys. Lett. B* **502** (2001) 1-8.
- [8] M. Yoshimura, *et al.*: Elastic Proton Scattering from ^4He at 297 MeV, *Phys. Rev. C* **63** (2001) 034618-01-11.
- [9] T. Kawabata, *et al.*: Thin Ice Target for $^{16}\text{O}(p,p')$ Experiment, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **459** (2001) 171.
- [10] B. Ketzer, T. von Egidy, F.J. Hartmann, C. Maierl, R. Pohl, J. Eades, E. Widmann, T. Yamazaki, M. Kumakura, N. Morita, R.S. Hayano, M. Hori, T. Ishikawa, H.A. Torii, I. Sugai, and D. Horvath: Collisional quenching of metastable states of antiprotonic helium atoms by hydrogen and deuterium molecules, *Eur. Phys. J.* **D13** (2001) 305-316.
- [11] Lauss B, Augsburg M, Beer G, *et al.*: The DEAR experiment on DAΦNE, *Acta. Phys. Pol.* **B31** (2000) 2257-2264
- [12] Y. Akiba, R. Begay, J. Burward-Hoy, R. Chappell, D. Crook, K. Ebisu, M.S. Emery, J. Ferreira, A.D. Frawley, H. Hamagaki, H. Hara, R.S. Hayano, T.K. Hemmick, M. Hibino, R. Hutter, M. Kennedy, J. Kikuchi, T. Matsumoto, C.G. Moscone, Y. Nagasaka, S. Nishimura, K. Oyama, T. Sakaguchi, S. Salomone, K. Shigaki, Y. Tanaka, J.W. Walker, A.L. Wintenberg and G.R. Young: The PHENIX ring imaging Cherenkov detector *Nucl. Instrum. Meth.* **A453** 279-283 (2000)

- [13] R.S. Hayano: Precision spectroscopy of antiprotonic atoms Nucl. Instrum. Meth. **B171** (2000) 145–152.
- [14] H. Gilg, A. Gillitzer, M. Knülle, M. Münch, W. Schott, P. Kienle, K. Itahashi, K. Oyama, R. S. Hayano, H. Geissel, N. Iwasa, G. Müzenberg, and T. Yamazaki: Deeply bound π^- states in ^{207}Pb formed in the $^{208}\text{Pb}(d,^3\text{He})$ reaction. I. Experimental method and results Phys. Rev. **C62** (2000) 025201
- [15] K. Itahashi, K. Oyama, R. S. Hayano, H. Gilg, A. Gillitzer, M. Knülle, M. Münch, W. Schott, P. Kienle, H. Geissel, N. Iwasa, G. Müzenberg, S. Hirenzaki, H. Toki, and T. Yamazaki: Deeply bound π^- states in ^{207}Pb formed in the $^{208}\text{Pb}(d,^3\text{He})$ reaction. II. Deduced binding energies and widths and the pion-nucleus interaction Phys. Rev. **C62** (2000) 025202
- [16] N. Yamanaka: Hyperfine anomaly for the ground state of $^9\text{Be}^+$, Hyperfine Interactions, **127** (2000) 129–132.
- [17] N. Yamanaka, Y. Horikawa, and A. Ichimura: Formulation of nuclear polarization correction with the Feynman photon propagator, Hyperfine Interactions, **127** (2000) 297–300.
- [18] Y. Horikawa, N. Yamanaka, and A. Ichimura: Negative Energy Correction for Nuclear Polarization in Muonic Atoms, Hyperfine Interactions, **127** (2000) 157–160.
- [19] N. Yamanaka, Y. Kino, M. Kamimura, and H. Kudo: Coupled rearrangement channel calculation of the fine and hyperfine structures of the antiprotonic helium atom, Phys. Rev. **A63** (2001) 012518.
- [20] M. C. Fujiwara, A. Adamczak, J. M. Bailey, G. A. Beer, J. L. Beveridge, M. P. Faifman, T. M. Huber, P. Kammel, S. K. Kim, P. E. Knowles, A. R. Kunselman, M. Maier, V. E. Markushin, G. M. Marshall, C. J. Martoff, G. R. Mason, F. Mulhauser, A. Olin, C. Petitjean, T. A. Porcelli, J. Wozniak, and J. Zmeskal: Resonant Formation of dut Molecules in Deuterium: An Atomic Beam Measurement of Muon Catalyzed dt Fusion, Phys. Rev. Lett. **85** (2000) 1642–1645.
- [21] H. Tamura, K. Tanida, D. Abe, H. Akikawa, K. Araki, H. Bhang, T. Endo, Y. Fujii, T. Fukuda, O. Hashimoto, K. Imai, H. Hotchi, Y. Kakiguchi, J. H. Kim, Y. D. Kim, T. Miyoshi, T. Murakami, T. Nagae, H. Noumi, H. Outa, K. Ozawa, T. Saito, J. Sasao, Y. Sato, S. Satoh, R. I. Sawafta, M. Sekimoto, T. Takahashi, L. Tang, H. H. Xia, S. H. Zhou, and L. H. Zhu: Observation of a Spin-Flip $M1$ Transition in ^7Li , Phys. Rev. Lett. **84** (2000) 5963–5966.
- [22] A. Ichikawa, J. K. Ahn, H. Akikawa, S. Aoki, K. Arai, S. Y. Bahk, K. M. Baik, B. Bassalleck, J. H. Chung, M. S. Chung, K. Hoshino, M. Ieiri, K. Imai, Y. H. Iwata, Y. S. Iwata, H. Kanda, M. Kaneko, T. Kawai, C. O. Kim, J. Y. Kim, S. J. Kim, S. H. Kim, Y. Kondo, T. Kouketsu, Y. L. Lee, J. W. C. MacNabb, M. Mitsuhashi, Y. Nagase, C. Nagoshi, K. Nakazawa, H. Noumi, S. Ogawa, H. Okabe, K. Oyama, H. M. Park, I. G. Park, J. Parker, Y. S. Ra, J. T. Rhee, A. Rusek, H. Shibuya, K. S. Sim, P. K. Saha, D. Seki, M. Sekimoto, J. S. Song, H. Takahashi, T. Takahashi, F. Takeuchi, H. Tanaka, K. Tanida, J. Tojo, H. Torii, S. Torikai, N. Ushida, K. Yamamoto, N. Yasuda, J. T. Yang, C. J. Yoon, C. S. Yoon, M. Yosoi, T. Yoshida, L. Zhu: Production of twin Λ -hypernuclei from Ξ^- hyperon capture at rest, Phys. Lett. **B500** (2001) 37–46.
- [23] K. Tanida, H. Tamura, D. Abe, H. Akikawa, K. Araki, H. Bhang, T. Endo, Y. Fujii, T. Fukuda, O. Hashimoto, K. Imai, H. Hotchi, Y. Kakiguchi, J. H. Kim, Y. D. Kim, T. Miyoshi, T. Murakami, T. Nagae, H. Noumi, H. Outa, K. Ozawa, T. Saito, J. Sasao, Y. Sato, S. Satoh, R. I. Sawafta, M. Sekimoto, T. Takahashi, L. Tang, H. H. Xia, S. H. Zhou, and L. H. Zhu: Measurement of $B(E2)$ of ^7Li and shrinkage of the hypernuclear size, Phys. Rev. Lett. **86** (2001) 1982–1985.
- [24] H. Iwasaki, T. Motobayashi, H. Akiyoshi, Y. Ando, N. Fukuda, H. Fujiwara, Zs. Fülöp, K.I. Hahn, Y. Higurashi, M. Hirai, I. Hisanaga, N. Iwasa, T. Kijima, T. Minemura, T. Nakamura, M. Notani, S. Ozawa, H. Sakurai, S. Shimoura, S. Takeuchi, T. Teranishi, Y. Yanagisawa, and M. Ishihara: Quadrupole deformation of ^{12}Be studied by proton inelastic scattering, Phys. Lett. B **481** (2000) 7–13.
- [25] H. Iwasaki, T. Motobayashi, H. Akiyoshi, Y. Ando, N. Fukuda, H. Fujiwara, Zs. Fülöp, K.I. Hahn, Y. Higurashi, M. Hirai, I. Hisanaga, N. Iwasa, T. Kijima, A. Mengoni, T. Minemura, T. Nakamura, M. Notani, S. Ozawa, H. Sagawa, H. Sakurai, S. Shimoura, S. Takeuchi, T. Teranishi, Y. Yanagisawa, and M. Ishihara: Low-lying intruder 1^- state in ^{12}Be and the melting of the $N=8$ shell closure, Phys. Lett. B **491** (2000) 8–14.
- [26] Y. Mizoi, T. Fukuda, Y. Matsuyama, T. Miyachi, H. Miyatake, N. Aoi, N. Fukuda, M. Notani, Y.X. Watanabe, K. Yoneda, M. Ishihara, H. Sakurai, Y. Watanabe, A. Yoshida: Measurement of the $^8\text{Li}(\alpha, n)^{11}\text{B}$ reaction and astrophysical implications, Phys. Rev. C **62** (2000) 065801.
- [27] F. Sarazin, H. Savajols, W. Mittig, F. Nowacki, N.A. Orr, Z. Ren, P. Roussel-Chomaz, G. Auger, D. Baiborodin, A.V. Belozorov, C. Borcea, E. Caurier, Z. Dlouh, A. Gillibert, A.S. Lalleman, M. Lewitowicz, S.M. Lukyanov, F. de Oliveira, Y.E. Penionzhkevich, D. Ridikas, H. Sakurai, O. Tarasov, and A. de Vismes: Shape coexistence and the $N=28$ shell closure far from stability, Phys. Rev. Lett. **84** (2000) 5062–5065.

- [28] K. Yoneda, H. Sakurai, T. Gomi, T. Motobayashi, N. Aoi, N. Fukuda, U. Futakami, Z. Gacsi, Y. Higurashi, N. Imai, N. Iwasa, H. Iwasaki, T. Kubo, M. Kumibu, M. Kurokawa, Z. Liu, T. Minemura, A. Saito, M. Serata, S. Shimoura, S. Takeuchi, Y.X. Watanabe, K. Yamada, Y. Yanagisawa, K. Yogo, A. Yoshida, and M. Ishihara: Deformation of ^{34}Mg studied via in-beam γ -ray spectroscopy using radioactive-ion projectile fragmentation, *Phys. Lett.* **B 499** (2001) 233–237.
- [29] V. Banerjee, T. Kubo, A. Chakrabarti, H. Sakurai, A. Bandyopadhyay, K. Morita, S.M. Lukyanov, K. Yoneda, H. Ogawa, D. Beaumel: beta-delayed proton decay of ^{24}Si , *Phys. Rev.* **C63** (2001) 024307.
- (会議抄録)
- [30] T. Ohnishi, *et al.*: Measurement of Deuteron Elastic Scattering at $E_d=270$ MeV and a Comparison with Sudden Approximation, *Proc. 1st Asian-Pacific Conf. on Few-Body Problems in Physics*, Few Body Systems Supplement **12** (2000) 153–156.
- [31] H. Sakai, *et al.*: Precise Measurement of dp Scattering at 270 MeV, *ibid*, 403–408.
- [32] K. Sekiguchi, *et al.*: Measurement of cross sections and vector and tensor analyzing powers for d - p elastic scattering at $E_d=270$ MeV, *ibid*, 474–478.
- [33] T. Uesaka, *et al.*: $^3\bar{\text{H}}e(\vec{d}, p)^4\text{He}$ Reaction at Intermediate Energies, *ibid*, 497–500.
- [34] R.S. Hayano: Antiprotonic Helium — a window into the antiworld, *ibid*, 1–6.
- [35] T. Wakasa, *et al.*: Spin-Isospin Modes in Quasielastic Region, *Proc. RCNP-TMU Symposium on Spins in Nuclear and Hadronic Reactions*, (World Scientific, Singapore, 2000) pp. 29–34.
- [36] H. Takeda, *et al.*: Neutron Density Distributions Observed by Proton Elastic Scattering, *ibid*, pp. 35–41.
- [37] A. Tamii, *et al.*: Nuclear Reaction Studied by (\vec{p}, \vec{p}') Reactions at 0° , *ibid*, pp. 42–47.
- [38] T. Uesaka, *et al.*: $^3\bar{\text{H}}e(\vec{d}, p)^4\text{He}$ Reaction at Intermediate Energies, *ibid*, pp. 209–214.
- [39] H. Sakai, *et al.*: Polarization Transfer Measurements for dp Scattering at 270 MeV, *Nucl. Phys.* **A684** (2001) 577c–579c.
- [40] K. Sekiguchi, *et al.*: Measurement of Cross Sections and Analyzing Powers for the d - p Elastic Scattering at Intermediate Energies, *ibid*, 574c–576c.
- [41] T. Uesaka, *et al.*: $^3\bar{\text{H}}e(\vec{d}, p)^4\text{He}$ Reaction at Intermediate Energies, *ibid*, 606c–608c.
- [42] K. Yako, *et al.*: The RCNP (n, p) Facility, *ibid*, 563c–565c.
- [43] R.S. Hayano: High-precision laser spectroscopy of antiprotonic helium atoms, *ibid*, 658c–662c.
- [44] H. Tamura, D. Abe, S. Ajimura, H. Akikawa, K. Araki, H. C. Bhang, R. E. Chrien, T. Endo, P. Eugenio, G. B. Franklin, Y. Fujii, T. Fukuda, L. Gan, O. Hashimoto, H. Hotchi, K. Imai, Y. Kakiguchi, P. Khaustov, J. H. Kim, Y. D. Kim, H. Kohri, M. May, T. Miyoshi, T. Murakami, T. Nagae, J. Nakano, H. Noumi, H. Outa, K. Ozawa, P. H. Pile, B. P. Quinn, A. Rusek, T. Saito, J. Sasao, Y. Sato, S. Satoh, R. I. Sawafta, R. A. Schumacher, M. Sekimoto, T. Takahashi, T. Tamagawa, L. Tang, K. Tanida, H. H. Xia, L. Yuan, S. H. Zhou, L. H. Zhu and X. F. Zhu: High-resolution hypernuclear gamma-ray spectroscopy, *Nucl. Phys.* **A663-664** (2000) 481c–484c.
- [45] H. Tamura, K. Tanida, D. Abe, H. Akikawa, K. Araki, H. Bhang, T. Endo, Y. Fujii, T. Fukuda, O. Hashimoto, K. Imai, H. Hotchi, Y. Kakiguchi, J. H. Kim, Y. D. Kim, T. Miyoshi, T. Murakami, T. Nagae, J. Nishida, H. Noumi, H. Outa, K. Ozawa, T. Saito, J. Sasao, Y. Sato, S. Satoh, R. Sawafta, M. Sekimoto, T. Takahashi, L. Tang, H. H. Xia, S. H. Zhou and L. H. Zhu: High-resolution gamma-ray spectroscopy of ^7Li , *Nucl. Phys.* **A670** (2000) 249c–256c.
- [46] T. Takahashi, S. Ajimura, K. Aoki, H. Bhang, T. Endo, Y. Fujii, O. Hashimoto, H. Hotchi, E. Hungerford, J. H. Kim, Y. D. Kim, T. Kishimoto, K. Koshino, K. Kubota, K. Maeda, T. Nagae, H. Noumi, Y. Ohta, K. Omata, H. Outa, H. Park, T. Saito, Y. Saito, Y. Sato, M. Sekimoto, T. Shibata, T. Tamagawa, H. Tamura, L. Tang, K. Tanida and M. Youn: Spectroscopy of light hypernuclei, *Nucl. Phys.* **A670** (2000) 265c–268c.
- [47] T. Nagae, H. Hotchi, H. Outa, H. Noumi, M. Sekimoto, T. Fukuda, H. C. Bhang, Y. D. Kim, J. H. Kim, H. Park, L. I. Tang, R. Sawafta, K. Tanida, O. Hashimoto, H. Tamura, T. Saito, T. Takahashi, Y. Sato, T. Endo, S. Satoh, J. Nishida, T. Miyoshi, T. Kishimoto, A. Sakaguchi, S. Ajimura, Y. Shimizu, T. Mori, S. Minami, and M. Sumihama: Structure of a Λ -hypernucleus $^{89}_{\Lambda}\text{Y}$ studied with the SKS spectrometer, *Nucl. Phys.* **A670** (2000) 269c–272c.
- [48] K. Tanida, H. Tamura, D. Abe, S. Ajimura, H. Akikawa, K. Araki, H. C. Bhang, R. E. Chrien, P. Eugenio, G. B. Franklin, Y. Fujii, T. Fukuda, L. Gan, O. Hashimoto, H. Hotchi, K. Imai, Y. Kakiguchi, P. Khaustov, J. H. Kim, Y. D. Kim, H. Kohri, M. May, T. Miyoshi, T. Murakami, T. Nagae, J. Nakano, H. Noumi, H. Outa, K. Ozawa, P. H. Pile, B. P. Quinn, A. Rusek, T. Saito, J. Sasao, Y. Sato, S. Satoh, R. I. Sawafta, R. A. Schumacher, M. Sekimoto, T. Takahashi, T. Tamagawa, L. Tang, H. H. Xia, L. Yuan, S. H. Zhou, L. H. Zhu and X. F. Zhu: High-resolution gamma-ray spectroscopy of hypernuclei with germanium detectors, *Nucl. Phys.* **A684** (2000) 560c–562c.

- [49] K. Tanida, H. Tamura, D. Abe, S. Ajimura, H. Akikawa, K. Araki, H. C. Bhang, R. E. Chrien, P. Eugenio, G. B. Franklin, Y. Fujii, T. Fukuda, L. Gan, O. Hashimoto, H. Hotchi, K. Imai, Y. Kakiguchi, P. Khaustov, J. H. Kim, Y. D. Kim, H. Kohri, M. May, T. Miyoshi, T. Murakami, T. Nagae, J. Nakano, H. Noumi, K. Ozawa, H. Outa, P. H. Pile, B. P. Quinn, A. Rusek, T. Saito, J. Sasao, Y. Sato, S. Satoh, R. I. Sawafta, R. A. Schumacher, M. Sekimoto, T. Takahashi, T. Tamagawa, L. Tang, H. H. Xia, L. Yuan, S. H. Zhou, L. H. Zhu and X. F. Zhu: Lambda-N spin dependent interactions studied by gamma-ray spectroscopy of hypernuclei, *Proc. RCNP-TMU Symposium on spins in nuclear and hadronic reactions* (World Scientific, Singapore, 2000) pp. 215–220.
- [50] K. Tanida, H. Tamura, D. Abe, S. Ajimura, H. Akikawa, K. Araki, H. C. Bhang, R. E. Chrien, P. Eugenio, G. B. Franklin, Y. Fujii, T. Fukuda, L. Gan, O. Hashimoto, H. Hotchi, K. Imai, Y. Kakiguchi, P. Khaustov, J. H. Kim, Y. D. Kim, H. Kohri, M. May, T. Miyoshi, T. Murakami, T. Nagae, J. Nakano, H. Noumi, K. Ozawa, H. Outa, P. H. Pile, B. P. Quinn, A. Rusek, T. Saito, J. Sasao, Y. Sato, S. Satoh, R. I. Sawafta, R. A. Schumacher, M. Sekimoto, T. Takahashi, T. Tamagawa, L. Tang, H. H. Xia, L. Yuan, S. H. Zhou, L. H. Zhu and X. F. Zhu: Hypernuclear γ -ray spectroscopy experiments with germanium detectors, *Proc. APCTP Workshop on strangeness nuclear physics* (World Scientific, Singapore, 2000) pp. 98–103.
- [51] T. Fukuda, T. Nagae, H. Outa, M. Sekimoto, H. Hotchi, T. Miyachi, J. Nakano, T. Tamagawa, K. Tanida, R. E. Chrien, M. May, E. Meyer, P. Pile, A. Rusek, R. Sutter, A. Berdoz, D. Carman, P. Eugenio, G. B. Franklin, P. Khaustov, P. Koran, C. Meyer, K. Paschke, B. P. Quinn, R. A. Schumacher, L. Gan, L. Tang, L. Yuan, A. Kurepin, V. Rasin, M. Prokhavatillov, K. Shileev, J. K. Ahn, H. Akikawa, K. Imai, A. Ichikawa, K. Yamamoto, M. Yosoi, S. Ajimura, T. Kishimoto, H. Kori, S. Minami, Y. Shimizu, Z. Meziani, H. Fischer, J. Franz, H. Schmitt, C. A. Davis, M. Landry, and B. Bassalleck: Production of double- Λ hypernuclei: BNL-AGS E906, *ibid.*, pp. 167–174.
- [52] A. Sakaguchi, S. Ajimura, R. E. Chrien, P. M. Eugenio, G. Franklin, J. Franz, T. Fukuda, L. Gan, H. Hayakawa, P. Khaustov, T. Kishimoto, H. Kohri, K. Matsuoka, M. May, S. Minami, T. Mori, K. Morikubo, J. Nakano, H. Noumi, H. Outa, K. Paschke, P. Pile, B. Quinn, A. Rusek, E. Saji, R. Sawafta, R. Sutter, Y. Shimizu, M. Sumihama, T. Tamagawa, H. Tamura, K. Tanida, L. Tang, and L. Yuan: Measurement of spin-orbit splitting in ${}^{13}\text{C}$ hypernucleus, *ibid.*, pp. 231–236.
- [53] R.S. Hayano: Experimental studies of deeply bound meson-nucleus states, *Nucl. Phys.* **A680** (2001) 125c–132c.
- [54] M.C. Fujiwara, A. Adamczak, J.M. Bailey, G.A. Beer, J.L. Beveridge, M.P. Faifman, T.M. Huber, P. Kammel, S.K. Kim, P.E. Knowles, A.R. Kunselman, V.E. Markushin, G.M. Marshall, C.J. Martoff, G.R. Mason, F. Mulhauser, A. Olin, C. Petitjean, T.A. Porcelli, and J. Zmeskal: Using Thin Film Targets for Muonic Atoms and Muon Catalyzed Fusion Studies, *Proc. of KEK international workshop on high intensity muon sources* edited by Y. Kuno and T. Yokoi (World Scientific, Singapore, 2001). pp. 291–298.
- [55] H. Sakurai: RI Beam Factory Project at RIKEN, *Proc. of 1999 Symposium on Nuclear Data*, Nov. 18–19, 1999 JAERI Tokai, Japan, ed. N. Yamano and T. Fukahori, JAERI-Conf 2000–005, pp. 82–86 (2000).
- [56] N. Imai, N. Aoi, S. Kubono, D. Beaumel, X. Liu, K. Abe, K. Kumagai, H. Ohnuma, S. Kato, Y. Fuchi, P. Strasser, M. Kurokawa, H. Sakurai, T. Kubo, and M. Ishihara: Test of The ANC method via (d,p) reaction, *Proceedings of the International Topical Conference on Nuclei in the Cosmos*, Aarhus, Denmark, 27 June 2000, *Nucl. Phys.* **A 688** (2001) 281c.
- (国内雑誌)
- [57] 谷田聖: ハイパー核と γ 線分光実験、*原子核研究* **45**, No.5 (2000) 151–159.
- [58] 櫻井博儀: 不安定核ビームを用いた核構造研究、*原子核研究* **45** (2000) 61–64.
- [59] 五味朋子, 他: 入射核破砕反応を用いた不安定核の励起状態の生成、*原子核研究* **45** (2000) 135–140.
- (学位論文)
- [60] 岩崎弘典: In-beam Gamma Spectroscopy of ${}^{12}\text{Be}$ with Inelastic Scattering 非弾性散乱を用いた ${}^{12}\text{Be}$ のガンマ核分光 (博士論文)
- [61] 波田野道夫: 高温低磁場での偏極陽子固体標的 (修士論文).
- [62] 加藤裕充: ${}^{12}\text{C}(\vec{d}, \vec{d}')$ 反応の 1-2 重スピン反転確率測定による ${}^{12}\text{C}$ 高励起状態の研究 (修士論文).
- [63] 前田幸重: 250 MeV 偏極中性子-重陽子弾性散乱測定による三体力の研究 (修士論文).
- [64] 船越亮: Development of ATHENA instruments for cold antihydrogen production with Penning traps (ペニングトラップを用いた低エネルギー反水素生成のための ATHENA 実験装置の開発、修士論文).
- [65] 山口英斉: High precision laser spectroscopy and density shift of antiprotonic helium atoms (反陽子ヘリウム原子の高精度レーザー分光と密度シフト、修士論文).

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [66] T. Wakasa, *et al.*: Gamow-Teller Strength in the Continuum and Quenching Problem, Int. Conf. on Giant Resonances, June 12–15, 2000, Osaka, Japan.
- [67] T. Ohnishi, *et al.*: Study of Spin-Isospin Excitations in ^{11}Be via the $(d, ^2\text{He})$ Reaction at 270 MeV, *ibid.*
- [68] T. Ishikawa, *et al.*: Giant Resonance of ^{58}Ni via Proton Inelastic Scattering at and near 0° , *ibid.*
- [69] J. Jänecke, *et al.*: Direct and Statistical Proton Decay from Isovector Giant Resonance in ^{90}Nb , *ibid.*
- [70] A. Tamii, *et al.*: Measurement of $^{12}\text{C}, ^{28}\text{Si}(\vec{p}, \vec{p}')$ Reactions at Zero Degrees, *ibid.*
- [71] H. Sakaguchi, *et al.*: Neutron Densities in ^{120}Sn Observed by Polarized Proton Scattering, *ibid.*
- [72] S. Sakoda, *et al.*: Spin-Flip Probability for the $^{26}\text{Mg}(^3\text{He}, t)^{26}\text{Al}^*(1^+; 1.058\text{MeV})$ Reaction at 177 MeV, *ibid.*
- [73] T. Wakasa, *et al.*: Momentum Transfer Dependence of Spin Isospin Modes in Quasi-Elastic (\vec{p}, \vec{n}) Reactions, *ibid.*
- [74] A. Tamii, *et al.*: Spin-dependent Effective Interaction Studied by the $^{12}\text{C}, ^{28}\text{Si}(\vec{p}, \vec{p}')$ Reactions at Zero Degrees, *ibid.*
- [75] T. Kawabata, *et al.*: Study of Spin-Dipole Resonances in ^{16}O by Measuring $^{16}\text{O}(\vec{p}, \vec{p}')$ Reaction at Extremely Forward Angles, *ibid.*
- [76] Y. Satou, *et al.*: Measurement of Single and Double Spin-Flip Probabilities S_1 and S_2 in Inelastic Deuteron Scattering off ^{12}C and ^{28}Si at 270 MeV, *ibid.*
- [77] J. Kamiya, *et al.*: Energy Dependence of $^{12,13}\text{C}(\vec{p}, \pi^-)^{13,14}\text{O}_{g.s.}$ Reactions in Δ_{1232} Resonance Region, *ibid.*
- [78] T. Uesaka, *et al.*: Role of Deuteron Internal Variables in the $^3\text{He}(d, p)^4\text{He}$ Reaction, *ibid.*
- [79] K. Sekiguchi, *et al.*: Measurement of Cross Section and Analyzing Powers for d - p Elastic Scattering at Intermediate Energies and Three-Nucleon Force Effects, *ibid.*
- [80] Y. Maeda, *et al.*: Measurement of Differential Cross Sections and Vector Analyzing Powers for the $\vec{n} + d$ Reaction at 250 MeV, *ibid.*
- [81] M. Yosoi, *et al.*: Instrumentation for the Polarization Transfer Experiment in Proton Elastic Scattering at 0° , *ibid.*
- [82] H. Kato, *et al.*: Deuteron Polarimeter DPOL and Calibration of the System, *ibid.*
- [83] K. Suda, *et al.*: Absolute Calibration of the Deuteron Beam Polarization at Intermediate Energies via the $^{12}\text{C}(\vec{d}, \alpha)^{10}\text{B}^*(2^+)$ Reaction, *ibid.*
- [84] T. Wakui, *et al.*: Development of a Polarized Proton Target in a Low Magnetic Field at High Temperature, *ibid.*
- [85] T. Ohnishi, *et al.*: Systematic Study of Spin-Isospin Excitations in Neutron Rich Light Nuclei via the $(d, ^2\text{He})$ Reaction at 270 MeV, *ibid.*
- [86] H. Kato, *et al.*: Measurement of Spin Flip Probabilities in Highly Excited Continuum of ^{12}C , *ibid.*
- [87] S. Fukusaka, *et al.*: J^π Decomposition of a Bump at $E_x \simeq 7$ MeV in ^{12}N , *ibid.*
- [88] D. Hirooka, *et al.*: Three-Body Effect in $\vec{p}d$ Elastic Scattering at 250 MeV, *ibid.*
- [89] T. Uesaka, *et al.*: Beam-Line Polarimeter for Intermediate-Energy Deuteron, *ibid.*
- [90] Y. Satou, *et al.*: A Vector and Tensor Polarimeter for Intermediate Energy Deuterons, *ibid.*
- [91] K. Yako, *et al.*: RCNP (n, p) Facility, *ibid.*
- [92] Y. Maeda, *et al.*: Production of Thick CD_2 Targets for Measurements of the $\vec{n} + d$ Reaction at 250 MeV, *ibid.*
- [93] J. Nishikawa, *et al.*: Calibration of ^3He Polarization Using Electron-Spin-Resonance Method, *ibid.*
- [94] N. Yamanaka, Y. Horikawa, and A. Ichimura: Transverse Nuclear Polarization in Hydrogen-Like Heavy Ions, Internatinal Conference on Atomic Physics, ICAP-2000, June 4–9 2000, Firenze, Italy
- [95] N. Yamanaka, Y. Horikawa, and A. Ichimura: Nuclear Polarization in Hydrogen-Like ^{208}Pb and ^{238}U Ions, 10th Internatinal Conference on the Physics of Hyghly Charged Ions, July 30 – August 3, 2000, Clark Kerr Campus of the University of California-Berkeley, USA
- [96] M.C. Fujiwara: Time-of-Flight Spectroscopy of Muonic Hydrogen Atoms and Molecules, a poster presented at Hydrogen Atom II: Precise physics of simple atomic systems, Tuscany, Italy, June 1–3, 2000.
- [97] M.C. Fujiwara: The Athena experiment at CERN-AD, a talk given at Lake Louise Winter Institute on Fundamental Interactions, Alberta, Canada, February 18–24, 2001
- [98] K. Tanida, H. Tamura, D. Abe, H. Akikawa, K. Araki, H. Bhang, T. Endo, Y. Fujii, T. Fukuda, O. Hashimoto, K. Imai, H. Hotchi, Y. Kakiguchi, J. H. Kim, Y. D. Kim, T. Miyoshi, T. Murakami, T. Nagae, H. Noumi, H. Outa, K. Ozawa, T. Saito, J. Sasao, Y. Sato, S. Satoh, R. I. Sawafta, M. Sekimoto, T. Takahashi, L. Tang, H. H. Xia, S. H. Zhou, and L. H. Zhu: High-resolution γ -ray spectroscopy of $^7_\Lambda\text{Li}$, HYP2000, Torino, Italy, October 23–27, 2000.

- [99] K. Yoneda *et al.*: Gamma-ray spectroscopy of ^{34}Mg via RI beam fragmentation, The Fifth International Conference on Radioactive Nuclear Beams, Divonne, France, 3–8 April, 2000.
- [100] H. Iwasaki *et al.*: Inelastic Scattering of ^{12}Be and Disappearance of the $N=8$ Magic Number, International Symposium on Perspectives in Physics with Radioactive Isotopes 2000, 13–16 November, 2000, Kanagawa, Japan.
- [101] H. Ogawa *et al.*: Quenching of neutron E2 effective charge in neutron-rich nuclei, *ibid.*
- [102] K. Yoneda *et al.*: Very Large Deformation of the Neutron-Rich Isotope ^{34}Mg from In-Beam Gamma-Ray Spectroscopy with RI Beam Fragmentation, *ibid.*
- [103] N. Imai *et al.*: First Application of the ANC Method to Neutron Radiative Capture Reaction, *ibid.*
- [104] H. Ueno *et al.*: β -delayed neutron spectroscopy using a spin-polarized ^{17}B beam, *ibid.*
- [105] Y. X. Watanabe *et al.*: Measurement of Fusion Excitation Functions of Neutron-Skin Nuclei $^{6,8}\text{He}$, *ibid.*
- [106] T. Minemura *et al.*: Study of the $^{11}\text{C}(p,\gamma)^{12}\text{N}$ and $^{12}\text{N}(p,\gamma)^{13}\text{O}$ reactions through the Coulomb dissociation method, *ibid.*
- [107] K. Yamada *et al.*: E1 strength of the subthreshold $3/2^+$ state in ^{15}O and its influence to the CNO reaction $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$, *ibid.*
- [108] M. Serata *et al.*: A test of the Coulomb dissociation method – E1 resonance excitation of ^{13}N and $^{14}\text{O}^-$, *ibid.*
- [109] N. Imai *et al.*: Study of $^{12}\text{C}(d,p)^{13}\text{C}(1/2^+)$ reaction – applicability of the ANC method to (n,γ) reactions, Workshop of Direct Reactions with Radioactive Isotope Beams, Tachikawa Hall, Rikkyo University, Ikebukuro, Tokyo, Japan, 18 Nov, 2000.
- [110] K. Yoneda *et al.*: In-beam gamma-ray spectroscopy with RI projectile fragmentation, *ibid.*
- [111] T. Minemura *et al.*: Low-energy E1 strength in ^{13}O , *ibid.*
- [112] S. Takeuchi *et al.*: Isobaric analog state of ^{14}Be , *ibid.*
- [113] D. Beaumel *et al.*: The ANC Method and some applications, *ibid.*
- [114] N. Imai *et al.*: Test of The ANC method via (d,p) reaction, Nuclei in Cosmos 2000, Jun. 27–Jul. 1 2000, Aarhus, Denmark.
- [115] H. Iwasaki *et al.*: Experimental Studies of E1 and E2 transitions in ^{12}Be , Physics at Drip Lines, 13–16 February, 2001, RIKEN.
- [116] K. Asahi *et al.*: Quadrupole moments and magnetic moments in exotic nuclei, *ibid.*
- [117] H. Ogawa *et al.*: Effective charge anomaly in neutron-rich nuclei revealed from spin-polarized RI beam experiments, 14th International Spin Physics Symposium (Spin2000), 16–21 October, 2000, Osaka University.
- [118] Asahi Koichiro *et al.*: Nuclear moment studied with polarized radioactive nuclear beams, *ibid.*
- 招待講演
- [119] H. Sakai: Spin-Isospin Responses in Nuclei via Polarization Measurements, 14th Int. Spin Physics Symp., October 16–21, 2000, Osaka, Japan.
- [120] H. Sakai: Pionic Collectivity in Nuclei, Int. Symp. on Strong Correlations in Many-Body Systems, 26–30 June, 2000, Tokyo/Mount Nikko, Japan.
- [121] H. Sakai: $\vec{d}p$ and $\vec{n}d$ Scatterings at Intermediate Energy and Three-Nucleon Force Effects, XVII European Conf. on Few-Body Problems in Physics, 11–16 September, 2000, Evora, Portugal.
- [122] H. Sakai: Gamow-Teller Strength and Quenching: Probed by Recent Precise (p,n) and (n,p) Measurements at 300 MeV, Int. Conf. on Nuclei and Neutron, 11–13 October, 2000, Darmstadt, Germany.
- [123] M. Hori: The ASACUSA experiment at CERN’s Antiproton Decelerator, Invited talk at “Biennial Conference on Low Energy Antiproton Physics (LEAP 2000)”, Venice, Italy, August, 2000.
- [124] E. Widmann: Präzisionspektroskopie von antiprotonischem Helium – erste Ergebnisse am AD des CERN (Precision spectroscopy of antiprotonic helium – first results from AD at CERN), invited talk at the German Physical Society spring meeting (Nuclear Physics Division) Erlangen, Germany, March 19–23, 2001.
- [125] H. Sakurai: RIBF project at RIKEN, Bologna 2000, Bologna, Italy, Jun., 2000.
- [126] H. Sakurai: Spectroscopy on very neutron-rich nuclei beyond $N=20$, Perspectives in Physics with Radioactive Isotope Beams 2000, Hayama, Japan, Nov., 2000.
- [127] H. Sakurai: Application of projectile fragmentation for nuclear structure, International workshop on reaction mechanisms with exotic nuclei, Trento, Italy, Feb., 2001.
- (国内会議)
- 一般講演
- [128] 前田幸重、他: 250 MeV 偏極中性子–重陽子弾性散乱における、微分散乱断面積および偏極分解能の測定、日本物理学会年次大会 (新潟大学、2000年9月22日～25日).
- [129] 加藤裕充、他: ^{12}C 高励起連続状態における重陽子偏極移行測定、同上.

- [130] 川畑貴裕、他: $T_p=392$ MeV における $^{16}\text{O}(p, p')$ 反応の偏極移行量測定、同上。
- [131] 藤原真琴、船越亮、桧垣浩之、早野龍五、山崎泰規、他 ATHENA Collaboration: CERN-AD 施設における反水素生成実験 (ATHENA)II、同上。
- [132] 山中信弘、木野康志: 反陽子原子生成過程の理論研究のための時間依存結合チャンネル法の開発、同上。
- [133] 秋川藤志、谷田聖、他: ^9Be の γ 線核分光 III、同上。
- [134] 市川温子、谷田聖、他: ダブルストレンジネス核探索実験 (KEK-PS E373)、同上。
- [135] 内ヶ島暢之、他: 300 MeV における高分解能 (p, n) 反応測定のためのテスト実験、日本物理学会年次大会 (中央大学、2001 年 3 月 27 日 ~30 日)。
- [136] 民井淳、他: 「 $p+d$ 散乱による狭幅ダイバリオンの探索」、同上。
- [137] 齋藤孝明、他: 197 MeV $^{12}\text{C}(p, n)^{12}\text{N}$ 反応の GSDR 領域の MDA、同上。
- [138] 波田野道夫、他: Integrated Solid Effect による高温低磁場での偏極陽子固体標的の開発、同上。
- [139] 山中信弘、木野康志、工藤博司、上村正康: 反陽子ヘリウム原子の超微細構造の組替えチャンネル結合計算、同上。
- [140] 坂口淳、早野龍五、石川隆、堀正樹、山口英斉、Eberhard Widmann、他: 反陽子ヘリウム原子の超微細構造間のマイクロ波共鳴遷移の観測、同上。
- [141] K. Yoshiki Franzen, H. Higaki, M. Hori, T. Ichioka、他: Design and test of a beam line for extraction of slow antiprotons from a Malmberg-Penning ion trap、同上。
- [142] 王志剛、桧垣浩之、吉城 FRANZEN 健、市岡利康、堀正樹、他: 超低速反陽子と原子分子衝突実験装置の開発、同上。
- [143] 船越亮、藤原真琴、桧垣浩之、早野龍五、山崎泰規、他 ATHENA collaboration: CERN ATHENA プロジェクトにおける低エネルギー反水素の生成実験、同上。
- [144] 桧垣浩之、黒田直史、市岡利康、王志剛、吉城健、堀正樹、他: ASACUSA Trap における高エネルギー陽子の電子冷却、同上。
- [145] 山口英斉、堀正樹、Eberhard Widmann、坂口淳、Bertalan Juhasz、他: AD における反陽子ヘリウム原子の高精度レーザー分光と密度シフト効果、同上。
- [146] 亀田大輔、他: 段熱磁場回転による入射核破碎反応の偏極度測定法の開発、同上。日本物理学会第 56 回年次大会 2001 年 (中央大学)。
- [147] 三好永哲、他: 中性子過剰核 ^{17}C の磁気モーメント測定と基底状態のスピン、同上。
- [148] 杉本崇、他: ^{17}B の分解反応、同上。
- [149] 奥田貴志、他: $p(^{11}\text{Be}, 2p)$ 反応による ^{10}Li の研究、同上。
- [150] 小林俊雄、他: $p(^{17}\text{Ne}, 2p)p^{15}\text{O}$ 反応による ^{17}Ne の構造、同上。
- [151] 早野龍五: ASACUSA 2000 年実験の成果、文部省科研費補助金創成的基礎研究費「反陽子を用いた反物質科学」理論班第 2 回研究会 2000 年 12 月 15 日-12 月 17 日、富士吉田。
- [152] 坂口淳、他: 反陽子ヘリウム原子の超微細構造、同上。
- [153] 山口英斉: 反陽子ヘリウム原子の精密レーザー分光と密度シフトの測定、同上。
- [154] 山中信弘、他: 反陽子ヘリウム原子の超微細構造の精密計算、同上。
- [155] 山中信弘、木野康志: 高速・安定時間依存チャンネル結合法の開発と組み替え衝突への応用、同上。
- [156] 船越亮: ATHENA (反水素生成) 実験の現状、同上。
- [157] 早野龍五: CERN ASACUSA 実験の新しい成果宇宙研研究会「反粒子の関与する原子物理」2000 年 12 月 25 日-26 日、宇宙研。
- [158] 藤原真琴、他 ATHENA Collaboration: CERN における反水素生成実験 (ATHENA)、同上。
- [159] 山中信弘、木野康志: 高速・安定時間依存チャンネル結合法の開発と陽電子-水素原子衝突によるポジトロニウム生成への応用、同上。
- [160] 渡辺裕、他: 中性子過剰核の融合反応, CNS/RIKEN 共催研究会「低エネルギー RIB の物理」(和光, 8 月 23-25)。
- [161] 今井伸明、他: 核子移行反応を用いた直接捕獲反応断面積導出法、同上。
- [162] 小川博嗣、他: 中性子過剰核の電磁気モーメント、同上。
- [163] 岩崎弘典、他: 不安定核 ^{12}Be ビームを用いたガンマ核分光、「低エネルギー短寿命核ビームの科学 2001」研究会 (KEK、2001 年 3 月 12-14 日)。
- [164] 渡辺裕、他: Measurement of Fusion Excitation Functions of $^{27,29,31}\text{Al} + ^{197}\text{Au}$ 、同上。
- [165] 斎藤明登、他: Molecular States in Neutron-Rich Nuclei $^{12,14}\text{Be}$ 、同上。

招待講演

- [166] 早野龍五: Antiprotonic Helium Spectroscopy - New Results from AD 理研-RCNP 研究会:「Exotics in Hadron Many Body Systems」2000 年 11 月 22 日-11 月 24 日、奈良。
- [167] 櫻井博儀: 核の安定性と集団性, Workshop on physics at RI Beam Factory- (I) the first experiments, 理化学研究所, 和光, 2000 年 6 月。
- [168] 櫻井博儀: 原子核物理学と高エネルギー宇宙物理学, 高エネルギー宇宙物理連絡会, 第 1 回研究会「高エネルギー宇宙物理学の現状と将来」, 大阪大学, 豊中, 2000 年 9 月。
- [169] 櫻井博儀: 不安定核ビーム実験の最新の成果と今後の展開, 研究会「原子核物理の最近の発展と今後の展望」, 高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所, つくば, 2001 年 3 月。

(セミナー)

- [170] 谷田聖: γ -ray spectroscopy of ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$, (KEK、つくば、2000年4月).
- [171] 谷田聖: γ -ray spectroscopy of ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$, (北海道大学、札幌、2000年5月).
- [172] E. Widmann: Präzisionsspektroskopie von antiprotonischem Helium – erste Ergebnisse am AD des CERN (Precision spectroscopy of antiprotonic helium - first results from AD at CERN), *et al.*, Seminar given at Institut für Strahlen und Kernphysik, Universität Bonn, November 17th, 2000.
- [173] 石川隆: CERNの反陽子減速器(AD)を用いた反陽子ヘリウム原子の精密レーザー分光、(神戸大学、粒子物理学セミナー、2001年3月2日).
- [174] H. Sakurai: Search for neutron-rich nuclei toward the neutron drip-line and RIBF project at RIKEN, Korean Physical Society, Spring meeting, Seoul, Korea, Apr., 2000.
- [175] 青井考: 次世代線検出器 GRETA II, 九州大学, 福岡, 2000年5月.
- [176] 櫻井博儀: 不安定核ビームを用いた核構造研究, 原子核三者若手夏の学校, 木島平, 2000年7月.
- [177] 櫻井博儀: 不安定核ビームの物理, 核化学夏の学校, 越後川口, 2000年8月.
- [178] 櫻井博儀: 中性子過剰核のエキゾチックな核構造, 基礎物理談話会, 東京工業大学, 大岡山, 2000年9月.
- <その他>
- [179] 中性子星の世界探る一歩 ハイパー原子核を見た、朝日新聞、2000年7月7日夕刊
- [180] The Incredible Shrinking Nucleus, Physical Review Focus, March 1, 2000.
- [181] Quark Quirk Triggers Nuclear Shrinkage, Science, **291** (2001) 1877-1878.

2.2 駒宮研究室

当研究室は、2000年度に本格的な活動を開始した若い研究室である。素粒子物理の本質的な問題を実験的なアプローチで解明することを目指している。エネルギーフロンティア（最高エネルギー）における加速器実験に加えて、新型の粒子検出器の開発研究を行なっている。旧折戸研究室のメンバーによる飛翔体を利用した宇宙線観測実験も行なっている。

2.2.1 最高エネルギー電子・陽電子コライダー LEP を用いた OPAL 実験

世界最高エネルギーの電子・陽電子衝突型加速器 (e^+e^- コライダー) LEP を用いて、国際協同実験 OPAL を素粒子物理国際研究センターと共同で行っている。この実験の目的は、統一ゲージ理論の精密検証、質量の起源であるヒッグス粒子の探索、超対称性などの素粒子物理学上の根源的な問題の研究を、素粒子反応の素過程を明確に観測できる電子・陽電子衝突を用いて、世界最高エネルギーで行なうことにある。

電子と陽電子 (e^+ と e^-) は、素粒子とみなすことができるので、それらの衝突は素過程である。また、 e^+ と e^- は粒子と反粒子の関係にあるので、衝突によって対消滅が起こり、その全ての衝突エネルギーは新たな粒子の生成に使われる（例えば図1参照）。従って、エネルギーフロンティア（世界最高エネルギー）での e^+e^- 衝突反応の実験研究は、素粒子の消滅生成の素過程反応そのものを直接、詳細に観測できるという本質的利点を有する。

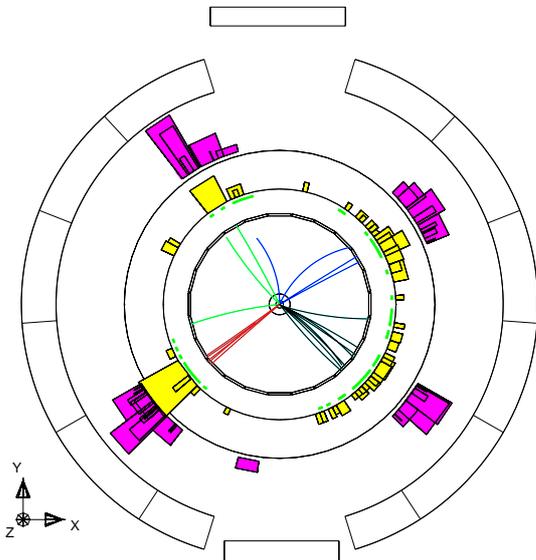


図1： e^+e^- 衝突で対生成したWボソンがそれぞれクォーク対に崩壊し、4つのクォークになった事象。OPAL測定器により観測された。4つのクォークは、図の中心から外へ向かう4本の粒子の束（ジェット）として観測される。 e^+e^- 衝突反応では、この様に素過程を直接的に観測できる。

1989年に重心系エネルギー 90 GeV 近辺で実験を開始して以来、弱い相互作用を媒介するゲージ粒子である Z^0 粒子を総数 500 万事象観測し、「統一ゲージ理論（標準理論）の精密検証」、「クォーク・レプトン群の世代数の決定」、「大統一理論の検証」等を行なってきた。

2000年度は、加速器の調整が順調に行なわれた為、衝突エネルギーを 209 GeV まで増強し、積算ルミノシティ 220 pb^{-1} 相当のデータを収集した。この大量のデータを用いて、以下の主要な研究成果が得られた。

ヒッグス粒子の探索

「局所ゲージ対称性」を仮定すると全ての粒子が質量を持たないのが自然な姿である。「局所ゲージ対称性」を破り素粒子に質量を与えるのが、ヒッグス粒子の役割である。真空は実は「無」ではなく濃密なヒッグス粒子の場が凝縮しており、本来質量の無い素粒子がこのヒッグス粒子の場と相互作用することによって、いわば「抵抗」を受けて光の速度では走れなくなり、質量が生ずると考えられる。このヒッグス粒子がどのような形で発見されるかが、「標準理論」を検証する上で、またこれを越えたより大きな理論の枠組を決定する上での鍵であり、素粒子物理学において極めて重要且つ緊急な問題である。 e^+e^- 衝突では、ヒッグス粒子は極めて明確に検出できると考えられる。2000年度11月までのLEPの四実験のデータ解析結果を総合すると質量が約 115 GeV のヒッグス粒子の生成らしき事象がいくつか存在し、シグナルの信頼性は 2.9σ である。一般に新粒子発見を宣言するには 5σ 程度の信頼性が必要なので、現在までのデータでヒッグス粒子が発見されたとは言い難い。2001年度には、このヒッグス粒子らしきシグナルに関して更に詳細なデータ解析をおこなう。残念ながらLEPの運転は2000年で終了した。

ミニマル超対称性理論は質量が 130 GeV 以下に電氣的に中性なヒッグス粒子が必ず存在すると予言している。特に、2つのヒッグス2重項の真空期待値の比が小さいと、最も軽いヒッグス粒子の質量がさらに軽くなる。2000年度は真空期待値の比が3程度以下の領域でヒッグス粒子の存在を棄却した。残る領域は真空期待値の比が大きい領域であり、ヒッグス粒子をパラメータ領域の角に追い詰めてきたといえる（図2参照）。

超対称性粒子の探索

現在、超対称性理論は「標準理論」を越える学説の内で最も有望なものであり、重力相互作用を含めた全ての相互作用の統一への道を開く可能性がある。超対称性理論では現在知られているすべての素粒子にパートナーの超対称性粒子が存在し、これらの粒子のうち一種類でも発見されれば、重力をも含めた究極の統一理論への大きな方向が定まる。LEP-IIではこの超対称性パートナーのうちでも、質量が軽いと期待される強い相互作用をしない粒子群の発見が期待

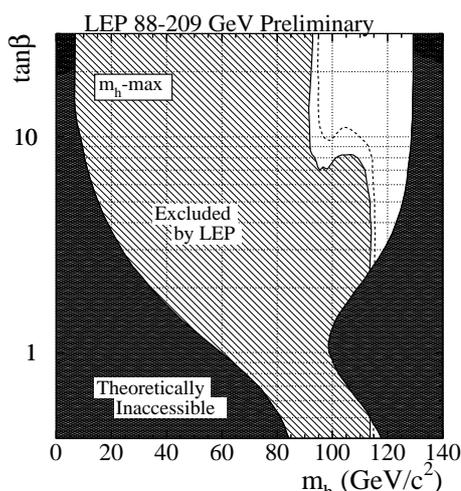


図2：OPAL実験が得た超対称性粒子ヒッグス質量の棄却領域（薄い灰色の領域）。縦軸は超対称性理論に必要な2種類のヒッグス粒子の真空期待値 (v_1, v_2) の比 ($\tan\beta = v_2/v_1$)。濃い灰色の領域は理論的に棄却されている領域。スカラートップの混合によって理論的に棄却される領域が変わるが、この図は混合が最大の場合。混合がなければ $\tan\beta < 10$ の全領域が棄却される。点線はOPALが得たルミノシティーから予想される棄却領域。実際の棄却領域が予想よりも狭いのはヒッグス粒子のような事象が存在したためである。

される。超対称性大統一理論を仮定すると、LEP-IIの実験が、現在最も広い探索可能領域を持つ。超対称性粒子群が生成されている証拠は発見されていないが、宇宙質量の大きな部分を担っているとされる暗黒物質の候補である最も軽い超対称性粒子（ニュートラリーノ）に対して質量の下限値 36.3 GeV を得ている（図3参照）。暗黒物質の直接的な探索実験は、半導体の結晶などの検出器を用いて世界数箇所の研究機関で行なわれているが、OPAL実験は、直接的な探索実験においては探索不可能な非常に低い質量の領域をほぼ棄却した。

Wボソンの物理

Wボソンは、Zボソンと並んで「弱い力」を伝達するゲージ粒子である。Wボソンの対生成が可能な e^+e^- コライダーはLEP-IIだけである。LEP-IでのZボソンの質量などの高精度測定から、Wボソンの質量は「標準理論」を仮定すると 30 MeV の精度で間接的に決定することができる。LEP-IIにおいては $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ の過程で対生成されたWボソンの質量をこの 30 MeV に匹敵する精度で直接測定することによって、LEP-Iでの精密測定とは独立な統一ゲージ理論の高い精度での検証ができ、ヒッグス粒子の質量の予想が可能となる。Wボソンの質量とその性質の測定は、取得データ量とともに向上している。2000年度までのデータからOPAL単独では、Wボソンの質量は $80.468 \pm 0.053 \pm 0.039$ GeV（二

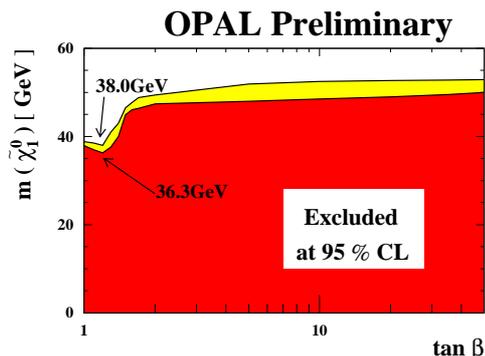


図3：OPAL実験の超対称性粒子群の探索の結果得た最も軽いニュートラリーノ ($\tilde{\chi}_1^0$) の質量の下限値。横軸は超対称性理論に必要な2種類のヒッグス粒子の真空期待値の比 ($\tan\beta = v_2/v_1$)。濃い灰色の領域はスカラーレプトンの質量に依らない棄却領域。スカラーレプトンの質量が重い場合は薄い灰色の領域も棄却される。暗黒物質の最有力候補の素粒子である $\tilde{\chi}_1^0$ の質量を、スカラーレプトンの質量に依らずに、36.3 GeV まで棄却することが出来た。

つの誤差はそれぞれ統計誤差と系統誤差)、と測定されている。LEP 4実験の結果を統合すると、Wボソンの質量と崩壊幅は $m_W = 80.427 \pm 0.046$ GeV および $\Gamma_W = 2.12 \pm 0.11$ GeV（統計誤差と系統誤差の合計）である。

2.2.2 電子・陽電子リニアコライダー JLC計画

LEPのような円形の e^+e^- コライダーではシンクロトロン放射によって電子や陽電子のエネルギーが急速に失われるため、より高い衝突エネルギーを得るためには、半径を非常に大きくする必要はあるが、LEPよりも大型の円形の e^+e^- コライダーは予算上建設不可能である。従って、電子・陽電子を向かい合わせて直線的に加速して正面衝突させるリニアコライダーのほうが経済的である。現在 e^+e^- リニアコライダーの開発研究が日本、ドイツ、米国などで盛んに行なわれている。日本はいち早く e^+e^- リニアコライダーを高エネルギー物理の次期基幹計画として取り上げた。既に主加速器の殆どどのコンポーネントの技術開発は衝突エネルギー 500 GeV のコライダーの仕様を満たすところまで進んだ。

一方、LEPのデータは電弱統一ゲージ理論の正しさを圧倒的な精度で検証したのみならず、更に、強い相互作用をも統一する大統一理論、及び超対称性の正しさを示唆している。もしこれが正しいとすれば、理論は 130 GeV 以下の質量を持った軽いヒッグス粒子の存在を予言しており、また超対称性粒子があまり高くないエネルギーに存在する可能性が高い。電子・陽電子衝突過程はその単純さ故に、新粒子の発見が容易なだけでなく、ひとつたび粒子が発見されればその性質の詳細を解明することができる。LEP-IIの先のエネルギーフロンティアを開く 250~500 GeV の e^+e^- リニアコライダーが、「軽いヒッグス粒子の検

出とその性質の精密測定」及び「超対称性粒子の探索」を通じて、21世紀の素粒子物理学の方向を決定する可能性が高い。2000年度もJLCに於ける物理及び測定器の検討を行ない、その実現に向けて全国の研究者と共に努力を重ねた。

2.2.3 気球搭載型超伝導スペクトロメータ BESS による宇宙粒子線の観測

BESS 実験は、「宇宙における素粒子現象」の探求を目的とする国際共同実験であり、高エネルギー加速器研究機構・神戸大学・宇宙科学研究所・米国航空宇宙局 (NASA) が参加している。加速器実験で培った最先端の技術を駆使して設計・製作された BESS 測定器は、超伝導ソレノイド・飛跡検出器・高性能粒子識別装置・並列処理型高速データ収集システムで構成され、大面積立体角を有し、0.2~100GeVの広いエネルギー領域を同時に高精度に測定できるといふ、これまでの飛翔体観測器にない特長を備えている。2000年までの計7回のフライトの結果、宇宙線の反粒子成分の探索などを通して、これまでの観測の感度を大きく上回る成果を挙げてきた。

(1) 宇宙線反陽子流束の精密測定

宇宙線反陽子は、Golden 等による初めての観測以来、大きな注目を集めてきた。その起源としては、一次宇宙線と星間物質との衝突で生成される二次起源成分が考えられている。これは運動学的要因により2 GeV 付近にピークを持ち、その両側で急激に減少するという特徴的な形を持つ。一方、原始ブラックホール (PBH) の蒸発や、銀河ハローを構成する超対称性粒子暗黒物質の対消滅によって生成される一次起源成分が存在する可能性も指摘されており、こちらは二次起源成分とは対照的に低エネルギーまで平坦に延びるスペクトラムが予測されている。このようなスペクトラムシェイプの違いを利用して、素粒子・宇宙物理学に非常に興味深い、一次起源成分を抽出できる可能性がある。

宇宙線反陽子の起源の探求を主な目的として行われてきた BESS 実験は、太陽活動極小期における測定によって、二次起源成分のピーク (2 GeV) を捉え、宇宙線反陽子の大部分が二次起源成分であることを示した (図4)。その一方で、低エネルギー領域においては二次成分の理論計算に比べ若干の過剰が観測されており、流束の経年変化などを通して、さらに精密な探求を行っている (図4)。

一般に太陽系に入射した宇宙線は、太陽風などの影響を受けるが (solar modulation), その影響は低エネルギーの宇宙線ほど大きい。従って、低エネルギー宇宙線を通して「宇宙における素粒子現象」を探求するためには、solar modulation の詳細な理解が不可欠である。Solar modulation は粒子の電荷に依存すると考えられているが、反陽子/陽子比の経年変化を追う事によって、この効果を顕著に検証することができる。特に、太陽の磁極が正から負へ反転する太陽活動極大期においては、図5の様に反陽子/陽子比が急激に増大することが予想されており、太陽活動が

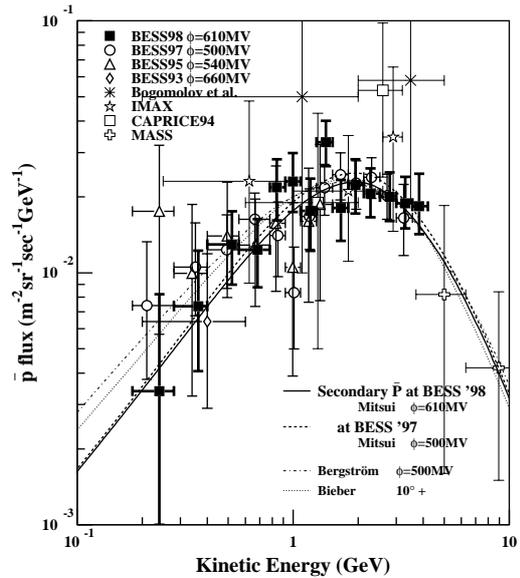


図4：宇宙線反陽子のエネルギー・スペクトラム

極大期を迎えた2000年のデータは、非常に重要な意味を持つ。

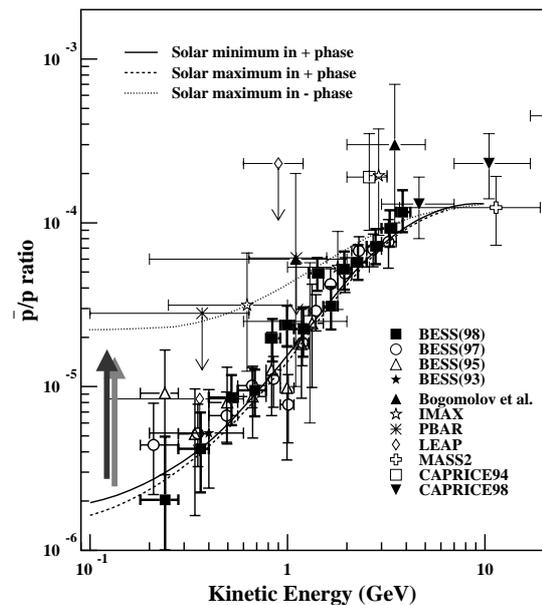


図5：反陽子/陽子比と予想される変化 (太矢印)

今年度の飛翔実験は8月カナダ・リンレークにおいて実施され、NASAの大型気球により高度約36kmの高空に上げられた BESS 測定器は、約35時間の飛行中完全に動作した。このデータにより約400例の反陽子を明瞭に検出し、現在、太陽活動に伴うスペクトラムの変化を見出すべく解析を進めている。

(2) 反陽子ビームによる反陽子検出効率の絶対較正

累積約 2000 例へと飛躍的に増加した反陽子事象に基づく反陽子エネルギースペクトラムの測定は今や精密測定となっており、系統誤差の主要因となっている反陽子検出効率推定に対する不定性を改善することが、急務であった。この状況を踏まえて昨年度に実施された、KEK-PS 東カウンターホール K2 ビームラインにおける BESS 測定器のビーム実験の解析を完了し、反陽子の検出効率に伴う系統誤差を、目標であった 5% まで下げること成功した。

(3) 宇宙起源反ヘリウムの探索

現在我々の知る宇宙が物質優勢であるのは、ビッグバン直後に起きた物質・反物質の対称性の破れの結果として解釈されている。しかし、もしこの破れが局所的に起こったと考えれば、宇宙が物質と反物質の領域に分かれたドメイン構造をしている可能性もあり得る。反ヘリウムは通常の宇宙線と星間ガス等との衝突反応で作られる確率は極めて低く、もし一例でも観測されれば、初期宇宙にその起源を求めざるを得ない。また反ヘリウムは負の電荷をもっているため、実験的に極めて明確に識別可能である。

今年度も飛翔実験のデータを解析し、その中に反ヘリウムイベントを探したが、一例も見つけることは出来なかった。これにより、2000 年までのデータも含めて $\overline{\text{He}}/\text{He}$ 比の上限 7×10^{-7} を得た。これは現在世界で最も感度の高い上限であり、我々の銀河およびその周辺の宇宙が物質のみからできていることの最も直接的な証拠となる。

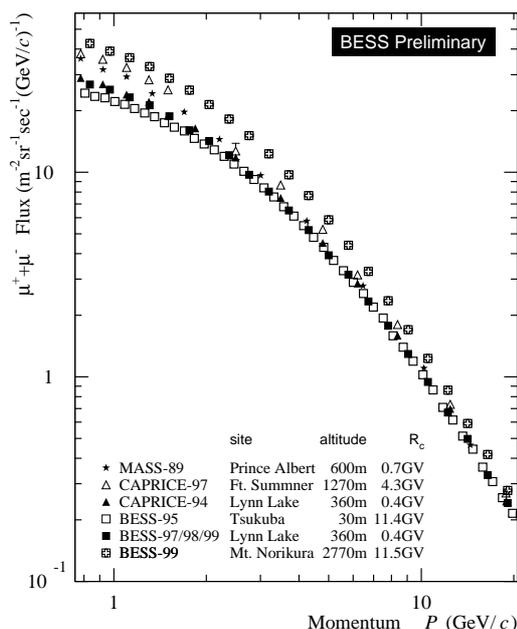
(4) 様々な高度における宇宙線の測定

大気シャワーを理解することは、大気頂上での流束を測定する際にバックグラウンドとなる大気によって生成された二次粒子流束の推定や、大気ニュートリノ流束の計算を行う上で非常に重要であるが、大気分布やハドロン相互作用における不定性が大きく、よく理解されているとは言えない状況にある。

この問題に新たな知見を加えるべく、我々は BESS 測定器を用いて、地表、気球実験時の上昇中、および山頂高度でのデータを収集し、各高度での宇宙線の流束を測定した。山頂高度における反陽子のエネルギースペクトラム、低エネルギー陽子流束の大気発展、各高度でのミュオン粒子のスペクトラム（プレリミナリーな結果を図 6 に示す）など、大気シャワー発展の理解に大きな貢献をなす数々の解析が、現在進行中である。

(5) BESS-TeV 実験

1998 年 6 月、スーパーカミオカンデ実験はニュートリノ振動の確実な証拠を世界で初めて発表した。この解析における大気ニュートリノの絶対強度の理論計算には宇宙線の様々なデータが用いられている。中でも、大気ニュートリノの親となる陽子・ヘリウムなどの一次宇宙線のエネルギースペクトラムは BESS 実験などによって、100 GeV 付近まで精密に測定さ

図 6 : 各高度における μ 粒子スペクトラム

れ、理論計算に役立てられている。一方、大気ニュートリノの理論計算における不定性を更に改善するには、一次宇宙線の絶対流束を 500 GeV 付近まで精密に測定する必要がある。現在、100 GeV 以上の宇宙線の絶対流束の測定結果には大きな不定性がある。

そこで測定可能領域を 1TeV 付近まで拡大した測定器を新たに開発し、2001 年度に実験を行なうことを予定している (BESS-TeV 実験)。現在、BESS-TeV 実験で新しく搭載する飛跡検出器の開発・製作、及びデータ収集系エレクトロニクスの改良などがほぼ完了し、測定器全体のインテグレーションを行っている。図 7 に、この実験の結果から期待される陽子スペクトラムを示す。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Y. Shikaze, S. Orito, T. Mitsui, K. Yoshimura, H. Matsumoto, H. Matsunaga, M. Nozaki, T. Sonoda, I. Ueda and T. Yoshida : Large-area Scintillator Hodoscope with 50 ps timing resolution onboard BESS, Nucl. Instr. and Methods **A455** (2000) 596-606
- [2] T. Sanuki, M. Motoki, H. Matsumoto, E. S. Seo, J. Z. Wang, K. Abe, K. Anraku, Y. Asaoka, M. Fujikawa, M. Imori, T. Maeno, Y. Makida, N. Matsui, H. Matsunaga, J. Mitchell, T. Mitsui, A. Moiseev, J. Nishimura, M. Nozaki, S. Orito, J. Ormes, T. Saeki, M. Sasaki, Y. Shikaze, T. Sonoda, R. Streitmatter, J. Suzuki, K. Tanaka, I. Ueda, N. Yajima, T. Yamagami, A. Yamamoto, T. Yoshida and K. Yoshimura : Precise Measurement of Cosmic-Ray Proton and Helium Spectra with the BESS, The AstroPhys. J. **545** (2000) 1135-1142

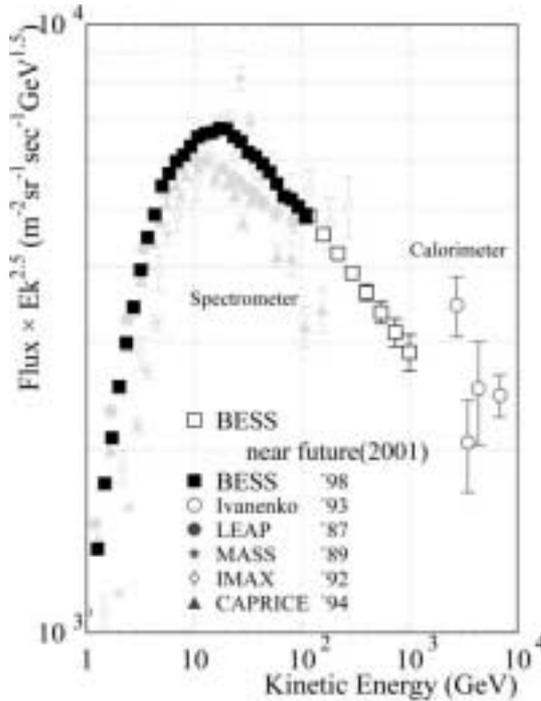


図7 : BESS-TeV 実験の結果から期待される陽子スペクトラム

- [3] T. Maeno, S. Orito, H. Matsunaga, K. Abe, K. Anraku, Y. Asaoka, M. Fujikawa, M. Imori, Y. Makida, N. Matsui, H. Matsumoto, J. Mitchell, T. Mitsui, A. Moiseev, M. Motoki, J. Nishimura, M. Nozaki, J. Ormes, T. Saeki, T. Sanuki, M. Sasaki, E. S. Seo, Y. Shikaze, T. Sonoda, R. Streitmatter, J. Suzuki, K. Tanaka, I. Ueda, J. Z. Wang, N. Yajima, T. Yamagami, A. Yamamoto, T. Yoshida and K. Yoshimura : Successive Measurements of Cosmic-Ray Antiproton Spectrum in a Positive Phase of the Solar Cycle, Accepted by Astropart. Phys.
- [4] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of the Branching Ratio for $D_S \rightarrow \tau \nu_\tau$ Decays, CERN-EP2001-019
- [5] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Precision Neutral Current Asymmetry Parameter Measurements from the Tau Polarization at LEP, CERN-EP2001-023
- [6] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : A Search for a Radial Excitation of the D^{*+-} Meson, CERN-EP2001-003
- [7] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : A Simultaneous Measurement of the QCD Colour Factors and the Strong Coupling, CERN-EP2001-001
- [8] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for the Standard Model Higgs Boson in e^+e^- Collisions at $\sqrt{s}=192-209$ GeV, Phys. Lett. **B499** (2001) 38-52
- [9] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Precise Determination of the Z Resonance Parameters at LEP : Zedometry, Eur. Phys. J. **C19** (2001) 587
- [10] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : A Study of B_s meson oscillation using D_s -lepton Correlations, CERN-EP2000-136
- [11] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Charged Multiplicities in Z Decays into u, d, and s Quarks, CERN-EP2000-128
- [12] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Investigation of the Decay of Orbitally-Excited B mesons and First Measurement of the Branching Ratio $BR(B_{J^*} \rightarrow B^* \pi(X))$, CERN-EP2000-125
- [13] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of triple gauge boson couplings from W^+W^- production at LEP energies up to 189 GeV, Eur. Phys. J. **C19** (2001) 1-14
- [14] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of W Boson Polarizations and CP-violating Triple Gauge Couplings from W^+W^- Production at LEP, CERN-EP2000-113
- [15] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : A Measurement of the Rate of Charm Production in W Decays, Phys. Lett. **B490** (2000) 71-86
- [16] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : W^+W^- Production Cross Section and W Branching Fractions in e^+e^- Collisions at 189 GeV, Phys. Lett. **B493** (2000) 249-265
- [17] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of the Mass and Width of the W Boson in e^+e^- Collisions at 189 GeV, CERN-EP2000-099
- [18] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Two Higgs Doublet Model and Model Independent Interpretation of Neutral Higgs Boson Searches, Eur. Phys. J. **C18** (2001) 425-445
- [19] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of the B^0 Lifetime and Oscillation Frequency using $B^0 \rightarrow D^* + l + \nu$ decays, Phys. Lett. **B493** (2000) 266-280
- [20] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : A Study of One Prong Tau Decays with a Charged Kaon, CERN-EP2000-091
- [21] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of the low-x behaviour of the photon structure function $F_{2\gamma}$, Eur. Phys. J. **C18** (2000) 15-39
- [22] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Production rates of $b\bar{b}$ quark pairs from gluons and $b\bar{b}b\bar{b}$ events in hadronic Z Decays, Eur. Phys. J. **C18** (2001) 447-460
- [23] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Multiplicities of π^0 , η , K^0 and of Charged Particles in Quark and Gluon jets, Eur. Phys. J. **C17** (2000) 373-387

- [24] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Trilinear Neutral gauge Boson Couplings in Z gamma production at $\sqrt{s} = 189$ GeV at LEP, *Eur. Phys. J.* **C17** (2000) 553-566
- [25] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : First Measurement of the Inclusive Branching Ratio of b Hadrons to ϕ Mesons in Z Decays, *Phys. Lett.* **B492** (2000) 13-22
- [26] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Searches for Prompt Light Gravitino Signatures in e^+e^- Collisions at $\sqrt{s} = 189$ GeV, *Phys. Lett.* **B501** (2001) 12-27
- [27] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : A Measurement of the τ Mass and the First CPT Test with τ Leptons, *Phys. Lett.* **B492** (2000) 23-31
- [28] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of V_{cb} using $B^0 \rightarrow D^* + l + \nu$ decays, *Phys. Lett.* **B482** (2000) 15-30
- [29] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : QCD Studies with e^+e^- Annihilation Data at 172-189 GeV, *Eur. Phys. J.* **C16** (2000) 185-210
- [30] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Transverse and Longitudinal Bose-Einstein Correlations in Hadronic Z^0 Decays, *Eur. Phys. J.* **C16** (2000) 423-433
- (会議抄録)
- [31] H. Matsumoto, K. Abe, K. Anraku, Y. Asaoka, M. Fujikawa, H. Fuke, M. Imori, K. Izumi, T. Maeno, N. Matsui, H. Matsunaga, M. Motoki, J. Nishimura, S. Orito, T. Saeki, T. Sanuki, Y. Shikaze, T. Sonoda, I. Ueda, Y. Yamamoto, K. Yoshimura, Y. Makida, M. Sasaki, J. Suzuki, K. Tanaka, A. Yamamoto, T. Yoshida, T. Mitsui, M. Nozaki, K. Toki, K. Yamato, E. S. Seo, J. Z. Wang, J. Mitchell, A. Moiseev, J. Ormes, R. Streitmatter, N. Yajima and T. Yamagami : Technical Progress of the BESS Spectrometer, *Proc. 22nd Intl. Symposium Space Technology and Science (Morioka)* (2000) 1659-1663
- [32] H. Matsunaga, K. Abe, K. Anraku, Y. Asaoka, M. Fujikawa, H. Fuke, S. Haino, M. Imori, M. Ishino, K. Izumi, T. Maeno, Y. Makida, N. Matsui, H. Matsumoto, J. Mitchell, T. Mitsui, A. Moiseev, M. Motoki, J. Nishimura, M. Nozaki, S. Orito, J. Ormes, T. Saeki, T. Sanuki, M. Sasaki, E. S. Seo, Y. Shikaze, T. Sonoda, R. Streitmatter, J. Suzuki, K. Tanaka, Y. Toki, I. Ueda, J. Z. Wang, N. Yajima, T. Yamagami, K. Yamato, A. Yamamoto, Y. Yamamoto, T. Yoshida and K. Yoshimura : Recent Results from the BESS Experiment, *Proc. 22nd Intl. Symposium Space Technology and Science (Morioka)* (2000) 1720-1725
- [33] J. F. Ormes, BESS Collaboration : "BESS Results: Data on Cosmic Ray Anti-Proton, Proton and Helium Spectra and New Upper Limits in the Search for Anti-helium", *American Astronomical Society HEAD meeting* **32** (2000) 1102
- [34] Y. Shikaze, M. Imori, H. Fuke, H. Matsumoto and T. Taniguchi : Performance of a High Voltage Power Supply Incorporating a Ceramic Transformer, *Proc. 6th Workshop on Electronics for LHC Experiments* (2000) 371-375
- [35] 大和一洋 他 : 「BESS2000 実験経過報告」, 宇宙科学研究所大気球シンポジウム (2001) 87-90
- [36] 前野忠嗣 他 : 「BESS 実験の成果」, 宇宙科学研究所大気球シンポジウム (2001) 91-94
- [37] 安部航 他 : 「TeV 領域宇宙線観測のための BESS 測定器改良」, 宇宙科学研究所大気球シンポジウム (2001) 95-98
- [38] 山本明 他 : 「BESS-Polar : 南極周回気球実験による宇宙線反粒子の精密探査」, 宇宙科学研究所大気球シンポジウム (2001) 99-102
- [39] 福家英之 他 : 「気球実験用太陽電池パネルの開発」, 宇宙科学研究所大気球シンポジウム (2001) 103-106
- (国内雑誌)
- [40] 吉田哲也 : 「BESS 宇宙粒子線観測」, *パリティ* **15(12)** (2000) 91-92
- [41] 山本明, 野崎光昭 : 「BESS-Polar : 南極周回気球実験による宇宙線反粒子の精密観測」, *ICRR ニュース* **43** (2001) 6-9
- (学位論文)
- [42] 灰野禎一 : 「気球搭載実験用高精度ドリフトチェンバーの開発」, 2001 年 3 月, (修士論文)
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [43] S. Komamiya : "Charge to Participants", *Linear Collider Workshop 2000 (Oct. 2000) Fermi National Accelerator Laboratory*
- [44] S. Komamiya : "LEP-II Physics", *The 3rd ACFA Workshop on Physics/Detector at the Linear Collider (Aug. 2000) Taipei*
- [45] H. Matsumoto : "Technical Progress of the BESS Spectrometer", *22nd Intl. Symposium Space Tech. and Sci. (May 2000) Morioka*
- [46] H. Matsunaga : "Recent Results from the BESS Experiment", *22nd Intl. Symposium Space Tech. and Sci. (Jun. 2000) Morioka*
- [47] A. Yamamoto, BESS Collaboration : "BESS and Its Future Prospect for Polar Long Duration Flights", *33rd COSPAR Scientific Assembly (Jul. 2000) Warsaw*
- [48] T. Sanuki, BESS Collaboration : "Precise Measurement of Cosmic-ray Proton and Helium Spectra with BESS", *33rd COSPAR Scientific Assembly (Jul. 2000) Warsaw*

- [49] T. Maeno, BESS Collaboration : “Precise Measurements of Cosmic-ray Antiproton Spectrum in a Positive Phase of the Solar Cycle”, 33rd COSPAR Scientific Assembly (Jul. 2000) Warsaw
- [50] T. Sanuki : “BESS Results on Primary Cosmic Ray and Atmospheric Muon Fluxes”, 2nd Workshop on “Neutrino Oscillations and Their Origin” (Dec. 2000) Tokyo
- [51] T. Yoshida : “BESS-TeV Project”, 2nd Workshop on “Neutrino Oscillations and Their Origin” (Dec. 2000) Tokyo

招待講演

- [52] K. Yoshimura, BESS Collaboration : “Cosmic-ray Antiproton and Antinuclei”, 33rd COSPAR Scientific Assembly (Jul. 2000) Warsaw

(国内会議)

一般講演

- [53] 山本明 : 「飛翔体による宇宙観測用超電導マグネットの開発 (1)-基本設計」, 低温工学・超電導学会 (2000年 5月) 工業技術院筑波研究センター
- [54] 浅岡陽一 : 「BESS 測定器反陽子検出効率の精密測定」, 日本物理学会 (2000年 9月) 新潟大学
- [55] 谷崎圭祐 : 「BESS2000 実験経過報告」, 日本物理学会 (2000年 9月) 新潟大学
- [56] 佐貫智行 : 「BESS による宇宙粒子線の精密測定と大気ニュートリノ流束の絶対較正」, 日本物理学会 (2000年 9月) 新潟大学
- [57] 泉康介 : 「BESS 測定器による低エネルギー領域における宇宙線陽子流束の測定」, 日本物理学会 (2000年 9月) 新潟大学
- [58] 浅岡陽一 : 「BESS 測定器反陽子検出効率の精密測定」, KEK PS Program Advisory Committee Meeting (2000年 12月) 高エネルギー加速器研究機構
- [59] 大和一洋 : 「BESS-2000 実験経過報告」, 大気球シンポジウム (2000年 12月) 宇宙科学研究所
- [60] 前野忠嗣 : 「BESS 実験の成果」, 大気球シンポジウム (2000年 12月) 宇宙科学研究所
- [61] 安部航 : 「TeV 領域宇宙線観測のための BESS 測定器改良」, 大気球シンポジウム (2000年 12月) 宇宙科学研究所
- [62] 山本明 : 「BESS-Polar 計画」, 大気球シンポジウム (2000年 12月) 宇宙科学研究所
- [63] 福家英之 : 「気球実験用太陽電池パネルの開発」, 大気球シンポジウム (2000年 12月) 宇宙科学研究所
- [64] 浅岡陽一 : 「BESS 実験の最近の結果及び将来計画」, 素粒子センターシンポジウム (2001年 2月) 白馬
- [65] 佐貫智行 : 「BESS 実験の成果と将来計画」, ビッグバンセンター研究会 (2001年 2月) 伊豆
- [66] 大和一洋 : 「BESS 気球実験のための, 高速粒子識別可能データ収集システムの開発」, 日本物理学会 (2001年 3月) 中央大学

- [67] 松川武夫 : 「BESS 測定器における分散制御型データ収集システムの開発」, 日本物理学会 (2001年 3月) 中央大学
- [68] 志風義明 : 「BESS 測定器を用いた低エネルギー宇宙線陽子流束の精密測定」, 日本物理学会 (2001年 3月) 中央大学
- [69] 藤川元治 : 「BESS 測定器を用いた山頂高度における宇宙線陽子・反陽子流束の決定」, 日本物理学会 (2001年 3月) 中央大学
- [70] 浅岡陽一 : 「超伝導スペクトロメータ BESS による宇宙線反陽子流束の精密測定」, 日本物理学会 (2001年 3月) 中央大学
- [71] 灰野禎一 : 「BESS による TeV 領域宇宙線精密測定のためのドリフトチェンバーの開発とその性能評価」, 日本物理学会 (2001年 3月) 中央大学

招待講演

- [72] 山本明 : 「BESS-Polar 実験 : 南極周回飛翔による宇宙起源反粒子の精密探査」, 日本物理学会 (2001年 3月) 中央大学
- [73] 駒宮 幸男 : 「LEP の意義と将来計画」, 日本物理学会, シンポジウム「LEP の成果と今後のエネルギーフロンティア」, 中央大学, 2001年 3月

(セミナー)

- [74] 野崎光昭 : 「BESS による宇宙線反陽子の観測」, 地球惑星科学関連学会 (2000年 6月) 国立オリンピック記念青少年総合センター

2.3 衰輪 研究室

衰輪 研究室では、大型加速器を使わずに新しい工夫により素粒子の実験的研究を行なっている。

2.3.1 ボロメーターを用いた暗黒物質の直接検出実験

我々の宇宙には通常物質の10倍以上の光らない物質があることを示唆する観測的および理論的根拠が数多くある。この物質は暗黒物質(ダークマター)と呼ばれており、その正体は素粒子の超対称性理論の予言する粒子ニュートラリーノである可能性が高い。

暗黒物質ニュートラリーノが通常の原子核と弾性散乱を行なうと原子核は10 keV程度の反跳エネルギーを受ける。我々はこの反応を利用し暗黒物質ニュートラリーノを直接検出するために、ボロメーターを開発し、実験を行なっている。本研究は筑波大学大塚洋一教授と共同で行なっている。

ボロメーターは10 mK程度に冷却した吸収体とそれに取り付けられた高感度抵抗温度計(サーミスター)からなる極低温熱量計型検出器である。10 keV程度のエネルギーによる吸収体の温度上昇をサーミスターにより電気信号に変換するというのがボロメーターを用いたニュートラリーノ検出の原理である。

原子核 ^{19}F はそのスピン構造から、スピンの依存した相互作用を行なうニュートラリーノに対し非常に大きな弾性散乱断面積を持つと考えられており、 ^{19}F (自然存在比100%)を含んだ検出器は暗黒物質ニュートラリーノの探索には非常に有利である。我々はこの観点から20 gのフッ化リチウム LiF の単結晶を吸収体としたボロメーターを完成させ、検出器の大質量化のために、8個並べて用いている。

2000年のはじめより、宇宙線の影響を避けて宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設の地下実験室で観測が開始された。これまでは宇宙線の影響などで見ることができなかった検出器近傍の物質中のウラン・トリウム系列やカリウムの自然放射能が見えるようになってきている。暗黒物質の観測限界を向上させるため、この自然放射能について起源を特定してできる限り完全に除去する作業を行なっている。

神岡鉱山内は空気中の放射性ラドンガス濃度が高いことが知られているので、希釈冷凍機近傍にラドンが入り込まないようにするためのガスバッグを設置し、その中にはラドン濃度の低い液体窒素製造機からの蒸発ガスを流している。2000年度には、さらにきれいな環境を用意するために、坑外からラドンガス濃度の低い新鮮な外気をダクトにより実験室に導入するようにした。さらに残留するラドンガスの除去のために活性炭による除去装置を製作して設置した。

また、検出器の中核部であるフッ化リチウム結晶の表面に放射能があることが明らかになった。これは結晶製作時の研磨工程で研磨剤に含まれる放射性物質が埋め込まれた可能性があると考えている。現在は放射能の低い新しい結晶に取り替えて観測中

ある。

また、冷凍機の振動雑音耐性の改善を行なった。

2.3.2 アクシオンヘリオスコープ実験

QCDにおける強いCP問題はアクシオンモデルを導入する事によって解決されるが、それに伴って擬南部Goldstone粒子であるアクシオンが生じる。仮にこのアクシオンが存在した場合、太陽からも放出されていると考えられる。われわれはアクシオンヘリオスコープを開発し、太陽から放出されている太陽アクシオンを地上で光子(X線)に変換し検出する実験を行なっている。本研究は高エネルギー加速器研究機構の山本明教授と共同で行なっている。

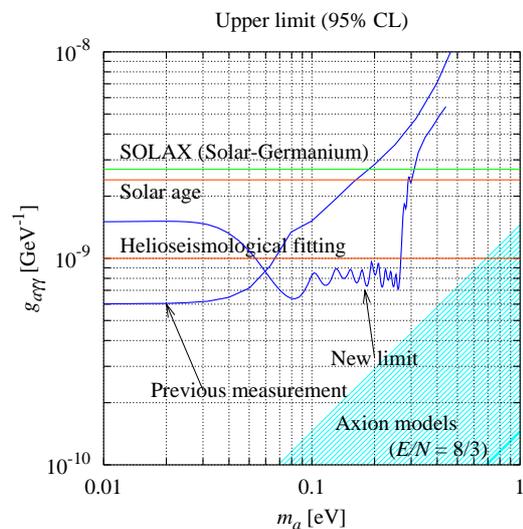


図 2.3 a: axion と光子の結合定数に対してつけられた制限

アクシオンを光子に変換するためにはアクシオンの進行方向に対して垂直な向きに磁場をかければ良い。このためわれわれのヘリオスコープでは4 T、2.3 mのレーストラック形超伝導磁石を太陽の方向に向けて追尾するという手法をとっている。そして、磁石の開口部の後方に置かれたX線検出器(PINフォトダイオード)によってアクシオン起源のX線を観測する。

これまでの観測において、 $m_a < 0.03 \text{ eV}$ の領域での他グループによる実験に比べて4.5倍強い制限を与えることができたが、第二回目の観測として磁場を印加した領域を極低温高密度のHeガスで満たして光子に見かけ上の質量を持たせ、axion質量0.26 eV以下の領域に感度を持つ観測をおこなった。その結果、アクシオンの有意な信号は見つからなかったがアクシオンと光子の結合定数にあらたな制限がつけられた(図2.3 a参照)。

2.3.3 太陽以外の天体を観測する

また、アクシオンヘリオスコープを「アクシオン望遠鏡」として使用し、太陽以外の天体を観測した。今まで天体からのアクシオン放射に対する実験的制限は、中性子星の表面温度からアクシオン放出による冷却を見積もったり、星間磁場によって変換された X/γ 線の検出によるもののみであった。これらの制限のうち、前者は中性子星の個性や中性子星の内部モデルに非常に依存し、また、観測例も少ない。一方、後者は変換に長い距離を必要とするため、質量が 10^{-9} eV 以下の非常に軽いアクシオンに対してしか制限を与えることができない。以上のような理由で、われわれの実験は各天体からのアクシオン放射に対して直接的制限を与えた最初の実験ということになる。

天球面のスキャン

望遠鏡を真南に固定し、天球の動きにまかせてスキャンを行った。この測定では、天球上の各点での測定の積分時間は約 60 秒となる。そして、10 日間にわたり 1 日に一度望遠鏡の仰角を変化させることにより、天球上の約 10% の領域を観測した。

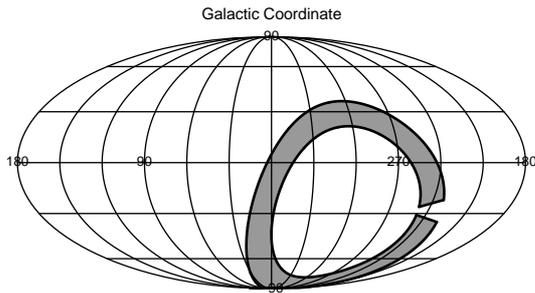


図 2.3 b: 天球面のスキャンされた領域 (灰色の部分)。銀河座標で示す。

天体追尾測定

銀河中心、さそり座 X-1、帆座 X-1 およびかに星雲に対して各 2 日間の追尾測定を行った。測定に際しては、約 6 時間または 12 時間ごとに追尾測定とバックグラウンド測定を交互に行い、それぞれの差をとった。測定対象を追尾したため、この測定の積分時間は非常に長く、58000 秒から 80000 秒程度である。

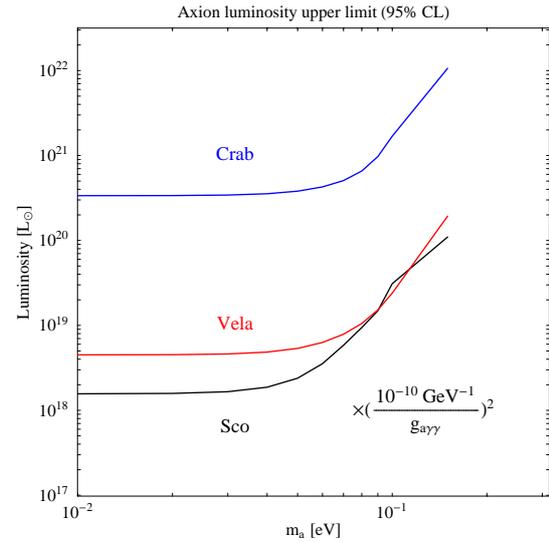


図 2.3 c: さそり座 X-1 (Sco)、帆座 X-1 (Vela) 及びかに星雲 (Crab) のアクシオン光度に対する制限。(横軸はアクシオンの質量。各天体に対して線の上側を制限)

測定結果

これらの測定の結果、アクシオンの飛来を確認できる信号は見つからなかった。しかしながら、この測定によって天体から飛来するアクシオンの地上での流束に対して制限をつけることができる。

まず、天球面のスキャンに対しては、観測されたイベントがすべてアクシオンによるものであると仮定し、解析を行った。その結果、質量が 0.03 eV よりも軽いアクシオンに対してその地上での流束は 4–20 keV の範囲で

$$\frac{d\Phi_a}{dE_a} < 3.3 \times \left(\frac{10^{-10} \text{ GeV}^{-1}}{g_{a\gamma\gamma}} \right)^2 \text{ keV}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \quad (3.3.1)$$

以下であるという制限が得られた (95% C.L.)。なお、この制限が得られた銀河座標での領域を図 2.3 b に示しておく。全天の 10% もの領域に対して制限を与えているため、今後何らかの天体モデルが提案される際に重要な拘束条件となりうる。

一方、天体追尾測定によって、スキャンよりも 2 桁ほど良い制限を対象天体からのアクシオン流束に対してつける事ができた。また、追尾対象のうち、帆座 X-1 とかに星雲に対しては中性子星の核からの制動放射を、さそり座 X-1 に対しては降着円盤からの黒体放射を仮定する事により、それらの天体のアクシオン光度に対して制限をつける事ができた。制限されたアクシオン光度領域を図 2.3 c に示す。ここで、 L_\odot は太陽光度であり、 $L_\odot = 3.85 \times 10^{33}$ erg/s である。

残念ながら、この制限は大変緩いもので、既存の

理論モデルの検証には至っていない。しかしながら、この測定は各天体からのアクシオン放射に対する初めての直接的な観測結果である。

2.3.4 検出器開発

一般にシンチレーション検出器など電離損失を測定する型の検出器では、重イオンが入射した場合、エネルギー損失あたりの発光量は電子の場合と比べ少なくなることが知られている。その減光の程度を quenching factor と呼んでいる。暗黒物質を、検出器中の原子核の反跳により捕らえようとする場合も同様なことが起こると考えられ、あらかじめ quenching factor を測定しておくことが必要になる。

一般にはエネルギーのわかった中性子による弾性散乱の反跳原子核を使って測定することができるが、我々は加速器を使わないで中性子線源を用いて比較的簡単に quenching factor を測定する試みを考案し、その実現可能性の検証のためにいくつかの予備的な実験と計算機による simulation を行っている。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Y. Inoue, T. Namba, S. Moriyama, M. Minowa, Y. Takasu, T. Horiuchi, and A. Yamamoto: Recent results from the Tokyo axion helioscope experiment
Preprint, astro-ph/0012338.

(国内雑誌)

- [2] 竹田 敦: ボロメータの高感度化に用いる静電捕集型ラドン検出器の開発、東京大学アイソトープ総合センターニュース Vol.31 No.2 2000.9.25
[3] 身内賢太郎: 神岡地下実験室に於ける暗黒物質探索実験、ICRR ニュース No.42 2000.12.1

(学位論文)

- [4] 難波俊雄: Experimental search for celestial axions utilizing a dipole magnet and X-ray detectors, 2001年3月(博士論文).
[5] 関谷洋之: 神岡地下実験室における暗黒物質探索のためのボロメータの改良、2001年2月(修士論文).
[6] 谷口哲朗: 重イオンに対するシンチレータの Quenching Factor を測定するための実験室的手法、2001年2月(修士論文).

< 学術講演 >

(国際会議)

- [7] M. Minowa, K. Miuchi, A. Takeda, H. Sekiya, Y. Shimizu, Y. Inoue, W. Ootani, Y. Ito, T. Watanabe, S. Moriyama, Y. Ootuka: The LiF dark matter experiment at Kamioka mine, Third international conference on dark matter in astro and particle physics (DARK2000), Heidelberg, Germany, 12 July 2000.

- [8] Y. Inoue, T. Namba, S. Moriyama, M. Minowa, Y. Takasu, T. Horiuchi, and A. Yamamoto: Recent results from the Tokyo axion helioscope experiment, the 3rd International Workshop on the Identification of Dark Matter (IDM2000), York, England, 20 September 2000.

- [9] K. Miuchi, M. Minowa, A. Takeda, H. Sekiya, Y. Shimizu, Y. Inoue, W. Ootani, Y. Ito, T. Watanabe, S. Moriyama, Y. Ootuka: Dark Matter Search with LiF Bolometer at Kamioka, 3rd International Workshop on the Identification of Dark Matter (IDM2000), York, England, 21 September 2000.

(国内会議)

一般講演

- [10] 身内賢太郎: 神岡地下実験室に於ける暗黒物質探索実験 II、日本物理学会第 55 回年次大会、新潟大学 2000 年 9 月 25 日.
[11] 井上慶純: 太陽アクシオン検出実験、ビッグバンセンター研究会「初期宇宙の探求」、南伊豆、2001 年 2 月 19 日.
[12] 難波俊雄: 天体からのアクシオン検出実験、第 7 回素粒子物理国際センターシンポジウム、長野県白馬村 2001 年 2 月 20 日.
[13] 竹田 敦: 神岡地下実験室における暗黒物質探索実験、第 7 回素粒子物理国際研究センターシンポジウム、長野県白馬村 2001 年 2 月 20 日.
[14] 関谷洋之: 神岡地下実験室に於ける暗黒物質探索実験、日本物理学会第 56 回年次大会、中央大学多摩キャンパス 2001 年 3 月 27 日.

(セミナー)

- [15] 蓑輪 眞: 加速器を使わない素粒子実験、集中講義、新潟大学大学院理学研究科、2000 年 10 月 5-6 日.
[16] 蓑輪 眞: 暗黒物質探索実験、新潟大学大学院理学研究科、2000 年 10 月 6 日.

2.4 相原研究室

当研究室は、過去4年間、高エネルギー加速器研究機構のBファクトリー加速器を用いて、B中間子崩壊における粒子・反粒子非対称(CP非対称)を世界に先駆けて検出するために、半導体荷電粒子検出器を製作し準備を進めてきた。本年度は、このBファクトリーでの実験(Belle)から最初の結果を出すことに成功した。

素粒子の弱い相互作用においては、荷電共役(粒子の持つ電荷の反転 $\leftrightarrow -$ 、のことで、Cと表す)、空間反転(Parity, P)、そしてCとPを組み合わせたCPのいずれの対称性も保存されない。このうちCとPの破れについては、その起源が解明されているが、粒子・反粒子の非対称性であるCP非対称性については、未だ結論が出ていない。CP対称性の破れの起源が、6種の異なるクォークの混じり合いにあるとする小林・益川理論で説明できるのか、それとも、他の理論の導入を必要とするのかは、現代素粒子物理の大きな課題の一つである。

2.4.1 B中間子崩壊におけるCP非対称の測定

Belle実験グループは、1999年6月より実験を開始し、2000年末までに約1千万のB中間子・反B中間子対を検出し、この中から、中性B中間子あるいは、反中性B中間子がCP変換の固有状態に崩壊する反応事象を選び出した。図2.4 aは、中性B中間子が、CPの固有状態 $J/\psi K_S$, $\psi(2S)K_S$, $\chi_{c1}K_S$, $\eta_c K_S$ および $J\psi\pi^0$ に崩壊したときのシグナル(不変質量)の分布で、斜線部分がバックグラウンド(ノイズ)である。また、図2.4 bは、中性B中間子が J/ψ 粒子と K_L 粒子に崩壊した事象のシグナル分布である。(ただし、この場合は、不変質量分布でなく、重心系におけるB中間子の運動量をプロットしたものである。)図2.4 cは、これらの事象を使って、Bと反Bの崩壊の時間分布の差をプロットしたもので、CP対称性の破れ($\sin 2\phi_1$ というパラメータで表される)は、図の正弦波の振幅の大きさとして表れる。このデータから、我々は $\sin 2\phi_1 = 0.58 \pm 0.34$ という結果を得た[1, 6, 10, 22, 23]。これはCP非対称を強く示唆するが、まだ精度が十分でなく、CP対称である可能性も5%程度残っている。現在の測定値は、標準理論を使ってB中間子以外のデータから抽出した予想値 ~ 0.75 とconsistentである。Bファクトリーの性能は、日々向上しており、2001年末までにはこの測定の統計誤差を半分程度にすることができると期待され、CP非保存の起源が解明される日は急速に近づいている。

2.4.2 B中間子の寿命の精密測定

B中間子寿命の精密な測定は、B中間子など重いクォークを含む系のQCD(量子色力学)のテスト

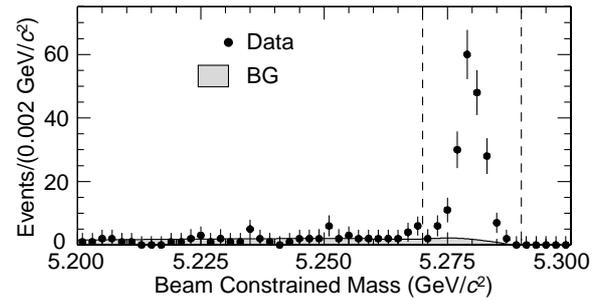


図 2.4 a: Belle 検出器で得られた中性B中間子と反中性B中間子の不変質量分布。CP固有状態へ崩壊した終状態を選んで再構築したもの。2本の破線の間が信号領域で、斜線はバックグラウンド(ノイズ)を示している。信号は、全部で194事象ある。

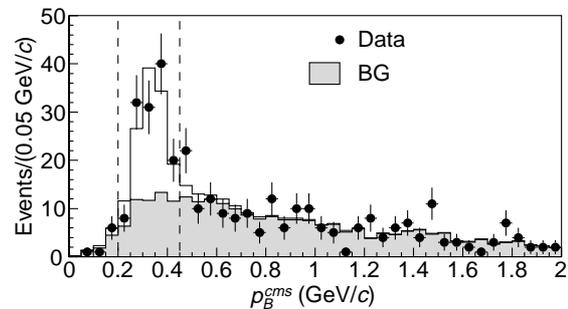


図 2.4 b: 中性B中間子あるいは反中性B中間子がCP固有状態である(CP固有値+1) $J/\psi K_L$ へ崩壊した事象を選んで、重心系におけるB中間子の運動量を再構築したもの。信号は、0.34 GeV/c付近にピークをつくる。

となる。我々は、 B_d^0 中間子の $D^{*-}\ell^+\nu$ や $D^{*-}\pi^+$ への崩壊を使って中性B中間子の寿命を測定し、また、 B^+ の $D^{*0}\ell^+\nu$ や $D^0\pi^+$ への崩壊を使って荷電B中間子の寿命を測定した。結果は[10, 21], $\tau(B_d^0) = 1.548 \pm 0.035\text{ps}$, $\tau(B^\pm) = 1.656 \pm 0.038\text{ps}$ で、その統計精度は世界最高レベルに達している。今後さらに統計精度があがることが確実であり、我々の測定が最も精度のよい数値となる。

2.4.3 $B^0 - \bar{B}^0$ 混合現象の精密測定

B^0 中間子と反 B^0 中間子は、粒子-反粒子混合を起こす系である。中性B中間子は、その生成時においては、Bあるいは反Bのどちらか確定して状態で生成される(この状態をフレーバーの固有状態という)。しかしながら、その後フレーバー量子数を保存しない弱い相互作用によって、Bと反Bの(時間に依存する)量

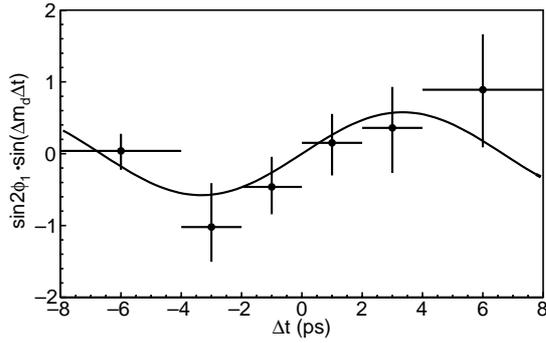


図 2.4 c: Belle 検出器で得られた中性 B 中間子と反中性 B 中間子の CP 固有状態への崩壊の時間分布の差 (CP 非対称) を B と反 B の崩壊時間差 Δt (単位: ピコ秒 10^{-12} s) の関数としてあらわしたものの \sin 関数の振幅が, CP 非対称の大きさのパラメータ $\sin 2\phi_1$ に比例する。実線はフィットから得られた結果 $\sin 2\phi_1 = 0.58$ を示している。

子力学的重ね合わせの状態に変化することになる。この重ね合わせの状態を混合とよぶ。混合は B と反 B から作られる質量の固有状態 B_H と B_L の質量差 Δm_d に比例する。この Δm_d は B 中間子の系で最も基本的なパラメータであり, これを精度よく測定することは大きな意味を持つ。我々は, Δm_d を B ファクトリーで対生成された B^0 中間子と反 B^0 中間子を使って決定した [2, 5, 10, 20]。B 中間子の semi-leptonic 崩壊モードから, $\Delta m_d = 0.522 \pm 0.026 \text{ ps}^{-1}$, hadronic 崩壊モードから, $\Delta m_d = 0.527 \pm 0.032 \text{ ps}^{-1}$ という結果を得た。

2.4.4 チャーム中間子の寿命と $D^0 - \bar{D}^0$ 混合の測定

B 中間子同様, チャーム中間子の寿命の測定は, 重いクォークを含む中間子の崩壊を理解するのに必要な重要なデータである。KEK の B ファクトリーは, 現在最も多くのチャーム中間子を生成することのできるチャームファクトリーでもある。我々は, これまで得たチャーム中間子崩壊のデータから, 図 2.4 d のように, 中性チャーム中間子 (D^0), 荷電チャーム中間子 (D^\pm), ストレンジクォークを含むチャーム中間子 (D_s) の寿命をそれぞれ, $414 \pm 1.7^{+1.8}_{-1.7}$ fs, $1033 \pm 12^{+5}_{-6}$ fs, $487.7^{+7.9+2.9}_{-7.7-4.2}$ fs と決定した [8, 9, 19]。これらの測定は, 現在, 世界最高の測定精度を誇っている。さらに, D^0 中間子が CP の固有状態である K^+K^- へ崩壊するときの寿命と, CP の混合状態である $K^-\pi^+$ へ崩壊するときの寿命の差を正確に調べることによって, D^0 と反 D^0 の混合を示すパラメータ y_{CP} を測定した。得られた結果, $y_{CP} = (1.8 \pm 1.7^{+1.0}_{-1.3}) \times 10^{-2}$ は, 標準理論が予想するように, D^0 と反 D^0 の混合

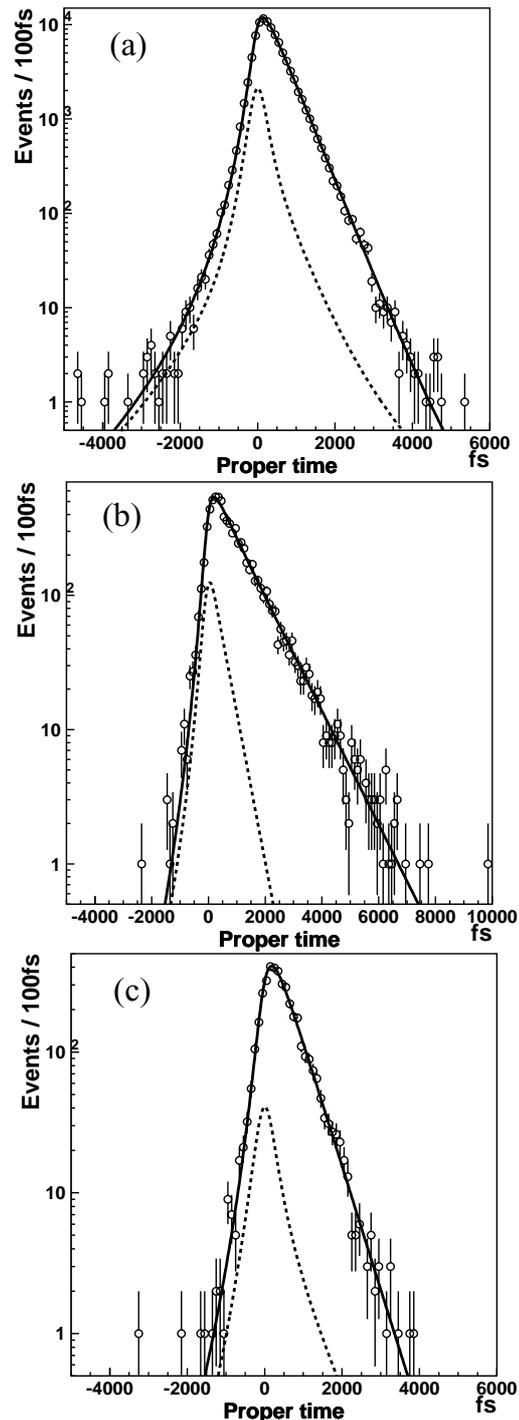


図 2.4 d: Belle 検出器で得られたチャーム中間子崩壊の固有時間分布。単位はフェムト秒 ($\text{fs} = 10^{-15}$ 秒)。(a) $D^0 \rightarrow K^-\pi^+$, (b) $D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+$, (c) $D_s^+ \rightarrow \phi(K^+K^-)\pi^+$ 。

が非常に小さいことを示している．この測定の精度も今後，データの量とともに，さらなる向上が期待できる．

2.4.5 B 中間子のきわめて稀な崩壊の探索と測定

B 中間子のストレンジクォークを含む非常に稀な崩壊には，超対称性に代表される新しい物理（標準理論の先にあると考えられている物理）からの影響が表れると期待されている．我々は，b クォークが s クォークと γ に崩壊する分岐比を測定し，かつ， $B \rightarrow K^* \ell^+ \ell^-$ などの反応の探索を行なっている．

2.4.6 第二世代シリコンバーテックス検出器の開発と設計

集積回路の機能強化 [11, 12] B ファクトリーにおいては，大量の B 中間子を生成するために，加速器の電流を増強する必要がある．しかし，それに伴ってバックグラウンドの反応数も増加し，現在の測定器では，収集する反応数は毎秒 1000 事象以上にもおおよぶと予測される．大部分のバックグラウンドは，軌道を外れたビームが検出器に突入してくることによって起こされるので，シリコンバーテックス検出器中で飛跡が再構成できるという条件を追加することによって，バックグラウンドを落すことができる．そのために必要な，シリコンバーテックス検出器の信号読み出し用集積回路 (VA-TA1) を設計した．

シリコンストリップセンサーの改良 [13]

シリコン検出器中の暗電流は，放射線を受けることによって増加するが，信号読み出し用 LSI の放射線耐性が飛躍的に向上した結果，暗電流の増加による雑音の悪化が無視できないものとなった．暗電流は，電極幅を広くすることによってその増加を減らすことができるが，同時に，電極の静電容量は増加してしまい必ずしも雑音を減らすことにはならない．そこで，様々な電極幅のテスト構造を製作し，放射線による暗電流および雑音の増加を測定した．その結果，放射線を 500kRad 照射した後は暗電流による雑音が主となるため，電極幅を最大限にするすることで雑音を最小にすることができるとわかった．また，検出器を 25°C から 15°C に冷却することで暗電流を 50%，雑音を 25% 減らすこともわかった．図 2.4 e にシリコン検出器に 10MRad 照射した後のノイズを shaping time (積分時間) の関数として示す．これらの最適化の結果，10MRad 以上の放射線を受けた後でも，検出器の信号対雑音比 16 以上を確保した．

Belle 次世代シリコンバーテックス検出器の設計

Belle 実験の第二世代シリコンバーテックス検出器，SVD2 の設計を進め，Technical Design Report を作

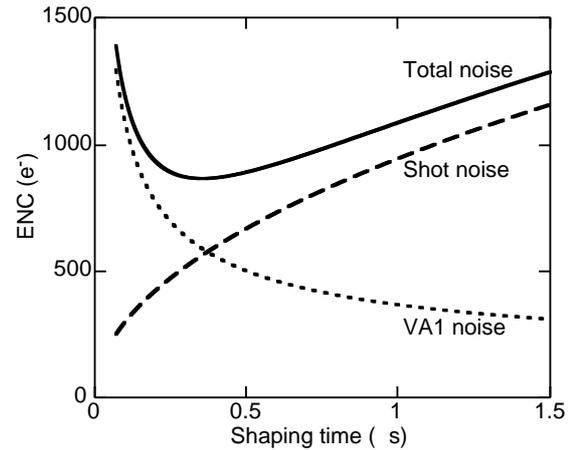


図 2.4 e: 10MRad の放射線を照射した後での検出器のノイズをプリアンプの積分時間の関数として示したものである．プリアンプ VA1 のノイズと半導体中の暗電流によるショットノイズを別々に示してある．

成した [26]．SVD 2 の特徴は，これまで本研究室が中心になって開発してきた高い耐放射線性を持つ IC や新しいシリコンストリップセンサーを用いて，今までの経験に基づき設計したもので，従来の位置測定精度をさらに (現在の約 $100\mu\text{m}$ から $50\mu\text{m}$ へ) 向上させる．また，レイヤー数を 4 層から 5 層に増やし，運動量の低い荷電粒子の飛跡再構成の効率の向上も目指している．

< 報文 >

(原著論文)

- [1] A. Abashian *et al.* [Belle Collaboration], Measurement of the CP violation parameter $\sin 2\phi_1$ in B_d^0 meson decays, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 2509 (2001).
- [2] 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), *Phys. Rev. Lett.* **86**, 3228 (2001).
- [3] G. Alimonti *et al.* [Belle Collaboration], The Belle silicon vertex detector, *Nucl. Instrum. Meth. A* **453**, 71 (2000).

(会議抄録)

- [4] H. Aihara, Physics Results from Belle, in Proceedings of the Third International Conference on B Physics and CP Violation, pp.60-66, (Eds. H.-Y. Cheng and W.-S. Hou, World Scientific, 2000)

(学位論文)

- [5] 松原太郎: Measurement of $B_d^0 - \bar{B}_d^0$ Oscillation Frequency Δm_d from the Time Evolution of $B^0 \rightarrow J/\psi K^*$ (修士論文)

< 学術講演 >

(国際会議)

招待講演

- [6] H. Aihara: A Measurement of CP Violation in Bd Meson Decays at Belle, XXXth International Conference on High Energy Physics, July 27-August 2, 2000, Osaka, Japan.
- [7] H. Tajima: Measurements of B and Charmed Meson Lifetimes with Belle, *ibid.*
- [8] J. Tanaka: Measurement of Charmed Meson Lifetimes at Belle, DPF2000-Meeting of the Division of Particles and Fields of the American Physics Society, 9-12 August, 2000, Columbus, Ohio, USA.
- [9] J. Tanaka: Measurements of D (D_s) lifetimes and search for $D^0 - \bar{D}^0$ mixing, 4th International Workshop on B Physics and CP Violation, February 19-23, 2001, Ise-Shima, Japan
- [10] H. Tajima: B CP-violation, mixing and lifetime results from Belle, XXXVth Rencontres de Moriond, QCD and Hadronic interactions at high energy, March 17-24, 2001, Les Arcs France.
- [20] 松原太郎: Measurement of $B_d^0 - \bar{B}_d^0$ Oscillation Frequency δm_d from the Time Evolution of $B^0 \rightarrow J/\psi K^*$, *ibid.*
- [21] 中平武: Measurement of B meson lifetime and $B^0 - \bar{B}^0$ mixing in $B \rightarrow D^* \ell \nu$ decays with the Belle detector at KEK Bfactory, *ibid.*
- [22] 樋口岳雄: Measurement of CP violation in $B \rightarrow J/\psi K_S$ decay with Belle, *ibid.*
- [23] 横山将志: Belle 実験による $B \rightarrow J/\psi K_L$ 崩壊を用いた CP 非対称性の測定, *ibid.*

その他

- [24] 相原博昭: Bファクトリーでの物理、日本大学素粒子論研究室セミナー (12月6日)
- [25] H. Tajima: Recent Results on CP Violation in B Decay from Belle, SLAC experimental seminar, March 1, 2001, Stanford, USA.
- [26] Belle SVD2 Upgrade Technical Design Report, <http://hep.phys.s.u-tokyo.ac.jp/SVD/upgrade/documents/>

一般講演

- [11] M. Yokoyama: Radiation-hardness of VA1 with Sub-micron Process Technology, IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, October 15-20, 2000, Lyon, France.
- [12] H. Tajima: Development of Front-end Electronics for Belle SVD Upgrades, *ibid.*
- [13] J. Kaneko: Improvement of radiation-hardness of Double-sided Silicon Strip Detector, *ibid.*

(国内会議)

招待講演

- [14] 相原博昭: 高エネルギー物理学の現状と将来, 高エネルギー宇宙物理連絡会, 第1回研究会「高エネルギー宇宙物理学の現状と将来」, 大阪大学 (9月29-30日)

一般講演

- [15] 樋口岳雄: $B \rightarrow J/\psi + K$ 崩壊における B 中間子の寿命の Belle 検出器による測定 Belle, 物理学会・第55回年次大会 (9月22-25日)
- [16] 松原太郎: Belle SVD の hit resolution の測定, *ibid*
- [17] 中平武: Belle 検出器による $B \rightarrow D^* \ell \nu$ 事象での B 中間子の寿命の測定, *ibid*
- [18] 戸村友宣: KEKB ファクトリー実験におけるチャーム中間子の寿命の測定, *ibid*
- [19] 田中純一: Measurement of $D^0 - \bar{D}^0$ Mixing and Charmed Meson Lifetimes with the Belle Experiment, 物理学会・第56回年次大会 (平成13年3月27-30日)

3 物性理論

3.1 和達研究室

統計力学と物性論における基礎的問題を中心に、興味ある現象の発見・解明と新しい解析手法の開発をめざす。分野と方法にとらわれずにより自由な発想で研究を進め、普遍的法則を確立したい。

3.1.1 ボース・アインシュタイン凝縮

弱い原子間相互作用を持つ原子レーザービームの自由落下

弱い原子間相互作用を持つ、連続波原子レーザービームの自由落下について研究した。相互作用が十分小さい(プランク定数の2次のオーダー)と仮定して、重力ポテンシャル項を伴う1次元 Gross-Pitaevskii 方程式の近似解を WKB 法を用いて求めたところ、斥力相互作用は粒子の(局所的な)落下速度を小さくし、引力相互作用は逆に大きくすることが示された[1, 46, 52]。

ト-ラス型トラップ中のボース・アインシュタイン凝縮体の基底状態

ト-ラス型ポテンシャルに閉じ込められたボース・アインシュタイン凝縮体の基底状態を、ト-ラスの曲率と原子間相互作用の両方の効果を取り入れて解析した。原子間相互作用がない場合、基底状態のエネルギー準位は曲率の効果によって低下することを、摂動法によって示した。相互作用が有限である場合は、試行関数を用いたエネルギーの変分計算によって解析した。特に斥力相互作用の場合、相互作用の強さが大きくなるにつれて、曲率の効果は小さくなることが示されたが、この傾向はトーマス・フェルミ近似から得られる結果と一致する[2, 53]。

2成分ボース・アインシュタイン凝縮体の静的安定性、集団振動と相分離

外部ポテンシャルに閉じ込められた2成分ボース・アインシュタイン凝縮体の静的な安定性についてガウシアンを試行関数とする変分計算を用いて解析的に調べた。さらにガウシアンを変形した別の試行関

数を用いることで異種原子間に強い斥力が働く場合の相分離を起こす条件を調べた[25]。また、集団振動に注目して、この系の動的な性質を調べ、引力による凝縮体の崩壊や2成分の分離といった現象は単極あるいは双極の振動モードのソフト化として説明できることが分かった。総和則を用いる方法と変分法による基底状態についての評価を組み合わせることで、振動周波数についての解析的な近似式を求めた。その結果、相互作用の組み合わせについて、安定性の観点から分類を行うことができた。多成分系では多様な不安定化モードが存在するために、この方法は特に有効な解析手法となることが分かった[3, 26, 38]。

理想ボースガスのボース・アインシュタイン凝縮

一般的な巾型のエネルギー分散関係をもつ理想ボースガスについて、ボース・アインシュタイン(BE)凝縮が起きる条件を与え、適当な熱力学極限のもとで、転移点、凝縮相の割合を計算した。また、巾型の外場トラップ中での問題を WKB 法を用いて解き、エネルギー分散関係と対応づけることで、BE凝縮の起こる判定条件をトラップの形状(実空間の巾)と系の空間次元によって書き下した。この結果、一次元の系でもトラップの形状を調和型より厳しく(例えば、線形のトラップ)することで BE凝縮が起きることを示した[4]。

3.1.2 スピン系

スピンの相関関数とリーマンヒルベルト問題

外場を含む XXZ 模型の相関関数、特にその漸近形について研究した。Korepin らによって求められた相関関数の Fredholm 行列式表示がその礎となる。一般に Fredholm 行列式はパウルヴェ方程式等、古典可積分系の方程式の解となる場合が多いので、模型が「量子」的にもかかわらず、 XXZ 模型の相関関数の計算は「古典」可積分系の問題に帰着される。我々は、 XXZ 模型の相関関数の計算が、「リーマンヒルベルト問題」と呼ばれるある種の古典可積分系の問題に帰着されることを明らかにし、このリーマンヒルベルト問題の解の漸近形を求めた[11]。また z 軸方向への相互作用を持たない、 XY 模型に関して、対応するリーマンヒルベルト問題を厳密に解き、相関関数を計算した[12]。これはもちろん従来知られている結果に一致する。

3.1.3 強相関電子系

1次元ハバード模型の熱力学

1次元ハバード模型の有限温度の性質を鈴木-トロッター変換を用いて二次元空間で扱った。有限温度ですべての状態に対する足しあげの問題は補助空

間に作用する量子転送行列の固有値問題に帰着する。分配関数は量子転送行列の最大固有値により求められるが、相関関数の相関長はある固有値と最大固有値の比によって与えられ、代数的ベータ仮説法から固有値は定式化される(ベータ仮説方程式)。バルクの物理量などはストリング仮説法または、量子転送行列法で対応するスピン系を扱うことにより盛んに研究が行われてきているが、相関関数などを求めるにはフェルミオン系を直接扱う量子転送行列のベータ仮説方程式が必要であり、その解析をおこなった。トロッター極限において、相関関数の漸近形に対し厳密な値を与えるが、本年度は有限のトロッター空間に対して、ベータ仮説方程式の解の分布を見ることによって、スピン相関関数 $S_j^+ S_k^-$ と 1 粒子グリーン関数の定性的な性質をみた [48]。

フェルミオン模型と可解境界条件

可解境界条件の拡張を中心に可解模型の研究を行った。 t - J 模型に対しては、境界条件として磁気的な不純物、非磁気的な不純物を考え、対応する反射行列を求め、転送行列の固有値、固有ベクトルを代数的ベータ仮説法で研究した [17, 19, 20]。同様に、スモール・ポーラロン模型の境界条件に対する研究を行った [21]。また、 $SU(4)$ 対称性を持つフェルミオン梯子模型に対してベータ仮説法を適用した [18]。

3.1.4 非線型波動

ソリトンセルオートマトンの対称性

ソリトンの解を持つセルオートマトン、「箱と玉の系」の可積分な数理構造を明らかにした。箱と玉の系の時間発展方程式は、Hirota-Miwa 方程式と呼ばれるソリトン方程式のある極限に相当することが知られていた。一方、同じ時間発展を頂点模型の記述法で解釈すると、結晶基底の理論を用いて説明できることが明らかになった。さらに、ソリトン解の基本的な構成が Hirota-Miwa 方程式の解に対する極限操作から得られ、ソリトンの散乱因子は結晶基底の理論で定義される同型写像から求められることが分かった [7, 8]。結晶基底の理論は量子群の特殊化を基に構成されたものであり、本研究にはソリトン系と量子可積分系の興味深い関わりが現れている。

量子ソリトン方程式

KdV 方程式に代表される非線型可積分方程式の量子版は共形場理論と密接な関係があることが知られている。こうした系についてモノドロミー行列を具体的に構成することは可積分構造や固有値を調べる上で重要なことである。従来の研究のすべてが sl_2 の対称性をもつ方程式系についてであり、一般の sl_n 対称性をもつソリトン方程式については全くなされ

ていなかった。ここでは離散 Boussinesq 方程式についてアフィン戸田方程式の転送行列を用いてモノドロミー行列を具体的に構成することに成功した。さらに、この行列は双対性を持ち、バクスター方程式と呼ばれる 3 階の差分方程式を満たすことを示した [9]。

3.1.5 結び目理論

量子群の発見以降、多彩な量子結び目普遍量が提出されてきた。もっとも古くから知られている Alexander 多項式が被覆空間のホモロジーから構成されるのとは異なり、こうした量子普遍量の幾何学的な理解は全くなされていなかった。最近になって、双曲結び目に対する色つき Jones 多項式の漸近的なふるまいが結び目の補空間の双曲体積を与える、という仮説が提唱され、量子普遍量の幾何が注目を集め始めた。我々はまず量子 dilog 函数の無限次元表現を用いて Jones 型の量子普遍量を新たに導出した [24]。これは量子化パラメータを 1 の巾根における色つき Jones 多項式の特異値と一致するものである。さらに、古典極限においては 3 次元双曲幾何の構造が自然に入り理想多面体の双曲体積が現れること、および鞍点方程式が貼り合わせ双曲方程式と厳密に一致することを明らかにした [10]。

3.1.6 量子多体系

Calogero–Sutherland 模型

Calogero–Sutherland 模型 (CS 模型) とは、一次元空間上で粒子間距離の逆二乗で相互作用する量子多体系であり、自由度と同数の可換な保存演算子を持つ「量子可積分系」の一つであることが知られている。いくつかの CS 模型においては、これら全ての保存演算子を同時対角化する固有状態に多変数多項式が現れることが特徴的である。

我々は調和振動子ポテンシャル中の CS 模型に対して、非対称な固有状態の多項式部分、非対称多変数 Hermite 多項式を代数的に与える昇降演算子を導入し、これらの非対称な固有状態のノルム公式を与えた。さらにこの非対称な状態を対称化することによってボソンの固有状態を構成し、この状態のノルムが非対称な状態のノルムから Poincaré 多項式を介して得られることを示した [27]。

量子可積分系の有限温度厳密解析

量子可積分とはここでは Bethe 方程式の解によって固有値を示すことが可能な系を言うこととする。

量子可積分系の典型例として、一次元 δ 関数型相互作用をとりあげ、この系における分配関数の厳密な解析的導出手法を発見した。そして、この方法をもちいて、この系の自由エネルギーを導出した [14,

32, 13, 15]。この方法は系に対する依存性が、関数のみに及ぶため、他の量子可積分系においても同様に適用が可能な一般的な方法論になると考えられる。

そもそも、現在一般的に知られている可積分系の有限温度の解析手法として、Thermal Bethe Ansatz (TBA) の手法がある。しかし、TBA はその導出過程において、物理的直観を用いるものであり、一般的可積分系に適用した時の数学的正当性の証明は満足されうる答を得ていない。上記結果は TBA と同等の答えを出すことを示しており、 δ 関数型相互作用する系における TBA の数学的正当性の裏付けを与えていると見ることもできる。

3.1.7 量子計算と量子情報

量子クローニング

量子クローニングは量子計算と量子情報の理論において最も基本的な概念の1つである。まず、ブロッホベクトルの1つが0であるような qubit に対する量子クローニング変換を考察し、このような変換が普遍量子クローニングより高い信頼度があることを示した。より一般に、入力が N ビット、出力が M ビットの場合も考察した。次に、準位数が d の場合の普遍量子クローニングマシンを考察し、最適信頼度を達成するユニタリー変換を構成することに成功した。

量子探索アルゴリズムの幾何構造

Grover の量子探索は、 N 個の探索状態数に対して古典コンピュータでは $O(N)$ の計算量を要した所を、 $O(\sqrt{N})$ で望みのものを捜し出す最適な量子アルゴリズムである。量子系の純粋状態の幾何構造を複素射影空間として捉える事によって、Grover のオリジナルの量子探索はその空間の測地線からなる最短経路に対応することを見つけた。一般に量子探索では、初期状態をうまく採った測地線になるようにアルゴリズムを構成することにより、最も効率的に探索でき、これらは Grover のオリジナルのものと計算量が等しい事を示した。また、代数幾何の Segre の埋め込みによってエンタングルしていない部分集合を特定して、エンタングルメントの量をその部分集合までの最短距離として扱うことによって、量子ビット数が多い時は、ほとんど最大限にエンタングルメントを利用していることを示した [33]。

3.1.8 力学系

ハミルトニアン系の拡張

南部-ハミルトニアン系はハミルトニアン系の拡張であり、その時間発展において相空間の体積を保存する力学系である。古典的な拡張は容易であるがそ

の量子化は困難であった。一方、南部-ハミルトニアン系は、無限自由度のハミルトニアン系に埋め込むことができる。そこで標準的な南部-ハミルトニアン系をハミルトニアン系と見なして、変形量子化を行った [16]。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] T. Tsurumi and M. Wadati: Free Fall of Atomic Laser Beam with Weak Inter-Atomic Interaction, *J. Phys. Soc. Jpn.* **70**, 60–68 (2001).
- [2] T. Tsurumi and M. Wadati: Ground State Properties of a Toroidally Trapped Bose-Einstein Condensate, to appear in *J. Phys. Soc. Jpn.* **70**, No. 6 (2001).
- [3] H. Morise and M. Wadati: Phase Separation and Collective Excitations of Two-Component Bose-Einstein Condensates in Traps, *J. Phys. Soc. Jpn.* **69** (2000) 2463.
- [4] J. Ieda, T. Tsurumi and M. Wadati: Bose-Einstein Condensation of Ideal Bose Gases, to appear in *J. Phys. Soc. Jpn.* **70**, No. 5 (2001).
- [5] R. Inoue and K. Hikami: The lattice Toda field theory for simple Lie algebras — Hamiltonian structure and τ -function, *Nucl. Phys. B* **581**, 761–775 (2000).
- [6] K. Hikami and R. Inoue: Supersymmetric extension of the integrable box-ball system, *J. Phys. A: Math. Gen.* **33**, 4081–4094 (2000).
- [7] G. Hatayama, K. Hikami, R. Inoue, A. Kuniba, T. Takagi and T. Tokihiro: The $A_M^{(1)}$ automata related to crystals of symmetric tensors, *J. Math. Phys.*, **42** (2000) 274.
- [8] K. Hikami and R. Inoue: Symmetry of integrable cellular automaton, *J. Phys. A: Math. Gen.*, **34** (2001) 2467.
- [9] K. Hikami: Baxter equation for quantum discrete Boussinesq equation, *Nucl. Phys. B*, to appear.
- [10] K. Hikami: Hyperbolic structure arising from a knot invariant, *Int. J. Mod. Phys. A*, to appear.
- [11] Y. Fujii and M. Wadati: Asymptotic form of the two-point correlation function of the XXZ spin chain, *J. Phys. A: Math. Gen.* **33** (2000) 6497–6504.
- [12] Y. Fujii: Exact solution of Riemann-Hilbert problem for a correlation function of the XY spin chain, *J. Phys. Soc. Jpn.* **69** (2000) 3143–3145.
- [13] G. Kato and M. Wadati: Explicit Calculation of the Partition Function of a one-dimensional δ -function bose gas *Chaos, Solitons & Fractals* **12**(2001)993.
- [14] G. Kato and M. Wadati: Partition function for a one-dimensional δ -function bose gas *Phys. Rev. E* **63** (2001), in press.

- [15] G. Kato and M. Wadati: Statistical Mechanics of a One-Dimensional δ -Function Bose Gas J. Phys. Soc. Jpn. **70** (2001) No.7, to appear.
- [16] M. Sakakibara: Remarks on a Deformation Quantization of the Canonical Nambu Bracket, Prog. Theo. Phys. **104** (2000) 1067.
- [17] H. Fan and M. Wadati: Integrable boundary impurities in the t - J model with different grading, Nucl. Phys. B **599** (2001) 561–581.
- [18] H. Fan and M. Wadati: Bethe ansatz for $SU(4)$ extension of the Hubbard model, J. Phys. Soc. Jpn. **69** (2000) 3797–3804.
- [19] H. Fan, M. Wadati and R. H. Yue: Boundary impurities in the generalized supersymmetric t - J model, J. Phys. A: Math. Gen. **33** (2000) 6187–6202.
- [20] H. Fan, M. Wadati and X. M. Wang: Exact diagonalization of the generalized super-symmetric t - J model with boundaries, Phys. Rev. B **61** (2000) 3450–3469.
- [21] X. M. Wang, H. Fan and X. W. Guan, Bethe ansatz for the one-dimensional small-polaron model with open boundary conditions, J. Phys. Soc. Jpn. **69** (2000) 251–258.
- (会議抄録)
- [22] K. Hikami: Quantum integrable lattice field theory and quantum dilogarithm function, in *Physics and Combinatorics — Proceedings of the Nagoya 1999 International Workshop*, edited by A. N. Kirillov, A. Tsuchiya, and H. Umemura. World Scientific, Singapore (2001).
- [23] K. Hikami: Exclusion statistics and chiral partition function, in *Physics and Combinatorics — Proceedings of the Nagoya 2000 International Workshop*, edited by A. N. Kirillov and N. Liskova. World Scientific, Singapore (2001), in press.
- [24] K. Hikami: Notes on construction of the knot invariant from quantum dilogarithm function, RIMS 講究録 **1172**, 44–69 (2000).
- [25] H. Morise, T. Tsurumi and M. Wadati: Two-Component Bose-Einstein condensates and their stability, Physica A **281** (2000) 432.
- [26] H. Morise and M. Wadati: Stability of Two-Component Bose-Einstein Condensates in Traps, J. Low Temp. Phys. **121** (2000) 257.
- [27] M. Wadati, A. Nishino, H. Ujino and Y. Komori: Symmetric and non-symmetric bases of quantum integrable particle systems with long-range interactions, J. Stat. Phys. **102** (2001) 1049–1064.
- [28] M. Wadati, H. Morise and T. Tsurumi: Two-Component Bose-Einstein Condensates in Magnetic Traps, 研究会「Anomalous Nuclear Fusion Reactions」報告集 (大阪大学、2000年3月), 原子核研究 **45**, 79–91 (2000).
- [29] T. Tsurumi, H. Morise and M. Wadati: Static and Dynamic Properties of Trapped Bose-Einstein Condensates, in “Lecture Notes of Recent Developments on Integrable Quantum Field Theories”, to be published by World Scientific.
- (学位論文)
- 博士論文
- [30] 山崎 (井上): Construction of Discrete Integrable Systems and Soliton Cellular Automata based on the Algebraic Structure.
- 修士論文
- [31] 緒方: Relation of Path Integral Method and Projection Operator Method
- [32] 加藤: Finite Temperature Analysis of a 1-D δ -function Boson Gas.
- [33] 三宅: Geometric Studies on Quantum Computation.
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 招待講演
- [34] K. Hikami: Integrable difference equations, vertex model, and cellular automaton (150th Anniversary of Sophie Kowalevski “Mathematical Methods of Regular Dynamics”, Leeds, UK, 2000年4月)
- [35] K. Hikami: Exclusion Statistics and Chiral Partition Function (“Physics and Combinatorics 2000”, Nagoya University, 2000年8月)
- [36] M. Wadati: Statistical Mechanics of 1-dimensional Bose Gas (International Workshop on “Nonlinearity and Disorder”, Uzbekistan, 2000年10月)
- 一般講演
- [37] T. Tsurumi and M. Wadati: Dynamics of Magnetically Trapped Boson-Fermion Mixtures (“International Symposium on Quantum Fluids and Solids”, University of Minnesota, Minneapolis, USA, 2000年6月)
- [38] H. Morise and M. Wadati: Stability of Two-Component Bose-Einstein Condensates in Traps (同上)
- [39] R. Inoue: Bogoyavlensky lattice and soliton cellular automaton (APCTP Conference on “Exact Solvable Models of Statistical Mechanics and Mathematical Physics”, Seoul, Korea, 2000年6月)
- [40] R. Inoue: The lattice Toda field theory for simple Lie algebras (9-th MSJ-IRI on “Integrable Systems in Differential Geometry”, Tokyo, Japan, 2000年7月)
- [41] K. Hikami: Integrable Lattice Field Theory and Quantum Dilogarithm Function, (International Congress of Mathematical Physics, London, 2000年7月)

(国内会議)

招待講演

- [42] 和達: 厳密に解ける模型 (東京大学物性研究所、2000年11月)
- [43] 和達: 厳密に解ける模型の展望、(“統計力学の現状”, 竹橋会館, 2000年11月)
- [44] 樋上: Quantum Dilogarithm Function and Knot Invariant (「Kashaev Conjecture and its Related Topics」, 東京工業大学、2000年11月)
- [45] 樋上: 量子 dilog 関数から volume conjecture へのアプローチ (「Art of Low Dimensional Topology VII」, 関西セミナーハウス、2001年2月)

一般講演

- [46] 鶴見、和達: 弱い原子間相互作用を持つ原子レーザービームの自由落下 (日本物理学会 第55回年次大会、新潟大学、2000年9月)
- [47] 井上、樋上: The lattice Toda field theory for finite-dimensional simple Lie algebras (同上)
- [48] 梅野、城石、A. Klümper: 一次元ハバードモデルにおける有限温度スピン相関関数と1粒子グリーン関数の量子転送行列法による解析 (同上)
- [49] 西野、小森、宇治野、和達: 一般化された Sutherland 模型のボソンの、フェルミオンの固有状態 (同上)
- [50] 加藤、和達: δ 関数型相互作用をするボゾン系の分配関数のダイアグラムを用いた厳密解 (同上)
- [51] 加藤: The Partition Function for a 1D δ -function Bose Gas (「非線形現象の数理と量子解析」, 国際高等研究所、2000年11月)
- [52] 鶴見: Free Fall of Atomic Laser Beam with Weak Inter-Atomic Interaction (レーザー冷却の物理と応用第3回研究会、湘南国際村センター、2001年1月)
- [53] 鶴見、和達: ト・ラス型トラップ中のボース・アインシュタイン凝縮体の基底状態 (日本物理学会 第56回年次大会、中央大学、2001年3月)

(セミナー)

- [54] A. Nishino: Symmetrization of non-symmetric Macdonald polynomials and Macdonald's inner product identities (東京大学総合文化研究科、2000年6月)
- [55] 加藤: Cluster Expansion of a One-dimensional Bose gas system (東京大学物性研究所、2000年11月)
- [56] 井上: Symmetry and integrable structure of soliton cellular automata (都立大学、2001年1月)
- [57] 三宅: Geometric Studies on Quantum Computation (KEK、2001年2月)
- [58] 鶴見: ボース・アインシュタイン凝縮の非線形物理 (東京工業大学、2001年3月)

3.2 塚田研究室

密度汎関数法など計算物理の新しい方法論の開発を行い、これを用いて表面・界面の電子状態、構造と動的現象、結晶成長や表面反応過程や走査プローブ顕微鏡の機構の解明を行っている。またカーボンナノチューブ系、原子細線系、分子架橋系などナノ構造系の量子輸送の基礎理論を研究している。

3.2.1 固体表面および吸着系の電子状態

Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面構造相転移の第一原理的研究

Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面の原子構造は、従来考えられていた対称的な構造 (HCT モデル) ではなく、非対称的な構造 (IET モデル) によって説明されることが、最近、第一原理電子状態計算および低温 STM 実験により明らかになった。HCT 構造から IET 構造への変態は銀三角形の回転として考えるとわかりやすい。そこで、相沢と塚田はこの回転角の関数として全エネルギーを第一原理的に計算したところ、HCT 構造は回転角に関してエネルギー極大になっていることがわかった。しかし、表面フォノンの効果を考慮に入れて、有限温度での自由エネルギーを計算したところ、温度が上がるにつれて、HCT 構造と IET 構造のエネルギー差がどんどん縮まっていくことがわかった。このことはこの表面の構造相転移が転位型の相転移である可能性を示唆する。[22, 44, 66] 一方、秩序・無秩序型の転位という観点からもモンテカルロ法による研究が進んでいる。どちらの型の相転移であるかという問題は清浄 Si(001) 表面との関連からも興味深い。[10, 43, 67]

3.2.2 原子間力顕微鏡の理論

Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面の IET 構造の非接触原子間力顕微鏡像の第一原理計算

佐々木、相澤、塚田は前年度、非接触原子間力顕微鏡 (NC-AFM) のイメージを第一原理的にシミュレートするフーリエ展開法 [11] を開発したが、今年度は本方法を Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面の Inequivalent-Triangle (IET) 構造に適用した [12]。IET 構造の二つの異なる NC-AFM 像の平均は、剛体の Honeycomb-chained triangle (HCT) 構造を仮定した NC-AFM 像とほぼ等しくなることが示された。これを我々は「見かけの HCT 構造」と名付けた。この結果は室温での $\sqrt{3}$ -Ag 構造が異なる IET 相間で揺らいでいることと、IET の平均像と見かけの HCT 像が区別されないことを示している。

非接触原子間力顕微鏡におけるエネルギー散逸の効果

佐々木と塚田 [12] は、探針が誘起するマイクロな非可逆的原子過程が非接触 AFM のカンチレバーのダイナミクスに与える影響を、時間平均を用いる摂動論をもとに調べた。まず、非可逆的過程に由来する Q 値の典型的な大きさが 10^4 のオーダーである事を示し、レバーの自由振動が持つ固有の散逸量と同じ大きさである事がわかった。次に非可逆的過程のヒステリシスループに由来する付加的な周波数シフトが 10 Hz のオーダーである事を示した。この付加項は、探針が表面に、ある閾値高さ以内に近づいた時に階段関数のように現れる。この特徴によって、化学的に活性の高い表面上で、不連続な周波数シフトが実験で観察されている理由を説明出来る。

非接触原子間顕微鏡の散逸と減衰

ゴーチエと塚田は、探針振動の減衰を検出することによって原子スケールの分解能をもつ像が得られる機構を考察し、揺動・散逸定理の特別な場合である表面原子の確率的運動の効果が関係しているという結果を得た。この理論は、減衰を検出することによる表面の原子サイズでの質量解析の可能性も示している。また、探針の運動の非線形性は減衰に大きく影響するので、実験の解析ではその線形性を確かめることが重要であることも指摘した。

非接触原子間力顕微鏡ダイナミクスの逆べき公式の導出

佐々木と塚田 [13] は、非接触 AFM の周波数シフトとエネルギー散逸量の一般的な解析公式を、探針-表面間相互作用が逆べき則で与えられる場合について求めた。まず様々な探針形状に対する周波数シフトを求め、過去の実験や数値計算と一致する有効な公式である事を示した。次に Langevin 方程式に基づきエネルギー散逸量の探針高さ依存性を示した。

Si(001) 表面の原子間力顕微鏡像のシミュレーション

田上と塚田は、Si(001) 表面の原子間力顕微鏡像を、シリコン探針およびナノチューブ探針を用い計算した。計算は、密度汎関数タイトバインディングモデルもとで行った。前者の探針では明瞭な像が得られるのに対し、後者では原子のない位置にも輝点を持つ異常像が観察されることが分かった。また、両者に共通して、探針誘起の不連続なダイマー反転やヒステリシス現象が観測された。

非接触原子間顕微鏡の探針の効果

三浦と塚田は、シリコン (100)2×1 構造表面の非接触原子間力顕微鏡像に対する探針の効果を一原理密度汎関数計算によるシミュレーションを用いて明らかにした。シリコン (111) 探針で清浄なものと水素終端したもののモデルとして SiH₃ クラスタと SiH₄ クラスタをそれぞれ用い、シミュレーション像を比較した。その結果、清浄シリコン探針による像のコントラストは水素化探針によるものよりはるかに大きいことがわかった。後者の探針の場合、探針の転回点を表面に近付けるにしたがって、かなり像が変化すること、特に、転回点が表面に極端に近付くと、像の明暗の反転が起こることが見出された。

3.2.3 計算物性物理

時間依存 Kohn-Sham 方程式の数値解法の定式化

多電子系の時間変化を 1 粒子波動関数から導く時間依存密度汎関数法の実践的な基礎方程式として時間依存 Kohn-Sham 方程式がある。この方程式は 1 粒子時間依存 Schrödinger 方程式とほとんど同じ形をしており、違いはポテンシャルが系の全電子密度分布に依存していることである。しかしこのポテンシャルの密度依存性のため、解くべき波動関数がある前に求めておくべきポテンシャルの計算が必要であるというジレンマが生じる。本年度、渡辺と塚田はこのジレンマを生じさせている原因である形式的厳密解の時間順序付き指数演算子による表現を改め、まったく新しい表現で厳密解を表すことを提案し、これを鈴木の数値展開法で近似することで単純で実用的な計算式が得られることを示した。この計算法を用いることで従来より効率良く多電子系の動的特性を解明できることが期待されている [15, 16]。

実空間有限要素法による C₃₆ フラーレンの第一原理分子動力学

高橋と塚田は近年我々のグループで開発された密度汎関数実空間有限要素法を用いて C₃₆ の 15 の異性体のエネルギーを計算した。その結果、D_{6h} の対称性を持つ異性体がヤーン・テラーひずみ (D_{6h} → C_{6v}) を起こすことは確認されず、D_{2d} 対称性が基底状態となることがわかった。実験では、C₃₆ は C₃₆H₄ や C₃₆H₆ として生成される。ここで、なぜ水素化反応が C₃₆H₆ の段階で止まるのかという疑問が起こるが、それを解く手がかりを得るために、C₃₆H_x (x=2,4,6,8) の安定構造の計算を行った。その結果、8 個の水素が結合する 2 通りの反応経路を見出し、水素化に対する C₃₆H₆ の反応性は まだ 高い、という結論を得た。

3.2.4 ナノ構造の物理

ナノチューブ接合系の整流作用

田村と塚田は、5 員環欠陥と 7 員環欠陥対による金属カーボンナノチューブ (Metallic NanoTube) ・半導体ナノチューブ (Semiconducting NanoTube) 接合 (MS-NT 接合) の電流・電圧特性をタイトバインディングモデル、ハートリーフォック近似、およびグリーン関数法を用いて求めた。通常金属・半導体接合では、ショットキー障壁による整流作用は逆バイアス側で障壁の高さが高くなることで起こる。しかし、この障壁の厚さは MS-NT 接合の場合、マイクロメートルの規模にまで達しナノメートル規模の素子を作る上で問題となることが指摘されていた。この障壁の厚さを薄くする方法として、ゲート電極を接合に近付けることによって接合中の電子間相互作用を遮蔽することが考えられるが、これに対応する計算を行った。その結果、フェルミレベルを半導体チューブのエネルギーギャップ端近くに固定した場合、通常の逆バイアスに相当するバイアスでは、障壁が薄いため大きなトンネル電流が流れ、その逆のバイアス時には半導体チューブのエネルギーギャップのため電流が阻害されるという、通常とは逆の極性の整流作用を見出した。

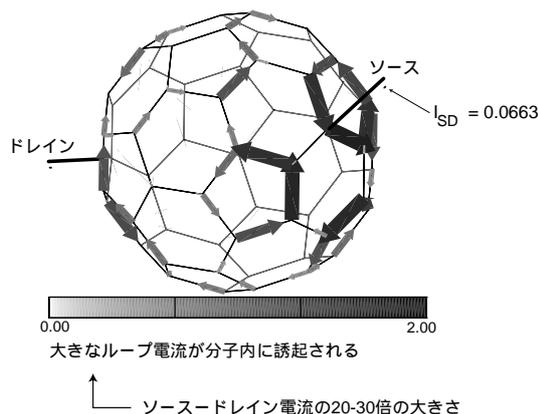


図 3.2 a: C₆₀ 分子中の誘起ループ電流

フラーレン分子架橋の電子透過

中西と塚田は、フラーレン C₆₀ を用いた分子架橋 (金属電極間に有機分子をはさんだ構造) の電子透過について数値的、解析的に研究を行った。これまでにほかの種類で確認してきたように、ソース・ドレイン電流によって分子内部に誘起されたループ電流がこの系に対してもあらわれることを確認した。この誘起ループ電流の大きさはソース・ドレイン電流の数十倍に達する。この電流 (のエネルギー密度) は、入射電子のエネルギーを変化させたときに縮重したエネルギー準位の近傍で大きくなり、またその向きを変える。このような振る舞いは、分子内部の

波動関数を分子軌道で展開して理解できる。すなわち、共鳴透過に寄与している分子軌道の展開係数間の位相差の変化が上記の現象を引き起こす。さらに、ソース電極の位置を固定して、ドレイン電極の位置を変化させたときに、ある条件下で誘起ループ電流の作る磁気モーメントが平面内に拘束される現象を数値的に明らかにし、解析的な議論により説明した。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Y.Yoshimoto and M.Tsukada: Possibility of the quantum fluctuation of the Si(001) surface at low temperature, Proc.of Inten.Conf.on Phys.Semiconductors 2000, is press
- [2] Y.Yoshimoto and M.Tsukada: Depth dependence of the point defect formation energy of Si(001)surface, Phys.Rev.B,in press
- [3] M.Tsukada, N.Kobayashi, M.Brandbyge and S.Nakanishi: Physics of Artificial Nano-Structures on Surfaces, Progr.Surf.Sci.**64**(2000)139
- [4] N. Sasaki, H. Aizawa and M. Tsukada: Fourier Expansion Method for Noncontact Atomic Force Microscopy Image Simulations-Application to Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface, Jpn.J.Appl.Phys.**39**(2000)L174
- [5] K.Tagami,E.Tsuchida,M.Tsukada: First-principles study of vibrational spectra on dihydride-terminated Si(001)/H surfaces,Surface Sci.**446**(2000)L108
- [6] N.Kobayashi, M.Brandbyge, M.Tsukada:First-principles study of electron transport through monatomic Al and Na wires, Phys.Rev.B.**62**(2000)8430
- [7] N.Watanabe and M.Tsukada: Fast and Stable Method for Simulating Quantum Electron Dynamics, Progr. of Theor. Phys. Suppl. **138**(2000)115
- [8] Y.Wada, M.Tsukada, M.Fujihira, K.Matsushige, T.Ogawa,M.Haga and S.Tanaka: Prospects and Problems of Single Molecule Information Devices, Jpn.J.Appl.Phys. **39**(2000)3835
- [9] Y. Yoshimoto, Y. Nakamura, H. Kawai, M. Tsukada, M. Nakayama: Ge(001) surface reconstruction studied using a first-principles calculation and a Monte Carlo simulation,Phys. Rev.B **61** (2000)1965
- [10] K. Kakitani, A. Yoshimori, H. Aizawa and M. Tsukada: Theoretical Analyses of Phase Transition and Debye-Waller Factor of Si(111)-Ag $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ surface, Surf. Sci., in press
- [11] N. Sasaki, H. Aizawa and M. Tsukada: Theoretical simulation of noncontact AFM images of Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag Surface based on Fourier expansion method, Appl. Surf. Sci. **157** (2000)367
- [12] N. Sasaki and M. Tsukda: Effect of Microscopic Nonconservative Process on Noncontact Atomic Force Microscopy, Jpn. J. of Appl. Phys. **39** (2000)L1334
- [13] N. Sasaki and M. Tsukda: Theoretical evaluation of the frequency shift and dissipated power in non-contact atomic force microscopy, Appl. Phys. A, in press
- [14] N. Sasaki, H. Aizawa, M. Tsukada: Simulation of interaction force between Si tip and Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface of IET structure in noncontact AFM, Surf. Sci., in press
- [15] N. Watanabe and M. Tsukada: Fast and stable method for simulating quantum electron dynamics, Physical Review E **62** (2000)2914
- [16] N. Watanabe and M. Tsukada: Finite element approach for simulating quantum electron dynamics in a magnetic field, J. Phys. Soc. Japan **69**(2000)2962
- [17] M. Gauthier, and M. Tsukada: Damping Mechanism in Dynamic Force Microscopy, Phys. Rev. Lett. **85** (2000)5348
- [18] K.Tagami and M. Tsukada: Simulated Non-contact Atomic Force Microscopy Images of Si(001) Surface with Silicon Tip, Jpn.J.Appl. Phys **39**(2000)6025
- [19] K. Tagami, N. Sasaki, and M.Tsukada: A Tight-Binding Study of Chemical Interaction of Nanotube Tip with Si(001) Surface, J. Phys. Soc. Jpn. **69**(2000)3937.
- [20] K. Tagami, N.Sasaki, M.Tsukada: Tight-Binding Study of Noncontact Atomic Force Microscopy Images of Si(001) Surfaces, Surf. Sci., in press
- [21] K.Tagami, N.Sasaki, M.Tsukada: Simulated nc-AFM Images of Si(001) Surface with Nanotube Tip, Appl. Surf. Sci., in press

(会議抄録)

- [22] H. Aizawa, N. Sasaki and M. Tsukada: First-principles study on structural phase transitions of Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface, *Proceedings of the 3rd Japan-Korea Joint Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations* (Tsukuba, 2000)259

(学位論文)

- [23] Hideyuki Takahashi: Theory of Structures and Breakdown Process of Fullerene C₃₆ and C₃₆H₆ (修士論文)
- [24] 三浦 成暁: Si(100) 表面における非接触原子間力顕微鏡像の理論 (修士論文)

(著書)

- [25] 塚田 捷: 各種 SPM の理論 - 原子間顕微鏡の計算理論, (丸善, 森田 清三 編著 走査型プローブ顕微 k 鏡, 基礎と未来予測) pp 163-173 2000 年

- [26] 塚田 捷: 表面分析技術選書, 走査プローブ顕微鏡,(丸善, 表面科学会編) 印刷中
- [27] 塚田 捷: 操作トンネル顕微鏡, 走査プローブ顕微鏡,(裳華房) 印刷中
- [28] 塚田 捷, 佐々木 成朗: 原子間力顕微鏡, 走査プローブ顕微鏡,(裳華房) 印刷中
- [29] N. Sasaki and M. Tsukada: Theory of Scanning Probe Microscopy, "Advances in Scanning Probe Microscopy", Springer-Verlag, Eds. T. Sakurai and Y. Watanabe, pp.1-41.
- [30] 佐々木成朗, 塚田捷: 「原子間力顕微鏡の理論的基礎」, 「走査プローブ顕微鏡」2.2.1章(共立、河津璋編、実験物理学シリーズ6) 印刷中.
- [31] 佐々木成朗, 塚田捷: 「非接触原子間力顕微鏡が見る世界 – 相互作用・構造転移・摩擦」
科学研究費補助金「特定領域研究(B)」(平成11年度-平成14年度)
平成12年度第1回研究会資料
原子分子のナノ科学 News Letter No.8, pp.1-5, 2000年7月.
(国内雑誌)
- [32] 佐々木成朗, 塚田捷: 「原子スケールの摩擦 – 摩擦力顕微鏡」, リレーコロキウム「摩擦の物理」
固体物理 35 巻 6月号(2000) pp.513-520
- [33] 塚田捷: 操作トンネル顕微鏡の物理, 応用物理 69 巻 3号(2000) pp.329-332
- [34] 佐々木 徹, 長嶋 雲兵, 塚田 捷: 第一原理分子軌道 DVX α 法のオブジェクト指向化と専用計算機の開発, 化学ソフトウェア学会誌 6 巻 4号(2000) pp 165-173
- [35] 塚田捷: 表面の理論, 学術月報 53 巻 12号(2000) pp.1281-1285
- [36] 佐々木成朗, 塚田捷: 「原子スケールの摩擦を見る」
物性研究(2001), 印刷中.
- [37] 佐々木成朗, 塚田捷:
「原子スケール摩擦のシミュレーション解析」
トライボロジスト(2001), 印刷中.
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [38] S. Nakanishi and M. Tsukada: Induced large loop current of molecular bridge with C₆₀, APS March Meeting 2001, (Seattle, 2001, Mar)
- [39] R. Tamura and M. Tsukada: Energy barriers in carbon nanotube junctions, APS March Meeting 2001, (Seattle, 2001, Mar)
- [40] S. Nakanishi and M. Tsukada: Induced loop current of molecular bridge structure with fullerenes, The International Symposium on Surface and Interface – Properties of Different Symmetry Crossing – 2000, (Nagoya, 2000, Oct 18)
- [41] M. Gauthier, and M. Tsukada: Noncontact dissipation force microscopy, NANOTRIBOLOGY, (Bali, 2000, April)
- [42] M. Gauthier, and M. Tsukada: Dissipation in non-contact dynamic force microscopy, NC-AFM2000, (Hamburg, 2000, July)
- [43] K. Kakitani, A. Yoshimori, H. Aizawa and M. Tsukada: Theoretical Analyses of Phase Transition and Debye-Waller Factor of Si(111)-Ag $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ surface, *The International Symposium on Surface and Interface – Properties of Different Symmetry Crossing – 2000*, (Nagoya, 2000年10月17-20日)
- [44] H. Aizawa, N. Sasaki and M. Tsukada: First-principles study on structural phase transitions of Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface, *The 3rd Japan-Korea Joint Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations*, (Tsukuba, 2000年10月30-11月1日.)
- [45] N. Watanabe and M. Tsukada: Efficient algorithm for TD-Schroedinger equation and TD-Kohn-Sham equation, International Conference on Computational Physics 2000 (Queensland, 2000, Dec 3-8).
- [46] N. Watanabe and M. Tsukada: Algorithm for simulating time-evolution of wavefunctions under Time-Dependent Kohn-Sham equation, Computational Science Workshop 2001 (Tsukuba, 2001, Mar 11-13).
- [47] K. Tagami, N.Sasaki, M.Tsukada: Tight-Binding Study of Noncontact Atomic Force Microscopy Images of Si(001)Surfaces, The international Symposium on Surface and Interface, (愛知県産業貿易会館, 2000, Oct.)
- [48] M.Tsukada, N.Sasaki, H.Aizawa, K.Tagami: Theory of noncontact atomic force microscopy Case studies for Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface, The International Symposium on Surface and Interface, (Nagoya, 2000, Oct.17-20)
- 招待講演
- [49] N. Sasaki and M. Tsukada: 「Towards a realistic theoretical calculation of NC-AFM system」
3rd International Workshop on Noncontact Atomic Force Microscopy, nc-AFM 2000 (Hamburg, 2000, July 16-19)
- [50] M.Tsukada, M.Brandbyge, N.Kobayashi and S.Nakanishi: Theory of quantum transport through molecular and atom bridges, IWCE7, (Univ. of Glasgow, 22-25, May, 2000)
- [51] M.Tsukada: Theory of Scanning Probe Microscopy and Related Nano-structure Materials, Symposium, Strong Correlation in Many-body Systems, (Tokyo/Mount Nikko, Japan, 26-30 June 2000)
- [52] M.Tsukada: Theory of quantum transport through nano-structure materials, The First

- Korea-Japan Workshop on Frontier Nano-structures on Surfaces, (Yonsei University, Seoul, Korea, 2000, Oct. 23-24)
- [53] M. Tsukada: Quantum Electron Transport through Atomic Wires and Molecular Bridges, Japanese German Symposium "Strategies in Nanotechnology" (Japanese German Center, Berlin, 2000, Oct. 30-31)
- [54] M. Tsukada, S. Nakanishi, N. Kobayashi, M. Brandbyge, R. Tamura: Quantum Transport Properties of Nano-Structures - Atom Wires, Molecular Bridges, Nanotubes-First International Symposium on Nano architectonic using Supra interactions, NASI 1 (Tsukuba, 2000, Nov. 13-16)
- [55] M. Tsukada, N. Kobayashi and S. Nakanishi: Theory of Quantum Transport through Atomic and Molecular Bridges, 4th International Workshop on Quantum Functional Devices (Kanazawa, 2000, Nov. 15-17)
- [56] M. Tsukada: Theory of quantum transport through nano-structures, Seminar on 2D Conductivity in Surface States and Monolayers 251. WE-Heraeus Seminar, (Physikzentrum Bad Honnef 2001. March. 5-8)
- (国内会議)
- 一般講演
- [57] 塚田捷: 人工ナノ構造系の量子輸送現象、第5回東京大学 IML シンポジウム (IML, 2000. Oct. 13)
- [58] 田上 勝規、塚田 捷: ナノチューブ探針でみる非接触 AFM 像の理論的予測、科研費補助金「特定領域基盤研究 (B)」研究会、大阪大学、2000年7月
- [59] ゴチエミツェル、塚田捷: damping in dynamic force microscopy, 日本物理学会第55回年次大会、新潟大学、2000年9月
bibitem 田村 了、塚田捷: ナノチューブ接合系の整流作用、日本物理学会第55回年次大会、新潟大学、2000年9月
- [60] 渡辺 尚貴、塚田捷: 時間依存 Kohn-Sham 方程式による多電子系の動力学計算、日本物理学会第55回年次大会、新潟大学、2000年9月
- [61] 田村 了、塚田捷: 金属ナノチューブ・半導体ナノチューブ接合の電圧・電流特性、日本物理学会第56回年次大会、中央大学多摩校舎、2001年3月
- [62] 佐々木成朗、塚田捷: 「非接触原子間力顕微鏡が見る世界 - 相互作用・構造転移・摩擦」科学研究費補助金「特定領域研究 (B)」(平成11年度-平成14年度)
平成12年度第1回研究会、2000年7月5日。
- [63] 佐々木成朗、相澤秀昭、塚田捷: 「AFM 探針が誘起する Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面の非対称構造転移 - 相互作用力と非接触 AFM 像の第一原理計算」日本物理学会第55回年次大会、新潟大、2000年9月22日-9月25日。
- [64] 佐々木成朗、渡邊聡、相澤秀昭、塚田捷: 「Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面の非接触 AFM 像に現れる熱揺らぎの第一原理的研究」第48回応用物理学関係連合講演会、明治大、2001年3月28日-3月31日。
- [65] 佐々木成朗、渡邊聡、相澤秀昭、塚田捷: 「Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 非対称構造表面の非接触 AFM 像の第一原理シミュレーション」日本物理学会第56回年次大会、中央大、2001年3月27日-3月30日。
- [66] 相澤秀昭、佐々木成朗、塚田捷、垣谷公德、吉森昭夫: 「Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面構造の対称性の破れに関するポテンシャル面」日本物理学会第55回年次大会、新潟大、2000年9月22日-9月25日。
- [67] 垣谷公德、吉森昭夫、相澤秀昭、塚田捷: 「Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面の Debye-Waller 因子」日本物理学会第55回年次大会、新潟大、2000年9月22日-9月25日。
- [68] 中西祥介、塚田捷: 1次元電極に接続されたフラレーンの内部電流、日本物理学会第55回年会、新潟大学、2000年9月
- 招待講演
- [69] 佐々木成朗、塚田捷: 「原子スケールの摩擦 - 摩擦力顕微鏡」日本物理学会第55回年次大会 合同シンポジウム「摩擦の物理」、新潟大、2000年9月22-25日。
- [70] 佐々木成朗、塚田捷: 「散逸の微視的機構」京都大学基礎物理学研究所研究会「摩擦の物理」、京大基礎研、2000年11月15-17日。
- [71] 佐々木成朗: 「非接触 AFM 国際会議報告」日本トライボロジー学会「マイクロマシンのトライボロジー第3種研究会」名古屋大学 VBL、2000年12月7日。
- [72] 佐々木成朗、塚田捷: 「Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag IET 構造表面の非接触 AFM 像シミュレーション」創成的基礎研究「表面・界面-異なる対称性の接点の物性」平成12年度研究会「Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 構造」、東京大学学士会館分館、2000年12月25-26日。
- [73] 塚田捷、小林伸彦、M. Brandbyge、中西祥介: 原子ワイヤと分子架橋の量子輸送、ワークショップ「原子尺度の表面デザイン - 低次元性機能の発現をめざして - 」(東京大学物性研究所、2000. June 8)
- [74] 塚田捷: 原子架橋と分子架橋の量子現象、京都大学分子工学専攻「分子工学コロキウム」(2000. June 9)
- [75] 塚田捷: SPM の理論、ナノプローブテクノロジー第167委員会、(株)日立製作所、2000. July 7)
- [76] 塚田捷: ナノ構造系の量子輸送、JST 異分野研究者交流ワークショップ、単一分子情報システムの構築、(ハケ岳ロイヤルホテル、2000. August 23-25)
- [77] 塚田捷、小林伸彦、M. Brandbyge、中西祥介: ナノ接合の量子コンダクタンスの理論、物理学会シンポジウム、「ナノ接合と量子化コンダクタンス」(新潟大学、2000. September 23)

-
- [78] 塚田捷、佐々木成朗：非接触原子間力顕微鏡の理論的課題、2000年(平成12年)秋季第61回応用物理学会学術講演会「力学に基づいた原子分子技術 - 原子間力顕微鏡 - 」シンポジウム(北海道工業大学)
- [79] 塚田捷：原子鎖および分子架橋構造の量子伝導の理論、第3回分子エレクトロニクス研究会(メルパルク松山、2000,Nov.6-8)
- [80] 塚田捷：電子放出機構の量子力学的基礎、第29回薄膜・表面物理基礎講座「新カーボン系材料の基礎と応用」(早稲田大学,2000,Nov.9-10)
- [81] 塚田捷：新カーボン系の電子状態、第29回薄膜・表面物理基礎講座「新カーボン系材料の基礎と応用」(早稲田大学,2000,Nov.9-10)
- [82] 塚田捷、赤木和人、相沢秀昭、佐々木成朗、小林伸彦、中西祥介：第一原理計算と表面、物性研・研究会シリーズ「物性理論研究のフロンティア」(物性研、2000.Nov.28 -30)
- [83] 塚田捷：表面およびナノ構造の第一原理計算、物性研短期研究会「物性研究における計算物理」(物性研、2000.Dec.11-13)

3.3 青木研究室

我々は一貫して、「超伝導」、「強磁性」、「分数量子ホール効果」に代表される多体状態を理論的に調べてきた。特に興味をもっているのは、電子相関効果（電子が互いの斥力のために複雑に運動するために生じる、特有な量子状態）のために、対称性（特にゲージ対称性）の破れが発現する様子と、相互作用を入れる前のバンド構造との関連である。つまり、特徴的なバンド構造に多体相互作用をスイッチオンすれば、特徴的な量子効果を生じるであろう、という問題意識である。

3.3.1 超伝導

今年度も引き続き電子間斥力からの超伝導について調べた。直観的には、斥力からも、（スピン、電荷の）揺らぎを交換して異方的ペアリング（Cooper pair内の2電子がノンゼロな相対角運動量をもち、超伝導ギャップ関数が節（node）をもつ）が起き得る。普通はペアのスピンは反平行（シングレット）であるが、近年様々な物質でスピン・トリプレットのペアリングが生じている可能性が指摘されていることにも触発され、様々な系においてトリプレット超伝導の可能性も含めて検討した。

2次元,3次元 Hubbard 模型におけるシングレットおよびトリプレット超伝導

有田、黒木、青木は、最も簡単な短距離斥力模型である Hubbard 模型における超伝導の基本的一般論として、(i) Hubbard 模型における強磁性相隣傍にトリプレット超伝導の可能性はあるか？(ii) 2次元は3次元に比べて超伝導に有利なのか？という問題に取り組んだ [2, 20]。「揺らぎ交換近似 (fluctuation exchange ; FLEX)」と呼ばれる手法を用いて、3次元を含む様々な格子形と電子密度をスキャンした結果、銅酸化物に対応する2次元反強磁性相隣のd波超伝導が‘best case’、つまり最も高い転移温度（それでも $k_B T_C$ は電子のホッピング積分 t (バンド幅) の1%程度、 $t \sim 1$ eV とすると $O(100)$ K) を持つことがわかった。

非連結なフェルミ面を持つ Hubbard 模型における超伝導

上記の結果では、通常は Hubbard 模型におけるトリプレット超伝導は、スピン揺らぎ交換による相互作用が小さいことと、強磁性的揺らぎを得るためにフェルミ面における状態密度を大きくすると準粒子が短寿命になることから不利（低い T_C ）である。黒木、有田は、非連結なフェルミ面をもつ系においては、ギャップ関数の node がフェルミ面と交差することを避け得るのでトリプレット超伝導が有利になる可能性を指摘し、実際に非連結フェルミ面である三

角格子と蜂の巣格子について、比較的高い転移温度を持つトリプレット超伝導が生じることを示した [1]。

このアイディアは、実はシングレット・ペアリングでも適用できるので、ギャップ関数がフェルミ面上で node を持たないようにさせると、フェルミ面が単連結の場合の $k_B T_C \sim 0.01t$ よりはるかに高い T_C を持つことが示される [5]。

酸化物におけるトリプレット超伝導

具体的な物質としてトリプレット超伝導の候補とされているものに、ルテニウムの酸化物 Sr_2RuO_4 がある。上述のように通常はトリプレット超伝導は起きにくい、磁気異方性を考慮すれば、反強磁性的なスピン揺らぎからもトリプレット超伝導が有利になることが本教室の小形ら、また独立に物性研の甲元らによって示されている。しかし、 Sr_2RuO_4 は二組の1次元的フェルミ面をもち、ギャップ関数の形がどうなるかは明らかでない。黒木、有田、青木は、小形と共に、このフェルミ面の形をもつ模型に対して磁気異方性も考慮した FLEX 計算による考察を行った。その結果、時間反転対称性を破ったトリプレット（軌道は p 波）が有利化し、ギャップ関数形は、通常仮定される単純な $\sin k_x + i \sin k_y$ ではなく、二組の1次元的フェルミ面を反映した特有な形 (Fig.1) をしていることを明らかにした [3, 30, 40]。

有機超伝導体におけるトリプレット f 波ペアリング

トリプレット超伝導の他の重要な候補とされているものに、有機導体 $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$ がある。この物質も磁気異方性をもつ1次元的物質であるが、トリプレット超伝導を特徴付ける d ベクトルが、 Sr_2RuO_4 においては磁気容易化軸 z と平行であるのに対して、TMTSF では垂直なので、超伝導の機構は同じではあり得ない。黒木、有田、青木は、 $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$ に対して、磁気異方性に加え電荷揺らぎ交換の効果を考えて $d \perp z$ のペアリングが起き得るであろうというアイディアから、FLEX 計算および現象論的を展開した (Fig.2)。その結果、この有機金属においては、トリプレットはトリプレットでも、p 波（ギャップ関数の node が1本）ではなく、d 波ギャップ関数にさらに node をいれて3本にしたような f 波ペアリングが実現する可能性があることが示された [4, 31, 41]。

以上のような超伝導理論について、研究会報告を行った [37, 39]。

3.3.2 強磁性

電子間斥力からスピンが揃う強磁性が得られるか、というのも基本的な電子相関の問題である。一般には強磁性状態は、運動エネルギー的に損なので、強磁性を実現できる条件・模型を見つけるのはチャレ

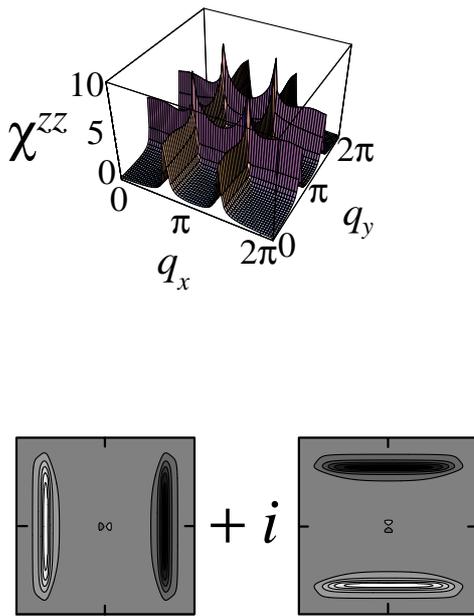


図 3.3 a: The superconductivity gap function for Sr_2RuO_4 is contour-plotted in k space with white(black) corresponds to positive(negative) amplitude. The upper panel depicts the spin susceptibility.[3]

ンジとなる。

3次元格子上的 Hubbard 模型における強磁性・反強磁性

斥力相互作用からの強磁性がどんな場合に有利化するかについては、金森理論など長い歴史があるが、これを現代的な観点から再訪するために、有田、小野田(物性研)、黒木、青木は昨年度以来、様々な3次元格子(単立方、FCC、BCCにおいて、次隣接ホッピングも入れて van Hove 特異点の位置もスキップした)Hubbard 模型に対して FLEX 近似、および vertex 補正を取り入れた TPSC 近似という解析的方法を用い、スピン感受率を計算して磁気的性質を調べた [6]。その結果、FCC のように状態密度の発散がバンドの底に位置し、その近傍にフェルミ準位があるときに強磁性的の傾向が最も強くなることがわかった。

強磁性近傍における電気伝導

一体のバンドが平坦である模型では電子相関からの強磁性が現れ易い、という提案がある。これが、

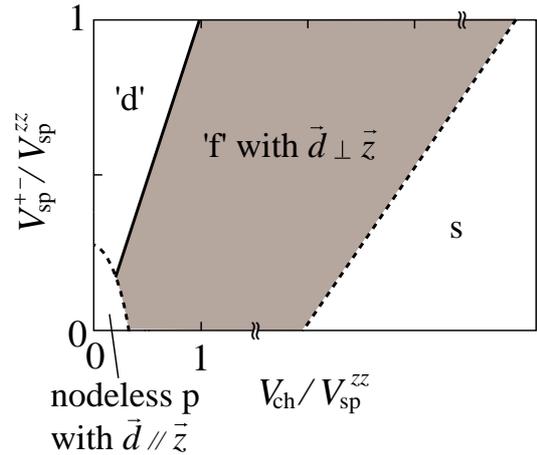


図 3.3 b: A phase diagram against the ratio, $V_{\text{ch}}/V_{\text{sp}}^{zz}$, of the charge- and spin-fluctuation mediated interaction, and the spin anisotropy, $V_{\text{sp}}^{+-}/V_{\text{sp}}^{zz}$. Note that all of s, p, d, f wave pairings appear.[4]

現実の物質で実現すれば興味深い。有田、黒木、青木は村田(大阪市大理)らによる τ 型有機導体における磁気抵抗の実験に触発され、バンドに平坦な部分と dispersive な部分がある場合には、電子相関から強磁性的揺らぎが発達し、このため磁場をかけて Zeeman 分裂させると電流が流れ易くなる(負の磁気抵抗が生じる)ことを提案した。この直観像を、低電子密度においてバンドの平坦性から強磁性的揺らぎが発達することが知られている2次元 t - t' - U 模型に対して FLEX 近似を用いて磁気抵抗を線形応答理論により計算した [8]。その結果、低温で確かに負の磁気抵抗が現れる。

スパイラル・スピン状態

Hubbard 模型をはじめとする強相関系で発現するスピン偏極状態においては、全スピン $S=0$ ではあるがスピン相関が系の長さと同じ波長で振れているスパイラル状態と呼ばれるものが付随して現れることが知られており、熱力学的極限(無限系)におけるスパイラル状態と強磁性との関係に興味もたれる。有田、青木は、スパイラル状態は有限系では $SU(2)$ スピン回転対称性を破らないが無限系においては破り、スパイラル状態と強磁性は同じ状態であることを、密度行列繰り込み群などを用いて示した [7]。

3.3.3 表面・界面における電子相関効果

金属・半導体界面では、電子相関効果により半導体が金属化される可能性があることが、1970年代に

Inkson-Anderson によって提案されている。最近、このような可能性を検証する実験がいくつか行われつつあることから、有田、黒木、谷田(富士通研)、青木は現代的な視点からこの可能性を議論した [32]。具体的には、シリコンの表面にゼリウム模型で表した金属を接合させ、電子間相互作用を RPA のレベルで入れ (LDA 計算において GW 近似と呼ばれているもの)、この系のバンドギャップの大きさを評価して半導体の金属化の可能性を議論した。

3.3.4 分数量子ホール効果

分数量子ホール効果は、クーロン斥力相互作用する電子を 2 次元に閉じこめた系に強磁場を加えた場合に発現する 2 次元空間に特有な電子相関効果であり、Chern-Simons ゲージ場 (直感的には複合粒子 = 電子 + 磁束) 理論 [16] も展開されている。通常の電子相関系においては相互作用と運動エネルギーの競争になるのとは対照的に、磁場によるランダウ量子化のために運動エネルギーが欠如しており、全ては相互作用で決まるという特異な状況にある。電子状態はランダウ準位の詰まり方 (ν) に極めて敏感に依存する。

分数量子ホール液体における有効質量

$\nu = (\text{奇数})^{-1}$ がエネルギー・ギャップをもつ量子液体状態であるのに対し、 $\nu = (\text{偶数})^{-1}$ は複合フェルミオン描像の平均場近似ではゼロ磁場中のフェルミ液体 (ギャップレスな量子液体) であることが予測されているが、平均場からの揺らぎは大きいはずである。特に、多体理論の試金石は励起スペクトルを再現できるか否かである、という観点から、小野田、青木と水崎、大塚 (原子核理論) は $\nu = 1/2$ の有限系を数値的方法 (2000 万次元程度の 6 次元行列の厳密対角化) で解き、その低エネルギー励起スペクトルを求めた [9, 21, 16]。これから、ゼロ磁場中の複合フェルミオンの低エネルギー励起と同一の殻構造が強磁場中相互作用系の数値解に現れることを見出した。このスペクトルのサイズ・スケーリングから、準粒子の有効質量を信頼性良く評価でき、 $\nu = 1/2 \rightarrow 1/4 \rightarrow 1/6$ につれて質量が重くなる様子を示した。

さらに、 $\nu = 1/\text{奇数}$ に対する Laughlin の量子液体状態も含めて、ランダウ準位の詰まり方 ν をスキャンしたときに有効質量がどのように振舞うかを調べた。この結果、有効質量は意外にも ν の単調な関数ではなく、階段関数状であり、基本的に付着磁束本数で決まる、という結果を得た。単純な複合粒子理論では単調関数なので、これはゲージ場の揺らぎの効果といえる。

分数量子ホール液体における Hund 則

このような揺らぎが存在するときに、ランダウのフェルミ液体論が成り立つか否かは、運動エネルギーが欠如している分数量子ホール系では特に面白い問題となる。これを見るために、スピン自由度まで取り入れて、系の基底スピン状態および低エネルギー励起スペクトルを、様々な ν に対して有限系で求めた [22]。その結果、励起スペクトルは、軌道とスピンについての Hund 結合相互作用する複合粒子描像が成り立つ (即ち複合粒子が Hund の第一則 (可能な最大スピン) および第二則 (可能な最大軌道角運動量) を満たす) ようなフェルミ液体として驚く程良くフィットできるが、フェルミ液体パラメータは系のサイズに依存する等、marginal な振る舞いも見られる。

分数量子ホール系における光スペクトル

分数量子ホール系は多体系であるが、光学スペクトルから多体効果を検出する際に、並進対称性のためにサイクロトロン共鳴スペクトルは内力である電子間相互作用を反映しない (Kohn の定理)。また、電子と正孔が同一面内に閉じ込められている 2 成分系では、或る隠れた対称性のために発光のエネルギーは孤立励起子のものに一致する。浅野はこうした対称性を破った系で光学スペクトルにどのような多体効果が現れるかを、ハミルトニアンの数値対角化を用いて考察した [10, 11, 29, 33]。

強磁場中の量子ドット

分数量子ホール系を電子が数個しか含まない程小さな領域に閉じこめるとは、最近の技術で可能になっている。強磁場中では電子はサイクロトロン運動の回転中心のダイナミクスにより支配されるが、この中心の x 座標と y 座標は同時には確定せず、磁気長 (10 T の磁場で ~ 100 Å) 程度の量子零点振動を行う。この系を量子ドットに閉じこめると、電子は斥力により避け合うが、特定の「魔法数」全角運動量をもった「電子分子」構造をもつ。つまり、電子は斥力のために自発的に分子を組むが、電子がパウリの排他律を満たしながら量子零点振動を最小にするために魔法数をもつ。Maksym (Leicester 大)、今村 (東北大) は電子分子を詳しく調べてきており、スピン自由度を解明したり二重量子ドットにおける立体分子を調べた。本年度はこれらについての総説を出版した [15]。

2 次元古典電子系の固体・液体転移

2 次元古典電子系は液体ヘリウム上の電子で実現され、液相・固相転移が起きる。武藤 (覚) と青木は、量子効果 (零点振動等) を取り入れる前の分数量子ホール系の固化の問題の出発点としての意味をもつ

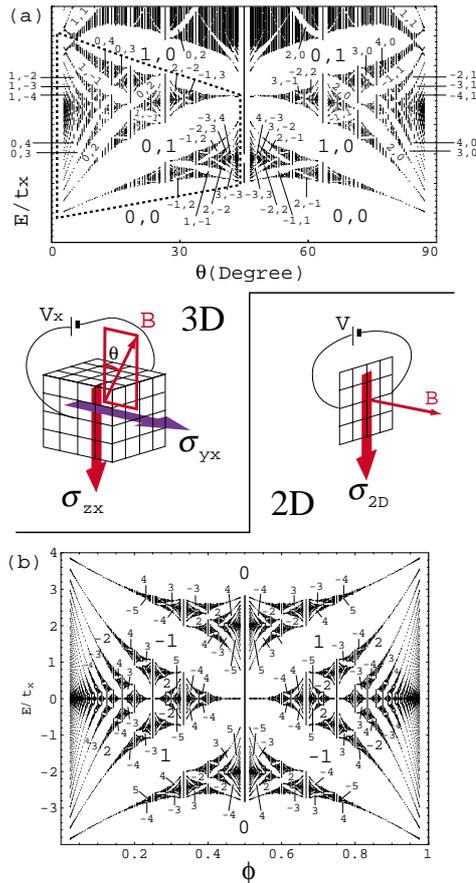


図 3.3 c: (a) The Hall conductivities (σ_{xy}, σ_{zx}) in units of $-e^2/h$ are plotted on a butterfly for a three-dimensional system. (b) The corresponding plot for the two-dimensional butterfly.[14]

ことから、古典 2 次元電子系に対して分子動力学計算 (MD) を行った [12, 13]。「有限温度では 2 次元系に真の長距離結晶秩序は存在しない」という Mermin の定理は、長距離相互作用である $1/r$ 相互作用について成立するかどうかは分かっていなかった。分子動力学計算によって電子の位置相関と角度相関の双方を見たところ、有限温度では位置の長距離秩序は無いが角度相関は長距離 (トポロジカルな秩序が存在) という結果を得た。

また、ダイナミクスに関して、振動状態密度を、速度相関関数に対する MD の結果から求めたところ、意外にも固体で存在する高振動数ピークが液体でも固執することがわかった。結晶に対する dynamical matrix を対角化することにより、このピークは平均粒子間隔程度の短波長の振動モードに対応することがわかった。経路積分モンテカルロ法による 2 次元ウィグナー結晶の多体交換エネルギーの計算も行った [34]。

武藤はこの成果を博士論文にまとめた [48]。

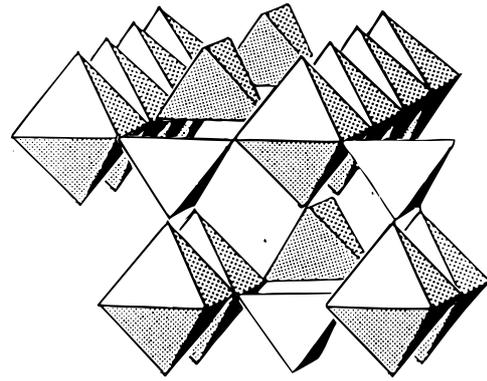


図 3.3 d: A polymorph of silica (SiO_2) under high pressure found in a molecular-dynamics study, where four-fold (tetrahedra) and six-fold (octahedra) Si coordination coexist.[18]

3.3.5 その他

3 次元系における整数量子ホール効果と butterfly

周期性をもつ 2 次元系に強磁場をかけると、エネルギー・スペクトルは Hofstadter butterfly と呼ばれるフラクタルなものになり、特異な整数量子ホール効果が生じることが知られている。3 次元系ではランダウ準位の分離や butterfly は一般には潰れるが、越野、黒木、青木、長田 (物性研) 鹿児島 (総合文化) は、異方的 3 次元 tight-binding 模型に磁場をかけた場合には、磁場方向の関数としてエネルギー・スペクトルが 2 次元での butterfly と似た構造をとることを示した。フェルミ・エネルギーがギャップ内にあるときに量子化されるホール伝導度の値も求めた (Fig.3)。この成果は *Phys. Rev. Lett.* 誌に出版された [14, 23]。

周期的極小曲面上の電子

越野、黒木、青木、森瀬、武田 (物性研) は、 C_{60} ゼオライトのように負曲率をもつ無限曲面からなる超周期系上の電子を考えた。曲面を準備するのに、3 次元空間内の電子をポテンシャル障壁で膜に閉じこめて膜厚をゼロにする極限操作と、最初から厚みがゼロの面を考える二通りがあるが、長岡等により示されたように、曲面上での量子力学においては、二通りの操作に対して微分幾何学的効果から生じる有効ポテンシャルに差が現れる。ゼオライト構造の模型として極小曲面を採用し、極小曲面に対する Weierstrass 表示を援用して、プロット電子のエネルギー・バンド構造を初めて求めた。これら二通りの操作に対するバンド構造は、意外にも似ていることが分かった。

その他

青木は、「電子相関と物質設計」についてのシンポジウム講演 [35] や、「強磁場中 2 次元系の多彩な量子現象」についてのシンポジウム講演 [36] を行った。また、青木は超伝導 [38, 44, 45]、電子相関とスピン自由度 [24] 強相関電子系における磁性 [42]、量子ホール効果 [43, 46]、についての講演を行った。

出版としては、地球物理・結晶化学と固体物理の学際的単行書の編集 [27] を行った。この書中で、「物理と鉱物学の接点」[17]、「多彩な結晶構造が固体物理学的にもつ意味」[18] についての章も執筆した (Fig.4 はその例)。この関連で講演を行い [47]、学際的研究についてコメントした [26]。また、「固体物理のこれから」について執筆した [25]。青木は、M. Pollak の *Festschrift* のために、量子相転移における輸送現象についての論文も寄稿した [19]。

青木は、14th Int. Conf. on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics を組織委員の一人として開催に協力し、会議録も編集した [28]。

なお、助手の黒木和彦は、電気通信大学量子物質工学科に転任になり、後任として有田亮太郎が着任した。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] K. Kuroki and R. Arita: Spin-triplet superconductivity in repulsive Hubbard models with disconnected Fermi surfaces: A case study on triangular and honeycomb lattices *Phys. Rev. B* **63**, 174507 (2001).
 - [2] R. Arita, K. Kuroki and H. Aoki: d- and p-wave superconductivity mediated by spin fluctuations in two- and three-dimensional single-band repulsive Hubbard model, *J. Phys. Soc. Jpn.* **69**, 1181 (2000).
 - [3] K. Kuroki, M. Ogata, R. Arita and H. Aoki: Crib-shaped triplet-pairing gap function for an orthogonal pair of quasi-one-dimensional Fermi surfaces in Sr_2RuO_4 *Phys. Rev. B* **63**, 60506(R) (2001).
 - [4] K. Kuroki, R. Arita and H. Aoki: Spin-triplet f-wave-like pairing proposed for an organic superconductor $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$ *Phys. Rev. B* **63**, 94509 (2001).
 - [5] K. Kuroki and R. Arita: @ *Phys. Rev. B*, in the press.
 - [6] R. Arita, S. Onoda, K. Kuroki and H. Aoki: Magnetic properties of the Hubbard model on three-dimensional lattices: fluctuation-exchange and two-particle self-consistent studies, *J. Phys. Soc. Jpn.* **69**, 785 (2000).
 - [7] R. Arita and H. Aoki: Relationship between spiral and ferromagnetic states in the Hubbard model in the thermodynamic limit, *Phys. Rev. B* **61** 12 261 (2000).
 - [8] R. Arita, K. Kuroki and H. Aoki: Electron-correlation-originated negative magnetoresistance in a system having a partly flat band, *Phys. Rev. B* **61**, 3207 (2000).
 - [9] Masaru Onoda, Takahiro Mizusaki, Takaharu Otsuka, and Hideo Aoki: Excitation spectrum and effective mass of the even-fraction quantum Hall liquid, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 3942 (2000).
 - [10] Kenichi Asano and Tsuneya Ando: Two-component cyclotron resonance in bilayer quantum Hall systems, *Physica E* **6**, 636 (2000).
 - [11] Kenichi Asano and Tsuneya Ando: Electron-electron interaction effects in integer quantum Hall photoluminescence, *Physica E*, **7**, 604 (2000).
 - [12] S. Muto and H. Aoki: Molecular dynamics study of a classical two-dimensional electron system — positional and orientational orders, *Physica E* **6** 116 (2000).
 - [13] S. Muto and H. Aoki: Persistence of vibrational modes in a classical two-dimensional electron liquid, *J. Phys. Condensed Matter* **12**, L83 (2000).
 - [14] M. Koshino, H. Aoki, K. Kuroki, S. Kagoshima, and T. Osada: Hofstadter Butterfly and Integer Quantum Hall Effect in Three Dimensions, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 1062 (2001). .
- (総説)
- [15] P.A. Maksym, H. Imamura, G. Mallon and H. Aoki: Molecular aspects of electron correlation in quantum dots, *J. Phys. Condensed Matter* **12**, R299 (2000).
 - [16] H. Aoki: Composite fermions — excitation spectra in the odd- and even-fraction quantum Hall liquids in *Dynamics of Gauge Fields* (Universal Academy Press, 2000), p. 371.
 - [17] H. Aoki, Y. Syono and R. J. Hemley: Physics and mineralogy — the current confluence, in *Physics Meets Mineralogy — Condensed-Matter Physics in Geosciences*, ed. by H. Aoki, Y. Syono and R. J. Hemley (Cambridge Univ. Press, 2000).
 - [18] Hideo Aoki: Opportunities in the diversity of crystal structures — a view from condensed-matter physics, in *Physics Meets Mineralogy — Condensed-Matter Physics in Geosciences*, ed. by H. Aoki, Y. Syono and R. J. Hemley (Cambridge Univ. Press, 2000).
 - [19] Hideo Aoki: Transport around criticalities — localisation-delocalisation and paramagnetic-ferromagnetic transitions, in *Festschrift in honour of Michael Pollak*, *Phil. Mag.*, in the press.
- (国際会議録)
- [20] R. Arita, K. Kuroki and H. Aoki: Fluctuation exchange study of singlet and triplet superconductivity in 2D and 3D single-band Hubbard model, in

- Proc. CREST Int. Workshop — Pseudogap, Spin Gap and Anomalous Metals* [*J. Phys. Chem. Solids* **62**, 249 (2001)].
- [21] M. Onoda, T. Mizusaki, T. Otsuka, and H. Aoki: How the composite-fermion picture describes the excitation spectrum of the even-fraction quantum Hall liquid, *Proc. 25th Int. Conf. on Physics of Semiconductors*, Osaka, 2000, in the press.
- [22] M. Onoda, T. Mizusaki, T. Otsuka and H. Aoki: Composite fermion picture and the spin states in the fractional quantum Hall system — a numerical study *Proc. 14th Int. Conf. on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics*, Matsue, 2000 [*Physica B*, in the press].
- [23] M. Koshino, H. Aoki, K. Kuroki, S. Kagoshima and T. Osada: Butterfly spectrum and integer quantum Hall effect in three dimensions — a mapping between 2D and 3D Hofstadter problems *Proc. 14th Int. Conf. on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics*, Matsue, 2000 [*Physica B*, in the press].
- [24] H. Aoki: Spin states and transport in correlated electron systems in *Low-Dimensional Systems — Interactions and Quantum Transport Properties* ed. by T. Brandes (Springer Series 'Lecture Notes in Physics' 544, Springer, 2000), p. 167.
- (国内雑誌)
- [25] 青木秀夫: Nevill Mott の物理と固体物理のこれから、*固体物理* **35**, 451 (2000).
- [26] 青木秀夫: 物理学と鉱物学、*固体物理* **35**, 968 (2000).
- (著書)
- [27] Hideo Aoki, Yasuhiko Syono and Russell J. Hemley (editors): *Physics Meets Mineralogy — Condensed-Matter Physics in Geosciences*, Cambridge Univ. Press, 2000.
- [28] G. Kido, H. Aoki and K. Takita (editors): *Proc. 14th Int. Conf. on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics*, Matsue, 2000, *Physica B*, in the press.
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 招待講演
- [29] Kenichi Asano and Tsuneya Ando Temperature dependence of integer quantum Hall photoluminescence (25th Int. Conf. on Physics of Semiconductors, Osaka, 17-22 Sept. 2000).
- (国内会議)
- 一般講演
- [30] 黒木和彦、有田亮太郎、青木秀夫: 有機導体 (TMTSF)₂PF₆ におけるスピン・トリプレット超伝導のスピン・電荷揺らぎ発現機構 (日本物理学会、新潟、2000.9.22-25)。
- [31] 黒木和彦、小形正男、有田亮太郎、青木秀夫: Sr₂RuO₄ における異方的スピン揺らぎからの超伝導ギャップ関数とトリプレット・シングレット競合 (日本物理学会、東京、2001.3.27-30)。
- [32] 有田亮太郎、谷田義明、黒木和彦、青木秀夫: 金属/半導体接合系のエネルギーギャップ (日本物理学会、東京、2001.3.27-30)。
- [33] 浅野建一: 量子ホール効果領域における電子・正孔系とスカーミオン効果 (日本物理学会、東京、2001.3.27-30)。
- [34] 武藤覚、青木秀夫、Peter Maksym: 経路積分モンテカルロ法による 2 次元ウイグナー結晶の多体交換エネルギーの計算 (日本物理学会、新潟、2000.9.22-25)。
- 招待講演
- [35] 青木秀夫: 電子相関と物質設計 — イントロダクション (日本物理学会「電子相関と新しい物質設計・物質探索」シンポジウム、新潟、2000.9.22-25)。
- [36] 青木秀夫: イントロダクション (日本物理学会「強磁場中 2 次元系の多彩な量子現象」シンポジウム、東京、2001.4.27-30)。
- (セミナー・研究会)
- [37] 青木秀夫: 斥力からの異方的超伝導 (東京理科大学、2000.6.29-7.1)。
- [38] 青木秀夫: 有機導体におけるスピン・トリプレット超伝導 (応用物理学会北海道支部講演会、2000.7.14)。
- [39] 青木秀夫、黒木和彦: Spin fluctuation mediated pairing in strongly correlated multiband systems ((科研費特定領域 (A) 「遷移金属酸化物における新しい量子現象」研究会、京大化研、2000.6.20-21))。
- [40] 黒木和彦、小形正男、有田亮太郎、青木秀夫: Spin-triplet superconductivity from antiferromagnetic spin fluctuations in Sr₂RuO₄ (Int. Workshop on Novel Quantum Phenomena in Transition Metal Oxides — Recent Advances in High T_c Superconductors and Related Systems、仙台、2000.11.13-15)
- [41] 黒木和彦、有田亮太郎、青木秀夫: Spin triplet superconductivity from antiferromagnetic spin fluctuations (科研費特定領域 (A) 「遷移金属酸化物における新しい量子現象」成果報告会、仙台、2001.1.8-10)
- [42] Hideo Aoki: Flat-band ferromagnetism — an electron correlation effect (Oxford 大学物理学教室セミナー、2000.11.27)。
- [43] Hideo Aoki: A composite look at the quantum Hall system — fractality and composite particles (Nottingham 大学物理学教室セミナー、2000.12.7)。
- [44] Hideo Aoki: Superconductivity from electron repulsion — anisotropy and spin states (Imperial College 物理学教室セミナー、2001.1.17)。
- [45] Hideo Aoki: Spin-triplet pairing in correlated electron systems (Oxford 大学物理学教室セミナー、2001.1.18)。

-
- [46] Hideo Aoki: Can the composite fermions describe excitations in the fractional quantum Hall systems? (Leicester 大学物理学教室セミナー、2001.1.24).
- [47] Hideo Aoki: Opportunities in diverse crystal structures (Birmingham 大学物理学教室セミナー、2001.1.25).

(学位論文)

- [48] Satoru Muto: Numerical study of two-dimensional Wigner solids、博士論文、2000年12月.

3.4 小形研究室

物性理論、凝縮系とくに量子現象が顕著に現れる多電子系の理論、すなわち強い相関のある電子系、高温超伝導の理論、モット金属・絶縁体転移、磁性、有機伝導体などの低次元伝導体、メゾスコピック系、軌道・スピン・電荷の複合した物質、従来と異なった新しい超伝導現象、非線形励起(スピノン・ホロン)などに関する理論を研究している。とくに、場の理論的手法、厳密解、くりこみ群、変分法、計算機シミュレーションなどの手法を組み合わせ用いている。2000年10月から、京都大学の柳瀬陽一さんが新しく助手として研究室に参加した。

3.4.1 高温超伝導の理論

強相関電子系のフェルミ面

高温超伝導体ではフェルミ面上の特殊な点(波数空間で $(0, \pi)$ などの点)において、伝導性を担う準粒子に異常が見られ、このことが異常金属状態の原因であると考えられている。これは平坦バンドや擬ギャップの問題として知られている。一方、フェルミ面の形は相互作用によって変形する可能性があることも知られている。我々はこの両者の問題が高温超伝導のモデルにおいて密接に関連していることを示した。[2] 具体的には高温超伝導のモデルハミルトニアンである t - J モデルに対して、絶対零度における変分波動関数を新たに考察し、強相関の効果を調べた。その結果、広いパラメータ領域においてフェルミ面が自発的に変形した状態が安定化し、実験とよく一致するフェルミ面が得られることがわかった。この結論は、他の近似計算である高温展開の結果とも一致している。相互作用によるフェルミ面の変形という一般的な現象について、従来の摂動論的な方法と全く異なった手法によっても調べることができるといことが初めて示された。

ストライプ状態

強相関に起因する特殊な形の波動関数として、電荷密度波と反強磁性の密度波(とくにインコメンシュレート)の波数を持つスピン密度波)および、 d 波対称性を持つ超伝導秩序の3者が空間的に波打ちながら共存しているストライプ状態と呼ばれるものが可能である。実験的にもこのような形での超伝導と反強磁性の共存という可能性が見出されている。このストライプ状態が t - J モデルにおいて実現するかどうかについて、上記と同じような絶対零度における変分法によって調べた。[10, 32, 45] とくに超伝導の秩序変数の符号が、空間的に正負を交替しながら存在するという今まで考えられて来なかったような特異な状態が安定化する可能性が示された。

高温超伝導体の擬ギャップ現象

高温超伝導体における異常金属状態は、擬ギャップ(または、スピンギャップ)に起因するものであると考えられている。この現象について、フェルミ液体論から出発し、強い超伝導揺らぎを考慮するという観点から調べた。その結果ハバードモデルという単純なモデルによって、微視的に擬ギャップ現象を説明することができることが示された。さらに実験との比較により、この理論の正当性についても確認することができ、種々の実験(光電子分光、トンネル分光、NMR、中性子散乱、輸送係数、光学伝導度など)の結果をよく説明することを示した。[12, 13, 14, 15, 33]

強相関電子系の低温比熱、低温エントロピーとスピン電荷分離

典型的な強相関電子系のモデルである t - J モデルについて、高温展開の手法により有限温度とくに低温領域での比熱、エントロピーを調べた。[34] 自由エネルギーの高温展開では、絶対零度への外挿が常に問題になるが、我々は、現在までの計算より高次の次数まで計算を進め、さらに新しい外挿法を組み合わせることによって低温領域での自由エネルギーを精度よく評価することができた。その結果、絶対零度での相分離の可能性が強いことを示した。また得られた低温比熱やエントロピーのドーピング依存性や温度依存性は実験とのよい一致を示す。さらに、エントロピーが急速に増加する2つの特徴的な温度領域があることが見出され、これは t - J モデルにおけるスピン・電荷分離の結果であるという議論を展開した。

グッツウィラー近似の拡張

高温超伝導などの問題で重要になる強相関の効果を、理論的にどのように取り入れればよいかという問題は未解決のものである。Gutzwiller 近似はその1つの方法であり、強相関の効果を t - J モデル中の変数 t と J の「くりこみ」として取り入れている。しかし超伝導と反強磁性の共存などを考慮する際には、従来の近似方法を拡張しなければならないことが分かった。この方法によると、反強磁性がある場合、変数 t と J の強相関によるくりこみが大きく変更を受けるといことがわかる。[18, 8]

3.4.2 d 波超伝導体における不純物および磁束近傍の電子状態

不純物近傍の電子状態

高温超伝導体は $d_{x^2-y^2}$ 波超伝導という従来型の s 波超伝導と異なる異方的超伝導体であると考えられている。このような異方的超伝導における不純物の

効果については、実験的にも理論的にも興味を持たれている。実験では Cu を Zn や Ni で置き換えることに相当する。Zn の場合は非磁性 ($S = 0$)、Ni の場合は磁性 ($S = 1$) 不純物となるが、不純物が非磁性であるにも係わらず、磁気モーメントが発生している可能性が指摘されている。この現象について、 t - J モデルの平均場近似を用いて理論的に調べた。その結果、強相関の効果で伝導性を担うキャリア数が少なくなっている場合には、磁気モーメントが発生する可能性があることがわかった。[11] また磁性不純物の近傍では、不純物の持つスピンの局所的な磁場をあたえるので、ゼロエネルギーピークを分裂させるということが明かになった。[1, 19, 26] この現象は実験的に検証できるものである。

磁束周辺の電子状態

超伝導体に磁場をかけると、磁束が導入される。とくに異方的超伝導における磁束まわりの電子状態は、従来の s 波対称性を持つ BCS 超伝導の場合と異なって、興味深いことが起こる。さらに高温超伝導体ではコヒーレンス長が短いことと、反強磁性ゆらぎが強いことにより、特殊な磁束状態が可能になる。このことについて Gutzwiller 近似を用いて調べ、磁束中心付近で d 波超伝導が壊される代わりに、反強磁性が生じるという可能性を示した。また磁束の持つ電荷について調べた。[16, 25]

3.4.3 p 波超伝導体

Sr_2RuO_4 という物質は、高温超伝導体と非常に似た構造をしているが、超伝導は、 p 波対称性を持つ triplet 超伝導体である。この超伝導発現の機構を微視的な立場から理解するために、今までのスピンゆらぎによる超伝導発現の理論を拡張した。とくに (1) スピンゆらぎの異方性が強く (2) フェルミ面の形状とネスティング条件がよい場合には、反強磁性スピンゆらぎによっても triplet 超伝導が実現することを示した。[3, 30] これは従来のような、強磁性スピンゆらぎによる triplet 超伝導の発現機構と全く異なる新しいものである。このことは FLEX 近似によっても確かめられた。[4]

3.4.4 2次元スピン系でのスピン励起

フラストレーションのない2次元スピン系の基底状態には反強磁性の長距離秩序があり、スピン波の励起が低エネルギー励起として存在している。しかしもっと高いエネルギー領域でのスピン励起がどのような構造を持つかについてはわかっていない。最近の中性子散乱の実験で、この領域も精度よく実験できるようになってきた。一方、理論的には通常の反強磁性の平均場近似の結果はよく知られているが、高温超伝導を契機に考えられた RVB 状態または π -flux 状態においては通常と異なったスピン励起(スピノン

励起)が期待される。我々は、この違いがどのような形で現れるか調べ、実験的に検証できるということを提唱した。[5]

3.4.5 低次元有機物質に関する理論

有機伝導体において、2種類の密度波(電荷密度波、スピン密度波)が共存することが実験的に見出されている。この結果は、従来の1次元パイエルス不安定性の議論からは理解できないものであった。しかし長距離のクーロン斥力を考慮すると、共存状態が素直に理解できる。我々はこのアイデアをさらにくりこみ群を用いて調べ、温度領域によってスピン密度波的に見える状態から低温での Mott 絶縁体状態へクロスオーバーするということを示した。このことは実験で観測されており、この興味深い現象がくりこみ群の観点から理解できることを示した。[35]

また p -EPYNN- $[\text{Ni}(\text{dmit})_2]$ という有機物質は、大きなスピンギャップを持つ梯子型の構造を持つ。この物質に不純物を導入すると、不純物周りに特徴的なスピン配置を伴った局在スピンの励起されることが実験的にわかった。この結果についてスピン系による解析を行なった。[7]

3.4.6 フラストレーションのある系での電子状態

$\text{PrBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ という酸化物には、 Cu-O の2本鎖がフラストレートした形で含まれている。この物質は鎖方向に金属的伝導性を示すが、ほとんど同じ形の物質で1本鎖の場合($\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$)には絶縁体である。我々はこの特異な現象がフラストレーションによる1次元電荷密度波の融解という観点から説明できるということを示した。[9] 実際には、幾何学的フラストレーションがある場合に長距離クーロン斥力が働くと、高いエネルギーのまま金属状態になることが数値計算によって示された。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] H. Tsuchiura, Y. Tanaka, M. Ogata and S. Kashiwaya: Phys. Rev. Lett. **84**, 3165-3168 (2000). "Local density of states around a magnetic impurity in high- T_c superconductors based on the t - J model"
- [2] A. Himeda and M. Ogata: Phys. Rev. Lett. **85**, 4345-4348 (2000). "Spontaneous Deformation of the Fermi Surface due to Strong Correlation in the Two-Dimensional t - J Model"
- [3] T. Kuwabara and M. Ogata: Phys. Rev. Lett. **85**, 4586-4589 (2000). "Spin-Triplet Superconductivity due to Antiferromagnetic Spin-Fluctuation in Sr_2RuO_4 "
- [4] K. Kuroki, M. Ogata, R. Arita and H. Aoki: Phys. Rev. B **63**, 060506(R) (2001). "Crib-shaped

- triplet-pairing gap function for an orthogonal pair of quasi-one-dimensional Fermi surfaces in Sr_2RuO_4 ”
- [5] C.-M. Ho, V. N. Muthukumar, M. Ogata, and P. W. Anderson: Phys. Rev. Lett. **86**, 1626-1629 (2001). “Nature of Spin Excitations in Two-Dimensional Mott Insulators: Undoped Cuprates and Other Materials”
- [6] Y. Tanuma, Y. Tanaka, M. Ogata and S. Kashiwaya: J. Phys. Soc. Jpn. **69**, 1472-1476 (2000). “Local density of states near the surface of a d+s-wave superconductor in the two-dimensional t - J model”
- [7] T. Otsuka, M. Yoshimaru, N. Wada, M. Ogata, K. Awaga, H. Imai, and T. Inabe: preprint. “Magnetic transition induced by paramagnetic lattice defects in the molecular ladder p -EPYNN·[Ni(dmit) $_2$]”
- [8] M. Ogata and A. Himeda: preprint. “Effect of Exclusion of Double Occupancies in t - J Model: Extension of Gutzwiller Approximation”
- [9] H. Seo and M. Ogata: submitted to Phys. Rev. B. “Metallic State Driven by Frustrated Electronic Correlation in Cu-O Double Chain of $\text{PrBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ ”
- [10] A. Himeda, T. Kato and M. Ogata: preprint. “Coexistence between charge stripes and d-wave superconductivity in the two dimensional t - t' - J model”
- [11] H. Tsuchiura, Y. Tanaka, M. Ogata and S. Kashiwaya: preprint. “Local magnetic moments around a nonmagnetic impurity in the two-dimensional t - J model”
- [12] Y. Yanase and K. Yamada: J. Phys. Soc. Jpn. **69**, 2209-2220 (2000). “Effect of Magnetic Field on the Pseudogap Phenomena in High- T_c Cuprates”
- [13] T. Jujo, Y. Yanase and K. Yamada: J. Phys. Soc. Jpn. **69**, 2240-2249 (2000). “Theory on Pseudo gap and Superconducting State in Strong Coupling Superconductors”
- [14] Y. Yanase, T. Jujo and K. Yamada: J. Phys. Soc. Jpn. **69**, 3664-3677 (2000). “Theory on Superconducting Transition from Pseudogap State”
- [15] Y. Yanase and K. Yamada: to appear in J. Phys. Soc. Jpn. **70** No.6 (2001). “Pseudogap Phenomena and Superconducting Fluctuations in Hubbard Model for High- T_c Cuprates”
- (会議抄録)
- [16] M. Ogata: Proceedings of the Second International Conference on *New Theories, Discoveries, and Applications of Superconductors and Related Materials* (New 3 SC) (Las Vegas, May 31 - June 4, 1999). Int. J. of Mod. Phys. B **13**, 3560-3565 (2000). “Electronic States and Mixing of Different Symmetry or Antiferromagnetism in Vortex Cores in $d_{x^2-y^2}$ -wave Superconductivity”
- [17] H. Fukuyama, H. Seo and H. Kino: XXII international Conference on Low Temperature Physics (LT22, Helsinki, Finland, August 4-11, 1999) Physica B **280**, 462-466 (2000). “Interplay between Structure and Electronic Properties in Organic Conductors”
- [18] A. Himeda and M. Ogata: XXII international Conference on Low Temperature Physics (LT22, Helsinki, Finland, August 4-11, 1999) Physica B **284-288**, 429-430 (2000). “Numerical estimation of Gutzwiller factors in the two-dimensional t - J model”
- [19] H. Tsuchiura, Y. Tanaka, M. Ogata and S. Kashiwaya: (LT22) Physica B **284-288**, 427-428 (2000). “The resonance states around an impurity in $d_{x^2-y^2}$ -wave superconductors”
- [20] Y. Yanase and K. Yamada: (LT22) Physica B **284-288**, 665-666 (2000). “Pseudogap Phenomena in High- T_c Cuprates as a Precursor of the Strong Coupling Superconductivity”
- [21] H. Seo and H. Fukuyama: (LT22) Physica B **284-288**, 1539-1540 (2000). “Charge Ordering in Charge Transfer Organic Compounds”
- [22] M. Ogata: Proceedings of International Workshop on *Magnetic Excitations in Strongly Correlated Electrons* (Hamamatsu, August 19-22, 1999). J. Phys. Soc. Jpn. **69**, Supple. B. pp. 22-25 (2000). “Stripe States in the Two-Dimensional t - J Model”
- [23] H. Fukuyama and H. Seo: J. Phys. Soc. Jpn. **69**, Supple. B. pp. 144-148 (2000). “Interplay between Lattice Structure and Electronic Properties in Organic Conductors”
- [24] Y. Yanase and K. Yamada: International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES'99, Nagano, August 24-28, 1999) Physica B **281&282**, 796-797 (2000). “Theory of Pseudogap Phenomena in High- T_c Cuprates and their Magnetic Field Dependences”
- [25] M. Ogata: Proceedings of the 12th International Symposium on Superconductivity (ISS'99) (Morioka, Japan, November 17-19, 1999), *Advances in Superconductivity XII* ed. by T. Yamashita and K. Tanabe (Springer Tokyo 2000) pp. 62-67. “Impurities and Vortex Cores in the t - J Model”
- [26] H. Tsuchiura, Y. Tanaka, M. Ogata and S. Kashiwaya: Proceedings of CREST International Workshop — Pseudo Gap, Spin Gap and Anomalous Metals — (Nagoya, January 24 - 26, 2000), J. Phys. Chem. Solids **62**, 265-267 (2001). “Magnetic impurities in t - J model”
- [27] Y. Yanase and K. Yamada: CREST International Workshop J. Phys. Chem. Solids **62**, 215-220 (2001). “Pseudogap State and Superconducting State in High- T_c Cuprates: Anomalous properties in the Observed Quantities”

- [28] A. Himeda and M. Ogata: Proceedings of The Third International Conference on *New Theories, Discoveries, and Applications of Superconductors and Related Materials* (New³SC) (Honolulu, Hawaii, January 15-19, 2001). to appear in Physica C. “Charge Modulation, Antiferromagnetism and d-wave Superconductivity in the Two-Dimensional $t-t'-J$ Model”
- (国内雑誌)
- [29] 小形正男: 日本物理学会誌 Vol. 55 No. 8 (2000) p. 619-620. “科学における創発性、還元主義、シームレスウェブ P. W. Anderson 序にかえて”
- [30] 桑原 武: 物性研究 Vol. 74-5, p. 509-541 (2000-8) “ Sr_2RuO_4 の超伝導メカニズム”
- [31] 柳瀬陽一、重城貴信、山田耕作: 固体物理 Vol. 35 No. 7 (2000) p. 485. “高温超伝導体の擬ギャップの理論”
- (学位論文)
- [32] 姫田章宏: “Antiferromagnetism and d-wave superconductivity in the two dimensional $t-J$ model (2次元 $t-J$ モデルにおける反強磁性と d 波超伝導)” (東京大学大学院理学系研究科・博士論文)
- [33] 柳瀬陽一: “Theory of Pseudogap Phenomena in High- T_c Cuprates – Based on the Strong Coupling Superconductivity –” (京都大学大学院理学系研究科・博士論文)
- [34] 是常 隆: “High temperature expansions of $t-J$ model ($t-J$ model の高温展開)” (東京大学大学院理学系研究科・修士論文)
- [35] 倉持俊輔: “Mott gap and Peierls gap in the one-dimensional dimerized electron system at quarter-filling (充填率 $\frac{1}{4}$ の 2 量体化した 1 次元電子系における Mott ギャップと Peierls ギャップ)” (東京大学大学院総合文化研究科・修士論文)
- (著書)
- [36] 小形正男: 『現代物理学最前線 4』高温超伝導研究最前線 (共立出版 2001 年)
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [37] H. Seo: IIAS-JRCAT 国際ワークショップ *Phase control of correlated electron systems* (京都高等研, 2000, 5.31) “Charge ordering in two-dimensional $(\text{ET})_2\text{X}$ ”
- [38] H. Seo: International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals (Gastein, Austria, 2000, 7.21) “Charge ordering in $(\text{ET})_2\text{X}$ ”
- [39] M. Ogata: International Symposium on New Developments in Strongly Correlated Electron Phase under Multiple Environment (Osaka, 2000, 11.6-11.8) “Spin-Triplet Superconductivity due to Antiferromagnetic Spin-Fluctuations in Sr_2RuO_4 ”
- [40] M. Seo and M. Ogata: International Symposium on New Developments in Strongly Correlated Electron Phase under Multiple Environment (Osaka, 2000, 11.6-11.8) “Frustration induced metallic state in $\text{PrBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ ”
- [41] Y. Yanase and K. Yamada: International Symposium on New Developments in Strongly Correlated Electron Phase under Multiple Environment (Osaka, 2000, 11.6-11.8) “Pseudogap Phenomena and Superconducting Fluctuations in Hubbard Model for High- T_c Cuprates”
- [42] M. Ogata: International Workshop (Tohoku, 2000, 11.13-15) “Antiferromagnetism Revisited in $t-J$ Model — Stripe, π -flux, and d-wave Superconductivity”
- [43] Y. Yanase and K. Yamada: American Physical Society, March Meeting 2001 (Seattle, 2001, 3.12-16) “Pseudogap Phenomena and Superconducting Fluctuations in Hubbard Model for High- T_c Cuprates”
- [44] H. Seo: Okazaki COE Symposium *Electronic Properties of Molecular Assemblies* (IMR, Okazaki, 2001, 3.17) “Charge Ordering in Organic Conductors”
- 招待講演
- [45] M. Ogata and A. Himeda: The Third International Conference on *New Theories, Discoveries, and Applications of Superconductors and Related Materials* (New³SC) (Honolulu, Hawaii, January 15-19, 2001). “Charge Modulation, Antiferromagnetism and d-wave Superconductivity in the Two-Dimensional $t-t'-J$ Model”
- (国内会議)
- 一般講演
- [46] 小形正男: 新潟大学 2000, 9.22-9.25 (年会) “ Sr_2RuO_4 の超伝導メカニズム”
- [47] 姫田章宏、小形正男: 新潟大学 2000, 9.22-9.25 (年会) “ $t-J$ モデルにおける超伝導とストライプの共存”
- [48] 土浦宏紀、田仲由喜夫、小形正男、柏谷聡: 新潟大学 2000, 9.22-9.25 (年会) “ $t-J$ モデルにおける不純物近傍の反強磁性秩序”
- [49] 宇野信吾、土浦宏紀、田仲由喜夫、小形正男、井上順一郎: 新潟大学 2000, 9.22-9.25 (年会) “ $t-J$ モデルにおける磁束芯近傍の準粒子状態”
- [50] 妹尾仁嗣、小形正男: 新潟大学 2000, 9.22-9.25 (年会) “ $\text{PrBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ におけるフラストレーション誘起 1 次元金属状態”
- [51] 松尾友和、福山秀敏、小形正男: 新潟大学 2000, 9.22-9.25 (年会) “gap のある 1 次元 Fermion 系の Berezinskii’s Diagram Method による不純物効果の解析”
- [52] 柳瀬陽一、山田耕作: 新潟大学 2000, 9.22-9.25 (年会) “ハバードモデルにおける超伝導揺らぎと擬ギャップ”

- [53] 是常 隆、小形正男：中央大学 2001, 3.27-3.30 (年会) “ t - J モデルの高温展開”
- [54] 堀田知左、小形正男、福山秀敏：中央大学 2001, 3.27-3.30 (年会) “ CaB_6 の強磁性メカニズム”
- [55] 土浦宏紀、田仲由喜夫、小形正男、柏谷聡：中央大学 2001, 3.27-3.30 (年会) “高温超伝導体中の非磁性不純物によるキャリア散乱と反強磁性秩序”
- [56] 妹尾仁嗣、福山秀敏：中央大学 2001, 3.27-3.30 (年会) “マグネタイト Fe_3O_4 における軌道整列とヴァーウェイ転移”
- [57] 小形正男：特定領域研究「遷移金属酸化物における新しい量子現象 — スピン電荷軌道結合系」研究計画発表会 (京都大学化学研究所) 2000, 6.20-6.22 “ t - J モデルに対する数値計算”
- [58] 小形正男、桑原 武：東京理科大シンポジウム 2000, 6.29-7.1 “Spin-Triplet Superconductivity due to Antiferromagnetic Spin-Fluctuation in Sr_2RuO_4 ”
- [59] 小形正男、宇野信吾、土浦宏紀、田中由喜夫、柏谷聡、井上順一郎：戦略的基礎研究ミニ研究会「ボルテックスマターのダイナミクスと電子状態」(東京大学数理科学研究科) 2000, 12.11-12 “不純物にピン止めされたボルテックス状態”
- [60] 小形正男：超電導工学研究所動向調査研究会 2000, 12.19-12.20 “最近の理論の発展について”
- [61] 小形正男、妹尾仁嗣：特定研究 (B) 「低次元ヘリウム 3 の新物性」研究会 (熱海) 2000, 12.20-12.22 “1 次元 2 重フェルミ粒子系でのフラストレーションによる CDW 融解”
- [62] 小形正男：特定領域研究「遷移金属酸化物における新しい量子現象」成果報告会 (東北大学金属材料研究所) 2001, 1.8-1.10 “Zn impurity in the t - J model”
- [63] 小形正男：*New Developments in Strongly Correlated Electron Systems*, Workshop of the Yukawa Institute for Theoretical Physics (Kyoto) 2001, 3.5-7 “Stripe states and phase separation in t - J model”
- [64] 倉持俊輔、小形正男：未来開拓「有機導体」ワークショップ ConCOM2001「有機導体、この 1 年」(学習院大学) 2001, 3.7-8 “Renormalization group study of the coexistence of $2k_F$ CDW and $2k_F$ SDW in $(\text{TMTSF})_2\text{X}$ ”
- [65] 妹尾仁嗣、小形正男：TMO 成果報告会 (東北大金研) 2001, 1.10 “One-dimensional metallic state driven by geometrical frustration in $\text{PrBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ ”
- [66] 妹尾仁嗣、小形正男：物性研 COE「強相関電子系におけるスピンと電荷の励起」研究成果報告会 (熱海 KKR ホテル) 2001, 3.1 “ $\text{PrBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ におけるフラストレーション誘起金属状態”
- [67] 妹尾仁嗣：未来開拓「有機導体」ワークショップ ConCOM2001「有機導体、この 1 年」(学習院大学) 2001, 3.7-8 “ $(\text{DCNQI})_2\text{X}$, $(\text{TMTTF})_2\text{X}$ における電荷秩序と電子格子相互作用”
- [68] 柳瀬陽一、山田耕作：特定領域研究「遷移金属酸化物における新しい量子現象」成果報告会 (東北大学金属材料研究所) 2001, 1.8-1.10 “Pseudogap Phenomena and Superconducting Fluctuations in Hubbard Model for High- T_c Cuprates”
- 招待講演
- [69] 小形正男：分子構造総合討論会 (東京大学教養学部) 2000, 9.27-9.30 “スピンと電荷と超伝導”
- [70] 小形正男：中央大学 2001, 3.27-3.30 (年会) シンポジウム『有機超伝導 20 周年：現状の諸問題と 21 世紀への展望』“異方的超伝導の現状”
- (セミナー)
- [71] M. Ogata: Ohio State University Seminar 2000, 5.22 “Spin-Triplet Superconductivity due to Antiferromagnetic Spin-Fluctuation in Sr_2RuO_4 ”
- [72] M. Ogata: Princeton University Condensed Matter Physics Seminar 2000, 5.25 “Antiferromagnetism and d-wave superconductivity in the t - J model”
- [73] 小形正男：名古屋大学工学部セミナー 2000, 10.10 “ Sr_2RuO_4 における超伝導のメカニズム”
- [74] 妹尾仁嗣：東京大学工学部物理工学科力学インフォーマルセミナー 2000, 4.14 “低次元有機導体における電荷秩序”
- [75] 妹尾仁嗣：東京大学物性研究所ミニワークショップ「 NaV_2O_5 の現状」2000, 7.26 “理論の現状”
- [76] 柳瀬陽一：東京理科大学 物性セミナー 2000, 12.5 “ハバ - ドモデルにおける超伝導揺らぎと擬ギャップ”
- [77] 柳瀬陽一：京都大学 2000, 12.6 “ハバ - ドモデルにおける超伝導揺らぎと擬ギャップ”
- [78] 柳瀬陽一：超電導工学研究所 2001, 2.7 “Theory of Pseudogap Phenomena in High- T_c Cuprates—Based on the Superconducting Fluctuations—”
- [79] 柳瀬陽一：北海道大学理学研究科 2001, 2.19 “Theory of Pseudogap Phenomena in High- T_c Cuprates—Based on the Strong Coupling Superconductivity—”
- [80] 柳瀬陽一：電子技術総合研究所 2001, 3.5 “Theory of Pseudogap Phenomena in High- T_c Cuprates—Based on the Strong Coupling Superconductivity—”
- [81] 柳瀬陽一：東京大学理学系研究科 塚田・青木研コロキウム 2001, 3.8 “超伝導の強結合理論に基づく高温超伝導体の擬ギャップ現象の理論”
- [82] 柳瀬陽一：名古屋大学工学部 2001, 3.22 “Theory of Pseudogap Phenomena in High- T_c Cuprates—Based on the Strong Coupling Superconductivity—”

4 物性実験

4.1 壽榮松研究室

最近の物質科学の発展は、多くの領域で新規で特異な物質を生み出してきた。炭素原子のネットワークから構成される人工物質、フラーレンやナノチューブは、ネットワークのトポロジーに特異な結合様式を持つと同時に、その大きさが分子と結晶の中間に位置するため本質的にナノサイズとしての特徴を持つ極めて興味深い物質群である。

カーボンナノチューブは、グラファイト・シートを円筒状に巻いた構造を持つ直径約 1 - 100 nm、長さ数ミクロンのチューブであり、ナノメートルサイズのいわば高分子または 1 次元結晶とも考えられる。ナノスコピック領域における 1 次元導体としての興味と同時に、特長であるネットワークトポロジーに起因するナノサイズレベルでの局所伝導特性に興味深い現象が期待されている。一方、 C_{60} に代表されるフラーレン分子は互いの分子間力によって分子性結晶を構成するが、この新奇な結晶は、分子の特異な対称性のゆえに、多様な構造相転移を示す。さらに、アルカリ金属や希土類金属との化合物では、金属原子との間の電荷移動効果にり、半導体から金属さらに高温超伝導体に転移したり、強磁性体となる。このらカーボン・ネットワーク物質は、分子自身の新奇性と同時に、その電子構造、超伝導、磁氣的性質などを人為的に大きく変化・制御できるシステムであり、物質科学および固体物理における新奇性に富む領域である。本年度まで、日本学術振興会の未来開拓学術研究推進事業の一プロジェクトとして他の共同研究者とともに研究を進めてきた。研究室のスタッフは、壽榮松宏仁教授、藤原明比古助手、および石井賢司（博士研究員）である。

4.1.1 ナノチューブの構造および局所伝導度の観測

カーボンナノチューブの伝導度の測定、特にチューブに沿った各場所での測定は、通常の STS 法では困難であり、特別な工夫が必要であった。我々は、AFM 法と STS 法を 1 つのプロブによって行う方法を考案し、単層カーボンナノチューブ (SWNT) バンドルに適用した。この AFM/STS Dual Probe 法は、AFM のチップの先端に金属を蒸着した Conducting Tip を用い、AFM 法によってチップ先端位置を試料から一定の距離となるよう制御しながら、試料とチップの間に流れる電流をモニターする方法である。これ

によって、試料は絶縁体基盤上に置く事が出来、試料のみの伝導度を測定できる事になる。図 4.1 a は、1 本の同じ SWNT バンドルを上記の方法で得られた、AFM イメージ (z-Mapping) と電流 Mapping 図を表している。電流図には明瞭な SWNT 像が観測され、試料以外のマトリックスは電流は流れないため黒くなっている。電流図にはバンドルの内の個々の

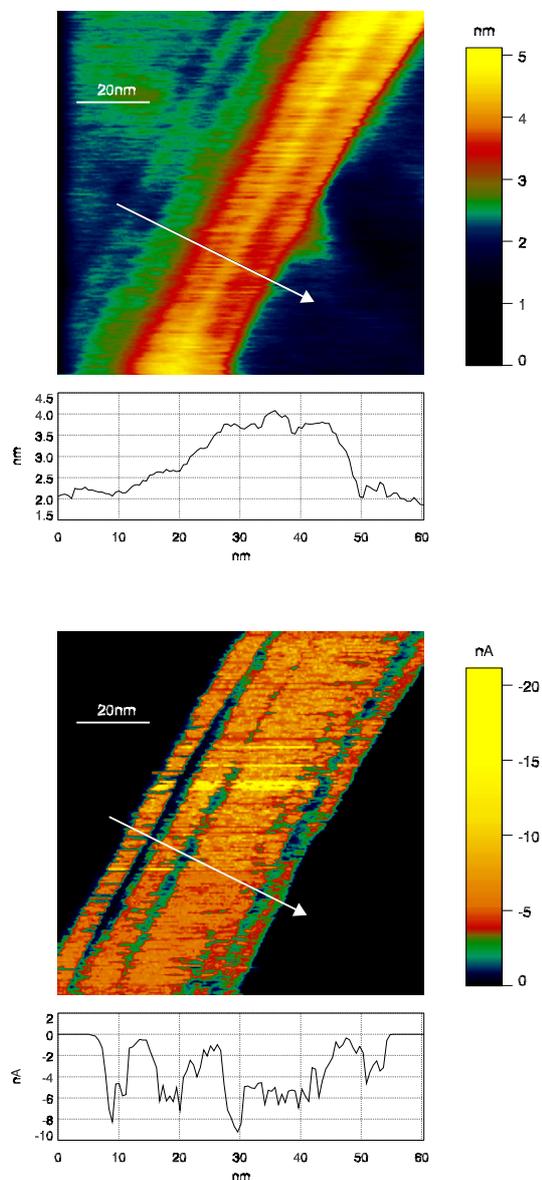


図 4.1 a: 1 本の同じ SWNT バンドルの AFM イメージ (z-Mapping) (上) と電流 Mapping 図 (下) .

SWNT が観測され、AFM 像より分解能が高いことが分かる。このバンドルの断面図では 5 本の SWNT が観測されている。この方法の、最も興味深い特長は、AFM でチップの場所を固定した後、そこでの STS スペクトルを得られる事である。ここでのスペクトルは、チップと SWNT との間のトンネル電流

を観測した真のトンネルスペクトルに相当しており、通常のSTMにおけるチップ-基盤間のトンネル電流とは異なる。このように、AFM/STS Dual Probe法は、SWNTなどナノメーター物質の局所伝導度および電子構造を決定するのに、極めて重要な手法となる事が期待できる。

4.1.2 カーボンナノチューブの光伝導

我々は、単層ナノチューブの光伝導度の測定を行い、エネルギー構造を実験的に明らかにした。バンド構造については、光吸収スペクトル測定などによって大略が明らかにされているが、1次元半導体特有の著しい励起子効果も期待され、バンド構造と輸送特性の対応の決定が困難であった。今回、波長可変レーザーを光源とし微細加工した伝導測定端子を用いることにより、光伝導スペクトルの測定に初めて成功し、そのスペクトルが光吸収スペクトルと非常に良く似ていることを明らかにし、(図4.1b)基本的にはバンド構造で理解できる伝導特性を示すことを明らかにした。この光伝導の観測は、同時に、ナノチューブが1次元半導体として機能することを示す顕著な実験事実である。更に、光伝導レスポンスは、励起エネルギーによって温度依存性が大きく異なることが解ったおり、今後、これらの新奇な振る舞いの解明が、ナノチューブにおける電子相関の理解、カーボンナノエレクトロニクスへの応用などにおいて、重要な寄与をすると期待される。

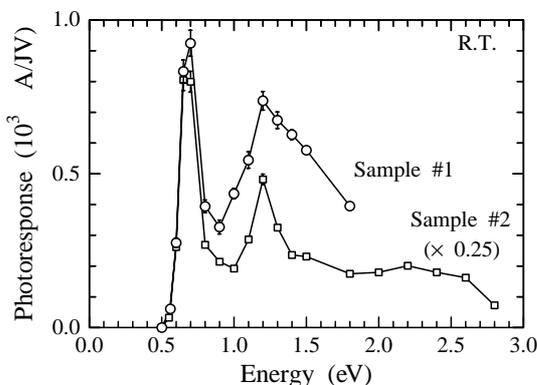


図 4.1 b: 単層カーボンナノチューブの光伝導スペクトル

4.1.3 フラーレン希土類化合物における巨大磁気抵抗

C_{60} などの閉殻型クラスターは、互いの分子間力によって分子性結晶を構成し、典型的な半導体結晶となる。これにアルカリ金属をインターカレートした化合物では大量の電荷移動により、金属に、しか

も超伝導体に転移する。これら超伝導体の研究が多く進められてきたが、一方、希土類金属との化合物については従来系統的な研究はなされてこなかった。しかし、希土類金属の場合、f電子に起因する磁性の発現が期待され、さらに、スピン-伝導電子間の相互作用による電流磁気効果が期待でき、興味深い物質系である。我々は、これまでに、希土類化合物について系統的な研究をすすめ、 Eu_6C_{60} が低温で強磁性転移を持つこと、さらに強磁性転移温度以下で(3桁にもおよぶ)極めて大きい負の磁気抵抗を示すことなど、極めて興味深い事実を明らかにした。磁化率および磁化過程の測定から、 Eu_6C_{60} は転移温度 $T_C = 13.5$ K を持つ強磁性体であり、常磁性帯磁率および強磁性領域での飽和磁化の大きさ、X線吸収スペクトル(XAFS)実験から、Euが2価の状態($S = 7/2$)の状態であることが明らかとなった。今回、この強磁性相関、巨大磁気抵抗の機構を明らかにするために Eu_6C_{60} のEuを非磁性元素Srで置換した系 $Eu_{6-x}Sr_xC_{60}$ での磁化、電気抵抗測定を行った。その結果、 $x = 1, 3$ においても $x = 0$ とほぼ同様に強磁性転移、巨大磁気抵抗効果を示すことが明らかになった。Euのpercolation thresholdよりも低い $x = 1$ においても強磁性転移を示すことから磁氣的相互作用はEuカルコゲナイドで見られる直接交換相互作用ではなく、 C_{60} を介した相互作用($\pi-f$ 相互作用)が重要である事が示唆され、新しい複合軌道物質であることを示した。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] H. Ootoshi, K. Ishii, T. Watanuki, A. Fujiwara, H. Suematsu: Synthesis and Crystal Structure of europium fullerides, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **340** (2000) 565-570.
- [2] K. Ishii, T. Watanuki, A. Fujiwara, H. Suematsu, Y. Iwasa, H. Shimoda, T. Takenobu, T. Mitani: Structural Phase Transition in ammoniated alkali fullerides: Orientational Ordering of alkali ammonia clusters, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **340** (2000) 571-576.
- [3] T. Watanuki, A. Fujiwara, K. Ishii, Y. Matsuoka, H. Suematsu, K. Ohwada, H. Nakao, Y. Fujii, K. Kikuchi, Y. Achiba: Structural Phase Transitions of Endohedral Metallofullerene $La@C_{82}$ Studied by Single Crystal X-ray Diffraction, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **340** (2000) 639-642.
- [4] Y. Maniwa, K. Kumazawa, H. Kataura, H. Ishii, S. Suzuki, Y. Achiba, A. Fujiwara, H. Suematsu: Gas Storage in Single-Walled Carbon Nanotubes, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **340** (2000) 671-676.
- [5] S. Fujiki, Y. Kubozono, S. Emura, Y. Takabayashi, S. Kashino, A. Fujiwara, K. Ishii, H. Suematsu, Y. Murakami, Y. Iwasa, T. Mitani, and H. Ogata: Structure and Raman scattering of Cs_3C_{60} under high pressure, *Phys. Rev.* **B62** (2000) 5366-5369.
- [6] A. Fujiwara, K. Ishii, T. Watanuki, H. Suematsu, H. Nakao, K. Ohwada, Y. Fujii, Y. Murakami, T.

- Mori, H. Kawada, T. Kikegawa, O. Shimomura, T. Matsubara, H. Hanabusa, S. Daicho, S. Kitamura, C. Katayama: Synchrotron radiation x-ray powder diffractometer using a cylindrical imaging plate, *J. Appl. Crystallogr.* **33** (2000) 1241-1245.
- [7] A. Fujiwara, K. Ishii, H. Suematsu, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki, Y. Achiba: Gas adsorption in the inside and outside of single-walled carbon nanotubes, *Chem. Phys. Lett.* **336** (2001) 205-211.
- [8] A. Fujiwara, K. Tomiyama, H. Suematsu, M. Yumura, K. Uchida: Magnetotransport of carbon nanotubes: Magnetic field induced metal-insulator transition, *Physica B* (2001) 541-545.
- (国際会議録)
- [9] K. Ishii, H. Ootoshi, Y. Nishi, A. Fujiwara, H. Suematsu, Y. Kubozono: Crystal Structure and Magnetic properties of $\text{Eu}_x\text{Sr}_{6-x}\text{C}_{60}$, *AIP Conference Proceedings* **544** (2000) 29 - 32.
- [10] A. Fujiwara, Y. Matsuoka, H. Suematsu, N. Ogawa, K. Miyano, H. Kataura, Y. Achiba, S. Suzuki, Y. Maniwa: Photoconductivity of Single-Walled Carbon Nanotubes, *AIP Conference Proceedings*, in press.
- [11] K. Ishii, Y. Nishi, A. Fujiwara, H. Suematsu, Y. Kubozono: Colossal Magnetoresistance in the ferromagnetic Eu_6C_{60} , *AIP Conference Proceedings*, in press.
- [12] A. Oguri, K. Kimura, M. Terauchi, M. Tanaka, A. Fujiwara: Superconductivity in Li-doped α -rhombohedral Boron, *AIP Conference Proceedings*, in press.
- [13] K. Ishii: Magnetism and Electronic Transport in Eu_6C_{60} , *AIP Conference Proceedings*, in press.
- (国内雑誌)
- [14] 藤原明比古: ナノチューブのガス吸蔵、機能材料 **21** No. 5 (2001) 49-53.
- (学位論文)
- [15] 飯島良介: 原子間力顕微鏡によるカーボンナノチューブの電子構造研究 (修士論文)
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [16] H. Suematsu, T. Watanuki: Novel structural phase transitions in endohedral metallofullerenes, *The fourth International Chemical Congress of Pacific Basin Societies* (Honolulu, U.S.A., December 2000)
- [17] A. Fujiwara, Y. Matsuoka, H. Suematsu, N. Ogawa, K. Miyano, H. Kataura, Y. Achiba, S. Suzuki, Y. Maniwa: Photoconductivity of Single-Walled Carbon Nanotubes, *International Symposium on Nanonetwork Materials* (Kamakura, Japan, January 2001)
- [18] K. Ishii, Y. Nishi, A. Fujiwara, H. Suematsu, Y. Kubozono: Colossal Magnetoresistance in the ferromagnetic Eu_6C_{60} , *International Symposium on Nanonetwork Materials* (Kamakura, Japan, January 2001)
- [19] A. Oguri, K. Kimura, M. Terauchi, M. Tanaka, A. Fujiwara: Superconductivity in Li-doped α -rhombohedral Boron, *International Symposium on Nanonetwork Materials* (Kamakura, Japan, January 2001)
- [20] R. Fujiwara, H. Kira, H. Tou, Y. Maniwa, X. Zhao, S. Iijima, Y. Ando, E. Nishibori, M. Takata, M. Sakata, A. Fujiwara: Structure of Multi-Walled Carbon Nanotubes, *International Symposium on Nanonetwork Materials* (Kamakura, Japan, January 2001)
- [21] K. Ishii: Magnetism and Electronic Transport in Eu_6C_{60} , *XVth International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials* (Kirchberg, Austria, March 2001)
- 招待講演
- [22] H. Suematsu: Electronic Properties and Quantum Transport in Carbon Nanotubes, *International Symposium on Strong Correlations in Many-Body Systems* (Nikko, Japan, June 2000)
- [23] A. Fujiwara, K. Tomiyama, H. Suematsu, M. Yumura, K. Uchida: Magnetotransport of carbon nanotubes, *The 14th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics* (Matsue, Japan, September 2000)
- (国内会議)
- 一般講演
- [24] 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、第19回フラーレン総合シンポジウム (群馬、2000年7月)
- [25] 石井賢司, 大歳始, 藤原明比古, 壽榮松宏仁, 久保園芳博: $\text{Eu}_x\text{Sr}_{6-x}\text{C}_{60}$ における巨大磁気抵抗、第19回フラーレン総合シンポジウム (群馬、2000年7月)
- [26] 三宅正晃, 竹延大志, 岩佐義宏, 三谷忠興, 西堀英治, 高田昌樹, 坂田誠, 石井賢司, 藤原明比古, 壽榮松宏仁: $(\text{NH}_3)_x\text{K}_x\text{Rb}_{3-x}\text{C}_{60}$ ($0 \leq x \leq 3$) の構造、フラーレン若手の会・夏の学校 (石川、2000年8月)
- [27] 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、日本物理学会第55回年次大会 (新潟大、2000年9月)
- [28] 三宅正晃, 竹延大志, 岩佐義宏, 三谷忠興, 西堀英治, 高田昌樹, 坂田誠, 石井賢司, 藤原明比古, 壽榮松宏仁: $(\text{NH}_3)_x\text{K}_x\text{Rb}_{3-x}\text{C}_{60}$ ($0 \leq x \leq 3$) の構造、日本物理学会第55回年次大会 (新潟大、2000年9月)

- [29] 高林康裕, 久保園芳博, 藤木聰, 石井賢司, 壽榮松宏仁, 柏野節夫: 二次元ポリマー相 Na_4C_{60} の構造と物性 III 日本物理学会第 55 回年次大会 (新潟大、2000 年 9 月)
- [30] 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、第 20 回フラーレン総合シンポジウム (岡崎、2001 年 1 月)
- [31] 石井賢司, 藤原明比古, 壽榮松宏仁: Eu_3C_{60} の磁性と磁気抵抗、第 20 回フラーレン総合シンポジウム (岡崎、2001 年 1 月)
- [32] 岩佐義宏, H. Chi Dam, 伊藤崇芳, 三谷忠興, 石井賢司, 壽榮松宏仁忠興, 村上洋一, 西堀英治, 高田昌樹, 坂田誠: Sm_7C_{70} の構造相転移、第 20 回フラーレン総合シンポジウム (岡崎、2001 年 1 月)
- [33] 飯島良介, 壽榮松宏仁, 藤原明比古, 石井賢司, 片浦弘道, 阿知波洋次, 鈴木信三, 真庭豊: AFM-STM 二重法による単層カーボンナノチューブの局所電子構造の研究、日本物理学会第 56 回年次大会 (中央大、2001 年 3 月)
- [34] 石井賢司, 藤原明比古, 壽榮松宏仁, 久保園芳博: Eu_6C_{60} の強磁性および巨大磁気抵抗への Sr 置換効果、日本物理学会第 56 回年次大会 (中央大、2001 年 3 月)
- [35] 真庭豊, 藤原竜児, 吉良弘, 藤秀樹, 片浦弘道, 鈴木信三, 阿知波洋次, 藤原明比古, 壽榮松宏仁: 単層カーボンナノチューブの X 線回折実験: 温度依存性、日本物理学会第 56 回年次大会 (中央大、2001 年 3 月)
- [36] 藤原竜児, 吉良弘, 藤秀樹, 真庭豊, 趙新洛, 飯島澄男, 安藤義則, 藤原明比古, 西堀英治, 高田昌樹, 坂田誠: 多層カーボンナノチューブの構造 II、日本物理学会第 56 回年次大会 (中央大、2001 年 3 月)
- [37] 小栗淳司, 木村薫, 藤原明比古, 寺内正己, 田中通義: α 菱面体晶ボロンへの Li ドープと新超伝導体の探索、日本物理学会第 56 回年次大会 (中央大、2001 年 3 月)
- [38] 寺内正己, 田中通義, 小栗淳司, 木村薫, 藤原明比古: 高分解能 EELS による Li ドープ α ボロンの電子状態の研究、日本物理学会第 56 回年次大会 (中央大、2001 年 3 月)

招待講演

- [39] 壽榮松宏仁: ネットワーク物質の奇妙な磁性、日本物理学会第 55 回年次大会 (新潟大、2000 年 9 月)
- [40] 石井賢司: C_{60} 希土類化合物の巨大磁気抵抗、日本物理学会第 55 回年次大会 (新潟大、2000 年 9 月)
- [41] 藤原明比古: カーボンナノチューブの機能物性、文部省科学研究費特定領域研究 (A) 「フラーレン・ナノチューブネットワーク」平成 12 年度第 2 回研究会 (公開ワークショップ) (金沢、2000 年 10 月)
- [42] 藤原明比古: 日本物理学会第 56 回年次大会 (中央大、2001 年 3 月)
- (セミナー)
- [43] 壽榮松宏仁: フラーレン若手の会・夏の学校 (石川、2000 年 8 月)

4.2 長澤研究室

ここ数年、我々は、典型的な半導体である亜酸化銅の単結晶における励起子のかかわる光学現象や光電特性を分光学的手法によって研究してきた。本年度は特に次の課題を取り上げた。

1) 励起子領域での弾性散乱光の光学信号スペクトルへの影響。2) 励起子系の BEC を実現するための手段として、歪印加による 3 次元閉じ込めトラップの開発と 2 光子分光による評価、および 2 光子励起による冷たい励起子系の運動の研究。

今年度はこれらの課題に加えて新しく、ゼオライト単結晶中に生成する非常に細くて単層のカーボンナノチューブの分光学的研究を本格的に開始した。

カーボンナノチューブは、グラファイト結晶の一層を継ぎ目が分からないように丸めた構造を持っている。その巻き方や太さだけによって電気特性が大きく変わる。この優れた物性は新しい物性材料として有望とされ、昨今急速にその興味が深まっている。最近香港の湯グループで非常に細い単層のカーボンナノチューブをゼオライト結晶中に方向をそろえて作ることに成功した。我々は湯グループと共同で、この物質の光学的研究を分光学的立場から開始した。

4.2.1 半導体結晶の励起子系の関わる線形、非線形光学現象の分光学的研究

亜酸化銅結晶における励起子領域の弾性散乱の光学信号へ及ぼす影響の定量的研究

亜酸化銅結晶では、吸収スペクトルに励起子由来する構造が明瞭に現れることが良く知られており、その吸収係数の値は詳しく調べられている。ところが、電極から離れた位置で観測される光起電力スペクトルや、エレクトロルミネッセンス (EL) のスペクトルからは、これよりも約 3 倍強い吸収が起こっているように見えることが分かった [2, 3, 10, 12]。そこで、この起源として結晶内部における光の弾性散乱を考え、実験とシミュレーション結果との定量的な比較を行った。

吸収の大きさを表す光学密度は、図 4.2a のような配置で A における入射光強度と A' における透過光強度の比として与えられる。図 4.2b(a) の点線で示された曲線は、このようにして得られる通常の on-axis 配置での吸収スペクトルである。吸収の立ち上がりは、フォノンを介した励起子によるものである。この研究では新たに、直接透過スポット A' から離れた点 B (off-axis 配置) においても同様に吸収スペクトルを測定した (図 4.2b(a) 実線)。このときの光学密度は on-axis 配置のものよりも大きく、観測点が遠くなるほど大きくなる。

一方、シミュレーションでは、結晶中に存在する欠陥や不純物などにおける弾性散乱によって光路が曲げられるために、off-axis 配置においても透過光が観測されるとした。モンテカルロシミュレーション

により光の経路を追跡すると、散乱によって光路はジグザグになり、その全長は結晶の厚さよりも数倍大きくなることが分かる。さらに光子エネルギーに依存する吸収と結晶表面における内部反射の効果を考慮に入れると図 4.2b(b) のような吸収スペクトルが得られ、実験との良い一致を示すことが分かった。シミュレーションの結果は、光子の平均自由行程が 1.4mm と試料の厚さ程度であり、用いた試料が高純度であることを示唆する。off-axis 配置の吸収スペクトルには散乱体の効果が顕著に現れるため、試料の評価法としての有用性が期待される。

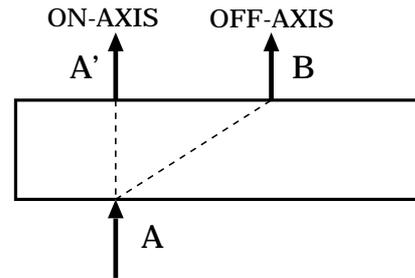


図 4.2 a: 吸収測定の配置図。

上述と同様の方法により、EL スペクトルの解析を行った。結晶の異なる位置で観測される EL スペクトルを図 4.2c(b) に実線で示す。点線は、図 4.2c(a) の網掛けの部分で発生する EL 光が等方的な弾性散乱によって結晶内部を伝播するとしてシミュレーションを行った結果である。高エネルギー側の光は再吸収を受けて減衰するために、観測位置が電極から離れるに従ってスペクトルの幅が顕著に狭くなる。このことがシミュレーションでも良く再現されていることから、ここでは EL の伝播のうち光散乱によるものの寄与が観測されているといえる。同様の光散乱の影響として、電極から離れた位置を光照射した場合に発生する光起電力も説明できる [9, 4, 16]。

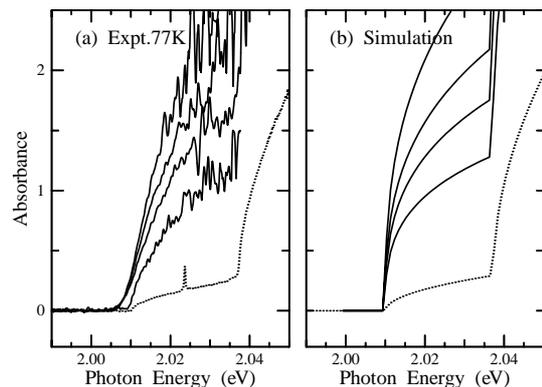


図 4.2 b: 亜酸化銅の励起子による吸収スペクトル。(a) 実験、(b) シミュレーション結果。

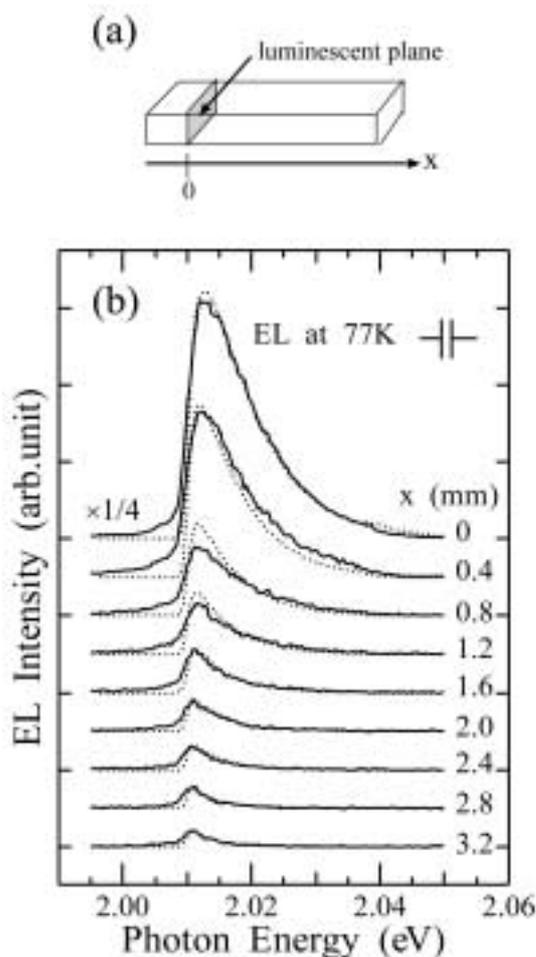


図 4.2 c: 空間分解 EL スペクトル。

亜酸化銅単結晶における歪トラップ中の冷たい励起子系の 2 光子分光

亜酸化銅結晶の最低励起子である $1s$ 状態はスピン交換相互作用によって 2 準位に分裂している。これらのうち高エネルギー側はオルソ励起子、低エネルギー側はパラ励起子と呼ばれている。パラ励起子は光学直接遷移が禁制であることから長い寿命を持つことが知られており、この性質は量子縮退現象や励起子のトラップの研究に利用されてきた。本研究では、2 光子共鳴励起によって冷たいオルソ励起子をトラップ中に選択的に生成し、それらから間接的に生成されるパラ励起子の捕捉を試みた。

パラ励起子発光の観測は、その強度が弱いため容易ではない。この研究では、光学遷移が許容となるような歪の印加によってその遷移確率を増し、冷たいオルソ励起子から間接的につくられるパラ励起子の発光の観測に初めて成功した。時間分解測定により、その寿命は $0.3 \sim 0.5$ マイクロ秒であることが明らかになった。このような系はトラップ中での励起子のダイナミクスの研究に向いており、トラップへ

の捕捉の効果が期待できる。

一方、高分解能のスペクトル測定からは、トラップの縁につくられたパラ励起子がポテンシャルの低い方向へドリフトし、トラップ中心にためこまれる様子が観測された。また、これまでは起こらないとされてきたオルソ励起子のドリフトも観測された。これは、従来の一光子励起とは異なり冷たい励起子のみを生成する 2 光子励起のもとでは、励起子の拡散長が長くなっている可能性を示唆している [1, 7, 13, 15]。

4.2.2 ゼオライト単結晶中のカーボンナノチューブの分光学的研究

可視光領域における光吸収の偏光依存性とその起源の吟味

図 4.2d は、カーボンナノチューブを含むゼオライト結晶の顕微鏡写真の例である [6,11]。

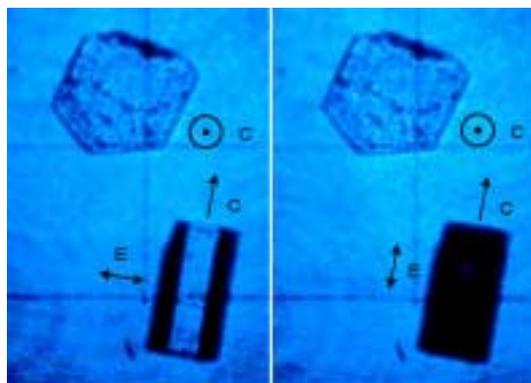


図 4.2 d: カーボンナノチューブを含むゼオライト結晶。

ゼオライト結晶は、鉛筆の軸のような六角柱の透明な結晶である。図の上は切り口を示しているが、この例では上部の角が欠けている例をある目的のために選んでいる。下は鉛筆を倒したような配置で見た様子である。各結晶の C 軸の方位を図に示している。右と左は紙面に垂直に光を入射させたときの透過光の様子を示している。光の波数ベクトルが C 軸に平行な場合 (上部) 結晶は透明である。しかし、波数ベクトルが C 軸に平行な場合はほとんど不透明 (右下) 垂直な場合には透明となる (左下) 左下の図で黒い 2 本の筋が見えるが、これは結晶の斜めの面による光の反射の効果である。

この偏光特性の起源は、近赤外から可視領域に見られる光学遷移の光学異方性によることが香港の湯グループの研究でわかった。湯らの透過型電子顕微鏡によるこのカーボンナノチューブの形状の直接測定から、このチューブは、直径が約 4 nm と理論的に安定とされるもっとも細いチューブであることがわかり、飯島らが多層ナノチューブの最も内側のチューブ

として同じころ発見したものに相当する。湯らのものは、単体として取り出された唯一の例である。測定された直径から、このナノチューブは (5,0)、(4,2) および (3,3) と呼ばれるカイラリティを持ったもののどれかと限定される。このように構造が少数の可能性に限定されている魅力は大きい。直径が細くなると対応するバンドギャップエネルギーが大きくなり、このような可視領域での分光研究が適用できるようになる。我々は湯らと共同して、得られた吸収スペクトルを解釈するための問題点を吟味するため、通常の Tight Binding 近似による該当するバンドの吟味と群論による対称性の吟味を試みた [8]。

しかしながら、細いチューブではチューブ表面の湾曲の効果が大きくなり、太いチューブでの考察が適応しにくいことが確認された。そこで、湯グループで計算した LDA 法によるバンド計算の結果も参考にして暫定的な吸収構造の同定を行った。現在さらに詳しい対称性の考察を続けている。これまで、チューブの太さや方位をそろえる技術が十分開発されていなかった関係で、このようなチューブが本来持っている光学的異方性の研究や遷移行列の群論的吟味に関する理論と実験の比較が不十分であった。このような基礎研究はこのシステムの光学材料としての可能性を広げるために不可欠である。ここでの研究はその端緒となることが期待される。

顕微分光法による可視領域の発光の研究

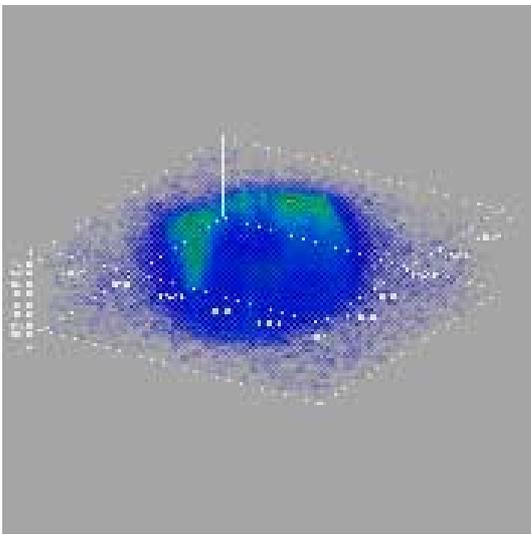


図 4.2 e: 発光の強度分布。

現在作成可能な試料は、まだ十分品質がそろっていないという欠点がある。最近湯らはこの試料によって超伝導性を発見したが、さらに新しい可能性を吟味するためには試料の評価法の確立も重要な要素である。我々はこの試料が強い可視領域の発光を示すことを発見した。ナノチューブに関係した試料で可視領域の発光が発見されたのは初めてのことで、今

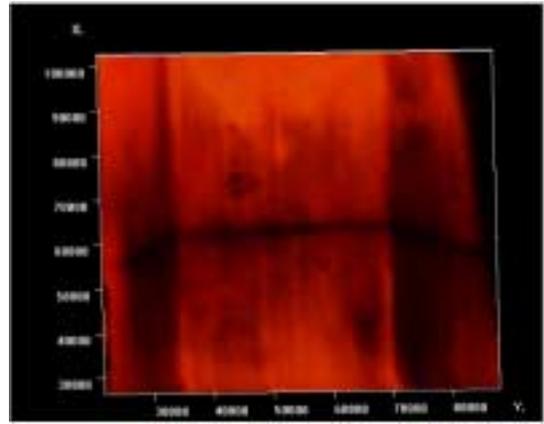


図 4.2 f: ゼオライト結晶の C 軸方向に偏った偏光特性をもつ発光の空間分布。

後この種の発光の研究も非常に興味深いと考えられる。この発光は、試料の評価のためにも有用であることが本年度の研究で明らかになった。すなわち、我々はありあわせの試料の光学測定から、どのように普遍性のある光学情報が得られるのかを明らかにするために、共焦点顕微鏡を基礎とする 3 次元断層光学測定装置として、東京インスツメンツが開発した、Nanofiner を使ってこの試料の評価をこの会社との共同研究として試みた。この装置は空間分解能がナノメートル領域の優れた性能を持っている。

図 4.2e はこの装置で六角形の断面から入射したときにみられる、ある発光の断面分布から再構成した 3 次元の強度分布である。実際の発光の色はオレンジ色から赤色であるがここではソフトによって着色してある。強い発光が結晶の表面近くや、特定の部分に集中しているのが分かる。この発光の偏光依存性から、この発光はある種の欠陥が関係している可能性があり、この発光の有無は試料の評価に有効であることが分かった [14]。

図 4.2f は、結晶の C 軸方向に偏った偏光特性をもった発光の分布で、この場合は試料の横の面から光を入射させている。この図で六角柱の側面が左右及び中央のゾーンとして見える。1 つの側面の幅はこの結晶の場合は 40 ミクロン程度である。結晶にはよく C 軸に垂直な面状の割れ目が入っている。この図では、これが黒い横線として見える。このようにこの方法は試料の評価に有用であることが分かった [17]。現在は更にこのような偏光特性が明らかな発光に関する詳しい分光研究が継続中であり、やがてナノチューブの発光過程の特徴と起源が明らかにされる期待が広がっている。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] N. Naka and N. Nagasawa: Two-photon spectroscopy on cold ortho-excitons in a stress trap in Cu_2O crystals, *J. Lumin.*, **87-89** (2000) 201.

- [2] N. Naka and N. Nagasawa: Experimental study on two-photon oscillator strength of hydrogenic yellow excitons in Cu_2O , *Solid State Commun.*, **116** (2000) 417.
- [3] A. Mori, N. Naka and N. Nagasawa: Effects of Rayleigh scattering on photovoltaic spectra associated with 1s orthoexcitons in Cu_2O , *Phys. Rev. B*, **63** (2001) 033202.
- [4] Y. Nakamura, N. Naka and N. Nagasawa: Effects of wandering photons on the excitonic optical signals in Cu_2O crystals, *Phys. Rev. B*, **63**, in press.
- [14] 長澤信方、杉山浩一、津田俊輔、I. Kudryashov, G. Li, and Z. K. Tang: ゼオライト中に成長させたカーボンナノチューブの光吸収、同上
- [15] 中暢子、長澤信方: 亜酸化銅 1s 励起子の二光子共鳴励起による発光、第 11 回光物性研究会 (大阪、2000 年 12 月)
- [16] 中村雄一、中暢子、長澤信方: 光散乱による吸収係数の変化に関するモンテカルロシミュレーション、日本物理学会第 56 回年次大会 (中央大、2001 年 3 月)
- [17] 長澤信方、津田俊輔、I. Kudryashov, and Z. K. Tang: ゼオライト中に成長させたカーボンナノチューブの光吸収 II、同上

(会議抄録)

- [5] Y. Nakamura, N. Naka and N. Nagasawa: Effect of reabsorption on electroluminescence of excitonic origin in Cu_2O , in *Proceedings of 25th International Conference on The Physics of Semiconductors*, in press.
- [6] N. Nagasawa, I. Kudryashov, S. Tusda and Z. K. Tang: Polarization characteristics of Zeolite single crystals containing carbon nanotubes, in *AIP Conference Proceedings*, in press.
- [7] 中暢子、長澤信方: 亜酸化銅 1s 励起子の二光子共鳴励起による発光、第 11 回光物性研究会論文集 p.29 (2000).

(学位論文)

- [8] 津田俊輔: 顕微偏光分光法によるカーボンナノチューブを含むゼオライト単結晶の研究 (修士論文)
- [9] 中村雄一: 亜酸化銅におけるエレクトロルミネッセンスの分光学的研究 (修士論文)

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [10] Y. Nakamura, N. Naka and N. Nagasawa: Effect of reabsorption on electroluminescence of excitonic origin in Cu_2O , *25th International Conference on The Physics of Semiconductors*, (Osaka, Japan, September 2000).
- [11] N. Nagasawa, I. Kudryashov, S. Tusda and Z. K. Tang: Polarization characteristics of Zeolite single crystals containing carbon nanotubes, *International symposium on nanonetwork materials: fullerenes, nanotubes, and related systems*, (Kamakura, Japan, January 2001).

(国内会議)

一般講演

- [12] 杉山浩一、中暢子、長澤信方: Cu_2O における 2 フォノン共鳴レイリー散乱、日本物理学会第 55 回年次大会 (新潟大、2000 年 9 月)
- [13] 中暢子、長澤信方: Cu_2O におけるトラップ中に生成された励起子の動力学、同上

(セミナー)

- [18] 長澤信方: 談話会「カーボンナノチューブの顕微分光によるアプローチ」(甲南大学、2000 年 11 月)

4.3 樽茶研究室

樽茶研究室では、極低温や高磁場下における低次元電子系の電子輸送、電子状態、多体効果の研究を行っている。系の寸法が電子のドブロイ波長程度になると、電子の量子性に由来する電子波干渉、荷電粒子のクーロン相互作用に由来する相関効果などが、直接、系全体の性質を左右するようになる。本研究室では、半導体を微細化することによって作られる一、零次元の電子系に着目し、人工原子、分子における電子状態、強磁場中で起こる状態遷移、近藤効果等のスピンの関与する伝導現象、一次元朝永-ラッティンジャー液体の非フェルミ電子液体的性質、等の電子物性の解明、フント則やパウリの排他律に代表される量子力学的基本仮説の検証、および、表面敏感走査プローブを利用した状態密度の空間分布の直接観測法の開発を進めている。

4.3.1 人工原子の電子状態の研究

量子ドットの近藤効果とコトンネリング [4,8,9]

近藤効果はスピン相関によってもたらされる典型的な多体効果である。最近、外部電極と強く結合している量子ドットでは、ドット中の電子スピンと外部電極の電子スピンの反強磁性交換作用に起因して近藤効果が観測されている。この効果は、従来、ドット中の電子が半整数のスピンの持つ場合に限られていたが、我々は、電子数と量子状態の制御性に優れた縦型の量子ドットを使って、一重項と三重項が縮退して、電子が整数のスピンの持つ場合に強い近藤効果が起ることを見い出した。さらに、この縮退と近藤効果の関係について詳細な実験を行い、縮退を磁場の関数として次第に解消していくと、やがて近藤効果が消失し、より低次の仮想トンネル過程である弾性的なコトンネルが、続いて非弾性的なコトンネルが顕著になることを明らかにした。また、ドットと電極の結合が強い場合には、零磁場においても、少数電子系の励起状態を介したコトンネルが明瞭に識別できることが分かった。このコトンネルは、2、4などの偶数個の電子を含むク-ロンブローケード領域に見られる。これは、スピン縮退していない励起状態がすぐ近くあることと関係する。

ユニタリ極限の近藤効果 [5,10]

近藤温度より低温で量子ドットのク-ロンブローケードは解消し、その極限では、コンダクタンスが $2e^2/h$ の値 (ユニタリ極限) に達することが予測されている。我々は、横型量子ドットを使ってユニタリ極限の近藤効果を初めて観測した。量子ドットは2次元電子ガスの面内方向を金属ゲートで閉じ込めて作った。この構造ではドットと外部電極の間のトンネル結合の大きさをゲート電圧で任意に変えられる。ク-ロン振動を温度を変えて測定したところ、奇数個の電子を含むク-ロンブローケード領域のコンダ

クタンスが温度の低下とともに上昇し、やがて、ユニタリ極限である $2(e^2/h)$ の値に近づいて飽和することを確認した。通常のコンダクタンスピークの最大値が e^2/h であるのに対して、近藤効果のコンダクタンスがユニタリ極限値をとることは、ドットの局在スピンの伝導電子で完全に遮蔽されていることを意味する。ただし、このような近藤効果は磁場中でしか観測されない。その理由はまだ明らかではないが、零磁場では交換相互作用のためにドットが高スピン状態になっていて、弱い磁場の印可で近藤効果に有利な低スピン状態 (全スピン $S=1/2$) に遷移するのではないかと考えている。さらに、この量子ドットを AB リングの片方のアームに埋め込んだ試料構成を使って AB 干渉の実験を行った。AB 干渉は単一粒子のコヒーレンスにのみ関係するが、この実験では多体のコヒーレンスが関与する AB 振動を初めて観測した。

極少数電子系の近藤効果 [16,32,52]

従来、近藤効果は多数個の電子を含む量子ドットを使って実験されていて、そこでは最もエネルギーの高い電子スピンだけが近藤効果に関与すると仮定されている。我々は、アンダーソン不純物模型に最も適合した1個、あるいは2個の電子を含む量子ドットを作成し、理想的な局在スピンに対する近藤効果の観測に成功した。1電子の場合には、従来値の2倍以上の高い近藤温度が実現できること、2電子の場合には、一重項-三重項の磁場縮退時に、ゼーマン分裂の影響を受けた近藤効果が起こることを見い出した。量子ドットは縦型構造でできていて、ドット中の電子数 N が1-3個で十分大きいドットと電極のトンネル結合が得られるように設計してある。近藤効果の証拠としては、1電子を含むク-ロンブローケード領域のコンダクタンスが温度の低下とともに増大すること、微分コンダクタンスが近藤状態密度を反映した零バイアスピークを持つこと、などを確認した。この実験から見積られる近藤温度は4-7 Kである。さらに、磁場をかけて2電子状態の一重項-三重項縮退を起こすと、2電子を含むク-ロンブローケード領域のコンダクタンスが低温で上昇する。これに対応する微分コンダクタンスピークは零バイアスの両側の僅かにズレた位置に見られる。このピーク分離はスピン三重項のゼーマン分裂によるものと考えている。ただし、量子ドットの g 因子については、まだ良く分かっておらず、従って、観測された三重項のゼーマン分裂についてもさらに検討する必要がある。

量子ドット中の二電子スピンの緩和 [33,39]

半導体量子ドットのスピンは、量子計算に必要な量子ビット、量子もつれ状態を実現するための有力な候補として注目されている。これらは、同時に、量子コヒーレンスやスピン緩和の物理に関わる興味深い研究対象である。我々はこれまで、量子ドット

の1電子スピン、2電子スピンの状態が電子数や磁場の関数として制御できることを報告した。今年度から、この2電子状態のスピン緩和の問題に取り組んでいる。通常、2電子の基底状態はスピン一重項で、その励起状態がスピン三重項になっている。一重項は1s軌道を2個の反平行スピンの、三重項は1s 2p軌道を2個の平行スピンの占めている。この励起状態から基底状態の緩和はスピン緩和を伴うことから、その時間的挙動が観測できればスピン反転を伴うエネルギー緩和を求めることができる。なお、スピン緩和を伴わない場合には、エネルギー緩和は電子-フォノン散乱で決まっていますが、その緩和時間はナノ秒以下と速いことが分かっている。我々は、パルスゲート電圧印可法により、励起状態に電子占有を起し、その基底状態への緩和時間を測定することを試みた。まだ初期的な結果しか得られていないが、マイクロ秒以上の極めて長い緩和時間を観測した。これは、スピン緩和が極めて遅いことを裏付けている。

電子のウィグナー結晶化

電子の波動関数は強磁場下で磁気長程度に局在する。量子ドット内の狭い領域に強磁場をかけると、電子間のクーロン反発により、電子はお互いを避けあって相互作用エネルギーの最も小さくなる位置に局在してウィグナー結晶化すると考えられる。これは電子間相互作用が強い極限に相当し、多体効果を議論するうえで興味深い現象である。最近の理論では、量子ドット内のウィグナー結晶のエネルギースペクトルの電子数依存性は、結晶格子の形状や対称性を反映すると予測されている。円形の半導体人工原子には電子数を厳密に定義できる上、系の高い回転対称性が得られという特徴があることから、我々はこれを利用してウィグナー結晶化の検証実験を試みている。現在は閉じ込めエネルギーの弱い人工原子を作成中であり、強磁場中でのエネルギースペクトルを観測することを目指して実験を進めている。

4.3.2 人工二原子分子の電子状態の研究

量子力学的に強く結合した人工分子の電子状態 [2,11,15,30]

これまで、半導体人工原子の電子状態を詳しく調べることにより、量子力学的閉じ込めと電子相関の効果に起因して、殻構造やフント則といった原子と同様な性質が見られることを明らかにしてきた。さらに、我々は、人工原子を縦に並べた人工分子を形成し、その電子状態について調べている。人工原子に比べ、人工分子では、(ア)電子が人工原子間をトンネルすることにより結合状態・反結合状態が形成される、(イ)体積が大きくなるため、クーロン相互作用が減少し、それとともにクーロン相互作用の直接項と間接項が変化する、といった違いを挙げることができる。実験では、励起スペクトルスコピーという方法を用いて、(ア)に起因する1、2電子の反結

合状態の形成を確認することが出来た。一方、(イ)の効果を表すものとして、電子数4でのスピンの揃いによるフント結合エネルギーの減少を明らかにした。さらに、4電子以上の多電子系についても、磁場中でのスピン一重項・三重項遷移が人工原子に比べて不明瞭になることから、(イ)の影響を確認した。また、人工原子では、強磁場極限のク-ロン相互作用を反映する現象として、電子が最大密度の液滴状態(MDD)になることが知られている。このMDDを人工分子についても調べた結果、磁場を上げるとMDDが崩壊しやすい、即ち不安定になっていることが分かった。このことは、人工分子では人工原子に比べてクーロン相互作用が小さいことを反映している。

弱結合2重量子ドットにおけるLOフォノン介在トンネリング [45,50]

弱結合の二重量子ドットは典型的な2準位系で、その準位間遷移(トンネルに相当)には何らかの量子とのエネルギーのやり取りが必要である。これまで音響フォノンとのエネルギーのやり取りが観測されていたが、フォノン分散は連続的なので量子ドット固有の零次元準位の関与がよく分からなかった。一方、光学フォノンを考えれば特定のエネルギーを持ち、しかも状態密度が大きいので理想的な零次元準位間の遷移が見られるものと期待される。我々は、縦型二重ドットを使って、これに相当する実験を行い、LOフォノンの関与する明瞭な準位間遷移を初めて観測した。ゲート電極を備えた弱結合2重量子ドットではソース電極のフェルミ準位と左側のドットの電子数1の準位とを常に一致させつつドット間のエネルギー差を変化させることができる。このとき2重ドットの全電子数はゼロまたは1であり電流は単一電子トンネルによって流れている。GaAs/AlGaAs/InGaAsヘテロ構造からなる縦型2重ドットではその高いトンネル障壁のためドットのゼロ次元準位に影響を与えることなく非常に大きなソース・ドレイン電圧を加えることができる。ドット間のエネルギー差が右側のドットの励起エネルギーにちょうど一致した場合、左側のドットに入った電子はその励起準位を介してドレイン側に抜けることができる。この結果電流・電圧特性に鋭いピークが現れ、ピーク位置の磁場依存性は右側のドットのゼロ次元準位を反映しFock-Darwin状態と良い一致を示す。これらのピークの磁場依存性をより大きなソース・ドレイン電圧に対して測定したところドット間のエネルギー差がGaAsのLOフォノンエネルギー(約36meV)より大きいと思われる領域に一連の強いピークが観測された。これらの強いピークの磁場依存性は低電圧側で観測されたピークと同様な低い軌道準位に対するFock-Darwin状態に一致していることから、LOフォノンの放出を伴ったドット間のトンネリングによるものと思われる。

4.3.3 一次元電子系の電子間相互作用の研究

一次元電子系の電子輸送については、長さ数ミクロンの単一モード量子細線を使って、一次元朝永-ラッティンジャー液体の実験を行っている。これまで、温度に対して非普遍的なコンダクタンス特性を観測し、これが朝永-ラッティンジャー液体特有の“相関関数のべき乗則”を反映することを確認した。現在、より強い電子相関が期待できる新しい一次元量子細線を作成し、その朝永-ラッティンジャー液体効果を調べている。

短周期ポテンシャル変調を持つ量子細線における電気伝導 [7,29,54]

一次元電子が短周期のポテンシャル変調中を伝搬する時に生じるブラッグ反射には、フェルミ液体 (FL) 的な電子波干渉や朝永-ラッティンジャー液体 (TLL) 的な非線形コンダクタンスやスピン-電荷分離の特徴が現れる。我々は、この現象を量子細線を使って検証すべく実験を進めている。今回、磁場を使って両液体の特徴の識別を試みた。その結果、相互作用の弱い FL 状態となる磁場中では端状態の関与するブラッグ反射を観測し、一方、より低磁場領域では TLL 効果のためにブラッグ反射前後の領域のコンダクタンスが非 FL 的な温度変化を示すことを見出した。FL 液体と見なせる磁場中では、電子は分散関係の中でポテンシャル変調の周期に応じた波数でミニギャップを生じる。この現象は量子化コンダクタンスプラトー上のコンダクタンス振動として観測された。一方、低磁場中 (0.3 T) でも、高磁場ほど明瞭ではないがブラッグ反射によるコンダクタンスディップが観測された。このディップの中央、ディップから離れた位置でコンダクタンスの温度依存性を測定したところ、いずれも、TLL に特徴的な温度特性のディップが観測された。また、この温度変化から TLL の相関パラメータ K は 0.51 と見積もられる。このほか、量子細線中にショットキーゲートを取り付けることで任意のポテンシャル変調ができるデバイスも作成中である。これまで低温での動作確認をしたところ、この変調ゲートと細線を形成するためのスプリットゲートを独立に制御することに成功した。

結合量子細線のク-ロンドラッグ [12,17,23,48]

前年度に引き続き、長さ数 μm の二つの量子細線を平行に近接して並べた系 (結合量子細線) において、クーロンドラッグに現れる朝永-ラッティンジャー液体効果の検証実験を行っている。理論的な予測によれば、等しいフェルミ速度をもつ比較的長い二つの量子細線が温度に比べて強く結合している場合に、極端に大きなドラッグ抵抗が生じる。また、この場合のドラッグ抵抗は、非相互作用系の場合とは逆に、温度の上昇とともに指数関数的に減少する。実験で

は、二つの細線中のフェルミ速度が一致するときに、従来の観測値に比べて極端に強いドラッグ信号を観測した。さらにその温度特性は、強結合した二つの電荷密度波のモデルで予測されるものとよく合ったものになった。また、やや短めの結合量子細線 (長さ $1\ \mu\text{m}$) においては、相互作用の長さが細線の長さを超える領域での測定が可能になり、有限長さの効果を確かめることができた。この領域でのドラッグ抵抗の温度変化は、指数関数的なものよりも緩やかになり、温度の逆数に比例する。さらに、温度が細線間の結合の強さをこえるとドラッグ抵抗が急激に減少する様子も確かめた。また、興味深い現象として、二つの細線が異なるフェルミ速度をもち、かつ二つの細線間に電子密度の格差がある場合には、負のドラッグ抵抗が出現することが分かった。これは、一方の細線が長距離相関をもつウィグナー結晶状態であるのに対し、もう一方が長距離相関のないフェルミ的な状態であると考え、一方の細線中のウィグナー結晶がもう一方の細線の伝導帯のホールをドラッグする現象として理解することができる。

4.3.4 表面敏感走査プローブを用いた状態密度の空間分布測定法の開発

半導体微細構造の電子系は、磁場中で相関効果による様々な状態遷移を起こす。その多体相関効果を直接検証する方法として、電子状態密度の空間分布を高分解能で測定するための表面敏感走査プローブ (極低温、高真空、高磁場で動作) を開発している。今年度は、装置の立ち上げを進めるとともに、室温高真空の環境で清浄な劈開端面を形成する技術について検討した。

4.3.5 ホットエレクトロンのスピンバルブ効果

スピンは量子状態を左右する重要なパラメータであるが、その検出、制御は技術的には極めて難しい。それを解決し得る候補の一つがスピンバルブトランジスタであるが、スピン状態密度や伝導特性については良く分かっていない。我々は、 $\text{Au}/\text{Co}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}/\text{GaAs}$ 構造を使って、 Fe/GaAs のショットキー接合を利用したエネルギー分光法により、伝導電子のエネルギースペクトルやホットエレクトロンの伝導を調べている。この素子はエミッター (Co)・ベース (Fe) 間が強磁性トンネル接合 (MTJ) になっており、電子はエミッター (Co) から絶縁膜 (Al_2O_3) を介してベース (Fe) にトンネル注入される。この電子のうち、ベース (Fe)・コレクター (GaAs) 間のショットキー障壁を越えるエネルギーを持った成分 (ホットエレクトロン) しかコレクター (GaAs) 側に入っていない。ホットエレクトロンのエネルギーはエミッター電圧で変えられるので、これをショットキー障壁の高さより僅かに高く設定すればベースでエネルギー緩和を受けない電子のみをコレクター電流として検出するこ

とができる。Fe のスピン状態密度を見るとフェルミ面上方にアップスピンとダウンスピンで大きな差があり、この領域のエネルギーを持った電子は普通の伝導電子より強くスピンの依存した伝導特性を示すはずである。これまでの実験で、スピンバルブ動作は確認したが、ホットエレクトロンの痕跡は見られていない。これは Fe 層が 800 Å と平均自由行程 (数 nm) に比べて厚すぎたため、現在 5-20nm の Fe 層をもつ試料を使ってデバイスを作製中である。

本研究の大部分は NTT 物性科学基礎研究所、デルフト工科大、ERATO 多体相関プロジェクトとの共同研究である。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] D.G. Austing, Y. Tokura, S. Tarucha, T.H. Oosterkamp, J.W. Janssen, M.W.S. Danoesastro, and L.P. Kouwenhoven: Vertical quantum dots at high magnetic fields beyond the few-electron limit, *Physica E* **6**, 358-363(2000).
 - [2] Y. Tokura, S. Sasaki, D.G. Austing, and S. Tarucha: Single-electron tunneling through two vertically coupled quantum dots, *Physica E* **6**, 676-679(2000).
 - [3] S. Tarucha, D.G. Austing, Y. Tokura, W.G. van der Wiel, and L.P. Kouwenhoven: Direct Coulomb and Exchange Interaction in Artificial Atoms, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 2485-2488(2000).
 - [4] S. Sasaki, S. De Franceschi, J. M. Elzerman, W. G. van der Wiel, M. Eto, S. Tarucha, and L. P. Kouwenhoven: Kondo effect in an integer-spin quantum dot, *Nature*, **405**, 764-766(2000).
 - [5] W. G. van der Wiel, S. De Franceschi, T. Fujisawa, J. M. Elzerman, S. Tarucha, and L. P. Kouwenhoven: The Kondo Effect in the Unitary Limit, *Science*, **289**, 2105-2108(2000).
 - [6] S. Tarucha, D.G. Austing, S. Sasaki, Y. Tokura, W. van der Wiel, and L.P. Kouwenhoven: Effects of Coulomb interactions on spin states in vertical semiconductor quantum dots, *Appl. Phys. A* **71**, 367-378(2000).
 - [7] Y. Tokura, A.A. Odintsov, and S. Tarucha: Interaction Effects in One-Dimensional Semiconductor Systems, *Lecture Notes in Physics*, Vol.**0544**, 0079(2000).
 - [8] S. De Franceschi, S. Sasaki, J. M. Elzerman, W. G. van der Wiel, S. Tarucha, and L. P. Kouwenhoven: Electron Cotunneling in a Semiconductor Quantum Dot, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 878-881(2001).
 - [9] S. Tarucha, D.G. Austing, S. Sasaki, Y. Tokura, W. van der Wiel, S. de Franceschi and L.P. Kouwenhoven: Spin effects in semiconductor quantum dot structures, accepted for publication in *Physica E* (2001).
 - [10] S. Tarucha, D.G. Austing, S. Sasaki, Y. Tokura, J.M. Elzerman, W. van der Wiel, S. de Franceschi, and L.P. Kouwenhoven: Novel Kondo Anomaly in Quantum Dots, accepted for publication in *Journal Materials Science and Engineering B* (2001).
 - [11] S. Amaha, D.G. Austing, Y. Tokura, K. Muraki, K. Ono, and S. Tarucha: Magnetic field induced transitions in the few-electron ground states of artificial molecules, accepted for publication in *Solid state comm.* (2001).
- (会議抄録)
- [12] Y. Yamamoto, M. Stopa, Y. Hirayama, Y. Tokura, and S. Tarucha: Coulomb drag in parallel quantum wires, *Proc. of the 25th Int. Conf. on the Physics of Semiconductors* (World Scientific, Osaka. Editor Tsuneya Ando (2001)).
- (国内雑誌)
- [13] 樽茶清悟: 人工原子分子のユニークな物理、*パリティ*, No.6, 15-19(2000).
 - [14] 佐々木智, 樽茶清悟: 縦型量子ドットにおける新型近藤効果, *固体物理*, vol.35, 887-895(2000).
- (修士論文)
- [15] 天羽真一: 人工分子の磁場中における電子状態遷移
 - [16] 北村吉隆: 外部電極と強く結合した量子ドットのコトネルリングと近藤効果
 - [17] 山本倫久: 結合量子細線のドラッグ効果
- (著書)
- [18] 樽茶清悟: 試料作製技術, *丸善実験物理学講座*, vol 4, 小間 篤 編, 282-289 (2000).
 - [19] S. Tarucha, D.G. Austing, S. Sasaki, L.P. Kouwenhoven, S. Reimann, M. Koskinen and M. Manninen: Electronic states in circular and ellipsoidally deformed quantum dots, *Physics and Applications of Semiconductor Quantum Structure*, ed. by T. Yao, IOP Publishing Co., Bristol, UK.(2001).
 - [20] S. Tarucha, David Guy Austing, and Toshimasa Fujisawa: Electron Transport in Semiconductor Quantum Dots, *Optical and Electronic Process of Nano-matters*, ed. By T. Kamiya, *Advances in Optoelectronics*, Kluwer Co., to be published.
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [21] K. Ono, D. G. Austing, Y. Tokura, and S. Tarucha: Angular Momentum Selection Rule for Resonant Tunneling Through Two Discrete Energy States, 3rd International Symposium on Formation, QDS2000 (Hokkaido Univ. Conference Hall Sapporo, Japan, September 2000).

- [22] W.G. van der Wiel, T. Fujisawa, S. Tarucha, and L.P. Kouwenhoven: A double quantum dot as an artificial atom, 3rd International Symposium on Formation, QDS2000 (Hokkaido Univ. Conference Hall Sapporo, Japan, September 2000).
- [23] M. Yamamoto, M. Stopa, Y. Tokura, Y. Hrayama, and S. Tarucha: Coulomb Drag in Parallel Quantum Wires, 25 th International Conference on the Physics of Semiconductors, ICPS25 (Osaka International Convention Center (OICC), Osaka, Japan, September 2000).
- [24] K. Ono, D.G. Austing, Y. Tokura, and S. Tarucha: Spin selective tunneling and spin blockade in vertically coupled double dot systems, 25 th International Conference on the Physics of Semiconductors, ICPS25 (Osaka International Convention Center (OICC), Osaka, Japan, September 2000).
- [25] S. Sasaki, D.G. Austing, Y. Kitamura, S. Tarucha, S. De Franceschi, J. M. Elzerman, W. G. van der Wiel, and L. P. Kouwenhoven: A novel Kondo effect in a vertical quantum dot, 25 th International Conference on the Physics of Semiconductors, ICPS25 (Osaka International Convention Center (OICC), Osaka, Japan, September 2000).
- [26] S. Tarucha, K. Ono, D.G. Austing, Y. Tokura, and T. Fujisawa: Spin Dependent Tunneling in Coupled Two Quantum Dot System, MRS 2000 Fall Meeting Symposium I "Semiconductor Spintronics-Physics, Materials and Applications" (Boston, November 2000).
- [27] W.G. Van der Wiel, S. De Franceschi, S. Sasaki, J.M. Elzerman, T. Fujisawa, S. Tarucha, and L.P. Kouwenhoven: The Kondo Effect in lateral and vertical Quantum Dots, Int. Symp. on Carrier Interactions in Mesoscopic Systems 2001 (CIM2001) (NTT Atsugi R & D Center, February 2001).
- [28] W.G. Van der Wiel, E.W.G.M. Huizeling, J.M. Elzerman, S. De Franceschi, T. Fujisawa, S. Tarucha, and L.P. Kouwenhoven: Electromagnetic Aharonov-Bohm effect in a 2-D electron gas ring, Int. Symp. on Carrier Interactions in Mesoscopic Systems 2001 (CIM2001) (NTT Atsugi R & D Center, February 2001).
- [29] T. Asayama, Y. Tokura, S. Miyashita, M. Stopa, and S. Tarucha: Magnetic Minibands and Conductance Oscillations in a Quantum Wire with Short Period Potential Modulation, Int. Symp. on Carrier Interactions in Mesoscopic Systems 2001 (CIM2001) (NTT Atsugi R & D Center, February 2001).
- [30] S. Amaha, D.G. Austing, Y. Tokura, K. Muraki, K. Ono, and S. Tarucha: Magnetic field induced transitions in the few-electron ground states of artificial molecules, Int. Symp. on Carrier Interactions in Mesoscopic Systems 2001 (CIM2001) (NTT Atsugi R & D Center, February 2001).
- [31] D.G. Austing, R Hill, A Patane, M Henini, P Main, L. Eaves, and S. Tarucha: Influence of different starting materials on transport through self assembled dots, Int. Symp. on Carrier Interactions in Mesoscopic Systems 2001 (CIM2001) (NTT Atsugi R & D Center, February 2001).
- [32] Y. Kitamura, S. Sasaki, W. Izumida, K. Ono, and S. Tarucha: The Kondo effect in a quantum dot with only one electron, Int. Symp. on Carrier Interactions in Mesoscopic Systems 2001 (CIM2001) (NTT Atsugi R & D Center, February 2001).
- [33] T. Fujisawa, Y. Tokura, Y. Hirayama, D.G. Austing, and S. Tarucha: Transient current spectroscopy of lateral and vertical quantum dots, Int. Symp. on Carrier Interactions in Mesoscopic Systems 2001 (CIM2001) (NTT Atsugi R & D Center, February 2001).

招待講演

- [34] S. Tarucha: Many-body States in Semiconductor Quantum Dots, Int. Symp. On Strong Correlation-sin Many-body Systems (Tokyo / Mount Nikko, Japan, June 2000).
- [35] S. Tarucha: Spin Singlet and Triplet in Quantum Dot Atoms and Molecules, Spin Effects in Mesoscopic Systems Euro conference (Cortona-Italy, June-July 2000).
- [36] S. Tarucha: Spin Effects in Quantum Dot Structures, The 8th Asia Pacific Physics Conference (Academia Sinica Taipei, August 2000).
- [37] S. Tarucha, K. Ono, and D.G. Austing: Spin Dependent Transport in Coupled Two Quantum Dot System (Poland-Japan Seminar, Sendai, September 2000).
- [38] S. Tarucha, K. Ono, S. Amaha, D.G. Austing, Y. Tokura, and S. Sasaki: Spin Effects on a Few-electron States in Strongly and Weakly Coupled Quantum Dot Molecules, Japan-Israel Symposium (Riken, Tokyo, September 2000).
- [39] S. Tarucha: Spin Effects in Semiconductor Quantum Dots, PASPS 2000 (Sendai, September 2000).
- [40] S. Tarucha: Interaction Effects and Transport Properties of Quantum Dots and Wires, GDR Systems Fortement Correlas, Interactions et Physique Mesoscopique (Réunion d' Aussois, France, September 2000).
- [41] S. Tarucha: Interaction Effects and Transport Properties of Semiconductor Quantum Dots, Int. Workshop on Artificial Atoms and Related Finite Fermion and Boson Systems, ECT (Trento-Italy, September 2000).
- [42] S. Tarucha: Two-electron Spin States and Related Physics in Quantum Dot Structures, The 8th NEC Symposium on Fundamental Approaches to New Material Phases, Spin-related Quantum Transport in Mesoscopic Systems, (Nasu, Japan, October 2000).

- [43] S. Tarucha: Spin Effects and Transport Properties of Semiconductor Quantum Dots, Int. Symp. on New Developments in "Strongly Correlated Electron Phase under Multiple Environment" (Osaka, Japan, November 2000).
- [44] S. Tarucha, D.G. Austing, S. Sasaki, Y. Tokura, T. Fujisawa, S. De Franceschi, W. van der Wiel, J. Elzerman, and L.P. Kouwenhoven: Control Over Two-electron Spin States and Kondo Effect in Quantum Dots, 4th Int. Workshop on Quantum Functional Devices (Kanazawa, November 2000).
- [45] K. Ono and S. Tarucha: Spin-selective tunneling in double quantum dots, Frontier Science Research Conference: Science and Technology of Nanostructures (Lajolla, U.S.A, November 2000).
- [46] S. Tarucha: Control and Applications of Two-electron States in Quantum Dot Structures, Int. Symp. on Carrier Interactions in Mesoscopic Systems 2001 (CIM2001) (NTT Atsugi R & D Center, February 2001).
- (国内会議)
- 一般講演
- [47] 天羽真一、D.G. Austing、佐々木智、都倉康弘、大野圭司、樽茶清悟: 半導体人工分子の磁場による状態遷移、第 55 回日本物理学会 (新潟大学五十嵐キャンパス、2000 年 9 月)
- [48] 山本倫久、大野圭司、M. Stopa、都倉康弘、平山祥郎、樽茶清悟: 結合量子細線におけるク - ロンドラッグの温度特性、第 55 回日本物理学会 (新潟大学五十嵐キャンパス、2000 年 9 月)
- [49] 大野圭司、樽茶清悟: 縦型 2 重量子ドットにおけるスピン選択トンネル、電子情報通信学会研究会 (北大、2001 年 2 月)
- [50] 大野圭司、D.G. Austing、都倉康弘、樽茶清悟: 2 重量子ドットにおける LO フォノン介在トンネリング、第 56 回日本物理学会 (中央大学八王子キャンパス、2001 年 3 月)
- [51] 天羽真一、D.G. Austing、都倉康弘、佐々木智、大野圭司、樽茶清悟: 半導体人工分子の磁場による少数電子の状態遷移、第 56 回日本物理学会 (中央大学八王子キャンパス、2001 年 3 月)
- [52] 北村吉隆、佐々木智、泉田渉、大野圭司、樽茶清悟: 少数電子を含む人工原子の近藤効果とコトンネリング、第 56 回日本物理学会 (中央大学八王子キャンパス、2001 年 3 月)
- [53] 山本倫久、大野圭司、M. Stopa、都倉康弘、平山祥郎、樽茶清悟: 結合量子細線におけるク - ロンドラッグとフォノンドラッグ、第 56 回日本物理学会 (中央大学八王子キャンパス、2001 年 3 月)
- [54] 浅山徹哉、大野圭司、都倉康弘、宮下宣、M. Stopa、樽茶清悟: 短周期ポテンシャル変調を持つ量子細線における磁気ミニバンドとコンダクタンス振動、第 56 回日本物理学会 (中央大学八王子キャンパス、2001 年 3 月)
- [55] 藤澤利正、都倉康弘、平山祥郎、D.G. Austing、樽茶清悟: 過電流スペクトルによる縦型量子ドットのスピン状態とエネルギー緩和、第 56 回日本物理学会 (中央大学八王子キャンパス、2001 年 3 月)
- [56] D.G. Austing、S. Sasaki、K. Ono、S. Tarucha、M. Barranco、A. Emperador、M. Pi、F. Garcias: Influence of mismatch on the addition energy spectra of artificial molecules、第 48 回応用物理学会 (明治大学駿河台キャンパス、2001 年 3 月)
- 招待講演
- [57] 樽茶清悟、佐々木智、江藤幹雄、Silvano De Franceschi、Leo Kouwenhoven: 量子ドット原子における近藤効果、第 55 回日本物理学会 (新潟大学五十嵐キャンパス、2000 年 9 月)
- [58] 樽茶清悟: メゾスコピック物理、神奈川科学技術アカデミー 教育講座「超微細加工技術とその応用」コース (NTT 物性科学基礎研究所、2000 年 11 月)
- [59] 樽茶清悟: 人工の原子や分子を半導体中に作る、第 15 回「大学と科学」公開シンポジウム - 電気と磁気の新しい交わり - スピンが拓く 21 世紀のエレクトロニクス (大阪・千里ライフサイエンスセンター、2000 年 11 月)
- [60] 樽茶清悟: 半導体人工分子の電子状態、第 1 2 回日本 MRS 学術シンポジウム (神奈川サイエンスパーク、2000 年 12 月)
- [61] 樽茶清悟: 半導体ドット構造における 2 電子スピン状態の制御と応用、応用物理学会 (明治大学、2001 年 3 月)
- (セミナー)
- [62] 樽茶清悟: 半導体ナノ構造と量子力学 (日立中央研究所セミナー、2000 年 6 月)
- [63] 樽茶清悟: 半導体低次元構造の物理 (大阪工業大学工学部セミナー、2000 年 11 月)
- [64] S. Tarucha, K. Ono, M. Yamamoto, T. Asayama, M. Stopa, Y. Hirayama: Transport Properties of Quantum Wires "Quantum wire with a short period modulation", "Laterally coupled two quantum wire", Seminar at Theoretical Physics Institute (University of Minnesota, December 2000).
- (研究会)
- [65] 樽茶清悟: 量子ナノ構造の科学と技術: 高分解能電子分光が明かす低次元系新物性、量子力学実験 PF 研究会 (KEK 物質構造科学研究所、2000 年 5 月)
- [66] 樽茶清悟: 半導体人工原子のスピン効果、東大ナノリンク研究会 (東大本郷、2000 年 8 月)

4.4 藤森研究室

藤森研究室では、光電子分光、放射光分光等の手法により、固体電子物性の研究を行っている。強相関電子系の示す様々な基状態とゆらぎ、相転移近傍の特異な振る舞いなどを調べている。具体的には、 d 電子系（遷移金属化合物）、 f 電子系（希土類元素化合物）、低次元系、量子スピン系が示す金属-絶縁体転移（モット転移、アンダーソン転移、電荷整列など）、磁気相転移・クロスオーバー（強磁性、反強磁性、近藤効果）、高温超伝導、巨大磁気抵抗、巨大熱電能などの機構解明をめざす。

実験室光源の他に、高エネルギー加速器研究機構のフoton・ファクトリー、スタンフォード放射光研究所、SPring-8等の放射光を用いて実験を行っている。また、新領域創成科学研究科の溝川研究室と共同で、柏キャンパスの高輝度放射光源計画 SuperSORにおける高分解能光電子分光ビームラインの建設準備を行っている。

4.4.1 超伝導、金属-絶縁体転移

高温超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の超伝導 - 絶縁体転移近傍における電子状態

角度分解光電子分光により、 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の電子状態のホール濃度依存性を調べた。特に、低ドーピング超伝導相から絶縁相にかけて詳細に調べ、Cu-O方向に延びたストライプ状の動的な揺らぎから、Cu-Oと45度をなす静的な“斜めストライプ”へ変化するのに伴う電子構造の変化を見出した。絶縁体である“斜めストライプ”相において、“大きなフェルミ面”とその反強磁性的の折り返しが観測された。

高温超伝導体における化学ポテンシャル・シフト

ホール・ドーピング型超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 、電子ドーピング型超伝導体 $\text{Nd}_{1-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ に引き続いて、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{1-x}\text{R}_x\text{Cu}_2\text{O}_{8+y}$ ($R = \text{Pr}, \text{Er}$) の内殻準位のシフトから、化学ポテンシャル・シフトを求めた。ストライプ揺らぎを示す $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ に比べて、低ドーピング領域での化学ポテンシャルの抑制は弱いことがわかり、 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ での化学ポテンシャルの抑制が、ミクロな相分離の一種であるストライプ揺らぎによるという従来の仮説を支持する結果が得られた。

ペロブスカイト型 Fe 酸化物における電荷不均化

低温で電荷不均化 $2\text{Fe}^{4+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{Fe}^{5+}$ を伴う金属 \rightarrow 絶縁体転移を示す $\text{La}_{1/3}\text{Sr}_{2/3}\text{FeO}_3$ と CaFeO_3 を、光電子分光、核共鳴X線散乱、バンド計算により調べた。breathing型格子変形を伴う CaFeO_3 では、顕著なフォノン状態密度の変化が観測され、バ

ンド計算からも金属 - 絶縁体転移に格子変形が必要なことが示された。これらの結果は、格子変形をほとんど伴わない $\text{La}_{1/3}\text{Sr}_{2/3}\text{FeO}_3$ と対照的である。

VO_2 のモット転移と絶縁体相の温度変化

約 320 K で一次の金属-絶縁体を示す VO_2 の低温半導体相での電子状態の温度変化を詳しく調べた。バンドギャップの温度変化などが通常の半導体と定性的に同様であることを示した。一方、スペクトル形状はバンド理論とは大きく異なり、電子相関の重要性を示した。

パイロクロア型 Ru 酸化物の金属-絶縁体転移

温度により金属-絶縁体転移を示す $\text{Tl}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$ の電子構造を、光電子分光、逆光電子分光により調べた。逆光電子スペクトルの解析から、転移に伴い Tl 6s 電子状態が変化することが示された。また、ホール・ドーピングにより金属-絶縁体転移を示す $\text{Sm}_{2-x}\text{Ca}_x\text{Ru}_2\text{O}_7$ の電子状態変化、化学ポテンシャル・シフトを光電子分光により調べた。

3次元系 CuV_2S_4 における電荷密度波の可能性

3次元スピネル型結晶構造と持つにも関わらず電荷密度波転移を起こす CuV_2S_4 の電子状態を、高分解能光電子分光および第一原理バンド計算により調べた。擬ギャップが転移点（ ~ 100 K）よりはるかに高温（ ~ 300 K）から起こることがわかり、揺らぎの効果が強いことが示唆された。一方、バンド構造から計算された電荷感受率は、フェルミ面が弱くネスティングを示すことを示した。

巨大磁気抵抗マンガン酸化物における化学ポテンシャルのシフト

ペロブスカイト型マンガン酸化物において、金属-絶縁体転移近傍の相分離が巨大磁気抵抗の原因であるとの説を検証するために、マクロあるいはミクロな相分離に敏感な化学ポテンシャルのシフトの測定を $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ について行った。その結果、金属-絶縁体転移の起こるホール濃度の低い領域では目立ったシフトの抑制は見られず、相分離が巨大磁気抵抗の原因であるという説に疑問を投げかけた。

$\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3$ の電子状態

高分解能光電子分光により、 $\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3$ の電子状態を調べた。CDW絶縁体 BaBiO_3 の Bi 6s バンドの強度が Pb 置換により減少する一方、フェルミ準位での強度が増加し、超伝導組成で最大になる

ことが観測された。

4.4.2 磁性体

$\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$ の軟 X 線吸収と磁気円二色性

ホールドーピングにより強磁性金属となるペロブスカイト型酸化物 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$ の軟 X 線吸収磁気円二色性を測定し、スピンおよび軌道磁気モーメントを見積もった。Co イオンが中間スピン状態にあること、ホールドーピングにより d 電子の遍歴性が増すことがわかった。

スピン・フラストレートのある系 $\text{Y}_{1-x}\text{Sc}_x\text{Mn}_2$

結晶構造に由来するフラストレーションのために低温まで巨大なスピン揺らぎを示す $\text{Y}_{1-x}\text{Sc}_x\text{Mn}_2$ と 1 次の反強磁性転移を示す YMn_2 の電子状態を、高分解能光電子分光、逆光電子分光により調べた。スペクトル形状はバンド計算とは大きく異なり、電子相関効果の重要性が明らかになった。電子相関効果を現象論的な自己エネルギーで取り入れてスペクトルの解析を行い、熱力学的性質（巨大比熱）と分光学的性質をコンシステントに説明した。

遷移金属モノシリサイドの遍歴磁性

非磁性（温度誘起磁性）半導体 FeSi と反磁性半金属 CoSi の混晶系 $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$ は、広い組成範囲で長周期のスパイラル反強磁性、強磁性を示す。また、 MnSi は長周期のスパイラル反強磁性を示す。高分解能光電子分光により、これらの物質の組成、温度による電子構造の変化を調べた。 $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$ については、フェルミ準位近傍でリジッド・バンド的な組成依存性が見られ、フェルミ準位が状態密度のピークにさしかかることが強磁性の原因であると結論した。

GaAs をベースにしたスピン制御半導体のバンド構造

半導体にスピンとキャリアーを同時に導入できることで注目を集めている Mn ドープ III-V 族半導体 $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ のバンド構造を角度分解光電子分光により調べた。Mn ドーピングにより、 GaAs 母体のバンドの一部がシフトすること、価電子帯頂上のフェルミ準位付近に、運動量分散のない不純物バンド的な状態が出現することが見出された。また、 $\text{Ga}_{1-x}\text{Cr}_x\text{As}$ について、金属 - 絶縁体転移と半導体領域での強磁性の出現を見出した。

酸化物希薄磁性半導体 $\text{Zn}_{1-x}\text{T}_x\text{O}$ ($T = 3d$ 遷移金属) の電子構造と p - d 交換相互作用

新しい希釈磁性半導体として最近注目されている $\text{Zn}_{1-x}\text{T}_x\text{O}$ の電子状態を光電子分光により調べた。内殻光電子スペクトルのサテライト構造のクラスターモデルによる解析を行なった。交換相互作用定数が見積もられ、 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}$ ホールをドープできれば高いキュリー点を持つ強磁性体が得られることが予言された。

カゴメ格子 $\text{Rb}_2\text{Ni}_3\text{S}_4$

Ni 原子がカゴメ型格子を作る $\text{Rb}_2\text{Ni}_3\text{S}_4$ の電子状態と、内殻光電子分光、角度積分型および角度分解型光電子分光により調べた。スペクトル形状は、Ni が低スピン状態にあるとして説明された。バンド計算とは概ねよい一致を示したが、一部に電子相関の効果と思われる不一致が見られた。

4.4.3 低次元系

$\text{PrBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ における金属的 Cu-O 一次元鎖の電子状態

高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ の Y サイトを Pr に置換すると、 CuO_2 面は絶縁体となり、Cu-O 鎖にのみキャリアーがドープされた 1 次元金属となる。 $\text{PrBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ および Cu の一部を Zn を置換した単結晶について、角度分解光電子分光をおこなった。スペクトル形状が、1 次元金属に対して理論的に予言されている朝永 - ラッティンジャー液体の特徴を示した。

1 次元鎖を持つ TlGaTe_2 の電子構造

1 次元的結晶構造を持つ半導体 TlGaTe_2 の電子構造を、角度分解光電子分光および第一原理バンド計算により調べた。両者の結果は初めの予想に反し、1 次元軸 (c -軸) に垂直な方向に大きなバンド分散を示し、 TlGaTe_2 が電子的に 3 次元性の強い物質であることが示された。

Trellis 格子 LiV_2O_5

第 1 近接原子間の超交換相互作用のみ考えた 1 次元ハイゼンベルク・モデルでよく記述される梯子型 NaV_2O_5 に対して、第 2 近接まで考える必要のある LiV_2O_5 の角度分解光電子分光スペクトルを測定した。特徴的な実験結果は、第 2 近接まで考えた $t-J$ モデル計算により説明されることがわかった。

4.4.4 近藤格子、重い電子系

近藤絶縁体 YbB_{12} に対する置換効果

典型的な近藤絶縁体 YbB_{12} に対する Lu 原子置換の効果、超高分解能光電子分光により調べた。わずかな量の Lu 置換により YbB_{12} の幅 ~ 10 meV の擬ギャップが崩壊すること、幅 ~ 40 meV の擬ギャップも徐々に崩壊することが見出された。Lu 濃度依存性より、後者は Yb 一原子の効果、前者は複数の Yb 原子間の相互作用の効果であることが結論された。

近藤絶縁体 FeSi に対するホールドーピングの効果

近藤絶縁体的な磁性、伝導性を示す d 電子系 FeSi に対するホールドーピングの効果、 $\text{FeSi}_{1-x}\text{Al}_x$ の高分解能光電子測定により調べた。擬ギャップ崩壊における非リジッドバンド的な振る舞いが明らかになった。

YbInCu_4

40 K 付近で 1 次相転移を示す価数揺動物質 YbInCu_4 のフェルミ準位近傍の電子状態を、高分解能光電子分光により調べた。近藤ピークの位置と価数の温度変化を再現するように、アンダーソン不純物モデルによる解析を行ない、Yb $4f$ 準位の位置と軌道混成強度の温度変化を定量的に見積もった。

高い熱電能を持つ CoSb_3 の電子構造

スクッテルダイト結晶構造を持つ CoSb_3 の電子構造を光電子分光により調べた。Co $3d$ および Sb $4p$ 原子軌道の混成により特徴的なバンド構造が形成されることが明らかにされた。 p 型、 n 型試料間でフェルミ準位のシフトが観測され、その大きさはバンドギャップの大きさと有効質量で説明された。

充填スクッテルダイト型 $M\text{Fe}_4\text{Sb}_{12}$ ($M = \text{La}, \text{Ce}, \text{Yb}$)

スクッテルダイト化合物の格子隙間に希土類を入れた充填スクッテルダイト型は、さらに優れた熱電特性を持つ。なかでも、 $\text{CeFe}_4\text{Sb}_{12}$ 、 $\text{YbFe}_4\text{Sb}_{12}$ は、価数揺動の面からも興味ある物性を示す。これらの物質について、光電子分光により、価数、フェルミ準位での擬ギャップを調べた。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] M. Satake, T. Mizokawa, A. Fujimori, T. Tanabe, T. Katsufuji and Y. Tokura: Charge Ordering and

Chemical Potential Shift in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_4$ Studied by Photoemission Spectroscopy, Phys. Rev. B **61** (2000) 15515 (cond-mat/9908014).

- [2] A. Ino, C. Kim, M. Nakamura, T. Mizokawa, Z.-X. Shen, A. Fujimori, Y. Kakeshita, H. Eisaki and S. Uchida: Electronic Structure of $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ in the Vicinity of Superconductor-Insulator Transition, Phys. Rev. B **62** (2000) 4137 (cond-mat/9902048).
- [3] J. Okamoto, H. Miyauchi, T. Sekine, T. Shidara, T. Koide, K. Amemiya, A. Fujimori, T. Saitoh, A. Tanaka, Y. Takeda and M. Takano: Magnetic X-Ray Dichroism Study of $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$, Phys. Rev. B **62** (2000) 4455.
- [4] T. Mizokawa, D. I. Khomskii and G. A. Sawatzky: Spin and Charge Ordering in Self-Doped Mott Insulator, Phys. Rev. B **61** (2000) 11263 (cond-mat/9908016).
- [5] T. Konishi, K. Mamiya, K. Morikawa, K. Kobayashi, T. Mizokawa, A. Fujimori, F. Iga, H. Kawanaka, Y. Nishihara, A. Delin and O. Eriksson: Electronic Structure of Valence-Fluctuating Ferromagnet CeFe_2 , Phys. Rev. B **62** (2000) 14303 (cond-mat/009200).
- [6] T. Mizokawa, C. Kim, Z.-X. Shen, A. Ino, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Goto, H. Eisaki, S. Uchida, M. Tagami, K. Yoshida, A. I. Rykov, Y. Siohara, K. Tomimoto, S. Tajima, Y. Yamada, S. Horii, N. Yamada, Y. Yamada and I. Hirabayashi: Angle-Resolved Photoemission Study of Insulating and Metallic Cu-O Chains in $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ and $\text{PrBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$, Phys. Rev. Lett. **85** (2000) 4779 (cond-mat/0011071).
- [7] T. Susaki, A. Fujimori, Y. Takeda, M. Taniguchi, M. Arita, K. Shimada, H. Namatame, S. Hiura, F. Iga and T. Takabatake: Photoemission Study of Substitution Effects on the Conduction-Band States in the Kondo Insulator YbB_{12} , J. Phys. Soc. Jpn. **70** (2001) 756.
- [8] K. Kobayashi, A. Fujimori, T. Ohtani, I. Dasgupta and O. K. Andersen: Electronic Structure of the Chevrel-Phase Compounds $\text{Sn}_x\text{Mo}_6\text{Se}_{7.5}$: Photoemission Spectroscopy and Band-Structure Calculations, Phys. Rev. B **63** (2001) 195109.
- [9] T. Yoshida, X. J. Zhou, M. Nakamura, S. A. Kellar, P. V. Bogdanov, E. D. Lu, A. Lanzara, Z. Husain, A. Ino, T. Mizokawa, A. Fujimori, H. Eisaki, C. Kim, Z.-X. Shen, T. Kakeshita and S. Uchida: Electron-Like Fermi Surface and Remnant $(\pi, 0)$ Feature in Overdoped $\text{La}_{1.78}\text{Sr}_{0.22}\text{CuO}_4$, Phys. Rev. B **63** (2001) R220501 (cond-mat/0011172).
- [10] A. Kimura, J. Matsuno, J. Okabayashi, A. Fujimori, T. Shishidou, E. Kulatov and T. Kanokmata: Soft X-Ray Magnetic Circular Dichroism Study of the Ferromagnetic Spinel-Type Cr Chalcogenides, Phys. Rev. B, in press.

- [11] X. J. Zhou, T. Yoshida, S. A. Kellar, P. V. Bogdanov, E. D. Lu, A. Lanzara, M. Nakamura, T. Noda, T. Kakeshita, H. Eisaki, S. Uchida, A. Fujimori, Z. Hussain and Z.-X. Shen: Dual Nature of the Electronic Structure of the Stripe Phase, *Phys. Rev. Lett.*, in press (cond-mat/0009002)
- [12] T. Koide, H. Miyauchi, J. Okamoto, T. Shidara, A. Fujimori, K. Amemiya, H. Takeshita, S. Yuasa, T. Katayama and Y. Suzuki: Direct Determination of Purely Interfacial Magnetic Moments and Ferromagnetism-to-Superparamagnetism Transition in Co Nanoclusters on Au(111), *Phys. Rev. Lett.*, in press.
- [13] J. Okabayashi, A. Kimura, O. Rader, T. Mizokawa, A. Fujimori, T. Hayashi and M. Tanaka: Angle-Resolved Photoemission Study of $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$, *Phys. Rev. B*, in press.
- [14] K. Okazaki, K. Tanaka, J. Matsuno, A. Fujimori, L. F. Mattheiss, S. Iida, E. Kerimova and N. Mamedov: Angle-Resolved Photoemission and Band-Structure Results for Linear Chain TlGaTe_2 , *Phys. Rev. B*, in press.
- [15] T. Yoshida, A. Ino, T. Mizokawa, A. Fujimori, Y. Taguchi, T. Katsufuji, Y. Tokura: Photoemission Spectral Weight Transfer and Mass Renormalization in the Fermi-Liquid System $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_{3+y/2}$, submitted to *Phys. Rev. B* (cond-mat/9911446)
- [16] K. Kobayashi, T. Susaki, A. Fujimori, T. Tonogai and H. Takagi: Disorder Effects in the Bipolaron System Ti_4O_7 Studied by Photoemission Spectroscopy, submitted to *Phys. Rev. Lett.* (cond-mat/9909189).
- [17] T. Koide, H. Miyauchi, J. Okamoto, T. Shidara, T. Sekine, A. Fujimori, H. Fukutani, M. Takano and Y. Takeda: Evidence for a Close Correlation between the Magnetic Moments, Lattice Distortions and Hybridization in LaMnO_3 and $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_{3+\delta}$: Doping-Dependent Magnetic Circular X-Ray Dichroism Study, submitted to *Phys. Rev. Lett.*
- [18] A. Ino, C. Kim, M. Nakamura, T. Yoshida, T. Mizokawa, Z.-X. Shen, A. Fujimori, T. Kakeshita, H. Eisaki and S. Uchida: Doping Dependent Evolution of the Electronic Structure of $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ in the Superconducting and Metallic Phases, submitted to *Phys. Rev. B* (cond-mat/0005370)
- [19] J. D. Lee, T. Mizokawa and A. Fujimori: Photoemission in the System of Linear Chains: Application to $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ and $\text{Nd}_{2-x-y}\text{La}_y\text{Sr}_x\text{CuO}_4$, submitted to *J. Phys. Soc. Jpn.* (cond-mat/0009391)
- [20] K. Okazaki, A. Fujimori and M. Onoda: Temperature-dependent Electronic Structure of VO_2 , submitted to *Phys. Rev. B*.
- [21] T. Susaki, A. Fujimori, M. Okusawa, J. L. Sarrao and Z. Fisk: High-Resolution Photoemission Study of the Valence Transition in YbInCu_4 , submitted to *Phys. Rev. B*.
- [22] A. Lanzara, P. V. Bogdanov, X. J. Zhou, S. A. Kellar, E. D. Lu, T. Yoshida, H. Eisaki, D.L. Feng, A. Fujimori, K. Kishio, J. -I. Shimoyama, T. Noda, S. Uchida, Z. Hussain and Z.-X. Shen: Ubiquitous and Almost Isotropic Coupling of Quasiparticle to Collective Excitations in High Temperature Superconductors, submitted to *Nature*.
- [23] H. Ishii, K. Okazaki, A. Fujimori, Y. Nagamoto, T. Koyanagi, J. O. Sofo: Photoemission Study of the Skutterudite Compounds $\text{Co}(\text{Sb}_{1-x}\text{Te}_x)_3$ and RhSb_3 , submitted to *Phys. Rev. B*.
- [24] J.-Y. Son, K. Okazaki, T. Mizokawa and A. Fujimori, T. Kanomata and R. Note: Photoemission Study of the Itinerant Helimagnet MnSi , submitted to *J. Phys. Soc. Jpn.*
- [25] J.-Y. Son, K. Okazaki, T. Mizokawa, A. Fujimori, T. Kanomata and R. Note: Photoemission Study of the Itinerant Helimagnet $\text{Fe}_x\text{Co}_{1-x}\text{Si}$, submitted to *Phys. Rev. B*.
- [26] J.-Y. Son, T. Mizokawa and A. Fujimori, H. Wada and M. Shiga: Photoemission study of the Laves-phase compounds YMn_2 and $\text{Y}_{0.97}\text{Sc}_{0.03}\text{Mn}_2$, submitted to *Phys. Rev. B*.
- [27] T. Nambu, T. Mizokawa, A. Fujimori, T. Fukumura and M. Kawasaki: Photoemission Study of the Oxide Diluted Magnetic Semiconductor $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}$, submitted to *Phys. Rev. B*.
- [28] N. Harima, J. Matsuno, A. Fujimori, Y. Onose, K. Taguchi and Y. Tokura: Chemical potential shift in $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$: Contrasting Behavior between the Electron- and Hole-Doped Cuprates, submitted to *Phys. Rev. Lett.*
- [29] H. Ishii, A. Fujimori, Y. Nagamoto and T. Koyanagi: Photoemission study of the Filled Skutterudite Compounds $M\text{Fe}_4\text{Sb}_{12}$ ($M = \text{La}, \text{Ce}, \text{Yb}$), submitted to *Phys. Rev. B*.
- [30] J. D. Lee, T. Mizokawa and A. Fujimori: Effects of Acoustic Plasmons in Photoemission from Coupled Layered Systems, submitted to *Phys. Rev. B*.
- [31] J. Okamoto, T. Mizokawa, A. Fujimori, T. Takeda, R. Kanno, F. Ishii and T. Oguchi: Photoemission Study of the Electronic Structure and the Metal-Semiconductor Transition in the Pyrochlore-Type $\text{Tl}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$, submitted to *Phys. Rev. B*.
- [32] M. Yamada, K. Ono, J. Okabayashi, M. Mizuguchi, T. Mano, A. Fujimori, M. Oshima, H. Akinaga: Semiconductor to Metal Transition in GaAs with High Cr-Doping; Electronic Structures and Magnetic Properties, submitted to *Appl. Phys. Lett.*
- (会議抄録)
- [33] T. Mizokawa, C. Kim, Z.-X. Shen, A. Ino, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Goto, H. Eisaki, S.

- Uchida, M. Tagami, K. Yoshida, A. I. Rykov, Y. Siohara, K. Tomimoto, S. Tajima and Y. Yamada: Angle-Resolved Photoemission Study of $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ and $\text{PrBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$, in *Advances in Superconductivity XII*, edited by T. Yamashita and K. Tanabe (Springer-Verlag, Tokyo, 2000) p. 173.
- [34] J. Matsuno, K. Kobayashi, A. Fujimori, L. F. Mattheiss and Y. Ueda: Electronic Structure of the “Heavy Fermion” System LiV_2O_4 , in *Proceedings of LI-st Yamada Conference on Strongly Correlated Electron Systems*, Physica B **281 & 282** (2000) 28.
- [35] T. Susaki, Y. Takeda, M. Arita, A. Fujimori, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, S. Hiura, F. Iga and T. Takabatake: Photoemission Study of Kondo Insulator YbB_{12} , *ibid*, Physica B **281 & 282** (2000) 282.
- [36] A. Fujimori, A. Ino, T. Yoshida, T. Mizokawa, M. Nakamura, C. Kim, Z.-X. Shen, T. Kakeshita, H. Eisaki and S. Uchida: Fermi Surface, Pseudogap and Superconducting Gap in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$, in *Proceedings of 6-th International Conference, Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors*, Physica C **341-348** (2000) 2067.
- [37] A. Fujimori, A. Ino, T. Yoshida, T. Mizokawa, M. Nakamura, C. Kim, Z.-X. Shen, K. Kishio, T. Kakeshita, H. Eisaki and S. Uchida: Pseudogaps and Dynamical Stripes in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ from Photoemission Spectroscopy, in *Proceedings of CREST International Workshop on Pseudo Gap, Spin Gap and Anomalous Metals*, J. Phys. Chem. Solids **62** (2001) 15.
- [38] A. Fujimori: Pressure Effects on Transition-Metal Compounds near Insulator-Metal Phase Boundaries, in *Proceedings of 9-th International Conference on High Pressure Semiconductor Physics*, Phys. Stat. Solidi B **223** (2001) 47.
- [39] A. Fujimori, A. Ino, T. Yoshida, T. Mizokawa, Z.-X. Shen, C. Kim, T. Kakeshita, H. Eisaki and S. Uchida: Fermi Surface, Pseudogaps and Dynamical Stripes in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$, in *Open Problems in Strongly Correlated Electron Systems*, edited by P. Prelovšek and A. Ramšak (Kluwer, 2000) in press (cond-mat/0011293).
- [40] A. Ino, S. Fujimori, T. Okane, A. Fujimori, T. Mizokawa, Y. Yasui, T. Nishikawa and M. Sato: Photoemission Study in the Filling-Control Metal-Insulator Transition in the Two-Dimensional System $\text{La}_{1.17-x}\text{Pb}_x\text{VS}_{3.17}$, *Proceedings of International Conference on Magnetism 2000*, J. Mag. Mater. **226-230** (2001) 263.
- [41] T. Mizokawa, C. Kim, A. Ino, Z.-X. Shen, M. Nakamura, T. Yoshida, A. Fujimori, H. Eisaki, T. Kakeshita, S. Uchida, K. Tomimoto, S. Tajima S. Horii and Y. Yamada: APRES Study of LSCO and PBCO: Electronic Structure of the Stripe Phase and th 1/4-Filled Cu-O Chains, *Proceedings of 3rd International Conference on Stripes and High- T_c Superconductivity*, Int. J. Mod. Phys. B (2000) 3602.
- [42] T. Yoshida, M. Nakamura, A. Ino, T. Mizokawa, A. Fujimori, X.-J. Zhou, S. A. Keller, P. Bogdanov, E. D. Lu, A. Lanzara, H. Eisaki, Z. Hussain, Z.-X. Shen, T. Kakeshita and S. Uchida: Nodal Spectral Weight and Fermi Surface in $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$, *ibid*, Int. J. Mod. Phys. B **14** (2000) 3777.
- [43] J. Okabayashi, A. Kimura, O. Rader, T. Mizokawa, A. Fujimori, T. Hayashi and M. Tanaka: Electronic Structure of III-V Based Diluted Magnetic Semiconductor $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ Studied by Photoemission Spectroscopy, *Proceedings of 25-th International Conference on Physics of Semiconductors*, (Springer-Verlag, Berlin, 2001), in press.
- [44] J. Okabayashi, A. Kimura, O. Rader, T. Mizokawa, A. Fujimori, T. Hayashi and M. Tanaka: Electronic Structure of $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ Studied by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, *Proceedings of the International Conference on the Physics and Application of Spi-Related Phenomena in Semiconductors 2000*, Physica E, in press.
- [45] A. Fujimori, J. Matsuno, T. Yoshida, N. Harima, T. Mizokawa and A. Ino: Electronic States and Novel Properties of Functional Transition-Metal Oxides: Tendency towards Charge-Density Modulation, *Tnars. Mater. Res. Soc. Japan*, in press.
- (綜説、解説、その他)
- [46] T. Saitoh, A. E. Bocuquet, T. Mizokawa, H. Namatame, A. Fujimori, Y. Takeda, M. Takano: Strontium-doped Lanthanum Manganese Oxides Studied by XPS, *Surface Science Spectra* **6** (1999) 292-301
- [47] T. Saitoh, A. E. Bocuquet, T. Mizokawa, H. Namatame, A. Fujimori, Y. Takeda, M. Takano: Strontium-doped Lanthanum Cobalt Oxides Studied by XPS, *Surface Science Spectra* **6** (1999) 302-312
- [48] K. Shimada, T. Mizokawa, K. Mamiya, T. Saitoh, A. Fujimori, T. Kamimura: Fe Chalcogenides by X-Ray Photoemission Spectroscopy, *Surface Science Spectra* **6** (2000) 321.
- [49] 岡本淳: Ru 酸化物の光電子分光法及び磁気円二色性による研究、新博士紹介、日本放射光学会誌 **13** (2000) 266.
- [50] 小林研介: 電子間相互作用と電子格子相互作用の競合する金属酸化物の分光学的研究、日本放射光学会誌 **13** (2000) 268.
- [51] 藤森淳: スイス-日本二国間セミナー「高輝度放射光を利用した新物質のスペクトロスコープ」、日本放射光学会誌 **14** (2001) 71.
- [52] A. Fujimori, T. Yoshida, K. Okazaki, T. Tsujoka, K. Kobayashi, T. Mizokawa, M. Onoda, B. T.

- Katsufuji, Y. Taguchi and Y. Tokura: Electronic Structure of Mott-Hubbard Type Transition-Metal Oxides, *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.*, in press.
- (学位論文)
- [53] 松野丈夫: Photoemission Study of Transition-Metal Compounds with Charge-Density Modulation (博士論文)
- [54] 孫珍永: Photoemission Study of Intermetallic Itinerant-Electron Magnets (博士論文)
- [55] 播磨有幸: Photoemission Study of the Chemical Potential Shift in $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ and $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{1-x}\text{R}_x\text{Cu}_2\text{O}_8$ ($R = \text{Pr}, \text{Er}$) (修士論文)
- [56] 石井啓之: Photoemission Study of Skutterudite Compounds (修士論文)
- [57] 南部貴: Photoemission Study of Diluted Magnetic Semiconductors $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}$ (修士論文)
- (編著書)
- [58] N. Tsuda, K. Nasu, A. Fujimori and K. Siratori: *Electronic Conduction in Oxides* (Springer-Verlag, Berlin, 2000).
- [59] 菅野暁、藤森淳、吉田博 編: 「新しい放射光科学」(講談社サイエンティフィック、2000)
- [60] 藤森淳: 放射光を用いた物性研究の基礎、「新しい放射光科学」菅野暁、藤森淳、吉田博 編(講談社サイエンティフィック、2000) p. 35.
- [61] T. Mizokawa and A. Fujimori: II-VI and III-V Semimagnetic Semiconductors: Photoemission and Interpretation, in *Physics and Control of Defects in Semiconductors* (Gordon & Breach, London, 2000), in press.
- [62] 藤森淳、小谷章雄、難波孝夫編: 物理学論文選集「強相関 f 電子系の分光」(日本物理学会、2000)
- [63] 藤森淳: 超光分解能光電子分光によるフェルミオロジ、 「分光学会測定法シリーズ “放射光” : 極限状態を見る放射光アナリシス」尾嶋正治編(学会出版センター)
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [64] A. Ino, S. Fujimori, T. Okane, A. Fujimori, T. Mizokawa, Y. Yasui, T. Nishikawa and M. Sato: Photoemission Study in the Filling-Control Metal-Insulator Transition in the Two-Dimensional System $\text{La}_{1.17-x}\text{Pb}_x\text{VS}_{3.17}$, *Proceedings of International Conference on Magnetism 2000*, (Recife, Brazil, August 2000)
- [65] A. Kimura, J. Matsuno, J. Okabayashi, A. Fujimori, T. Shishidou, E. Kulatov and T. Kanomata, Soft X-Ray Magnetic Circular Dichroism Study of the Ferromagnetic Spinel-Type Chalcogenides, *8-th International Conference on Electronic Spectroscopy and Structures* (Berkeley, U.S.A., August 2000)
- [66] A. Kimura, Y. Takaichi, K. Shimada, C. Hirai, H. Sato, M. Nakatake, M. Taniguchi, A. Fujimori, T. Nozoe and T. Kanimira: Valence Band Electronic Structure of Pauli Paramagnetic Cr and Ni Pnictides, *ibid*
- [67] A. Fujimori, J. Okabayashi, T. Nambu, T. Mizokawa, A. Kimura, O. Rader, T. Hayashi, M. Tanaka, T. Fukumura, M. Kawasaki: Photoemission Spectroscopy of New Diluted Magnetic Semiconductors: $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ and $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}$, *Workshop on Application of Synchrotron Light to Magnetic Materials* (Campinas, Brazil, August 2000)
- [68] T. Yoshida, X. J. Zhou, M. Nakamura, S. A. Kellar, P. Bogodanov, E. D. Lu, A. Lanzara, Z. Hussain, A. Ino, T. Mizokawa, A. Fujimori, Z.-X. Shen, H. Eisaki, T. Kakeshita, S. Uchida: Spectral Weight Mapping and Fermi Surface in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$, *3rd International Conference on Stripes and High- T_c Superconductivity* (Rome, August 2000)
- [69] J. Okabayashi, O. Rader, A. Kimura, T. Mizokawa, A. Fujimori, T. Hayashi, and M. Tanaka: Electronic Structure of $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ Studied by Photoemission Spectroscopy, *Symposium on Spin-Electronics* (Halle, Germany, July 2000).
- [70] J. Okabayashi, A. Kimura, O. Rader, T. Mizokawa, A. Fujimori, T. Hayashi and M. Tanaka: Electronic Structure of Spin-Controlled III-V Based Diluted Magnetic Semiconductor $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ Studied by Photoemission Spectroscopy, *25-th International Conference on the Physics of Semiconductors* (Osaka, September 2000)
- [71] J. Okabayashi, A. Kimura, O. Rader, T. Mizokawa, A. Fujimori, T. Hayashi and M. Tanaka: Electronic Structure of $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ Studied by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, *The International Conference on the Physics and Application of Spi-Related Phenomena in Semiconductors 2000* (Sendai, September 2000)
- 招待講演
- [72] A. Fujimori: Fermi Surface, Pseudogaps and Stripes in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$, *NATO Advanced Research Workshop – Open Problems in Strongly Correlated Electron Systems* (Bled, Slovenia, April 2000).
- [73] A. Fujimori: Superconductor, Insulator and “Stripe Phase” in Between, *Dutch-Japanese Symposium on Strong Correlations in Many-Body Systems* (Nikko, June 2000).
- [74] A. Fujimori, Photoemission Spectroscopy of $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$, in *XII Workshop on Strongly Correlated Electron Systems* (ICTP Trieste, Italy, July 2000)
- [75] A. Fujimori: Photoemission Spectroscopy of Stripe Phase and One-Dimensional Metals, *3rd Harima*

- International Forum: Synchrotron Radiation Spectroscopy of Magnetic Materials* (SPring-8, July 2000)
- [76] A. Fujimori, J. Okabayashi, T. Nambu, T. Mizokawa, A. Kimura, O. Rader, T. Hayashi, M. Tanaka, T. Fukumura and M. Kawasaki: Photoemission Spectroscopy of Diluted Magnetic Semiconductors $Ga_{1-x}Mn_xAs$ and $Zn_{1-x}Mn_xO$, *Polish-Japanese Seminar on Spin Related Phenomena in Semiconductors* (Sendai, September 2000)
- [77] A. Fujimori: Electronic Structure of Fe Oxides Studied by Photoemission Spectroscopy, *8-th International Conference on Ferrites* (Kyoto, September 2000)
- [78] A. Fujimori, Transition-Metal Compounds near the Metal-Insulator Bouraries, *9-th International Conference on High Pressure Semiconductor Physics* (Sapporo, September 2000)
- [79] T. Mizokawa, C. Kim, A. Ino, Z.-X. Shen, M. Nakamura, T. Yoshida, A. Fujimori, H. Eisaki, T. Kakeshita, S. Uchida, K. Tomimoto, S. Tajima S. Horii and Y. Yamada: APRES Study of LSCO and PBCO, *3rd International Conference on Stripes and High- T_c Superconductivity* (Rome, August 2000)
- [80] J. D. Lee: Photoemission in Strongly Correlated Layered Systems, *Swiss-Japanese Seminar on Spectroscopy of Novel Materials with Highly Brilliant Synchrotron Radiation* (Nikko, October 2000)
- [81] A. Fujimori: Photoemission Spectroscopy of 1D Metals and Stripe Phase in High- T_c Cuprates *1st Korea-Japan Symposium on Strongly Correlated Electron Systems* (Seoul National University, October 2000)
- [82] A. Fujimori and T. Mizokawa: Problems in Complex Materials and High Resolution Photoemission, *New Scientific Opportunities in Ultra High Resolution Spectroscopy: from Nano Materials to Complex Quantum Systems* (Stanford Synchrotron Radiation Laboratory, U.S.A., October 2000)
- [83] A. Fujimori: Photoemission Spectra of Dynamical Stripe Phase and Metallic Cu-O Chains, *Workshop on Novel Quantum Phenomena in Transition Metal Oxides* (Sendai, November 2000)
- [84] J. Okabayashi: Photoemission Studies of GaAs-based Diluted Magnetic Semiconductors, *6th International Symposium on Advanced Physical Fields "Growth of Well-defined Nanostructures"* (Tsukuba, March 2001)
- (国内会議)
一般講演
- [85] 岡林潤: 角度分解光電子分光でわかった希薄磁性半導体 $Ga_{1-x}Mn_xAs$ の電子構造、フロンファクトリー研究会「高分解能光電子分光が明かす低次元系新物性」(物構研、2000年5月)
- [86] 南部貴: 磁性半導体 $Zn_{1-x}Mn_xO$ の光電子分光、同上
- [87] 藤森淳: 光電子分光で見た高温超伝導体のストライプ、科研費特定領域研究「遷移金属酸化物における新しい量子現象」研究計画発表会(京大化研、2000年6月)
- [88] 藤森淳: Introduction - Fe, Ni, Mn 酸化物における酸素ホール、科研費基盤研究 A「酸素ホールの整列とダイナミクス」研究会(阪大基礎工、2000年8月)
- [89] 吉田鉄平、中村元彦、井野明洋、溝川貴司、藤森淳、X.-J. Zhou, P. Bogdanov, S. A. Kellar, E. Lu, A. Lanzara, Z. Hussain, 笹川崇男、永崎洋、C. Kim, Z.-X. Shen、掛下照久、内田慎一: $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ のフェルミ面マッピング、日本物理学会秋の分科会(2000年9月、新潟大学)
- [90] 石井啓之、田中清尚、岡林潤、藤森淳、小柳剛、長本泰征: フィルドスクッテルダイト化合物 MFe_4Sb_{12} ($M = La, Ce, Yb$) の光電子分光、同上
- [91] 縄井伸一郎、播磨有幸、南部貴、松野丈夫、岡崎浩三、石井啓之、藤森淳、本藤克彦、藤原香弘、加藤徹也、飯尾勝矩: $Rb_2Ni_3S_4$ の光電子分光、同上
- [92] 田中清尚、岡林潤、藤森淳、内田慎一、高木英典: $BaPb_{1-x}Bi_xO_3$ の光電子分光、同上
- [93] J. D. Lee, T. Mizokawa and A. Fujimori: Photoemission in the System of Linear Chains: an Application to PBCO and Nd-LSCO Systems、同上
- [94] 中村元彦、吉田鉄兵、笹川崇男、永崎洋、C. Kim、P. Armitage、D. Lu、井野明洋、奥沢誠、後藤昌宏、岸尾光二、内田慎一、Z. X. Shen、Z. Hussain、藤森淳: $La_{1.85}Sr_{0.15}Cu_{1-x}Zn_xO_4$ の角度分解光電子分光、同上
- [95] 岡根哲夫、藤森伸一、井野明洋、藤森淳、S. K. Dhar: $Yb_2Co_3X_9$ ($X = Ga, Al$) の高分解能光電子分光、同上
- [96] 藤森伸一、井野明洋、岡根哲夫、藤森淳、岡田耕三、真鍋敏夫、山下正廣、岸田英夫、岡本博: 疑一次元八口ゲン架橋金属錯体 $[Ni(chxn)_2Br]Br_2$ の角度分解光電子分光、同上
- [97] 井野明洋、藤森伸一、岡根哲夫、藤森淳、安井幸夫、西川崇、佐藤正俊: 二次元フィリング制御金属絶縁体転移系 $La_{1.17-x}Pb_xVS_{3.17}$ の高分解能光電子分光、同上
- [98] 設楽哲夫、小出常晴、関根武俊、宮内洋司、藤森淳、福谷博仁、木村剛、十倉好紀: 層状ペロブスカイト $La_{2-2x}Sr_{1+2x}Mn_2O_7$ の内殻吸収線二色性、同上
- [99] 小出常晴、関根武俊、宮内洋司、設楽哲夫、藤森淳、福谷博仁、木村剛、十倉好紀: 層状ペロブスカイト $La_{2-2x}Sr_{1+2x}Mn_2O_7$ の角度分解内殻吸収磁気円二色性、同上
- [100] 宮内洋司、小出常晴、関根武俊、設楽哲夫、藤森淳、福谷博仁、小林啓一郎、富岡泰秀、木村剛、十倉好紀: 2重整列ペロブスカイト Sr_2FeMO_6 ($M = Mo$) の内殻磁気円二色性 II、同上
- [101] 藤森淳、石井啓之: スクッテルダイト化合物の光電子分光、物性研短期研究会「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)

- [102] 溝川貴司：高輝度光源直入射ビームラインの分光系(1)、研究会シリーズ「軌道放射物性研究施設」(物性研究所、2000年12月)
- [103] 岡林潤、藤森淳：希薄磁性半導体 (Ga_xMn)As の電子構造、同上
- [104] 岡林潤、小野寛太、間野高明、水口将輝、堀場弘司、中園晋輔、木原隆幸、中村健哉、木綿秀行、尾嶋正治、藤森淳：*in situ* 作製 GaAs/AlAs の角度分解光電子分光、日本放射光学会(2001年1月、広島大学)
- [105] 小野寛太、間野高明、中村健哉、水口将輝、中園晋輔、木綿秀行、堀場弘司、木原隆幸、岡林潤、尾嶋正治、柿崎明人：MBE 成長した GaAs(001) 上の 1 ML InAs-3×1 超薄膜の *in situ* 放射光高分解能光電子分光、同上
- [106] 小野寛太、間野高明、中村健哉、水口将輝、中園晋輔、木綿秀行、堀場弘司、木原隆幸、岡林潤、尾嶋正治、柿崎明人：MBE 成長した GaAs(001) 上の InAs 量子ドットの *in situ* 放射光高分解能光電子分光、同上
- [107] 小野寛太、間野高明、中村健哉、水口将輝、中園晋輔、木綿秀行、堀場弘司、木原隆幸、岡林潤、H. W. Yeom、尾嶋正治、柿崎明人：MBE 成長した化合物半導体表面・ナノ構造の *in situ* 放射光高分解能光電子分光、同上
- [108] 小野寛太、間野高明、中村健哉、水口将輝、中園晋輔、木綿秀行、堀場弘司、木原隆幸、岡林潤、H. W. Yeom、尾嶋正治、柿崎明人：MBE 成長した GaAs(001)-c(4×4) の *in situ* 放射光高分解能光電子分光、同上
- [109] 小野寛太、間野高明、中村健哉、水口将輝、中園晋輔、木綿秀行、堀場弘司、木原隆幸、岡林潤、H. W. Yeom、尾嶋正治、柿崎明人；MBE 成長した GaAs(001)-(4×6) の *in situ* 放射光高分解能光電子分光、同上
- [110] 中村健哉、小野寛太、間野高明、水口将輝、中園晋輔、木綿秀行、堀場弘司、木原隆幸、岡林潤、H. W. Yeom、尾嶋正治、柿崎明人；MBE 成長した GaAs(111)B-(2×2) および ($\sqrt{19} \times \sqrt{19}$) の *in situ* 放射光高分解能光電子分光、同上
- [111] 小野寛太、間野高明、中村健哉、水口将輝、中園晋輔、木綿秀行、堀場弘司、木原隆幸、岡林潤、H. W. Yeom、尾嶋正治、柿崎明人；MBE 成長した GaAs(001)-(2×4) の *in situ* 放射光高分解能光電子分光、同上
- [112] 木綿秀行、小野寛太、間野高明、岡林潤、水口将輝、堀場弘司、中園晋輔、木原隆幸、中村健哉、H. W. Yeom、尾嶋正治、柿崎明人；MBE 成長した InAs(001)-c(4×4) の *in situ* 放射光高分解能光電子分光、同上
- [113] 藤森淳：放射光の利用—物理、化学、講習会「放射光で何ができるか—東京大学高輝度光源計画入門」(2001年2月、東京大学)
- [114] 岡崎浩三、藤森淳、磯部正彦、上田寛：1次元バナジウム酸化物 LiV_2O_5 の角度分解光電子分光、日本物理学会年会(2001年3月、中央大学)
- [115] 松野丈夫、藤森淳、瀬戸誠、北尾真司、小林康浩、春木理、三井隆也、川崎修嗣、高野幹夫：ペロブスカイト型 Fe 酸化物の電荷不均化、同上
- [116] 播磨有幸、藤森淳、菅谷剛洋、寺崎一郎： $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{1-x}\text{R}_x\text{Cu}_2\text{O}_8$ ($\text{R} = \text{Pr}, \text{Er}$) の化学ポテンシャルシフト、同上
- [117] 吉田鉄平、中村元彦、井野明洋、溝川貴司、藤森淳、X.-J. Zhou、P. Bogdanov、S. A. Kellar、E. Lu、A. Lanzara、Z. Hussain、笹川崇男、永崎洋、C. Kim、Z.-X. Shen、掛下照久、内田慎一： $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ のフェルミ面マッピング II、同上
- [118] 奥沢誠、吉田鉄平、藤森淳、N.P. Armitage、D.H. Lu、C. Kim、Z.-X. Shen、脇本秀一、山田和芳： $\text{La}_2\text{CuO}_{4+\delta}$ の角度分解光電子分光、同上
- [119] 井野明洋、吉田鉄平、藤森伸一、岡根哲夫、藤森淳、Z.-X. Shen、掛下照久、内田慎一： T^* 型銅酸化物超伝導体 $\text{SmLa}_{0.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_{4-\delta}$ の角度分解光電子分光、同上
- [120] J. D. Lee, T. Mizokawa and A. Fujimori: Photoemission in Quasi-Two-Dimensional Solids: Concentrating on the Role of Acoustic Plasmons、同上
- [121] 岡本淳、藤森淳、中村元彦、吉居俊輔、村田一大、佐藤正俊：金属絶縁体転移を示す $\text{Sm}_{2-x}\text{Ca}_x\text{Ru}_2\text{O}_7$ の光電子分光、X線吸収分光、同上
- [122] 藤森伸一、井野明洋、岡根哲夫、藤森淳、播磨尚朝、青木大、常盤欣文、池田修悟、宍戸寛明、芳賀芳範、大貫惇睦： CeRhIn_5 の角度分解光電子分光、同上
- [123] 岡根哲夫、藤森伸一、井野明洋、藤森淳、辻井直人、吉村一良： Yb-Cu 化合物の光電子分光、同上
- [124] 小出常晴、関根武俊、宮内洋司、設楽哲夫、藤森淳、木村剛、十倉好紀：層状ペロブスカイト $\text{La}_{2-2x}\text{Sr}_{1+2x}\text{Mn}_2\text{O}_7$ の角度分解内殻吸収磁気円二色性 II 単一 e_g 軌道の四葉クローバー性の発現、同上
- [125] 関根武俊、小出常晴、設楽哲夫、藤森淳、鈴木義茂、湯浅新司： Co 超薄膜の hcp/bcc 構造相転移と内殻磁気円二色性、同上
- [126] 岡林潤、小野寛太、間野高明、水口将輝、堀場弘司、中園晋輔、木原孝幸、中村健哉、木綿秀行、藤森淳、尾嶋正治：MBE 作製 III-V 族希薄磁性半導体の *in situ* 光電子分光、同上
- [127] 水口将輝、小野寛太、秋永広幸、真砂卓史、H. W. Yeom、Y. D. Chung、岡林潤、間野高明、白井正文、尾嶋正治：閃亜鉛鋅型 CrAs の光電子分光、同上
- [128] 小野寛太、間野高明、中村健哉、水口将輝、中園晋輔、木綿秀行、堀場弘司、木原隆幸、岡林潤、H. W. Yeom、尾嶋正治、柿崎明人：MBE 成長した GaAs 再構成表面の *in situ* 放射光高分解能光電子分光、同上
- [129] 岡林潤、小野寛太、間野高明、水口将輝、堀場弘司、中園晋輔、木原隆幸、中村健哉、木綿秀行、山田素久、藤森淳、尾嶋正治：MBE 作製 *in situ* 光電子分光による磁性半導体 $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ の電子構造(応用物理学会、2001年3月)
- [130] 小野寛太、間野高明、中村健哉、水口将輝、中園晋輔、木綿秀行、堀場弘司、木原隆幸、岡林潤、H. W. Yeom、尾嶋正治、柿崎明人：MBE 成長した GaAs(001)-(2×4) の表面構造、同上
- [131] 小野寛太、間野高明、中村健哉、水口将輝、中園晋輔、木綿秀行、堀場弘司、木原隆幸、岡林潤、H. W. Yeom、尾嶋正治、柿崎明人：MBE 成長した GaAs(001)-c(4×4) の表面構造、同上

- [132] 小野寛太、間野高明、中村健哉、水口将輝、中園晋輔、木綿秀行、堀場弘司、木原隆幸、岡林潤、H. W. Yeom、尾嶋正治、柿崎明人：MBE 成長した GaAs(111)B-(2×2) および ($\sqrt{19} \times \sqrt{19}$) の表面構造、同上
- [133] 木綿秀行、小野寛太、間野高明、岡林潤、水口将輝、堀場弘司、中園晋輔、木原隆幸、中村健哉、H. W. Yeom、尾嶋正治、柿崎明人：MBE 成長した InAs(001)-c(4×4) の in situ 放射光高分解能光電子分光、同上

招待講演

- [134] 藤森淳：強相関 1 次元系の光電子分光-スピン-電荷分離は見えただか、フォトンファクトリー研究会「高分解能光電子分光が明かす低次元系新物性」(2000 年 5 月、高エネ研)
- [135] 藤森淳：強相関 1 次元系の光電子分光、平成 12 年度放射光・ナノリンク合同ワークショップ(2000 年 8 月、東大工学部)
- [136] 藤森淳、岡崎浩三：Angle-Resolved Photoemission and Band-Structure Calculation of TlGaTe₂、Tl 化合物に関する研究会(2000 年 10 月、長岡技科大)
- [137] 藤森淳：擬 1 次元強相関系の光電子分光、特定領域研究「光誘起相転移」研究会：光物性における電子相関の効果(2000 年 12 月、高エネ研)
- [138] 藤森淳：光電子分光による高温超伝導研究-最近の発展-、基礎物性小委員会「高温超伝導の物理と化学：この 1 年」(2000 年 12 月、超伝導工学研究所)
- [139] 藤森淳：機能調和酸化物の電子構造と機能発現機構、第 12 回日本 MRS 学術シンポジウム(2000 年 12 月、かながわサイエンスパーク)
- [140] 藤森淳：超高分解能の展望、研究会シリーズ「軌道放射物性研究施設」(物性研究所、2000 年 12 月)
- [141] 藤森淳：高輝度光源計画における超高分解能光電子分光ビームライン、物性研究拠点整備計画等に関する物性研短期研究会(物性研究所、2000 年 12 月)
- [142] 藤森淳：磁性半導体の光電子分光、日本物理学会年会シンポジウム「磁性半導体研究の新展開」(2001 年 3 月、中央大学)

セミナー

- [143] 藤森淳：遷移金属化合物の光電子スペクトルと電子構造解析(豊田工業大学、2000 年 4 月)
- [144] A. Fujimori: Pseudogaps and Stripes in High- T_c Cuprates (Centro Atomico Bariloche, Argentina, August 2000)
- [145] A. Fujimori: Superconductor-Insulator Transition and Stripes in High- T_c Cuprates (University of Parana, Curitiba, Brazil, August 2000)
- [146] 藤森淳：1 次元強相関系の光電子分光(東京工業大学理学部講演会、2000 年 12 月)

4.5 長谷川研究室

本年度末に長尾忠昭助手が東北大学金属材料研究所の助教として、また、学振特別研究員の白木一郎博士が産業技術総合研究所へ、科学技術振興事業団研究員の S. V. Ryjkov 博士がロシア科学アカデミーへ転出した。また、田邊輔仁君が修士の学位をとって卒業した。

当研究室では、表面物性、特に「表面輸送」をキーワードにして、固体表面特有の様々な構造と現象について実験的研究を行っている。特に、シリコン単結晶表面上に形成される種々の表面超構造を利用し、それらに固有な表面電子バンドの電子輸送特性を明らかにし、バルク電子状態では見られない新しい現象を見出すことをめざしている。そのために、表面構造の制御・解析、表面電子状態、電子輸送特性、表面近傍での電子励起やフォノン構造、原子層・分子層の成長構造、エレクトロマイグレーションなどの表面質量輸送現象など、多角的に研究を行っている。また、これらの研究のために、新しい手法・装置の開発も並行して行っている。以下に、本年度の具体的な成果を述べる。

4.5.1 表面電子輸送

マイクロ4端子プローブによる表面電気伝導の測定

昨年に引き続き、デンマーク工科大学マイクロエレクトロニクスセンターで開発されたマイクロ4端子プローブ(プローブ間隔; $4 \sim 20 \mu\text{m}$)を当研究室所有の超高真空走査電子顕微鏡(SEM)・MBE装置に組み込み、表面超構造を制御しながらマイクロ領域の表面電気伝導度を測定した。昨年度、Si(111)- 7×7 清浄表面および Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面上において、ステップバンドをまたいだ領域とステップフリーの領域の抵抗に大きな差があることを見いだした。今年度は、これらの結果とレギュラーステップの場合よりも若干大きいものの比較的近いことがわかった。すなわちステップバンド領域で観測された抵抗値の大幅な増大はバンチングを起こすことによって生じることがわかった。また、Si(111)- 7×7 清浄表面上で非線形の電流-電圧特性を見いだした。この特性は Heike 等がすでに報告している表面電子状態とバルク電子状態間に形成されるショットキー障壁に起因すると説明できる。なお、この非線形特性は Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面では観測されなかった。(デンマーク工科大学マイクロエレクトロニクスセンターとの共同研究)

独立駆動型4探針STMによる表面電気伝導度の測定

昨年度までに、4つのプローブが独立して動作する4探針STMの開発をほぼ完了した。今年度は主に制御系の製作を行った。すなわち、4つの探針を、4端子法の伝導度測定用およびSTM用の探針とし

て切り替えて使用できるよう、各探針へのリード線を電氣的に切り替え可能にするためにスイッチ付ブレアンプを製作し、評価を行った。また、本装置をSTM装置として用いる際に必要となる探針のフィードバック装置であるDSP(デジタルシグナルプロセッサ)およびその入出力回路の製作・評価や、その他各種周辺装置の評価、製作を行った。本年度は、これらの製作と並行して、この装置の本来の目的である表面電気伝導の測定を行った。ただし、探針はフィードバックをかけずに試料表面に直接コンタクトをとった。対象とした系は、Si(111)- 7×7 清浄表面と Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面であり、それぞれの表面で4端子法におけるプローブの間隔 d を 1mm から $1\mu\text{m}$ まで変化させて電気抵抗の測定を行った。まず、Si(111)- 7×7 清浄表面では、測定された電気抵抗は、プローブの間隔に依存して非常に大きな変化を示した。 $d=10\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ では、電気抵抗は試料のバルク抵抗率に対応し、試料が半無限の様な導体とみなせる。 $d=100\mu\text{m} \sim 1\text{mm}$ では、試料のバルク抵抗率から予測される抵抗値よりも大きな値が測定された。これは、プローブ間隔が試料の厚みと同程度となるので、試料の厚みが有限である効果が反映されるためである。 $d=1\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$ でも、試料のバルク抵抗率から予測される抵抗値よりも大きな値が測定された。これは、プローブ間隔を小さくすることにより、表面空間電荷層(この場合は空乏層)での伝導が支配的に寄与するからである。このプローブ間隔範囲では、間隔を小さくするにつれて、単調に表面電気伝導度(シートコンダクタンス)は小さくなった。特に、 $d=1\mu\text{m}$ においては、 $2 \times 10^{-6} \Omega^{-1}$ となった。これは、STMを用いた点接触法により Y.Hasegawa らが測定した Si(111)- 7×7 清浄表面上での表面状態に起因する電気伝導度の値とほぼ同程度である。すなわち、 $d=1\mu\text{m}$ 程度から、表面状態の影響が現れる可能性を示唆している。次に、Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面では 7×7 清浄表面と全く異なる振る舞いを示した。すなわち、 d を小さくすると電気抵抗は単調に減少した。この理由として、プローブ間に存在するステップなどの表面欠陥の影響が相対的に小さくなっていくことが考えられる。電気抵抗の変化は、 7×7 清浄表面と比べると極めて小さく、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面では、2次元的な電気伝導、すなわち、表面状態に起因した電気伝導が支配的であることを示している。また、この抵抗の変化は、試料の不純物濃度を変化させても不変であり、このことも、表面状態に起因した表面電気伝導が支配的であることを示している。

表面粗さと表面電気伝導

STM、RHEED、および「その場電気伝導測定法」を用いて、Si(100)- 2×3 -Na 表面を例にして、原子尺度での表面粗さと表面電気伝導の関連を調べた。この表面超構造では $1/3$ 原子層の Si 原子層が含まれているので、Si(001)- 2×1 清浄表面上に Na を蒸着して 2×3 -Na 構造にすると、Si 原子の数を調整するため、平坦なテラスが1原子段差の狭いテラスに分離して凸凹になる。しかし、前もって、清浄表

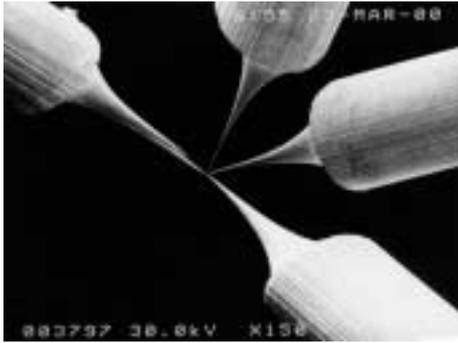


図 4.5 a: 4 探針型 STM ティップの SEM 像。4 本の探針を約 600nm まで近づけたところ。

面上に $1/3$ 原子層の Si を蒸着しておく、平坦な 2×3 -Na 構造が形成される。このように、前もって蒸着する Si 原子の量を制御することで、表面の粗さを制御できることを示した。さらに、それぞれの表面での電気伝導度を測定すると、表面粗さに依存して著しく変化した。伝導度は、Si 蒸着量が $1/3$ または $4/3$ 原子層で平坦な表面のとき最大となり、その中間の蒸着量で最小となった。この結果は、表面近傍を流れるキャリアの、表面粗さに起因する表面散乱の影響を直接示すものである。

4.5.2 表面超構造と相転移

IV 族原子吸着 Si(111)- 3×3 表面の CDW 転移

Si(111) 表面上に $1/3$ 原子層の Pb または Sn が吸着した時に形成される $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 表面超構造を 150 K 程度に冷却すると、 3×3 構造に転移することを昨年までに RHEED を用いて調べてきた。今年度は、この相転移を低温 STM で観察した。Sn 吸着の場合、置換型欠陥の第一隣接サイトのみで 3×3 周期の変調が観察されただけで長距離秩序は成長しないのに対し、Pb 吸着の場合には、置換型欠陥を中心に 3×3 のドメインが形成されていた。また、このとき、欠陥が 3×3 の長距離秩序で並び、ドメイン形成に重要な役割を演じていることがわかった。最近提案されている 'Defect Density Wave' の考え方で解析しているところである。

擬 1 次元表面 Si(111)- 4×1 -In 表面の CDW 相の室温での誘起

Si(111)- 4×1 -In 表面は、擬 1 次元金属的な表面電子状態を持ち、約 130 K に冷却するとパイエルズ転移を起こして電荷密度波 (CDW) 相である $8 \times 2'$ を形成することを一昨年度見出した。しかし、室

温での 4×1 表面上に極微量 (0.1 原子層以下) の Na 原子を吸着させると $4 \times 2'$ 相に転移することを RHEED および STM で見出した。 $\times 2'$ 周期の変調は低温で見られる 1 次元 CDW と酷似しているため、Na 吸着原子からの電荷移動によってフェルミ面がチューニングされ、室温で CDW が形成されたものと考えられる。この仮説を証明するため、光電子分光による測定を計画している。(韓国ヨンセイ大学との共同研究)

擬 1 次元表面 Si(111)- 3×1 -Ag 表面の低温での相転移

Si(111) 表面を 600 程度の高温に保って Ag を蒸着すると 3×1 -Ag 相が形成され、それを室温に冷却すると 6×1 構造に相転移することは知られていたが、これをさらに 120 K 程度に冷却すると $c(12 \times 2)$ に相転移することを STM および RHEED を用いて見出した。その STM 像から、秩序・無秩序転移とは考えられず、電子的な駆動力の検討が必要と考えられる。(東北大学およびスエーデン・ルント大学との共同研究)

4.5.3 表面電子励起

高波数分解型低速電子回折-電子分光装置 (E L S-L E E D) を用いた表面バンド中の低次元プラズモン (シートプラズモン) の研究

Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面電子バンド中の 2 次元電子系のプラズモンのエネルギー分散関係を、高い波数分解能を持つ E L S-L E E D 装置を用いて、世界で初めて測定した。高密度量子プラズマに対して 1966 年に Frank Stern が予言した、弱結合 RPA 理論による分散関係にほぼ完全に一致することをはじめて直接的・定量的に示した。また表面に不純物を吸着させ表面電子バンドのエレクトロンポケット中の電子密度を増加させると、理論からの予想通りに、分散曲線の傾きが急になることも見出した。さらに、プラズモンの減衰に従来の解釈 (バンド間遷移型、フォノンアシスト型、不純物アシスト型の減衰) では理解不能な波数依存性があることを発見し、プラズモンの寿命が 2 次元電子系の電子相関の程度や膜厚方向の閉じ込めの強さの程度に関係があるとする解釈を提案した。(独逸ハノーバー大学との共同研究)

4.5.4 原子層・分子層の成長

Bi/Si(111) 超薄膜の自己組織化

Si(111)- 7×7 表面上の Bi 超薄膜の初期成長は、SK 様式を経て、アイランドのパーコレーションによ

る平坦化の後、完全な層状成長に移行する珍しい成長を示す。その際、下地に対して回転無秩序性の有る RHEED パターンから徐々に秩序性の高いパターンへと移行し、1.5 層程度において単結晶状の薄膜となる。この自己組織化の様子をこれまでの STM 観察、電気抵抗測定に加え、RHEED の強度変化測定や菊地パターン解析、断面 TEM 観察などを行い、結晶性の深さ方向依存性や、界面構造などを解析した。

Si(001) 表面上の Ag の成長

前年度までに、室温において Si(001)-2x1 清浄表面上に Ag を蒸着しながら電気抵抗を測定した。その結果蒸着膜厚が 40 原子層程度で電気抵抗が一時的に急上昇しその後急激に抵抗値が減少することを見いだした。またこのような特異な電気抵抗の変化は Si(001)-2x3-Ag 表面上に同様の実験をした場合には見られなかった。今年度は STM によってこれらの成長様式を直接調べた。Si(001)-2x1 清浄表面上の Ag 原子層成長の場合、これまでに報告のあった Ag(111) 方位の平坦なアイランドに加え Ag(001) 方位の 3 次元的なアイランドが初期成長過程から存在し、この 2 種類のアイランドで成長した。さらに 50ML 以上の高い蒸着量では Ag(111) アイランドのみが連続膜を形成し Ag(001) アイランドは逆に減少していることがわかった。その一方で Si(001)-2x3-Ag 表面上では Ag(111) アイランドは存在せず 3 次元的な Ag(001) アイランドのみが成長し、高い蒸着量でも平坦な膜にならずに立体的なアイランドの裾同士が接しあったような状態になるだけであることがわかった。このように 0.5 原子層以下の蒸着量で形成される下地表面構造のわずかな違いが数十原子層に及ぶ Ag 原子層の成長様式に大きな差異を生むことがわかった。

今年度の研究は下記の研究費補助のもとで行われた。記して感謝いたします。

- ・科研費 基盤研究 A 「4 探針走査トンネル顕微鏡の開発とナノメータ・スケール表面電気伝導の研究」(代表者 長谷川修司)
- ・科研費 基盤研究 B (国際学術) 「表面電子輸送」(代表者 長谷川修司)
- ・科研費 基盤研究 C 「半導体の表面電子準位バンドの電気伝導特性」(代表者 長谷川修司)
- ・科研費 基盤研究 C 「2 次元角度走査型高分解電子エネルギー損失分光装置による表面構造相転移の研究」(代表者 長尾忠昭)
- ・科研費 創成的基礎研究 「表面・界面 — 異なる対称性の接点の物性 —」(代表者 八木克道)
- ・科学技術振興事業団 戦略的基礎研究 「人工ナノ構造の機能探索」(代表者 青野正和)
- ・受託研究 科学技術振興事業団 「半導体表面超構造と表面電気伝導の制御」(代表者 長谷川修司)

< 報文 >

(原著論文)

- [1] S. Hasegawa, K. Tsuchie, K. Toriyama, X. Tong,

and T. Nagao: Surface electronic transport on silicon — Donor- and acceptor-type adsorbates on Si(111)- 3×3 -Ag substrate—, *Applied Surface Science* **162/163**, 42-47 (2000).

- [2] S. Hasegawa, N. Sato, I. Shiraki, C. L. Petersen, P. Boggild, T. M. Hansen, T. Nagao, F. Grey: Surface-state Bands on silicon — Si(111)- 3×3 -Ag surface superstructure — : *Japanese Journal of Applied Physics* **39**, 3815-3822 (2000).
- [3] F. X. Shi, I. Shiraki, T. Nagao, S. Hasegawa: Diffusion Anisotropy of Ag and In on Si(111) Surface Studied by UHV-SEM, *Ultramicroscopy* **85**, 23-33 (2000).
- [4] F. X. Shi, I. Shiraki, T. Nagao, and S. Hasegawa: Substrate-structure dependence of Ag electromigration on Au-precovered Si(111) surfaces, *Japanese Journal of Applied Physics* **39**, 4438-4442 (2000).
- [5] T. Nagao, T. Sekiguchi, and S. Hasegawa: Epitaxial growth of single-crystal ultrathin film of Bi on the Si(111) surface, *Japanese Journal of Applied Physics* **39**, 4567-4570 (2000).
- [6] S. Hasegawa: Surface-State Bands on Silicon as Electron Systems in Reduced Dimensions at Atomic Scales, *Journal of Physics: Condensed Matters*, **12**, R463-R495 (2000).
- [7] T. Nagao and S. Hasegawa: Construction of an ELS-LEED — an electron energy-loss spectrometer with electrostatic two-dimensional angular scanning —, *Surface and Interface Analysis* **30**, 488-492 (2000).
- [8] I. Shiraki, C. L. Petersen, P. Boggild, T. M. Hansen, T. Nagao, F. Grey, and S. Hasegawa: Micro-four-point probes in an UHV-scanning electron microscope for *in-situ* surface conductivity measurements, *Surface Review and Letters* **7**, 533-537 (2000).
- [9] C. L. Petersen, F. Grey, I. Shiraki, S. Hasegawa: Microfour-point probe for studying electronic transport through surface states, *Applied Physics Letters* **77**, 3782-3784 (2000).
- [10] I. Matsuda, H.-W. Yeom, T. Tanikawa, K. Tono, T. Nagao, S. Hasegawa, and T. Ohta: Growth and electron quantization of the metastable silver films on Si(001), *Physical Review* **B63**, 125325 (2001).
- [11] F. X. Shi, I. Shiraki, T. Nagao, and S. Hasegawa: Electromigration and phase transformation of Ag on a Cu-precovered Si(111) surface, *Surface Science* 印刷中 (2001).
- [12] T. Sekiguchi, F. Shimokoshi, T. Nagao, and S. Hasegawa: A series of Ca-induced reconstructions on Si(111) surface, *Surface Science* 印刷中 (2001).
- [13] S. V. Ryjkov, T. Nagao, V. G. Lifshits, and S. Hasegawa: Surface roughness and electrical resistance on Si(100)- 2×3 -Na surface, *Surface Science* 印刷中 (2001).

- [14] T. Nagao, T. Hildebrandt, M. Henzler, S. Hasegawa: Two-dimensional plasmon in a surface-state band, *Surface Science* 印刷中 (2001).
- [15] T. Nagao, T. Hildebrandt, M. Henzler, and S. Hasegawa: Sheet plasma in a two-dimensional electron liquid in a surface-state band, *Physical Review Letters*, 印刷中 (2001).
- [16] T. Tanikawa, I. Matsuda, T. Nagao, and S. Hasegawa: Growth mode and electrical conductance of Ag atomic layers on Si(001) surface, *Surface Science* 印刷中 (2001).
- [17] I. Shiraki, F. Tanabe, R. Hobara, T. Nagao, and S. Hasegawa: Independently driven four-tip probes for conductivity measurements in ultrahigh vacuum, *Surface Science* 印刷中 (2001).
- [18] S. V. Ryjkov, T. Nagao, V. G. Lifshits, and S. Hasegawa: Phase transition and stability of Si(111)- $8\times 2'$ -In surface phase at low temperature, *Surface Science* 印刷中 (2001).
- (会議抄録)
- [19] T. Nagao, T. Hildebrandt, M. Henzler, S. Hasegawa: Observation of two-dimensional plasmon in a metallic monolayer on silicon surface, *Proceedings of 25th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS25)*, 印刷中.
- (総説)
- [20] S. Hasegawa and F. Grey: Electronic transport at semiconductor surfaces — From point-contact transistor to micro-four-point probes —, *Surface Science* **500**, 印刷中 (2001).
- (国内雑誌)
- [21] 長谷川修司: 半導体表面の電子輸送 — 原子スケール低次元電子系としてのシリコン表面電子バンド —, *物性研究* **75**, 494-511 (2000, 12).
- [22] 長谷川修司: 結晶表面の1原子層に電気を流す — 点接触トランジスタから多探針STMへ —, *学術月報* **53** 1269-1274 (2000, 12).
- [23] 長尾忠昭: ELS LEEDによるヘテロ層界面のナノ構造制御、(財)日本板硝子材料工学助成会成果報告書第18号、91-95 (2000).
- (学位論文)
- [24] 田邊輔仁: 独立駆動型四探針STM装置の開発とそれによる表面電気伝導の研究 (修士論文).
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [25] I. Shiraki, C. L. Petersen, P. Boggild, T. M. Hansen, T. Nagao, F. Grey, and S. Hasegawa: Micro-four-point probes for surface-sensitive conductivity measurements, 10th International Conference on Solid Films and Surfaces, 2000年7月12日 (Princeton Univ., USA).
- [26] T. Nagao, T. Hildebrandt, M. Henzler, and S. Hasegawa: Dispersion and Damping of a Two-dimensional Plasmon in a Surface-State Band, 19th European Conference on the Surface Science (ECOSS19), 2000年9月5日 (Madrid, Spain).
- [27] T. Nagao, T. Hildebrandt, M. Henzler, and S. Hasegawa: Direct observation of two-dimensional plasmon in a metallic monolayer on silicon surface, 25th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS25), 2000年9月18日 (Osaka).
- [28] I. Shiraki, C. L. Petersen, P. Boggild, T. M. Hansen, F. Tanabe, T. Nagao, F. Grey, and S. Hasegawa: Electronic transport through surface-state bands, 25th International Conference on the Physics of Semiconductors, 2000年9月19日 (Osaka).
- [29] S. V. Ryjkov, V. G. Lifshits, T. Nagao, and S. Hasegawa: Structural and transport properties of Si(001) 2×3 -Na surface, *International Symposium on Surface and Interfaces -Properties of Different Symmetry Crossing-*, 2000年10月18日 (Nagoya).
- [30] T. Sekiguchi, T. Nagao, and S. Hasegawa: A series of Ca-induced reconstructions of the Si(111) surface, *International Symposium on Surface and Interfaces -Properties of Different Symmetry Crossing-*, 2000年10月18日 (Nagoya).
- [31] T. Nagao, S. Hasegawa, T. Hildebrandt, and M. Henzler: Two-dimensional plasma oscillation in a metallic surface-state band on a silicon surface, *International Symposium on Surface and Interfaces -Properties of Different Symmetry Crossing-*, 2000年10月18日 (Nagoya).
- [32] F. X. Shi, I. Shiraki, T. Nagao, and S. Hasegawa: Surface electromigration and phase transformation of Ag and Cu on Si(111) surfaces modified by Au and Cu, *International Symposium on Surface and Interfaces -Properties of Different Symmetry Crossing-*, 2000年10月18日 (Nagoya).
- [33] T. Nagao, and S. Hasegawa: Effects of interface modification by surface superstructures on the growth of Bi overlayers, *International Symposium on Surface and Interfaces -Properties of Different Symmetry Crossing-*, 2000年10月18日 (Nagoya).
- [34] T. Tanikawa, I. Matsuda, T. Nagao, and S. Hasegawa: Growth mode and electrical conductance of Ag atomic layers on Si(001) surface, *International Symposium on Surface and Interfaces -Properties of Different Symmetry Crossing-*, 2000年10月18日 (Nagoya).
- [35] I. Shiraki, F. Tanabe, T. Nagao, F. Grey, and S. Hasegawa: Surface conductivity measurements by micro- and nano-four-point probes, *International Symposium on Surface and Interfaces -Properties*

- of Different Symmetry Crossing-, 2000 年 10 月 18 日 (Nagoya) .
- [36] T. Nagao, T. Hildebrandt, M. Henzler, and S. Hasegawa: Plasmon dispersion in a metallic surface-state band on a silicon surface, The Fourth Japan-Russia Seminar on Semiconductor Surfaces, 2000 年 12 月 1 2 日 (Nagoya) .
- [37] S. V. Ryjkov, V. G. Lifshits, T. Nagao, and S. Hasegawa: Effects of surface structures on electrical resistance of silicon, The 4th Japan-Russia Seminar on Semiconductor Surfaces, 2000 年 11 月 13 日 (Nagoya) .
- [38] I. Shiraki, F. Tanabe, R. Hobara, T. Nagao, and S. Hasegawa: Independently driven four-tip UHV-STM, The 8th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy and Asian SPM-3, 2000 年 12 月 9 日 (Atagawa) .
- [39] T. Nagao, T. Hildebrandt, M. Henzler, and S. Hasegawa: Observation of a Low-Dimensional Plasmon in a Metallic Surface-State Band on a Silicon Surface, The Symposium on Surface Science 2001 年 1 月 8 日 (Furano) .
- [40] T. Tanikawa, I. Matsuda, T. Nagao, and S. Hasegawa: Growth and conductivity of Ag layers on Si(001) surfaces, 251st WE-Heraeus Seminar on 2D Conductivity in Surface States and Monolayers, 2001 年 3 月 5 日 (Bad Honnef, Germany) .
- [41] S. Hasegawa, I. Shiraki, C. L. Petersen, F. Grey, T. M. Hansen, P. Boggild, T. Tanikawa, F. Tanabe, and T. Nagao: Microscopic four-point probes for surface conductivity measurements, 251st WE-Heraeus Seminar on 2D Conductivity in Surface States and Monolayers, 2001 年 3 月 5 日 (Bad Honnef, Germany) .
- [42] T. Nagao, H. Seki, and S. Hasegawa: Growth and conductivity of bismuth overlayers on Si(111) surfaces, 251st WE-Heraeus Seminar on 2D Conductivity in Surface States and Monolayers, 2001 年 3 月 5 日 (Bad Honnef, Germany) .
- [43] I. Shiraki, F. Tanabe, R. Hobara, T. Nagao, and S. Hasegawa: Independently driven four-tip UHV-STM, 251st WE-Heraeus Seminar on 2D Conductivity in Surface States and Monolayers, 2001 年 3 月 6 日 (Bad Honnef, Germany) .
- [44] T. Nagao, and S. Hasegawa: Surface-state 2D plasmon, 251st WE-Heraeus Seminar on 2D Conductivity in Surface States and Monolayers, 2001 年 3 月 6 日 (Bad Honnef, Germany) .
- [45] S. V. Ryjkov, V. G. Lifshits, T. Nagao, and S. Hasegawa: Structural transformations on silicon: effect on electrical resistance, 251st WE-Heraeus Seminar on 2D Conductivity in Surface States and Monolayers, 2001 年 3 月 7 日 (Bad Honnef, Germany) .
- [46] S. Hasegawa: Micro- and nano-four-point probes for surface conductivity measurements, US-Japan Seminar on Mesoscopic Phenomena on Surfaces, 2000 年 4 月 6 日 (Utah, USA) .
- [47] S. Hasegawa: Electronic transport through surface-state bands measured with micro- and nano-four-probes in UHV, The 1st Korea-Japan Workshop on Frontier Nanostructures on Surfaces, 2000 年 10 月 23 日 (Yonsei Univ., Korea) .
- [48] S. Hasegawa, I. Shiraki, F. Tanabe, T. Nagao, and F. Grey: Conductivity measurements in micro- and nanometer-scale regions on surfaces, The 4th Japan-Russia Seminar on Semiconductor Surfaces, 2000 年 11 月 13 日 (Nagoya) .
- [49] S. Hasegawa, I. Shiraki, F. Tanabe, T. M. Hansen, and F. Grey: Surface-state electronic transport measured by microscopic four-point probes, The Symposium on Surface Science 2001, 2001 年 1 月 11 日 (Furano) .
- [50] S. Hasegawa: Surface-state electronic transport measured by microscopic four-point probes, International Workshop on Dynamical Phenomena Related with Electrons at Surfaces (27th IUVESTA Workshop), 2001 年 1 月 29 日 (Kushiro) .
- [51] S. Hasegawa: Atomic imaging of macroscopic surface conductivity, 2001 International Seminar on Advanced Semiconductor Devices and Circuits (Research Center for Interface Quantum Electronics), 2001 年 1 月 31 日 (Hokkaido Univ.) .
- [52] S. Hasegawa: Resume -Surface-state electrical conductivity-, 251st WE-Heraeus Seminar on 2D Conductivity in Surface States and Monolayers, 2001 年 3 月 8 日 (Bad Honnef, Germany) .
- (国内会議)
- 一般講演
- [53] 長谷川修司: 表面量子物性, 物性研ワークショップ「原子尺度の表面デザイン — 低次元性機能の発現を目指して —」, 2000 年 6 月 8 日 (物性研) .
- [54] 長谷川修司: 低温表面での相転移から新しい物理が生まれるか、文部省科学研究費補助金創成的基礎研究費「表面・界面-異なる対称性の接点の物性」討論会、2000 年 6 月 23 日 (熱海) .
- [55] 長谷川修司: 表面電気伝導の課題、文部省科学研究費補助金創成的基礎研究費「表面・界面-異なる対称性の接点の物性」討論会、2000 年 6 月 23 日 (熱海) .
- [56] 長尾忠昭、T. Hildebrandt、M. Henzler、長谷川修司: 表面電子状態中のシートプラズモンにおける量子効果、日本物理学会 第 55 回年次大会、2000 年 9 月 22 日 (新潟大学) .
- [57] S. V. Ryjkov、長尾忠昭、V. Lifshits、長谷川修司: Epitaxial growth of Ag on Si(111)-4 × 1-In surface、日本物理学会 第 55 回年次大会、2000 年 9 月 24 日 (新潟大学) .

招待講演

- [58] 金川泰三、長尾忠昭、谷川雄洋、長谷川修司：アルカリ金属原子吸着 Si(111)- 3×3 -Ag 表面の構造と電気伝導、日本物理学会 第 5 5 回年次大会、2000 年 9 月 24 日（新潟大学）。
- [59] 長尾忠昭、長谷川修司：Bi 多重原子層成長における表面超構造を用いた界面改質の効果、日本物理学会 第 5 5 回年次大会、2000 年 9 月 24 日（新潟大学）。
- [60] 白木一郎、田邊輔仁、保原麗、長尾忠昭、長谷川修司：4 探針 STM の開発とそれによる表面電気伝導の測定、科学技術振興事業団 戦略的基礎研究「量子効果等の物理」第 4 回シンポジウム、2000 年 12 月 20 日（東京）。
- [61] 長谷川修司：Si(111)- 3×3 -Ag 表面、この古くて新しい表面、文部省科学研究費補助金創成的基礎研究費「表面・界面-異なる対称性の接点の物性」ワークショップ「Si(111)- 3×3 -Ag 表面」、2000 年 12 月 25 日（学士会館、東京）。
- [62] 長谷川修司、大内暁、X. Tong、谷川雄洋、佐藤昇男、長尾忠昭：金属吸着シリコン表面の電子状態、物性研究会シリーズ物性研究の展望「高輝度光源計画の現状と放射光利用研究の展望」、2000 年 12 月 27 日（物性研）。
- [63] 長尾忠昭：波数空間とエネルギー空間の高分解能化でナノ構造の物性を観る、日本板硝子材料工学助成会研究成果報告会、2001 年 1 月 18 日（東京）。
- [64] 白木一郎、田邊輔仁、保原麗、長尾忠昭、長谷川修司：独立駆動型 4 探針 STM による表面電気伝導の研究、文部省科学研究費補助金創成的基礎研究費「表面・界面-異なる対称性の接点の物性」平成 12 年度 年度末研究報告会、2001 年 1 月 27 日（東工大）。
- [65] 田邊輔仁、白木一郎、保原麗、長尾忠昭、長谷川修司：独立駆動型四探針 STM 装置による表面電気伝導の測定、日本物理学会 第 5 6 回年次大会、2001 年 3 月 28 日（中央大学）。
- [66] 谷川雄洋、白木一郎、長尾忠昭、長谷川修司：マイクロ 4 端子法による電気伝導の測定、日本物理学会 第 5 6 回年次大会、2001 年 3 月 28 日（中央大学）。
- 招待講演
- [67] 長谷川修司：半導体表面の電子輸送、第 4 5 回物性若手夏の学校、2000 年 8 月 21 日（鳥取）。
- [68] 長谷川修司：半導体表面科学の新展開、第 6 1 回応用物理学学術講演会、「半導体界面形成 - 原子レベルの表面・界面制御を目指して -」シンポジウム、2000 年 9 月 5 日（北海道工業大学、札幌）。
- [69] 長谷川修司：物性測定装置としての SPM、日本表面科学会 第 21 回 表面科学セミナー「走査プローブ顕微鏡で観る測る創る」、2000 年 10 月 26 日（金属材料技術研究所、東京）。
- [70] 長谷川修司：電気伝導を観る、日本電子顕微鏡学会 第 45 回 シンポジウム「観る限界を越えて」、2000 年 11 月 21 日（岡崎国立共同研究機構コンファレンスセンター、岡崎）。
- [71] 長谷川修司：4 探針 STM の開発とナノ領域伝導の測定、日本学術振興会ナノプロブテクノロジー第 167 委員会 第 19 回 研究会「SPM による表面電気伝導特性の評価」、2001 年 1 月 16 日（大阪大）。
- [72] 長谷川修司：原子を並べて電気を通す - 原子と電子の動きを“観る” -、日本表面科学会 第 1 回市民公開講座「社会を変えるナノサイエンスの世界 - 表面科学の基礎とその広がり -」、2001 年 3 月 17 日（東京大学）。
- [73] 長谷川修司：いまさら Si(111)- 3×3 -Ag 表面?!、日本物理学会 第 5 6 回年次大会 領域 9 シンポジウム「シリコン表面での相転移」、2001 年 3 月 27 日（中央大学）。
- (セミナー)
- [74] 長谷川修司：半導体表面における低次元電子系の電子状態と電子輸送物性、東京工業大学大学院理学研究科物性物理学専攻、2000 年 5 月 31 日（大岡山）。
- [75] 長谷川修司：Electronic transport on silicon surfaces、東北大学金属材料研究所回折結晶学部、2000 年 6 月 20 日（仙台）。
- [76] 長谷川修司：半導体表面の電子輸送 - 原子スケール低次元系としてのシリコン表面電子バンド、東北大学大学院理学研究科物理学教室物性コロキウム、2000 年 6 月 20 日（本郷）。
- (講義等)
- [77] 長谷川修司：半導体表面物性、東京工業大学大学院理学研究科物性物理学専攻 集中講義 2000 年 5 月 24, 31 日、6 月 7 日（大岡山）。
- [78] 長谷川修司：原子を観る、触る、手繰る、電子の波動関数を観る、現代物理学入門（3 年生）(分担担当) 2000 年 6 月 5 日（本郷）。
- [79] 長谷川修司：物性物理学特別講義 3、東北大学大学院理学研究科物理学専攻 集中講義 2000 年 6 月 19, 20, 21 日（仙台）。
- [80] 長谷川修司：原子を観る、並べる、さらには電子の波動関数も観る、千葉大学ベンチャービジネスラボ「電子光情報基盤技術研究センター」ベンチャー特論 1 集中講義、2000 年 11 月 17 日（千葉）。
- [81] 長谷川修司：現代物理実験学 I（3 年生）(分担担当) 2000 年度夏学期（本郷）。
- [82] 長谷川修司：物理実験学（2 年生）(分担担当) 2000 年度冬学期（駒場）。
- [83] 長谷川修司、長尾忠昭、谷川雄洋 (TA)：物理学実験 II（3 年生）表面物性、2000 年度冬学期（本郷）。

4.6 福山研究室

福山研究室では室温以下 μK に至る広範な低温領域で発現する様々な量子多体現象および相転移現象、さらにそれらに対する空間次元の効果について、主に液体および固体ヘリウム (He)、超伝導や電荷密度波を示す層状物質などを対象に研究している。

昨年度に引き続き平成 12 年度は、我々の主力装置である「超低温走査トンネル顕微鏡」と「核断熱消磁冷凍機」という二つの大型実験装置の同時立ち上げに重点的に取り組んだ。希釈冷凍機の導入の遅れのため年度内完成という目標は達成できなかったが、それ以外の建設は順調に進み、両装置とも平成 13 年 6 月末頃ほぼ同時に完成予定である。これらは世界的にも大変ユニークな装置であり、今後、低温物理研究に epoch making な寄与を果たすと期待している。

4.6.1 超低温走査トンネル顕微鏡の開発研究

超低温 ($T \geq 20 \text{ mK}$)、高磁場 ($B \leq 6 \text{ T}$)、超高真空 ($P \ll 10^{-8} \text{ Pa}$) の複合極限環境下で原子分解能をもって作動する新型の超低温走査トンネル顕微鏡 (ULT-STM) の開発を行い、現在テスト運転中である。この装置が実現することにより、表面走査プローブ法という新しい方法論のもとで、2 次元希ガス固体の整合-不整合転移、エキゾチック超伝導体の渦芯および渦糸格子、電荷密度波の量子スライディング渦転移、表面ナノ構造の原子操作とトンネル分光などに取り組む予定である。

この装置の最大の特長は先に挙げた複合極限環境下で作動することであるが、この性能を最大限に引き出すためには、約 2 K 以下の極低温を保持したまま超高真空環境を壊すことなく試料/探針の交換が迅速に行えるという機能が特に重要である。従来の我々の装置では室温大気中で試料/探針交換を行っていたため、これらの交換に約 3 日間を要したが、新型装置ではこの時間が 30 分程度と飛躍的に短縮され、測定的大幅なスピードアップが実現した。さらにこの装置には、STM 観測を行う前に超高真空中で清浄試料表面を得るための表面処理/評価装置を装備しており、試料によっては低温劈開も行うことができる。その結果、試料に関する制約が大幅に緩和され、ほとんどすべての導電性物質、吸着系の STM 実験を行うことができるようになった。

図 4.6 a は本装置の全体写真である。クライオスタット全体は、空気ばねを介した除振装置の上に設置され、電磁シールドボックスにより電気雑音を除去している。実験ピット内には探針/試料の導入、表面処理/分析用の超高真空チェンバーが展開している。交換用の探針/試料は、まず大気圧下で導入室(図 4.6 a(b))へセットされ、ターボ分子ポンプで 10^{-5} Pa 以下まで真空引きされる。その後、処理/分析室へ搬送され、イオンポンプとチタンサブリメーションポンプによって 10^{-8} Pa 以下の超高真空下におかれる。ここで試料の清浄表面を得るためにアルゴンイオン

スパッタリングや抵抗加熱を施し、低速電子線回折 (LEED) あるいは反射高速電子線回折 (RHEED) により試料表面を評価/分析することができる。試料はその後、保持・予冷室(図 4.6 a(c))に搬送され、液体ヘリウムフローにより約 8 K 以下まで予冷された後、必要があれば低温劈開を行い、クライオスタットの底部から STM 観測室へと導入される。

図 4.6 a(d) は STM ヘッドの写真である。ヘッドは熱的には無酸素銅の熱リンクによって希釈冷凍機の混合室と結ばれているが、希釈冷凍機の断熱真空槽からは隔絶した超高真空容器内に設置されている。この構造によって固体試料だけでなく吸着ガス試料の STM 実験も可能となっている。STM ヘッドは超低温・高磁場中で良好な熱伝導と小さな熱容量をもつ銀合金で製作した。探針/試料を mK 域まで確実に冷却するために、 ^3He - ^4He 混合液を用いた特別な熱リンクを製作している(図 4.6 a(e))。この熱リンクは、探針/試料間にバイアス電圧を印加するために必要な電気的な絶縁と冷却のために必要な良好な熱伝達を両立するよう設計されている。

現在進行中の液体ヘリウム温度 ($T \approx 4 \text{ K}$) におけるテスト運転では、清浄グラファイト表面およびその表面に物理吸着したキセノンとクリプトン原子の 2 次元結晶の STM 観測を行い、良好な原子分解能とサイトを特定したトンネル分光性能をもつことが証明された(次節参照)。

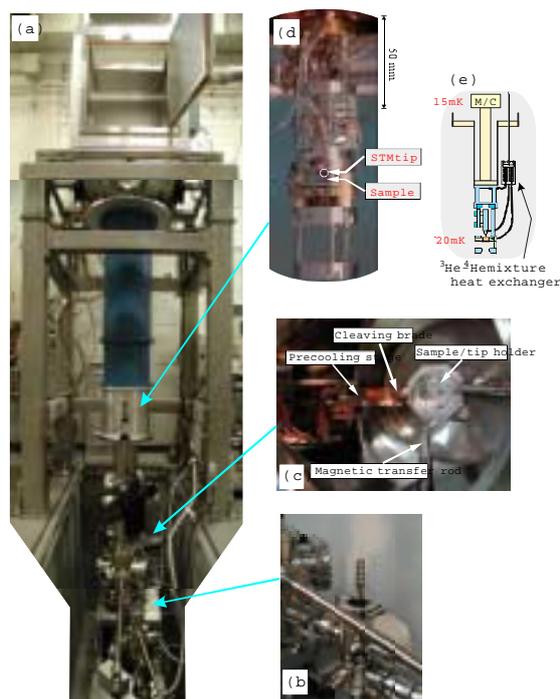


図 4.6 a: 超低温走査トンネル顕微鏡の全体 (a)、導入室 (b)、保持・予冷室 (c)、STM ヘッド (d) の写真と、探針/試料冷却のための ^3He - ^4He 混合液を用いた熱リンク機構 (e)。

4.6.2 2次元吸着希ガス固体のSTM観察

前節で説明した超低温走査トンネル顕微鏡 (ULT-STM) のテスト運転を兼ねて、液体ヘリウム温度においてグラファイト上に吸着したキセノン (Xe) およびクリプトン (Kr) の2次元固体の結晶構造の実空間観察を行った。化学的に不活性な希ガス原子は、原子スケールで平坦な基盤上に物理吸着させることにより、ほぼ理想的な2次元結晶を形成することが知られている。この系は、基盤を変えることで吸着原子に対する周期ポテンシャルを変化させたり、希ガス原子を Xe から He まで変化させることでその量子性をコントロールできるなど、2次元の物理を研究する上で非常に興味深い対象である。この研究では、Kr 原子の配列の様子を実空間で観測することに初めて成功した。

図 4.6 b(a) は $T = 4.4$ K における清浄グラファイト表面の STM 像である。蜂の巣構造をもつグラファイト基底面には直下に下層の炭素原子が存在する A サイトと、そうでない B サイトの2種類のサイトがあり、STM では局所状態密度のより大きな B サイト原子が構成する三角格子が観測される。格子定数は 0.246 nm である。

これに対して図 4.6 b(b)、図 4.6 b(c) は Xe、Kr を吸着させたときの STM 像で、それぞれ格子定数は 0.45 ± 0.05 nm、 0.35 ± 0.03 nm である。一般に Kr よりも軽い希ガス原子はグラファイト B サイト三角格子の $\sqrt{3}$ 倍の周期をもつ $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 整合相が最も低密度の固相として存在する。吸着子の面密度が増すと、より密度の高いドメイン壁で整合相のドメインが隔てられたドメイン壁構造を経て、最終的に基盤に不整合な三角格子に構造相転移すると考えられている。格子定数から考えて、得られた Kr の STM 像は不整合固相のものと考えられる。一方、fcc Xe の格子定数は $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 構造のそれより大きいため、低密度領域でより密度の低いドメイン壁で整合相のドメインが隔てられたドメイン壁構造を取ることが知られている。図 4.6 b(b) の STM 像はこうした低密度ドメイン壁の近傍を観測した可能性もある。今後は、吸着量を正確にコントロールしてドメイン壁構造の面密度依存性、吸着子依存性を調べる予定である。

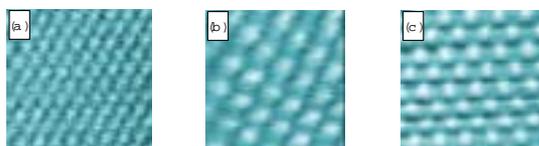


図 4.6 b: $2 \text{ nm} \times 2 \text{ nm}$ の STM 像。(a) 清浄グラファイト表面 ($T = 4.4$ K, $V = 0.10$ V, $I = 2.20$ nA)。(b) グラファイト上吸着 Xe 原子 ($T = 4.4$ K, $V = 0.80$ V, $I = 0.40$ nA)。(c) グラファイト上吸着 Kr 原子 ($T = 6.2$ K, $V = 1.20$ V, $I = 0.20$ nA)。

個々の吸着希ガス原子が STM 観測できる物理的

な起源を探るため、トンネル分光を行い局所状態密度 (トンネル微分コンダクタンス dI/dV に比例) の変化を調べた (図 4.6 c)。清浄グラファイト表面のデータに対して、Xe を吸着させたときのデータでは -2 から -1 V 付近で状態密度の減少が、 $+0.3$ V から $+1.5$ V にかけて増加が見られる。これらは共に探針-基盤間距離をバイアス電圧 -1.0 V、トンネル電流 0.35 nA の位置に固定して測定したものである。Kr の場合はさらに大きな局所状態密度の変化が観測されており、今後データの精度を上げてより定量的な議論をして行きたい。

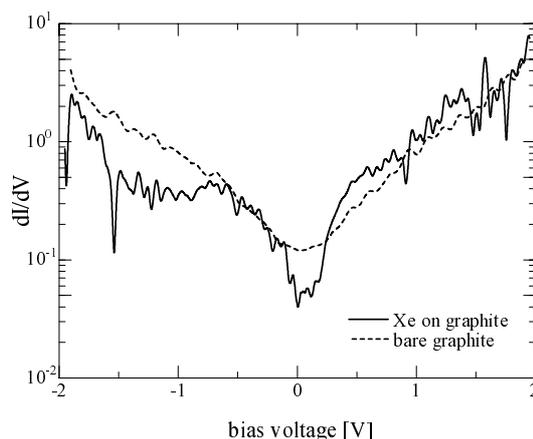


図 4.6 c: 清浄グラファイト表面とそれに Xe を吸着させた場合のトンネル分光データ。探針-基盤間距離は $V = -1.0$ V, $I = 0.35$ nA の位置に固定。

図 4.6 d は Xe / グラファイト系で探針を基盤に徐々に近づけたときの STM 像の変化である。Xe の吸着構造 (a) は探針が近づくにつれて失われ (b)、やがてグラファイトのみの構造が観察されるようになる (c)。その後、逆に探針を基盤から遠ざけてもグラファイトの構造のみが見え続ける (d)。これは探針との相互作用によって Xe 原子が走査範囲から排除された結果と考えられる。

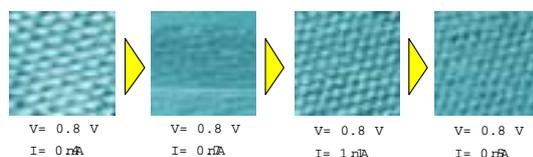


図 4.6 d: グラファイト上吸着 Xe 系について探針を基盤表面に近づけたときの STM 像の変化 ($2 \text{ nm} \times 2 \text{ nm}$)。バイアス電圧を $V = 0.8$ V で一定のままフィードバックするトンネル電流値を変えることによって探針-基盤間距離を変化させた。トンネル電流が大きい程、探針-基盤間距離は短い。

一方、Xeの多層吸着膜に対しては、トンネル電流が時間と共に特定の2値(0 nAと0.8 nA)を交互に示すという興味深い現象が観察された。図4.6 eはバイアス電圧を $V = 0.6$ Vに固定して、フィードバックするトンネル電流の設定値を0.1 nAから0.5 nAまで変化させた時に得られたトンネル電流の時間変化である。設定値が大きい程、探針-基盤間距離は短い。フィードバックの時定数は約30 msで2値の平均滞在時間より十分長いので、トンネル電流を時間平均した値がフィードバック電流の設定値に等しくなっている。探針-基盤間距離が短くなるにつれて0.8 nAの滞在確率が増し、電流の設定値が0.8 nAのときに0 nAの滞在確率はゼロとなった。このような2値を取るトンネル電流の時間変化(telegraph pattern)はXe原子1個の動きを実時間で捉えたものと考えている。これが量子的なトンネル効果によるものか、熱的な励起によるものか、などの詳細は、今後ULT-STMを用いて熱励起のほとんどないmK温度域まで測定を拡張することで明らかになるはずである。

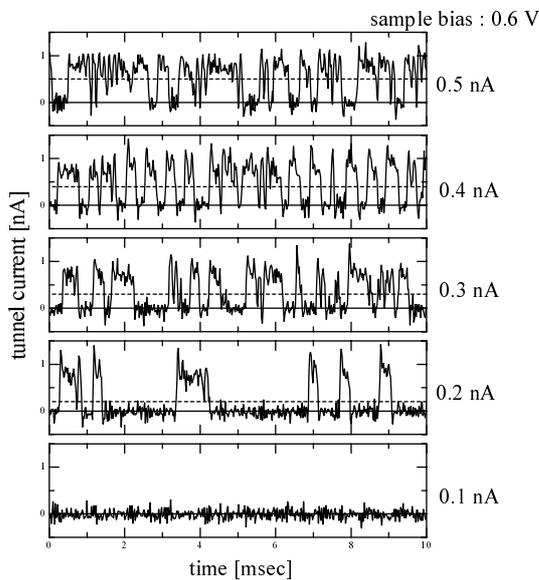


図 4.6 e: Xeの多層吸着膜におけるトンネル電流の telegraph pattern。バイアス電圧を $V = 0.6$ Vに固定し、フィードバック電流の設定値を大きくしてゆくと、トンネル電流は時間と共に特定の2値(0 nAと0.8 nA)を交互にとるようになり、電流設定値に応じてその頻度が変化する。

4.6.3 低温 STM による異方的超伝導体 Sr_2RuO_4 の研究

銅酸化物高温超伝導体の母結晶と同じペロブスカイト構造をもちながら銅を含まずに超伝導(転移温

度: $T_c = 1.5$ K)を示す Sr_2RuO_4 の物性が興味を集めている。最近特に、クーパー対の対称性が超流動 ^3He と同じくスピン三重項であることが明らかになりつつあり、通常のs波スピン-重項状態にはない豊富な物理の存在が期待されている。この物質の超伝導機構には磁氣的相互作用が重要な役割を果たすと考えられているが、詳細は明らかではない。また、過剰なRu金属($T_c = 0.49$ K)が内部析出した試料(3 K相)では、 T_c が一気に3 Kまで上昇することが知られており、その微視的機構も興味深い。本研究は、低温走査トンネル顕微鏡(低温STM)を用いたトンネル分光法で Sr_2RuO_4 の超伝導ギャップの観測を行い、クーパー対の対称性に関する知見を得ることを目的としている。さらに、3 K相についてはRu析出相近傍での超伝導ギャップの空間分布を測定することにより、 T_c 上昇の謎を探る。

本研究に用いた低温STMは、試料を極低温($T \approx 4$ K)・超高真空下で劈開して清浄表面を得ることのできる低温劈開装置を装備している。1.5 K相試料をc軸に垂直な面内で低温劈開したときの劈開面について $T = 4.3$ Kで測定したトンネル分光データが図4.6 fである。フェルミ面で有限の状態密度をもつ金属的なデータと、幅約 ± 40 mVのギャップ構造をもつデータの2種類のデータが得られた。測定温度は T_c より高温であり、観測されたギャップ幅は期待される超伝導ギャップより1桁大きいので、これは銅酸化物高温超伝導体で知られている擬ギャップを観測したものである可能性がある。今後は、ギャップ構造の温度依存性を測定する予定である。

一方、3 K相試料をc軸に平行な面内で低温劈開した表面について行ったトンネル分光測定でも、幅約 ± 15 mVのギャップ構造の他、金属的なデータ、半導体的なデータなど大別して3種類の分光データを得た。今後は原子分解能を有する超低温走査トンネル顕微鏡(ULT-STM)を使って、原子サイトを特定したトンネル分光測定を超伝導相を含む広い温度、磁場範囲で詳細に行う予定である。また、秩序変数の多様なスピン三重項状態では磁場中の量子渦糸の渦芯構造も非常に興味深いSTM実験の対象である。

4.6.4 ^3He 単原子層膜の2次元核磁性の研究

サブモノレイヤー ^3He におけるスピンプォラロン効果と零点空格子点の可能性

原子スケールで平坦なグラファイト表面に物理吸着した ^3He 原子はvan der Waals引力(吸着ポテンシャル ~ 100 K)のために低温で表面に強く束縛され、理想的な2次元系を形成する。一定の面密度以上では固体の単原子層膜、すなわち2次元固体 ^3He が実現する。固体 ^3He では強い零点振動のために隣接原子が直接位置交換して核スピン間に多体の交換相互作用が働くことが知られている。この多体交換相互作用(MSE)の大きさは周囲の原子配列に敏感なので、吸着面密度(ρ)や下層の結晶構造によって ^3He

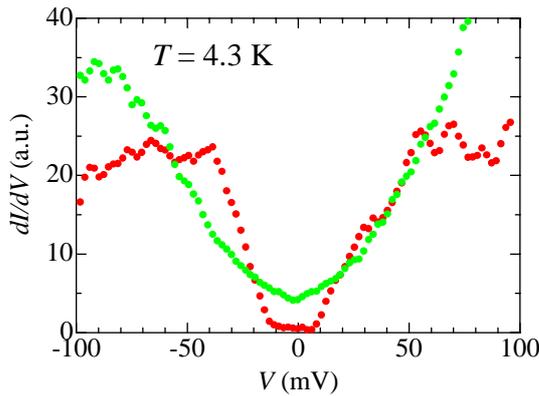


図 4.6 f: Sr_2RuO_4 (1.5 K 相) のトンネル分光データ ($T = 4.3 \text{ K}$, $V = 0.05 \text{ V}$, $I = 0.1 \text{ nA}$)。c 軸に垂直な面内で低温劈開した表面で測定。

膜の磁性が大きく変わる可能性がある。そこで 2 層目に続いて、1 層目のサブモノレイヤー固層の比熱 (C) を $100 \mu\text{K}$ に至る超低温まで測定することでその核磁性を研究した。これは交換相互作用 (J) と同程度の低温までこの系の磁気比熱を測定した最初の例である。

図 4.6 g で、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 整合固相に対応する $\rho = 6.1 \text{ nm}^{-2}$ 、 6.4 nm^{-2} のデータの 20 mK 付近に比熱の小さな山が見られる。この山は面密度を増すと速やかに消滅する ($\rho \geq 7.0 \text{ nm}^{-2}$)。一方、吸着第 2 層目の場合にも $\sqrt{7} \times \sqrt{7}$ 整合固相 (第 1 層目の高密度 ^3He に対する整合相) のとき類似の比熱の山が 30 mK 付近に観測されている (図 4.6 g の点線参照)。この場合も面密度を増すと、比熱異常は密度に対して微妙に形を変えながら速やかに消滅する。これらの事実から、この 20~30 mK 付近の奇妙な比熱の山は、下地の周期ポテンシャルに整合な低密度固相のときのみ現れ、面密度が増加して不整合固相になると消滅することが分かる。この温度領域は 2 次元固体のデバイ温度に比べて十分低く、交換相互作用に比べればかなり高いので、通常の格子比熱や磁気比熱などは小さいはずである。

この比熱異常を説明する一つの仮説は、低密度の 2 次元整合量子固体では mK という低温域でも空格子点が比較的多数存在し (全格子点の数%)、その運動とスピン自由度がカップルして比熱異常として現れるというものである (スピンポーラロン効果)。例えば、正方格子スピン 1/2 ハイゼンベルク模型では空格子点の存在が強磁性基底状態を安定化することが知られており (長岡強磁性)、有限系のモンテカルロ計算ではポーラロン形成が始まる温度域で比熱に山が現れる異常が指摘されている。実際の系は三角格子であるし、多体の交換相互作用が支配的だと思われるので、現存する理論計算と単純な比較はできない。しかし、もし絶対零度でも比較的多数の空格子点が安定して存在できれば (零点空格子点)、これらは運動エネルギーを下げるために結晶中を動き回っているはずである。

我々はこの 20~30 mK 付近の比熱異常を面密度の関数として詳細に調べ、スピンポーラロン仮説を検証するために、超伝導量子干渉磁束計 (SQUID) を利用した低熱容量高感度磁気温度計を設計製作している。

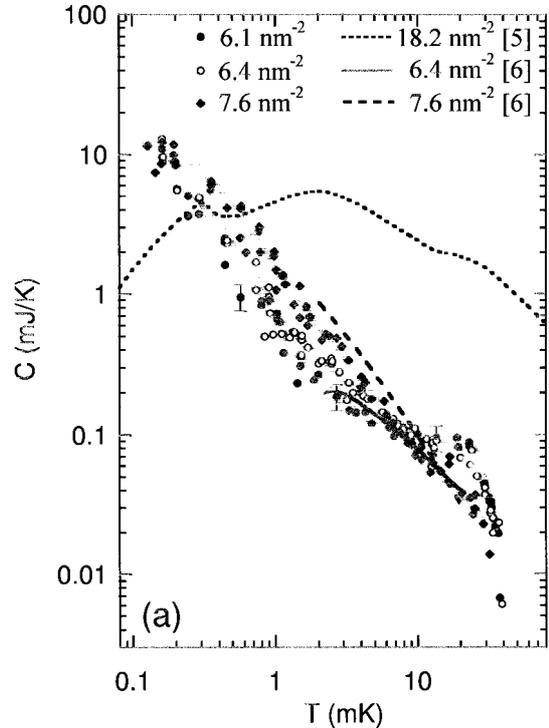


図 4.6 g: サブモノレイヤー固体 ^3He の熱容量測定の結果 (低密度領域のみ示す)。点線は 2 層目の $\sqrt{7} \times \sqrt{7}$ 整合相に対する以前の結果。

アモルファス ^3He の比熱

ランダムなポテンシャルをもつ基盤に吸着した ^3He は、フェルミ流体でも完全結晶でもない一種のアモルファス状態になっていると考えられる。我々は 10 nm 程度の大きさの配向したグラファイト単結晶子 (platelet) の集合体である Grafoil 基盤を用いて一様な ^3He 膜の比熱が十分小さい温度および面密度領域で、2D アモルファス ^3He の比熱を測定した。その結果、 8.9 nm^{-2} と 9.5 nm^{-2} の間で 1 層目から 2 層目への layer promotion と考えられる比熱の急激な変化があること、それぞれの層内では比熱はほぼ平均密度に依存しないことなどが分かった。また、観測された低温域の緩やか温度依存性は、格子間距離すなわち交換相互作用の大きさが広く分布するという単純な理論モデルで定性的に説明可能である。高温側の比熱のカットオフ温度が 1 層目と 2 層目で約 10 倍異なるのも、一様膜の交換相互作用の大きさの比と符合しており妥当である。このモデルに従ってア

モルファス成分の比率を見積もると全体の 10 数% となり、NMR など他の方法で求めた値と一致する。なお、前節のサブモノレイヤー ^3He の比熱データからはずしてこのアモルファス成分の寄与を差し引いてあるので、20~30 mK での比熱異常は、ここで説明したような効果では説明できない。

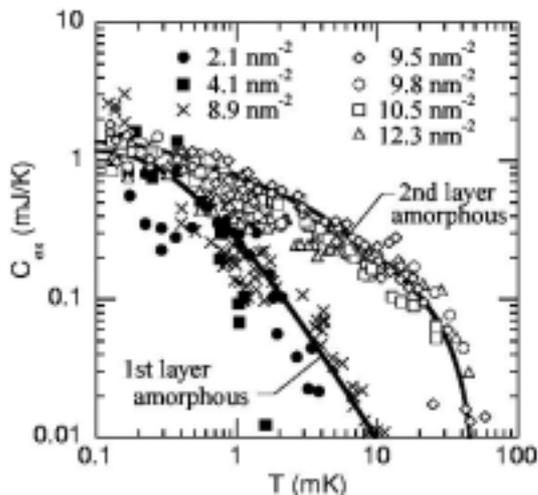


図 4.6 h: アモルファス ^3He の熱容量測定の結果。図中の数字は平均面密度。2 本の実線はアモルファス ^3He の第 1 層目と第 2 層目に対応。

4.6.5 2次元固体 ^3He における量子スピン液体状態の研究

グラファイト表面に物理吸着した固体 ^3He 単原子層膜は理想的な 2次元三角格子上のスピン 1/2 の系である。低密度 (反強磁性的) の吸着第 2 層目に対して行った比熱測定では、ほぼ全てのスピンエントロピーが除去される最低温度 (90 μK) に至るまで明確な相転移を示す比熱異常が観測されず、2 mK と 0.3 mK に緩やかなダブルピークをもつ特異な温度依存性を示すことが明らかになった。我々はこの比熱測定の結果から、この系の基底状態として絶対零度でも長距離秩序をもたない“量子スピン液体”状態の可能性を初めて指摘した。2次元三角格子という幾何学的なフラストレーション、スピン 1/2 系の量子揺らぎ、MSE 間の相互作用の競合といった要素が、このような特異な基底状態発現のメカニズムであると考えている。

最近、MSE モデルに基づいた有限系の厳密対角化法による理論計算がなされ、実験的に求められた交換相互作用パラメータに対応する基底状態が相関距離の極端に短い量子スピン液体状態であることが、さらに比熱のダブルピーク構造も出現することが示された。また、4 体交換相互作用が強いときには磁場中で uuud 相と呼ばれるフェリ磁性的なネール状

態が安定化し、それに伴い磁化曲線に飽和磁化の半分の数値で磁化プラトーが現れることが予言されている。さらに、磁場中の有限温度では uuud 相への相転移に伴う大きな比熱異常が観測される可能性も指摘されている。我々は磁化曲線や磁場中比熱の測定からこれらの仮説の真偽を、そしてそれによってスピンギャップの大きさや 4 体交換相互作用の大きさなど量子スピン液体状態の性質を明らかにしたいと考えている。

本研究では、 $T \leq 300 \mu\text{K}$ 、 $B \leq 1 \text{ T}$ の超低温・高磁場下で 2次元固体 ^3He を始めとする低次元 ^3He 試料の比熱、磁化、NMR 測定を行うため、銅の核スピンを利用した高性能かつコンパクトな核断熱消磁冷凍機を建設している。 ^3He - ^4He 希釈冷凍機、断熱消磁用超伝導マグネット、液体ヘリウムデューワー、除振架台、銅核ステージはすでに完成し、予冷段に用いる希釈冷凍機の試運転では 6 mK が発生できることを確認した。核断熱消磁冷凍機の全体と実験空間を図 4.6 i に示す。実験空間には白金パルス NMR 温度計、超伝導熱スイッチのほか比熱測定セルおよびこれに磁場を印加するためのアクティブシールド付き超伝導マグネット等が収まる。

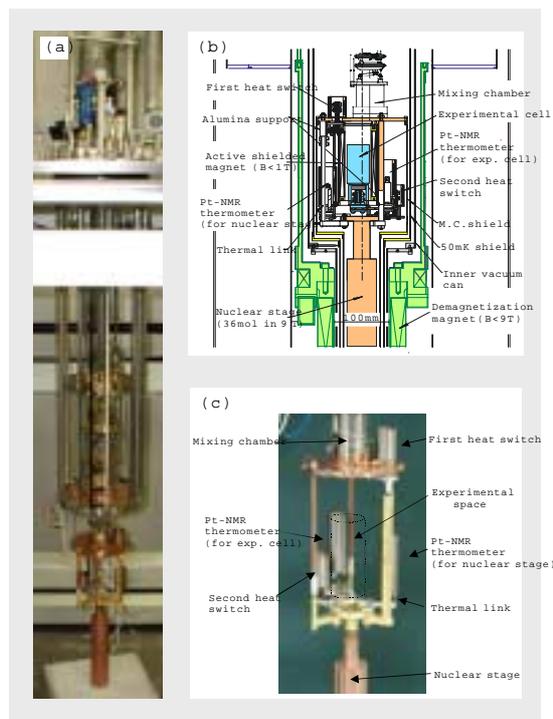


図 4.6 i: 建設中の核断熱消磁冷凍機。全体 (a)、実験空間の断面図 (b) と写真 (c)。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] T. Matsui, H. Kambara, and Hiroshi Fukuyama: Development of a New ULT Scanning Tunneling

- Microscope at University of Tokyo, *J. Low Temp. Phys.* **121**, 803-808 (2000).
- [2] S. Kishishita, H. Kambara, and T. Mamiya: Heat Capacity of Liquid ^3He in Sintered Silver Powder, *Phys. Rev. B* **63**, 024512-1-5 (2001).
- [3] T. Mamiya, H. Kambara, and S. Kishishita: Specific Heat of the Surface Layers on the Amorphous Substrate in Solid and Liquid ^3He , *J. Low Temp. Phys.* **122**, 367-377 (2001).
- [4] M. Morishita, H. Nagatani, and Hiroshi Fukuyama: Anomalous Nuclear-spin Heat Capacities in Submonolayer Solid ^3He Adsorbed on Graphite, *Phys. Rev. B* (2001) in press.
- [13] 八幡和志、池上弘樹、石本英彦、福山 寛: Bcc ヘリウム 3 の高磁場秩序相における反強磁性スピン波、日本物理学会第 55 回年次大会 (新潟大学、2000 年 9 月)
- [14] 八幡和志、池上弘樹、石本英彦、福山 寛: ヘリウム 3 融解圧曲線に基づく mK 温度スケール、日本物理学会第 55 回年次大会 (新潟大学、2000 年 9 月)
- [15] 松井朋裕、神原 浩、福山 寛: 超低温走査トンネル顕微鏡の開発とその応用、日本物理学会第 56 回年次大会 (中央大学、2001 年 3 月)
- [16] 八幡和志、桃井 勉、福山 寛: Bcc ヘリウム 3 の高磁場秩序相における反強磁性スピン波 II、日本物理学会第 56 回年次大会 (中央大学、2001 年 3 月)

(学位論文)

- [5] 八幡和志: ^3He Melting Curves in High Magnetic Fields (筑波大学博士論文)
- [6] 松井朋裕: 超低温走査トンネル顕微鏡の開発研究 (修士論文)
- [7] 松本洋介: グラファイト上に吸着した 2 次元固体ヘリウム 3 の核磁性の研究 (修士論文)
- [8] 横田健一: 走査トンネル顕微/分光法を用いた層状超伝導体の物性研究 (修士論文)

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [9] T. Matsui, H. Kambara, and Hiroshi Fukuyama: Development of a New ULT Scanning Tunneling Microscope at University of Tokyo, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (Mineapolis, USA, June 2000).

招待講演

- [10] Hiroshi Fukuyama, K. Yawata, D. Ito, H. Ikegami, and H. Ishimoto: The ^3He Melting Curve as a Probe of Nuclear Magnetic Orderings in Solid ^3He and a Millikelvin Temperature Scale in High Magnetic Fields, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (Mineapolis, USA, June 2000).
- [11] Hiroshi Fukuyama: A Possible Quantum Spin Liquid State in Two Dimensional Solid ^3He ; frustration caused by competing multiple-spin exchange interactions, Highly-Frustrated Magnetism 2000 Conference (Waterloo, Canada, June 2000).
- [12] Hiroshi Fukuyama: Spin Liquid Effects in ^3He Films, The year 2000 Correlated Electrons Gordon Conference (Plymouth, USA, June 2000).

(国内会議)

一般講演

4.7 岡本 研究室

当研究室は、2000年5月に岡本が着任して発足した。2000年度は実験室の取得、整備等に思わぬ時間を要したが、2001年度より河野行雄助手と大学院学生を迎え、本格的に研究活動を開始する。早急に、半導体試料作製および低温・強磁場物性測定のための環境を整え、半導体2次元系などを舞台とした、新しい量子現象の解明および探索に取り組む。

4.7.1 強相関2次元系

量子固体相の磁性

半導体2次元系の研究は、非常に高い移動度の試料が得られる GaAs/AlGaAs ヘテロ接合界面に形成された電子系に対して、もっとも盛んに行われてきた。分数量子ホール効果が、初めて観測されたのもこの系である。これに対して、整数量子ホール効果の発見以来、大きく注目されることがあまりなかった Si-MOSFET (シリコン MOS 電界効果型トランジスタ) の2次元電子系で、いくつかの興味深い現象が、近年になって報告されている。

シリコン2次元電子系の最も大きな特徴は、電子相関が強いことである。平均的な電子間のクーロン斥力エネルギーは、量子運動のエネルギーよりも10倍程度大きい。2次元系のクーロンエネルギーを最低にするのは、電子がウィグナー結晶と呼ばれる三角格子を組んだ状態である。量子運動のエネルギーが大きくなると固体状態は不安定になり量子液体状態になるが、実験では、電子濃度を制御することによって絶縁体相から金属相への移り変わりを引き起こすことができる。

重要な課題の一つとして、我々は、量子融解点近傍の電子固体状態に対する研究を行っている。融解点近傍の電子固体においては、格子点近傍に局在した電子が大きく振動し、さらにトンネリングによって隣接する電子と位置交換を行うことが可能となる。このような量子固体における位置交換は、電子のスピン間に相互作用をもたらす。以前、岡本らは、Si-MOSFET の絶縁体領域において、量子固体状態が実現されていることを示唆する重要な実験結果を報告した。活性化エネルギーの磁場依存性は、多体交換相互作用に対するアハラノフ・ボーム効果の結果として良く説明することができた。

これまで行われた研究は、我々が独自の着想に基づき行った Si-MOSFET に対するものだけであり、量子固体相での具体的な交換の種類、性質などは確定されていない。今後は、シリコン2次元電子系において議論を複雑にしていた谷縮重がない半導体2次元系の量子固体相に対して実験を行う。磁場と2次元面との角度を制御した環境下での実験から、交換相互作用に対するアハラノフ・ボーム効果の強さとスピン分離エネルギーの大きさに対する磁気相図を完成させ、量子固体相におけるスピン間の相互作用の性質を明らかにする。これまで知られていなかった

た全く新しい磁気秩序状態が期待される。

現在、シリコン電子系とならぶ代表的な強相関系である GaAs の2次元正孔系などに対して FET 試料を製作するため、試料作製システムを立ち上げている。

金属相

高電子移動度 Si-MOSFET などの電気抵抗が低い電子濃度領域において、温度の低下に伴う電気抵抗率の急速に減少が観測される。相関の強い2次元電子系に特有の現象と考えられているが、未だそのメカニズムは解明されていない。2次元系では金属状態は存在しえないとするスケール理論から導かれる従来の常識とは矛盾する現象であることから、近年、大きく注目されている。

以前、岡本らはスピン自由度に着目した研究を行い、Si-MOSFET に対してスピン偏極率と磁気抵抗効果の関係を詳細に調べた。本年度は、非常に移動度が高い Si/SiGe ヘテロ接合界面に形成された2次元電子系に対する実験データを含めた詳細な解析を行い、金属相から絶縁体相に至る非常に広い電気抵抗範囲での普遍的な磁気抵抗の振る舞いを明らかにした。今後は、これまで行ってきた研究を大きく拡張させ、2次元面内の電子(または正孔)の持つスピンや谷の縮重などの内部自由度を磁場や物質を変えることにより系統的に制御した実験を行い、金属状態の出現条件と2次元系の磁気状態との関係を明らかにする。

4.7.2 量子ホール効果

量子化ホール抵抗の破綻現象

低温・強磁場下におかれた2次元電子系においては、ホール抵抗が h/e^2 を整数(または分数)で割った値に量子化される現象、量子ホール効果が観測される。量子化されたホール抵抗は、1990年より抵抗標準に用いられており、また、プランク定数 h や素電荷 e の決定にも用いられる。量子化ホール抵抗を高精度に測定するためには、試料に流す電流を大きくする必要があり、電流が臨界値を超えると量子ホール効果状態は破綻する。量子化ホール抵抗の破綻現象の機構に関して、いくつかの、物理学の研究対象としても非常に興味深いモデルが提唱されているが、未だコンセンサスは得られていない。

これまでに岡本は、学習院大学の川路教授との共同研究において、電流電極での発熱の影響を取り除いた GaAs/AlGaAs ヘテロ接合界面2次元電子系試料を用いることにより、整数量子ホール効果の電流による本質的な破綻現象の試料測定部幅依存性、試料依存性(電子濃度、電子移動度依存性)の系統的实验的研究行ってきた。本年度は、量子ホール効果の特徴づけると考えられてきた無散逸状態のブレイクダウンが生ずる電流値より小さい電流で、ホー

抵抗値の量子化値からの急峻なずれ (~ 10 ppm) が現れる現象の、温度依存性を調べた。温度の増加とともに、量子化値からのずれが現れ出す電流は小さくなるが、破綻電流近傍での振る舞いは、多少鈍りが見えるものの、急峻であった。

サイクロトロン発光の空間分解測定

量子化ホール抵抗の破綻現象の機構を解明するため、河野行雄助手を中心として、サイクロトロン発光の空間分解測定を計画している。これまで、河野は、試料電極近傍での、熱平衡状態からずれた非平衡電子の空間分布を直接的に観察することに成功している。今後は、固有ブレイクダウン領域に研究を拡張する。

また、空間分解測定技術は、エッジ状態とバルク状態との緩和長の測定などにも応用できる。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] H. Iizuka, S. Kawaji and T. Okamoto: Collapse of Quantized Hall Resistance and Breakdown of Dissipationless State in the Integer Quantum Hall Effect: Filling Factor Dependence, *Physica E* 6 (2000) 132.
- [2] T. Okamoto, K. Hosoya, S. Kawaji, A. Yagi, A. Yutani and Y. Shiraki: Metal-Insulator Transition and Spin Degree of Freedom in Silicon 2D Electron Systems, *Physica E* 6 (2000) 260.

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [3] T. Okamoto and S. Kawaji: Metal-insulator transition and magnetoresistance in strongly correlated 2D electron systems, 25th International Conference on the Physics of Semiconductors, (Osaka, Japan, September 2000).

招待講演

- [4] T. Okamoto: Metal-insulator transition in 2D silicon and magnetism in a Wigner solid, Japan-Israel symposium on physics of nanostructures and mesoscopic systems (RIKEN, Japan, September 2000).

(国内会議)

一般講演

- [5] 田中啓安、川島洋徳、岡本徹、川路紳治：量子化ホール抵抗の崩壊：温度依存性、日本物理学会第55回年次大会、(新潟大学、2000年9月)。
- [6] 岡本徹：強相関2次元電子系と磁場効果、「低次元ヘリウム3の新物性」研究会(熱海市、2000年12月)。

招待講演

- [7] 岡本徹：2次元電子系での電子相関、第13回佐々木学術シンポジウム「せめぎあう電子たち」(学習院大学、2001年1月)。
- [8] 岡本徹、川路紳治：量子固体相におけるアハラノフ・ボーム効果と強相関金属相、日本物理学会第56回年次大会シンポジウム「強磁場中2次元電子系の多彩な量子現象」(中央大学、2001年3月)。

5 一般物理理論

5.1 宇宙理論研究室 (佐藤、須藤)

宇宙物理学は取り扱う対象が極めて多岐に渡っているのみならず、その方法論も多様であり非常に学際的な体系をなしている。実際、素粒子物理学、原子核物理学、プラズマ物理学、流体力学、一般相対性理論、などの基礎物理学を駆使して宇宙の諸階層の現象の本質的な理解にせまろうという点では、応用物理学的な色彩の濃い学問分野である。当教室の宇宙理論研究室では、佐藤教授、須藤助教授、白水助手、樽家助手、および十数名の大学院学生、研究員が様々な宇宙物理の問題に取り組んでいる。研究室の活動は、「初期宇宙・相対論」、「観測的宇宙論」、「天体核素粒子物理」の3つの中心テーマを軸として行なわれており、研究室全体でのセミナーに加えて、それぞれのテーマごとのグループでのセミナーや論文紹介等、より研究に密着した活動も定期的に行なわれている。

我々の住むこの宇宙は今から 150 億年の昔、熱い火の玉として生まれた。膨張にともなう温度の降下によってハドロン、原子核、原子が形成され、さらにガスがかたまり銀河や星などの天体が形成され豊かな構造を持つ現在の宇宙が創られた。これが物理学に基づいて描きだされてきた現在の宇宙進化像である。しかし宇宙の進化には多くの謎が残されている。またさらに近年の技術革新の粋を用いた宇宙論的観測の爆発的進歩によって新たな謎も生じている。宇宙論のもっとも根源的謎はこの 3 次元の空間と 1 次元の時間を持った宇宙がいつか始まったかという問題である。「初期宇宙・相対論」は、1980 年代に急速な発展を遂げたインフレーション理論に代表される、素粒子的宇宙論の進歩を基礎とし、さらにより根源的な問題として残されている宇宙の誕生・創生の研究を目的としている。当研究室では、最近の超紐理論の進展で中心的役割を担っているブレインや AdS/CFT 対応を基礎とした相対論的宇宙論に取り組んでいる。重力の深い理解によって真の宇宙創成像を明らかにすることを目標としている。宇宙の誕生の瞬間を出発として宇宙の進化を説明しようとするのが素粒子的宇宙論の立場であるとするれば、「観測的宇宙論」は、逆に現在の宇宙の観測データを出発点として過去の宇宙を探ろうとする研究分野である。1992 年に米国の宇宙背景輻射探査衛星 COBE が発見した 3K マイクロ波背景輻射の温度揺らぎ、1993 年に打ち上げられた日本の X 線衛星 ASCA、1993 年に修理が成功した米国のハッブル宇宙望遠鏡、さらに今世紀末から稼働する予定のすばる望遠鏡や、大規模銀河探査計画など、現在そして近い将来におい

てきわめて重要な観測データが大量に提供されることが期待される。これらの観測データを理論を用いて正しく解釈する、さらにコンピュータシミュレーションを通じて、ダークマター、宇宙初期の密度揺らぎのスペクトル、宇宙の質量密度、膨張率、宇宙定数など宇宙の基本パラメータを決定することで現在の宇宙像を確立するとともに宇宙の進化の描像を構築することが「観測的宇宙論」の目的である。このテーマに関して現在我々が具体的に取り組んでいる課題として、大規模数値シミュレーションを用いた銀河・銀河団の形成とその空間分布、銀河団の X 線光度関数とその進化、重力レンズ現象と高赤方偏移天体、赤方偏移空間での銀河分布 2 体相関関数、銀河のハッブル系列の起源、などがあげられる。さらに最近では、太陽系外惑星探査の研究にも興味を持っている。

質量の大きい星は進化の最終段階で中心にブラックホールもしくは中性子星を形成し超新星爆発を起こす。「超新星・高密度天体」を解明するにはニュートリノを中心とする素粒子の反応、中性子過剰原子核がいつか合体しながら核子物質へ移行するのか、さらに密度の上昇によりクオーク物質へと相転移を起こすかという基礎過程の研究が必要である。さらにこれらを組合せ一般相対論的な流体力学計算、爆発のシミュレーションを行なわなければならない。1987 年、大マゼラン星雲中に起こった超新星 1987A からのニュートリノバーストが神岡の観測装置で観測された。これはニュートリノ天文学の始まりを告げる歴史的出来事であった。さらに GINGA 衛星による超新星 1987A、ASCA 衛星による超新星 1993J の観測などから超新星、中性子星の形成を解明する重要なデータが得られている。我々の研究室では爆発のエンジンとなる星のコアの重力崩壊、中性子星形成の 2 次元 3 次元流体シミュレーションを中心に研究を進めている。従来中性子形成の研究は球対称を仮定した研究が中心であったが実際の星は自転しており、遠心力の効果、対流、非等方な衝撃波の発生などが爆発に大きな寄与をしている。これらのシミュレーションとともに r-プロセス元素合成の研究なども進めている。

5.1.1 初期宇宙論、相対論

ブレインワールド・ブラックホール

超紐理論の最近の非摂動的側面から、我々の宇宙は高次元中のドメイン壁的なものとするのが自然とされている。しかし、ブレインワールドの非線形領域は未だ明らかになっていない。そこで、非線形が重要となる物体であるブラックホールの初期データの構成 [1]、電荷を有するブラックホールのバルクでの振る舞い等を調べた [2]。

ホログラフィー

我々の住むブレインはバルク時空の端（境界）であると見なすと、バルクの重力の自由度を境界上の共形場としてとらえることができると信じられている（AdS/CFT 対応予想）。そこで、我々が以前導出したブレイン上の重力場の方程式の Einstein 方程式からのずれの項を、共形場のエネルギー・運動量テンソルの期待値のトレイスレス部分とアノマリー部分とで説明した [3]。

多次元宇宙の量子論的創生

正の宇宙定数のある多次元宇宙モデルのユークリッド解を数値計算して、「準アトラクター」的ふるまいを見いだした [4]。また、同じモデルで宇宙の波動関数を数値計算した [5]

ディラトン重力理論におけるブレーンワールド

ディラトン重力理論におけるブレーンワールドにおいて、動的な厳密解を見だし、その時空構造について調べた。[6], [56]

ダブル・インフレーションと原始ブラックホール

ニュー・インフレーションで終わるようなダブル・インフレーションを考えると、一般に小スケールにおいて赤方に傾いた密度揺らぎを得る。これによって、ダブル・インフレーションの接続スケールに非常に大きなブレイクが作られ、たとえば銀河分布等の観測結果をうまく説明できる事が知られている [33, 41]。一方で、最近観測された反陽子粒子線束が原始ブラックホールの蒸発による可能性が指摘されているが、ダブル・インフレーションによって原始ブラックホールが作られる場合について考察した [7, 34, 47, 57]。

ダブル・インフレーションとブーメラン実験

最近、気球による宇宙背景輻射観測実験であるブーメランの観測結果が発表され、それによると宇宙はほぼ平坦でありインフレーションの枠組みと無矛盾である事が示された。その一方で、宇宙背景輻射非等方性の角度スペクトルにおいて、2 番目のアコースティック・ピークが低いという結果も得られている。他の多くの観測から予想される宇宙論パラメータではこの低いセカンド・ピークを説明できないが、ダブル・インフレーションによって他の観測と無矛盾にこの結果を説明できる事を示した [41, 82]。

5.1.2 観測的宇宙論

遠方天体の 2 点統計における光円錐効果

遠方天体の空間相関は、時間一定面上ではなく、過去の光円錐上で定義される。この効果に関しては、今まで主として解析的な定式化を行ってきたが、それを応用して、高赤方偏移の X 線銀河団に対する 2 点相関関数の理論予言を行った [8]。また、大規模数値シミュレーションを組み合わせる光円錐上での模擬サンプルを構築し、この解析的予言の妥当性を実際に確認した [9]。

測光観測による $z \sim 1.1$ クェーサーグループ周辺の銀河集団大構造の発見

現在の宇宙には、超銀河団と呼ばれる、銀河の空間的な大構造が存在する。高赤方偏移宇宙では、対応するような構造は知られていないが、これは宇宙の構造進化のためであるか、あるいは、暗くなるための観測的限界によるのかは明らかでない。一方、 $z \sim 1.1$ 付近で、23 個のクェーサーが密集している領域が存在することが知られている。我々は、東北大学、プリンストン大学の共同研究者とともに、米国アパッチポイント天文台の 3.5m 望遠鏡を用いて、この領域内の銀河の測光観測を行い、クェーサー集団の付近で、確かに銀河の面密度が高くなっていることを発見した [10]。この領域をすばる望遠鏡を用いてさらに詳細に観測した結果を現在解析中である。

宇宙論的流体シミュレーションを用いた銀河、銀河団のバイアスモデルの検証

Press – Schechter 理論は解析的な近似理論として、銀河団に関する宇宙論的予言を行う際にひろく使われている。我々は、 $N = 128^3$ のガス粒子および同数のダークマター粒子を用いた、世界最大の SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) シミュレーションを 6 モデル行うことによって、銀河団スケールにおいては、解析的近似では無視されている輻射冷却や背景紫外線輻射による加熱を考慮しても、Press – Schechter 理論の予言する温度関数が良い近似であることを明らかにした [11]。また、ダークマターハローに対する非線型確率的バイアスの解析的モデルを構築し [12]、シミュレーションから同定した銀河・銀河団の空間相関と比較することで、このバイアスモデルを検証した [13, 14]。

ミリ波領域における銀河団のスニャーエフ・ゼルドビッチ効果の高角度分解能マッピング

国立天文台、東北大学、京都大学の共同研究者とともに、全天で最も明るい X 線銀河団 RXJ1347-1145 のミリ波領域でのスニャーエフ・ゼルドビッチ効果

による 2 次元マップを得た。今回の高角度分解能観測によって、従来知られていなかった銀河団のサブストラクチャーを発見した [15]。この結果は、最近の米国 X 線天文衛星チャンドラによって確認されている。このような形態の非一様性の起源はまだ理解されておらず、銀河団の進化に対する新たな謎を投げかけることになる。

遠方天体における等密度統計の宇宙論的効果

大規模構造の統計的性質を特徴づける指標に、等密度統計と呼ばれる幾何学的な統計量があり、こうした統計量を用いて、銀河、銀河団分布に対し、クラスタリングの性質や初期ゆらぎのガウス性の検証が盛んに行われている。現在のところ、このような解析は比較的近傍の天体に限られているが、我々は、遠方天体を用いて等密度統計を解析した際、赤方偏移歪みや幾何学的効果といった宇宙論的効果がどう影響するかを考察した [18]。宇宙論的効果を取り入れた等密度統計の理論モデルを構築、解析的表式を用いた評価から、等密度統計は宇宙論的距離指標に敏感であることがわかり、今後の遠方観測において、宇宙論的効果の影響が無視できない場合があることを指摘した。

[50]

非線形バイアスを考慮した銀河団分布に対するジーナス統計

等密度統計の一種であるジーナス統計は、大規模構造の幾何学的特徴をとらえる有力手段として、今後、スローンデジタルスカイサーベイなどから得られる銀河、銀河団分布を用いて、精密な統計解析が行われる予定である。こうした統計量に対する理論予言には、天体分布のバイアス、及び非線形重力進化を考慮する必要があるが、我々は、ダークマターハローの解析的バイアスモデル [12] を軸に、バイアスの非線形と重力進化を同時に取り入れたジーナス統計の解析的表式を導いた [19]。解析的表式に基づき、将来、スローンデジタルスカイサーベイから得られる銀河団分布に対し、ジーナス統計の予言を行い、バイアス、宇宙モデルの依存性についての考察を行った。

冷たい暗黒物質宇宙における非線形重力多体系の速度分布関数

赤方偏移で観測する天体の位置は、その天体の固有速度のために、実の位置からずれて見える（赤方偏移歪み）。強非線形領域において、赤方偏移歪みを取り込んだ 2 点相関関数の理論予言を行うためには、精度の良い相対特異速度統計が必要である。これまでは、アインシュタイン-ドジッター宇宙において、ハローの密度プロファイルに等温球を仮定するとい

う理想化された場合に速度分布関数が計算されてきた。今回我々は、現実的とされている冷たい暗黒物質宇宙において、最近のシミュレーションから示されている普遍密度プロファイルを用いて速度分布関数を計算し、それが準指数関数型をなすことを導いた。あわせて、速度分布関数と速度分散の宇宙モデル依存性とスケール依存性について調べた。[46, 59, 60]

赤方偏移空間における 2 点相関関数

観測的宇宙論における最も重要な対象のひとつ、銀河、クエーサーの相関関数を、非常に一般的な形で求めることに成功した。これまで求められていた形は空間の相対論的ゆがみや時間発展を無視しているか、あるいは観測領域を見込む角度が小さい極限などの、実際には必ずしも満たされるとは限らない近似の下に得られていたが、そのような制限を一切取り去り、一般相対論的ゲージ不変線形理論の枠内でまったく一般的な形を求めた [20]。さらに、近年注目を集めている弱重力レンズ効果を赤方偏移サーベイによる解析によって検出できるかどうかを調べた [22]。SDSS サーベイを例にとると、銀河の相関関数を用いることにより、 S/N が 10 で測定可能であるという注目すべき結果を示した。

ラスカンパナスサーベイの固有モード解析による宇宙論パラメータ

我々はジョンズホプキンス大学の共同研究者と共に、カーフネンルーベ変換に基づく銀河の赤方偏移データの固有モード解析のプロジェクトを進めているが、最近実際の観測データであるラスカンパナスサーベイを用いてこのプロジェクトの第一結果を得た [21]。比較的データの質が均一でなく、有効体積も小さいこのサーベイにありながら、この解析の有効性を大きく示す結果となった。特に、格段にデータの質の向上する SDSS サーベイへの応用に計り知れない可能性を強く示した。

弱重力レンズ場のトポロジー

近年急速に発展してきた宇宙論的弱重力レンズ場の解析法としては初めてトポロジーを用いる方法を調べた [23]。現在進行中の弱重力レンズの観測で、トポロジーの解析により宇宙論モデルを区別することが可能であること、また、現在提案中のより野心的な計画では、極めて有望な方法となることを示した。

銀河団の進化と X 線基準面

Fujita & Takahara (1999) は、銀河団高温ガスの温度 T 、中心密度 ρ_0 、コア半径 r_c によって張られる 3 次元のパラメータ空間 ($\log \rho_0, \log r_c, \log T$) に銀河

団の観測データをプロットすると、それが 1 平面上によく乗ることを見だし、この平面を X 線基準面 (X-ray fundamental plane) と名付けた。この X 線基準面が、標準的な構造形成シナリオによって再現できるかどうか、また、X 線基準面の物理的意味は何かという問題をシミュレーションによって調べることが、本研究の目的である。本年度は、そのための第 1 ステップとして、1 個の銀河団の ($\log \rho_0, \log r_c, \log T$) 空間における時間的な進化の様子を詳しく調べた。結果をまとめると (1) ρ_0, r_c, T は、現在に至るまで時々刻々その値を変化させた (一定値に落ち着く様子はみられなかった)。 (2) $z \sim 1$ 以降はほぼ観測されている X 線基準面に沿うように進化し、 $z = 0$ において X 線基準面の上に到達した。[62]

2 点相関関数の準自己相似的成長

宇宙における密度場の非線形段階での成長に関し、最もよく使われているモデルは、Davis & Peebles (1977) による self-similar evolution + stable clustering ansatz である。このモデルは、非線形性の強いスケールにおいて $\xi(x) \propto x^{-3(n+3)/(n+5)}$ を予言する。ここで、 $\xi(x)$ は 2 点相関関数、 n は初期の密度ゆらぎのポワースペクトルのべき指数 ($P(k) \propto k^n$) である。しかし、このモデルは $\Omega_0 = 1$ の宇宙にしか適用できない。そこで本研究では、このモデルを拡張し、 $\Omega_0 \neq 1$ の宇宙に適用できるようにすることを試みた。

そのために、quasi-self-similar evolution という考え方を導入した。これは、2 点相関関数の成長を短い時間ごとに区切り、それぞれの時間内での成長は近似的に self-similar になっているという仮定に基づく。さらに、物理的な動機に基づいた「ビリアル化条件」を導入し、この条件が満たされているスケールでは stable clustering が成り立つと仮定した。これらの仮定から、強非線形領域における 2 点相関関数のふるまいを予言することができる。この予言は、 $\Omega_0 < 1$ の宇宙において N 体シミュレーションの結果とよく一致することがわかった。[63]

質量密度非線形ゆらぎの確率分布関数

質量密度ゆらぎの確率分布関数は、重力多体系を特徴づける基本的な統計量である。しかしながら、宇宙初期に微小なガウス分布のゆらぎから出発した質量密度ゆらぎも、重力的発展をするにしたがって重力の非線形性、非局所性のために解析的理解が非常に困難となる。そこで我々は、高分解能 N 体シミュレーションを用いて、1 点の確率分布関数および 2 点の確率分布関数を調べた。その結果、1 点確率分布関数については対数正規分布関数でよく近似されることを、従来の研究よりも高非線形領域において確かめた。さらに、2 点確率分布関数に関しては、対数正規分布関数の考え方を応用した拡張を試み、これがシミュレーション結果をよく近似することを見出した [44]。さらに、これらの結果の宇宙初期密度

ゆらぎポワースペクトル依存性が大変弱く、統一的に対数正規分布関数を用いることができるという興味深い結果も得ている [58]。

大マゼラン星雲に於ける化学進化

化学進化モデルを使うことで、我々は具体的にどの程度銀河進化に関する情報を引き出せるのかを、大マゼラン星雲を例に検討した。結果として、化学進化モデルのパラメータを適当に選ぶことで、大マゼラン星雲のガスと星の質量比、化学組成史、星形成率、Ia 型と重力崩壊型の超新星残骸比等の観測値が無理なく説明出来ることが示された。又、 $[\text{Ti}/\text{Fe}]$ 比は、従来の超新星の元素合成計算の結果を使うと、観測よりも低めに出てしまうことが避けられず、太陽組成再現問題で言われているところの Ti 不足問題が大マゼラン星雲の化学進化問題でも顕著であることが確認された。[31]

5.1.3 超新星・高密度天体

重力崩壊型超新星に於けるジェット状爆発の効果

重力崩壊型超新星爆発のダイナミクスを検討している上では角運動量や磁場の効果を考慮することが重要であり、それらを考慮するとジェットの爆発を起こす可能性がある指摘されて久しいが、このようなジェット状爆発の元素合成や物質混合に対する影響を見積もり、具体的に観測と比較することはされていなかった。今回、我々は SN1987A を対象として、観測値と数値計算の結果の比較を行い、SN1987A は極方向と赤道方向で爆発の強さが約 2:1 である可能性が極めて高いことを結論づけた。更にジェット状爆発時に引き起こされる中性子星の固有運動や、r-process 元素合成の可能性についても議論を行なった。[26, 27, 28, 29, 32, 67, 68, 69, 70, 88]

超高エネルギー宇宙線の伝搬

超高エネルギー宇宙線の到来方向が一様分布しているように見える事実を、ボトムアップシナリオによって説明出来るか否かを、Monte Carlo 計算を用いて検証した。結論として、10nG 程度の銀河間磁場を仮定すれば deflection angle が 10 度角のオーダーにまで大きくなることを示した。現在の 100EeV 以上の宇宙線の観測数の少なさ (25 events) を考慮すれば、宇宙線の起源がたとえ超銀河平面付近に多数分布していても、観測と統計的に無矛盾であることも示された。超銀河平面との相関は、1000events 位の観測数が必要で、将来計画の TA、Auger、EUSO 計画により解明されるであろうという展望も示された。[54, 42]

超新星コアにおける非球状原子核

重力崩壊型超新星において、コアの流体力学的性質並びにニュートリノ透過率は、爆発のダイナミクスに影響を及ぼす重要な要素である。これらは、超新星コアを構成する高密度物質の性質やそこでの原子核の状態によって決まるものであり、その意味でも超新星内部物質の研究は欠かすことができない。特に、超新星コアは重力崩壊の結果、標準核密度近傍まで圧縮されるが、このような状況下では、円柱状や板状及びバブル状といった非球状の原子核 (“Nuclear Pasta” と呼ばれている) が現れ得ることが過去の研究結果からも期待されており、それ自体も興味深い対象となり得る。

超新星コアにおいては、中性カレントを介した原子核とのコヒーレント散乱によって、ニュートリノが一時的にトラップされ Fermi 縮退するということが起こり、その点が中性子星物質との大きな違いである。本研究では、温度ゼロの下 Fermi 縮退したニュートリノを考慮した上で、不定性の大きな高密度下での原子核の性質と “nuclear pasta” の各相の出現状況との関係を体系的に調べた。同時に、中性子星物質の場合と比較することによって、“nuclear pasta” に及ぼすニュートリノトラッピングの種々の効果を明らかにした。また、現実の有限温度の状況下での知見を得るために、円柱状、板状の原子核から成る相の秩序構造に対する熱揺らぎを見積もり、それらの構造の安定性を議論した。[25, 66, 87]

クォーク物質の超流動相

中性子星のコアにおいて、相対論的でありかつ縮退したクォーク物質が存在し、しかもそれがカラー超伝導状態にある可能性がある。そこで、一般化された Ginzburg-Landau 理論を強結合・超相対論的クォーク超流体に応用することにより、転移温度近傍における超流動相を調べた。カラー磁気相互作用を含むギャップ方程式を用いて、Ginzburg-Landau 自由エネルギーの弱結合極限を押えた。カラー間に化学ポテンシャルの差を導入することにより、カラー中性条件を Ginzburg-Landau 理論に取り入れた。オーダーパラメーターがカラー空間において異方的な場合、カラー中性条件下、カラー間に化学ポテンシャルの差が生じ、結果としてペアリングギャップが抑制されることがわかった。[24, 48, 64]

ブラックホール時空を運動する粒子に対する重力波放射反作用

近年建設がすすむ重力波の観測において、理論的な重力波の予想が重要と考えられている。そうしたなか、粒子に働く重力波放射反作用力の導出が、残された問題とされている。ここではブラックホール摂動を使った反作用力の導出を考えた。重力波の理論的計算について、粒子の運動を完全に記述する方程式について、これまでの結果から、時空の摂動を

行うときのゲージが重要であることが分かった。これについて、当初特殊関数を使った系統的な計算可能性について検討したが、困難があることが分かった。そこで、もっと簡単な多項式による展開を考えたところ、展開の最低次において成功を収めた。この結果は、多項式による系統的な高次の展開が可能であることを示している。[55]

重力波観測における、データ解析プログラムの作成

重力波観測は、これまでのどの素粒子実験ともタイプが異なる実験である。特に長時間の観測データをフィルターしなければいけないところで、膨大な計算を要するものである。

現在ある解析手法において、観測ノイズにおいて非常に単純な仮定をおくが、それを拡張する方法について考察を行ない、それに基いたプログラムの開発を行った。

超新星ニュートリノにおけるニュートリノ振動

現実的な超新星ニュートリノフラックス、密津分布モデルのもとで、三世代ニュートリノ振動による conversion probability の変化、および銀河中心付近に超新星爆発を仮定した場合の地球上での観測結果を数値計算した。さらに、SuperKamioKande と SNO での観測結果の比較により、ニュートリノ振動の解を一部見分けることが可能であることを示した。[43, 77, 78]

超新星ニュートリノにおける地球効果

超新星からのニュートリノが地球内部で起こすニュートリノ振動について解析した。太陽ニュートリノ問題の解が LMA であるなら、地球の効果を見ることにより、 θ_{13} の値の大小を見積もることができることがわかった。[30] [73] [74]

銀河団内宇宙線とガンマ線

地球に降り注ぐ宇宙線の大部分は我々の銀河で作られている。同位体の観測より、銀河内に $\sim 10^7$ 年滞在した後、銀河外に流出していると考えられている。これら宇宙線は荷電粒子であるため、銀河内の磁場によりこのような “閉じこめ” が起こっていると考えられている。

銀河から流出した宇宙線が次に閉じこめられる可能性があるのは、強い磁場と磁場の乱れの存在する銀河団である。銀河団内の伝播モデルを調べること、銀河団内に存在する宇宙線の様子を調べた。モデルを立てるに当たって、銀河団の形成史、つまり小さな銀河団があつまって大きな銀河団が形成されていく過程の効果、および星形成史を考慮に入れた

[71, 72].

銀河団の中にある宇宙線は直接検出することができないので、宇宙線粒子が銀河団ガスと衝突することにより生成される π^0 を起源とするガンマ線が検出可能かどうかを調べた。また、そのガンマ線を積分することで、銀河団が宇宙ガンマ線背景にどの程度影響を与えるかも調べた。その結果、近傍の銀河団からのガンマ線は、EGRET では検出不可能であること (このことは EGRET がそのようなガンマ線を検出しなかったという実験事実と一致する)、そして GLAST であれば検出できる可能性があることを示した。またガンマ線背景に関しては EGRET が検出したフラックスの 10^{-5} 以下の寄与しかないことも示した。

5.1.4 その他

山田章一助手が 2000 年 8 月 16 日付で、大阪大学核物理センター助教授に、松原隆彦助手が、2000 年 9 月 16 日付で、名古屋大学物理学教室助教授に、杉之原立史助手が、2001 年 4 月 1 日付で、小樽商科大学商学部助教授に、それぞれ転出した。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] T. Shiromizu and M. Shibata, *Phys. Rev.* **D62**,127502(2000).
- [2] A. Chamblin, H. S. Reall, H. Shinkai and T. Shiromizu, *Phys. Rev.* **D63**, 064015(2001).
- [3] T. Shiromizu and D. Ida, hep-th/0102035, accepted for *Phys. Rev. D*
- [4] H. Ochiai, K. Sato: Dynamical Properties of Euclidean Solutions in a Multidimensional Cosmological Model, *Progress of Theoretical Physics* **103** (2000) 893.
- [5] H. Ochiai, K. Sato: Numerical Analysis of the Wave Function of the Multidimensional Universe, *Progress of Theoretical Physics* **104** (2000) 483.
- [6] H. Ochiai, K. Sato: Vacuum Brane and the bulk dynamics in dilatonic brane world, *Phys. Lett.* **B503** (2001) 404.
- [7] Toshiyuki Kanazawa, M. Kawasaki and T. Yanagida: Double inflation in supergravity and the primordial black hole formation, *Phys. Lett.* **B482**, 174 (2000).
- [8] Yasushi Suto, Kazuhiro Yamamoto, Tetsu Kitayama, and Y.P.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 (astro-ph/9907105).
- [9] Takashi Hamana, Stephane Colombi, and Yasushi Suto: Two-point correlation functions on the light cone: testing theoretical predictions against N-body simulations; *Astronomy and Astrophysics* **367**(2001) 18-26 (astro-ph/0010287).
- [10] Ichi Tanaka, Toru Yamada, Edwin L. Turner and Yasushi Suto: Superclustering of Faint Galaxies in the Field of a QSO Concentration at $z \sim 1.1$; *The Astrophysical Journal* **547**(2001)521-530(astro-ph/0009229).
- [11] Kohji Yoshikawa, Y.P. Jing, and Yasushi Suto: Cosmological SPH simulations with four million particles: statistical properties of X-ray clusters in a low-density universe; *The Astrophysical Journal* **535**(2000)593-601 (astro-ph/0001076).
- [12] Atsushi Taruya and Yasushi Suto: Nonlinear stochastic biasing from the formation epoch distribution of dark halos; *The Astrophysical Journal* **542**(2000)559-577 (astro-ph/0004288).
- [13] Kohji Yoshikawa, Atsushi Taruya, Y.P. Jing, and Yasushi Suto: Nonlinear Stochastic Biasing of Galaxies and Dark Halos in Cosmological Hydrodynamic Simulations; *The Astrophysical Journal* **558** (2001) September 1 issue, in press (astro-ph/0104361).
- [14] Atsushi Taruya, Hiromitsu Magira, Y.P. Jing, and Yasushi Suto: Nonlinear Stochastic Biasing of Peaks and Halos: Scale-Dependence, Time-Evolution, and Redshift-Space Distortion from Cosmological N-body Simulations; *Publications of the Astronomical Society of Japan* **53** No.2, (2001) 155-167 (astro-ph/0012511).
- [15] Eiichiro Komatsu, Hiroshi Matsuo, Tetsu Kitayama, Makoto Hattori, Ryohei Kawabe, Kotaro Kohno, Nario Kuno, Sabine Schindler, Yasushi Suto, and Kohji Yoshikawa: Substructures Revealed by the Sunyaev-Zel'dovich Effect at 150GHz in the High Resolution Map of RX J1347-1145; *Publications of the Astronomical Society of Japan* **53**(2001) 57-62 (astro-ph/0006293).
- [16] Atsushi Taruya: Stochastic Biasing and Weakly Nonlinear Evolution of Power Spectrum; *The Astrophysical Journal* **537**(2000) 37-49 (astro-ph/9909124).
- [17] Atsushi Taruya, and Jiro Soda: The Spherical Infall Model in a Cosmological Background Density Field; *Monthly Notice of the Royal Astronomical Society* **317**(2000) 873-879 (astro-ph/9911116).
- [18] Atsushi Taruya, and Kazuhiro Yamamoto: Isodensity Statistics on Clustering of High-z Objects in Cosmological Redshift Spaces; *The Astrophysical Journal* **550**(2001) 528-546 (astro-ph/0011426).
- [19] Chiaki Hikage, Atsushi Taruya, and Yasushi Suto: Genus Statistics for Galaxy Clusters and Nonlinear Biasing of Dark Matter Halos; *The Astrophysical Journal* **556**(2001) August 1 issue, in press (astro-ph/0104013).

- [20] Takahiko Matsubara: The Correlation Function in Redshift Space: General Formula with Wide-angle Effects and Cosmological Distortions; *Astrophysical Journal*, **535** (2000), 1-23.
- [21] Takahiko Matsubara, Alexander S. Szalay, Stephan A. Landy: Cosmological Parameters from the Eigenmode Analysis of the Las Campanas Redshift Survey; *Astrophysical Journal Letters*, **535** (2000), L1-L4.
- [22] Takahiko Matsubara: The Gravitational Lensing in Redshift-Space Correlation Functions of Galaxies and Quasars; *Astrophysical Journal Letters*, **537** (2000), L77-L80.
- [23] Takahiko Matsubara, Bhuvnesh Jain: The Topology of Weak Lensing Fields; *Astrophysical Journal Letters*, **552** (2001), May 10 issue, in press.
- [24] Kei Iida and Gordon Baym: Superfluid phases of quark matter: Ginzburg-Landau theory and color neutrality, *Phys. Rev. D* **63** (2001) 074018.
- [25] G. Watanabe, K. Iida and K. Sato: Effects of neutrino trapping on thermodynamic properties of nuclear "pasta"; *Nuclear Physics A* **687** (2001) 512
- [26] Kazunori Kohri and Shigehiro Nagataki: Pulsar Kick and Asymmetric Iron Velocity Distribution in SN 1987; *Progress of Theoretical Physics*, **103** (2000) 713.
- [27] Shigehiro Nagataki: Neutrino-Driven Jets and Rapid-Process Nucleosynthesis; *The Astrophysical Journal*, **551** (2001) 429.
- [28] Shigehiro Nagataki and Katsuhiko Sato: Implications of the Discovery of Millisecond Pulsar in SN 1987A; *Progress of Theoretical Physics*, **105** (2001) 429.
- [29] Shigehiro Nagataki and Kazunori Kohri: Rapid-Process Nucleosynthesis in Neutrino-Magneto-Centrifugally Driven Winds; *Publications of the Astronomical Society of Japan* (2001), in press (astro-ph/0101347).
- [30] K.Takahashi, M.Watanabe and K.Sato: The Earth Effects on Supernova Neutrino Spectra, *astro-ph/0012354*, *Physics Letters B*, accepted.
- (会議抄録)
- [31] Shigehiro Nagataki: Chemical Evolution in the Large Magellanic Cloud, in the Proceedings of the 4th RESCEU International Symposium on "Birth and Evolution of the Universe", eds. K. Sato and M. Kawasaki (Universal Academy Press, Tokyo, 2001) p.385.
- [32] 長滝 重博: 重力崩壊型超新星に於けるジェット状爆発, 第12回理論天文学懇談会シンポジウム集録「すばる望遠鏡時代の理論天文学の展望」, 和田、犬塚、戸谷、千葉編集 (2000) p.146.
- [33] Toshiyuki Kanazawa, M. Kawasaki, Naoshi Sugiyama and T. Yanagida: Double Inflation in Supergravity and the Large Scale Structure; in the Proceedings of the 4th RESCEU international symposium "The Birth and Evolution of the Universe", eds. K. Sato and M. Kawasaki (Universal Academy Press, 2001).
- [34] Toshiyuki Kanazawa: Double inflation in supergravity and PBH formation: In the Proceedings of the Tenth Workshop on General Relativity and Gravitation, eds. M. Sasaki, J. Yokoyama, T. Nakamura and K. Tomita (Osaka University, 2000).
- (国内雑誌)
- [35] 樽家 篤史: 銀河分布から宇宙の進化を推測する～非線形・確率的バイアス～; *日本物理学会誌* **56** (2001) 169.
- [36] 佐藤勝彦, 深尾良夫: 次の宇宙像・地球像を求めて I, *科学 (岩波書店)* **71** 巻 3 号 (2001), pp.237-245
- [37] 佐藤勝彦, 深尾良夫: 次の宇宙像・地球像を求めて II, *科学 (岩波書店)* **71** 巻 4 号 (2001)
- [38] 佐藤勝彦: 素粒子物理が宇宙開闢の謎を解く、日本の科学者 (日本科学者会議) **36** 巻 1 号 (2001) pp.23-29
- [39] 佐藤勝彦: 宇宙における時間、*数理科学*, **39** 巻 1 号 (2001) pp.19-35
- [40] 佐藤勝彦: インフレーション理論を確かめた気球観測、*日経サイエンス*, 2001年4月号
- (学位論文)
- [41] 金澤 敏幸: Double inflation in supergravity and its observational implications (博士論文)
- [42] 井出喜徳: Propagation of UHERCRs in the inhomogeneous source model(修士論文)
- [43] 渡辺万里子: Effects of neutrino oscillation on the supernova neutrino spectrum(修士論文)
- [44] 加用一者: A Biasing Model for Cosmological Two-Point Statistics and the Probability Distribution Function of Nonlinear Mass Fluctuations (修士論文)
- [45] 日影千秋: Genus Statistics for Large-Scale Structure as a probe of Primordial Random-Gaussianity and Nonlinear Stochastic Biasing(修士論文)
- [46] 桑原健: Velocity Distribution Functions for Nonlinear Gravitating Many-body Systems in Cold Dark Matter Universes (2000) (修士論文)
- (国際会議)
- 一般講演
- [47] Toshiyuki Kanazawa: Double inflation in supergravity and PBH formation, The Tenth Workshop on General Relativity and Gravitation, Osaka University (2000, September).

- [48] Kei Iida and Gordon Baym: The superfluid phases of quark matter: Ginzburg-Landau theory and color neutrality, The Fifteenth International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions (QM 2001), Stony Brook, New York, January 15-17, 2001.
- [49] Atsushi Taruya: Nonlinear Stochastic Biasing From the Formation Epoch Distribution of Dark Halos, The 9th Marcel Grossman Meeting 2000, Rome (2000年7月9日).
- [50] Yasushi Suto: The universe traces by clusters, invited review at Institut d'Astrophysique de Paris 2000 conference on "Constructing the Universe with Clusters of Galaxies", Paris (2000年7月5日).
- [51] Yasushi Suto: Stable clustering solutions and the nonlinear stochastic biasing models for dark matter halos, invited talk at the workshop "Cosmology in the New Millennium", 上海天文台 (2000年10月19日)
- [52] Katsuhiko Sato: Inflationary Universe Model, Marcel Grossman Conf. Rome, (July, 2000)
- [53] Katsuhiko Sato: Neutrino Oscillation and Supernova Neutrino Burst, Physics Potential of Supernova II, UCLA (Feb., 2001)
- [54] Y. Ide, S. Nagataki, S. Tsubaki and K. Sato: Propagation of UHECRs in the Inhomogeneous Source Model, International Workshop: "Extremely High Energy Cosmic Rays - Experiments, Theories and Future direction -" Tokyo, March, 2001.
- [55] Yasushi Mino: Radiation Reaction Force on a Compact Body Spiraling into a Supermassive Black Hole AMALDI CONFERENCE (1999年7月12日から16日, Caltech, U S)
- (国内会議)
- 一般講演
- [56] 落合洋敬、佐藤勝彦: ディラトン重力理論におけるブレーン世界の宇宙論的解、日本物理学会年次大会 (新潟大学 2000年9月)
- [57] 金澤敏幸、川崎雅裕、柳田勉: 超重力理論での原始ブラックホール生成、日本物理学会 (新潟大学, 2000年9月).
- [58] 加用一者、樽家篤史、須藤靖: 質量密度ゆらぎの確率分布関数、日本天文学会 2001年春季年会 (千葉大、2001年3月)
- [59] 桑原健、樽家篤史、須藤靖: 銀河の特異速度統計と強非線形領域における2点相関関数、第13回天文学理論懇談会 (京都大学、2000年12月)
- [60] 桑原健、樽家篤史、須藤靖: ダークマターの特異速度統計とハローの密度プロファイル、日本天文学会春季年会 (千葉大学、2001年3月)
- [61] 杉之原立史: 銀河群のX線光度に対する超新星爆発による加熱の効果、日本天文学会 2000年春季年会 (東京大、2000年4月)
- [62] 杉之原立史、藤田裕、高原文郎: 3次元パラメータ空間における銀河団の進化とX線基準面、日本天文学会 2000年秋季年会 (群馬県総合教育センター、2000年10月)
- [63] 杉之原立史: 2点相関関数の準自己相似的成長、第13回理論天文学懇談会シンポジウム (京大基研、2000年12月)
- [64] 飯田圭、Gordon Baym: クォーク物質の超流動相: カラー中性の効果、日本物理学会第56回年会 (東京、2001年3月29日)
- [65] 佐藤勝彦: 超新星・中性子星の中の中性子過剰核、CNS研究会「RIBの物理」、理化学研究所、2000年8月24日
- [66] 渡辺元太郎、飯田圭、佐藤勝彦: 超新星コアにおける"Nuclear Pasta"の熱力学的性質に対するneutrino-trappingの効果、日本物理学会 2000年第55回年次大会 (新潟大学、2000)
- [67] 長滝重博: 磁気圧駆動型 r-process 元素合成、日本天文学会秋季年会 (群馬県総合教育センター、2000年10月)
- [68] Shigehiro Nagataki: Effects of Jetlike Explosion in Collapse-Driven Supernovae, 研究会「高エネルギー宇宙物理学の展望」(京大基研、2000年11月)
- [69] 長滝重博: Supernova Jets and Explosive Nucleosynthesis, 研究会「元素の起源と初期宇宙・銀河の進化」(上智大、2001年1月)
- [70] 長滝重博、佐藤勝彦: Implications of the Discovery of Millisecond Pulsar in SN 1987A, 日本天文学会春季年会 (千葉大、2001年3月)
- [71] 椿信也、北山哲、佐藤勝彦: 銀河団の進化と宇宙線起源のガンマ線、日本物理学会第55回年次大会 (新潟大学、2000年9月)
- [72] 椿信也、北山哲、佐藤勝彦: 銀河団の進化と銀河団内宇宙線による γ 線、日本天文学会 2000年秋季年会 (群馬県総合教育センター、2000年10月)
- [73] 高橋慶太郎、渡辺万里子、佐藤勝彦、戸谷友則: Effects of Neutrino Oscillation on the Supernova Neutrino Spectrum, 日本天文学会春期年会 (千葉大学、2001年3月)
- [74] 高橋慶太郎、渡辺万里子、佐藤勝彦: The Earth Effects on Supernova Neutrino Spectra, 日本物理学会第56回年次大会 (中央大学、2001年3月)
- [75] 日影千秋、樽家篤史、須藤靖: ハローのバイアスを考慮した銀河団のジェナス統計、日本天文学会秋期年会 (群馬県総合教育センター、2000年10月)
- [76] 日影千秋、樽家篤史、須藤靖: Predicting the Genus Statistics for Galaxy Clusters: Comparison with Hubble Volume Simulations, 日本天文学会春期年会 (千葉大学、2001年3月)
- [77] 渡辺万里子、戸谷友則、佐藤勝彦: 超新星ニュートリノとニュートリノ振動、日本物理学会年次大会 (新潟大学、2000年9月)
- [78] 渡辺万里子、戸谷友則、佐藤勝彦: 超新星ニュートリノと三世代ニュートリノ振動、日本天文学会春期年会 (千葉大学、2001年3月)

招待講演

- [79] 佐藤勝彦: 宇宙論とプランク定数、日本物理学会 プランク定数発見100周年シンポジウム、新潟 2000年9月
- [80] 佐藤勝彦: 宇宙線と宇宙初期、宇宙線国際プレシンポジウム、2000年10月14日
- [81] 須藤 靖: 21世紀の観測的宇宙論、日本物理学会 宇宙線分科シンポジウム “観測的宇宙論の進展と大型観測装置の役割” 於 新潟大学 (2000年9月24日)
- [82] Toshiyuki Kanazawa: Cosmological Implications of Recent CMB Observations, SENDAI PHENOMENOLOGY WORKSHOP: NEW DIRECTIONS TO UNIFIED THEORIES, Tohoku University (2000, October).

(セミナー)

- [83] 須藤 靖: ダークハローの非線形確率的バイアスモデル、京都大学物理学教室 談話会 (2001年2月22日) “
- [84] 佐藤勝彦: Neutrino Burst From supernova and Neutrino Oscillation, . Univ. of Canterbury, Christchurch, NZ, 7th, Dec. 2000
- [85] 杉之原立史: コンピュータの中の宇宙、青山学院大学物理学科コロキウム (2000年5月)
- [86] 杉之原立史: コンピュータの中の宇宙、東邦大学物理学科コロキウム (2000年7月)
- [87] 渡辺 元太郎: 高密度物質における Nuclear ”Pasta” の熱力学的性質、理化学研究所 計算科学技術推進室 セミナー (2000年8月)
- [88] 長滝 重博: Supernova Jets and Gamma-Ray Bursts、大阪大学レーザー核融合研究センター、核融合研セミナー (2001年2月6日)

6 一般物理実験

6.1 小林研究室

本研究室では、レーザーを用いた非線形光学、量子光学、量子エレクトロニクスを中心に、光物性物理学、分子物理学、光生物物理学にわたる幅広い研究を行っている。特に、超短パルスレーザーを用いてフェムト秒 (1 フェムト秒は 10^{-15} 秒)、ピコ秒 (1 ピコ秒は 10^{-12} 秒)、ナノ秒 (1 ナノ秒は 10^{-9} 秒) からマイクロ秒・ミリ秒に至る時間の流れに沿って凝縮系における非線形光学効果や動的物性の研究を行っている。研究対象としては、擬一次元系である共役高分子や分子会合体、混合原子価金属錯体を取り上げている。特にこれらの物質中の素励起 (ワニア励起子、フレンケル励起子、電荷移動励起子、ソリトン、ポーラロン、バイポーラロン等) による超高速非線形光学過程を解明している。また、非線形分光、非線形光学過程や量子光学・量子情報の基礎的な問題 (微小共振器、量子テレポーテーション等) に関する研究も行っている。

6.1.1 サブ 5 fs 実時間分光

共役高分子

ポリアセチレンやポリジアセチレンなどの共役高分子は、その π 電子共役が一次元主鎖方向に局在化して広がっている。その低い次元性のために、高速応答と大きな非線形性を示し、将来の超高速巨大非線形光学材料として注目されている物質である。

ポリアセチレンは、CH の単位が一次元状に並び最も簡単な化学構造式を持ち、一次元電子系のモデル物質としても最適である。その光励起直後のソリトン形成に関与する一連の動力学的理解が、実験の目的である。

サブ 5fs パルスを光源としたポンプ・プローブ分光法 (プローブ波長 600 nm) を用いて得られた透過率変化の時間依存性をフーリエ変換すると、 1070 cm^{-1} 及び 1460 cm^{-1} に 2 つのピークが現れた。これらはそれぞれ炭素原子の一重及び二重結合の伸縮振動によるものである。さらに、データ区間を 128 fs ごとに区切ってフーリエ変換を行ったところ、励起直後においては、上記の 2 つのピークが周波数的に広がり、かつピーク位置がお互いに離れるようにシフトしていることがわかった。また、 400 cm^{-1} 付近に非常に寿命の短いモードが存在することもわかった。さらに、スペクトログラム解析を行った結果、 1460 cm^{-1} の周波数幅が時間とともに狭くなっていく様子がわ

かった。これらの実験結果に対する考察を以下に述べる。

光励起が起こると、 π - π^* バンド間遷移によりまず同一主鎖上に電子・正孔対が作られる。しかしそれは不安定であり、素早く周辺の格子歪みを引き起こし、エネルギー的に安定な正・負の荷電ソリトン対へと緩和する。実験では、励起直後においては、炭素結合の振動数が広がっていたが、それは、格子歪みによって、炭素原子同士の結合の次数が分布を持ちかつ連続的に変化するので、振動数が広い分布を持っていることが原因と考えられる。その後、荷電ソリトン対へと緩和していくにつれ、周波数は炭素原子の一重及び二重結合の伸縮振動へと定まっていくため、周波数幅が狭くなっていくということで、実験結果を説明することができる。その時間スケールは 200 fs 程度であるが、これは 400 cm^{-1} の振動の寿命にほぼ一致しており、これは荷電ソリトン対の初期形成過程における結合状態としてのブリーザによるものであるという理論家の予想を裏付けている。この実験は、ポリアセチレンの光励起直後においてブリーザが形成され、それが荷電ソリトン対へと緩和していく様子をはじめて実時間的に観測したものである。

分子振動動力学

高分子にドープした有機色素分子の系として、クレジルバイオレット (cresyl violet) 分子 (以下 CV と略す) をポリビニルアルコールにドープしたものを用いた。この試料はラマン散乱の実験において、 590 cm^{-1} に ring-breathing mode の振動モードが 1 つあることが知られており、非常に単純な系である。この振動モードの実時間変化を調べるのが、この実験の目的である。

実験はサブ 5fs パルスを光源としたポンプ・プローブ分光法を用いた。測定された透過率が、増加した後に振動する様子が明瞭に観測された。この振動の周期はほぼ 60 fs である。これは、CV 分子が持つ、ring-breathing mode の 590 cm^{-1} と対応している。この振動波形についてスペクトログラム解析を行った結果、 590 cm^{-1} の振動モードの振幅と周波数が共に 400 fs の周期で変調を受けていることがわかった。これは ring-breathing mode と、それ以外の周期 400 fs のモード (91 cm^{-1}) とが結合していることが原因であると考えた。その振幅変調と周波数変調の大きさとその位相関係から、ring-breathing mode と、 91 cm^{-1} のモードの位置座標を規準座標とした 2 次元ポテンシャルを計算した。そして、この 2 つのモードの結合は、ダシンスキー回転によって説明できるものであることがわかった。実時間分光によって、ダシンスキー回転を観測したのははじめてのことである。

アゾベンゼン及びその誘導体は、trans-cis 光異性化を起こす典型的な分子として知られ、光駆動スイッチや記憶素子としての応用が期待されている。アゾベンゼンの吸収スペクトルは近紫外と可視領域に 2 つのピークを持つ。中心波長 440 nm のピークは n -

π^* 遷移、320 nm のピークは π - π^* 遷移に由来する。 n - π^* 遷移は対称性により禁制で、 π - π^* 遷移より弱い。アゾベンゼンの光異性化の機構は励起波長によって異なると考えられており、trans-アゾベンゼンの S_1 (n - π^* 遷移) 状態を励起した場合、アゾ基の片方の N 原子を中心とした平面内の反転によって異性化し、 S_2 (π - π^* 遷移) 状態を励起した場合、N=N 二重結合の周りの回転によって異性化するというモデルが提唱されている。一方、ピコ秒時間分解ラマンスペクトルの結果から、 S_2 励起の場合も S_1 励起の場合と同様に反転機構による異性化が起こると主張する研究グループもある。このような光異性化のメカニズムについて究明するのが、本研究の目的である。今回の実験に用いた試料は、アゾベンゼンの誘導体のひとつ、4-(ジメチルアミノ)アゾベンゼン (4-(Dimethylamino)azobenzene; DMAAB) のジメチルスルホキシド (Dimethyl sulfoxide; DMSO) 溶液である。DMAAB は、アゾベンゼンの片方のフェニル基の *para*-位が $(\text{CH}_3)_2\text{N}$ -で置換された構造を持つ。この電子供与基の寄与及び極性溶媒 DMSO との相互作用により、アゾ基の π - π^* 遷移による吸収が低エネルギー側 (極大 420 nm) にシフトしている。測定はポンプ・プローブ分光法を用いた。光源にはサブ 5fs パルスを用いており、アゾ基の π - π^* 遷移のやや低エネルギー側を励起している。また励起光に正チャープ及び負チャープの 2 種類のチャープパルスを用いてそれぞれ励起状態と基底状態の振動状態を選択的に励起している。透過率変化の振動成分のフーリエ変換をみると、1140 cm^{-1} 付近のピークの振動成分は C-N 伸縮振動、1410 cm^{-1} 付近のピークの振動成分はアゾ基の N=N 伸縮振動に由来する。この 2 つの振動モードに関してバンドパスフィルタとスペクトログラム解析によって振動周波数の遅延時間依存性について解析を行った。正チャープパルスによって π - π^* 遷移を選択的に励起した場合において、2 つの分子振動モードの振動周波数が、約 400 fs の周期で周波数変調を受けていることがわかった。また、この変調が逆相の関係になっていることもわかった。負チャープパルスによって基底状態の振動準位を励起した場合は周波数変調に特定の位相関係は見られなかった。これは光異性化の途中において、振動モード間のカップリングが起こっていることを表している。また N=N 伸縮振動が、遅延時間によらず基底状態とほぼ同じ振動周波数をもつことから、trans-DMAAB のアゾ基-N=N-が二重結合性を保ったまま C-N 結合の反転機構により光異性化していることが結論される。

J 会合体

ポルフィリン誘導体により構成された分子会合体は、光合成アンテナクロロフィルのモデルとして非常に注目が集まっている系である。分子 J 会合体中の素励起は、分子間の双極子・双極子相互作用による非局在化の結果、フレンケル励起子を構成すると考えられている。本研究では、ポルフィリン J 会合体を 3 準位フレンケル励起子系 (S_2 , S_1 励起子) のモデルとして考え、サブ 5fs パルスを用いて、会

体中励起子の非線型光学応答を研究した。スペクトル幅 250 nm のレーザースペクトルは、ポルフィリン J 会合体の最低励起一重項状態 (Q バンド) を完全におおっており、Q バンド共鳴励起が可能である。試料には J 会合体の配向膜を用いた。プローブ光波長 1.78 eV (697 nm) 以下では褪色が、1.78 eV 以上では誘導吸収が見られた。この誘導吸収は、多励起子状態への遷移によるもの ($|n+1\rangle \leftarrow |n\rangle$ ($n > 0$)) であり、パウリの排他律により 1 励起子状態への遷移 ($|1\rangle \leftarrow |0\rangle$) より高エネルギー側に存在する。J バンド付近のプローブ波長において振動が明瞭に観測された。これはラマンスペクトルと比較した結果、ポルフィリン分子が波打つ 247 cm^{-1} のラフリング・モードと同定された。このモードは、会合により 30 倍程度増強することが Akins らにより報告されており、会合体に特有の性質であることがわかっている。このコヒーレントな振動は、褪色と誘導吸収のどちらにも見られており、信号強度は褪色・誘導吸収各々において同位相で増減していた。すなわち、褪色の信号強度が増加 (減少) したときには、誘導吸収も同位相で増加 (減少) していた。また、Q バンドを十分おおおうスペクトル領域で信号を積分した結果、積分強度もやはり 247 cm^{-1} で振動していた。従来の波束理論では、スペクトル積分した結果は全体の分布数を反映するため、振動は消滅することが期待されたが、実験結果はむしろ、遷移の振動子強度そのものが変調されていると解釈できるものであった。そこで、吸光度変化における振動の起源が、ラフリング・モードを介した、B バンド (第二励起状態) から Q バンドへのインテンシティ・ボローイング (IB) による、Q バンドの双極子能率の変調によるものと解釈することで、実験結果を説明できると考えた。吸光度変化における振動の振幅の大きさから、Q バンドの双極子モーメントは 3% 変化しているの見積もった。この値と、振電相互作用の摂動による双極子能率の表式から、Q 励起子は B 励起子から 2% の振動子強度の貸し借りをしていると結論した。

元来 S_1 吸収帯 (Q バンド) は、配置間相互作用・振電相互作用により S_2 吸収帯 (B バンド) から振動子強度を借りているが、本報告で動的な IB として見られたような、実時間上での変調としての観測は、本研究で初めて提唱されたものであり、新しいコヒーレント・フォノンの発生による電子遷移強度の変調機構である。

擬一次元ハロゲン架橋金属錯体

擬一次元ハロゲン架橋金属錯体のサブ 5fs 実時間分解吸収分光を研究した。擬一次元ハロゲン架橋金属錯体は金属イオンとハロゲンイオンとが交互に配列している擬一次元物質であり、光励起により励起子を生成することが知られている。また、電子格子相互作用が大きいために、電子基底状態と電子励起状態との間で大きく構造が変化することが知られている。このことは励起子の自己束縛化という現象にもっとも特徴的に表れている。しかしながら、従来の研究では自己束縛化の機構については理論、実験の両面よりある程度明らかにされてきたものの実時間的に検証した研

究はほとんどない。そこで本研究では5 fsという高い時間分解能の光源を利用してこの問題に取り組むことにした。実験は $[\text{Pt}(\text{en})_2][\text{Pt}(\text{en})_2\text{I}_2](\text{ClO}_4)_4(\text{Pt-I})$ の単結晶を用い、反射型のポンプ・プローブ分光法で行った。2.00 eVにおける反射率の時間変化をみると、ゆっくりと変化する低周波成分は、時定数140 fsで立ち上がり、時定数1400 fsで減少する様子がわかる。この信号変化はサブピコ秒領域の時間分解吸収分光および発光分光の実験結果と比較すると、自己束縛励起子の緩和過程に起因する信号であると考えられる。さらに反射率変化にはコヒーレントに生成された波束の運動を反映した信号が観測され、信号の振幅は振動しながら減衰している。この減衰振動の成分を抽出し、フーリエ変換すると、2本のピークが観測され、それぞれ 107 cm^{-1} と 124 cm^{-1} である。自然放出ラマン散乱スペクトルより、 123 cm^{-1} にヨウ素イオンの対称伸縮振動モードが観測されていることから、これらの減衰振動成分はヨウ素イオンの運動に起因するものと考えられる。このうち 124 cm^{-1} に観測された振動成分は振動周期が、270 fs、減衰時定数が1100 fsと決定されたが、観測するプローブ光のエネルギーにほとんど依存しない。この成分は基底状態のポテンシャル面上に生成された波束に起因する反射率変化であると同定された。一方、 107 cm^{-1} (振動周期が310 fsに相当) の減衰振動周波数は観測エネルギーに依存しないものの、減衰時定数は260~700 fsで観測エネルギーに大きく依存する。この振動波束は励起状態、すなわち自己束縛励起子状態中に生成された波束の運動に起因するものと考えられる。また、この自己束縛励起子による波束の運動に関しては振動の開始が光励起された時間原点から約50 fsほど遅れていることが分かった。この遅れ時間の原因として考えられる理由は、光励起によって生成された自由励起子が、自己束縛励起子へと格子緩和するまでに有限の時間を要したということである。

6.1.2 新しい分光装置の開発

広帯域マルチブレックス非線型感受率スペクトル測定法の開発

広帯域マルチブレックス非線型感受率スペクトル測定法の様々な問題点の解決および精度の向上に着手した。本測定法で基本波として使用する近赤外パラメトリック増幅器からの出力パルスは、広帯域な波長領域を持っているので、測定した縮退の感受率の結果に非縮退の感受率が混じっているのではないかという問題点が生じていた。非縮退の成分が信号としてあらわれるのは、測定試料のコヒーレント長内に非縮退に寄与する3つの波長が存在するときである。測定試料のコヒーレント長を計算したところ、膜厚がそのコヒーレント長より短いので、その膜厚内に非縮退に寄与する3つの波長が存在しなければ、非縮退の寄与はないと考えることができる。本測定系の基本波のチャープ量を、近赤外パラメトリック増幅器の励起光パルスとして用いている800 nm、160 fsパルスとの相互相関を測定することによって調べた。

これより、基本波のチャープ量は波長100 nm差で約240 fsと見積もることが出来る。一方測定試料の膜厚は現在使用している試料で最大15 μm なので、50 fsずれて通過する波長の光は相互作用しないと考えられる。これより現段階では、21 nm以内の波長しか相互作用しないと考えることができ、この測定法の分解能は21 nmと行うことができる。

参照試料として測定した高屈折率ガラス (FDS9) のTHGスペクトルにフリンジ項が見えた、この構造は位相整合条件の影響によってでてくるものであり、非線型感受率を求める際に考慮した。また、ポリジアセチレンについてもTHGスペクトルを測定したが、それにはフリンジが見えなかった。これは試料の膜厚がコヒーレント長よりかなり薄いためである。

また基本波を発生させる際にどうしても角度分散ができてしまうという問題がある。それにより試料に集光し入射する際、波長毎に焦点が異なってしまい、試料の置く位置を0.2~0.3 mm変えるだけで、数%の誤差となることを明らかにした。それが原因で、この方法ではスペクトルの形を正確に決定できる段階までは至っていないことがわかった。しかしながら既存の測定法と比較して、ピーク位置はより正確に求めることが出来ると思われ、測定時間も短縮できることを合わせると、現段階でも既存の測定法よりは優れていると行うことが出来る。

中赤外吸収分光測定装置の製作

中赤外吸収分光測定装置の開発を行った。中赤外光の発生にはチタンサファイア再生増幅装置からの光パルスの2段階の光パラメトリック過程を応用したダウンコンバージョン(下方転換)法を用いた。すなわち、第1の光パラメトリック過程ではチタンサファイアレーザーからの基本波光(0.775 μm)を1.4 μm の信号光と1.8 μm のアイドラー光に分ける。続いて第2の光パラメトリック過程により信号光とアイドラー光の差周波光を発生させる。差周波光の波長は5~10 μm の間で波長可変であり、スペクトルの半値全幅はおおよそ50~100 cm^{-1} である。今年度は昨年に引き続き、対象とする物質を第1の可視光で光励起して電子励起状態を作り、第2の中赤外光を照射することで過渡的な透過率の変化を検出するという配置で行った。装置の時間分解能は約400 fsである。有機一次元系への応用としてポリジアセチレン誘導体への超高速分光を研究した。ポリジアセチレンは従来の可視光領域の分光より超高速な光応答性を示すことが知られている。この速い光応答性は強い電子格子相互作用によるものであると考えられている。本研究では励起状態での振動モードに関する情報を実時間的に観測することで、この高速反応の機構について従来よりも詳細な知見を得ることを目的とする。ポリジアセチレンの場合、炭素分子間の一重結合(C-C)、二重結合(C=C)、三重結合(C≡C)の伸縮振動モードが特に電子格子相互作用が強いモードであることが知られており、これらが超高速光応答性と密接な関係があると考えられている。本年度は一重結合モー

ドの観測されると期待される 1200 cm^{-1} 付近の過渡吸収スペクトルの測定を試みた。試料はポリジアセチレン誘導体 (poly [5,7-dodecadiyne-1,12-diol bis [n-butoxycarbonyl] methyl] urethane) の赤相の粉末を CaF_2 基板上でスピコート膜にしたものである。光励起にはチタンサファイア再生増幅器からの出力光の第二高調波光を用い、光子エネルギーは 3.2 eV である。 1200 cm^{-1} にピークを持つ吸収帯は炭素原子間の一重結合 (C-C) による伸縮振動モードによるものであると考えられる。光励起後 1 ps 後の吸収スペクトルをみると、今回観測したすべての周波数領域で見られる広帯域な信号成分の他、 1200 cm^{-1} よりも低周波数側では負、高周波数側では正となる信号も観測された。この信号の負の部分は電子励起により基底状態に関する吸収スペクトルが褪色しており、正の部分は新たに励起状態による吸収が現れたことを反映した結果であると考えられる。つまり、C-C モードは基底状態と比較して励起状態では高エネルギー側に存在するというを意味する。この結果より基底状態と比較して、励起状態中では電子波動関数の広がりが大きくなっており、非同在性が大きくなったことを示していると思われる。

吸収発光像測定可能な近接場顕微鏡の開発

これまでの近接場光学顕微鏡 (NSOM) を用いた分光では発光分光が主に行われてきた。しかしながら、発光効率の小さい試料や正確な電子励起状態を調べる上で顕微吸収分光システムの開発が必要とされていた。そこで、NSOM を用いた吸収分光システムを開発し、シアニン色素 J 会合体とポリジアセチレン微結晶にこれを適用した。白色光源から発生した光を光ファイバプローブに結合させ、試料の直径数十ナノメートル程度の空間領域だけを照射する。対物レンズで集光された透過光を分光器にて波長分解し、マルチチャンネル検出器にて検出し、透過光スペクトルを測定する。試料が無い状態の透過光スペクトルを参照スペクトルとして試料の微小領域の吸収スペクトルが一点あたり $200\sim 500\text{ msec}$ で測定される。このことにより走査範囲全点で吸収スペクトルが現実的な時間で測定される。開口径 20 nm の光ファイバプローブを用い温度 10 K にてシアニン色素 J 会合体の近接場吸収像を測定した。また、J 会合体が起源である吸収ピークの積分強度を各測定点の吸収スペクトルから計算し描写した。これより、平行な線状の構造があることがわかった。いくつかの点における吸収スペクトルを比較すると、吸収ピークの位置が互いに違っていくことがわかった。また、直径 70 nm のポリジアセチレン微結晶の吸収スペクトルを測定し、 647 nm の吸収ピークの積分強度から描かれた吸収像をみると、2 個の微結晶を観測するのに成功していることがわかった。ポリジアセチレン微結晶の発光効率は著しく小さいため、吸収スペクトルを測定することでその顕微分光が可能となった。今後、本システムを用いて、シアニン色素 J 会合体、ポリジアセチレン微結晶の詳細な特性を明らかにしていく。

6.1.3 量子光学・量子情報

フェムト秒パルスの評価方法の開発

パルス幅の測定法としては通常自己相関法と呼ばれる手法が用いられる。しかしこれだけではパルス電場の強度、位相を完全に知ることは不可能である。近年超高速光物性の分野が盛んになり、非常に短いパルス幅のレーザーが使われるようになった。そして、光パルスの電場の強度のみでなく、位相の時間変化も物性測定に影響を及ぼすようになってきた。よって、物性測定で用いるレーザーパルスの強度だけでなく、位相もできるだけ正確に知ることが必要である。そこで最近では超短パルスの評価方法として FROG (Frequency Resolved Optical Gating) 法という方法がよく用いられている。この手法は自己相関の信号をさらに波長分解して測定することによって、各時間ごとのスペクトルと同等の情報を得ることにより、パルスの強度と位相の両方の情報を同時に得ることができる。この方法はもっぱらパルス評価として使われているが、この研究ではこれを分光に応用することを目的とした。通常のポンプ・プローブ法などでは、電場の時間積分した強度のみを測定することがほとんどであった。FROG 法を分光に応用することによって、電場の強度だけでなく、位相の情報も知ることになり、より詳細な物性を調べることが可能である。ここで用いた方法は FROG 法への応用であるところの XFROG (cross-correlation-based FROG) 法である。この方法は、試料の透過光パルスと入射光パルスとの相互相関信号を波長分解するというものである。この方法によって、試料を透過後のパルス電場の時間変化を測定することができる。希少元素の一種であるネオジウムを添加したガラスを透過したレーザーパルスに対して XFROG 法により測定を行って得られたデータからパルスの前の部分と後ろの部分で、位相が反転し、傾きが変わっていることがわかった。傾きが変化しているということは中心周波数が変化しているということを意味する。後ろ部分の中心周波数と試料の吸収ピークの周波数が一致したことから、これは、入力パルスによって発生した分極から放射される電場であることがわかった。これは、自由誘導減衰とよばれる信号である。このように、XFROG 法を用いてフェムト秒パルスに対する物質の応答を測定することができた。この方法を非線型現象の測定にまで応用することができれば、今まで得られなかった位相の非線型な時間変化の情報を得ることができるようになる。

量子テレポーテーション

1998 年において、コヒーレント状態の量子テレポーテーションが行われた。将来の通信技術への応用を考えた場合、1 光子状態を転送することが可能になれば興味深い。最近、量子テレポーテーションの理論的記述も発展し、トランスファーオペレータの方法により連続量子テレポーテーションの全過程が光子数状態を基底にして記述できるようになった。その方法を非古典的な光の状態である 1 光子状

態に適応し、その状態が受け手のところでどのような変化を受けるか解析した。

さらに、スクイズド光による量子テレポーテーションの実験も計画しており、測定系や実験系の安定化に必要な、量子雑音を検出する光検出器の製作と、光パラメトリック共振器の設計と製作を行った。

<受賞>

- [1] Takayoshi Kobayashi, 2000. Fellow, Optical Society of America.

<報文>

(原著論文)

- [2] T. Fuji, T. Saito, and T. Kobayashi. Dynamic Duschinsky rotation of a molecule revealed by sub-5-fs real-time spectroscopy. *Chem. Phys. Lett.*, Vol. 332, pp. 324–330, 2000.
- [3] H. Kano and T. Kobayashi. Time-resolved fluorescence spectroscopy of porphyrin J-aggregates using optical Kerr gate methods. *J. Chin. Chem. Soc.*, Vol. 47, pp. 859–861, 2000.
- [4] K. Misawa and T. Kobayashi. Wave-pocket dynamics in a cyanine dye molecule excited with femtosecond chirped pulses. *J. Chem. Phys.*, Vol. 113, pp. 7546–7553, 2000.
- [5] H. F. Hofmann, T. Ide, T. Kobayashi, and A. Furusawa. Fidelity and information in the quantum teleportation of continuous variables. *Phys. Rev. A*, Vol. 62, , 2000. 062304.
- [6] H. Kano and T. Kobayashi. Simultaneous measurement of real and imaginary parts of nonlinear susceptibility for the verification of the Kramers-Kronig relations in femtosecond spectroscopy. *Opt. Comm.*, Vol. 178, pp. 133–139, 2000.
- [7] H. F. Hofmann, T. Kobayashi, and A. Furusawa. Nonclassical correlation of photon number and field components in the vacuum state. *Phys. Rev. A*, Vol. 62, p. 013806, 2000.
- [8] T. Kobayashi and A. Shirakawa. Tunable visible and near-infrared pulse generation in a 5 fs regime. *Appl. Phys. B*, Vol. 70, pp. S239–S246, 2000.
- [9] T. Kobayashi and A. Shirakawa. Sub-10-fs tunable pulses in visible and NIR and visible sub-5-fs pulses generated by noncollinear OPA. *J. Luminescence*, Vol. 87–89, pp. 119–120, 2000.
- [10] B. C. Chin, K. Misawa, T. Masuda, and T. Kobayashi. Large static dipole moment in substituted polyacetylenes obtained by electroabsorption. *Chem. Phys. Lett.*, Vol. 318, pp. 499–504, 2000.
- [11] T. Fuji, T. Saito, and T. Kobayashi. Sub-5-fs study of self-induced phase and amplitude modulations of molecular vibration. In *Quantum Electronics and Laser Science Conference, Technical Digest*, p. 220, 2000.
- [12] H. Kano, T. Saito, and T. Kobayashi. Phase jump in the wavelength dependence of coherent vibration in porphyrin j-aggregates by sub-5-fs spectroscopy. In *Quantum Electronics and Laser Science Conference, Technical Digest*, p. 221, 2000.
- [13] T. Kobayashi, H. Kano, and K. Misawa. Spectral fringes in difference phase and transmission spectra using a femtosecond Sagnac interferometer. In *Quantum Electronics and Laser Science Conference, Technical Digest*, p. 124, 2000.
- [14] T. Kobayashi. Ultrafast relaxations in one-dimensional systems: π -conjugated polymers, J-aggregates, and metal-halogen chain complexes. In T. Kamiya, F. Saito, O. Wada, and H. Yajima, editors, *Femtosecond Technology*, pp. 350–363. Springer, 2000.
- [15] T. Kobayashi, A. Shirakawa, H. Matsuzawa, and H. Nakanishi. Real-time vibrational mode-coupling associated with ultrafast geometrical relaxation in a polydiacetylene induced by sub-5-fs pulses. *Chem. Phys. Lett.*, Vol. 321, pp. 385–393, 2000.
- [16] Z.-Y. Deng, X. Chen, T. Ohji, and T. Kobayashi. Subband structures, exciton and impurity states in V-shaped GaAs-Ga_{1-x}Al_xAs quantum wires. *Phys. Rev. B*, Vol. 61, pp. 15905–15913, 2000.
- [17] H. Kano, T. Saito, and T. Kobayashi. Dynamic intensity borrowing in porphyrin J-aggregates revealed by sub-5-fs spectroscopy. *J. Phys. Chem. B*, Vol. 105, pp. 413–419, 2001.
- [18] A. Sugita, T. Saito, H. Kano, M. Yamashita, and T. Kobayashi. Wave packet dynamics in a quasi-one-dimensional metal-halogen complex studied by sub-5fs time-resolved spectroscopy. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 86, pp. 2158–2161, 2001.
- [19] Y. Kameoka, T. Nakashima, T. Yamada, T. Kobayashi, and H. Hashimoto. Low-temperature absorption spectroscopy of carotenoids. *Carotenoid Science*, Vol. 4, pp. 62–63, 2001.
- [20] T. Marui, T. Yamada, T. Kobayashi, and H. Hashimoto. Total synthesis and spectroscopic studies of spheroidene analogues. *Carotenoid Science*, Vol. 4, pp. 76–77, 2001.
- [21] T. Nakashima, T. Yamada, T. Kobayashi, and H. Hashimoto. Spectroscopic properties of hydrazones derived from biological polyenes. *Carotenoid Science*, Vol. 4, pp. 34–35, 2001.
- [22] T. Kobayashi, S. Kobayashi, A. Furuta, T. Yamada, and H. Hashimoto. Development of a multiplex method for the measurement of nonlinear susceptibility spectrum. *Carotenoid Science*, Vol. 4, p. 36, 2001.
- [23] T. Ikeda, M. Abe, T. Yamada, T. Kobayashi, and H. Hashimoto. Synthesis and vibrational analysis of cyclohexene rings substituted by various functional groups. *Carotenoid Science*, Vol. 4, pp. 7–8, 2001.

- [24] M. Abe, T. Yamamoto, T. Yamada, Y. Yamano, M. Ito, T. Kobayashi, and H. Hashimoto. Synthesis and x-ray crystallography of selectively deuterium-substituted retinal homologues. *Carotenoid Science*, Vol. 4, pp. 3–6, 2001.
- [25] T. Yamamoto, M. Abe, T. Yamada, T. Kobayashi, and H. Hashimoto. Synthesis and spectroscopic analysis of selectively deuterium-substituted retinal homologues. *Carotenoid Science*, Vol. 4, pp. 1–2, 2001.
- [26] A. Sugita, M. Yamashita, and T. Kobayashi. Ultrafast relaxation dynamics of neutral soliton pairs in a quasi-one-dimensional halogen-bridged mixed-valence platinum complex $[\text{Pt}(\text{en})_2][\text{Pt}(\text{en})_2\text{Br}_2](\text{ClO}_4)_4$. *J. Chem. Phys.*, Vol. 114, pp. 2369–2376, 2001.
- [27] H. Kano, K. Misawa, and T. Kobayashi. Periodic structures in difference phase and transmission spectra studied by a femtosecond Sagnac interferometer. *Opt. Commun.*, Vol. 188, pp. 1–9, 2001.
- [28] T. Yamamoto, M. Abe, T. Yamada, H. Hashimoto, and T. Kobayashi. Spectroscopic properties of selectively deuterium-substituted retinal homologues. *Int. J. Mod. Phys.*, 2001. in press.
- [29] T. Nakashima, T. Yamada, H. Hashimoto, and T. Kobayashi. Structures and optical properties of hydrazones derived from biological polyenes. *Int. J. Mod. Phys.*, 2001. in press.
- [30] H. Hashimoto, K. Hattori, T. Yamada, and T. Kobayashi. Electro-absorption spectroscopy and semi-empirical molecular orbital calculations of polar retinoid analogues. *Int. J. Mod. Phys.*, 2001. in press.
- (会議抄録)
- [31] K. Misawa and T. Kobayashi. Excited- and ground-state wavepacket dynamics in organic materials induced by femtosecond chirped pulses. In R. J. Gordon and Y. Fujimora, editors, *Advances in multi-photon processes and spectroscopy, Quantum control of molecular dynamics: Proceedings of the US-Japan Workshop held in Honolulu, USA*, Vol. 14, pp. 286–301. World Scientific, 2001.
- [32] T. Kobayashi. Sub-5fs real-time spectroscopy of geometrical relaxation processes in polydiacetylenes. In R. J. Gordon and Y. Fujimora, editors, *Advances in multi-photon processes and spectroscopy, Quantum control of molecular dynamics: Proceedings of the US-Japan Workshop held in Honolulu, USA*, Vol. 14, pp. 256–265. World Scientific, 2001.
- [33] T. Kobayashi, H. Kano, and T. Saito. Dynamical intensity borrowing in porphyrin J-aggregates revealed by sub-5-fs spectroscopy. In R. J. Gordon and Y. Fujimora, editors, *Advances in multi-photon processes and spectroscopy, Quantum control of molecular dynamics: Proceedings of the US-Japan Workshop held in Honolulu, USA*, Vol. 14, pp. 242–255. World Scientific, 2001.
- (国内雑誌)
- [34] 橋本秀樹, 山田隆, 高橋宏典, 細田誠, 小林孝嘉. *p*-トロアニン型分子を用いた有機非線形光学結晶の開発. *固体物理*, Vol. 35, pp. 417–427, 2000.
- [35] 小林孝嘉. フェムト秒実時間分光法—超高速ダイナミクスへの応用. *日本物理学会誌*, Vol. 55, pp. 332–339, 2000.
- [36] 小林孝嘉. 1999年度ノーベル賞受賞者の人柄と業績. *科学*, Vol. 70, pp. 11–15, 2000.
- [37] 小林孝嘉. 21世紀の初頭に当たって私の夢. *O pulse E*, Vol. 23, pp. 76–79, 2001.
- [38] 小林孝嘉, 藤貴夫. フェムト秒光パルスの発生とその計測応用. *電子情報通信学会誌*, Vol. 84, pp. 194–196, 2001.
- (学位論文)
- [39] 斎藤敬. 有機色素分子の励起状態のフェムト秒実時間分光 (修士論文)
- [40] 小林賢史. 広帯域マルチプレックス非線形感受率スペクトル測定法の開発 (修士論文)
- [41] 藪下篤史. 周波数分解光ゲート法を用いたフェムト秒パルス光の媒質中伝搬 (修士論文)
- [42] 加納英明. Dynamics of Frenkel excitons in porphyrin J-aggregates studied by ultrafast spectroscopy. (超高速分光法によるポルフィリン J 会合体中フレンケル励起子の動力学) (博士論文)
- (著書)
- [43] 小林孝嘉. フェムト秒分光法の展開と高分子励起状態への応用. *日本化学会 (編), 季刊 化学総説 超高速化学ダイナミクス*, No. 44, pp. 30–40, 2000.
- [44] 小林孝嘉. 新編 光学材料ハンドブック, 第 1 章 光学効果と材料の基礎 1.3 非線形光学効果 1.3.1 非線形光学の基礎, pp. 72–85. リアライズ社, 2001.
- [45] 小林孝嘉. 新編 光学材料ハンドブック, 第 1 章 光学効果と材料の基礎 1.3 非線形光学効果 1.3.2 縮退四光波混合, pp. 88–95. リアライズ社, 2001.
- [46] 小林孝嘉. 新編 光学材料ハンドブック, 第 1 章 光学効果と材料の基礎 1.3 非線形光学効果 1.3.3 光カー効果, pp. 99–109. リアライズ社, 2001.
- [47] 小林孝嘉. 新編 光学材料ハンドブック, 第 1 章 光学効果と材料の基礎 1.3 非線形光学効果 1.3.4 位相共役波発生, pp. 111–120. リアライズ社, 2001.
- [48] 小林孝嘉. 実験物理学講座 9 レーザー測定, 4-2 節, pp. 92–115. 丸善, 2001.
- < 学術講演 >
- (国際会議)

一般講演

- [49] H. F. Hofmann, T. Kobayashi, and A. Furusawa. Correlations of measurement information and noise in quantum measurements with finite resolution. In *RIMS symposium on analytical studies of Quantum Information and Related Fields*, January 2000.
- [50] T. Fuji, T. Saito, and T. Kobayashi. Sub-5-fs study of self-induced phase and amplitude modulations of molecular vibration. In *Conference on Lasers and Electro-Optics, Quantum Electronics and Laser Science Conference*, San Francisco, California, U. S. A., May 7–12 2000. QThM3.
- [51] H. Kano, T. Saito, and T. Kobayashi. Phase jump in the wavelength dependence of coherent vibration in porphyrin j-aggregates by sub-5-fs spectroscopy. In *Conference on Lasers and Electro-Optics, Quantum Electronics and Laser Science Conference*, San Francisco, California, U. S. A., May 7–12 2000. QThM5.
- [52] T. Kobayashi, H. Kano, and K. Misawa. Spectral fringes in difference phase and transmission spectra using a femtosecond sagnac interferometer. In *Conference on Lasers and Electro-Optics, Quantum Electronics and Laser Science Conference*, San Francisco, California, U. S. A., May 7–12 2000. QWI12.
- [53] H. F. Hofmann. Nonclassical correlations between photon number and quadrature components of the light field. In *Proceedings of the Quantum Information Technology conference QIT3*, Tokyo, November 29,30 2000.
- [54] H. Kano, T. Saito, A. Ueki, and T. Kobayashi. Dynamical intensity borrowing in porphyrin j-aggregates revealed by sub-5-fs spectroscopy. In *The 7th International Workshop on Femtosecond Technology*, AIST-Tsukuba Research Center, Tsukuba, June 29-30 2000. FC-13.
- [55] T. Fuji, T. Saito, and T. Kobayashi. Sub-5-fs study of the self-induced phase and amplitude modulation of a molecular vibration. In *The 7th International Workshop on Femtosecond Technology*, AIST-Tsukuba Research Center, Tsukuba, June 29-30 2000. FC-14.
- [56] A. Sugita, M. Yamashita, and T. Kobayashi. Ultrafast optical response of 1-d metal-halogen complex studied by time-resolved spectroscopy. In *The 7th International Workshop on Femtosecond Technology*, AIST-Tsukuba Research Center, Tsukuba, June 29-30 2000. FC-15.
- [57] A. Yabushita, T. Fuji, and T. Kobayashi. Ultra-short pulse characterization and measurement of non-linear optical effects using shg-frog. In *The 7th International Workshop on Femtosecond Technology*, AIST-Tsukuba Research Center, Tsukuba, June 29-30 2000. FC-16.
- [58] H. Kano, T. Saito, and T. Kobayashi. Dynamical intensity borrowing in porphyrin J-aggregates revealed by sub-5-fs spectroscopy. In *The Twelfth International Conference on Ultrafast Phenomena*, Charleston, South Carolina, U.S.A., July 9–13 2000. TuF38.
- [59] T. Kobayashi, H. Kano, T. Saito, and A. Ueki. Dynamic intensity borrowing induced by coherent vibrations in J-aggregates detected by sub-5-fs spectroscopy. In *Nonlinear Optics: Material, Fundamentals and Applications*, Kaua'i Marriott, Kaua'i-Lihue, Hawaii, Aug.7-10 2000. WM4.
- [60] H. F. Hofmann, T. Fuji, A. Sugita, and T. Kobayashi. Molecular photon echoes as a signature of vibrational cat states. In *Nonlinear Optics: Material, Fundamentals and Applications*, Kaua'i Marriott, Kaua'i-Lihue, Hawaii, Aug.7-10 2000. WB24.
- [61] H. F. Hofmann, A. Furusawa, and T. Kobayashi. Quantum jumps in backaction evasion measurements of a light field component. In *Nonlinear Optics: Material, Fundamentals and Applications*, Kaua'i Marriott, Kaua'i-Lihue, Hawaii, Aug.7-10 2000. WB28.
- [62] T. Fuji, T. Saito, and T. Kobayashi. Self-induced phase and amplitude modulations of vibration in dye molecules/polymer film studied with sub-5-fs pulse. In *Nonlinear Optics: Material, Fundamentals and Applications*, Kaua'i Marriott, Kaua'i-Lihue, Hawaii, Aug.7-10 2000. ThB8.
- [63] T. Kobayashi. Sub-5fs spectroscopy of excitonic system. In *Yamada Conference LIII, 2000 International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter (EXCON)*, Osaka City University, Aug.22-25 2000.
- [64] H. Kano, T. Saito, A. Ueki, and T. Kobayashi. First observation of dynamic intensity borrowing induced by coherent molecular vibrations in J-aggregates revealed by sub-5-fs spectroscopy. In *Yamada Conference LIII 2000 International Conference on Excitonic Process in Condensed Matter (EXCON)*, Osaka, August 22-25 2000. (Technical digest p43).
- [65] A. Sugita, M. Yamashita, and T. Kobayashi. Ultrafast lattice relaxation dynamics of exciton of quasi-1-d metal-halogen complex. In *Yamada Conference LIII 2000 International Conference on Excitonic Process in Condensed Matter (EXCON)*, Osaka City University, August 22-25 2000. (Technical digest p43).
- [66] T. Yamamoto, T. Yamada M. Abe, H. Hashimoto, and T. Kobayashi. Spectroscopic properties of selectively deuterium-substituted retinal homologues. In *Yamada Conference LIII 2000 International Conference on Excitonic Process in Condensed Matter (EXCON)*, Osaka City University, August 22-25 2000.

- [67] H. Hashimoto, K. Hattori, T. Yamada, and T. Kobayashi. Electro-absorption spectroscopy and semi-empirical molecular orbital calculations of polar retinoid analogues. In *Yamada Conference LIII 2000 International Conference on Excitonic Process in Condensed Matter (EXCON)*, Osaka City University, August 22-25 2000.
- [68] H. Kano, T. Saito, and T. Kobayashi. Dynamic intensity borrowing induced by coherent molecular vibration observed by sub-5-fs spectroscopy. In *Quantum Electronics and Laser Science Conference*, 2001. QThC6.
- 招待講演
- [69] T. Kobayashi. Sub-5-fs nonlinear optical processes in polydiacetylenes. In *5th International Conference on Organic Nonlinear Optics*, Davos, Switzerland, March 12–16 2000. invited.
- [70] T. Kobayashi. Sub-5-fs real-time spectroscopy of polymers. In *18th General Conference of the Condensed Matter Division of the European Physical Society*, Montreux, Switzerland, March 13–17 2000. invited.
- [71] T. Kobayashi. Ultrashort pulse generation by optical parametric amplifier. In *Conference on Lasers and Electro-Optics, Quantum Electronics and Laser Science Conference*, San Francisco, California, U. S. A., May 7–12 2000. CWO1, invited.
- [72] T. Kobayashi. Sub-5-fs real-time spectroscopy. In *The 7th International Workshop on Femtosecond Technology*, AIST-Tsukuba Research Center, Tsukuba, June 29-30 2000. FA-4, invited.
- [73] Takayoshi Kobayashi. Sub-5fs-nonlinear spectroscopy in molecular systems. In *Nonlinear Optics: Material, Fundamentals and Applications*, Kaua'i Marriott, Kaua'i-Lihue, Hawaii, Aug.7-10 2000. MB1, invited.
- [74] T. Kobayashi. Dynamic mode coupling in molecular and polymers revealed by sub-5-fs real-time spectroscopy. In *The Twelfth International Conference on Ultrafast Phenomena*, Charleston, South Carolina, U.S.A., July 9–13 2000. ThA1, plenary.
- [75] T. Kobayashi. Generation and application of sub-5-fs laser. In *Gordon Research Conference on Nonlinear Optics*, July 29–August 3 2000. invited.
- [76] T. Kobayashi. Sub-5-fs spectroscopy of bacteriorhodopsin. In *8th International Conference on Laser Applications in Life Sciences (LALS2000)*, Waseda University, Aug.13-18 2000. TH-A2, invited.
- [77] T. Kobayashi. Sub-5-fs spectroscopy for vibrational mode dynamics. In *mini-symposium of Future Prospect of Molecular Science*, “*Time-resolved Vibrational Spectroscopy*”, Okazaki Conference Center, Institute of Molecular Science, Okazaki, October 23 2000. invited.
- [78] T. Kobayashi. Sub-5fs spectroscopy of polymers. In *Japanese-Belgian Seminar on Polymer Science*, Belgium, November 6–8 2000. invited.
- [79] T. Kobayashi. Sub-5fs pulse spectroscopy. In *Pacificchem 2000, Symposium 103 ‘New Frontiers in Chemical Reaction Dynamics’*, Honolulu, Hawaii, Dec. 14-19 2000. invited.
- [80] T. Kobayashi. Sub 5 fs vibrational dynamics in large molecules. In *Pacificchem 2000, Symposium 210 ‘Large Molecule Vibrational Dynamics’*, Honolulu, Hawaii, Dec. 14-19 2000. invited.
- [81] T. Kobayashi. Dynamic intensity borrowing in J-aggregates. In *Pacificchem 2000, Symposium 147, “The Structure and Dynamics of Photogenerated Intermediates in Solution: Vibrational and Electronic Studies”*, Honolulu, Hawaii, Dec. 14-19 2000. invited.
- [82] T. Kobayashi, T. Fuji, N. Ishii, and H. Goto. First observation of auger-process induced anharmonic oscillation in molecular systems under high density excitation. In *Quantum Electronics and Laser Science Conference*, 2001. QTuH3, invited.
- 一般講演
- [83] 藤貴夫, 斎藤敬, 加納英明, 小林孝嘉. 有機色素分子 / 高分子のサブ 5 フェムト秒分光 II—分子振動の自己誘導振幅・周波数変調—. 日本物理学会, 大阪 (関西大学), 3月 22–25日 2000. 23aN-1.
- [84] 斎藤敬, 藤貴夫, 大谷弘之, 小林孝嘉. バクテリオロドプシンのサブ 5 フェムト秒実時間分光 II. 日本物理学会, 大阪 (関西大学), 3月 22–25日 2000. 23aN-2.
- [85] 小林孝嘉, 斎藤敬. バクテリオロドプシンのサブ 5 フェムト秒実時間分光 III. 日本物理学会, 大阪 (関西大学), 3月 22–25日 2000. 23aN-3.
- [86] 加納英明, 斎藤敬, 藤貴夫, 小林孝嘉. ポルフィリン J 会合体のサブ 5fs 分光. 日本物理学会, 大阪 (関西大学), 3月 22–25日 2000. 23aN-4.
- [87] 杉田篤史, 斎藤敬, 山下正廣, 小林孝嘉. 擬一次元八口ゲン架橋金属錯体のサブ 5fs 時間分解分光 II. 日本物理学会, 大阪 (関西大学), 3月 22–25日 2000. 23pM-1.
- [88] 小林賢史, 古田淳浩, 小林孝嘉, 橋本秀樹. 広帯域マルチプレックス非線型感受率スペクトル測定法の開発. 日本物理学会, 大阪 (関西大学), 3月 22–25日 2000. 23pN-1.
- [89] 小林孝嘉, 小林賢史, 古田敦浩, 橋本秀樹. 広帯域マルチプレックス非線型感受率測定法の開発. 応用物理学会, 東京 (青山学院), 3月 28–30日 2000. 30p-Y-5.
- [90] 小林孝嘉, 古田敦浩, 小林賢史, 島田悟, 松田宏雄. ポリアセチレン (PDA) の第 3 高調波発生非線型感受率スペクトル. 応用物理学会, 東京 (青山学院), 3月 28–30日 2000. 30p-Y-6.
- [91] 藪下篤史, 藤貴夫, 小林孝嘉. Nd ガラス中のサブ 20fs パルス伝播. 日本物理学会, 新潟 (新潟大学), 9月 22–25日 2000. 22pXD-5.

- [92] 加納英明, 斎藤敬, 藤貴夫, 小林孝嘉. ポルフィリン j 会合体のサブ 5fs 分光 ii. 日本物理学会, 新潟 (新潟大学), 9月 22-25日 2000. 25pXD-8.
- [93] 杉田篤史, 小林孝嘉. ポリジアセチレン誘導体の超高速中赤外吸収分光. 日本物理学会, 新潟 (新潟大学), 9月 22-25日 2000. 25pXD-9.
- [94] 斎藤敬, 小林孝嘉. アゾベンゼンのサブ 5fs 実時間分光. 日本物理学会, 新潟 (新潟大学), 9月 22-25日 2000. 25pXD-10.
- [95] 藤貴夫, 小林孝嘉. フェムト秒パルスを用いた有機色素分子振動モードの実時間分光. 日本物理学会, 新潟 (新潟大学), 9月 22-25日 2000. 25pXD-11.
- [96] 藤貴夫, 小林孝嘉. 有機無機複合多層膜のフェムト秒実時間分光. 日本物理学会, 新潟 (新潟大学), 9月 22-25日 2000. 25pXD-12.
- [97] 中島孝康, 亀岡康弘, 山田隆, 小林孝嘉, 橋本秀樹. 生理活性ポリエンより誘導したヒドロゾン類の光学特性. 日本物理学会, 新潟 (新潟大学), 9月 22-25日 2000. 22aXD-4.
- [98] 山本崇幸, 阿部元哉, 池田剛, 山田隆, 小林孝嘉, 橋本秀樹. 選択的重水素置換レチナール同属体の分光学解析 (2). 日本物理学会, 新潟 (新潟大学), 9月 22-25日 2000. 22aXA-2.
- [99] 山本崇幸, 阿部元哉, 山田隆, 小林孝嘉, 橋本秀樹. 選択的重水素置換レチナールホモログの合成と分光学解析. 第 14 回カロテノイド研究談話会, 浜松 (静岡大学), 10月 7-8日 2000.
- [100] 阿部元哉, 山本崇幸, 山田隆, 小林孝嘉, 橋本秀樹. 選択的重水素置換 β -carotene の合成と X 線結晶構造解析. 第 14 回カロテノイド研究談話会, 浜松 (静岡大学), 10月 7-8日 2000.
- [101] 池田剛, 阿部元哉, 山田隆, 小林孝嘉, 橋本秀樹. 官能基置換シクロヘキセン環の合成と振動解析. 第 14 回カロテノイド研究談話会, 浜松 (静岡大学), 10月 7-8日 2000.
- [102] 小林孝嘉, 小林賢史, 古田淳浩, 山田隆, 橋本秀樹. 広帯域マルチプレックス非線形感受率スペクトル測定法の開発. 第 14 回カロテノイド研究談話会, 浜松 (静岡大学), 10月 7-8日 2000.
- [103] 丸井隆司, 山田隆, 小林孝嘉, 橋本秀樹. スフェロイデンアナログの全合成と分光測定. 第 14 回カロテノイド研究談話会, 浜松 (静岡大学), 10月 7-8日 2000.
- [104] 高坂繁弘, 福武直樹, 中西八郎, 笠井均, 小林孝嘉. 近接場光学顕微吸収分光システムの開発とポリジアセチレン微結晶への応用. 日本物理学会年会, 中央大学 (東京), 3月 2001. 27pXA-10.
- [105] 福武直樹, 高坂繁弘, 小林孝嘉. 近接場光学顕微鏡を用いた j 会合体の吸収発光分光. 日本物理学会年会, 中央大学 (東京), 3月 2001. 27pXA-11.
- [106] 足立俊輔, 藤貴夫, 加納英明, 斎藤敬, Kobryanskii, 小林孝嘉. ナノポリジアセチレンのサブ 5 フェムト秒実時間分光. 日本物理学会年会, 中央大学 (東京), 3月 2001. 28aYA-5.
- [107] 加納英明, 小林孝嘉. ポルフィリン j 会合体の実時間分光. 日本物理学会年会, 中央大学 (東京), 3月 2001. 28aYA-6.
- [108] 杉田篤史, 小林孝嘉. ポリジアセチレン誘導体の超高速中赤外吸収分光 ii. 日本物理学会年会, 中央大学 (東京), 3月 2001. 28aYA-7.
- [109] 小林孝嘉, 藤貴夫, 石井順久, 後藤隼人. フタロシアニン分子振動モードの実時間分光. 日本物理学会年会, 中央大学 (東京), 3月 2001. 28aYA-8.
- [110] 藤貴夫, 小林孝嘉. フェムト秒パルスを用いた有機色素分子振動モードの実時間分光 ii. 日本物理学会年会, 中央大学 (東京), 3月 2001. 28aYA-9.
- 招待講演
- [111] 小林孝嘉. サブ 5 フェムト秒パルスによるコヒーレント分光. 「超高速フォトンクス」ワークショップ, 東京 (東京大学工学部), 1月 25日 2000. invited.
- [112] 小林孝嘉. 超高速光・光制御材料の探査的研究. 日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業 分野「光科学」第 2 回公開シンポジウム, 大阪 (千里ライフサイエンスセンター), 3月 2日 2000. invited.
- [113] 小林孝嘉. フェムト秒レーザー分光の最前線. 極短量子ビームポンプ & プロブ分析 (I), 東京 (東京大学), 3月 6,7日 2000. invited.
- [114] 小林孝嘉. サブ 5 フェムト秒実時間分光. 量子構造体における励起電子ダイナミクス, 物性研究所短期研究会, (東京大学物性研究所), 4月 24-26日 2000. invited.
- [115] 小林孝嘉. 超短パルスを用いた新しい非線形感受率スペクトル測定. 第 6 回フェムト秒光エレクトロニクス研究会, 兵庫 (有馬温泉), 5月 18,19日 2000. invited.
- [116] 小林孝嘉. 量子情報通信と量子テレポーテーション. 第 5 回量子情報通信研究会, 東京 (郵政省通信政策局会議室), 5月 31日 2000. invited.
- [117] 小林孝嘉. 実時間分光で探る分子の過渡状態. 「第 2 回ダイナミック分光ワークショップ-複雑系のダイナミクスを計測する」, 浜松, 7月 6-7日 2000. invited.
- [118] 小林孝嘉. 5fs 実時間分光のポリエン類への応用. 第 14 回カロテノイド研究談話会, 浜松 (静岡大学), 10月 7-8日 2000. invited.
- [119] 小林孝嘉. 超短パルスレーザーで分子の運動を見る. 茅コンファレンス, 福島 (裏磐梯ロイヤルホテル), 11月 5-8日 2000. invited.
- [120] A. Baltuška. Toward monocycle optical pulses: current status, challenges, and applications. 第 1 回 超高速光エレクトロニクス研究会講演会, 東京 (東京大学), 1月 11日 2001. invited.
- [121] 小林孝嘉, 藤貴夫, 加納英明. 超高速分光による分子振動のダイナミクス. 日本分光学会 春季講演シンポジウム, 東京 (早稲田大学), 5月 10,11日 2001. invited.
- [122] 小林孝嘉, 杉田篤史. MX のフェムト秒分光. 日本物理学会年会, 中央大学 (東京), 3月 2001. 29aYG-3, invited.
- [123] 小林孝嘉. サブ 5fs パルス発生とその応用. 応用物理学関係連合講演会, 明治大学 (東京), 3月 2001. 29p-Q-8, invited.

<特許>

- [124] 小林孝嘉、三沢和彦. J 会合体配向分散膜及びその製造方法. ドイツ国特許 特許願第 10045727.4 号
- [125] 小林孝嘉、高坂繁弘、福武直樹. 電場変調スペクトル測定用近接場光学顕微鏡 日本国特許 出願番号 特願 2001-123716

6.2 牧島研究室

今年度は田代助手が9月に埼玉大学の助教授として転出し、新年度には国分紀秀助手が後任に着任した。3名の博士と3名の修士が誕生した。

6.2.1 「あすか」衛星とGIS装置

次第に軌道を下げりつつあった宇宙X線衛星「あすか」は、2000年7月14日におきた巨大な太陽フレアの影響（地球大気の膨張）により姿勢を崩し、太陽捕捉ができず、観測不能に陥った。「あすか」は2001年3月2日14:21（日本時間）、東経163.°2、南緯8.°2の大太平洋上空で、大気圏に突入して消滅し、8年のミッションを全うした。我々が責任製作し、釜江研などと協同で運用を続けてきた撮像型蛍光比例計数管（GIS）は、この8年間を通して順調に動作を続け、貴重な観測データを蓄積した[47]。

6.2.2 「ようこう」衛星を用いた研究

1991年8月30日に打ち上げられた太陽観測衛星「ようこう」は、我々が宇宙研や国立天文台と協力して製作した、太陽硬X線望遠鏡（HXT）を搭載する。HXTはフーリエ合成手法により、15–95 keVの硬X線領域で、太陽フレアの画像を5秒角の解像度で撮像できる。

今年度は6月中旬に、かに星雲から1.°2の距離を太陽が通過するさい、HXTを用いて、かに星雲の撮像観測を試みたが、信号強度が足りず不成功に終わった[56][59]。松本らは「ようこう」広帯域スペクトル計（WBS；立教大学などが製作）のデータを、HXTのデータと突き合わせることで、太陽フレアにおける電子加速と陽子加速の比較研究を進めている。

6.2.3 コンパクト天体の観測的研究

○ 標準降着円盤とその破れ

久保田らは「あすか」および米国RXTE衛星を用い、ソフト状態にある8個のブラックホール（BH）連星の降着円盤を研究した。その結果、ある種のBHでは円盤はEddington限界の近くまで標準状態にあるが、他のBHではEddington限界の $\sim 1/7$ の光度で円盤の標準状態が破れ、コンプトン散乱が強く効いた状態に遷移し、それを超えるとアドベクション優勢な状態になることが発見された（図6.2 a）[21][30][75]。これは質量降着率が高いときの降着円盤の統一的な描像を、観測データから検証したもので、高い評価を受けつつある[87][89][90]。標準状態を保つ天体はSchwarzschild BH、そうでない天体はKerr BHである可能性がある。

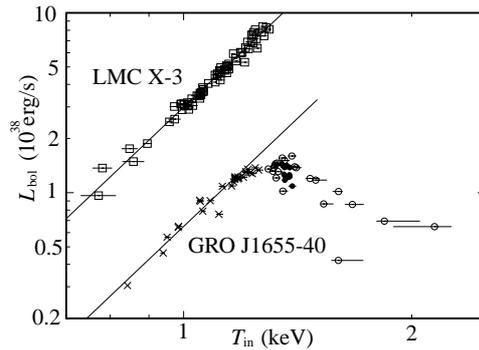


図 6.2 a: The bolometric luminosity L_{bol} of optically-thick accretion disks in two black-hole binaries, LMC X-3 and GRO J1655-40, shown against the innermost disk temperature T_{in} . The data points for LMC X-3 satisfy $L_{\text{bol}} \propto T_{\text{in}}$, indicating that its disk can be described by the standard-disk model with a constant inner radius. In contrast, the behavior of GRO J1655-40 is considerably different, even though its black hole is very similar to that in LMC X-3. This shows that GRO J1655-40 violates the standard-disk picture [21].

○ ライン X 線の共鳴散乱効果の研究

寺田らは昨年度に続きモンテカルロ計算を用い、白色わい星の磁極のプラズマ中でライン光子が共鳴散乱され、縦方向にコリメートされるという効果を検証した。強磁場白色わい星 V834 Cen の「あすか」データでは、磁極を上から見下ろすフェーズで、鉄ラインが強くなっていることを確認した[41][58][60]。さらに米国 Chandra 衛星のグレーティング装置のデータを用いて検証を進めている。

○ 局所銀河の中のコンパクト天体

局所銀河群に属する M31（アンドロメダ大星雲）および M33 銀河は、「あすか」の初期に観測された。岡田らは M33 にある明るい X 線源 X-4 を研究し、そのスペクトルが温度 ~ 1 keV のプラズマ放射と、光子指数 ~ 2 のパワーロー成分から成ることを発見した。よって X-4 は大光度 ($\sim 10^{38}$ erg s $^{-1}$) の超新星残骸らしい[37][63]。高橋（弘）らは M31 の中心から 2.4 kpc までの空間積分されたスペクトルを解析し、多くの中性子星連星からの放射成分に加え、温度 ~ 1 keV（超新星残骸の集合か）と ~ 0.3 keV のプラズマ放射（星のコロナの集合か）の成分を含むことを示した[39][62][77]。

○ 超大光度コンパクト X 線源 (ULX)

局所銀河群より遠い渦巻銀河の腕には、ULX (Ultra-Luminous Compact X-ray Source) と呼ばれる、一群の強い謎の X 線源が存在する。我々は、それらが $\sim 100 M_{\odot}$ の質量をもつブラックホール連星であるという描像を、観測的に追求している。杉保らは、渦巻銀河 IC 342 に存在する 2 つの ULX を「あすか」により長期観測し、その一方 (Source 2) から、31 時間もしくは 41 時間の、ほぼ周期的な変動を検出した [36] [38] [78]。これは $\sim 100 M_{\odot}$ のブラックホールが、同程度の質量の主系列星と近接連星を成している場合に、期待される連星軌道周期とよく一致する。よって ULX がブラックホール連星であることは、さらに確実になったと言える。

○ 活動銀河核の変動のタイムスケール

江副らは、構造関数を用いて、まばらな時系列データから変動のパワースペクトルを推定する方法 [14][8] を、Lockman Hole を観測した ROSAT 衛星のデータに適用した。この結果、5 つの活動銀河核について、変動の特徴的な時間スケールが決められ、ブラックホール質量が推定された [31] [55]。

6.2.4 星間・銀河間空間での粒子加速

○ 銀河バルジでの加熱・加速の証拠

国分らは「あすか」および RXTE 衛星を用い、銀河系バルジの全域から、ディフューズな X 線放射を検出することに成功した。放射は、温度 ~ 0.6 keV の低温プラズマ放射、温度 ~ 3 keV の高温プラズマ放射、および光子指数 ~ 2 の非熱的放射の 3 成分から成り、後 2 者はほぼ相似な空間分布をもつ [22] [35] [53] [76]。バルジ放射は全体として、銀河面に局在する銀河リッジ放射と酷似した性質をもち、銀河面からバルジにわたる星間空間で、プラズマ加熱と粒子加速が広汎に起きていることを示唆する。

○ 電波銀河のローブ

磯部、田代らは、新たに 2 個ほどの電波ジェットの終端ローブから、逆コンプトン放射とおぼしき X 線を検出した [32] [66] [79]。中心核が活発な天体ほど、磁場のエネルギー密度に対して粒子のエネルギー密度が卓越する傾向が示唆されている [10] [40]。昨年度の XMM-Newton 衛星に続き、Chandra 衛星でも観測提案が採択され、ともに観測を待っている。

○ 銀河群における粒子加速

中澤らは「あすか」のデータを用い、深沢 (釜江研) の主導により発見された、銀河群からの広がった非熱的放射を詳しく研究した。その結果、18 個の銀河群のうちほぼ半数から、銀河間ガス起源の熱的 X 線を有意に上回る、硬 X 線放射を検出し、数例については硬 X 線の空間的な広がりを確認した [23] [43] [52] [81]。硬 X 線スペクトルは、非熱的な放射 (もしくは高温の熱的放射) の特徴をもち、光度は 10^{41-42} erg s^{-1} に達する。これは銀河団の銀河間空間で、広く粒子加速が起きていることを示唆する。

○ 銀河団プラズマに関するパラダイムシフト

牧島らが主導してきた、銀河団の中心における物理の総まとめは、*Publ. Astr. Soc. J.* に受理された [16]。その主眼は、「銀河団プラズマは放射冷却で冷え、そこに大規模な冷却流 (cooling flow) が発生する」という従来の定説を覆し、磁気プラズマ効果による加熱の重要性を示すことにあった。稼動を始めた米国 Chandra 衛星および欧州 XMM-Newton 衛星は、我々の先見的な主張をあいまいで追認しつつあり、パラダイムシフトが起きつつある [88]。

6.2.5 ASTRO-E 衛星の回復と硬 X 線検出器 (HXD) の再製作

○ ASTRO-E II 衛星

今年度は、2000 年 2 月 10 日に打ち上げ失敗した ASTRO-E 衛星を回復すべく、最大限の努力を行った [18]。物理学教室を含む各方面から多くのご支援を頂いた結果、2005 年の 1-2 月期に、ほぼ同様な衛星を ASTRO-E II として打ち上げる見通しが開けた。ロケットは、同じ M-V 型に不具合対策を施したものである。この場をお借りして、ご支援いただいた皆様に厚くお礼を申し述べたい。

○ HXD (硬 X 線検出器) 装置の再出発 : HXD-II

ASTRO-E 衛星には 4 つの装置が搭載されていた。その一つが硬 X 線検出器 (HXD) で、これは我々が釜江研、宇宙研、阪大核物理センターなどと共同で開発したものである。HXD の検出器部 (HXD-S) は重量 200 kg をもち、結晶とシリコン PIN ダイオードを組み合わせて、10-700 keV のエネルギー域を確保し、きわめて低いバックグラウンドを特徴とする。アナログ電子回路部 (HXD-AE) およびデジタル電子回路部 (HXD-DE) にも、多くの技術が凝らされている。ASTRO-E II 計画のスタートに伴い、HXD 装置も HXD-II 装置として、東大、宇宙研、広島大 (釜江、深沢)、埼玉大 (田代) などの協同により再製作されることとなった [46] [69] [83]。

○ HXD-II 開発に向けての準備

今年度は、HXD 装置の打ち上げ前の試験データを詳しく解析するとともに [17] [34]、それを踏まえて、HXD-II 装置の設計を検討した。HXD-II は基本は HXD と同じだが、必要最小限の改良を施すこととしている。改良点としては、シリコン PIN ダイオードに代えて CdTe ダイオードを用いる可能性 [71][72]、量子効率の改良されたフォトチューブを用いる可能性、電子回路部の部分的な手直し、搭載ソフトウェアの部分的な改良、などが検討されている。来年度から検出器の製作が始まるため、結晶シンチレータやシリコン素材を先行して購入し、予備的な評価試験を行うとともに、製作に必要なさまざまな準備を整えた。HXD-DE については、製造メーカーの変更を伴うため、具体的な開発作業に着手し、打ち合わせを重ねた。

○ 微量放射能の混入の評価

HXD および HXD-II では、BGO および GSO という、2 種類の結晶シンチレータを用いる。高橋 (勲) らは、結晶シンチレータ自身、それらの周辺材料、および結晶育成に用いるイリジウムつぼについて、微量放射能の混入を徹底的に下げるべく多くの評価実験を行い、いくつかの改良の指針を得た [26] [70]。また宇宙線がフォトチューブで作り出すチェレンコフイベントについても、解析を進めた [26][70]。

6.2.6 将来に向けての開発など

○ キャピラリープレートの内面反射の基礎実験

ガラス毛细管の内面で X 線の全反射を起こさせると、X 線のライトガイドとして用いる可能性が開ける。江副らは、内径 $\sim 10 \mu\text{m}$ のガラス毛细管を束ねたキャピラリープレートを用いて基礎実験を行い、内面反射がじっさいに起きること、またテーパ型キャピラリープレートを用いると、X 線の集光や発散が生じることを実験的に検証した [24] [45] [48] [74]。将来の全天モニタ装置などへの応用が考えられる。

○ フーリエ合成法を用いた宇宙硬 X 線撮像装置

古徳らは数値シミュレーションと可視光実験により、「ようこう」HXT のフーリエ合成撮像の原理と、HXD-II の極低バックグラウンド特性をあわせもつ、新しい宇宙硬 X 線撮像装置の概念設計を行った (図 6.2 b) [25] [73]。これは ASTRO-E II 以後に硬 X 線領域で高感度のイメージング観測を目指すもので、装置は約 100 個の撮像素子からなり、1 つの素子は、1 枚のすだれコリメータと 1 次元ストリップ検出器から成る。

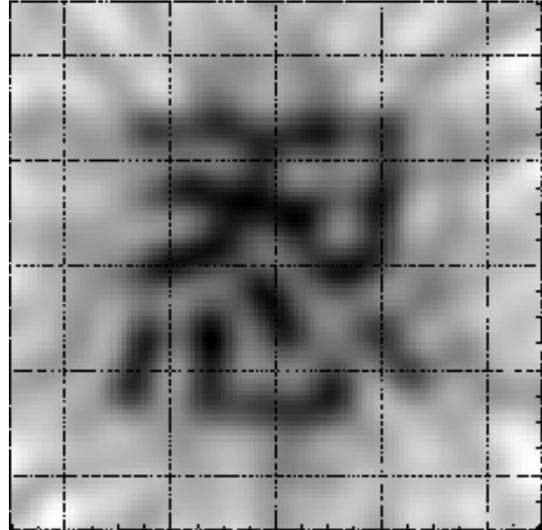


図 6.2 b: A simulated image of the chinese character 忍, using the Fourier-synthesis method applicable to hard X-rays [25].

○ 4 年生特別実験

前期 (竹井、林田) には CdTe 検出器を用い、X 線に対する物質の蛍光収量を測定する実験を行った。後期 (安藤、福迫) には、渦巻き型のフォイルを用いて極軽量の X 線反射鏡を作ることを想定し、可視光による模擬実験をおこなった。

○ 地球外惑星の探査計画

近年ドップラー法を用いて、50 個を超える太陽系外惑星が発見され、大きな話題となっている。牧島は、須藤、坪野らと協力し、日本でその本格的な探査を行う可能性を検討し始めている [86]。

< 受賞 >

Fukazawa, Y., Makishima, K., Tamura, T., Ezawa, H., Xu, H., Ikebe, Y., Kikuchi, K., Ohashi, T.: "ASCA Measurements of Silicon and Iron Abundances in the Intracluster Medium", *Publ. Astr. Soc. J.* **50**, 187 (1998) が、2000 年度の日本天文学会欧文誌論文賞を受賞。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Nakazawa, K., Makishima, K., Fukazawa, Y. & Tamura, T.: ASCA Observations of a Near-by Cluster in the Antlia, *Publ. Astr. Soc. J.* **52**, 623 (2000)
- [2] Matsushita, K., Makishima, K., & Ohashi, T.: Metal Abundances in the Hot Interstellar Medium

- in Early-Type Galaxies Observed with ASCA, *Publ. Astr. Soc. J.* **52**, 685 (2000)
- [3] Takahashi, I., Fukazawa, Y., Kodaira, K., Makishima, K., Nakazawa, K., & Xu, H.: ASCA Observations of Three Shakhbazyan's Compact Groups of Galaxies, *Publ. Astr. Soc. J.* **52**, 769 (2000)
- [4] Kotoku, J., Mizuno, T., Kubota, A., & Makishima, K.: ASCA Observation of Ultra-Luminous X-Ray Sources in the Nearby Spiral Galaxy NGC 2403, *Publ. Astr. Soc. J.* **52**, 1081 (2000)
- [5] Tamura, T., Makishima, K., Fukazawa, Y., Ikebe, Y., & Xu, H.: X-Ray Measurements of the Gravitational Potential Profile in the Central Region of Abell 1060 Cluster of Galaxies, *Astrophys. J.* **535**, 602 (2000)
- [6] Makishima, K., Kubota, A., Mizuno, T., Ohnishi, T., Tashiro, M. et al.: The Nature of Ultra-Luminous Compact X-ray Sources in Nearby Spiral Galaxies, *Astrophys. J.* **535**, 632 (2000)
- [7] Fukazawa, Y., Makishima, K., Tamura, T., Nakazawa, K., Ezawa, H., Ikebe, Y., Kikuchi, K., & Ohashi, T.: Statistical Properties of Metal Abundances of the Intracluster Medium in the Central Region of Clusters, *Mon. Not. Roy Astr. Soc.* **313**, 21 (2000)
- [8] Ezoe, Y., Iyomoto, N., & Makishima, K.: Study of the Long-Term X-Ray Variability of a Possible Quasar RX J0957.9+6903 with ASCA, *Publ. Astr. Soc. J.* **53**, 69 (2001)
- [9] Isobe, N., Tashiro, M., Sugiho, M., & Makishima, K.: ASCA Observations of the BL Lacertae Object OJ 287 in 1997 April and November, *Publ. Astr. Soc. J.* **53**, 79 (2001)
- [10] Tashiro, M., Makishima, K., Iyomoto, N., Isobe, N., & Kaneda, H.: X-Ray Measurements of the Field and Particle Energy Distributions in the West Lobe of the Radio Galaxy NGC 1316 (Fornax A), *Astrophys. J. Lett.* **546**, 19 (2001)
- [11] Fukazawa, Y., Nakazawa, K., Isobe, N., Makishima, K., Matsushita, K., Ohashi, T., & Kamae, T.: Detection of Excess Hard X-Ray Emission from the Group of Galaxies HCG 62, *Astrophys. J. Lett.* **546**, 87 (2001)
- [12] Kubota, A., Mizuno, T., Makishima, K., Fukazawa, Y., Kotoku, J., Ohnishi, T., & Tashiro, M.: Discovery of Spectral Transitions from Two Ultraluminous Compact X-Ray Sources in IC 342, *Astrophys. J. Lett.* **547**, 119 (2001)
- [13] Ueda, Y., Ishisaki, Y., Takahashi, T., Makishima, K., & Ohashi, T.: The ASCA Medium Sensitivity Survey (the GIS Catalog Project): Source Catalog, *Astrophys. J. Suppl.* **133**, 1 (2001)
- [14] Iyomoto, N. & Makishima, K.: Long-Term Variability of the Low-Luminosity Active Galactic Nucleus of M81, *Mon. Not. Roy Astr. Soc.* **321**, 767 (2001)
- [15] Matsumoto, Y., Fukazawa, Y., Nakazawa, K., Iyomoto, N., & Makishima, K.: The FR-I radio galaxies NGC 315 and NGC 4261 observed with ASCA, *Publ. Astr. Soc. J.* **53**, in press (2001)
- [16] Makishima, K., Ezawa, H., Fukazawa, Y., Honda, H., Yasushi, F., Tsuneyoshi, K., Kikuchi, K., Matsushita, K., Nakazawa, K., Ohashi, T., Takahashi, T., Tamura, T., & Xu, H.: X-Ray Probing of the Central Regions of Clusters of Galaxies, *Publ. Astr. Soc. J.* **53**, in press (2001)
- [17] Sugiho, M., Kamae, T., Makishima, K., Takahashi, T., Murakami, T., Tashiro, M., Fukazawa, Y., et al., Spatially Dependent Response of Thick and Large Area PIN Diode for ASTRO-E Hard X-ray Detector, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, in press (2001)
- (解説)
- [18] 牧島一夫:「ASTRO-E 衛星の打上げ失敗とその意味」, 科学 (岩波書店), **70** (8月号), p.642
- [19] 牧島一夫, 「太陽の 100 倍の質量をもつ回転ブラックホール」, 理学部広報, Vol.32, 第3号, p.10
- [20] 牧島一夫, 「ガス蛍光比例計数管」, ISAS ニュース (宇宙科学研究所), 8月号
- (学位論文)
- [21] Kubota, A.: X-ray Study of Optically-Thick Accretion Disks around Stellar Black Holes, 博士論文
- [22] Kokubun, M.: Hard X-ray Study of the Galactic Bulge, 博士論文
- [23] Nakazawa, K.: Hard X-ray Emission from Groups of Galaxies Detected with ASCA, 博士論文
- [24] 江副祐一郎, 「キャピラリープレートの内面反射を用いた宇宙 X 線集光系の基礎実験」, 修士論文
- [25] 古徳純一, 「Fourier・Bessel 合成を用いた宇宙硬 X 線撮像光学系の基礎実験」, 修士論文
- [26] 高橋勲, 「アクティブシールドを利用した低バックグラウンド 線検出器の研究」, 修士論文
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 招待講演
- [27] Makishima, K.: Spectroscopy of Normal Galaxies, *33rd COSPAR Scientific Assembly*, July 17–21, Warsaw University of Technology, E1.1-007
- [28] Makishima, K.: Evidence for Astrophysical Reconnection on Large Scales, *ibid*, D0.1-0035
- [29] Makishima, K.: Concluding Remarks, *New Century of X-ray Astronomy*, March 6–8, 横浜シンポジア
- 一般講演

- [30] Kubota, A.: X-ray Study of Optically Thick Accretion Disks around Stellar Black Holes – the Standard Accretion Disk and beyond, *New Century of X-ray Astronomy*, March 6–8, 横浜シンポジア
- [31] Iyomoto, N. & Ezoe, Y.: Study of Long-Term X-ray Variability with Sparse Light Curves – Analysis Method and Application to Quasars, *MAXI Workshop on AGN Variability*, March 10–11, 日光金谷ホテル
- ポスター発表
- [32] Isobe, N., Makishima, K., Tashiro, M., & Kaneda, H.: ASCA Observation of the Northern Outer Lobe Edge of the Radio Galaxy Centaurus A, *Particles and Fields in radio galaxies*, August 3–5, Oxford University
- [33] Matsumoto, Y.: The FR-I Radio Galaxies NGC 351 and NGC 4261 Observed with ASCA, *X-Ray Astronomy 2000*, Mondello (Palermo), Sept. 4–9, Poster No.8.12
- [34] Sugiho, M.: Spatially Dependent Response of Thick and Large Area PIN Diode Developed for ASTRO-E Hard X-ray Detector, *IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference*, October 15–20, Lyon Convention Centre, France, 604
- [35] Kokubun, M.: Diffuse Hard X-ray Emission in the Galactic Bulge, *New Century of X-ray Astronomy*, March 6–8, 横浜シンポジア, P41
- [36] Kotoku, J.: ASCA Observations of the two Ultra Luminous Compact X-Ray Sources in the Nearby Spiral Galaxy IC 342 (I) — State Transitions — *ibid*, P42
- [37] Okada, Y.: An X-Ray Emitting Supernova Remnant Candidate, M33 X-4, *ibid*, P45
- [38] Sugiho, M.: ASCA Observations of the two Ultra Luminous X-Ray Sources in the Nearby Spiral Galaxy IC 342 (II) – Possible Orbital Periods – *ibid*, P47
- [39] Takahashi, H.: ASCA Observations of the Central Region of M31, *ibid*, P48
- [40] Isobe, N.: Relations between Core Luminosities and Physical Parameters of the Lobes of Radio Galaxies, *ibid*, P72
- [41] Terada, Y.: X-Ray Beaming due to Resonance Scattering in the Accretion Column, *ibid*, P119
- [42] Makishima, K.: Physics of the Central Regions of Clusters of Galaxies, *ibid*, P148
- [43] Nakazawa, K.: Hard X-ray Emission from Groups of Galaxies Detected with ASCA, *ibid*, P152
- [44] Takahashi, I.: ASCA Observations of Three Shakhbazyan's Compact Groups of Galaxies, *ibid*, P160
- [45] Ezoe, Y.: Development of Capillary-Plate X-ray Optics, *ibid*, P184
- [46] Makishima, K.: The HXD-II on ASTRO-E-II: Another Challenge to the Hard X-ray Sky, *ibid*, P205
- [47] Tashiro, M.: Nearly-Final In-Orbit Calibration of the GIS onboard ASCA, *ibid*, P223
- [48] Ezoe, Y.: Development of Capillary-Plate X-ray Optics, *MAXI Workshop on AGN Variability*, March 10–11, 日光金谷ホテル
- (国内会議)
- 日本物理学会・秋の分科会 (9月22~25日、新潟大学)
- [49] 高橋勲, 大西呂尚, 牧島一夫, 田代信, 釜江常好: GSO 結晶とフォトダイオードを用いた次世代硬 X 線検出器の開発、24pYR3
- [50] 古徳純一, 牧島一夫, 久保田あや, 水野恒史: 近傍渦巻銀河中の大光度 X 線源の「あすか」による観測 (1)、23aWJ1
- [51] 牧島一夫, 古徳純一, 久保田あや, 水野恒史: 近傍渦巻銀河中の大光度 X 線源の「あすか」による観測 (2)、23aWJ2
- [52] 中澤知洋, 深沢泰司, 牧島一夫, 高橋勲: 「あすか」衛星による銀河群からの硬 X 線の観測、23aWJ3
- [53] 国分紀秀, 牧島一夫, 坂野正明, 山内茂雄, 釜江常好: 「あすか」による銀河バルジの観測、23aWJ4
- [54] 田代信, 牧島一夫, 磯部直樹, 金田英宏: 宇宙 X 線観測衛星「あすか」を用いた電波ロープ中の磁場-電子エネルギー分布の観測、23aWJ5
- [55] 江副祐一郎, 伊豫本直子, 牧島一夫: AGN の長時間変動と光度, 中心質量の関係 – Lockmanhole –、23aWJ7
- [56] 松本縁, 杉保昌彦, 牧島一夫, 小杉健郎, 坂尾太郎: かに星雲の, 太陽 X 線観測衛星「ようこう」による硬 X 線撮像への挑戦、23aWJ8
- [57] 杉保昌彦, 釜江常好, 牧島一夫, 高橋忠幸, 村上敏夫, 田代信, 深沢泰司, 大田直美, 米徳大輔, 渡辺伸: ASTRO-E 衛星硬 X 線検出器 PIN 型シリコンダイオードのエネルギー応答の測定、23aWJ9
- [58] 寺田幸功, 牧島一夫, 石田学: 強磁場激変星の降着プラズマにおける鉄共鳴線のピーミング効果の検証、25aWK6
- 日本天文学会・秋の年会 (10月4~8日、群馬県総合教育センター)
- [59] 杉保昌彦, 松本縁, 牧島一夫, 小杉健郎, 坂尾太郎: 「ようこう」衛星 硬 X 線望遠鏡 (HXT) を用いた かに星雲の硬 X 線撮像観測、M01a
- [60] 寺田幸功, 牧島一夫, 石田学, 藤本龍一, 松崎恵一: 「あすか」による、強磁場激変星を用いた共鳴散乱の検証 II、N38a
- [61] 牧島一夫, 久保田あや, 古徳純一, 水野恒史: 近傍の渦巻銀河に見られる大光度 X 線源の正体、N39a
- [62] 高橋弘充, 岡田祐, 牧島一夫, 満田和久: 「あすか」による M31 の観測、R06a

- [63] 岡田祐、高橋弘充、牧島一夫、満田和久：近傍銀河 M33 にある X 線点源の「あすか」による解析、R07a
- [64] 深沢泰司、伊予本直子、久保田あや、松本縁、牧島一夫：M51 の隠れた AGN からの X 線放射の検出、S03a
- [65] 伊予本直子、深沢泰司、石原裕子、中井直正、牧島一夫：NGC 3079 の X 線観測、S04a
- [66] 磯部直樹、田代信、牧島一夫、金田英宏：「あすか」による電波銀河 Centaurus A の北側アウトロープの観測、S14a
- [67] 田代信、牧島一夫、磯部直樹、金田英宏：「あすか」による電波ロープの中の粒子・磁場のエネルギー分布の観測、S15a
- [68] 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、T19a
- 日本物理学会・春の年会（3月27～30日、中央大学多摩キャンパス）
- [69] 高橋忠幸、牧島一夫、釜江常好、村上敏夫 A、田代信、深沢泰司：Astro-E の再挑戦 - Astro-E-II 衛星搭載用 HXD-II 検出器 -、28pSD3
- [70] アクティブシールドを利用した低バックグラウンド線検出器の開発、29pSG10 高橋勲、磯部直樹、寺田幸功、牧島一夫：
- [71] 佐藤悟朗、渡辺伸、高橋忠幸、岡田祐：テルル化カドミウム (CdTe, CdZnTe) 半導体を用いた新しいガンマ線検出器の特性評価 (1)-スペクトル特性-、29pSG11
- [72] 岡田祐、佐藤悟朗、高橋忠幸、牧島一夫：テルル化カドミウム (CdTe, CdZnTe) 半導体を用いた新しいガンマ線検出器の特性評価 (2) - タイミング -、29pSG12
- [73] 古徳純一、寺田幸功、牧島一夫：フーリエ・ベッセル合成を用いた宇宙硬 X 線撮像光学系の基礎研究、28pSD4
- [74] 江副祐一郎、牧島一夫、杉保昌彦、渥美卓治：キャピラリプレート内面反射をもちいた X 線集光系の開発、28pSD6
- 日本天文学会・春の年会（3月25～28日、千葉大学）
- [75] 久保田あや、牧島一夫：X 線観測によるブラックホール周りの標準降着円盤の検証、N36a
- [76] 国分紀秀、牧島一夫、山内茂雄、坂野正明、海老沢研：硬 X 線を用いた銀河系バルジの観測、R33a
- [77] 高橋弘充、岡田祐、牧島一夫：「あすか」による M31 の観測 (2)、R34a
- [78] 杉保昌彦、久保田あや、古徳純一、牧島一夫、水野恒史：渦巻銀河 IC 342 中の大光度 X 線源の「あすか」による観測、R36a
- [79] 磯部直樹、牧島一夫、田代信、金田英宏、伊予本直子：「あすか」による電波銀河 4C73.08 観測、S11b
- [80] 田代信、谷畑千春、高橋忠幸、窪秀利、牧島一夫、杉保昌彦：「あすか」による BL Lacertae の光度変動の観測、S16a
- [81] 中澤知洋、深沢泰司、牧島一夫、松下恭子：銀河群からの硬 X 線放射の観測、T06a
- [82] 深沢泰司、中澤知洋、牧島一夫：Chandra 衛星による超過吸収銀河団 2A0335+096 の吸収分布の測定、T17a
- [83] 牧島一夫、釜江常好、深沢泰司、村上敏夫、高橋忠幸、田代信、ほか HXD-II チーム：ASTRO-E 衛星の再挑戦 - ASTRO-E II 搭載 HXD-II 検出器、W10a
- その他
- [84] 牧島一夫：「近傍銀河に発見されつつある大質量ブラックホール候補天体」、立教大学理学部物理学教室コロキウム、10月14日
- [85] 牧島一夫：「太陽の100倍の質量をもつ回転ブラックホール」、東京大学理学系天文学教室談話会、2000年10月24日。
- [86] 牧島一夫、寺田幸功、須藤靖、坪野公夫、小谷隆行、山田亨、大石奈緒子、E. L. Turner、D. N. Spergel：「中型衛星による太陽系外惑星の探査計画」、宇宙科学シンポジウム（宇宙科学研究所）、1月11日。
- [87] 久保田あや：“X-ray Study of Optically-Thick Accretion Disks around Stellar Black Holes”，京都大学宇宙物理学教室談話会、2月21日。
- [88] 牧島一夫：「銀河・銀河団におけるプラズマ加熱と粒子加速」、国立天文台談話会、2月23日。
- [89] 久保田あや：「X 線観測によるブラックホール周りの標準降着円盤の検証」、宇宙科学研究所談話会、2001年4月23日
- [90] 久保田あや：「X 線観測によるブラックホール周りの標準降着円盤の検証」、立教大学理学部物理学教室コロキウム、2001年4月28日
- <集中講義>
- [91] 牧島一夫：「地球から見た宇宙、宇宙から見た地球」、名古屋大学理学研究科物理学専攻、7月3-5日。
- [92] 牧島一夫：「高エネルギー宇宙物理学」、立教大学理学部物理学科、10月12-14日。

6.3 高瀬研究室

当研究室では磁場により閉じ込められた高温プラズマの研究を行っている。この研究は未来のエネルギー源としての核融合の実現を目指したものであり、そのために不可欠な高温プラズマの物理的理解を目標としている。現在では、トカマクと呼ばれる閉じ込め方式により、核融合出力が外部からの加熱入力を上回る段階まで来ており、核融合反応による自己加熱が支配的となる「燃焼プラズマ」の研究に移行しようとしている。このため国際熱核融合実験炉 (ITER) 計画が国際協力で進行している。我々はトカマクより更に効率を上げるため、球状トカマク (ST) 方式の研究を進めている。ST では、プラズマを閉じ込める磁場の圧力に対するプラズマの圧力 (この比は β とよばれ、プラズマ閉じ込めの効率を表す) が従来のトカマク方式に比べ数倍大きくできると期待されている。

高温・高ベータプラズマは非線形複雑系の典型例であり、様々な興味深い現象が起こる。例えば、プラズマの圧力勾配により電場が生じ、強い流れが生じる。更に流れに強い勾配ができるとプラズマ中の乱流が抑制され、輸送が軽減される。プラズマには輸送の大きい状態と輸送の小さい状態が存在し、これらの中で遷移を起こす。また、プラズマ中に自発的に電流が流れるようになり、プラズマを閉じ込めるのに必要な磁場をプラズマ自身が作り出すようになる。我々はこのような高温・高ベータのプラズマ実験を行うために、平成 11 年度に TST-2 球状トカマク装置を新設し、平成 12 年度から ST プラズマで起きる電磁流体 (MHD) 不安定性、プラズマ乱流による輸送、波動を用いたプラズマ加熱等の研究を開始した。また、プラズマ加熱あるいはプラズマ計測の手法も ST では従来のものが使用できない場合も多く、これらの開発も合わせて行っている。13 年度以降、高周波を用いたプラズマ加熱の実験を計画しているほか、開発した計測・加熱手法を用いて学外の研究所との共同研究を活用して幅広い研究を行っている。

6.3.1 TST-2 実験

TST-2 はトーラスの大半径 0.36 m、小半径 0.23 m の球状トカマクプラズマである。トロイダル磁場 0.3 T、プラズマ電流 0.2 MA、電子密度 $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、電子温度 200 eV、 $\beta = 5\text{--}10\%$ のプラズマを生成できるよう設計されている (図 6.3 a 参照)。現在、測定器と電源を順次整備しながら実験を進めており、得られている典型的なパラメータは図 6.3 b に示すように、設計値の約半分のレベルである。

内部磁気再結合現象の観測

内部磁気再結合現象 (IRE) は球状トカマク特有の MHD 現象と考えられている。現象論としては、図 6.3b の様に放電の途中でプラズマ電流に正のスパイ

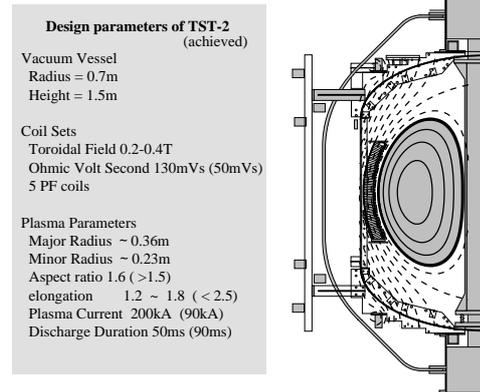


図 6.3 a: Design parameters and poloidal cross section of TST-2

クが、また、周回電圧に負のスパイクがあらわれる。これはプラズマの内部で磁気再結合がおきて電流分布が平坦になり、内部インダクタンスが下がったためと考えられる。このとき H_α の発光が増え、軟 X 線の信号強度や密度が減り、プラズマに閉じ込められた熱や粒子が吐き出されていることを示す。しかしプラズマ内部でどのような不安定性が成長しているかといったメカニズムは分かっていない。

プラズマ内部に磁気プローブを挿入し、磁気揺動の空間分布を測定した。この結果、プラズマの小半径の約半分の位置で、10 kHz の磁気揺動に加えて、(20, 30, 40 kHz) の高次モードが起きていることが分かった。また、IRE の直前にこの周波数は 15 kHz, 30 kHz に移動している。この 10 kHz 磁気揺動はプラズマの外側で計ったところ $n = 1$ のモード数を示し、このモードがプラズマ内部で成長していることが分かった。

高周波波動励起実験

ST で生成されるプラズマは高い誘電率を有するが、イオン高調波速波 (High harmonic fast wave: HHFW) はこのようなプラズマの中心部まで伝播可能であり、特に高温ではランダウ減衰による電子への強い吸収が期待されるので、ST における有力な加熱・電流駆動の手段となりうる。このため、高誘電率プラズマ中の HHFW の伝播・吸収機構の解明は、加熱・電流駆動実験の基礎となる重要なテーマである。TST-2 の実験では真空容器内壁に取りつけられたコムラインアンテナを用いて 25 MHz、1 kW レベルの進行波を励起した。励起された波はプラズマの外側の 5ヶ所に配置した磁気プローブで検出し、位相・強度・周波数スペクトルを測定した。その結果、トロイダルモード数 7-8 の波がプラズマ中に励起されていることがわかった。また、密度揺動による波の散乱に起因するとおもわれる 100 kHz 程度の周波

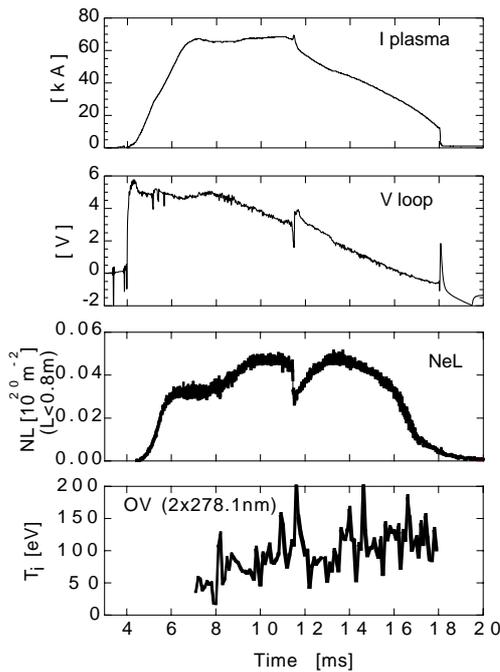


図 6.3 b: Typical plasma parameters of TST-2

数スペクトルの広がりが観測された。現在これらの結果を元に、200 kW レベルの大電力を使ったプラズマ加熱実験の準備中である。

プローブ実験

高温プラズマの熱・粒子輸送は、通常微視的揺動の引き起こす輸送（乱流輸送）によって支配されている。ST プラズマの輸送現象を観測するために静電・磁気プローブを用いて静電揺動及び磁気揺動を測定している。先端に 4 つの電極をもつプローブを用いて測定を行った。全ての電極で浮遊電位を計測した結果、トリプルプローブ法が使用可能であることが分かった。プラズマの外 $R = 540$ mm の位置では、放電後半では電子温度が 10 eV 程度であるのに対して電子密度はほとんどなく、プラズマが内側よりになり、プラズマ外側のスクレイブオフ領域ではプラズマ電流に応じて増大、減少する。現存のプローブを用いた実験では、トリプルプローブ法を用いて電場の計測を行えないので輸送係数を求めることはできなかった。しかし、浮遊電位計測によってプラズマ電位の波数の目安を与えることができた。今後輸送係数やプラズマ中の静電波計測のために複数のプローブを設置する予定である。

マイクロ波干渉計による電子密度の測定

2 つのマイクロ波発信器（周波数 104 GHz、差周波数 1.2 GHz）を用いて、ヘテロダイン方式のマイクロ波干渉計を用いて電子密度を測定している。今回新たに、ピンスイッチを用いて導波管を切り替え、2 つのコードを交互に測定することを試みた。ピンスイッチは簡単な電子回路によって $2 \mu\text{s}$ ごとに切り替えられ、1 つのコードに対して $4 \mu\text{s}$ 間隔で測定が行われた。

図 6.3 c に示すのは、典型的な放電の際の 2 コードの電子密度とプラズマ電流の波形である。測定コードはプラズマの中心付近を通る $R = 390$ mm と、それより外側 $R = 505$ mm を用いた。時刻 8–15 ms に、プラズマ電流に頻繁に現れる正のスパイクに応じて中心密度は大きく減少するが、外側の密度はあまり変化していない。これより、この現象は主にプラズマの内部で起こったことが分かる。なお、両コードの密度は 29 ms 頃から上昇するが、これは 2 回目のガス入射（27–28 ms）を行ったためである。

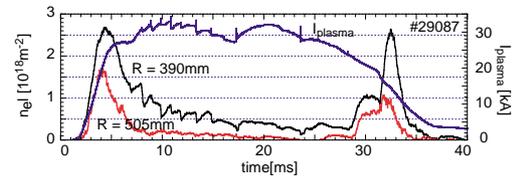


図 6.3 c: The line-averaged density measured by a dual-channel PIN-switch interferometer.

4 ビーム相関法による揺動測定の可能性

プラズマは非平衡、非線形な系である。また、多種の粒子、多種の場をもつため、プラズマ乱流は、通常流体の一樣等方乱流とは異なった散逸機構、エネルギースペクトル、カスケードを示すと考えられる。これらの研究を実験的に行うためには、従来よりも小さい空間スケールでの揺動の構造を測定する必要がある。ここで述べる 4 ビーム相関法は、揺動の微細構造測定を目的とした新しい手法であり、その可能性と限界を理論的に解析した。

4 ビーム相関法は、従来から知られているクロスビーム法を拡張した方法である。クロスビーム法は、2 つの交差する線積分測定から、交差部の局所的な揺動を得る手法で、揺動の相関長が短いことを利用する。図 6.3 d(a) はセルモデルを用いて配位を模式的に示したものである。セルモデルでは、空間を相関長で離散化し、1 つのセル内では相関が 1 で、異なるセル間の相関は 0 とおく。この場合に 2 つの線積分測定値の相関をとると、相関の無い成分 ($\epsilon_i, \delta_j, i \neq j$) は統計平均により 0 になり、相関のある成分 ($\epsilon_k = \delta_k$)、すなわち、交差部の揺動の自乗平均 ($\epsilon_k^2 = \delta_k^2$) のみが残る。

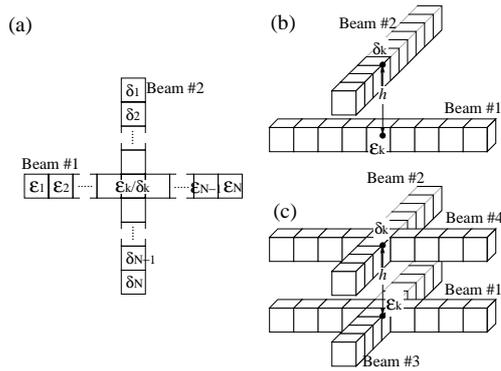


図 6.3 d: Schematic cell-model of the 4-beam correlation method

これに対して、4ビーム相関法では h だけ離れた、交差しない2つの線積分（ビーム）の相関をとる（図 6.3 d(b)）。これによって、揺動の空間相関 $\langle \epsilon_k \delta_k \rangle$ が得られる。さらに2つのビームを配置し、 h だけ離れた平面のそれぞれに2つの交差するビームを配置する（図 6.3 d(c)）。この距離 h を変化させて測定することによって、距離の関数として相関が求められるとともに、交差部の揺動の自乗平均で規格化することにより相関関数が得られると期待される。

定量的な評価を行うために、相関関数がガウス型分布を持つとして解析を行った。その結果、空間的に一様等方な揺動（相関関数）の場合には、相関関数の測定が可能であること、測定の局所性はビームの交差角度と相関長に依存することがわかった。また、通常、磁化プラズマでは、磁力線方向に長い相関長が期待されるが、この場合に磁力線に平行、垂直方向には正しい相関長が求められることがわかった。さらに、磁力線にシアがある場合には、定量的な相関長が得られる。このことを利用することにより、磁力線の方向を測定することが可能であることが示された。

電子バーンシュタイン波をもちいた電子温度計測法の開発

ST では電子サイクロトロン波（ECW）は伝播することができない。このためこの波動を用いて電子温度を計測したり、電子加熱を行うことはできない。電子バーンシュタイン波（EBW）はこのような条件のもとでも伝播できる。しかし、電場が波動の進行方向と平行な静電波であり、真空中では伝播することができないため EBW はプラズマ外部に出てこない。しかし、EBW はプラズマと真空の境界付近に位置する高域混成共鳴点付近で ECW に線形モード変換するため、モード変換した ECW をプラズマ外部で検出すればプラズマ中心部の電子温度を測定することが期待できる。また、このモード変換の逆過

程を辿ることで、プラズマ外部から ECW を入射してプラズマを加熱することも可能となる。このようなアイデアの元にプラズマの放射する EBW を観測するためのラジオメータを設計した。今後、マイクロ波部品の組み立て、感度較正などを行い、13年度に測定を行う予定である。

トムソン散乱を用いた電子温度計測装置の製作

トムソン散乱を用いた電子温度、電子密度の分布計測を準備中である。この計測法は、まず、プラズマ中にレーザー光を入射する。この時レーザー光の強い電場は、プラズマ中の電子を激しく振動させる。振動した電子は、電磁波を再放射する。再放射された電磁波は、電子の運動の影響をうけて、ドップラシフトする。そのため、散乱された電磁波のスペクトルは、電子の速度分布を反映したものになる。そのスペクトルの幅から電子温度を、強度から密度を算出することができる。この方法では、プラズマ中の電子の速度分布関数の広がりを直接計測するため、信頼性の高い測定が可能である。

使用するレーザーは YAG の第二高調波（波長 532 [nm]）で出力 250 [mJ/pulse] であり、散乱光は ~ 1000 [photons/s] と少ないことが予測される。このため S/N の良い最適な検出系を構成するために検出素子、光ファイバーや光学系の設計などの検討を行っている。

6.3.2 原研との共同研究

日本原子力研究所との共同研究として、JFT - 2M トカマクにおいて揺動の発生機構と輸送の関連を明らかにするための研究を行っている。平成 11 年度から、高速移動可能なプローブ（レシプロケーティングプローブ）を設置し、スクレイブオフ及び周辺プラズマの計測を行った。実験の結果、浮遊電位が電極間で一致せず、トリプルプローブ計測が難しいことが判明した。そこでシングルプローブ法によって電子温度、密度分布を計測した。図 6.3 e は密度分布の測定結果である。また、この密度分布の減衰係数をもとに粒子輸送係数を求めると $2 \text{ m}^2/\text{s}$ であった。

6.3.3 核融合研との共同研究

CHS ヘリカル装置での不純物イオン計測

プラズマ中の不純物イオンが発する特性 X 線の良い時間分解能で測定するために、多層膜反射鏡を用いた軟 X 線分光器を開発した。用いた多層膜反射鏡は、15–20 eV のエネルギー分解能、10–25% の反射率を持つ分光素子で、測定エネルギー範囲は 300–1000 eV 程度である。分光器の原理は、入射角に対しブラッグ条件を満たすエネルギーを持った電磁波が反射することを利用して分光し、PIN 型の 20ch フォトダイオードで信号を検出する。過去の実験ではエネルギー

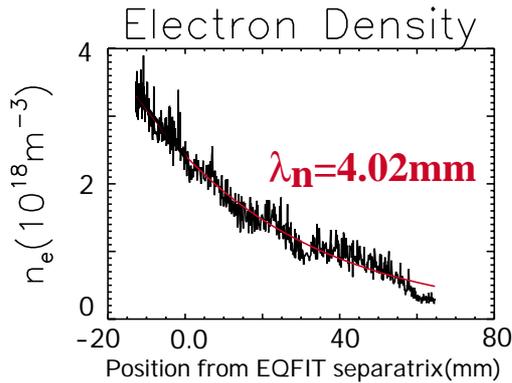


図 6.3 e: Edge density profile measured by a single Langmuir probe.

ギー範囲 500–1300 eV のスペクトルから連続スペクトル (制動放射・再結合放射) の式

$$I \propto \exp(-E/T_e)$$

を用いて電子温度を求めることを目的としたが、実際の電子温度を反映しないことがわかった。その原因として、不純物による発光の寄与が示唆された。これまでは多層膜反射鏡の全エネルギー範囲を測定するためにエネルギー分解能を犠牲にしていたが、不純物のラインスペクトルを同定する目的で、エネルギー分解能を改良した。この改造により、エネルギー分解能は 40 eV から 23 eV になり、測定エネルギー範囲は 640–800 eV になった。分光器最適化の結果、774 eV のエネルギーに O(1s-3p) のスペクトル線が確認でき、CHS プラズマ中の酸素イオンによる発光強度を計測することが可能となった。

LHD 用電流駆動アンテナの開発

ヘリカル型装置はプラズマ電流を必要とせず、外部コイルの作る磁場のみによりプラズマを閉じ込めることができる。しかし高 β で安定なプラズマを維持するためには、圧力駆動電流によって生じる理想的な磁場からのずれをキャンセルするように回転変換の径方向分布を制御する必要がある。これはプラズマ中に少量の電流を駆動することにより達成可能である。そのためには、高い指向性をもった進行波を励起することが必要である。核融合科学研究所の大形ヘリカル装置 LHD において速波による電流駆動実験を行うため、コムラインアンテナの開発を行っている。周波数は 85 MHz で電子とのランダウ共鳴を利用して電子を一方向に加速することにより電流を駆動する。平成 13 年度にはアンテナの製作を完了する予定である。

プラズマ中の径電場構造の理論

電極を用いたバイアス実験において、局所的にピークを持つ径電場の構造が測定されているが、これは改善閉じ込め現象を特徴づけるものである。電流保存の式にトカマクプラズマ中でのオームの法則を適用し、さらに空間的に電場が変化することによる拡散項を加えた式を解析することで、電場の空間分布を得る。非線形の微分方程式であるが、電気伝導率に近似的な 2 次式を用いることで解析的な取り扱いができる。電極間の距離を有限な値とした場合、複数個のピークを持つ解が求められる。また、解が存在する最小の電極間距離が存在し、解の個数はこの最小の電極間距離によって決まる。同一の条件で、複数の解が与えられるわけであるが、これが構造の分岐を説明する。縦軸に電極より流出する電流、横軸に電極間の電圧をプロットすると、実際に取る値は内部抵抗を含む回路の式との交点で与えられる。外部電圧を大きくしていくと空間的に一様な解からピークを持った構造へと遷移する。このとき一様な解から、ピークが 2 つある解へ、さらにピークが 1 つの解へと複数段階の遷移も可能となる。逆に外部電圧を小さくしていく場合には 1 段階の遷移のみ可能となり、ヒステリシスを持つ。

6.3.4 プリンストンにおける共同研究

日本国内では TST-2 は最大規模の ST 装置であるが、米国プリンストン大学プラズマ物理研究所の NSTX ならびに英国 UKAEA Fusion の MAST は TST-2 より一回り規模の大きな ST 装置である。どちらも平成 11 年に実験を開始しており、当研究室はこれらの研究グループと緊密な協力関係をもっている。特に NSTX の実験には直接参加しており、12 年度には HHFW を用いた高周波加熱、電子バーンシュタイン波 (EBW) の輻射を利用した新電子温度計測法の開発で共同研究を行い、13 年度も継続する予定である。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] J. Reardon, P.T. Bonoli, M. Porkolab, Y. Takase, W.J. Wukitch: Fast wave transmission measurements on the Alcator C-Mod tokamak, Phys. Lett. A 264, 407-411 (2000).
- [2] J.A. Snipes, A. Fasoli, P. Bonoli, S. Migliuolo, M. Porkolab, J.E. Rice, Y. Takase and S.M. Wolfe: Investigation of fast particle driven modes on Alcator C-Mod, Plasma Phys. Control. Fusion 42, 381-388 (2000)
- [3] S. Lee, S. Duorah, A. Ejiri, H. Iguchi, A. Fujisawa, E. Ishiyama, Y. Takase, H. Toyama, M. Aramaki, M. Kojima, S. Okamura, K. Matsuoka: Multilayer mirror soft x-ray spectrometer for fast electron temperature measurement on the compact helical system, Rev. Sci. Instrum. 71, 1671-1674 (2000).

- [4] P. T. Bonoli, M. Brambilla, E. Nelson-Melby, C.K. Phillips, M. Porkolab, G. Schilling, G. Taylor, S.J. Wukitch, R.L. Boivin, C.J. Boswell, C.L. Fiore, S. Gangadhara, J. Goetz, R. Granetz, M. Greenwald, A.E. Hubbard, I. H. Hutchinson, Y. In, J. Irby, B. LaBombard, B. Lipschultz, E. Marmor, A. Mazurenko, R. Nachtrieb, D. Pappas, C.S. Pitcher, J. Reardon, J. Rice, W. L. Rowan, J.A. Snipes, Y. Takase, S.M. Wolfe: Mode conversion electron heating in Alcator C-Mod: Theory and experiment, *Phys. Plasmas* **7**, 1886-1893 (2000).
- [5] P.T. Bonoli, R.R. Parker, M. Porkolab, J.J. Ramos, S.J. Wukitch, Y. Takase, S. Bernabei, J.C. Hosea, G. Schilling, J.R. Wilson: Modelling of advanced tokamak scenarios with LHCD in Alcator C-Mod, *Nucl. Fusion* **40**, 1251-1256 (2000).
- [6] A. Ejiri, K. Kawahata, Feasibility of Microwave Transmissivity Measurement to Obtain Density Profile of Sheet Plasmas, *Jpn. J. Appl. Phys.* **39**, 2839-2842 (2000).
- [7] T. Tokuzawa, K. Kawahata, R. O. Pavlichenko, K. Tanaka and A.Ejiri, Pulsed radar reflectometry on the LHD *Rev. Sci. Instrum.* **72**, 328-331 (2001).
- [8] T. Tokuzawa, K. Kawahata, K. Tanaka, Y. Ito, A. Ejiri, T. Simizu, New type of digital phase linearizer for real-time interferometric measurement *Rev. Sci. Instrum.* **72**, 1103-1106 (2001).
- [9] S. Duorah, A. Ejiri, S. Lee, H. Iguchi, A. Fujisawa, M. Kojima, K. Matsuoka, E. Ishiyama, K. Hanada, S. Shiraiwa, H. Toyama, and Y. Takase, Multilayer mirror based soft x-ray spectrometer as a high temperature plasma diagnostic *Rev. Sci. Instrum.* **72**, 1183-1187 (2001).
- (会議抄録)
- [10] Y. Takase, A. Ejiri, N. Kasuya, T. Mashiko, S. Shiraiwa, L.M. Tozawa, T. Akiduki, H. Kasahara, Y. Nagashima, H. Nozato, H. Wada, H. Yamada, T. Yamada, K. Yamagishi: Initial Results from the TST-2 Spherical Tokamak, in *Fusion Energy 2000* (Proc. 18th Int. Conf., Sorrento, Italy, 2000) paper IAEA-CN-77/EXP1/08.
- [11] T. Ogawa, K. Hoshino, S. Kanazawa, M. Saigusa, T. Ido, H. Kawashima, N. Kasuya, Y. Takase, H. Kimura, Y. Miura, K. Takahashi, C.P. Moeller, R.I. Pinsky, C.C. Petty, and JFT-2M Group: Radio Frequency Experiments in JFT-2M: Demonstration of Innovative Applications of a Traveling Wave Antenna, in *Fusion Energy 2000* (Proc. 18th Int. Conf., Sorrento, Italy, 2000) paper IAEA-CN-77/EXP4/06.
- [12] M. Ono, M. Bell, R.E. Bell, T. Bigelow, M. Bitter, W. Blanchard, D. Darrow, D. Gates, J. Hosea, S.M. Kaye, R. Kaita, S. Kubota, H. Kugel, D. Johnson, B. LeBlanc, R. Maingi, R. Maqueda, J. Menard, D. Mueller, B.A. Nelson, C. Newmeyer, F. Paoletti, S. Paul, Y.-K. M. Peng, S. Ramakrishnan, R. Raman, P. Ryan, S.Sabbagh, C. Skinner, T. Stevenson, D. Stutman, E. Synakowski, D. Swain, G. Taylor, A. Von Halle, J. Wilgen, M. Williams, J.R. Wilson, R. Ackers, A. Bers, J. Bialek, P. Bonoli, M.D. Carter, J. Chrzanowski, W. Davis, E. Doyle, L. Dudek, R. Ellis, P. Efthimion, J. Ferron, E. Fredd, M. Finkenthal, T. Gibney, R. Goldston, R.E. Hatcher, R. Hawryluck, K. Hill, T. Jarboe, S.C. Jardin, H. Ji, M. Kalish, L. Lao, K.C. Lee, N.C. Luhmann, H. Hayashiya, P. Lamarche, B. McCormack, R. Majeski, R. Marsala, T.K. Mau, E. Mazzucato, O. Mitarai, M. Nagata, G. Oliaro, H. Park, R. Parsells, T. Peebles, G. Pearson, C.K. Phillips, R. Pinsky, N. Nishino, A.K. Ram, J. Robinson, P.Roney, L. Roquemore, A. Rosenberg, M. Schaffer, S. Shiraiwa, P. Sichta, B. Stratton, Y. Takase, W.R. Wampler, G. Wurden, J.G. Yang, L. Zeng, W. Zhu, S. Zweben: Overview of the Initial NSTX Experimental Results, in *Fusion Energy 2000* (Proc. 18th Int. Conf., Sorrento, Italy, 2000) paper IAEA-CN-77/OV4/2.
- [13] J.R. Wilson, R. Bell, M. Bitter, P. Bonoli, M. Carter, D. Gates, J.C. Hosea, B. LeBlanc, R. Majeski, T.K. Mau, J. Menard, D. Mueller, S. Paul, C.K. Phillips, R. Pinsky, A. Rosenberg, P. Ryan, S.A. Sabbagh, D. Stutman, D. Swain, Y. Takase, J. Wilgen: High Harmonic Fast Wave Heating Experiments on NSTX, in *Fusion Energy 2000* (Proc. 18th Int. Conf., Sorrento, Italy, 2000) paper IAEA-CN-77/EXP4/08.
- [14] Y. Takase, A. Ejiri, N. Kasuya, T. Mashiko, S. Shiraiwa, L.M. Tozawa, H. Wada, T. Akiduki, H. Kasahara, Y. Nagashima, H. Nozato, H. Yamada, T. Yamada, K. Yamagishi: RF Wave Experiments on the TST-2 Spherical Tokamak, In *Proc. 2000 Int. Congress on Plasma Phys.* (Quebec, Canada, 2000), Vol. III, p. 780-783.
- (国内雑誌)
- [15] Y. Takase, Y.-K.M. Peng, A. Sykes, M. Nagata, T. Uyama, Y. Ono, Y. Nogi, M. Ono, T. Hayashi, M. Katsurai: Status and Future Prospects of the Spherical Torus Research, *Journal of Plasma and Fusion Research (プラズマ・核融合学会誌)* **76**, 503-552 (2000).
- (学位論文)
- [16] 益子岳史:「プラズマからの可視光強度の揺動測定」(修士論文)
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演

- [17] Y. Takase, A. Ejiri, S. Shiraiwa, M. Ushigome, N. Kasuya, Y. Nagashima, L. M. Tozawa, T. Mashiko, H. Nozato, T. Akiduki, H. Kasahara, H. Wada, H. Yamada, T. Yamada, K. Yamagishi: First Results from the TST-2 Spherical Tokamak, 3rd Japan-China Workshop on Plasma Control in Magnetic Fusion Device, Naka, May 23-26, 2000.
- [18] Y. Takase, A. Ejiri, N. Kasuya, T. Mashiko, S. Shiraiwa, L.M. Tozawa, T. Akiduki, H. Kasahara, Y. Nagashima, H. Nozato, H. Wada, H. Yamada, T. Yamada, K. Yamagishi: Research Activities on the TST-2 Spherical Tokamak, RCM on Comparison of Compact Toroid Configurations, IAEA Vienna, July 10-14, 2000.
- [19] T. Ogawa, K. Hoshino, S. Kanazawa, M. Saigusa, T. Ido, H. Kawashima, N. Kasuya, Y. Takase, H. Kimura, Y. Miura, K. Takahashi, C.P. Moeller, R.I. Pinsky, C.C. Petty, JFT-2M Group: RF Experiments on JFT-2M: Demonstration of Innovative Applications of a Traveling Wave Antenna, International Workshop on Heating and Transport in Tokamaks and ITER Expert Group Meeting on Fast Particles, Heating, and Steady State Operation, Frascati, October 11-13, 2000.
- [20] Y. Takase, A. Ejiri, N. Kasuya, T. Mashiko, S. Shiraiwa, L. Tozawa, H. Wada, H. Kasahara, H. Yamada, K. Yamagishi: RF Wave Experiments on the TST-2 Spherical Tokamak, 42nd Annual Meeting of the Division of Plasma Physics of The American Physical Society and the 10th International Congress on Plasma Physics, Quebec, October 23-27, 2000, Bull. Am. Phys. Soc. Vol. 45, No. 7, 345-346 (2000).
- [21] Y. Takase, H. Wada, N. Kasuya, T. Mashiko, L.M. Tozawa, H. Kasahara, H. Yamada, A. Ejiri, S. Shiraiwa, K. Yamagishi, M. Ushigome, Y. Nagashima, H. Nozato, T. Akiduki, T. Yamada: RF Experiments of TST-2, US-Japan Workshop on RF Physics, Nara, March 22-24, 2001.
- [22] T. Yamada, A. Ejiri, S. Shiraiwa, K. Yamagishi, M. Ushigome, N. Kasuya, Y. Nagashima, H. Nozato, T. Mashiko, T. Akiduki, H. Kasahara, H. Yamada, H. Wada, L. M. Tozawa: Two channel microwave reflectometry and interferometry using PIN switch 5th international workshop on Reflectometry, Gifu, March 6, 2001.
- (国内会議)
一般講演
- [23] 高瀬雄一: NSTX の状況報告 「NSTX における日米研究協力」研究会 核融合研 2000 年 5 月 31 日
- [24] 高瀬雄一: 高次速波を用いた加熱実験 「NSTX における日米研究協力」研究会 核融合研 2000 年 5 月 31 日
- [25] S. Shiraiwa, M. Ushigome, N. Kasuya, Y. Nagashima, L. M. Tozawa, T. Mashiko, H. Nozato, T. Akiduki, H. Kasahara, H. Wada, H. Yamada, T. Yamada, K. Yamagishi, A. Ejiri, Y. Takase: TST-2 における球状トカマク研究 「NSTX における日米研究協力」研究会 核融合研 2000 年 5 月 31 日
- [26] 白岩俊一: EBW を用いた電子温度計測法の開発 「NSTX における日米研究協力」研究会 核融合研 2000 年 5 月 31 日
- [27] 江尻晶、白岩俊一、高瀬雄一、牛込雅裕、永島芳彦、糟谷直宏、野里英明、益子岳史、山岸健一、ルシオ・ミノル・トザワ: TST-2 球状トカマク装置の設計とプラズマ実験の現状 核融合エネルギー連合講演会 春日井 2000 年 6 月
- [28] 糟谷直宏、高瀬雄一、和田浩史、白岩俊一、山岸健一、江尻晶、スミタ・ドゥオラ、牛込雅裕、永島芳彦、野里英明、益子岳史、戸沢ルシオ実: TST-2 球状トカマク装置における速波励起実験 核融合エネルギー連合講演会 春日井 2000 年 6 月
- [29] 徳沢季彦、R.O.Pavlichenko、川端一男、田中謙治、江尻晶: 大型ヘリカル装置用パルスレーダ反射計 核融合エネルギー連合講演会 春日井 2000 年 6 月
- [30] 江尻晶、白岩俊一、山田琢磨、牛込雅裕、永島芳彦、糟谷直宏、野里英明、益子岳史、ルシオ・ミノル・トザワ、秋月剛士、笠原寛史、山田秀治、和田浩史、山岸健一、高瀬雄一: TST-2 における球状トカマク研究 電気学会プラズマ研究会 東京 2000 年 9 月
- [31] 江尻晶、山田琢磨、白岩俊一、牛込雅裕、永島芳彦、糟谷直宏、野里英明、益子岳史、ルシオ・ミノル・トザワ、秋月剛士、笠原寛史、山田秀治、和田浩史、山岸健一、高瀬雄一: TST-2 球状トカマクにおけるイオン温度と電子密度のふるまい 日本物理学会第 55 回年次大会 新潟 2000 年 9 月
- [32] 糟谷直宏、和田浩史、笠原寛史、山田秀治、牛込雅裕、永島芳彦、野里英明、益子岳史、戸沢ルシオ実、秋月剛士、山田琢磨、白岩俊一、山岸健一、江尻晶、高瀬雄一: TST-2 球状トカマクにおける ICRF 速波波動実験 II 日本物理学会第 55 回年次大会 新潟 2000 年 9 月
- [33] 高瀬雄一: 球状トカマクの現状 「定常核融合をめざす炉心プラズマ研究の現状と物理課題」第 2 回会合 名古屋 2000 年 11 月 18 日
- [34] 高瀬雄一、J.R. Wilson, R. Majeski, J. Menard, M. Ono, C.K. Phillips, P. Ryan, D. Swain, R. Pinsky, NSTX Team: NSTX 球状トカマクにおける高周波加熱実験 プラズマ・核融合学会第 17 回年会 北海道大学 2000 年 11 月 27-30 日
- [35] S. Shiraiwa, G. Taylor, P. Efthimion, B. Jones, H. Hayashiya: Electron Bernstein Wave Data Analysis on NSTX プラズマ・核融合学会第 17 回年会 北海道大学 2000 年 11 月 27-30 日
- [36] 糟谷直宏、高瀬雄一、江尻晶、白岩俊一、牛込雅裕、永島芳彦、野里英明、益子岳史、戸沢ルシオ実、秋月剛士、笠原寛史、山田琢磨、山田秀治、和田浩史、山岸健一: TST-2 球状トカマクプラズマの性能改善 プラズマ・核融合学会第 17 回年会 北海道大学 2000 年 11 月 27-30 日

- [37] 永島芳彦、江尻晶、高瀬雄一、白岩俊一、三浦幸俊、星野克道、上原和也、仙石盛夫: JFT-2Mにおけるレシプロプローブ実験 プラズマ・核融合学会第17回年会 北海道大学 2000年11月27-30日
- [38] 高瀬雄一: NSTXにおけるHHFW実験 「コンパクト核融合炉を指向した高ベータプラズマの閉じ込め」及び第二回「NSTXにおける日米協力研究」合同研究会 核融合研 2000年12月15-16日
- [39] S. Shiraiwa, M. Ushigome, N. Kasuya, Y. Nagashima, L. M. Tozawa, T. Mashiko, H. Nozato, T. Akiduki, H. Kasahara, H. Wada, H. Yamada, T. Yamada, K. Yamagishi, A. Ejiri, Y. Takase: TST-2 球状トカマクの電源増力とプラズマ性能改善 「コンパクト核融合炉を指向した高ベータプラズマの閉じ込め」及び第二回「NSTXにおける日米協力研究」合同研究会 核融合研 2000年12月15-16日
- [40] 白岩俊一: 電子パーンシュタイン波を用いた電子温度計測法の開発 「コンパクト核融合炉を指向した高ベータプラズマの閉じ込め」及び第二回「NSTXにおける日米協力研究」合同研究会 核融合研 2000年12月15-16日
- [41] 高瀬雄一、飛田健次: 「高エネルギー粒子、加熱及び定常運転」Expert Group Meetingの報告 「MHD、ディスラプション及び制御」, 「高エネルギー粒子、加熱及び定常運転」第3回ITER物理R&D合同研究会 鳥羽 2001年1月5-6日
- [42] 和田浩史、山田秀治、江尻晶、糟谷直宏、白岩俊一、山田琢磨、戸沢ルシオ実、笠原寛史、牛込雅裕、永島芳彦、野里英明、益子岳史、秋月剛士、山岸健一、高瀬雄一: TST-2とLHDにおけるRF実験 第4回若手科学者によるプラズマ研究会 日本原子力研究所 2001年2月26日-28日
- [43] 高瀬雄一、山田秀治、和田浩史、糟谷直宏、渡利徹夫、熊沢隆平、武藤敬、関哲夫、C. P. Moeller: LHD用進行波励起型高周波アンテナの開発 日本物理学会第56回年次大会 中央大学 3/27-30/01
- [44] 江尻晶: 超微細構造測定のための可視光4ビーム相関法の開発 日本物理学会第56回年次大会 中央大学 3/27-30/01
- [45] 白岩俊一、牛込雅裕、永島芳彦、糟谷直宏、野里英明、益子岳史、秋月剛士、笠原寛史、山田琢磨、山田秀治、和田浩史、ルシオミノルトザワ、山岸健一、江尻晶、高瀬雄一: TST-2 球状トカマクにおけるMHD現象の観測 日本物理学会第56回年次大会 中央大学 3/27-30/01
- [46] 和田浩史、糟谷直宏、笠原寛史、白岩俊一、山岸健一、江尻晶、牛込雅裕、永島芳彦、野里英明、益子岳史、秋月剛士、山田琢磨、山田秀治、ルシオミノルトザワ、高瀬雄一: TST-2 球状トカマクにおけるICRF速波の伝播 日本物理学会第56回年次大会 中央大学 3/27-30/01
- [47] 山田琢磨、江尻晶、高瀬雄一、白岩俊一、山岸健一、牛込雅裕、糟谷直宏、永島芳彦、野里英明、益子岳史、秋月剛士、笠原寛史、山田秀治、和田浩史、ルシオミノルトザワ: TST-2 球状トカマクにおける密度のふるまい 日本物理学会第56回年次大会 中央大学 3/27-30/01
- 招待講演
- [48] 高瀬雄一、M. Greenwald, A. Hubbard: 「Alcator C-ModにおけるEnhanced D_{α} H-mode」周辺閉じ込め研究会 核融合研 2000年7月26日
- [49] 高瀬雄一: 「球状トカマク実験の最新動向」プラズマ科学シンポジウム2001/第18回プラズマプロセスング研究会 京都 2001年1月24-26日
- [50] 高瀬雄一: 「球状トカマク研究の現状」平成12年度第2回核融合研究委員会 原研那珂研 2001年2月1日
- (セミナー)
- [51] 高瀬雄一: 「トカマク及び球状トカマクにおける波動物理」筑波大学 2000年12月25-27日

6.4 坪野研究室

本研究室では重力と相対論に関する実験的研究を進めている。その中でも、重力波検出は一貫して研究室の中心テーマとなっている。また、進行中の実験である空間の等方性検証は、物理学の根幹に関わる課題である。これらの研究に関連して、熱雑音や精密計測に関する研究も同時に進めている。

重力波は光速で伝搬する時空のひずみであり、超新星爆発や連星中性子星の合体などの非常に激しい天体現象にともなって発生する。これを観測することによって、新しい分野「重力波天文学」を確立することが現在の重力波研究の目的である。

三鷹に建設された TAMA300 レーザー干渉計重力波検出器は、現在世界で最高の感度と安定性を達成しており、われわれの銀河系内でおきた重力波イベントを十分検出できるだけの性能を有している。現在は観測データ取得と装置改良を交互に実施しており、これまでに蓄積された観測データの解析も進んでいる。さらに、検出器の感度を上げて重力波検出を確実にするための次世代レーザー干渉計の開発研究に着手している [12, 13, 17, 19, 9, 44, 42, 43, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34]。

6.4.1 レーザー干渉計を用いた重力波の検出

TAMA プロジェクトの現状

TAMA プロジェクトは、日本国内の各機関が協力して基線長 300m のレーザー干渉計型重力波検出器 (TAMA300) を国立天文台三鷹キャンパス内に建設し、重力波観測を行う計画である。同様の計画は、アメリカ合衆国の LIGO、イタリア・フランスの VIRGO、ドイツ・イギリスの GEO など世界各国でも進められているが、TAMA では他計画より 1~2 年先駆けて、2000 年度より本格的な観測を開始した。TAMA では、パワーリサイクリングを除くほぼ全ての要素技術を組み込んだ状態での安定な動作が実現されており、観測運転と感度・安定度の向上が並行して進められている。

TAMA300 は基線長 300m のファブリー・ペロー共振器を両腕に持つマイケルソン干渉計である。主干渉計を構成する光学素子は、それぞれ防振装置によって独立に懸架されている。また、干渉計は、大気の揺らぎによる光路長変動や音の影響を避けるために真空装置内に収められている。光源としては出力 10 W の Nd:YAG レーザーを用い、基線長 10 m のモードクリーナによって、レーザー光の空間モード整形と周波数安定化を行っている。

現在までに TAMA では、重力波振幅 $h_c \sim 10^{-19}$ という感度 (感度スペクトル $h \sim 5 \times 10^{-21} 1/\sqrt{\text{Hz}}$) が実現されている (図 6.4 c)。これは、レーザー干渉計としては世界最高の感度であり、我々の銀河系内での連星中性子星合体や超新星爆発といった重力波イベントがあれば十分検出可能な値である。感度を

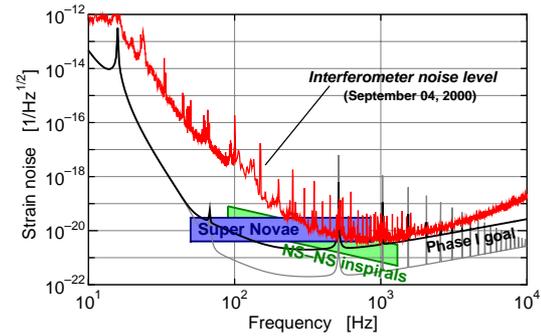


図 6.4 a: TAMA300 の感度曲線。銀河系内からの重力波の予想振幅と目標到達感度もあわせて描かれている。

制限する雑音源はほぼ特定されており (散乱光による雑音、鏡の姿勢制御による雑音等)、これらを改善していくことによって、より感度を向上できると考えられる [1]。

2000 年 8 月には、2 週間にわたる観測運転が行われ、160 時間以上のデータが取得された。観測は、主に、地面振動が静かな夜間に行われたが、干渉計は観測時間の約 95% 動作するという高い安定度を示した。取得されたデータは現在、連星中性子星の合体や超新星爆発、パルサーからの重力波を求めて解析が進められている [2, 10]。また、この観測運転後、防振・懸架系の改良が施され、外乱の大きな昼間でも、高品質のデータが取得できるよう改善されている。

その他、干渉計の制御技術や要素技術に関する開発研究もおこなった [3, 4, 5]。

TAMA 検出器の動作解析

レーザー干渉計は、非常に高感度であるがゆえに、様々な外乱の影響を受けやすい。そこで、干渉計の状態を把握することで、重力波以外の要因による偽の信号を除去し、データの質を高めることは不可欠である。また、長時間観測中には、地震や人工的な外乱、気圧・温度変化によるドリフト等によって、干渉計運転が妨げられたり、感度が低下するという問題も残っている。従って、干渉計の状態を解析・把握することによって干渉計の問題点・改良点を特定することや、感度の安定度を評価し重力波解析に生かすことなどが重要となる。

TAMA の観測中には、重力波イベント発生時に重力波信号が現れるはずのデータだけではなく、干渉計の他の自由度や地面振動、各種環境データなど補助的なデータが約 100 チャンネル記録されている。これらの信号を用いることによって、干渉計の動作が不安定になったり、感度が低下した場合、その原因を知ることができる。一方で、重力波信号ポートに大きな信号が現れた際には、これらの補助データは、地面振動や、レーザーの雑音などの重力波以外の要因を除去する材料となる。

現在、2000 年 8 月に行われた観測運転のデータを解析し、干渉計の状態の効率的な把握法や、そのシ

ステムの干渉計への組み込みの研究が進められている [15, 16]。

懸架点干渉計の開発

レーザー干渉計型重力波検出器では、地面振動の鏡への伝達を防ぐため、さまざまな防振機構が用いられる。しかし防振機構の共振周波数付近では鏡が大きく揺れてしまい、干渉計の安定性を損ねる。そこで、強力な永久磁石を用いた渦電流によるダンピングや、ローカルなセンサを用いた制御などで防振機構の共振を抑えている。しかしこれらの方法では、ローカルなセンサの雑音や変動が防振比を制限してしまう。

懸架点干渉計の方法では、主干渉計の鏡の懸架点にも鏡を取り付け、補助干渉計を構成する。主干渉計は補助干渉計から吊られる形になる。補助干渉計を用いて懸架点の相対変動をモニターし、それを打ち消すように制御をかけることによって、補助干渉計より上にある防振機構の共振を抑え込む。また、地面振動そのものも抑え込むことができる。センサとして干渉計において最も高感度なセンサである干渉計自身を用いるため、センサノイズやローカルな振動の混入といった問題が避けられる。さらに、最終段の鏡の制御に用いるアクチュエータの負担が軽減され、より低雑音のアクチュエータを用いることが可能になり、観測帯域でのアクチュエータ雑音を下げることができる。

懸架点干渉計の動作を確認するために、防振機構として3段振り子を用いた基線長15cmの試作機を作って実験を行った [25]。この実験では補助干渉計を制御することによって、3段振り子の共振を抑え、振り子の共振周波数以下においても地面振動の伝達を抑制することに成功した [39]。

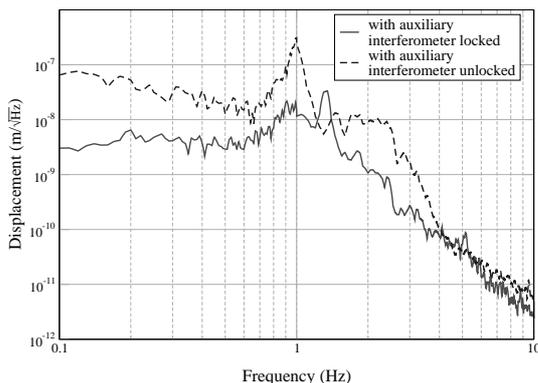


図 6.4 b: 補助干渉計をロックした場合と、しない場合における主干渉計のノイズスペクトルの変化。ロックした場合のほうが全体的にノイズが下がっている。また、1Hz と 2Hz 付近の共振ピークが抑えられている。

大型重力波望遠鏡計画

TAMA300 はわれわれの銀河系内の重力波イベントを検出するだけの感度をもっているが、重力波を確実に検出して天文学として成立させるためには、距離 200Mpc でのイベントを検出できるだけの性能が必要がある。このためには数キロメートル基線長をもった次世代大型レーザー干渉計が必須である。これを実現するため、東大宇宙線研を中心として低温利用のレーザー干渉計の開発が続けられている [27, 41]。また、本研究室では巨大ミラーを用いて熱雑音と輻射圧雑音を低減する方策を検討している。

GEO600

ドイツの重力波検出器プロジェクトである GEO プロジェクトと共同研究を行っている。

プロトタイプ: GEO プロジェクトでは、干渉計型検出器の制御に関する基礎実験のためにプロトタイプ干渉計を用いて研究を行っている。2000 年度は、プロトタイプの移転が行われ、これに伴い干渉計の基線長が 30 m から 12 m に変更された。2001 年度から、干渉計の応答のダイナミックな最適化技術の基礎実験を行う予定である。

GEO600: GEO600 は、Hannover に建設中の基線長 600 m の干渉計重力波検出器である。GEO600 では、低雑音化のためにデュアルリサイクリング/ モノリシックサスペンション/ 静電アクチュエータの採用等、数々の技術が採り入れられているが、このうち干渉計制御に用いる静電アクチュエータの設計を Glasgow 大学と共同で行っている。

6.4.2 相対論の基礎実験

空間の等方性検証

空間の等方性は、現代物理学の根本原理であるがゆえ、常に最高の精度で検証されることが肝要である。今までに、Michelson-Morley の実験に始まり、精度の向上がいくつかなされてきた。現在までで最も精度の良い実験は、1979 年の Brillet-Hall の実験であり、直交する方向の光速の比に対して、 10^{-15} の精度でおさえられている。本実験は、Brillet-Hall の実験に改良を加え、 10^{-16} の精度での検証を目的としたものである。

実験の原理は、次のとおりである。2 台の FP (Fabry-Perot) 共振器にレーザーをロックして周波数安定化した状態で片方の共振器を回転させ、ビートを観測する。空間に異方性があれば、ビート周波数の変化として観測されるはずである。また、FP 共振器の長さ変化による信号と空間の異方性による信号とは本質的に区別することができないので、共振器長の変化は極力抑える必要がある。そのために、本実験では、(a) 重力による変形を防ぐための傾斜制御 (b) 共振器長の熱変形を防ぐための温度制御 (c) 遠心力による共振器長の変化を防ぐための離散的回転機構を

導入している。

昨年度までは、ClearCeram Z 製のスペーサを用いた共振器を試験用に用いていた。今年度、より熱膨張率が小さく、性能の高い、ClearCeram 55 製スペーサを用いた共振器に取り替え、性能評価を行った [24]。また、当研究室の小林、高森により離散的回転機構の開発が進められた [40]。

6.4.3 熱雑音の研究

非一様な散逸による熱雑音の研究

懸架系や鏡の熱雑音は、干渉計型重力波検出器の観測帯域の感度を最終的に制限すると、考えられている。このため熱雑音の大きさを推定し、低減することは重要な課題である。従来はモード展開という方法を用いて熱雑音の推定が行われてきた。しかしこの方法は懸架系や鏡内部の散逸が非一様に分布しているとき正しくない [3, 14, 11]。そして非一様な散逸を持つ鏡の熱雑音を、最近開発された新しい推定方法で計算すると、モード展開の結果と大きく異なることが、昨年度の我々の研究から明らかになっている [11]。

今年度の研究は新しい推定方法から得られた昨年度の計算の結果の実験的検証である [11, 20, 35]。実際の鏡の熱雑音の測定は極めて困難であるので、鏡の代わりに drum を用いた。drum は外見は鏡と同じく円柱形であるが、中は空洞である。drum はアルミニウムでできており、磁石を利用して一部分にのみ eddy current damping をかけて、非一様な散逸を実現することができる。計算によると鏡でも drum でもレーザーのビームスポット付近に散逸が集中しているときは、新しい推定方法の結果はモード展開より大きく、スポットから離れているところに集中しているときには小さい。以上のことから drum を用いて昨年度の計算の実験的検証ができる。drum の熱雑音の直接測定は難しいので、機械的応答を測定し、測定結果を揺動散逸定理に代入することで、熱雑音を求めた。測定から得られた熱雑音のスペクトルは新しい推定方法による結果と一致した。この結果は新しい推定方法による昨年度の計算結果を支持している。つまり非一様な散逸による鏡の熱雑音を推定するためには、従来のモード展開でなく、新しい方法を用いなければならない [45]。

鏡材料の機械損失に関する研究

干渉計型重力波検出器における鏡の熱雑音の低減のためには、機械損失の小さな鏡材料が用いられなければならない。機会損失の小さな鏡材料の探索や鏡における機械損失の過程の理解のため、当研究室では、様々な材料の機械損失を独自に開発した手法によって測定している [4, 8]。

室温の干渉計において最も有望視されている鏡材料は、熔融石英である。そのため、国内外で製造さ

れている十数種の熔融石英の Q 値を測定した。結果、 10^6 から 10^7 にわたる、種類によって大きく異なる Q 値が測定された [36]。TAMA300 の最終感度のためには鏡の Q 値が少なくとも 2×10^7 必要であることが計算されており、従来これは非常に困難と考えられてきた。しかし、我々の測定で、バルクの熔融石英としては報告例のない高い Q 値、 3×10^7 を示す石英がいくつか見出されている。また、アニーリングによって Q 値が増加する石英もあった。このような各石英の差は、おのおのが含有している OH 基の量や熱履歴に起因すると理解されている。さらに、多くの石英には、周波数が低くなると損失が小さくなる傾向があることが分かった。干渉計型重力波検出器の観測帯域は機械損失の測定の周波数よりも数桁低い。機械損失が観測帯域でさらに小さくなるならば、熱雑音はこれまでに予測されている以上に低減されることになり、期待が持てる。

今後は、石英の機械損失を決定する要因の特定、機械損失の周波数依存性の研究、最適な熱処理法の探索や積極的な石英材料の開発などを行う。基材を鏡とするために行うコーティングにより導入される損失の評価実験や、将来の低温干渉計のための低温実験などにも、当研究室で開発された機械損失の測定法が応用されている。

6.4.4 精密計測の研究

低周波防振装置 SAS の開発

昨年度に引き続き、当研究室ではレーザー干渉計型重力波検出器のための R&D として、California Institute of Technology (LIGO / Caltech), Università di Pisa と共同で次世代防振装置 SAS (Seismic Attenuation System) の研究開発をおこなっている [21, 22, 23]。

本年度は、これまで研究してきた超低周波水平防振用の倒立振り子、低周波鉛直防振装置 GAS (Geometric Anti-Spring) といった SAS の構成要素に加え、SAS と組み合わせる鏡懸架装置の研究、開発をおこなった [18, 46, 38]。

さらにこれらの研究を統合して TAMA300 に組み込み可能な SAS (TAMA SAS) を 3 台作成した。内一台はプロトタイプであり、これを用いて Caltech においてローカルコントロールの研究、試験をおこなった。

現在、TAMA SAS の特性評価のために、2 台の装置を本研究室の 3m プロトタイプ干渉計に組み込み、実際に SAS で防振された Fabry-Perot 共振器を動作させるべく実験をすすめている [37]。また、長さ基準としてレーザーを用いて振動評価をおこなうため、共振器に入射するレーザーの周波数安定化が必須であり、この研究も平行して進めている [38]。本年度中にすべての評価を完了する予定である。



図 6.4 c: 3m プロトタイプ干渉計の真空槽に組み込まれた SAS。倒立振り子、2 台の GAS フィルター、鏡懸架装置からなる受動的防振装置を、倒立振り子上部に取り付けたセンサー、アクチュエータによって制御する。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Masaki Ando, Koji Arai, Ryutarō Takahashi, Gerhard Heinzel, Seiji Kawamura, Daisuke Tatsumi, Nobuyuki Kanda, Hideyuki Tagoshi, Akito Araya, Hideki Asada, Youich Aso, Mark A. Barton, Masa-Katsu Fujimoto, Mitsuhiro Fukushima, Toshifumi Futamase, Kazuhiro Hayama, Gen'ichi Horikoshi, Hideki Ishizuka, Norihiko Kamikubota, Keita Kawabe, Nobuki Kawashima, Yoshinori Kobayashi, Yasufumi Kojima, Kazuhiro Kondo, Yoshihide Kozai, Kazuaki Kuroda, Namio Matsuda, Norikatsu Mio, Kazuyuki Miura, Osamu Miyakawa, Shoken M. Miyama, Shinji Miyoki, Shigenori Moriwaki, Mitsuru Musha, Shigeo Nagano, Ken'ichi Nakagawa, Takashi Nakamura, Ken-ichi Nakao, Kenji Numata, Yujiro Ogawa, Masatake Ohashi, Naoko Ohishi, Satoshi Okutomi, Ken-ichi Oohara, Shigemi Otsuka, Yoshio Saito, Misao Sasaki, Shuichi Sato, Atsushi Sekiya, Masaru Shibata, Kentaro Somiya, Toshikazu Suzuki, Akiteru Takamori, Takahiro Tanaka, Shinsuke Taniguchi, Souichi Telada, Kuniharu Tochikubo, Takayuki Tomaru, Kimio Tsubono, Nobuhiro Tsuda, Takashi Uchiyama, Akitoshi Ueda, Ken-ichi Ueda, Koichi Waseda, Yuko Watanabe, Hiromi Yakura, Kazuhiro Yamamoto, Toshitaka Yamazaki, and the TAMA collaboration, Stable Operation of a 300-m Laser Interferometer with Sufficient Sensitivity to Detect Gravitational-Wave Events within our Galaxy, *Phys. Rev. Lett.* **86** (2001) 3950.
- [2] Hideyuki Tagoshi, Nobuyuki Kanda, Takahiro Tanaka, Daisuke Tatsumi, Souichi Telada, Masaki Ando, Koji Arai, Akito Araya, Hideki Asada, Mark A. Barton, Masa-Katsu Fujimoto, Mitsuhiro Fukushima, Toshifumi Futamase, Gerhard Heinzel, Gen'ichi Horikoshi, Hideki Ishizuka, Norihiko Kamikubota, Keita Kawabe, Seiji Kawamura, Nobuki Kawashima, Yasufumi Kojima, Yoshihide Kozai, Kazuaki Kuroda, Namio Matsuda, Sumihiro Matsumura, Satoshi Miki, Norikatsu Mio, Osamu Miyakawa, Shoken Miyama, Shinji Miyoki, Eiichi Mizuno, Shigenori Moriwaki, Mitsuru Musha, Shigeo Nagano, Ken'ichi Nakagawa, Takashi Nakamura, Ken-ichi Nakao, Kenji Numata, Yujiro Ogawa, Masatake Ohashi, Naoko Ohishi, Akira Okutomi, Ken-ichi Oohara, Shigemi Otsuka, Yoshio Saito, Misao Sasaki, Shuichi Sato, Atsushi Sekiya, Masaru Shibata, Kazumichi Shirakata, Kentaro Somiya, Toshikazu Suzuki, Ryutarō Takahashi, Akiteru Takamori, Shinsuke Taniguchi, Kuniharu Tochikubo, Takayuki Tomaru, Kimio Tsubono, Nobuhiro Tsuda, Takashi Uchiyama, Akitoshi Ueda, Ken-ichi Ueda, Koichi Waseda, Yuko Watanabe, Hiromi Yakura, Kazuhiro Yamamoto, and Toshitaka Yamazaki, and the TAMA Collaboration, First search for gravitational waves from inspiraling compact binaries using TAMA300 data, *Phys. Rev. D* **63** (2000) 062001.
- [3] Masaki Ando, Koji Arai, Keita Kawabe, and Kimio Tsubono, Signal-separation experiments for a power-recycled Fabry-Perot-Michelson interferometer by sideband elimination, *Phys. Lett. A* **268** (2000) 268.
- [4] Koji Arai, Masaki Ando, Shigenori Moriwaki, Keita Kawabe, and Kimio Tsubono, New signal extraction scheme with a harmonic demodulation for power-recycled Fabry-Perot-Michelson interferometers, *Phys. Lett. A* **273** (2000) 15.
- [5] Norikatsu Mio, Masaki Ando, Gerhard Heinzel, and Shigenori Moriwaki, High-power and low-noise photodetector for interferometric gravitational wave detectors, *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** (2001) 426.
- [6] K. Yamamoto, S. Otsuka, M. Ando, K. Kawabe, and K. Tsubono, Experimental study of thermal noise caused by an inhomogeneously distributed loss, *Phys. Lett. A* **280** (2001) 289.
- [7] K. Numata, G. Bertolotto Bianc, N. Ohishi, A. Sekiya, S. Otsuka, K. Kawabe, M. Ando, K. Tsubono, Measurement of the intrinsic mechanical loss of low-loss samples using a nodal support, *Phys. Lett. A* **276** (2000) 37.

- [8] K. Numata, G. Bertolotto Bianc, M. Tanaka, S. Otsuka, K. Kawabe, M. Ando, K. Tsubono, Measurement of the mechanical loss of crystalline samples using a nodal support, *Phys. Lett. A* (2001, in press) .
- [9] N. Kanda and the TAMA collaboration, TAMA Status Report, *Int. J. Mod. Phys. D* **9** (2000) 233.
- [10] H. Tagoshi, T. Tanaka, N. Kanda, D. Tatsumi, S. Telada, M. Ohashi, and the TAMA300 Collaboration, Searching for gravitational waves from inspiraling compact binaries using TAMA300 data, *Int. J. Mod. Phys. D* **9** (2000) 319.
- (学位論文)
- [11] 山元 一広 : Study of the thermal noise caused by inhomogeneously distributed loss、博士論文、2000年 12 月。
- (会議抄録)
- [12] Masaki Ando, Kimio Tsubono, and the TAMA collaboration: TAMA Project: Design and Current Status, *Gravitational Waves* (AIP Conference Proceedings, New York, 2000) p.128-p.139.
- [13] Masaki Ando and the TAMA collaboration: Current Status of the TAMA300 Interferometer, *Gravitational Wave Detection II* (Universal Academy Press, Tokyo, 2000) p.101-p.111.
- [14] K. Yamamoto, S. Otsuka, K. Kawabe, and K. Tsubono: Thermal noise of inhomogeneous loss, *Gravitational Wave Detection II*,(Universal Academy Press, 2000) p.233-p.240.
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [15] Masaki Ando and the TAMA collaboration: Noise behavior of TAMA300, Gravitational Wave Data Analysis Workshop (December 14-16, 2000, Louisiana State University Baton Rouge, U.S.A).
- [16] Masaki Ando and the TAMA collaboration, Noise behavior of TAMA300, Meeting on the final GW detector in the area of Asia and Oceania (November 15, 2000, ICRR, Kashiwa).
- [17] Masaki Ando and the TAMA collaboration, Current Status of TAMA300, LCGT-ACIGA collaboration meeting, (February 17-24, 2001, Australia National University, Adelaide University Western Australia University, Australia).
- [18] A. Takamori *et al*, Performance of Geometric Anti-Spring Filter (GASF) for Seismic Attenuation in Advanced Gravitational Wave Detectors, American Physical Society April Meeting 2000, Long Beach Convention Center (California, US), April 30, 2000.
- 招待講演
- [19] Kimio Tsubono: Status of TAMA, The 9th Marcel Grossman meeting (July 2000, Rome, Italy).
- (国内会議)
- 一般講演
- [20] 山元一広、大塚茂巳、安東正樹、河邊径太、坪野公夫 : 非一様な散逸による熱雑音の研究 V、日本物理学会第 55 回年会 (新潟大学、2000 年 9 月)
- [21] 高森昭光, 安東正樹, A.Bertolini, G. Cella, R. DeSalvo, 福嶋美津広, 川村静児, Sz.Marka, 沼田健司, V. Sannibale, 宗宮健太郎, 高橋竜太郎, H.Tariq, 坪野公夫, N. Viboud, C.Wang, H. Yamamoto, 依田達夫 : Seismic Attenuation System (SAS) for gravitational wave detectors I、日本物理学会第 55 回年会 (新潟大学、2000 年 9 月)
- [22] 沼田健司, 安東正樹, A.Bertolini, G. Cella, R. DeSalvo, 福嶋美津広, 川村静児, Sz.Marka, V. Sannibale, 宗宮健太郎, 高橋竜太郎, 高森昭光, H.Tariq, 坪野公夫, N. Viboud, C.Wang, H. Yamamoto, 依田達夫: Seismic Attenuation System (SAS) for gravitational wave detectors II、日本物理学会第 55 回年会 (新潟大学、2000 年 9 月)
- [23] 依田達夫, 安東正樹, A.Bertolini, G. Cella, R. DeSalvo, 福嶋美津広, 川村静児, Sz.Marka, 沼田健司, V. Sannibale, 宗宮健太郎, 高橋竜太郎, 高森昭光, H. Tariq, 坪野公夫, N.Viboud, C. Wang, H. Yamamoto : Seismic Attenuation System (SAS) for gravitational wave detectors III、日本物理学会第 55 回年会 (新潟大学、2000 年 9 月)
- [24] 小林義徳, 麻生洋一, 関谷淳, 上田晃三, 高森昭光, 安東正樹, 河邊径太, 坪野公夫 : 2 台のレーザーによる空間の等方性の検証 III、日本物理学会第 55 回年会 (新潟大学、2000 年 9 月)
- [25] 麻生洋一, 小林義徳, 安東正樹, 河邊径太, 坪野公夫 : 補助干渉計による主干渉計の安定化、日本物理学会第 55 回年会 (新潟大学、2000 年 9 月)
- [26] 新井宏二, 安東正樹, 高橋竜太郎, Gerhard Heinzl, 辰巳大輔, 川村静児, 沼田健司, 依田達夫, 高森昭光, 三尾典克, 神田展行, 森脇成典, 武者満, 三代木伸二, 長野重夫, 谷口信介, 朽久保邦治, 寺田聡一, 関谷淳, 河邊径太, 新谷昌人, 奥富聡, 山元一広, 大橋正健, 山崎利孝, 福嶋美津広, 大塚茂巳, 植田憲一, 藤本真克, 坪野公夫, 黒田和明, 他 TAMA Collaboration : レーザー干渉計型重力波検出器 TAMA300 の開発 X、日本物理学会第 55 回年会 (新潟大学、2000 年 9 月)
- [27] 黒田和明, 大橋正健, 三代木伸二, 佐藤修一, 石塚秀喜, C.T. Taylor, 藤本真克, 川村静児, 高橋竜太郎, 山崎利孝, 新井宏二, 辰巳大輔, 新富孝和, 山本明, 鈴木敏一, 齋藤芳男, 春山富義, 佐藤伸明, 内山隆, 坪野公夫, 安東正樹, 植田憲一, 米田仁紀, 武者満, 三尾克典, 森脇成典, 新谷昌人, 神田展行 : 大型低温重力波望遠鏡 (LTGT) 計画の現状、日本物理学会第 55 回年会 (新潟大学、2000 年 9 月)

- [28] 高橋竜太郎, 安東正樹, 新井宏二, 福嶋美津広 : TAMA300 用アクティブ防振装置の評価、日本物理学会第 55 回年会 (新潟大学、2000 年 9 月)
- [29] 藤本眞克、他 TAMA グループ : TAMA300 の現状 (7)、日本天文学会 2000 年秋季年会 (群馬県総合教育センター、2000 年 10 月)
- [30] 辰巳大輔、神田展行、他 TAMA collaboration : TAMA300 データ取得および解析の現状について、日本天文学会 2000 年秋季年会 (群馬県総合教育センター、2000 年 10 月)
- [31] 高橋竜太郎, 新井宏二, Gerhard Heinzl, 川村静児, 安東正樹, 辰巳大輔, 神田展行, 三尾典克, 森脇成典, 大橋正健, 三代木伸二, 福嶋美津広, 山崎利孝, 藤本眞克, 坪野公夫, 黒田和明, 他 TAMA Collaboration : レーザー干渉計型重力波検出器 TAMA300 X(現状)、日本物理学会第 56 回年会 (中央大学、2001 年 3 月)
- [32] 新井宏二, 高橋竜太郎, Gerhard Heinzl, 川村静児, 安東正樹, 辰巳大輔, 依田達夫, 沼田健司, 高森昭光, 三尾典克, 麻生洋一, 小林義徳, 近藤寿浩, 森脇成典, 三代木伸二, 武者満, 福嶋美津広, 山崎利孝, 藤本眞克, 坪野公夫, 黒田和明, 他 TAMA Collaboration : レーザー干渉計型重力波検出器 TAMA300 XII (検出器改良)、日本物理学会第 56 回年会 (中央大学、2001 年 3 月)
- [33] 安東正樹, 新井宏二, 高橋竜太郎, Gerhard Heinzl, 川村静児, 辰巳大輔, 神田展行, 森脇成典, 三代木伸二, 宮川治, 沼田健司, 宗宮健太郎, 端山和大, 矢倉宏美, 渡邊優子, 近藤寿浩, 三浦一介, 麻生洋一, 小林義徳, 福嶋美津広, 山崎利孝, 坪野公夫, 藤本眞克, 黒田和明, 他 TAMA Collaboration : 300m レーザー干渉計型重力波検出器 TAMA300 XI (干渉計分析)、日本物理学会第 56 回年会 (中央大学、2001 年 3 月)
- [34] 辰巳大輔, 安東正樹, 新井宏二, 高橋竜太郎, Gerhard Heinzl, 川村静児, 神田展行, 森脇成典, 三代木伸二, 宮川治, 沼田健司, 宗宮健太郎, 端山和大, 矢倉宏美, 渡邊優子, 近藤寿浩, 三浦一介, 麻生洋一, 小林義徳, 福嶋美津広, 山崎利孝, 大橋正健, 坪野公夫, 藤本眞克, 黒田和明, 他 TAMA Collaboration : レーザー干渉計型重力波検出器 TAMA300 XIII (データ解析)、日本物理学会第 56 回年会 (中央大学、2001 年 3 月)
- [35] 山元一広、大塚茂巳、安東正樹、河邊径太、坪野公夫 : 非一様な散逸による熱雑音の研究 VI、日本物理学会第 56 回年会 (中央大学、2001 年 3 月)
- [36] 沼田健司, 三代木伸二, 黒田和明, 新富孝和, 山本明, 鈴木敏一, 安東正樹, 坪野公夫 : 低損失材料の intrinsic Q 値測定 IV、日本物理学会第 56 回年会 (中央大学、2001 年 3 月)
- [37] 高森昭光, 安東正樹, A.Bertolini, G.Cella, R.DeSalvo, 福嶋美津広, 川村静児, Sz.Marka, 沼田健司, V.Sannibale, 宗宮健太郎, 高橋竜太郎, H.Tariq, 坪野公夫, N.Viboud, C.Wang, H.Yamamoto, 依田達夫 : Seismic Attenuation System (SAS) for gravitational wave detectors IV、日本物理学会第 56 回年会 (中央大学、2001 年 3 月)
- [38] 依田達夫, 安東正樹, A.Bertolini, G.Cella, R.DeSalvo, 福嶋美津広, 川村静児, Sz.Marka, 沼田健司, V.Sannibale, 宗宮健太郎, 高橋竜太郎, 高森昭光, H.Tariq, 坪野公夫, N.Viboud, C.Wang, H.Yamamoto : SAS 評価のための光源の安定化、日本物理学会第 56 回年会 (中央大学、2001 年 3 月)
- [39] 麻生洋一, 小林義徳, 榎並泰平, 大栗真宗, 西雄彦, 三谷烈史, 安東正樹, 河邊径太, 坪野公夫 : 補助干渉計による主干渉計の安定化 II、日本物理学会第 56 回年次大会 (中央大学、2001 年 3 月)
- [40] 小林義徳, 麻生洋一, 関谷淳, 上田晃三, 高森昭光, 安東正樹, 河邊径太, 坪野公夫 : 2 台のレーザーによる空間の等方性検証実験 IV、日本物理学会第 56 回年会 (中央大学、2001 年 3 月)
- [41] 黒田和明, 大橋正健, 三代木伸二, 石塚秀喜, 佐藤修一, C.T.Taylor, 藤本眞克, 川村静児, 高橋竜太郎, 山崎利孝, 新井宏二, 辰巳大輔, 福嶋美津広, 新富孝和, 山本明, 鈴木敏一, 斎藤芳男, 春山富義, 佐藤伸明, 内山隆, 坪野公夫, 安東正樹, 植田憲一, 米田仁紀, 武者満, 三尾典克, 森脇成典, 新谷昌人, 神田展行 : 大型低温重力波望遠鏡 (LCGT) 計画、日本物理学会第 56 回年会 (中央大学、2001 年 3 月)
- [42] 辰巳大輔、他 TAMA collaboration : TAMA300 観測の現状、日本天文学会 2001 年春季年会 (千葉大学、2001 年 3 月)
- [43] 川村静児、他 TAMA グループ : TAMA300 の現状 (8)、日本天文学会 2001 年春季年会 (千葉大学、2001 年 3 月)
- (セミナー)
- [44] 坪野公夫 : 動き始めた TAMA300 重力波検出器、東京大学物理学教室談話会 (本郷、2000 年 12 月)
- [45] 山元一広 : 非一様な散逸による熱雑音の研究、神岡研究会 (東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設、2001 年 3 月)
- [46] A. Takamori, Status of Seismic Attenuation System for TAMA300 (TAMA SAS), VIRGO seminar (Cascina, Italy), November 22, 2000.

6.5 佐野研究室

当研究室は、2000年4月に佐野雅己が着任してスタートした。佐野研究室の研究内容は、熱平衡から遠く離れた系に起こる秩序形成や乱れといった現象に潜む法則を実験的・理論的に解明することを目的としている。そのために非線形動力学や非平衡熱統計力学の手法と概念を用いるとともに、新たな手法と概念の構築も目指している。

非平衡状態において自発的にパターンや乱れが生じる現象は、近年急速に発達した分野であるカオスやパターン形成、フラクタルなどの研究以前からも流体現象においてその存在が広く知られていた。しかし、非線形力学系における分岐理論や相空間アトラクターの概念、カオスなどの理解の進展により、流体力学的現象がより具体的かつ新たな枠組みで捉えられるとともに、さらに大きなクラスである非線形力学系を持つ一般的な性質の一つとして体系が再編成されつつある。そのような観点からは、流体力学、固体力学、粉体、化学反応系、生命システムまで含めてパターン形成や非線形振動、カオスや乱流といった現象は共通しており、そこでは系の詳細によらず統一的に議論し扱うことが可能である。また一方で、非平衡現象は多彩であり、系の対称性や境界条件、初期条件、有効な自由度の数などにより多様な運動形態が生じ、普遍性ではなくくりきれない多様性と新奇な現象が発見される宝庫でもある。したがって研究の戦略として、典型的と思われる非平衡系の実験系を選び、良く制御された実験を行い非平衡度を上げていった時に見られる新たな現象を詳細に観測する。また、理論と実験の緊密なフィードバックにより新たな手法開発と概念構築を目指す。

初年度は、実験室の基盤整備や装置の移設に時間を要したが、2001年の3月末にはほぼ全体の実験装置の移設を終え、実験の立ち上げを行った。2001年度より村山能宏助手が着任し大学院生を加え、本格的な研究を開始する。

6.5.1 乱流と散逸大自由度系の研究

熱乱流の究極状態

発達した熱乱流系においては、Rayleigh-Benard 対流系を用いて制御パラメータであるレイリー数が極めて高い状態を実現し、究極の熱乱流状態の存在を探究した。従来、極めて高いレイリー数の乱流状態においては、温度境界層と粘性境界層の位置が逆転し、系全体の熱流（ヌッセルト数）がレイリー数の $1/2$ 乗に比例する究極状態の存在が予想されていた。本研究では、プラントル数が小さい水銀を用いて実験を行い（図 6.5 a）、レイリー数 10^5 から 10^{11} 、レイノルズ数 5×10^5 （低プラントル数における世界記録）を作りだし（図 6.5 b）、2つの境界層の逆転状態を初めて見出した。また、逆転にもかかわらず熱流の転移は起こらず、従来の予測は誤りであるとの仮説を提案した。さらに、境界層の空間構造、各種統計量を詳細に測定し、2つの境界層の厚さの比率

は常に一定でありレイリー数の $-2/7$ 乗に漸近して減少していく傾向があること、各種統計量の空間プロフィールは境界層厚さでスケールすると不変な形になることなどを明らかにした。

2000年3月末に乱流実験装置を東北大学より移設し実験室の冷却水循環設備工事を行い、現在運転開始の準備を行っている。今後は、境界層内のより詳細な構造を明らかにすべく、時系列相関に基づく速度境界層プロフィールの決定や境界層への摂動に対する系全体の輸送の応答などを調べる実験を計画している。

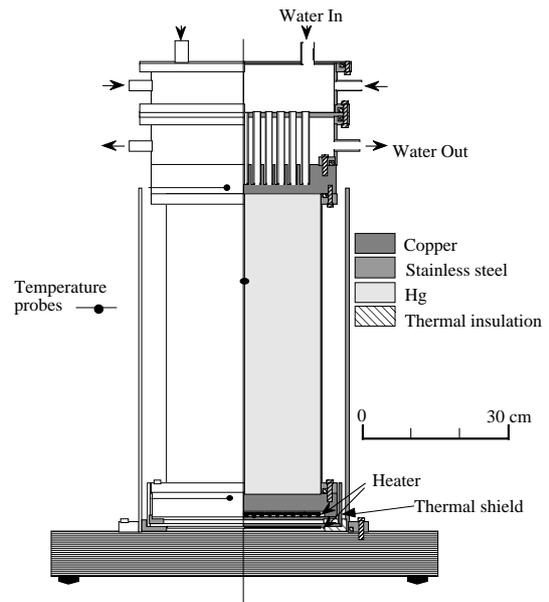


図 6.5 a: 低プラントル数流体用の熱乱流実験装置。

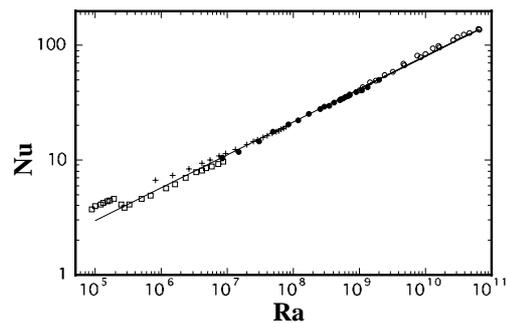


図 6.5 b: 実験で得られた熱乱流のマクロな熱輸送のスケール関係。横軸は、Rayleigh 数、縦軸は Nusselt 数。実線は $Nu \sim Ra^{2/7}$ のスケール関係を表す。

液晶対流系の乱流 - 乱流転移

乱流状態を調べるには極めて多数の空間フリーモードが不安定化するような実験系を選ぶのがよい。そのため的手段として通常は、大きな装置を用いるかレイノルズ数を大きくする方法が取られる。前項の熱乱流の実験はこの手段を用いている。一方、高分子や液晶などの複雑な液体では、レイノルズ数が小さくとも多数の空間モードが不安定化し、小さな装置でも乱流化が起こることが最近認識され注目されている。

例えばネマチック液晶では、電気的対流などの流れの効果により分子の配向の秩序が乱され乱流化が起こるが、この場合の流体中の駆動力と拮抗するのは配向の復元力であるため僅かの駆動力で大きな乱れが生ずる。そのためマイクロスケールのセルで大自由度の乱流が生成できるだけでなく、電界で精密かつ容易に制御できるという利点を持つ。電気対流における乱流に関しては、Dynamic Scattering Mode(DSM)と呼ばれる光を強く散乱する状態が古くから知られ、近年は DSM には DSM1 と DSM2 の 2 つの乱流状態がありその乱流 - 乱流転移のメカニズムが謎になっていた。また、DSM1 状態においては乱流中に巨視的な秩序構造が現われることが佐野等により見出された。これは、長時間の時間平均により初めて観測可能となる average pattern として、その原因の解明が問題となっていた。我々は、この DSM1 - DSM2 転移が、配向の自発的対称性の破れと流体効果の相互作用に起因するとの仮説のもとに実験を行い、円偏光を用いた可視化により、分子配向の対称性の破れに起因する配向の周期構造が乱流中に現われることを明らかにした。この結果、DSM1 における average pattern は、乱流中でもまだ液晶の配向秩序が保たれ、しかもその向きが空間的周期パターンを形成することにより乱流中の秩序を生じていることを明らかにした。これらは、最近ドイツの理論グループが、chevron pattern と呼ばれる高周波数で見られるパターンの解析に用いたモデルを乱流状態に拡張することにより理解できるとの見通しを得た。さらに、DSM2 状態から電界を切った時に現われる disclination loop の密度と長さ分布の測定を行った結果、DSM2 への転移は流れのせん断力が大きくなるため disclination loop が生成されそれらが流れにより引き伸ばされ、巨視的秩序構造の波長サイズを越えて広がるためマクロに配向秩序が失われて起こる乱流現象であるとの結論に達した。(発表準備中)

6.5.2 非線形系としての生命システム

一分子計測による DNA の凝縮転移と分子間相互作用の研究

生命の基本分子である DNA は、細胞内では小さく折り畳まれているが、必要に応じて引き伸ばされ、情報が読み出される。この凝縮機構には、棒状分子間の静電相互作用による凝縮相転移が関わっていると考えられている。また、RNA ポリメラーゼなどの

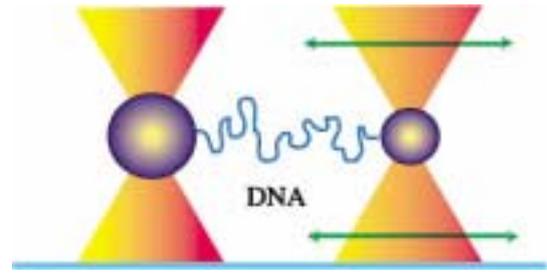


図 6.5 c: レーザーピンセットによる DNA 一分子の張力特性の測定。ビーズの直径は $3 \mu\text{m}$ 。

遺伝子の発現に関わる分子が遠くから DNA と結合することができる機構も静電相互作用によるものである。本研究では、棒状生体分子である DNA が溶液内イオンの制御と分子内相互作用により凝縮相転移する現象に着目し、この過程を初めて一分子計測の手法で力学的に測定することに成功した。

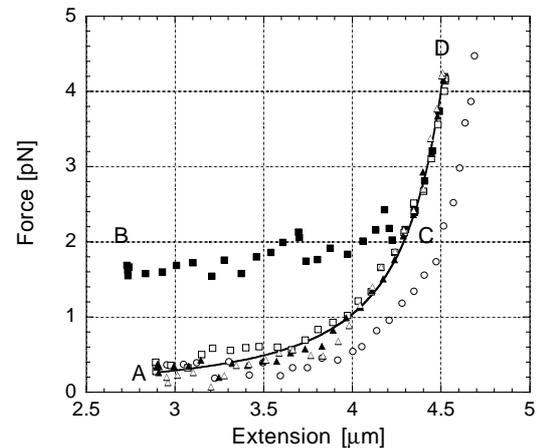


図 6.5 d: DNA 一分子の張力・伸び特性。実線は Worm Like Chain Model に基づく。○ は凝縮状態におけるプラトー特性。他の記号は、ランダムコイル状態での特性。

(方法と結果) ファージ DNA の一部 (15kbp) を利用し、片端をビオチン化、他端をジゴキシゲニン化しそれぞれアビジン化した $2 \mu\text{m}$ のビーズと抗ジゴキシゲニン化した $3 \mu\text{m}$ のビーズに特異的に結合させた。2 ビーム・レーザートラップ (波長 1064nm) を構成し、2 つのビーズをトラップし DNA 両端間の距離とその間に働く張力の測定を行った。チャンパー内の溶液を (10mM, Tris-HCl, pH 7.0) から 3 価のポリアミンである Spermidine を 2 mM 含むものに徐々に交換し、DNA の凝縮相転移を引き起こし、転移の前後において DNA の伸びと張力の関係を測定した。分子内相転移における伸びと張力の関係は、気液相転移における体積と圧力の関係と対応

することを利用し、DNA 分子どうしの相互作用のデータを得ることができる。

測定の結果、通常の溶媒中では DNA はランダムコイル状態にあり、その伸び・張力特性は WLC (Worm Like Chain) モデルで良く近似される。しかし、溶媒を 3 価のイオンである Spermidine を含むものに変えると DNA は凝縮転移を起こし、張力が上昇し、張力一定のプラトーが生じる。これは、3 価のイオンが DNA に凝縮することにより静電相互作用が変化するとともに、1 価イオンの移動に伴うエントロピーの増大により DNA セグメント間に引力が働き凝縮転移を起こしたと考えられる。張力一定のプラトーは、凝縮状態にある部分とランダムコイル状態の共存状態が生じている結果である。共存状態とランダムコイル状態の両曲線から、凝縮前後での仕事量が 1.6×10^3 kT と求まり、凝縮に伴う仕事は単位塩基対当たり、0.1 kT/bp という値が得られた。これは、溶液中の生体分子間相互作用を定量的に理解する上で重要である。今後は、DNA の凝縮および非凝縮状態において DNA と結合する分子モータが非平衡下 (ATP の存在下) で仕事をする過程などを一分子で測定することを計画している。

神経ネットワークの構造と時空間活動解析

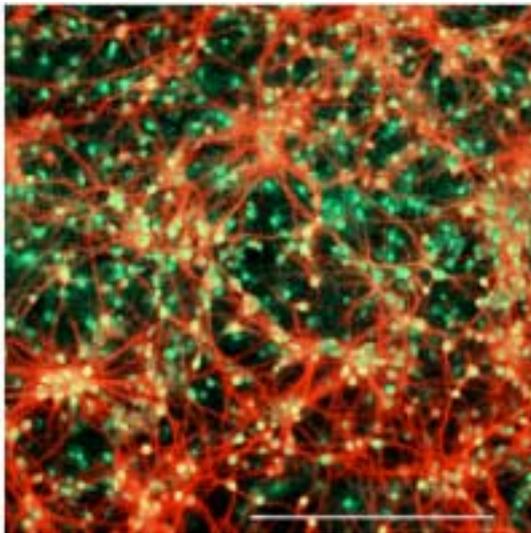


図 6.5 e: 培養神経回路の観察像：抗体染色した神経細胞（赤色）の画像と細胞内カルシウム濃度画像（緑色：神経及びグリア細胞）を重ねたもの

大脳皮質細胞の分散培養（ラット胎児）を行い、ガラス基板上で神経ネットワークを形成させ、その上に生ずる同期発火現象や Ca^{2+} ウェーブ現象を光学測定により観測した。さらに神経に特異的なタンパクを抗体染色することで、神経細胞とその間のデンドライトによる結合状態、グリア細胞の特定などを行い、ネットワークの空間構造と Ca^{2+} の時空間活動

の詳細な比較を行った。視野内の全ての細胞の Ca^{2+} 濃度の時間変化を長時間にわたって測定し、同期発火を周期発火、非周期発火、伝搬型に分類するとともに、同期クラスターに含まれる細胞を同定する新しい解析方法として、相関行列、主成分分析、クラスター分析、独立成分解析などを用いることを提案してその有効性を示した。また、神経・神経間の時系列相関、神経・グリア間、グリア・グリア間の時系列相関分布などを初めて明らかにした。抗体染色により、ネットワーク構造の形成過程を定量的に特徴づけ、結合領域の慣性半径が日数とともに指数関数的に増大することを見出した。

今年度の研究は、科研費 基盤研究 B、「散逸大自由度系の実験 - ゆらぎと非線形ダイナミクス of the 観点から -」（代表者：佐野雅己）の援助のもとに行われた。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Y. Murayama and M. Sano: Force Measurement of Single DNA Molecules in the Collapsing Phase Transition J. Phys. Soc. Jpn. 70, 345-348 (2001).

(会議抄録)

(国内雑誌)

- [2] 佐野雅己: 非線形科学と生命科学の接点, 物性研究, 75, No.4, 767-773 (2001).

(学位論文)

(著書)

- [3] 堀口剛、佐野雅己: 「数理情報物理学」(朝倉書店、2000) 1-268.

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [4] Y. Murayama and M. Sano: Force measurement of single DNA molecules in coil-globule transition, Dynamical Aspects of Complex Systems from Cells to Brain (Sendai, 2000, Dec.)

- [5] A. Yoshida and M. Sano: Collective Dynamics of Intracellular Calcium Activities and its Relation to Network Structures in Culture of Neuron-Glia Cells, Dynamical Aspects of Complex Systems from Cells to Brain (Sendai, 2000, Dec.)

招待講演

- [6] M. Sano, T. Segawa, A. Naert, and J. Glazier: Asymptotic State of Thermal Turbulence The 8th Asian Pacific Physics Conference (Taipei, 2000, Aug.7-10)

- [7] M. Sano: Propagation of Calcium Wave in Networks of Astrocyte - Neuron Cultures, The 6th Minerva Winter School, "Physical Aspects of Biological Systems" (Israel, Weizmann Institute of Science, 2000, Feb.27-Mar.3)
- [8] M. Sano: "Calcium Wave Propagation in Networks of Astrocyte-Neuron Culture" RIMS Project 2000 "Reaction-diffusion Systems: Theory and Applications" Interfaces, Pulses and Waves in Nonlinear Dissipative Systems (Kyoto, 2000, Aug.)

(国内会議)

一般講演

- [9] 村山能宏、坂巻義彦、佐野雅己: 「DNA のコイル・グロビュール転移における張力測定」日本生物物理学会第38回年会(東北大学)2000年9月

招待講演

- [10] 佐野雅己: 「流れの二つの極限」神部勉先生退官記念講演会、21世紀の流体物理学 展望と課題 (2000年5月13日)
- [11] 佐野雅己: 物理学の最前線(東北大学理学部): 複雑さを読み解く, 2000年6月23日
- [12] 佐野雅己: 「熱乱流の問題について」文部省統計数理研究所共同研究会「21世紀に向けた乱流の問題」, (2000年11月20日)
- [13] 佐野雅己: 「DNA 一分子のダイナミクス」国際高等研究所研究会「巨視的乱雑系の力学」, (2000年12月16日)

(セミナー)

- [14] 佐野雅己: 東京大学大学院理学系研究科和達研究室、2000年6月1日
- [15] 佐野雅己: 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻、2000年12月21日

(講義等)

- [16] 佐野雅己: 現代物理学入門(4年生)(分担任当): 複雑な系を読み解く, 2000年7月10日
- [17] 佐野雅己: 物理出前授業(日本物理学会東北支部): 力学とカオスの世界, 東北工業大学附属電子高等学校, 2000年7月17日
- [18] 佐野雅己: 「非線形科学と生命科学の接点」: 物性若手夏の学校サブゼミ講師(鳥取、2000年8月)
- [19] 佐野雅己: 熱統計力学(大学院)(東北大学大学院工学研究科), 2000年度前学期
- [20] 佐野雅己: 情報物理学(大学院)(東北大学大学院情報科学研究科), 2000年度前学期
- [21] 佐野雅己: 流体力学(3年生), 2000年度冬学期
- [22] 佐野雅己: 非線形物理学(大学院集中講義)(九州大学大学院総合理工学研究科), 2001年1月29-31日

6.6 山本研究室

星間分子雲は、恒星が形成される場所であり、宇宙における物質循環の主要経路にあたる。本研究室では、星間分子雲に存在する原子・分子に着目して、サブミリ波望遠鏡による観測的研究と、実験室での分子分光を行っている。特に、天文学において未開拓の波長領域であるサブミリ波、テラヘルツ波領域(波長 1 mm から 0.1 mm)の検出技術の開拓に力を入れており、わが国ではじめてのサブミリ波望遠鏡を富士山頂に設置して観測を行っている。特に、中性炭素原子の放つ 492 GHz、809 GHz のスペクトル線の星間分子雲スケールでの広域観測を展開しており、その分布を一酸化炭素の分布などと比較することで、星間分子雲の詳細構造や形成過程を明らかにしつつある。また、このような研究を銀河系スケールで展開するために、口径 18cm 可搬型サブミリ波望遠鏡を開発している。さらに、国立天文台が中心となって推進する ASTE 計画、ALMA 計画にも積極的に参加している。

6.6.1 観測装置の開発・改良

富士山頂サブミリ波望遠鏡

富士山頂サブミリ波望遠鏡(口径 1.2 m)は、サブミリ波を観測するわが国で初めての望遠鏡である。富士山頂は冬季に気温が低く乾燥するので、サブミリ波天体観測を妨げる水蒸気が少なく、観測には絶好の場所である。その優れた観測条件を活かして、中性炭素原子(CI)のスペクトル線($^3P_1 - ^3P_0$; 492 GHz, $^3P_2 - ^3P_1$; 809 GHz)の観測を行い、星間分子雲の詳細構造や形成・進化、およびそこでの星形成過程を研究している。

富士山頂サブミリ波望遠鏡は 1995 年度より製作を行い、1998 年 7 月に富士山頂に設置された。その後、衛星通信回線を利用した遠隔制御によって観測を行っている。3 回の冬季の観測シーズンで、492 GHz のスペクトル線については 35 平方度に及ぶ領域のサーベイを行うことができた。これは、これまでの CI の観測規模を 1 桁上回るものであり、近傍星間分子雲における CI 分布の全貌を描き出しつつある。2000 年-2001 年の観測シーズンでは、昨年度と同様に 345 GHz/492 GHz/809 GHz の 3 バンド受信機を搭載した。しかし、492 GHz ミキサーが観測開始直後に不調となったため、809 GHz の CI スペクトル線観測に専念した。このスペクトル線の観測は、技術的困難のためにこれまで世界的にみてもほとんど行われていなかった。しかし、我々の 1 シーズンにわたる集中的観測の結果、いくつかの代表的分子雲において、はじめてその 2 次元分布を明らかにすることができた。また、中小質量星形成領域において、はじめて 809 GHz のスペクトル線を検出した。その結果、CI が存在する領域の物理状態を直接調べることが可能となった。

本研究は初期宇宙研究センター、ビッグバン宇宙国際研究センターのプロジェクトの 1 つとして推進

しており、国立天文台の関本裕太郎氏、立松健一氏、野口卓氏、大石雅壽氏、福井大学の斎藤修二氏、宇宙開発事業団の尾関博之氏、稲谷順司氏、東大工学部の藤原英夫氏らとの共同研究である。

受信機システム 本年度は 345GHz/492GHz/809GHz (すべて DSB ミキサー) の 3 バンド対応の受信機を搭載した。345GHz 帯と 492GHz 帯の 2 バンドを周波数帯域の広い distributed junction タイプの 492GHz 帯 SIS 素子ひとつで受信できるようにし、ミキサー 2 台で 3 バンドに対応した。492GHz ミキサーで、492GHz 帯と 345GHz 帯の 2 バンドを受信するために、必要な局部発振信号の切り換えシステムを製作した。光学系でのロスを低減した結果、809GHz 帯のシステム雑音温度は 4400K となり、従来の 3 分の 2 に減少させることができた。

音響光学型分光計の開発 18cm 望遠鏡ならびに、富士山頂サブミリ波望遠鏡で使用することを目的とした音響光学型分光計(AOS)を開発した。プラグセルは現在富士山頂で稼働している AOS(一号機)と同型のものを用いて(Marconi)、光学系を含む設計、製作を行った。LD には HL7851G (Hitachi)、CCD アレイには TH7811A (Thomson) を用いている。筐体の大きさは可搬性を重視し、(405 × 175 × 135 mm) と小型にした(一号機の 3 割の容量)。現在、入力信号レベル -34 dBm/MHz に対して、3 dB バンド幅 700 MHz、周波数分解能 1.6 MHz を達成していて、一号機より 10 dB 弱い信号を検出することが可能となった。

高速積分器の開発 音響光学型分光計から出力される分光データに対して高速な積分処理を行い、on the fly(OTF)方式のマッピング観測に対応可能な積分器の開発を行った。今回製作した積分器には、現行の富士山望遠鏡の積分器に比べて約 4 倍の処理速度の Z80CPU を搭載して高速化を実現した。また、データ入出力ポートを 2 系統備えたメモリ IC を採用することにより、データ転送時のデッドタイムを 32ms まで抑えた。ホスト計算機へのデータ転送は GPIB インターフェースを介して行なう。可搬性を考慮して省スペース化を図り、現行の富士山望遠鏡の積分器と比べて半分以下の容積を実現した。

チョッピング副鏡の開発 微弱かつコンパクトなサブミリ波源に対する感度を飛躍的に向上させる目的で、富士山頂サブミリ波望遠鏡用のチョッピング副鏡の開発を行っている。このチョッピング副鏡は、その駆動機構として、従来採用されてきた複数のアクチュエータで副鏡を支持する方式とは異なり、向かい合う歯車状の電磁石と永久磁石から成る全く新しい方式を採用している。現在は実験室において、二つの試作機の実験結果を踏まえて設計・製作された搭載機の性能評価および調整を行っている。現段階で 5 Hz の振動周期で duty cycle \approx 88% を達成している。この夏、望遠鏡に搭載し観測に用いる予定である。

望遠鏡モニタプログラムの改良 富士山望遠鏡の操作・モニタの諸プログラムは、従来は UNIX の X-Window システムを利用して遠隔操作を実現していた。しかしながら、コンソール-望遠鏡間の通信は通信速度 64kbps の衛星通信を介しているために、従来の X ウィンドウを転送する方法は負荷が大きく、望遠鏡操作の少なからぬ非効率化を招いていた。今回、富士山頂-コンソール間のデータ転送を行なうプログラムを新たに開発した。このプログラムは、転送されるデータ量を必要最低限に止め、GUI 操作のウィンドウの生成をコンソール側で行なう事により、データ転送に要する時間の大幅な短縮を実現している。

可搬型 18cm サブミリ波望遠鏡

本研究室では、小型（口径 18cm）で可搬型のサブミリ波望遠鏡を開発している [22]。この望遠鏡は、中性炭素原子が放射する二本のサブミリ波スペクトル線 ($CI\ ^3P_1-^3P_0$: 492GHz, $^3P_2-^3P_1$: 809GHz) による広域サーベイ観測を行うことによって、銀河系スケールにおける原子ガスの分布・運動・物理状態を調べることを目的としている。この望遠鏡の特長は、可搬型のため世界中のあらゆる優良観測サイトに持ち込むことができ、しかも主鏡口径が 18cm と小さい ($HPBW = 13' @ 492GHz$) ので広い領域をサーベイするのに適しているところにある。

受信機システムの開発 可搬型 18cm サブミリ波望遠鏡に搭載する目的で、492GHz/809GHz 帯の小型 SIS 受信機を開発した。ミキサ素子には国立天文台野辺山で作られた SIS 超伝導素子を使用している。受信機の冷却には、住友重機製の消費電力 1 kW の GM 2 段式 4K 冷凍機を用いている。フィード・ホーンにはダイアゴナル・ホーンを採用した。実験室における 492GHz 帯受信機の望遠鏡に搭載した状態での総合性能は、 $T_{sys} = 203\ K$ である。このうち入力部分の雑音成分は $T_{RF} \approx 150\ K$ と比較的高く、光学系およびデューワー窓材の選択等にまだ改善の余地が残されている。

制御システムの開発 可搬型 18cm サブミリ波望遠鏡の制御システムとして、Windows NT 計算機をベースにした制御システムを開発した。機器の制御およびモニタは、基本的には GPIB インターフェースを使用している。制御ソフトウェアは Visual C++ 言語により記述され、高地での作業性を考慮して操作はほぼ全て GUI で行えるようになっている。

チリ・アタカマ高地でのテスト運用 本年度末（平成 13 年 3 月）、この可搬型 18cm サブミリ波望遠鏡をチリ・アタカマ高地パンパラボラへ移設し、約二週間のテスト運用を行った。今回は天候不順のため、残念ながら科学的意義のあるデータは取得できなかったが、標高 4800m の高地で受信機デューワー内が 3K 近くまで冷却できた事を始め、望遠鏡システムが正常に機能することが確認された。



図 6.6 a: アタカマ高地パンパラボラでテスト運用中の可搬型 18cm サブミリ波望遠鏡

Atacama Submillimeter Telescope Experiment (ASTE)

ASTE は、チリ・アタカマ砂漠パンパラボラに、口径 10 m のサブミリ波望遠鏡を移設し、稼働させる計画である。この望遠鏡は、日米欧共同で進められている Atacama Large Millimeter Array (ALMA) 計画のプロトタイプであり、ALMA 建設予定サイトであるパンパラボラで、初めて実際に試験運用を行なう。また、ASTE は、南半球における初めての大口径サブミリ波望遠鏡である。本研究室では昨年度に引き続き、国立天文台、東京大学天文学科、名古屋大学、大阪府立大などのグループと共同で、この計画を推進してきた。望遠鏡は、2001 年 6 月まで野辺山で試験運用したのち、チリに移設する予定である。

ASTE 350 GHz 帯受信機の開発 本研究室では、野辺山のグループと共同で、ASTE に搭載するサブミリ波 350 GHz 帯超伝導受信機を開発を行ってきた。本年度は、IF の total power の安定性の評価、SIS junction にかける磁場の最適化、LO 光学系のアライメントの最適化などを行なった。その結果、受信機雑音温度は、最も良いところで 52 K@352 GHz と量子雑音限界の約 3 倍の値を示した。また、デューワー内部の温度と真空度の監視システムの製作や LO の Phase Lock 制御の一部リモート化も行った。

2001 年 1 月から、野辺山において、この受信機を望遠鏡に搭載し、 $CO(J = 3 - 2): 346\ GHz$ 、 $CS(J = 7 - 6): 343\ GHz$ 、 $HCN(J = 4 - 3): 356\ GHz$ などのテスト観測を行った。システム雑音温度は、比較的天候の良い時で 600 K (DSB) を得ている [30]。

6.6.2 星間物質の観測的研究

オリオン巨大分子雲における CI 広域分布とその起源 昨年度までに、Orion A, B 巨大分子雲に対する $CI\ ^3P_1-^3P_0$ 輝線の観測を行ってきた。観測領域は約 15 平方度、観測点数は約 8000 点にも及び、世界最大規

模のものである。観測の結果、CI輝線の分布は大質量形成領域である Orion nebula(M42) や NGC2024 から、低温な暗黒星雲にいたるまで、 $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ の分布とよく一致することがわかった。そして、CI と CO の存在量比も、分子雲のバルク領域に関しては 0.1-0.2 とほぼ一定の値を示した。CI/CO 比が意味することを調べるため、CI の強度をもとに同定した CI 雲に対してピリアル解析を行った。すると、CI/CO 比は分子雲が希薄なガスから形成される進化過程に相関を持つ可能性が明らかになった。しかし、なぜ分子雲バルク全域に対して CI/CO 比がほぼ一定の値を示すのかは、既存のモデルでは説明が困難であり、CI が分子雲内部で CO と共存できる新たなメカニズムの可能性を示唆している [23]。

牡牛座暗黒星雲 Heiles' Cloud 2 周辺領域の CI 広域観測 Heiles' Cloud 2 (HCL2) 周辺の $\text{CI } ^3P_1-^3P_0$ 輝線の観測は、現時点で 3.4 平方度、観測点数は 1389 点とかつてない規模に及んでいる。その結果から、この領域ではない領域に示す 3 つの特徴的領域が連続的に連なっていることがわかってきた。1. Dense Core 領域 CI/CO 比が 0.1 程度と低く、CI は主に分子雲表面近くの光解離 (PDR) 領域に付随している。2. CI Rich Cloud 領域 CI/CO 比が 0.2-0.7 程度と高く、CI から CO への変換がまだ十分に進んでいない。この領域は物質の存在量も比較的多い(可視減光 > 7 mag) ことから、形成初期段階にある若い分子雲ではないかと考えられる。3. Translucent Cloud 領域 CI/CO 比が 0.5 以上と高く、可視減光は 1-4 mag と低い値を示す。星間紫外光が雲内部まで浸透し、雲全体に PDR 領域が広がっている。

2001 年 2 月には、CI Rich Cloud の中の CI 輝線強度ピーク方向に対して、 $\text{CI } ^3P_2-^3P_1$ 輝線の観測を行った。輝線は検出できなかったが、その結果 CI の励起温度は 15 K 以下であることが導かれた。これにより、CI Rich Cloud における CI/CO 比は Dense Core 領域のそれよりも有意に高いことが確認された。さらに、2000 年 3 月、国立天文台野辺山 45m 望遠鏡を用いて CI Rich Cloud で CS、SO、 HCO^+ 分子を検出した。これにより、CI Rich Cloud 内部には、 10^4 cm^{-3} 程度の密度を伴い、星間紫外光から十分遮断された領域が存在することが明らかとなった [24]。

巨大分子雲 M17 の $\text{CI } ^3P_2-^3P_1:809\text{GHz}$ 輝線マッピング観測 M17(オメガ星雲) は距離 2.2 kpc にある III 領域で、その南西側に分子雲を伴っている。今年度はこの領域の $\text{CI } ^3P_2-^3P_1$ 輝線のマッピング観測を進めた。最終的な観測領域は M17SW を中心に 160 点、 $30' \times 20'$ に達した。CI ピークで $^3P_2-^3P_1$ 輝線と $^3P_1-^3P_0$ 輝線の強度から求めた CI 励起温度は $T_{\text{ex}} = 29.8 \pm 3.5\text{K}$ 、CI 柱密度 $N(\text{CI}) = 7.4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ であった。全体的には $^3P_2-^3P_1$ 輝線の分布は $^3P_1-^3P_0$ 輝線とほぼ同じように分布していたが、北東部で多少 $^3P_2-^3P_1$ 輝線が強くなっている。また CI 励起温度には東から西にかけての温度勾配が見られる。CI の柱密度分布と温度勾配は ^{13}CO の柱密度の分布と温度勾配 (Howe et al. 2000) とよく一致した。このことは CO と CI が分子雲内の同じ領域に存在する

ことを示している [25]。

散光星雲 NGC1333 方向での $\text{CI } ^3P_2-^3P_1$ 輝線の検出 中質量星形成領域である NGC1333 は、Orion KL 領域などの大質量星形成領域に比べると比較的低温 ($T_k \sim 20 \text{ K}$) かつ低密度 ($n(\text{H}_2) \sim 10^{3-4} \text{ cm}^{-3}$) の領域であることが知られている。我々は、この NGC1333 コア領域の H-H12 を中心とした 3×3 点に対して一点 380 秒の積分を行った結果、9 点全てにおいて有意な $\text{CI } ^3P_2-^3P_1$ 輝線を検出した [26]。大質量星など強烈な紫外光源の影響の無いこのような領域において、 $\text{CI } ^3P_2-^3P_1$ 輝線が検出されたのは、世界的にも初めてのことである。昨年取得した $\text{CI } ^3P_1-^3P_0$ 輝線の結果と併せて、局所熱平衡を仮定して NGC1333 コアの物理状態を求めた。CI の励起温度は 27 K であり、これは NH_3 の観測から求められている値 ($\sim 20 \text{ K}$) に比べてやや高い。また CI 柱密度は $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ であり、これから CI/CO 存在比は 0.24 という値が得られた。この値は、Orion KL 領域などの大質量星近傍における値 (CI/CO ~ 0.05) に比べて非常に高い値であり、むしろ紫外光源の影響の少ない静的な領域のそれに一致する。

ρ Oph 領域における $\text{CI } ^3P_2-^3P_1$ 輝線の検出 ρ Oph 領域 (ρ Oph) の暗黒星雲 L1688 に対して昨年度に行なった $\text{CI } ^3P_1-^3P_0$ 輝線観測における 2 つの強度ピーク位置 (ρ Oph A, CI peak) について、 $\text{CI } ^3P_2-^3P_1$ 輝線の観測を行ない、両方の位置において検出に成功した。2 輝線の観測結果から CI の励起温度を求めたところ ρ Oph A では 44 K、CI peak では 29 K となった。これらの値は CO の観測から得られたものよりも若干大きい、CI peak よりも ρ Oph A の方が高温であるという傾向には矛盾しない。この温度で局所熱平衡を仮定して CI/CO 柱密度比を求めたところ、0.10 (ρ Oph A)、0.17 (CI peak) となった。CI peak における比は他の領域より大きく、その原因として化学的に比較的若い領域である可能性が考えられる。

Orion A 分子雲の $\text{CI } ^3P_2-^3P_1$ 輝線観測 Orion A 分子雲は、太陽系近傍 (距離 450 pc) の巨大分子雲のひとつであり、大質量星が活発に生まれている領域である。本年度は CI の $^3P_2-^3P_1$ 輝線を用いて、Orion KL を中心に 1.5 グリッドで 252 点 (約 0.15 平方度) におよぶ観測を行なった。その結果、分子雲の ridge に沿って広く分布している $\text{CI } ^3P_1-^3P_0$ 輝線に比べて、 $\text{CI } ^3P_2-^3P_1$ 輝線は KL 付近に局在しており、 $\text{CI } ^3P_2-^3P_1/^3P_1-^3P_0$ 強度比が ridge の東側で高くなっていることが分かった。これは、OB 型星である θ^1, θ^2 による強烈な紫外線によって照らされていることによるものである。局所熱平衡を仮定して柱密度と励起温度を求めた結果、(1) CI 柱密度の分布と $^3P_1-^3P_0$ 輝線の積分強度の分布がほとんど一致している、(2) Orion KL、S 領域で柱密度は大きく ($8-10 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$)、ridge にも CI が広く分布している、(3) θ^1, θ^2 ori の周りを取り囲む高温領域 (60-100K) が存在している、などのことが分かった。さらに、CI の柱密度の分布と励起温度の分布を重ね合

わせると、柱密度ピークは高温領域に対して励起星から遠い側にあることも分かった。このことから紫外線の強さは CI の柱密度を決定する主要な要因ではなく (PDR モデルでもそのことは指摘されている) むしろ、geometry も含めた分子雲の構造による可能性があると考えられる [31]。

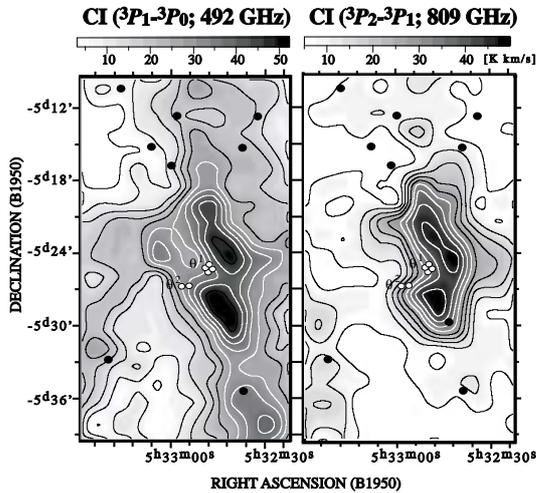


図 6.6 b: Orion A 分子雲の CI 積分強度図: 黒丸は IRAS point source、白丸は O, B 型星

巨大分子雲 DR21 の CI の ${}^3P_2-{}^3P_1$ 輝線による観測 典型的な大質量星形成領域として知られる巨大分子雲 DR21 のほぼ全域にわたり、CI ${}^3P_2-{}^3P_1$ 輝線を富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いて観測した。この領域の CI の分布は過去の ${}^3P_1-{}^3P_0$ 輝線による観測によって、CO の分布とほぼ一致していることが明らかになっているが、今回の観測に基づく LTE 計算の結果は、HII region に近い南部に位置するコア (DR21, W75S) では $N(\text{CI}) \sim 7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$, $T_{\text{ex}} \sim 35 \text{ K}$ であったのに対し、近傍に O 型星の存在しない北のコア (CO9) においては、 $N(\text{CI}) \sim 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$, $T_{\text{ex}} \sim 23 \text{ K}$ であることを示している。このことは、周囲の物理的な環境や、コアの性質の違いを反映して、各々の領域の CI が異なる起源から生じている可能性を示唆する。

Orion B 分子雲における CI ${}^3P_2-{}^3P_1$ 輝線のマッピング観測 Orion B 分子雲は距離約 400pc に位置する巨大分子雲の一つで、典型的な大質量星形成領域である。本年度は、Orion B 分子雲内の NGC2023, NGC2024 領域において CI ${}^3P_2-{}^3P_1$ 輝線の観測を行った。観測点は 1.5 分角グリッドで合計 264 点、約 0.2 平方度の領域にわたっている。CI ${}^3P_2-{}^3P_1$ 輝線の広がり、CI ${}^3P_1-{}^3P_0$ 輝線とおおむねよい相関を示すが、NGC2024 領域の強度ピーク方向に約 1.5 分のずれが見られた。また今回の観測により ${}^3P_2-{}^3P_1/{}^3P_1-{}^3P_0$ の強度比から LTE モデルを用いて、直接 CI の光学的厚み、励起温度、柱密度を求めた。その結果、励起温度の高い領域は ${}^3P_2-{}^3P_1$ 輝線の強度

ピーク方向に集中しており、柱密度の分布は ${}^3P_1-{}^3P_0$ 輝線の積分強度分布にほぼ一致することがわかった。 ${}^3P_2-{}^3P_1$ 輝線強度ピーク方向における励起温度、柱密度はそれぞれ 73 K、 $6.9 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ と求められた。さらに、 ${}^3P_2-{}^3P_1$ 輝線の強度 ピーク方向は CO, CS, CII などのピークとほぼ一致することから、支配的な励起星が ${}^3P_2-{}^3P_1$ 輝線強度ピーク方向に存在することが予想される [33]。

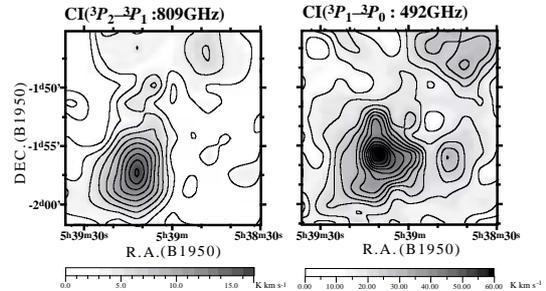


図 6.6 c: Orion B 分子雲/NGC2024 領域における、CI ${}^3P_2-{}^3P_1$ 輝線積分強度図 (左) と CI ${}^3P_1-{}^3P_0$ 輝線積分強度図 (右)

Photodissociation Region (PDR) モデル計算 星間空間に存在している分子雲では力学的変化 (収縮など) だけでなく、化学反応による化学的变化も起こっている。PDR モデルとは、外部からの FUV ($6 \text{ eV} < h\nu < 13.6 \text{ eV}$) に照らされた分子雲の状態を、chemical network (gas-gas, gas-dust 反応、photodissociation 反応) を解くモデルである。具体的には、FUV 強度: G_0 、cloud の密度: n と温度: T 、abundance の初期値をパラメータとし、スラブを切って各スラブごとに chemical network (418 個の分子種、4138 個の反応: 反応コードは NSM のものを使用) を時間に対して解いた。その結果、CO, CI の存在量は時間に対して敏感で、CI/CO 柱密度比は時間に対して減少していく傾向を示した。現在のコードでは、熱収支や cloud の収縮による密度変化は考慮に入れていない。そのため、より現実に近づけるためにこれらの効果を加えたシミュレーションを今後行っていく予定である。

6.6.3 実験室分子分光

星間分子雲には微量ではあるが様々な分子が存在している。それらの中には実験室の環境では寿命の短いフリーラジカルなどの「短寿命分子」が数多く含まれている。そのような分子の回転スペクトルは実験室での測定が容易でないため、星間分子雲に存在することが予想されていても、スペクトル線の周波数が知られておらず、探索ができていないものが少なくない。そこで、本研究室では、「短寿命分子」の回転スペクトルを実験室での高感度ミリ波サブミリ波分光によって研究している。

FCO ラジカルのマイクロ波スペクトル FCO ラジカルは大気の化学反応過程に重要な役割を果たしていると考えられている。この FCO ラジカルのマイクロ波領域でのスペクトルをフーリエ変換ミリ波分光計を用いて初めて測定した。FCO ラジカルは F_2CO とアルゴンの混合ガスを高圧放電させて生成し、その回転スペクトルを 22, 44, および 67 GHz 領域に測定した。スペクトルを解析することにより、この分子の電子状態についての情報を得た [10]。

フーリエ変換ミリ波分光計の測定周波数の 85 GHz までの拡張 これまで当研究室のフーリエ変換ミリ波分光計は約 10 GHz から 52 GHz の周波数帯で測定が可能であった。しかし 50–100 GHz の電波領域には HCN, HCCl など、天文学や化学反応動力学的の研究に応用できる、比較的重要で軽い分子の回転遷移が存在する。これらの分子の遷移周波数を正確に測定する目的でこの分光計の測定周波数領域を 65–85 GHz に拡張した。ミリ波の共鳴キャビティへの導入には減衰が大きい同軸ケーブルの代わりに導波管を用い、専用の半導体素子を用いることにより 65–85 GHz 領域の分子の遷移をこのタイプの分光計では初めて測定することができるようになった。これを用いて HCCl (71 GHz) および FCO (67 GHz) のスペクトルを測定した。

エチルラジカルのフーリエ変換ミリ波分光 エチルラジカル (C_2H_5) は基本的なアルキルラジカルである。エチルラジカルはメチル基の内部回転自由度をもち、その分子構造に興味を持たれている。今回、フーリエ変換ミリ波分光計を用いて、その回転スペクトル線 ($N_{K-1, K+1} = 1_{01} - 0_{00}$) を初めて検出することに成功した。エチルラジカルは C_2H_5I を Ar の中に希釈し、放電することによって生成した。43 GHz 領域を探索したところ、全部で 28 本の C_2H_5 回転スペクトル線を検出した。そのスペクトルは電子スピンや核スピンにより複雑に分裂するが、ゼーマン効果の解析から、うち 19 本を帰属する事ができた。それらを用いて最小二乗解析を行い、回転定数および微細、超微細構造相互作用定数を決定した [29][18]。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Tomofumi Umemoto, Hitomi Mikami, Satoshi Yamamoto, Naomi Hirano, “The Ortho-to-para Ratio of Ammonia in the L1157 Outflow”, *Astrophys. J.* **525**, L105-L108 (1999).
- [2] Shuji Saito, Hiroyuki Ozeki, Masatoshi Ohishi, & Satoshi Yamamoto, “Observations of NH_2D toward Dark Molecular Clouds”, *The Astrophysical Journal*, **535**, 227-230 (2000).
- [3] Hiroko Shinnaga & Satoshi Yamamoto “Zeeman Effect on the Rotational Levels of CCS and SO in the $^3\Sigma^-$ Ground State”, *The Astrophysical Journal*, **544**, 330-335 (2000)

- [4] Yutaro Sekimoto, Satoshi Yamamoto, Tomoharu Oka, Masafumi Ikeda, Hiroyuki Maezawa, Tetsuya Ito, Gaku Saito, Ken'ichi Tatematsu, Yuji Arikawa, Yoshiyuki Aso, Takashi Noguchi, Keisuke Miyazawa, Sheun-Cai Shi, Shuji Saito, Hiroyuki Ozeki, Hideo Fujiwara, Junji Inatani, Kazufusa Noda, & Yuichi Togashi, “The Mt. Fuji Submillimeter-Wave Telescope”, *Rev. Sci. Instr.*, **71**, 2895-2907 (2000).
 - [5] Satoshi Yamamoto, Hiroyuki Maezawa, Masafumi Ikeda, Tetsuya Ito, Tomoharu Oka, Gaku Saito, Mitsuhiro Iwata, Kazuhisa Kamegai, Takeshi Sakai, Yutaro Sekimoto, Ken'ichi Tatematsu, Takashi Noguchi, Sheng-Cai Shi, Yuji Arikawa, Yoshiyuki Aso, Keisuke Miyazawa, Shuji Saito, Hideo Fujiwara, Masatoshi Ohishi, Hiroyuki Ozeki, & Junji Inatani, “Observation of the $CI\ ^3P_2 - ^3P_1$ Line toward the Orion KL Region”, *The Astrophysical Journal*, **547**, L165-L169 (2001).
 - [6] Tomoya Hirota, Masafumi Ikeda, & Satoshi Yamamoto, “Observations of DNC and $HN^{13}C$ in Dark Cloud Cores”, *The Astrophysical Journal*, **547**, 814-828 (2001).
 - [7] T. Oka, S. Yamamoto, M. Iwata, H. Maezawa, M. Ikeda, T. Ito, K. Kamegai, T. Sakai, Y. Sekimoto, K. Tatematsu, Y. Arikawa, Y. Aso, T. Noguchi, S.-C. Shi, K. Miyazawa, S. Saito, H. Ozeki, H. Fujiwara, M. Ohishi, & J. Inatani, “Atomic Carbon and CO Isotope Emission in the Vicinity of DR15”, *The Astrophysical Journal*, **556**, in press (2001)
 - [8] K. Sorai, T. Hasegawa, R. S. Booth, M. Rubio, J.-I. Morino, L. Bronfman, T. Handa, M. Hayashi, L.-Å. Nyman, T. Oka, S. sakamoto, M. Seta, & K. S. Usuda, “The CO $J=2-1/J=1-0$ Ratio in the Large Magellanic Cloud”, *The Astrophysical Journal*, **551**, 794– (2001)
 - [9] D. Pierce-Price, J. S. Richer, J. S. Greaves, W. S. Holland, T. Jenness, A. N. Lasenby, G. J. White, H. E. Matthews, D. Ward-Thompson, W. R. F. Dent, R. Zylka, P. Mezger, T. Hasegawa, T. Oka, A. Omont, & G. Gilmore, “A Deep Submillimeter Survey of the Galactic Center”, *The Astrophysical Journal*, **545**, L121-L125 (2000)
 - [10] Hideta Habara & Satoshi Yamamoto, “Microwave spectrum of the FCO radical in the $^2A'$ electronic ground state” *Journal of Molecular Spectroscopy*, in press (2001)
 - [11] Hideta Habara & Satoshi Yamamoto, “Microwave spectrum and molecular structure of the HSC radical”, *Journal of Chemical Physics*, **112**, 10905-10911 (2000)
- (学位論文)
- [12] 池田正史 : Distribution of Atomic Carbon in the Whole Region of Orion Giant Molecular Cloud (オリオン巨大分子雲における炭素原子の広域分布)、(博士論文)

- [13] 前沢裕之 : Structure and Evolution of Taurus Molecular Cloud as studied by Submillimeter-Wave CI Line Observations (サブミリ波 CI 輝線観測による牡牛座分子雲の構造と進化の研究)、(博士論文)

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [14] T. Oka, T. Ito, K. Kamegai, N. Kuboi, K. Matuo, K. Tanaka, & S. Yamamoto, "CI $^3P_2-^3P_1$ Line Observations of Nearby Star Forming Regions", "Spectroscopy in the 21st Century", Hayama, Kanagawa, Japan (2001)
- [15] H. Habara, E. Kim, & S. Yamamoto, "Fourier Transform Millimeter-wave Spectroscopy of Transient Molecules in the Frequency Range up to 85 GHz", "Spectroscopy in the 21st Century", Hayama, Kanagawa, Japan (2001)
- [16] M. Ikeda, T. Oka, & S. Yamamoto, "Distribution of Atomic Carbon in the Orion Giant Molecular Cloud", "Spectroscopy in the 21st Century", Hayama, Kanagawa, Japan (2001)
- [17] Hiroyuki Maezawa, Takashi Noguchi, Sheng-Cai Shi, Yutaro Sekimoto, & Satoshi Yamamoto : "Developments of the 810-GHz SIS Receiver with Nb-Based Junctions", "1th International Symposium on Space Terahertz Technology", The University of Michigan (May 1-3, 2000)
- [18] Eunsook KIM, Hideta HABARA, and Satoshi YAMAMOTO : Fourier Transform Millimeter-wave Spectroscopy of the Ethyl Radical, "Spectroscopy in the 21st Century", Hayama, Kanagawa, Japan (March, 2001)

招待講演

- [19] Satoshi Yamamoto: "Large Scale Distribution of Neutral Carbon Atom in Interstellar Clouds Observed with Mount Fuji Submillimeter-wave Telescope", "Spectroscopy in the 21st Century", Hayama, Kanagawa, Japan (March, 2001)

(国内会議)

一般講演

- [20] 山本 智 : ASTE 計画進捗状況、日本天文学会 2000 年秋季年会 (群馬、2000 年 10 月)
- [21] 岡 朋治、他 富士山頂サブミリ波望遠鏡グループ : 富士山頂サブミリ波望遠鏡による近傍分子雲の [CI] 輝線観測、日本天文学会 (群馬県総合教育センター、2000 年 10 月)
- [22] 岡 朋治、山本 智、岩田充弘、亀谷和久、松尾公大、関本裕太郎、立松健一、神庭利彰 : 可搬型 18cm サブミリ波望遠鏡、日本天文学会 (千葉大学、2001 年 4 月)

- [23] 池田正史、他富士山頂サブミリ波望遠鏡グループ : オリオン巨大分子雲における CI の広域分布とその起源、日本天文学会 (千葉大学、2001 年 3 月)

- [24] 前沢裕之、山本智 : 牡牛座暗黒星雲の Heiles' Cloud 2 (HCL2) 領域における CI Rich Cloud の化学組成、日本天文学会 (千葉大学、2001 年 4 月)

- [25] 伊藤哲也、関本裕太郎、山本智、他富士山頂サブミリ波望遠鏡グループ : 富士山頂サブミリ波望遠鏡による巨大分子雲 M17 の炭素原子 $^3P_2-^3P_1$ 輝線の広域観測、日本天文学会 (千葉大学、2000 年 3 月)

- [26] 岩田充弘、岡 朋治、山本 智、他 富士山頂サブミリ波望遠鏡グループ : 富士山頂サブミリ波望遠鏡による NGC1333 領域での CI ($^3P_2-^3P_1$) 輝線の検出、日本天文学会 (千葉大学、2001 年 4 月)

- [27] 亀谷和久、池田正史、尾関博之、藤原英夫、吉田久史、他 富士山頂サブミリ波望遠鏡グループ : On-the-fly マッピング観測法対応の高速積分器システムの開発、日本天文学会 (千葉大学、2001 年 3 月)

- [28] 金銀淑、羽原秀太、山本智 : CS($X^1\Sigma^+$)、SO($b^1\Sigma^+$) 分子の振動励起状態のフーリエ変換ミリ波分光、分子構造総合討論会 (東京大学、2000 年 9 月)

- [29] 金銀淑、羽原秀太、山本智 : エチルラジカルのフーリエ変換ミリ波分光、日本化学会 (甲南大学、2001 年 3 月)

- [30] 酒井剛、関本裕太郎、立松健一、河野孝太郎、野口卓、田中邦彦、山本智、他 ASTE チーム : ASTE 350 GHz 帯受信機の安定性評価、日本天文学会 (千葉大学、2001 年 3 月)

- [31] 久保井信行、山本 智、岡 朋治、他富士山頂サブミリ波望遠鏡グループ : 富士山頂サブミリ波望遠鏡による OMC-1 の CI ($^3P_2-^3P_1$) 観測、日本天文学会 (千葉大学、2001 年 3 月)

- [32] 田中 邦彦、山本 智、岡 朋治、他富士山頂サブミリ波望遠鏡グループ : 富士山頂サブミリ波望遠鏡による DR21/W75 領域の CI($^3P_2-^3P_1$) 輝線の観測、日本天文学会 (千葉大学、2001 年 3 月)

- [33] 松尾公大、山本 智、岡 朋治、他富士山頂サブミリ波望遠鏡グループ : 富士山頂サブミリ波望遠鏡による OMC-1 の CI ($^3P_2-^3P_1$) 観測、日本天文学会 (千葉大学、2001 年 3 月)

招待講演

- [34] 山本 智 : 宇宙からの信号を分ける、東京大学公開講演会 (東京大学、2000 年 10 月)

- [35] 山本 智 : LMSA が拓くサイエンス、日本天文学会 LMSA 特別セッション (群馬、2000 年 10 月)

- [36] 山本 智 : 大型ミリ波サブミリ波干渉計計画と星間化学、分子構造総合討論会、シンポジウム「星間物質の化学：現状と将来」(東京大学、2000 年 9 月)

6.7 酒井広文 研究室

本研究室では、1) 高強度レーザー電場による中性分子の配向および偏向とその応用、2) 分子内波束の構造とダイナミクスに関する研究、および3) 超短パルス高強度レーザー光と原子分子等との相互作用に関する研究を中心に研究活動を行っている。本年度4月の峯本紳一郎助手と大学院生の加入により、まだ少人数ながら研究活動も本格化した。本年度の主な研究内容は以下の通りである。

6.7.1 2次元イオンイメージング装置の開発

非共鳴なレーザー光によって分子中に誘起された双極子と直線偏光したレーザー電場との相互作用により、分子をレーザーの偏光方向に配向させるトルクが働く。この原理を利用して分子をレーザーの偏光方向に揃えることができると期待される。実際、最近酒井広文らは、超短パルスレーザー技術と2次元イオンイメージング技術を駆使して、分子が配向していることを示す最も直接的な証拠を得ると共に配向度を定量的に評価することに成功した。本研究室では、高強度レーザー電場による中性分子の配向および配列制御とその応用を主要研究課題の一つとしている。

中性分子の配向とその検出は、以下の手順で行う。配向用レーザーには、パルス幅が数 ns の Nd:YAG レーザーの基本波 (波長: $1.06 \mu\text{m}$) を用いる。数 ns という時間は、多くの分子の回転周期よりも十分長く、分子の配向過程はいわゆる断熱領域で進行する。断熱領域では、分子の配向度はレーザーのパルス波形に追従すると期待できる。YAG レーザーパルス中で分子が配向している様子を観測するために、YAG レーザーパルスの瞬時強度が最大の時、フェムト秒レーザーパルスで分子をイオン化する。フラグメントイオンを2次元イオンイメージング技術を用いて観測し、データ解析を行うことにより、分子の配向状態を定量的に評価することができる。2次元イオンイメージング技術は、現時点では、分子の配向や配列を評価するのに最も有効な手法であると考えられる。

今年度、本研究室では、2次元イオンイメージングシステムを備えた実験装置を新たに開発した (図 6.7 a)。装置の設計に当たっては、以下の点を特に考慮した。1) 分子ビームの射出方向は、観測軸と同一とした。これにより、中心対称性の維持された歪みの無いイメージが得られる。2) フラグメントイオンの加速電極部は、静電レンズ効果を用いた velocity map imaging の手法を採用し、大口径 (直径 20 mm)、メッシュ無しの構造とした。velocity map imaging の手法を採用すれば、加速電圧の最適化により、初速度ベクトルの等しいフラグメントイオンは、検出器の同一点上に到達する。従って、空間分解能の高い測定を行うことが可能となる。装置の開発に関連して、CCD カメラで撮影した2次元イメージをディスプレイ上に表示するためのインターフェース部分

や特定のイオンを選択的に観測するための高速高電圧パルス電源なども自作した。図 6.7 b に観測したイオンイメージの例を示す。これは、 O_2 分子に直線偏光したフェムト秒 Ti:sapphire レーザー光 (波長 $\lambda = 800 \text{ nm}$ 、強度 $I = 6.0 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$) を照射することにより生成されるフラグメントイオンのうち、主に O^+ イオンを選択的に観測したものである。enhanced ionization を反映し、レーザーの偏光方向に沿って効率的にイオンが生成されていることが分かる。

配向した分子集団をサンプルとすることにより、従来空間平均を取って議論しなければならなかった多くの実験を、格段にクリアーな形で行うことが出来るようになるであろう。また、化学反応では、分子が反応対象物に対して特定の方向を向いている時に反応速度が増大する、いわゆる配置効果を示す場合がある。分子の配向技術は、このような配置効果の実験研究に役立つであろう。



図 6.7 a: 2次元イオンイメージングシステムを備えた実験装置

6.7.2 中性分子の配列制御に関する数値シミュレーション

酒井広文らが成功した中性分子の配向実験では、異核2原子分子 A-B の場合、配列 A-B と B-A は区別されていない。分子の配列を制御し、全ての分子を A-B または B-A に揃えることが出来れば、化学反応ダイナミクスにおける配置効果の研究や、光解離生成物の選択的制御等に有効であることは自明である。

本研究室では先に、2波長レーザー光の重ね合わせにより生成される非対称電場 (即ち、非対称ポテンシャル) を用いた中性分子の配列制御の可能性について検討した。分子の回転周期に比べて配列がゆっくり進む状況 (adiabatic regime) で、時間に依存しないシュレーディンガー方程式を数値的に解いて、orientation parameter $\langle\langle \cos\theta \rangle\rangle$ と alignment parameter $\langle\langle \cos^2\theta \rangle\rangle$ のレーザー強度依存性やレーザーパルス

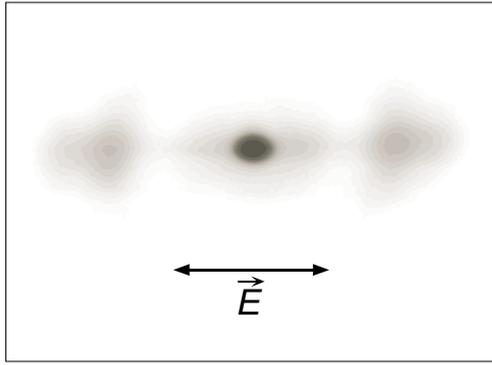


図 6.7 b: 開発した装置 (図 6.7 a) を用いて観測したイオンイメージの例。O₂ 分子に直線偏光したフェムト秒 Ti:sapphire レーザー光 (波長 $\lambda = 800$ nm、強度 $I = 6.0 \times 10^{14}$ W/cm²) を照射することにより生成されるフラグメントイオンのうち、主に O⁺ イオンを選択的に観測したもの。enhanced ionization を反映し、レーザーの偏光方向に沿って効率的にイオンが生成されていることが分かる。

内の時間発展等を評価した。ここで、 θ はレーザー電場の偏光方向と分子軸のなす角である。モデル分子と FCN 分子について計算を行い、回転温度の低い分子については、上記のアプローチにより配列制御できる可能性があることを示した。

本年度はさらに断熱領域以外の条件における配向や配列の時間発展を詳細に検討するため、時間に依存するシュレーディンガー方程式を数値的に解くコードを開発した。計算では、分子集団におけるボルツマン分布も考慮した。 $\langle\langle \cos\theta \rangle\rangle$ と $\langle\langle \cos^2\theta \rangle\rangle$ の時間発展について得られた知見をまとめると次のようになる。1) 断熱領域では、両者はレーザー光の時間発展に追従する。レーザー強度が大きいく程、それらの値も大きくなり、配列や配向の持続時間も長くなる。2) 非断熱領域では、レーザー光が通過した後も周期的変化を示し、その周期はレーザー強度が高いほど短くなる。3) 中間領域では、レーザー光の通過後、 $\langle\langle \cos\theta \rangle\rangle$ が激しい振動を示すのが特徴と言える。図 6.7 c に $\langle\langle \cos\theta \rangle\rangle$ の時間発展の計算例を示す。レーザーのピーク強度はいずれも 1.4×10^{12} W/cm² であり、レーザー光のパルス幅 (半値全幅) は (a) 断熱領域、(b) 非断熱領域、(c) 中間領域の順にそれぞれ、5 ns、5 ps、50 ps である。

非断熱領域で実験を行えば、レーザー光が通過した後に配向や配列が実現する可能性があり、高強度レーザー電場が存在しない状況が必要とする高精度な分光実験などに対する有力なアプローチとなりうる。また、時間に依存するシュレーディンガー方程式を数値的に解くことにより、2 波長のレーザー光を用い、超分極率の効果を取り入れた問題に対しても量子力学の断熱定理が厳密に成り立つことを最も

直接的に検証できた。

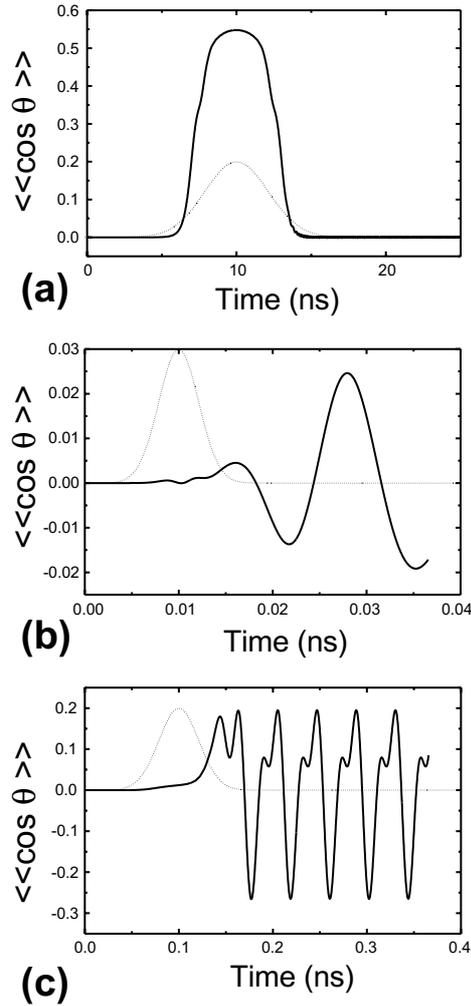


図 6.7 c: $\langle\langle \cos\theta \rangle\rangle$ の時間発展の計算例。レーザー光のピーク強度はいずれも 1.4×10^{12} W/cm² であり、レーザー光のパルス幅 (半値全幅) は (a) 断熱領域、(b) 非断熱領域、(c) 中間領域の順にそれぞれ、5 ns、5 ps、50 ps である。

6.7.3 中性分子の配列制御の試み

6.7.1 で開発した実験装置を用いて、レーザー光を用いた中性分子の配列制御を世界で初めて実現すべく、現在 精力的に実験を進めている。国内外に競合する研究グループが存在するため、残念ながら現時点では、実験手法の詳細について説明することは出来ないが、配列が実現していることを示唆する実験データが得られている。別の試料でも実験を行い、得られているデータが配列制御によるものであること

の確認を急いでいる。

また、上記の実験結果を理論と比較するためのシミュレーションコードの開発も並行して進めている。

6.7.4 分子内波束の干渉に関する数値実験

1 分子中に生成された 2 つの核波束の干渉の時間発展を調べるためのシミュレーションコードを開発した。2 つの連続するレーザーパルスによって励起状態ポテンシャルに 2 つの解離性波束を生成する。条件を適当に設定し、座標空間で見た場合、最初のうち核波束は完全に分離しているが、時間が経つに従って第 2 波束の速い成分が第 1 波束の遅い成分に追いつき干渉パターンを形成すると期待できる。

モデル計算では、 I_2 分子の X 及び B 状態を用い、時間に依存するシュレーディンガー方程式を split-operator technique (SOT) を用いて解いた。実際に核波束の干渉が期待できることを確認すると共に、以下の知見を得た。1) 干渉パターンの形状を決める重要なパラメータは、2 つの励起レーザーパルス間の遅延時間とレーザー光の波長である。2) X 状態が振動励起されていると、干渉パターンは若干複雑になり、一般的には干渉ピークの数が増える。図 6.7 d に計算結果の一例を示す。レーザー光のパルス幅は 100 fs、2 つの励起レーザーパルス間の遅延時間は 300 fs、励起レーザー光の波長は、495.98 nm である。第 1 励起パルス入射後 500 fs (破線) では核波束は完全に分離しているが、1.7 ps 後 (実線) では第 2 波束の速い成分が第 1 波束の遅い成分に追いつき干渉パターンを形成している様子が分かる。

1 分子内に生成された複数の波束の干渉とその観測は量子光学の最も基礎的で重要な課題の一つである。また、形成される干渉パターンは量子力学的分子回折格子と呼ぶべき全く新しい分子デバイスの構築という観点からも大変興味深い。シミュレーションコードの開発は実験条件の設定やデータの解析に不可欠である。また、一つひな形となるコードを開発しておけば、分子内波束の関係する他の実験条件をモデル化するためのコードに改造することは比較的容易である。

6.7.5 フェムト秒レーザー光による N_2 および O_2 分子のクーロン爆裂におけるナノ秒 Nd:YAG レーザー光の役割

フェムト秒レーザー光による分子のクーロン爆裂の実験は既に複数の分子について行われている。ここでは、 N_2 および O_2 分子について、ナノ秒 Nd:YAG レーザー光 (波長 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$) のレーザー電場が存在する状況で、高強度フェムト秒 Ti:sapphire レーザー光 (波長 $\lambda \sim 800 \text{ nm}$) を照射した。飛行時間型 (Time-Of-Flight: TOF) イオン分析装置を用いたいわゆる TOF スペクトルを観測すると、Nd:YAG レー

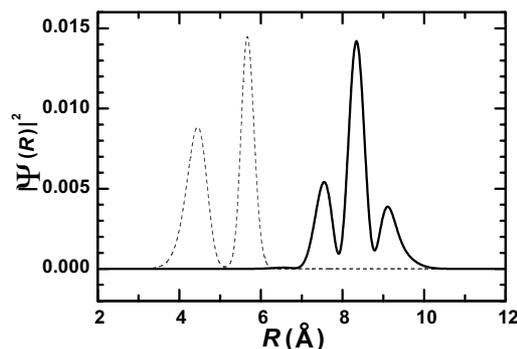


図 6.7 d: 分子内波束の干渉に関する数値実験。横軸は核間距離である。レーザー光のパルス幅は 100 fs、2 つの励起レーザーパルス間の遅延時間は 300 fs、励起レーザー光の波長は、495.98 nm である。第 1 励起パルス入射後 500 fs (破線) では核波束は完全に分離しているが、1.7 ps 後 (実線) では第 2 波束の速い成分が第 1 波束の遅い成分に追いつき干渉パターンを形成している様子が分かる。

ザー光を併用した場合には、 N_2 と O_2 の間に大きな相違は見られないが、Nd:YAG レーザー光を用いた場合には、特定のフラグメントイオンについて両者の間に著しい相違が観測された。使用した Nd:YAG レーザー光の強度 ($2 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$) では、分子の配向の効果は小さいと予想されるが、6.7.1 で開発した実験装置を用いて実際に分子の配向度を評価しつつ、両者の相違の原因を解明すべく実験データの解析を進めている。

ナノ秒 Nd:YAG レーザー光を併用した場合に現れる興味深い現象は、別の分子についても観測されている。2 波長レーザー光を用いた分子の多光子イオン化の実験は、最近いわゆるコヒーレントコントロールの観点から注目されている。ここでは laser-assisted phenomena と呼ぶべきより広い観点から新しく興味深い現象について積極的に研究を展開する予定である。

6.7.6 フェムト秒レーザーパルスによる D_2 分子の非段階的 2 重イオン化

酒井広文らは先に、高強度 20 fs パルスを用いて D_2 分子のクーロン爆裂の実験を行った (本研究は、デンマーク・オーフス大学化学科の Henrik Stapelfeldt 博士のグループとの共同研究である)。実験データの詳細な解析を行った結果、以下に述べるような高強度レーザー物理に関する興味深い知見が得られた。

原子や分子と超短パルス高強度レーザー光との相互作用において観測される多くの興味深い現象のうち、高次高調波発生、高エネルギー電子の発生、および非段階的 2 重イオン化は、いわゆる準古典的モ

デルによって良く説明される。即ち、直線偏光した高強度レーザー電場によって変形したポテンシャルを電子がトンネルイオン化し、その電子がレーザー電場によって駆動され、親イオン近傍に戻って来た時、上記の現象が起きると理解できる。

高強度 20 fs パルスを用いた D_2 分子のクーロン爆裂の実験から得られた D^+ イオンの運動エネルギー分布には、段階的 2 重イオン化によると解釈できる 3.5 eV 付近の主要なピークに加えて、最大 10 eV に達する高エネルギー成分が観測された。実際、平衡核間距離 $R_e = 0.74 \text{ \AA}$ でクーロン爆裂が起きれば、約 10 eV の運動エネルギーを持つ D^+ イオンが生成されるはずである。このことは、 D^+ イオンの高エネルギー成分が、非段階的 2 重イオン化によって生成されたものであることを示唆する。

上記の準古典的モデルのメカニズムに従えば、楕円偏光を用いた場合、電子は親イオン近傍に戻ることが出来ないため、 D^+ イオンの高エネルギー成分は消滅するはずである。レーザー強度を一定に保ち、楕円偏光を用いて実験を行ったところ、楕円率の増大と共に、高エネルギー成分の信号強度が減少することを確認した。

多光子イオン化過程では、レーザー電場の振幅が重要である。そこで、レーザー電場の振幅を一定に保ち、円偏光と直線偏光を用いて実験を行った（この時、円偏光パルスの強度は、直線偏光パルスの強度の 2 倍となる）。円偏光を用いた時、高エネルギー成分が消滅することを確認した。これまでに得られている実験結果は、高エネルギー成分が非段階的 2 重イオン化によるものであるという解釈と両立する。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Tsuneto Kanai and Hirofumi Sakai, "Numerical simulations of molecular orientation using strong, nonresonant, two-color laser fields," to appear in *J. Chem. Phys.*
 - [2] S. Minemoto, J. Müller, G. Ganteför, H.J. Münzer, J. Boneberg, and P. Leiderer, "Direct observation of dynamics of electronic excitations in clusters," *Phys. Rev. Lett.*, **84** 3554-3557 (2000).
 - [3] S. Minemoto, A. Terasaki, and T. Kondow, "Electronic and geometric structures of vanadium cluster ions, V_n^+ ($n=3-5$), Studies by optical absorption spectroscopy," *J. Electr. Spectr. Rel. Phenom.*, **106** 171-178 (2000).
 - [4] Š. Vajda, A. Bartelt, E.-C. Kaposta, T. Leisner, C. Lupulescu, S. Minemoto, P. Rosendo-Francisco, and L. Wöste, "Feedback optimization of shaped femtosecond laser pulses for controlling the wavepacket dynamics and reactivity of mixed alkaline clusters," *Chem. Phys.*, **267** 231-239 (2001).
 - [5] C. Daniel, J. Full, L. Gonzáles, C. Kaposta, M. Krenz, C. Lupulescu, J. Manz, S. Minemoto, M. Oppel, P. Rosendo-Francisco, Š. Vajda, and L. Wöste, "Analysis and control of laser induced fragmentation processes in $CpMn(CO)_3$," *Chem. Phys.*, **267** 247-260 (2001).
- (会議抄録)
- 査読あり
- [6] (Invited paper) Hirofumi Sakai, Jakob Juul Larsen, C. P. Safvan, Ida Wendt-Larsen, Karen Marie Hilligsøe, Kasper Hald, and Henrik Stapelfeldt, "Alignment of neutral molecules by a strong nonresonant laser field," *Advances in multiphoton processes and spectroscopy* (World Scientific) Vol. 14, "Quantum control of molecular reaction dynamics: Proceedings of the US-Japan Workshop held in Honolulu, USA" Ed. by R. J. Gordon and Y. Fujimura, pp. 135-150 (2000).
 - [7] (Invited paper) Hirofumi Sakai, Jakob Juul Larsen, C. P. Safvan, Ida Wendt-Larsen, Henrik Stapelfeldt and Tsuneto Kanai, "Alignment of neutral molecules by a strong nonresonant linearly-polarized laser field," to appear in *Laser control and manipulation of molecules* (ACS (American Chemical Society) Books), Ed. by A. Bandrauk, R. J. Gordon, and Y. Fujimura, (2001).
- 査読なし
- [8] 寺寄亨、松下明、登野健介、R. T. Yadav, T. Briere、峯本紳一郎、近藤保、「3d 遷移金属クラスターイオンの電子構造と幾何構造」、超微粒子とクラスター懇談会、pp. 11-16 (2000).
- (国内雑誌)
- [9] 酒井広文、「レーザー光で分子を操る—レーザー光による分子の偏向・配向と今後の展望—」、*科学*、**71**, No.7 (2001)。
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 招待講演
- [10] Hirofumi Sakai, Jakob Juul Larsen, C. P. Safvan, Ida Wendt-Larsen, Karen Marie Hilligsøe, Kasper Hald, and Henrik Stapelfeldt, "Alignment of neutral molecules by a strong nonresonant laser field," The 2000 Meeting of the Division of Atomic, Molecular, and Optical Physics of the American Physical Society, Connecticut, U.S.A., June 2000.
 - [11] Hirofumi Sakai, Jakob Juul Larsen, C. P. Safvan, Ida Wendt-Larsen, Henrik Stapelfeldt, and Tsuneto Kanai, "Alignment of neutral molecules by a strong nonresonant linearly-polarized laser field," 2000 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies, Hawaii, U.S.A., December 2000.
- 一般講演

- [12] G. Ganteför, S. Minemoto, J. Müller, R. Fromherz, H.-J. Münzer, J. Boneberg, and P. Leiderer, "Time resolved dynamics of electronic excitations in C_3^- ," 10th International Symposium on Small Particles and Inorganic Clusters, Atlanta, Georgia, U.S.A., October 2000.
- [13] A. Bartelt, S. Minemoto, T. Leisner, S. Vajda, and L. Wöste, "Control of wavepacket dynamics in mixed alkali-trimers by optimally shaped femtosecond pulses," 10th International Symposium on Small Particles and Inorganic Clusters, Atlanta, Georgia, U.S.A., October 2000.
- (国内会議)
- 招待講演
- [14] 酒井広文、「高強度レーザー電場による中性分子の配向と配列」、物性研究所短期研究会「強光子場中の原子分子ダイナミクス」、東京大学物性研究所、2000年6月。
- [15] 酒井広文、「非共鳴レーザー電場による気相分子の配向制御と今後の展望」、分子科学研究所短期研究会「強光子場の化学」、岡崎コンファレンスセンター、2000年9月。
- [16] Hirofumi Sakai, "Alignment of neutral molecules by a strong nonresonant linearly-polarized laser field," Mini Symposium on Molecules in Intense Laser-light Fields, Tokyo, Japan, September 2000.
- [17] 酒井広文、「非共鳴レーザー場による分子配向の制御」、分子構造総合討論会シンポジウム「レーザー場による分子過程コントロール」、東京大学駒場キャンパス、2000年9月。
- [18] 酒井広文、「高強度レーザー電場による中性分子の配向技術とその応用」、第20回物理化学コロキウム「21世紀へ向けた物理化学の新展開」、仙台、2000年10月。
- 一般講演
- [19] 酒井広文, Jakob Juul Larsen, Ida Wendt-Larsen, Johannes Olesen, Henrik Stapelfeldt, Paul B. Corkum, 「高強度 20 fs パルスによる D_2 分子の非段階的 2 重イオン化」、日本物理学会第 55 回年次大会、新潟大学五十嵐キャンパス、2000 年 9 月。
- [20] 酒井広文, Jakob Juul Larsen, C. P. Safvan, Ida Wendt-Larsen, Henrik Stapelfeldt, 「配向した分子を用いた enhanced ionization 効果の観測」、レーザー学会学術講演会第 21 回年次大会、東京国際フォーラム、2001 年 1 月。
- [21] 金井恒人, 酒井広文, 「中性分子の配列制御に関する数値シミュレーション」、レーザー学会学術講演会第 21 回年次大会、東京国際フォーラム、2001 年 1 月。
- [22] 酒井広文, Jakob Juul Larsen, Ida Wendt-Larsen, Johannes Olesen, Henrik Stapelfeldt, Paul B. Corkum, 「フェムト秒レーザーパルスによる D_2 分子の非段階的 2 重イオン化」、レーザー学会学術講演会第 21 回年次大会、東京国際フォーラム、2001 年 1 月。
- [23] 酒井広文, Jakob Juul Larsen, Ida Wendt-Larsen, Johannes Olesen, Henrik Stapelfeldt, Paul B. Corkum, 「高強度フェムト秒レーザーパルスによる D_2 分子の非段階的 2 重イオン化」、2001 年春季第 48 回応用物理学関係連合講演会、明治大学、2001 年 3 月。
- [24] 早川貴之, 酒井広文, 「中性分子の配向・配列過程の時間発展に関する数値シミュレーション」、2001 年春季第 48 回応用物理学関係連合講演会、明治大学、2001 年 3 月。
- [25] 谷口智利, 酒井広文, メッテ・マクホルム, 「分子中の核波束の干渉に関する数値実験」、2001 年春季第 48 回応用物理学関係連合講演会、明治大学、2001 年 3 月。
- [26] 峯本紳一郎, A. Bartelt, C. Kaposta, C. Lupulescu, P. Rosendo, S. Vajda, and L. Wöste, 「超短パルスレーザー光の位相を用いた金属クラスターの反応制御」、日本物理学会第 55 回年次大会、新潟大学、2000 年 9 月。
- [27] 峯本紳一郎, J. Müller, and G. Ganteför, 「超短パルスレーザー光による金属・半導体クラスター負イオンの光電子分光」、2000 年分子構造総合討論会、東京大学駒場キャンパス、2000 年 9 月。
- [28] 峯本紳一郎, A. Bartelt, C. Kaposta, C. Lupulescu, P. Rosendo, S. Vajda, and L. Wöste, 「超短パルス光の波形整形による気相中分子・クラスターイオン強度の最適化」、レーザー学会第 21 回年次大会、東京国際フォーラム、2001 年 1 月。
- [29] 峯本紳一郎, A. Bartelt, C. Kaposta, C. Lupulescu, P. Rosendo, S. Vajda, and L. Wöste, 「超短パルス光の波形整形による分子・クラスターイオンの反応制御」、2001 年春季第 48 回応用物理学関係連合講演会、明治大学、2001 年 3 月。
- [30] P. Rosendo, S. Minemoto, C. Kaposta, C. Lupulescu, M. Krenz, A. Bartelt, S. Vajda and L. Wöste, "Subpicosecond photodissociation of $MnCp(CO)_3$ and chirp-dependent molecular dynamics in Na_3 ," DPG-Fruhjahrstagungen (ドイツ物理学会春季年会) Bonn, April 2000.
- [31] A. Bartelt, P. Rosendo, S. Minemoto, C. Kaposta, B. Baptist, C. Lupulescu, S. Vajda and L. Wöste, "Ultrafast fragmentation and vibrational dynamics of small alkali and alkali halide clusters," DPG-Fruhjahrstagungen (ドイツ物理学会春季年会) Bonn, April 2000.
- (その他)
- [32] 酒井広文、「配向した分子を用いた enhanced ionization の観測と中性分子の orientation に関する考察」、量子エレクトロニクス・量子光学・分子物理学セミナー、東京大学理学部、2000 年 4 月。
- [33] 酒井広文、「高強度レーザー電場による中性分子の配向および配列制御」、東京大学 大学院理学系研究科・理学部 広報、32 巻 2 号、10-11 (2000)。
- [34] 酒井広文、「レーザー光で分子を操る」、東京大学理学部物理学教室 教室談話会、東京大学理学部、2000 年 10 月。

7 生物物理

7.1 若林研究室

生命を構築するタンパク質分子の立体構造と生命機能との関係を明らかにすることを通して、生命現象の分子レベルでのメカニズムを解くことを目的としている。特に、モーター蛋白質システムにおけるエネルギー変換とその制御の分子メカニズムを追求している。そのために、

- 1) ナノ構造解析のための電子顕微鏡法と画像解析法の開発
- 2) ホログラフィック像再構成法と電子分光クライオ顕微鏡法を用いた分子モーター構造研究
- 3) タンパク質工学を用いた研究
- 4) X線結晶解析・電子顕微鏡法・情報科学的手法を組み合わせた原子レベルでの研究

を行っている。

97年度から特別推進研究「蛋白工学とホログラフィック・クライオ電子顕微鏡法によるモーター蛋白質機能の研究」による研究の機会に恵まれ、電子波による生きたタンパク質の新しい観察法の開発を図り、エネルギー変換機構について分子構造変化に基づいた新しいメカニズムの提唱を目指している。

7.1.1 ナノ構造解析のための電子顕微鏡法と画像解析法の開発

電子分光クライオ電子顕微鏡法の開発 (安永、若林)

電子分光クライオ電子顕微鏡法は、非弾性散乱した電子によるぼけを取り除くことができ、1分子可視化に有効である。しかし、非弾性散乱電子を除去すると電子数は約25%に減少するため、高感度・高分解能の電子線ディテクターが必須である。そこで、我々はエピタキシャルに成長させた CsI/Tl をシンチレーターとして用いた CCD カメラを開発した。その結果、56万倍で 0.14 nm の金薄膜結晶の縞を観察することができた。更に、タンパク質構造解析への応用の第一歩として、カタラーゼ結晶のクライオ電子顕微鏡像を撮影した。その結果、14万倍で、0.8 nm を超える分解能の画像を得ることに成功した。この時、約1000個の非対称構造ユニットがその像に含まれていた。従って、一つの投影像に関して1000個の像を集めると、0.8 nm を超える構造情報を手に入れることができることが分かった。

エネルギーフィルタを備えた冷電界放出型電子顕微鏡の性能 (安永、若林)

タンパク質分子は軽原子からなり、約75%の電子がタンパク質分子により非弾性散乱し像質は劣化する。この非弾性散乱電子を除くエネルギーフィルタと冷電界放出型電子銃を備えた電子顕微鏡 (EF-2000) の性能を評価した。電子線のコヒーレンスは、エネルギーフィルタを通した後も保たれており (照射半角: 約 $35 \mu\text{rad}$)、ホログラフィック電子顕微鏡法を行う事が可能である事が分かった。また、細いフィラメントやアクチン・ミオシン硬直複合体の氷包埋試料に適用して、エネルギーフィルタにより、正焦点に近い領域でも高いコントラストで像を観察することができた。したがってナノ構造解析に有効である。[24], [28]

7.1.2 タンパク質工学及び生化学的手法を用いたモータータンパク質の研究

筋収縮の制御に影響を及ぼす変異アクチン (佐伯、安永、松浦、若林)

アラニン230とロイシン236の箇所に変異を含む二重変異アクチン (Q228K / T229A / A230Y / L236A / E360H) はトロポミオシン存在下で myosin ATPase を野生型アクチンより約10倍活性化した。この変異アクチンは *in vitro* 滑り運動測定においてトロポミオシン非存在下では野生型アクチンと同様な速度でアクチンフィラメントが HMM 上を滑ったが、トロポミオシン存在下では低 HMM 濃度の時に野生型アクチンより速い滑り運動を引き起こした。A230Y と L236A を同時に導入した YA mutant actin (A230Y/L236A/E360H) はトロポミオシン存在下での myosin ATPase の強い活性化を引き起こした。myosin ATPase の活性化能が二重変異アクチン、YA mutant、三種類の single mutants (T229A, A230Y, L236A) の順に強かったことから、T229A, A230Y, L236A の3つの変異を同時に導入することによりアクチンのサブドメイン4上の疎水性ポケットにトロポミオシンが相互作用しやすくなり、アロステリック平衡がR型にシフトし、R状態 ("open state") がより安定化された結果として活性化が生じたと考えられる。[3], [13], [21], [18]

細胞性粘菌アクチンによるミオシン ATPase 活性化 (岡田、佐伯、若林)

トロポミオシン・トロポニン複合体存在下で、野生型アクチンよりもミオシン ATPase を活性化する変異アクチンに関し、その分子機構を詳細に調べる

ために、トロポミオシン・トロポニン複合体およびトロポミオシンの濃度を変えて S1-ATPase 活性測定を行った。高カルシウムイオン濃度では、変異アクチンにより活性化された S1-ATPase 活性は、トロポミオシン・トロポニン複合体により阻害を受けなかった。トロポミオシンは、変異アクチンで活性化される S1-ATPase 活性を阻害したが、野生型に比べてその阻害能は低かった。このことは、アクチンの変異部位が R 状態 ("open state") でのトロポミオシン結合部位であることと矛盾しない。また、変異アクチン、野生型アクチンいずれの場合にも、アクチン 7 分子に対して 0 ~ 1 分子の制御タンパク質濃度の条件では、濃度増加に対して S1-ATPase 活性をほぼ直線的に阻害した。本実験では、アクチンに対してミオシンの量比が低いので、ミオシンによる協同性は考慮しなくて良い。従って、制御タンパク質がアクチンによる S1-ATPase の活性化に対して協同性を示さない事がわかった。[11], [22]

蛍光エネルギー移動測定のための変異トロポミオシンの作製 (佐伯、海 (福井大学)、三木 (福井大学)、若林)

トロポミオシンの C 末端とアクチンとの距離を蛍光エネルギー移動法で測定するために変異トロポミオシンの作製した。C190I, S237C/C190I, S245C/C190I, T247C/C190I, S252C/C190I の 5 つの変異体を作製した。変異トロポミオシンは BL21(DE3) で大量発現した。このうち T247C/C190I はアクチンとの結合能を保持しておりシステイン残基と反応するので蛍光エネルギー移動法に利用できる。

アクリロダンをを用いたアクチンの蛍光光度測定 (三浦 (4 年生特別 実験)、佐伯、若林)

アクチンのサブドメイン 4 にシステインを導入した変異アクチン (T229C/C374T) を用いて、システイン 229 に蛍光試薬アクリロダンを導入して蛍光測定をおこなった。アクリロダンは周辺環境に応じてその傾向強度と波長を大きく変化させる。G-アクチンを重合させて F-アクチンにすると蛍光強度が増大し、最大吸収波長が短くなった。F-アクチンにトロポミオシン・トロポニンを加えると蛍光強度が減少し、myosin S1 を加えると更に蛍光強度が減少した。しかし Ca^{2+} の有無では差が見られなかった。成田らによるアクチン・トロポミオシン・トロポニンの三次元構造解析の結果によれば、トロポミオシンの N 端側の 2 / 3 は Ca^{2+} によって変化しない。そこでアクチンのシステイン 229 近傍はトロポミオシンの N 端側 2 / 3 の領域と結合していると解釈できる。野生型アクチンのシステイン 374 にアクリロダンを導入した場合も同様の結果が得られる。システイン 374 はトロポミオシン・トロポニンとの結合部位には遠いと考えられており、なぜ蛍光強度の減少があるのかは分からない。

ヒスタグ付き欠失トロポニンのアクチン・トロポミオシンへの結合 (村上、松浦、佐伯、安永、若林)

TnT の T1 を欠失させたヒスタグ付きトロポニン欠失変異のアクチン・トロポミオシンに対する結合能への影響を共沈法で測定した。アクチン:ヒスタグ付き欠失トロポニンの分子比は低 Ca^{2+} 濃度で 4:2、高カルシウム濃度で 4:1 であり、T1 欠失トロポニンはアクチン・トロポミオシンに対し、正常の分子比 (7:1) よりも多く結合する。これは T1 の欠失の結果であろう。ヒスタグが異なった位置についた二つのヒスタグ付き変異トロポニンで測定したが、結果は両者ともほぼ同じなので、ヒスタグによる影響ではない。[10], [23]

7.1.3 原子レベルでの構造研究 (X線結晶解析・電子顕微鏡法)

細いフィラメント上でのトロポニンとトロポミオシンのカルシウムによるスイッチング (成田、石川、真柳、安永、若林)

本研究により、世界で初めて、筋肉の細いフィラメント上のトロポニンとトロポミオシンの三次元構造と Ca^{2+} による変化が明らかとなった。更にその結果を用いて、筋肉のカルシウム制御の新しいモデルを構築した。カルシウムが無くなると、トロポニン I (Tn arm) がアクチンの N 末端から C 末端にかけての領域と結合し、トロポニン T を介してトロポミオシンを引っ張る。トロポミオシンはトロポニン T と結合する C 末端側の 1 / 3 だけがアクチンの outer domain 側に引っ張られ、結合しない N 末端側の 2 / 3 はカルシウムによりあまり変化しない。また、これまで報告されてきた蛍光エネルギー移動法による研究結果を電子顕微鏡による構造情報と組み合わせることができる確率的距離幾何学法により、トロポニンに結合させた蛍光標識の部位を求めることが出来き、トロポニンの構造変化モデルを構築できた。これらのモデルは、今までの多くの研究結果をよく説明できる。この新しいモデルによって、30 年以上にわたって多くの研究者によってなされてきた筋肉のカルシウム制御の研究を集大成し、筋収縮制御の分子メカニズムの解明に向け大きく前進させることができたと考えている。[25], [6], [14], [17], [29], [20], [9], [19], [31], [32]

ミオシン ATPase 中間体の結晶化の試み (松浦、須藤 (総合文化)、若林)

細胞性粘菌ミオシン II モータードメイン (S1dC) の変異体 G457A、E459A はそれぞれ ATP を加えたときに M · ATP 状態、M* · ATP 状態で止まってしまうことが知られている。そこで、ミオシン ATPase サイクルの反応中間体の構造を明らかにするために、

それら変異体の精製・結晶化を行なった。N 末にヒスタグを付けたもの、C 末にヒスタグを付けたもの、ヒスタグを全く付けないものを試した。ヒスタグを導入したものは細胞性粘菌の粗抽出液を ATP 存在下で遠心・超遠心し上清をニッケルカラムにかけ、さらに硫酸分画、脱塩し、DEAE カラム、さらにハイドロキシアパタイトカラムにかけて最後にゲルろ過することにより高度に精製することができた。ヒスタグを付けていないものの精製は、ニッケルカラムを使わない以外はヒスタグ付きのものと同様の方法を用い、さらに SP カラムも使用した。ヒスタグ付きのもの精製には及ばないが、結晶化を試せるレベルまで精製した。これら変異 S1dC 精製には色素カラムや ATP カラムは効果的でなかった。細胞性粘菌野生型ミオシン S1dC の結晶化条件を参考にしつつ ATP 存在下で結晶化を試みたが、これまでに結晶構造が解かれている種々のヌクレオチドアナログとの複合体結晶の結晶化条件では全く結晶にならなかった。唯一 C 末ヒスタグ付きの変異 S1dC(G457A) だけ、マイクロ透析でイオン強度とスクロース濃度を同時に下げるにより 5 ミクロン程度の微結晶と思われるものを得た。

Tetrahymena thermophila 22S 外腕ダイニンのクライオ電子顕微鏡法による構造研究

22S 外腕ダイニンは *Tetrahymena thermophila* の繊毛運動に使われているモーター蛋白質であり、3つの重鎖と複数の中鎖、軽鎖で構成されているのが特徴である。抽出した 22S 外腕ダイニンをクライオ電子顕微鏡法で撮影したところ、アモルファス状の氷の中でもフラワー・ブーケ構造が確認された。また、撮られた写真から頭部の大きさを測定したところ $10.6 \text{ nm} \times 9.5 \text{ nm}$ (SD=0.9nm) という値が得られた。画像解析の結果から、頭部は中心の密度が低い構造をしていることが予想される。また、微小管との結合部位であるストークも幾つかの頭部で確認できた。今後の展望として head をクライオ電子顕微鏡法で撮影し、画像処理して三次元構造を解析する方向性が考えられる。[12]

制御タンパク質トロポニンのチューブ状結晶化 (村上、松浦、佐伯、安永、若林)

制御タンパク質トロポニンのカルシウムによる構造変化を高分解能で解明するために、ヒスタグ付き欠失トロポニンを大腸菌で発現・精製し、リボソーム上にヒスタグを用いて二次元的に結晶化させるチューブ状結晶化を試みている。高カルシウム型トロポニン構造として、ヒスタグ付き欠失トロポニン His₆-T2+TnI+TnC をチューブ状結晶化することができた。現在、より良質のチューブ状結晶を得るために結晶化条件、コンストラクトの設計を最適化している。また低カルシウム型トロポニン構造解明のために、低カルシウム型構造に束縛すると提唱されている変異トロポニンを作成、精製し、現在結晶化中

ある。[10]

電子分光クライオ電子顕微鏡法によるアクチン・ミオシン硬直複合体の構造解析 (安永、若林)

開発した電子分光クライオ電子顕微鏡法・CCD カメラによって、アクチン・ミオシン硬直複合体の高分解能三次元像を得ることを目標として、実験を開始した。これまでに比べて、不足焦点外れ量が少なくても、十分なコントラストを得ることに成功した。このことは、以前よりも高分解能三次元像再構成が可能となった事を示す。今後、平均する分子数を増やすことにより、ヘリックスを可視化し、アクチン・ミオシン相互作用の詳細な様式を解明したい。[28]

7.1.4 電子顕微鏡法を使ったタンパク質の構造研究

古細菌 type-II シャペロニンの構造解析 (安永、吉田、丸山 (海洋バイオ)、若林)

古細菌由来のシャペロニンは、内部に変性タンパク質を巻き戻すための空間を持つ事がわかっている。本研究では、電子顕微鏡法により、シャペロニンが ATP アナログである MgAMPPNP を結合すると、そのふたが閉まり、内部の空間を外部と遮断することが分かった。蛍光性蛋白質 GFP を用いて、その巻き戻り中における構造を解析したところ、MgAMPPNP 存在下では、この内部の空間で巻き戻った GFP がシャペロニンから遊離しないことが分かった。GFP を遊離させるには ATP の加水分解が重要であった。このことは、シャペロニンとヌクレオチドの結合により、変性タンパク質は結合したまま巻き戻り反応を起こし、加水分解に伴い、巻き戻った天然のタンパク質を遊離させることを示唆している。[8], [26]

古細菌 ATP 合成酵素 V_0V_1 ATPase のロータードメインの同定 (安永、横山 (金沢大)、若林)

古細菌 ATP 合成酵素である V_0V_1 ATPase の構造を電子顕微鏡法により研究した。g 及び d サブユニットは A3B3 構造がつくる六角形構造の中央に存在することがわかった。したがって、F0F1ATPase との類推により、g サブユニットがロータードメインであると結論した。[2], [27]

7.1.5 計算機を用いたタンパク質の構造研究

蛍光標識によるアクチンの Cys374 の再配置 (安永、若林)

アクチン Cys374 は反応性が高く様々な標識が導入でき、アクチン構造研究において重要であるが、その三次元位置に関して矛盾する結果が得られてきた。そこで、これまで報告された蛍光エネルギー移動による距離情報から確率的距離幾何学法を用いて、アクチン Cys374 の三次元位置を検討した。その結果、Cys374 が標識されるとアクチン C 末端近傍に構造変化が生じ、Cys374 の三次元位置が変化することがわかった。このことは、蛍光エネルギー移動の結果と、Cys374 を重原子標識した結晶の原子モデルでの Cys374 の位置をよく説明することができる。これは、二次構造転移予測法によるとこの領域には分子内構造変化を生じるスイッチが存在するとの結果と一致している。[5], [16]

蛍光エネルギー移動法と確率的距離幾何学法を組み合わせたミオシン レバーアームの動きの検出 (安永、若林、東京大・須藤研究室との共同研究)

これまで、ATP 加水分解反応に伴うレバーアームの動きを蛍光エネルギー移動と確率的距離幾何学法を用いて検出し、化学反応状態に応じて、2 つ異なるタイプのミオシンの原子モデルで説明できることを示してきた。一方で、最近の X 線結晶解析法によって明らかとなったミオシンの第三の構造は、蛍光エネルギー移動法の観測にかからないような過渡的状态であることが分かった。一方で、この第三の構造は、SH1-SH2 ヘリックス構造が崩れており、ATP 加水分解に伴う生化学的架橋実験の結果を説明できる。したがって、ATPase 加水分解サイクル中に現れる過渡的構造である可能性がある。[4]

トロポミオシンとアクチンの相互作用様式の分子動力学計算 (安永、大屋、若林 (4 年生特別実験))

NAMD というプログラムを使って、トロポミオシンとアクチンの相互作用様式の探求を行うことを試みた。トロポミオシンに外力を与えることにより強制的に回転、移動を行わせ、総エネルギーの増減を見ることにより、結合様式を探ることができるシステムを造り上げた。今後、そのシステムで計算をすることにより、結合様式モデルを検討することができると思う。

<受賞>

- [1] 若林健之、第 3 2 回内藤記念科学振興賞 「筋収縮の分子機構の三次元構造に基づく研究: Molecular mechanism of muscle contraction on the basis of

three-dimensional structure.」, 内藤記念科学振興財団、平成 13 年 3 月 19 日

<報文>

(原著論文)

- [2] Yokoyama, K., Ohkuma, S., Taguchi, S., Yasunaga, T., Wakabayashi, T. and Yoshida, M.: V-Type H⁺-ATPase/Synthase from a Thermophilic Eubacterium, *Thermus Thermophilus*. *J. Biol. Chem.* (2000), **275**, 13955-13961.
- [3] Saeki, K., Yasunaga, T., Matsuura, Y., and Wakabayashi, T.: Role of residues 230 and 236 of actin in myosin-ATPase activation by actin-tropomyosin. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* (2000)**275**, 428-433.
- [4] Yasunaga, T., Suzuki, Y., Ohkura, R., Sutoh, K., and Wakabayashi, T.: ATP-induced Transconformation of Myosin Revealed by Dtermining Three-Dimensional Positions of Fluorophores from Fluorescence Energy Transfer Measurements. *J. Struct. Biol.* (2000), **132**, 6-18.
- [5] Yasunaga T. and Wakabayashi T.: Relocation of Cys374 of Actin Induced by Labeling with Fluorescent Dyes. *J. Biochem.* (2001), **129**, 201-204
- [6] Narita, A., Yasunaga, T., Ishikawa, T., Mayanagi, K. and Wakabayashi, T. Ca²⁺-induced switching of troponin and tropomyosin on actin filaments as revealed by electron cryo-microscopy. *J. Mol Biol.* (2001) **308**, (2)241-261
- [7] Yasunaga, T., and Wakabayashi, T.: Evaluation of a 2k CCD camera with an epitaxially-grown phosphor as a scintillator for recording electron spectroscopic cryo-micrographs. *Ultramicroscopy*, submitted.
- [8] Yoshida, T, Kawaguchi, R., Taguchi, H., Yoshida, M., Yasunaga, T., Wakabayashi, T., Yoshida, M., Maruyama, T.: Archaeal Group II Chaperonin mediates protein folding in the cis-cavity without cochaperonin. *J. Biol. Chem.*, submitted.

(会議抄録)

- [9] Wakabayashi, T., Yasunaga, T., Narita, A., Matsuura, Y., Saeki, K.: Molecular Mechanism of Ca-regulation of Motor Function, *J. Molecular and Cellular Cardiology*, **32**(11), (2000), SS-2.

(学位論文)

- [10] 村上健次: 制御タンパク質トロポニンの構造解析 (修士論文)
- [11] 岡田拓也: 細胞性粘菌アクチンによるミオシン ATPase 活性化 (修士論文)
- [12] 竹内 成夫: テトラヒメナ外腕ダイニンのクライオ電子顕微鏡法による構造研究 (修士論文)
- [13] 佐伯喜美子: 細胞性粘菌変異アクチンを用いた筋収縮制御の研究 (東京農工大学連合大学院農学研究科、論文博士、2001年3月)

- [14] Narita, A.: Ca²⁺-induced switching of troponin and tropomyosin on actin filaments as revealed by electron cryo-microscopy. (博士論文)
- [15] 安永卓生: 構造から探るアクチン・ミオシン系エネルギー変換の分子機構 (東京大学・大学院理学系研究科、論文博士、2001年6月予定)
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [16] Yasunaga, T and Wakabayashi T.: Relocation of Cys374 of actin induced by labelling of fluorescent dyes. (Alpbach Meeting, Austria, March-April, 2001)
- [17] Narita, A., Yasunaga T., Ishikawa, T., Mayanagi, K. and Wakabayashi, T.: Ca²⁺-induced switching of troponin and tropomyosin on actin filaments as revealed by electron cryo-microscopy. (Alpbach Meeting, Austria, March-April, 2001)
- [18] Saeki, K., Yasunaga, T., Matsuura, Y., and Wakabayashi T.: Role of the hydrophobic pocket on actin subdomain 4 in myosin-ATPase activation by actin-tropomyosin. (Alpbach Meeting, Austria, March, 2001)
- 招待講演
- [19] Wakabayashi, T., Yasunaga, T., Narita, A., Matsuura, Y., Saeki, K.: Molecular Mechanism of Ca-regulation of Motor Function, the XVII Annual Meeting of the International Society for Heart Research, Japanese Section, International Satellite Sessions, International Lectures and Satellite Symposium Featuring "Molecular Mechanisms of Excitation-Contraction Coupling in the Myocardium" (Osaka, Japan, Dec. 2000,)
- [20] Wakabayashi, T: Ca²⁺-induced switching of troponin and tropomyosin on actin filaments as revealed by electron cryo-microscopy. (Alpbach Meeting, Austria, March-April, 2001)
- (国内会議)
- 一般講演
- [21] 佐伯喜美子、安永卓生、松浦能行、若林健之: A230Y と L236A の二重変異アクチンはトロポミオシン存在下ミオシン ATPase を強く活性化する、第 38 回日本生物物理学会年会 (仙台市、宮城、2000 年 9 月)
- [22] 岡田拓也、佐伯喜美子、安永卓生、若林健之: チロシン変異アクチンにおける "higher Ca²⁺ activation" はさまざまな濃度のトロポミオシン・トロポニン複合体を加えたときに観察される、第 38 回日本生物物理学会年会 (仙台市、宮城、2000 年 9 月)
- [23] 村上健次、松浦能行、佐伯喜美子、安永卓生、若林健之: 複合体トロポニンの発現精製 (第 38 回日本生物物理学会年会、2000 年 9 月)
- [24] 安永卓生、若林健之: 冷電界放出型電子銃、エネルギーフィルタ、高分解能高感度 CCD を備えた透過型電子顕微鏡のアクチン・ミオシン硬直複合体構造解析への応用、第 38 回日本生物物理学会年会 (仙台市、宮城、2000 年 9 月)
- [25] 成田 哲博, 石川 尚, 真柳 浩太, 安永 卓生, 若林健之: 細いフィラメント上のトロポニンの構造を可視化する新しい画像処理法、第 38 回日本生物物理学会年会 (仙台市、宮城、2000 年 9 月)
- [26] 吉田尊雄、川口利華、田口英樹、吉田賢右、安永卓生、若林健之、養王田正文、丸山正: 超高熱性古細菌由来グループ 2 型シャペロニンの折り畳み反応機構の解析 - グループ 2 型シャペロニンにおける cis リングでの折り畳みの可能性、第 73 回日本生化学会大会 (横浜、2000 年 10 月)
- [27] 横山謙、安永卓生、若林健之、大熊勝治: 高度高熱菌 *Thermus thermophilus* 由来 V-type ATP synthase/ase の subunit 構造とローター subunit の同定、第 73 回日本生化学会大会 (横浜、2000 年 10 月)
- [28] 安永卓生、若林健之: 電子分光電子顕微鏡によるアクチン - ミオシン硬直複合体の構造解析、生体運動合同班会議 (早稲田大学、東京、2001 年 1 月)
- [29] 成田哲博、安永卓生、石川尚、真柳浩太、若林健之: 細いフィラメント上でのトロポニン・トロポミオシンのカルシウムによる移動、生体運動合同班会議 (早稲田大学、東京、2001 年 1 月)
- [30] 宮西隆幸^{1,2}、石川尚³、林原歳久²、若林健之: 心筋ミオシン頭部とアクチンとの相互作用、生体運動合同班会議 (早稲田大学、東京、2001 年 1 月)
- [31] 若林健之、第 32 回内藤記念科学振興賞受賞講演 「筋収縮の分子機構の三次元構造に基づく研究: Molecular mechanism of muscle contraction on the basis of three-dimensional structure.」 (内藤記念科学振興財団、2001 年 3 月)
- (セミナー)
- [32] Wakabayashi T: Ca²⁺-induced switching of troponin and tropomyosin on actin filaments as revealed by electron cryo-microscopy., (*MRC Laboratory of Molecular Biology, Cambridge, UK, April, 2001*)

7.2 桑島研究室

桑島研究室では、球状蛋白質の天然立体構造構築（フォールディング）の物理原理に関する研究を行っている。研究内容は、(1) 蛋白質工学を用いた蛋白質のフォールディング研究、(2) 細胞内での蛋白質フォールディングに関与する分子シャペロンの作用機構、(3) 新しい高速反応測定技術を利用した蛋白質のフォールディング研究の三つに大別される。

7.2.1 蛋白質工学を用いた蛋白質のフォールディング研究

球状蛋白質の構造形成機構を明らかとするには、天然状態の熱力学的安定性に関する研究とともに、巻き戻り過程の速度論的な研究が必要である。多くの蛋白質で、巻き戻り反応初期に二次構造を持った過渡的な中間状態の蓄積されることが知られている。この中間体は、平衡条件下で観測されるモルテン・グロビュール (MG) 状態と同一であり、蛋白質構造形成にとって必須であると考えられている。このような中間体の構造や巻き戻り反応の遷移状態の構造を明らかにすることが蛋白質のフォールディング研究にとって重要である。そのためには、蛋白質工学の手法を用いて、対象とする蛋白質に部位指向的な変異を導入し、導入されたアミノ酸変異がその蛋白質の構造安定性や巻き戻り速度過程にどのような影響を及ぼすかを調べることが有効なアプローチとなる。また、分子動力学などの計算機シミュレーションによる蛋白質のアンフォールディング過程の解析も有効なアプローチと考えられる。われわれは、このような観点から、いくつかの代表的な球状蛋白質を対象に、天然構造の熱力学的安定性、巻き戻りとアンフォールディングの速度過程を調べている。

ヤギ α -ラクトアルブミンのフォールディング反応の遷移状態の解析

(石井 (4年生特別実験)、野沢 (4年生特別実験)、新井、依田、桑島)

蛋白質のフォールディング反応における律速段階は、モルテン・グロビュール (MG) 様の中間体が天然状態 (N) へと構造形成していくプロセスであり、この過程において側鎖の密なパッキングが形成される。このプロセスで起きている現象を理解するためには、 $MG \rightleftharpoons N$ の反応の遷移状態の構造を特徴づけることが必要であり、部位特異的アミノ酸置換を導入した変異体の巻き戻り速度過程を測定することによって遷移状態の構造を特徴づけることができる。我々は、ヤギ α -ラクトアルブミン (α LA) の2つの変異体 (I95V, W118F) の巻き戻りとアンフォールディング反応の変性剤濃度依存性を測定した。その結果、I95Vのアンフォールディング反応は野生型の場合よりもやや速くなっていること、及び、W118をFに置換した変異では巻き戻りと変性の速度過程は

野生型の場合と同じであることがわかった。このことから、 α LAのフォールディング反応の遷移状態では、I95周辺の構造はまだ完全には形成されていないことが示唆される。

イヌミルクリゾチームのフォールディング機構

(中尾、新井、桑島：小柴博士 (北大)、新田教授 (北大) との共同研究)

カルシウム結合型リゾチームの一種であるイヌミルクリゾチーム (CLZ) は、平衡条件の熱変性実験において、安定な中間体を含む二段階の転移を示すことが知られている。さらに、この中間体を詳細に調べてみると、他のカルシウム非結合型リゾチームや α -ラクトアルブミンの場合と異なり、より天然状態に近い構造を持った中間状態であることが明らかとなった。このような性質を持つ CLZ について、(1) 変性剤を用いて平衡条件下でアンフォールディングさせると、熱変性と同様に安定な中間体が蓄積するのか、また、(2) その性質は巻き戻り速度過程上で観測される中間体と関係があるのか、を明らかにし、結果をリゾチーム- α -ラクトアルブミン構造ファミリーの他の分子と比較することにより、フォールディング機構を解明する上で重要な知見が得られると期待される。

そこでまず、CLZを大腸菌による発現系を用いてインクルージョンボディとして発現させて正しいジスルフィド結合の形成を促すため、チオレドキシンを用いた系で巻き戻しを行った。HPLCによる分析で、巻き戻しの際に複数の不純物が生じることが分かったが、イオン交換クロマトグラフィーや、分取用大型カラムを用いた HPLC などこれらを分離することが出来た。

得られた CLZ について、塩酸グアニジンによる平衡条件下でのアンフォールディング転移を円二色性 (CD) スペクトルにより測定した。その結果、CLZは三状態転移 (天然状態 \rightleftharpoons 中間状態 \rightleftharpoons 変性状態) を示した。また、この中間状態は、熱転移の場合と同様に、ウマリゾチームやウシ α -ラクトアルブミンと比較して熱力学的に大変安定であることが明らかになった。

次に、ストップフロー CD 法により CLZ の巻き戻り反応を測定した結果バースト・フェーズの後にオーバーシュートが見られた。このことは、バースト・フェーズ中間体を経た後に、CLZは、ウマリゾチームでは観測されなかった別の中間体を形成することを示している。このように2つの速度論的中間体が観測されたことは、平衡条件下で観測された中間状態が高い安定性を持っていることと関係していると考えられる。

スタフィロコッカール・ヌクレア - ゼ (pro-) 変異体のフォールディング機構の研究

(鎌形、桑島)

フォールディングの初期過程を調べることは、フォールディングのメカニズムを解明する上でも重要である。近年、蛍光ストップフロー法を用いた測定により、スタフィロコッカス・ヌクレアゼ (SNase) のフォールディングには 1000 s^{-1} から 200 s^{-1} の速い相があることが分かった。SNase は、アミノ酸残基数 149 で α 、 β サブドメインからなる球状蛋白質である。トリプトファン残基 (Trp140) が α サブドメイン末端に一つあり、3次構造の形成を調べる上でよい蛍光プローブになっている。我々は、不感時間 (Dead time) の短い Applied Photophysics 社の蛍光ストップフロー装置 (不感時間は 4 ms) を用いて、SNase (pro-) 変異体 (プロリン残基のすべてを Gly, Ala, Thr などの他のアミノ酸に置換した変異体) のフォールディング機構を調べた。その結果、リフォールディングでは、 200 s^{-1} の速い相を含めて3つの相が観測され、アンフォールディングでは、1つの相が観測された。次に、リフォールディングで観測された3つの相から、フォールディング経路が、パラレルなのか、シークエンシャルなのかそれとも、その二つが混ざっているのかということが問題になる。この問題を解決するために、ダブルジャンプ測定を計画しており、そのため、現在、ストップフロー装置の組換えとキャリブレーションを行っている。

分子間力顕微鏡による蛋白質アンフォールディング過程の1分子計測

(坂根, 桑島: 廣島博士 (遺伝研), 徳永教授 (遺伝研) との共同研究)

分子間力顕微鏡を用いて、蛋白質1分子の力学的アンフォールディングを計測している。1分子測定により、これまでのフォールディング研究では得られない、新たな知見が得られると考えられる。Staphylococcal Nuclease の両端のアミノ酸をシステインに置き換え、金に化学吸着させた試料を用いて、分子間力顕微鏡により蛋白質1分子の伸長実験を行った。得られたフォースカーブ (伸長力と伸長距離のプロット) から、試料が自己重合し2量体になっていると仮定した場合、試料全長が 87 nm という結果を得た。これは、1アミノ酸あたり 0.29 nm に相当し、従来の測定結果と一致した。アンフォールディングの力学的特性を高分解能に解明すべく、現在計測を進めている。

7.2.2 細胞内での蛋白質フォールディングに關与する分子シャペロンの作用機構

細胞内での蛋白質の構造形成はさまざまな分子シャペロンにより介助されている。分子シャペロンは、細胞内での蛋白質の構造形成とアセンブリーに關係するのみならず、蛋白質の細胞内輸送、DNA の複製、ストレス応答など、細胞内でのさまざまな現象に關与しており、分子シャペロンの概念は、生物物理学、生化学、分子生物学、細胞生物学、医学、バイオテク

ノロジーなどの広い分野を包括する新しい研究分野を提供しつつある。われわれは、このような *in vivo* の現象を理解することを目的として、分子シャペロンの一つ、大腸菌のシャペロニン (GroEL/ES) に關する研究を行っている。特に、蛋白質の巻き戻りの速度過程に及ぼすシャペロニンの影響、シャペロニンの機能発現にとって必要なヌクレオチドとの相互作用などを *in vitro* のモデル系を用いて調べている。

大腸菌シャペロニン GroEL の変異体 D398A と標的蛋白質の相互作用

(槇尾, 高須, 桑島)

大腸菌シャペロニン GroEL は細胞内において ATP を加水分解しコ・シャペロニン GroES と結合・解離しながら蛋白質の巻き戻りを助けていることが知られている。ATP の結合と加水分解それぞれが GroEL と標的蛋白質との相互作用にどのような影響を与えているのか調べるため、GroEL の変異体 D398A を作成した。この変異体はヌクレオチドを野性型 GroEL と同様に結合できるものの、ATP の加水分解速度が極度に遅くなっている。この変異体を用いることにより、ATP の結合と加水分解の GroEL に与える影響を分離して理解することができると期待される。モデル標的蛋白質としては α ラクトアルブミン (α LA) を用いた。 α LA の巻き戻り反応を GroEL 存在下で測定しその速度過程を数値解析することにより、GroEL と α LA の結合定数を求めることができる。

さまざまな濃度の ATP 存在下で GroEL と D398A 変異体の α LA に対する親和性をそれぞれ測定した。ATP の濃度を上げるにつれて α LA との親和性の低下が見られたが、その様子は GroEL と D398A 変異体との間でほぼ同一となった。また、D398A 変異体の α LA に対する親和性低下は ATP を加えて 15 秒以内に起こることが分かった。これは親和性低下が ATP の加水分解より速く起こることを示しており、GroEL が ATP の加水分解よりむしろ ATP の結合によって標的蛋白質との親和性を変化させていることを示す。

また、様々な ATP 濃度で調べた GroEL の α LA に対する親和性変化の様子を詳しく検討すると、ATP の濃度を上げるにつれて協同的な結合定数の低下が見られることが分かった。GroEL に標的蛋白質との親和性の異なる二つの状態があると考え、ATP の結合によりこの両者間の転移が起こるとするモデルを立てて親和性低下の様子を解析した。結果、転移の起こる ATP 濃度領域は GroEL に構造変化の見られる ATP 濃度領域と一致することが分かった。GroEL は ATP の結合により引き起こされる協同的な構造変化に伴って標的蛋白質との親和性を低下させていることが分かった。

機能発現状態における GroEL の構造変化機構

(伊野部, 菊島 (4年生特別実験) 廉岡 (4年生特別実験) 槇尾, 桑島)

GroEL に介助された蛋白質が効率的に巻き戻るには、ATP の結合、加水分解による GroEL の大きな構造変化が重要である。そのような大きな構造変化を引き起こすメカニズムは未だ明らかにされていない。我々は滴定型熱量計 (ITC) や蛍光ラベルした GroEL を用いて、ヌクレオチド滴定を行い GroEL のヌクレオチド結合の協同性について研究を行った。現在までに GroEL は ATP の結合もしくはその加水分解により、協動的な構造変化をすることができるが、ADP や非加水分解性 ATP アナログ (ATP γ S, AMP-PNP) の結合では、協動的な構造変化を起こさないことがわかっている [5]。このことは、ATP の加水分解中に GroEL の協動的な構造変化が起こる可能性を示唆している。本年度は ATP 加水分解中間状態での構造変化について、ヌクレオチド滴定により詳細に調べた。

ヌクレオチドの滴定実験は、等温滴定型熱量計 (ITC) を用い観測した熱変化、および蛍光ラベルした GroEL (ピレニル化 GroEL) の蛍光変化をプローブとして行った。まず ATP 加水分解中の GroEL の構造変化を見積もるために、ADP-リン酸アナログ複合体の滴定を行った。リン酸アナログ存在下でピレニル化 GroEL に対して ADP を滴定し、その蛍光変化をモニターした結果、VO $_4$ や ScF $_x$ 、GaF $_x$ と ADP の複合体は協動的な構造変化をもたらさないものの、AlF $_4$ や BeF $_x$ 、ScF $_x$ と ADP の複合体は GroEL の協動的な構造変化を引き起こすことがわかった。このことは少なくとも ATP の加水分解のエネルギーが GroEL の構造変化に必要なことを示している。

以上の結果より、以下の二つの可能性が考えられる：(1) ADP-リン酸アナログ複合体は ATP と等価であり、実験結果は ATP 結合により GroEL の協動的な転移が起こることを示す。(2) ADP-リン酸アナログ複合体は ATP 加水分解の遷移状態アナログであり、実験結果は ATP 加水分解が協動的な転移に必要なことを示す。(2) の推論に従えば、ATP 加水分解の律速段階は ATP の γ -リン酸が解裂した後の段階と考えられ、ATP 加水分解の初期にリン酸放出のバーストがみられるはずである。そこで加水分解反応で解裂したリン酸の定量を行った。その結果、ATP 加水分解の初期にはバースト相がないことがわかった。つまり、ADP-リン酸アナログ複合体による構造変化は、加水分解後の構造変化を表しているのではなく、ATP 結合による構造変化を反映していると考えられる。

ヌクレオチドによる GroEL の構造変化の X 線小角散乱法による観察

(伊野部、新井、中尾、鎌形、桑島：伊藤博士 (筑波大・物質工)、木原教授 (関西医大・物理)、雨宮教授 (東大・新領域) との共同研究)

ヌクレオチドによる GroEL の構造変化は、その機能発現には欠かせないものである。現在までヌクレオチド存在下の GroEL の構造変化を特徴付けようと X 線小角散乱法による実験が多くなされてきたが、PSPC 型 X 線検出器では変化を検知できなかった。

しかしながら 2 次元 CCD 型 X 線検出器を用いることにより、高い精度で広角領域の散乱パターンを観ることが可能になり、様々なヌクレオチド存在下で溶液中の GroEL の構造変化を調べることが可能となった。その結果、GroEL は ATP 存在下で広角領域での散乱パターンが変化し、大きく構造変化することが明らかとなった。同様の構造変化が滴定実験で協動的な結合反応が示された ADP とリン酸アナログ複合体存在下でも観測されるが、ATP γ S や ADP 存在下では観測されないことが明らかとなった。この実験で得られた散乱パターンを X 線結晶構造より計算した散乱パターンと比較した。その結果、図 7.2 a のように、ヌクレオチド非存在下および ADP, ATP アナログ結合状態の GroEL は二つのリングとも基質蛋白質と強く結合することのできる状態 (close 状態) を取っていることがわかった。一方、ATP や ADP-リン酸アナログ存在下では GroEL-GroES 複合体の結晶構造から GroEL のみ取り出した状態、つまり頂上ドメインが持ち上がりリング内の空洞が大きくなった状態 (open 状態) を取るようになった。このことは GroEL が ATP 加水分解サイクルにおいて open-close の構造転移を繰り返していることを示している。更に ATP による GroEL の構造変化の速度過程の測定も行った。その結果、構造変化の速度は、以前に行われた GroEL のトリプトファン変異体の蛍光変化により観測された速度とほぼ一致していた。今回のわれわれの実験結果は ATP による GroEL の構造転移を直接観測した初めての例である。

7.2.3 新しい高速反応測定法を利用した蛋白質のフォールディング研究

蛋白質のフォールディング機構を実験的に研究するには、ストップフロー法などの高速反応測定法を用いて、巻き戻りの速度過程を、光吸収、円二色性、蛍光スペクトル、X 線溶液散乱などの分光学的な測定手段を用いて調べる。しかし、現在まで用いられているストップフロー法の時間分解能はミリ秒が限界であり、サブミリ秒以下の速い反応過程を追跡することはできない。この時間分解能の限界は、多くの場合、検出器にあるのではなく、フォールディング反応を誘起するためのストップフロー混合装置の混合時間によってもたらされる。現在、ミリ秒内に素早く巻き戻ってしまう蛋白質の例がいくつも明らかとなりつつあり、サブミリ秒からマイクロ秒の時間域におけるフォールディング反応を実験的に研究することが重要となっている。また、ストップフロー X 線散乱の実験では、検出器自身の S/N 比が低いため、より高感度の検出器を用いた研究も必要となっている。われわれは、このような観点から新しい高速反応測定法を利用した蛋白質のフォールディング研究を行っている。

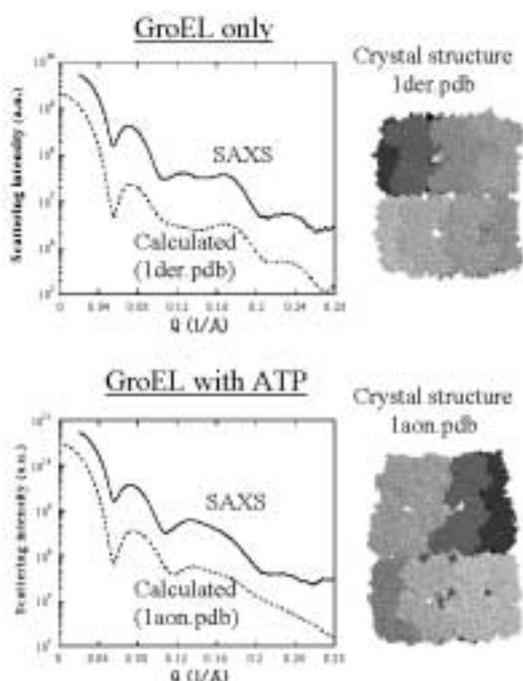


図 7.2 a: GroEL の X 線小角散乱パターンの実測値と結晶構造から計算した散乱パターン

ストップフロー X 線溶液散乱法による α - ラクトアルブミンの巻き戻り反応の解析

(新井、伊野部、中尾、鎌形、桑島：伊藤博士(筑波大) 雨宮教授(東大・新領域)、木原教授(関西医大)との共同研究)

蛋白質のフォールディング機構を理解するためには、フォールディング反応に伴う蛋白質の構造変化を詳細に特徴づけることが必要である。我々は、蛋白質の構造形成に伴う分子サイズと形状の時間変化を追跡する上で有効な手法であるストップフロー X 線溶液散乱法を用いて、蛋白質の巻き戻り反応の測定を行っている。これまでに、二次元 CCD 型 X 線検出器を使用することにより、散乱データの S/N 比を飛躍的に向上できること、また、CCD のデータに対して適切な補正を行うことによって PSPC で測定した場合と一致するデータが得られることを示した。そこで今回は、この方法を用いて α - ラクトアルブミン (α LA) の巻き戻り反応の測定を行った。実験は高エネルギー加速器研究機構・放射光研究施設にある BL15A にて行った。データ取り込み間隔は、10 ms あるいは 100 ms にて測定した。また、同様の実験を 3 回行い、再現性を確認した。その結果、 α LA の巻き戻り初中間体の慣性半径と Kratky plot は、平衡条件下で観測されるモルテン・グロビュール (MG) 状態のものと同じであることがわかった。このことから、分子サイズと形状という観点から見ても、

α LA の巻き戻り中間体は MG 状態と同一であると言える。MG 状態様の中間体を形成したあとの巻き戻り過程の速度定数は、以前に測定されたストップフロー円二色性法から得られた速度定数と一致しており、二次構造形成と分子サイズのコンパクト化は同時に起きるプロセスであることが示唆される。さらに、この過程において、前方散乱強度 ($I(0)$) がわずかに (10%程度) 減少していく様子が観測された。 $I(0)$ は、散乱体の電子密度と溶媒の電子密度の差の 2 乗で表される。もしも水和水がバルクの水と異なる密度を持つならば、観測された $I(0)$ の減少は、巻き戻り中間体の疎水性残基に水和していた水が、フォールディングに伴って脱離することによる解釈できる。

高圧温度ジャンプ装置の試作

(鎌形、新井、桑島)

サブミリ秒からマイクロ秒域の蛋白質フォールディング反応の追跡には、従来のストップフロー装置の時間分解能 (約 1 ms) を越えた新しい実験手法が必要である。そのため、連続フロー超高速混合法 (時間分解能約 50 μ s) などが開発され、世界の二三の研究室で使われている。しかし、これらの方法は広く一般に使用できる汎用的なものとは言い難い。一方、ジュール熱方式の温度ジャンプ法はマイクロ秒の時間分解能を持った汎用的な実験手法であるが、温度を上昇させることしかできないので、蛋白質フォールディング反応追跡には不向きと考えられてきた。しかし、蛋白質が低温変性する低温条件下 (多くの場合、 -10°C 以下) で温度ジャンプを実現することができれば、マイクロ秒の時間分解能で蛋白質フォールディングを追跡できる汎用的な実験手法になると期待される。2000 気圧の高圧力下では水の氷点は -20°C まで下がり、かつ、蛋白質も不安定化されるので、一般に多くの球状蛋白質の低温変性を氷点以上の温度で実現することができる。このような低温変性状態からの巻き戻り反応の追跡を目的として、高圧温度ジャンプ装置の試作をユニソク社 (枚方市) との共同で行っている。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Y. Kobashigawa, M. Demura, T. Koshiba, Y. Kumaki, K. Kuwajima, and K. Nitta: Hydrogen exchange study of canine milk lysozyme: Stabilization mechanism of the molten globule. *Proteins* **40** (2000) 579-589.
- [2] H. Fukuda, M. Arai, and K. Kuwajima: Folding of green fluorescent protein and the Cycle3 mutant. *Biochemistry* **39** (2000) 12025-12032.
- [3] T. Yoda, M. Saito, M. Arai, K. Horii, K. Tsumoto, M. Matsushima, I. Kumagai, and K. Kuwajima: Folding-unfolding of goat α -lactalbumin studied by stopped-flow circular dichroism and molecular dynamics simulations. *Proteins* **42** (2001) 49-65.

- [4] T. K. Chaudhuri, M. Arai, T. P. Terada, T. Ikura, and K. Kuwajima: Equilibrium and kinetic studies on folding of the authentic and recombinant forms of human α -lactalbumin by circular dichroism spectroscopy. *Biochemistry* **39** (2000) 15643-15651.
- [5] T. Inobe, T. Makio, E. Takasu-Ishikawa, T. P. Terada, and K. Kuwajima: Nucleotide binding to the chaperonin GroEL: Noncooperative binding of ATP analogs and ADP, and cooperative effect of ATP. *Biochimica et Biophysica Acta* **1545** (2001) 160-173.
- [6] K. Horii, M. Saito, T. Yoda, K. Tsumoto, M. Matsushima, K. Kuwajima, and I. Kumagai: Contribution of Thr29 to the thermodynamic stability of goat α -lactalbumin as determined by experimental and theoretical approaches. *Proteins* (2001) in press.
- (国内雑誌)
- [7] 桑島邦博: 蛋白質の構造はひとりでに形成される: フォールディング, 第14回「大学と科学」公開シンポジウム『生物の働きを生み出す蛋白質のかたち』講演収録集、(株)クバプロ、(2000) 57-70.
- [8] 桑島邦博: フォールディング: ゲノム科学と物理化学との接点、*生物物理* 40巻5号 (2001) 310-311.
- [9] 新井宗仁: 第24回谷口シンポジウムに参加して、*生物物理* 41巻1号 (2001) 47.
- [10] 榎尾匡: Cold Spring Harbor Laboratory Meeting 「Molecular Chaperone & The Heat Shock Response」に参加して、CHAPERONE News Letter (特定領域研究「分子シャペロンによる細胞機能制御」領域ニュース) No. 7 (2000) 5-6.
- [11] 伊野部智由、桑島邦博: GroELの協同性に関する「加水分解モデル」の顛末、CHAPERONE News Letter (特定領域研究「分子シャペロンによる細胞機能制御」領域ニュース) No. 8 (2001) 23-24.
- (学位論文)
- [12] 榎尾匡: Molecular mechanism of target recognition by the chaperonin GroEL (博士論文)
- [13] 中尾正治: The folding mechanism of canine milk lysozyme (修士論文)
- (著書)
- [14] K. Kuwajima, and M. Arai: The molten globule state: the physical picture and biological significance. In *Mechanisms of Protein Folding (Second Edition)* ed. R. H. Pain (Oxford University Press, New York, 2000) pp.138-174.
- [15] 桑島邦博: タンパク質フォールディングとモルテングロビュール状態、「神経難病の分子機構(タンパク質のコンフォメーション異常による疾患)」(石浦章一編)分担執筆、(シュプリンガー・フェアラーク東京、2000) pp. 20-31.
- [16] 桑島邦博: ゆらぎとタンパク質分子間相互作用、「基礎生化学実験法第3巻(タンパク質II. 機能・動態解析法)」(日本生化学会編)分担執筆、(東京化学同人、2001) 第14章、pp. 179-187.
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [17] T. Inobe, T. Makio, E. Takasu-Ishikawa, T. P. Terada, M. Arai, K. Ito, M. Nakao, H. Kihara, Y. Amemiya, and K. Kuwajima: Non-cooperative nucleotide binding and the ATP-induced cooperative transition of chaperonin GroEL, *Cold Spring Harbor Laboratory Meeting on Molecular Chaperone and the Heat Shock Response* (Cold Spring Harbor Laboratory, NY, U.S.A., May 3-7, 2000) (Poster).
- [18] T. Makio, M. Arai, and K. Kuwajima: Chaperonin-affected refolding of α -lactalbumin. Effects of nucleotides and the co-chaperonin GroES, *Cold Spring Harbor Laboratory Meeting on Molecular Chaperone and the Heat Shock Response* (Cold Spring Harbor Laboratory, NY, U.S.A., May 3-7, 2000) (Poster).
- [19] M. Arai, K. Ito, T. Inobe, M. Nakao, K. Maki, H. Kihara, Y. Amemiya, and K. Kuwajima: Studies of protein folding by stopped-flow X-ray scattering using a CCD-type X-ray detector, *The Protein Society 14th Symposium* (San Diego, CA, U.S.A., August 5-9, 2000) (Poster).
- [20] M. Arai, K. Ito, T. Inobe, M. Nakao, K. Maki, H. Kihara, Y. Amemiya, and K. Kuwajima: Studies of protein folding by stopped-flow X-ray scattering using a CCD-type X-ray detector. 第3回東アジア生物物理学シンポジウム(慶州、韓国、2000年5月22日 - 26日) (Poster).
- 招待講演
- [21] K. Kuwajima: Molecular Mechanisms of the Chaperonin Function, *15th FAOBMB Symposium 2000 Perspectives of Biochemistry and Molecular Biology in the 21 Century* (Beijing, China, October 21-24, 2000).
- [22] K. Kuwajima: Is the new view of protein folding in conflict with old view?, *International Symposium on Structure, Dynamics and Folding of Proteins as Viewed from Pressure Axis* (Otsu, Japan, January 25-27, 2001).
- [23] K. Kuwajima: Molecular mechanisms of protein folding, *KIAS-APCTP Winter School on Biocomplexity* (Korea Institute for Advanced Study, Seoul, Korea, February 6-8, 2001).
- [24] K. Kuwajima: Molecular mechanisms of the chaperonin function, *KIAS-APCTP Winter School on Biocomplexity* (Korea Institute for Advanced Study, Seoul, Korea, February 6-8, 2001).

(国内会議)

一般講演

- [25] 伊野部智由、槇尾匡、高須悦子、寺田智樹、新井宗仁、伊藤和輝、中尾正治、木原裕、雨宮慶幸、桑島邦博：シャペロニン GroEL の非協同的ヌクレオチド結合と ATP による協同的構造転移、蛋白合同年会（第 51 回タンパク質構造討論会、第 12 回日本蛋白質学会年会、第 7 回タンパク質立体構造の構築原理ワークショップ）東京 2000（学習院大学、2000 年 6 月 7 日 - 10 日）
- [26] 福田宏幸、新井宗仁、桑島邦博：緑色蛍光タンパク質の細胞内フォールディングと試験管内巻き戻り反応、蛋白合同年会（第 51 回タンパク質構造討論会、第 12 回日本蛋白質学会年会、第 7 回タンパク質立体構造の構築原理ワークショップ）東京 2000（学習院大学、2000 年 6 月 7 日 - 10 日）
- [27] 新井宗仁、伊藤和輝、伊野部智由、槇尾匡、中尾正治、木原裕、雨宮慶幸、桑島邦博：ストップフロー-X線溶液散乱法による α -ラクトアルブミンのフォールディング反応の解析、蛋白合同年会（第 51 回タンパク質構造討論会、第 12 回日本蛋白質学会年会、第 7 回タンパク質立体構造の構築原理ワークショップ）東京 2000（学習院大学、2000 年 6 月 7 日 - 10 日）
- [28] 槇尾匡、高須悦子、桑島邦博：ヌクレオチド存在下でのシャペロニン GroEL の作用機構、蛋白合同年会（第 51 回タンパク質構造討論会、第 12 回日本蛋白質学会年会、第 7 回タンパク質立体構造の構築原理ワークショップ）東京 2000（学習院大学、2000 年 6 月 7 日 - 10 日）
- [29] 小柴琢己、小橋川敬博、桑島邦博、新田勝利：フォールディング研究におけるモデル蛋白質としてのイヌミルクリゾチーム、蛋白合同年会（第 51 回タンパク質構造討論会、第 12 回日本蛋白質学会年会、第 7 回タンパク質立体構造の構築原理ワークショップ）東京 2000（学習院大学、2000 年 6 月 7 日 - 10 日）
- [30] 堀井克紀、斉藤稔、依田隆夫、津本浩平、松島正明、桑島邦博、熊谷泉：ヤギ α -ラクトアルブミンの疎水性コアにある Thr29 の構造安定性への寄与、蛋白合同年会（第 51 回タンパク質構造討論会、第 12 回日本蛋白質学会年会、第 7 回タンパク質立体構造の構築原理ワークショップ）東京 2000（学習院大学、2000 年 6 月 7 日 - 10 日）
- [31] 槇尾匡、高須悦子、桑島邦博：大腸菌シャペロニン GroEL の変異体 D398A と標的蛋白質との相互作用、日本生物物理学会第 38 回年会（東北大学、2000 年 9 月 10 日 - 13 日）
- [32] 中尾正治、新井宗仁、小柴琢己、新田勝利、桑島邦博：イヌ・ミルク・リゾチームのフォールディング機構、日本生物物理学会第 38 回年会（東北大学、2000 年 9 月 10 日 - 13 日）
- [33] 河田康志、桑島邦博：シャペロニン作用の分子機構、日本生物物理学会第 38 回年会（東北大学、2000 年 9 月 10 日 - 13 日）
- [34] 堀井克紀、斉藤稔、依田隆夫、津本浩平、松島正明、桑島邦博、熊谷泉：ヤギ α -ラクトアルブミンの変異体の安定化機構、日本生物物理学会第 38 回年会（東北大学、2000 年 9 月 10 日 - 13 日）
- [35] 坂根勲、桑島邦博、廣島通夫、徳永万喜洋：フィードバック AFM を用いたタンパク質 1 分子のアンフォールディング、日本物理学会第 55 回年次大会（新潟大学、2000 年 9 月 22 日 - 25 日）
- [36] 橘純二、下村武史、伊藤耕三、新井宗仁、桑島邦博：分子ナノチューブと線状高分子の包接ダイナミクス、日本物理学会第 55 回年次大会（新潟大学、2000 年 9 月 22 日 - 25 日）
- [37] 伊野部智由、槇尾匡、高須悦子、寺田智樹、新井宗仁、伊藤和輝、中尾正治、雨宮慶幸、木原裕、桑島邦博：GroEL への非協同的ヌクレオチド結合と ATP による協同的構造転移、第 73 回日本生化学会大会（横浜、2000 年 10 月 11 日 - 14 日）
- [38] 桑島邦博：シャペロニンの機能発現の分子機構、文部省科学研究費特定領域研究「分子シャペロンによる細胞機能制御」班会議（下呂、2000 年 11 月 30 日 - 12 月 2 日）
- [39] 伊野部智由：シャペロニン GroEL のヌクレオチドによる協同的構造転移のメカニズム、文部省科学研究費特定領域研究「分子シャペロンによる細胞機能制御」班会議（下呂、2000 年 11 月 30 日 - 12 月 2 日）
- [40] Zhi-Jie Qin, Dong-Mei Hu, 島田瑠衣、中川龍夫、新井宗仁、Jun-Mei Zhou、木原裕：Kinetic study of β -lactoglobulin at subzero temperatures suggests the initial folding rate is very fast、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（広島大学、2001 年 1 月 12 日 - 14 日）
- [41] Zhi-Jie Qin, Dong-Mei Hu, 島田瑠衣、中川龍夫、新井宗仁、Jun-Mei Zhou、木原裕：Early events of β -lactoglobulin refolding at subzero temperatures、日本物理学会第 56 回年次大会（中央大学、2001 年 3 月 27 日 - 30 日）

招待講演

- [42] 桑島邦博：Molecular mechanisms of the chaperonin function, 第 12 回名古屋コンファレンス「タンパク質フォールディングの諸問題」（主催 日本化学会東海支部）（岡崎コンファレンスセンター、2000 年 10 月 16 日 - 18 日）
- [43] 新井宗仁：X線溶液散乱法による蛋白質フォールディング反応と GroEL の構造変化、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開」（主催 物質構造科学研究所放射光研究施設）（筑波、高エネルギー加速器研究機構、2000 年 12 月 19 日 - 20 日）

(セミナー)

- [44] K. Kuwajima: Experimental and simulation studies of α -lactalbumin folding/unfolding, (Department of Chemistry and Biochemistry, University of California, Santa Cruz, August 10, 2000).
- [45] 桑島邦博：タンパク質のフォールディング問題、東京大学理学部物理学教室談話会、2000 年 7 月 7 日。

7.3 能瀬 研究室

脳・神経系はいかにして形成され機能するのか。この問いは現代科学に残された最大の謎の一つである。脳・神経系は、その構成単位である神経細胞が軸索突起を介して他の神経細胞と連絡し、ネットワークを形成することにより成り立っている。われわれの精神活動もつきつめれば、このネットワークにおける情報の流れととらえることができ、その形成機構を明らかにすることは深遠な学問的興味を提起する。

脳神経系の設計図は基本的に遺伝子にコードされている。発生過程において個々の神経細胞は、遺伝情報にしたがって、特定の経路に沿って軸索を伸ばし、適切な標的細胞とシナプス結合する。したがって、この過程に関わる遺伝子を同定し、それらがコードする蛋白分子の作用機構を解析することにより、神経ネットワーク形成のメカニズムを明らかにできると期待できる。しかしながら、ヒトなどの高等動物を用いた研究においては、神経系の複雑さが解析を困難にしている。また新たな機能分子を同定するための方法論も限られている。そこで当研究室ではショウジョウバエの神経系、特に神経-筋結合系をモデル材料として、神経ネットワーク形成のメカニズムを探っている。当面の目標は、神経ネットワークの素子である1個の神経細胞がどのようにしてその配線のパターンを決定し、シナプスを形成するのかを明らかにすることである。将来的には、そこから得られた知見をもとに、この素子がつながってできる複雑なネットワークがどのように形成され機能するのかという問題にアプローチしたいと願っている。神経発生の基本メカニズムは種をこえて保存されていることが最近明らかになってきており、得られた成果は一般性をもつものと期待される。

ショウジョウバエの神経-筋結合系は約30個の運動神経細胞が末梢神経路に沿って軸索を伸ばし30本の筋肉と特異的にシナプス結合することによって成り立っている。この神経結合は胚期に形成され、幼虫期を通じ基本的なパターンは維持される。この系は以下の優れた特徴から、神経ネットワーク研究のモデルとして注目されている。1. 個々の運動神経細胞が識別可能で、それらが軸索を伸ばし、シナプスを形成する過程を追跡することができる。2. 発達した遺伝学を利用し、分子の生体における機能を調べたり、新たな機能分子を見つけたことが可能である。当研究室では、この系を利用し、生物物理学的、分子生物学的手法を駆使した以下の研究を展開している。

7.3.1 神経配線形成の分子機構

発生過程において神経細胞はいかにして、その行き先を正しく見つけだすのだろうか。最近の研究によって、軸索経路や標的細胞に存在する特異分子(軸索ガイド分子)が神経の正確な配線形成に関与していることが分かってきた。われわれは遺伝学的手法を用い、ショウジョウバエ神経系形成過程に関わる

軸索ガイド分子を多数同定し、その機能を調べることにより、神経配線形成の分子機構を探っている。これまでにエンハンサー・トラップ法を用い、神経-筋標的認識に関わる分子、コネクチン、カプリシャスを同定することに成功している。本年度はカプリシャス分子の機能に関するより詳細な解析を進めた。また新たな軸索ガイド分子を同定するための試みとして昨年度より継続して異所発現トラップ法を用いた新規軸索ガイド分子の探索を行った。

Two-hybrid法を用いた、カプリシャス細胞内ドメインと結合する分子の同定(亀田(新座)麻記子、高坂洋史、能瀬聡直)

カプリシャスは leucine-rich repeat とよばれる繰り返し構造を細胞外にもつ膜貫通型蛋白質で、特定の運動神経細胞とその標的筋肉の表面において発現している。これまでに我々は、この遺伝子を壊したり、本来発現しない筋肉において強制発現する実験により、カプリシャスが特定の運動神経と筋肉間の結合に関わる軸索ガイド分子として働くことを示した。カプリシャスを介した神経-筋特異認識が起こる際、その情報はいかにして細胞内に伝えられるのか。カプリシャスを介した細胞内情報伝達の機構を明らかにするため、酵母菌を用いた two-hybrid 法によりカプリシャス細胞内ドメインと結合する分子を単離しようと試みた。まず LexA とカプリシャス細胞内ドメインとの融合タンパク質を発現するプラスミドをデザインし、酵母に導入した。これに、ショウジョウバエ胚期 cDNA ライブラリーをさらに導入し、カプリシャスと相互作用する分子をスクリーニングした。現在、スクリーニングの結果について解析中である。

ショウジョウバエ神経、筋肉組織においてカプリシャスと結合する分子の同定(亀田(新座)麻記子、能瀬聡直)

カプリシャス分子のシナプス形成時の作用機構を知るために、カプリシャスと既知のシナプス形成に関わる蛋白質との相互作用について、実際のショウジョウバエ個体の神経-筋組織を用いて検討した。カプリシャスを大量発現させたショウジョウバエ胚および幼虫の神経、筋肉組織からタンパク質を分離し、カプリシャスに対する抗体で沈降させる(免疫沈降法)ことにより、カプリシャス蛋白質と結合する分子を検出、単離できないかを検討した。まず、幼虫の筋肉組織よりカプリシャスを含むタンパク質を分離する方法を確立した。次に、タンパク質を単離した共沈物を SDS ゲル電気泳動により分離し、シナプス形成時期に働くとされるいくつかのタンパク質について、この共沈物の中に含まれているかどうか、検討した。現在、1つの候補タンパク質について解析を行っている。

カブリシャスの下流因子の遺伝学的解析（亀田（新座）麻記子、能瀬聡直）

既知のシグナル伝達関連分子について、カブリシャスの下流において働く可能性を検討した。カブリシャスを本来発現しない筋肉 13 において発現すると、運動神経 RP 5 による異所的シナプス形成が誘導される。もしある遺伝子がこの過程においてカブリシャスの下流で働いたら、その分子の機能を低下させたり活性化することが、カブリシャスによる異所的シナプスの誘導の頻度に影響をあたえるはずである。そこで既知のシグナル系に関わる様々な分子、カルモジュリンキナーゼ、C キナーゼ（カルシウム系）、A キナーゼ（cAMP 系）、低分子量 G 蛋白質 Dcdc42、Drac1、DrhoA（細胞骨格制御系）、D-raf、ras1（MAP キナーゼ系）について、構成的活性化型（constitutively active）および阻害型（dominant negative）の作用を検討した。その結果、Dcdc42、A キナーゼの構成的活性化型をカブリシャスと同時に発現するとカブリシャスによる異所的シナプスの誘導頻度を増加させること、逆にこれら分子の阻害型を発現すると、異所的シナプスの誘導頻度が減少することが明らかとなった。さらに解析を進めたところ、Dcdc42 の構成的活性化型および阻害型は、それ単独で異所的シナプスの誘導頻度を増加、減少させることが分かった。しかしながら A キナーゼに関しては、その効果はカブリシャスと同時に発現させた時のみに表れることが明らかになった。このことは、シナプス形成時に A キナーゼを介したシグナル伝達系がカブリシャスの下流で働いていることを示唆しており現在この可能性についてさらに検討している。

特異的シナプス形成過程におけるカブリシャス分子の挙動の可視化（高坂洋史、能瀬聡直）

特異的シナプス誘導過程におけるカブリシャス分子の挙動を詳細に解析することを目的として、クラゲの蛍光蛋白質である GFP とカブリシャスとの融合蛋白質をショウジョウバエ個体内の特定の筋肉で発現させた。すると、完成したシナプスの周辺部にこの融合蛋白質が局在することが確認された。しかしカブリシャスの C 末端につけた蛍光蛋白質のため融合蛋白質は異所的シナプスの誘導能を失ってしまった。このことはカブリシャスの C 末端領域から発するシグナル系の存在を強く示唆するものであるが、シナプス形成過程の可視化に融合蛋白質は不適であることも示している。現在共焦点顕微鏡を用いて抗体染色法によりシナプス形成時のカブリシャス分子の挙動の解析を試みている。

カブリシャス分子 C 末端領域の役割の検討（高坂洋史、能瀬聡直）

シナプス部には効率の良い情報伝達を実現するために受容体や可塑性に関わる膜蛋白質などが高密度

に凝集している。Discs-large という蛋白質は一部の膜蛋白質の C 末端モチーフを認識し、その凝集を起こすことが知られている。カブリシャス分子はこの C 末端モチーフを持つので Discs-large との結合が示唆される。そこで、C 末端モチーフを失った変異カブリシャス cDNA をデザインした。現在この cDNA のショウジョウバエ個体への導入を試みている。

神経-筋認識に関わる新たな LRR 蛋白質の同定の試み（鳥居宏在、能瀬聡直）

LRR (leucine-rich repeat) は、タンパク分子間の相互作用に際して機能していると考えられるモチーフである。これまでに見出された軸索ガイド分子のうち、カブリシャス、コネクチン、トール等が LRR を持っており、それぞれの分子が異なった組み合わせの筋肉において発現して、特異的な標的認識のプロセスで重要な役割を果たしていることが分かっている。

そこで特定の筋肉で発現し神経-筋特異結合に関わる新たな分子を探索するために、ショウジョウバエゲノムのデータベース上で LRR を持つ細胞接着分子をコードしていると予測される遺伝子を探索し、その中でも特に既知の遺伝子であるカブリシャス、トール、ケッコン遺伝子と相関の高いものに注目して 30 の遺伝子を list up した。その胚における発現を調べるために、RNA in situ hybridization を行い、mRNA の分布を調べた。しかしながら、筋肉において特異的に強く発現している分子を発見することは出来なかった。

異所発現トラップ法を用いた新規軸索ガイド分子の探索：1092 系統の解析（梅宮猛、高須悦子、鳥居宏在、相垣敏郎博士（都立大）、能瀬聡直）

異所発現トラップ法は最近開発された実験手法で、未知の遺伝子を本来発現しない組織や細胞で異所発現させ、その効果を調べることにより、新たな機能分子を見つけ出す遺伝的スクリーニングである。我々はこの手法を用いゲノム中の多数の遺伝子を筋肉全体や神経全体において強制発現させ、その神経配線形成への影響を調べることにより、新たな軸索ガイド分子を単離できないかと考え、スクリーニングを行った。本スクリーニングで単離された 1092 系統は筋肉全体において強制発現させると筋肉 12 を支配するはずの運動神経が近傍の筋肉 13 にもシナプスを形成するという表現系を示す。またその転写産物は中枢神経内の一部の細胞において特異的に発現していた。その分子構造を明らかにしたところ、1092 遺伝子は新規の膜タンパク質をコードすることが判明した。本年度は、この分子の機能をより詳細に調べるため機能欠失体の作製を行い、その表現系を解析した。その結果 1092 遺伝子を欠失した個体では、筋肉 12 のシナプス形成過程に異常が

あることが判明した。以上の結果から本遺伝子は神経-筋特異結合に関わる新たな軸索ガイド分子であることが強く示唆された。

異所発現トラップ株 3011 系統の解析 (高須悦子、梅宮猛、鳥居宏在、相垣敏郎博士 (都立大)、能瀬聡直)

異所発現トラップ株 3011 系統を筋肉全体で強制発現させると、特定の運動神経が、シナプスを形成しなかったり、あるいはシナプスを形成する場合でも、通常に比べ終末が小さかったり、形成部位が異常であるという表現系を示した。強制発現されている転写産物を単離し、タンパク質コード領域を予想した結果、セマフォリンドメインおよび thrombospondin type I repeat をもつ膜貫通型蛋白質であることが判明した。3011 mRNA の分布を調べたところ、末梢の特定の部位において特異的に発現していた。セマフォリンドメインをもつ分子の多くは repulsive な作用を介して神経軸索誘導に関わることが知られており、3011 遺伝子も同様な作用を介して運動神経に働きかけることにより、その投射パターンを制御していることが示唆された。

異所発現トラップ株 G6 系統の解析 (田中宏昌、高須悦子、能瀬聡直)

異所発現トラップ株 G6 系統は、胚における神経全体での強制発現が軸索のパターンに異常を生ずるものとして単離された系統である。強制発現されている転写産物の一部を RT-PCR で回収し、そのシーケンスをもとに、ショウジョウバエのゲノムプロジェクトの情報を活用し、対応するタンパク質コード領域を予想した。さらに PCR 産物、既存の EST および新たに単離したラムダファージクローンを用い、完全長 cDNA をクローニングした。その結果、G6 遺伝子はいくつかの細胞内蛋白質において見つかった formin homology (FH) ドメインをもつ残基数 1644 の新規タンパク質をコードすることが判明した。このドメインをもつ多くの蛋白質は細胞骨格制御に関わることが知られている。さらに G6 転写産物の正常発生過程における発現様式を調べるため、RNA in situ を行った結果、神経系内において一部の細胞において発現していることが分かった。以上の結果から、G6 遺伝子は、特定の神経細胞において細胞骨格系を調節することにより、軸索伸長パターンを制御する機能をもつと予想される。この可能性をさらに検討するため、機能欠失体の作製や完全長及び一部欠失型 cDNA の遺伝子導入を現在試みている。

7.3.2 シナプス形成の分子機構

神経細胞はシナプスと呼ばれる特徴を持つ部位を介して、他の神経細胞や筋肉細胞に情報を伝えている。このように神経細胞が機能を果たす上で中心的な役割を果たしているシナプス構造がどのようにしてできていくのか、という問いかけに答える研究はまだ始まったばかりである。当研究室ではショウジョウバエ神経-筋シナプスをモデル系として、分子生物学的、光学的、電気生理学的諸技術を用い、シナプス形成過程の分子機構の解明にアプローチしている。

トランスニューロナルマーカー WGA を用いたシナプス形成過程の測定方法の確立 (谷藤 (森本) 高子、徳本貴久、吉原良浩博士 (理研)、岡野栄之博士 (阪大)、能瀬聡直)

小麦胚芽レクチン (WGA) は、シナプスを介して特異的に一方から他方へと移ることが報告されている蛋白質である。このシナプス間の移動は、神経細胞の活動の大きさに依存して起こることが明らかとなっている。我々はショウジョウバエの筋肉細胞において WGA を発現させると、筋肉細胞にシナプスを形成している運動神経細胞へと WGA が移動することを見だし、この WGA のシナプスを介した移動が、シナプス形成が正しく起こっているかどうかの指標として使えるのではないかと考えた。

これまで WGA の検出は、抗 WGA 抗体を用いた免疫染色法により行なっていたが、大規模なスクリーニングには効率的でないので、前年度からクラゲの蛍光蛋白質である GFP と WGA を融合させた蛋白質を筋肉で発現するようなショウジョウバエを作成し、GFP-WGA 融合蛋白質が WGA と同様に、筋肉細胞から神経細胞へと移動するかについて検討してきた。その結果、WGA は GFP との融合蛋白質として、発現しており、GFP の局在と、WGA の局在が一致していることが確認できた。すなわち、GFP-WGA 融合タンパク質は WGA と同様に筋肉細胞から運動神経細胞へと移動することが示唆された。さらにこの方法の有効性を検討するため、シナプス形成に異常があると報告されている突然変異体について、GFP-WGA 融合蛋白質の筋肉細胞から神経細胞への移動について検討した。しかし、シナプス形成が異常である 2 つの既知の突然変異体について調べたが、GFP-WGA 融合タンパク質の移動について差異は見られなかった。したがって、現在までのところ GFP-WGA 融合蛋白質の筋肉細胞から神経細胞への移動が、シナプス形成が正しく起こっているかどうかの指標として有効であるという確証は得られていない。

シナプス成長過程に関わる PDZ ファミリー遺伝子の解析 (亀田 (新座) 麻記子、能瀬聡直)

シナプスの形成過程において、PDZ ドメインを持つ分子ファミリーが重要な役割を果たしていることが近年明らかになりつつある。そこで、シナプス形成に関わる新規 PDZ ドメイン分子を単離する目的で以下の実験を行った。ショウジョウバエゲノムプロジェクトを利用し、PDZ ドメインを含むタンパク質をコードする遺伝子を調査し、そのうちのいくつかについて遺伝子機能欠損変異体入手し、シナプス形成に異常が見られないか観察した。その結果、ある一つの変異系統において、幼虫初期シナプスのブトン構造形成に異常が見られた。このことは、この遺伝子がシナプス形成過程に関わっていることを示唆している。今後この遺伝子についてさらに解析を行っていく予定である。

電気生理学的解析方法を用いたシナプス形成機構の解析: シナプス形成における CaMKII の役割 (谷藤 (森本) 高子、能瀬 聡直)

シナプスの機能を調べる上で、シナプス伝達の応答の大きさを直に電気的に測定することは不可欠である。我々は、様々な突然変異体で、さらに詳しい電気生理学的解析を行なうために、パッチクランプ法による筋肉細胞からの後シナプス電流を測定する系の確立を行なった。さらに、この手法を用いて、標的細胞による逆行性のシナプス伝達調節機構を明らかにすることを目的として、研究を開始した。このようなシナプス伝達を調節する逆行性因子は成熟したシナプスを形成するために働いていると考えられている。まず、神経-筋シナプスにおいて、標的細胞である筋肉細胞内のシグナル伝達機構を変化させた時のシナプス伝達に対する影響を調べた。種々のシグナル伝達機構に関与する分子のうち、カルモジュリン・キナーゼ II (CaMKII) に着目した。CaMKII はシナプス後肥と呼ばれるシナプス後細胞の特徴ある構造に豊富に含まれ、シナプス可塑性において、重要な働きをしていると考えられている酵素である。UAS-GAL4 システムという、特定の組織にある分子を発現させるのに有効な方法を用い、特定の筋肉細胞に活性化型 CaMKII を発現させ、シナプス伝達に与える影響について検討した。その結果、孵化後 3 時間以内の幼虫では CaMKII 活性化により、シナプス伝達の促進が見られた。このシナプス伝達の変化はシナプス前細胞の変化によるもので、逆行性因子を介していることが、明らかになった。さらに、孵化後 5 時間以上経過した幼虫では逆に、シナプス伝達が抑制されていた。以上の結果は、シナプス後細胞内の CaMKII 活性化はシナプス形成初期過程に必要なであるが、初期過程終了後には不活化される必要があることを示唆している。引き続き、更に詳しい影響について検討している。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Taniguchi, H., Shishido, E., Takeichi, M. & Nose, A.: Functional dissection of *Drosophila* Capricious: its novel roles in neuronal pathfinding and selective synapse formation. *J. Neurobiol.*, 42, 104-116 (2000).
- [2] Tabuchi, K., Sawamoto, K., Suzuki, E., Ozaki, K., Sone, M., Hama, H., Tanifuji-Morimoto, T., Yuasa, Y., Yoshihara, Y., Nose, A. & Okano, H.: The GAL4/UAS-WGA system as a powerful tool for tracing *Drosophila* transsynaptic neural pathways. *J. Neurosci. Res.*, 59, 94-99 (2000).
- [3] Inobe, T., Makio, T., Takasu-Ishikawa, E., Terada, T. P. and Kuwajima, K: Nucleotide binding to the chaperonin GroEL: non-cooperative binding of ATP analogs and ADP, and cooperative effect of ATP. *Biochem. Biophys. Acta* 1545, 160-173 (2000).

(国内雑誌)

- [4] 能瀬聡直: 特異的神経・筋シナプス形成のメカニズム *Molecular Medicine* 37, 247-253 (2000).

(学位論文)

- [5] 田中宏昌: 神経軸索伸長に関連した新規 formin homology protein の解析 (修士論文)
- [6] 徳本貴久: トランスニューロナルマーカ WGA を用いたシナプス形成過程の解析 (修士論文)

< 学術講演 >

(国際会議)

招待講演

- [7] Akinao Nose: Molecular genetic analysis of neuromuscular specificity in *Drosophila*. The 4th German-Japanese Joint Workshop "Molecular Basis of Axonal Regeneration" (Hakone, September 2000).

(国内会議)

一般講演

- [8] 能瀬聡直: ショウジョウバエ神経-筋シナプス特異結合の分子機構 第 23 回日本神経科学大会 第 10 回日本神経回路学会 合同大会 (横浜, 2000 年 9 月)
- [9] 森本 (谷藤) 高子、能瀬 聡直: 標的細胞による逆行性のシナプス伝達調節機構: 標的細胞内シグナル伝達系の関与、第 23 回日本神経科学大会 第 10 回日本神経回路学会 合同大会 (横浜, 2000 年 9 月)
- [10] 亀田麻記子、能瀬聡直: シナプス形成に関わる後シナプス細胞内情報伝達機構の解析、第 23 回日本神経科学大会 第 10 回日本神経回路学会 合同大会 (横浜, 2000 年 9 月)
- [11] 高須悦子、梅宮猛、鳥居宏在、相垣敏郎、能瀬聡直: 強制発現システムを用いたショウジョウバエ軸索誘導に関わる新規セマフォリン分子の同定、第 23 回日本分子生物学会 (神戸, 2000 年 12 月)
- [12] 田中宏昌、高須悦子、梅宮猛、相垣敏郎、能瀬聡直: 神経軸索伸長に関連したショウジョウバエ新規 formin homology protein の解析、第 23 回日本分子生物学会 (神戸, 2000 年 12 月)

8 技術部門

8.1 技術部門

8.1.1 実験装置試作室

利用状況

2000年4月から2001年3月までの、実験装置試作室の主な利用状況は以下のとおりである。

- | | |
|------------------|-------|
| 1. 内部製作件数 | 43 件 |
| 2. 設計及び部品等の問い合わせ | 105 件 |
| 3. 外注発注 | 93 件 |
| 4. 他教室の問い合わせ | 4 件 |

工作実習

当教室所属の大学院1年生を対象として、6月12日から7月4日まで下記の内容で工作講習会を行なった。

- 参加人員：48名
- 実習内容
 1. 実験用機器・部品等の製作に必要な設計・製図の基礎
 2. 測定器（ノギス、マイクロメーター等）の使い方
 3. ケガキ、ポンチ、タツブ、ダイス、の使い方
 4. 材質による刃物の使用方法
 5. 旋盤、フライス盤、ボール盤の使用方法

II

Summary of group activities in 2000

1 Theoretical Nuclear Physics Group

Subjects: Stochastic approach to many-body problems, Structure and reactions of unstable nuclei, Interacting Boson Model (IBM)
Quark-gluon Plasma, Lattice QCD simulations, Structure of Hadrons

Member: Takaharu Otsuka, Tetsuo Hatsuda, Naoyuki Itagaki, and Shoichi Sasaki

In the nuclear theory group, a wide variety of subjects are studied. The subjects are divided into two major categories. One is Nuclear Structure Physics and the other Hadron Physics.

Nuclear Structure Physics

Among various subjects of the Nuclear Structure Physics, we have studied mostly, during the past one year, (1) Monte Carlo approach to many-body problems, (2) Structure and reaction of unstable nuclei, (3) Interacting Boson Model (IBM).

(1) We have proposed, several years ago, the Quantum Monte Carlo Diagonalization (QMCD) method for solving many-body problems. This method enables us to generate, through a Monte Carlo process, a small number of many-body bases which are important to the final solution. The method therefore can be characterized as *importance truncation scheme* [1, 5]. Thus, this study is expected to produce enormous progress in our understanding of nuclear structure. This kind of studies are referred to as Monte Carlo Shell Model.

(2) Unstable nuclei stand for the nuclei far from the beta stability line. We are studying various features of such nuclei. This year, a systematic study has recently been made for unstable nuclei around $A=30$, focusing upon varying shell gap, vanishing magic number and anomalous deformation, by applying the Monte Carlo shell model described above [1, 3, ?]. We found that magic numbers of unstable nuclei can be quite different systematically from those of stable nuclei, and this difference has a robust origin [4]. The molecular structure of unstable nuclei is studied extensively also [7]. A new method treating loosely bound particles is developed also.

(3) Our group has been one of the major research groups on the algebraic approach to the nuclear structure. In recent years, much effort has been made in the study of the microscopic analysis of the collective states and the origin of the algebraic structure, by using the Monte Carlo Shell Model [2].

Hadron Physics

In Hadron Physics group (T. Hatsuda and S. Sasaki), many-body problems of quarks and gluons are studied theoretically on the basis of the quantum chromodynamics (QCD).

Main research interests are the quark-gluon structure of hadrons, matter under extreme conditions, quark-gluon plasma in relativistic heavy-ion collisions, high density matter and neutron stars, chiral symmetry in nuclei, color superconductivity, and lattice gauge theories.

The research activities of this year are listed below.

1. Physics of high density matter
 - 1.1 Neutron star matter, quark matter their phase transition [8, 9, 10]
 - 1.2 Chiral symmetry restoration in baryonic matter [11]
2. QCD structure of hadrons
 - 2.1 Lattice QCD simulations for excited baryons, and chiral symmetry in baryon spectrum [12, 13]
 - 2.2 High energy QCD processes, diffraction and soft/hard Pomeron [14, 15]
 - 2.3 Spectral functions in lattice QCD [16]
3. Quark-gluon plasma and its signature [17, 18]

References

- [1] T. Otsuka, M. Honma, T. Mizusaki, N. Shimizu and Y. Utsuno : Monte Carlo Shell Model of Atomic Nuclei, Progress of Particle and Nuclear Physics, (Elsevier, Amsterdam, 2001), *in press*.
- [2] Collective Excitations of Nuclei in The Monte-Carlo Shell Model, N. Shimizu, T. Otsuka, T. Mizusaki and M. Honma, Phys. Rev. Lett. 86, 1171 (2001).
- [3] Y. Utsuno, T. Otsuka, T. Mizusaki and M. Honma : Extreme location of F drip line and disappearance of the $N=20$ magic structure, Physical Review **C**, Rapid Com. *in press*.
- [4] T. Otsuka, R. Fujimoto, Y. Utsuno, B.A. Brown, M. Honma and T. Mizusaki : Magic numbers in exotic nuclei and spin-isospin properties of NN interaction, *submitted*.
- [5] T. Otsuka : Monte Carlo Shell Model, Nuclear Physics **A**, (2001), *in press*.
- [6] T. Otsuka, Y. Utsuno, T. Mizusaki and M. Honma : Exotic Nuclei in the Monte Carlo Shell Model calculations, Nucl. Phys. **A 685**, 100c (2001).
- [7] N. Itagaki, S. Okabe, and K. Ikeda, Important role of the spin-orbit interaction in forming the $1/2^+$ orbital structure in Be isotopes, Phys. Rev. **C62**, 034302 (2000).
- [8] A. Ishihara, M. Kimura, A. Suzuki, K. Suzuki : Charge symmetry breaking in neutron star matter, Phys. Rev. **C61**, 034004 (2000) .
- [9] T. Maruyama and T. Hatsuda : Color Molecular Dynamics for High Density Matter, Phys. Rev. **C61**, 062201 (2000).
- [10] T. Maruyama, T. Hatsuda and S. Chiba : Color Molecular Dynamics Simulation of Nuclei and Dense Matter, Nucl. Phys. **A681**, 72 (2001).
- [11] D. Jido, T. Hatsuda and T. Kunihiro : In-Medium π - π Correlation induced by Partial Restoration of Chiral Symmetry, Phys. Rev. **D63**, 011901 (2001).
- [12] Shoichi Sasaki, Tom Blum and Shigemi Ohta : A Lattice Study of the Nucleon Excited States with Domain Wall Fermions. To be published in Phys. Rev. D, (hep-lat/0102010)
- [13] D. Jido, T. Hatsuda and T. Kunihiro : Chiral Symmetry Realization for Even Parity and Odd Parity Baryon Resonances, Phys. Rev. Lett. **84**, 3252 (2000).
- [14] K. Suzuki, A. Hayashigaki, K. Itakura, J. Alam and T. Hatsuda : Validity of the color dipole approximation for diffractive production of heavy quarkonium, Physcal Review **D62**, 031501 (2000).
- [15] J. Alam, A. Hayashigaki, K. Suzuki, and T. Hatsuda : Diffractive phi and rho production in a perturbative QCD model, Physical Review **D63**, 114023 1-6 (2001)
- [16] M. Asakawa, T. Hatsuda, and Y. Nakahara : Maximum Entropy Analysis of the Spectral Functions in Lattice QCD : to appear in Prog. Part. Nucl. Phys. **47** (2001).
- [17] J. Alam, S. Sarkar, T. Hatsuda, T. Nayak and B. Sinha : Photons from Pb-Pb Collisions at CERN SPS, Phys. Rev. **C63**, 021901 (2001).
- [18] J. Alam, S. Sarkar, P. Roy, T. Hatsuda, and B. Sinha : Thermal Photons and Lepton Pairs from Quark Gluon Plasma and Hot Hadronic Matter, Ann. Phys. **286**,159 (2001).

2 Theoretical Particle and High Energy Physics Group

Research Subjects: The Unification of Elementary Particles & Fundamental Interactions

Member: Kazuo Fujikawa, Tohru Eguchi, Tsutomu Yanagida, Yutaka Matsuo,
Ken-Ichi Izawa, Yuji Sugawara, Yosuke Imamura, Teruhiko Kawano

The main research interests at our group are in superstring theory, quantum theory of gravity and unification theories. Superstring theory, supersymmetric field theories, topological field theories and conformal field theories are analyzed relating to the fundamental problems of interactions. In the field of high energy phenomenology, supersymmetric unified theories are extensively studied and cosmological problems are also investigated. In addition to these topics, we also study various problems in quantum field theory, from the viewpoints of both continuum and lattice approaches.

We list the main subjects of our researches below.

1. Superstring Theory and M-Theory
 - 1.1 Compactification Problems and Calabi-Yau Manifolds [3, 38, 27, 28, 2]
 - 1.2 Topological String Theory [4, 30, 31]
 - 1.3 Brane Dynamics and Tachyon Condensation [23, 13, 18, 47, 48, 41, 42, 36]
 - 1.3 Noncommutative Geometry [24, 25, 26, 16, 17, 44, 45, 11]
 - 1.4 *AdS/CFT* Correspondence [37]
 - 1.5 F-Theory [46]
2. Quantum Gravity [12, 43, 63]
3. High Energy Phenomenology
 - 2.1 Particle Cosmology [1, 34, 35, 49, 58, 51, 15, 14, 39, 40]
 - 2.2 The Phenomenology of Supersymmetric Models [29, 50, 19, 20, 21, 22]
 - 2.3 Lepton Flavor Physics [10]
4. Quantum Field Theory
 - 3.1 Lattice Gauge Theory [5, 7, 8]
 - 3.2 The Quantization of Gauge Theories [6, 52]

References

- [1] T. Asaka and T. Yanagida, "Solving the gravitino problem by axino", *Phys. Lett.* **B494**, 297 (2000).
- [2] M. Asano and M. Natsuume, "The no-ghost theorem for string theory in curved backgrounds with a flat timelike direction," *Nucl. Phys.* **B588**(2000)453.
- [3] Tohru Eguchi, Hiroaki Kanno, "Five-Dimensional Gauge Theories and Local Mirror Symmetry", *Nucl.Phys.* **B586** (2000) 331-345
- [4] Tohru Eguchi, Ezra Getzler, Chuan-Sheng Xiong, "Topological gravity in genus 2 with two primary fields", to appear in *Adv. Theor. Math. Phys.*
- [5] K. Fujikawa: "Algebraic generalization of the Ginsparg-Wilson relation", *Nucl. Phys.* **B589** (2000)487.
- [6] K. Fujikawa and H. Terashima: "Quantum and Classical Gauge Symmetries in a Modified Quantization Scheme", *Int. Journal of Mod. Phys. A* (in press), hep-th/0004190.
- [7] K. Fujikawa and M. Ishibashi: "Chiral anomaly for a new class of lattice Dirac operators" , *Nucl. Phys.* **B587** (2000)419-441.
- [8] K. Fujikawa and M. Ishibashi: "Locality properties of a new class of lattice Dirac operators", *Nucl. Phys. B* (in press), hep-lat/0102012.
- [9] K. Fujikawa: "Aspects of Anomalies in Field Theory", *Int. Journal of Mod. Physics*, **A16**(2001) 331.

-
- [10] F. Borzumati, K. Hamaguchi and T. Yanagida: “Supersymmetric seesaw model for the (1+3)-scheme of neutrino masses”, Phys. Lett. B **497** (2001) 259.
- [11] M. Hamanaka and S. Terashima, “On exact noncommutative BPS solitons,” JHEP **0103** (2001) 034 [hep-th/0010221].
- [12] Masashi Hashimoto: “Action of singular instantons of Hawking-Turok type”, Phys. Rev. **D63** (2001) 043510.
- [13] Y. Imamura: “A D2-brane realization of Maxwell-Chern-Simons-Higgs systems”, JHEP **0102** (2001) 035.
- [14] S. Hayakawa and K. I. Izawa: “Warped compactification with an Abelian gauge theory,” Phys. Lett. B **493**, 380 (2000) [hep-th/0008111].
- [15] K.-I. Izawa: “Quintessential Brane and the Cosmological Constant”, Prog. Theor. Phys. **105** (2001) 185.
- [16] T. Kawano and T. Takahashi, “Open String Field Theory On Noncommutative Space,” Prog. Theor. Phys. **104**, 459 (2000).
- [17] T. Kawano and T. Takahashi, “Open-Closed String Field Theory In A Background B -Field,” Prog. Theor. Phys. **104**, 1267 (2000).
- [18] T. Kitao and N. Ohta: “Spectrum of Maxwell-Chern-Simons Theory Realized on Type IIB Brane Configurations”, Nucl.Phys. **B578** (2000) 215.
- [19] N. Kitazawa, N. Maru and N. Okada: “Dynamical Supersymmetry Breaking with Gauged $U(1)_R$ Symmetry” Phys. Rev. **D62** (2000) 077701.
- [20] N. Kitazawa, N. Maru and N. Okada: “Models of Dynamical Supersymmetry Breaking with Gauged $U(1)_R$ Symmetry” Nucl. Phys. **B586** (2000) 261.
- [21] N. Kitazawa, N. Maru and N. Okada: “R-mediation of Dynamical Supersymmetry Breaking” Phys. Rev. **D63** (2000) 015005.
- [22] N. Maru, N. Sakai, Y. Sakamura and R. Sugisaka: “SUSY Breaking by Overlap of Wave Functions in Coexisting Walls” Phys. Lett. **B496** (2000) 98.
- [23] Hiroyuki Fuji, Yutaka Matsuo: “Open String On Symmetric Product”, Int. J. Mod. Phys. **A16** (2001) 557-608, hep-th/0005111.
- [24] Yutaka Matsuo: “Topological Charges Of Noncommutative Soliton”, Phys. Lett. **B499** (2001) 223-228, hep-th/0009002.
- [25] Y. Matsuo, Y. Shibusa: “Volume Preserving Diffeomorphism And Noncommutative Branes”, JHEP **0102** (2001) 006, hep-th/0010040 .
- [26] I. Bars, H. Kajiura, Y. Matsuo, T. Takayanagi: “Tachyon Condensation On Noncommutative Torus”, Phys. Rev. **D63** (2001) 86001, hep-th/0010101.
- [27] M. Naka and M. Nozaki: “Singular Calabi-Yau Manifolds and ADE Classification of CFTs”, Nucl. Phys.(2001) **B599** 334.
- [28] J. Hashiba and M. Naka: “Landau-Ginzburg Description of D-branes on ALE Spaces”, Nucl. Phys.(2001) **B599** 361.
- [29] Y. Nomura and T. Yanagida, “Bulk $U(1)$ Messenger”, Phys. Lett. **B487** (2000) 140.
- [30] E. Ogasa: “The projections of n -knots which are not the projection of any unknotted knot” Journal of knot theory and its ramifications (2001)
- [31] E. Ogasa: “ Nonribbon 2-links all of whose components are trivial knots and some of whose bund-sums are nonribbon knots” Journal of knot theory and its ramifications (to be published)
- [32] Y. Sugawara: “Topological String on $AdS_3 \times \mathcal{N}$ ”, Nucl. Phys. **B576** (2000) 265-284.
- [33] T. Eguchi and Y. Sugawara: “Modular Invariance in Superstring on Calabi-Yau n -fold with $A - D - E$ Singularity”, Nucl. Phys. **B577** (2000) 3-22.
- [34] T. Asaka, M. Fujii, K. Hamaguchi and T. Yanagida, “Affleck-Dine leptogenesis with an ultralight neutrino,” Phys. Rev. D **62**, 123514 (2000).
- [35] M. Fujii, K. Hamaguchi and T. Yanagida, “Reheating-temperature independence of cosmological baryon asymmetry in Affleck-Dine leptogenesis,” Phys. Rev. D **63**, 1235XX (2001), hep-ph/0102187.
- [36] Shibusa Yuuichirou: “A component of superconnection of 11-dimensional curved superspace at second order in anticommuting coordinates”. Prog. Theor. Phys. **104** (2000) 249
- [37] Y. Hikida, K. Hosomichi and Y. Sugawara: “String Theory on AdS_3 as Discrete Light-Cone Liouville Theory”, Nucl. Phys. **B589** (2000) 134-166.

-
- [38] T. Eguchi and Y. Sugawara: "D-branes in Singular Calabi-Yau n -fold and $N = 2$ Liouville Theory", Nucl. Phys. B598 (2001) 467-491.
- [39] T. Asaka, K. Hamaguchi and Koshiro Suzuki, "Cosmological gravitino problem in gauge-mediated supersymmetry breaking models", Phys.Lett.**B490**:136-146,2000.
- [40] Koshiro Suzuki and T. Watari, "Constraints on inflation models from supersymmetry breakings", Phys.Lett.**B506**:231-237,2001.
- [41] Y. Hikida, M. Nozaki and T. Takayanagi, "Tachyon condensation on fuzzy sphere and noncommutative solitons," Nucl. Phys. B **595** (2001) 319.
- [42] T. Takayanagi, "Holomorphic tachyons and fractional D-branes," hep-th/0103021, to be published in Nucl. Phys. B.
- [43] H. Terashima: "The Brown-Henneaux's central charge from the path-integral boundary condition", Phys. Lett. **B499**, 229 (2001).
- [44] S. Terashima, "The non-Abelian Born-Infeld action and noncommutative gauge theory," JHEP **0007** (2000) 033
- [45] T. Kawano and S. Terashima, "S-duality from OM-theory," Phys. Lett. B **495** (2000) 207
- [46] J. Hashiba, K. Hosomichi and S. Terashima, "String junctions in B field background," JHEP **0009** (2000) 008
- [47] M. Naka, T. Takayanagi and T. Uesugi: "Boundary State Description of Tachyon Condensation", JHEP **0006** (2000) 007, hep-th/0005114.
- [48] T. Takayanagi, S. Terashima and T. Uesugi: "Brane - Antibrane Action from Boundary String Field Theory", JHEP **0103** (2001) 019, hep-th/0012210.
- [49] Y. Nomura, T. Watari and T. Yanagida, "Quintessence axion potential induced by electroweak instanton effects," Phys. Lett. B **484** (2000) 103 [hep-ph/0004182].
- [50] M. Kawasaki, T. Watari and T. Yanagida, "Vacuum instability in anomaly mediation models with massive neutrinos," Phys. Rev. D **63** (2001) 083510 [hep-ph/0010124].
- [51] T. Watari and T. Yanagida, "N = 2 supersymmetry in a hybrid inflation model," Phys. Lett. B **499** (2001) 297 [hep-ph/0011389].

3 Sakai Group

Research Subjects: Experimental Nuclear Physics

Member: Hideyuki Sakai, Atsushi Tamii

We are aiming to explore nuclear structure as well as nuclear reaction mechanisms by using an intermediate energy beam from accelerators. Particular emphasis is placed on the study of the spin degrees of freedom in nuclei. Our expertise is various “polarizations”: polarized beams (\vec{p} , \vec{n} and \vec{d}), polarized targets (\vec{p} and ^3He), and polarization analysis of reaction products (\vec{p} , \vec{n} and \vec{d}).

Major activities during the year are summarized below.

1. Construction of a polarized neutron beam facility has been completed. Following three subjects were pursued.
 - a) Measurement of the $^{90}\text{Zr}(n, p)$ reaction at $E_n=300$ MeV has been carried out to extract the distribution of the β^+ Gamow-Teller (GT) strength in the (n, p) channel for the study of the effect of the quark degrees of freedom.
 - b) Three nucleon force (3NF) in a Coulomb free system has been studied by measuring the differential cross sections and vector analyzing powers of the n - d elastic scattering at $E_n=250$ MeV. Faddeev calculations incorporating 3NF have reproduced the cross section slightly better than those without 3NF. They still, however, underestimate the data, which might be an indication of a relativistic effect at this energy.
 - c) High energy resolution measurement of (p, n) reaction by using the (n, p) facility has been tested at $E_p=300$ MeV. We obtained a good energy resolution of 680 keV in full width at half maximum, which is the highest energy resolution ever obtained at this energy.
2. How the effect of 3NF appears in nuclear reactions is one of interesting subjects in nuclear physics. We have measured the d - p elastic scattering with high precision at 140, 200 and 270 MeV for cross sections and deuteron analyzing powers as well as the deuteron to proton polarization transfer coefficients at 270 MeV. The data are compared with Faddeev calculation incorporating 3NF models. A clear signature of 3NF is obtained for the cross section data. However, there still remains discrepancies in the tensor analyzing powers which clearly indicates deficiency in the spin-dependent part of 3NF.
3. Dibaryon, which is an exotic particle consisting of 6 quarks, has been searched for more than 30 years. No clear evidence of its existence has been obtained up to now. A group at Moscow has recently found two candidates of the super-narrow dibaryon (SND) in mass spectra of the $^2\text{H}(p, p')$ reaction. The SND is expected to have a very narrow decay width (≤ 1 keV) due to the prohibition of the decay to NN or $NN\pi$ system. We have measured the same reaction with much better resolution for the dibaryon candidate at 1905 MeV/ c^2 . However, no resonance peak has been observed.
4. The resonance at around 7 MeV in mirror nuclei, ^{12}N and ^{12}B , has long been known as the 1^- state of spin-flip dipole resonances (SDR). Recently contradicting results have been reported by the $^{12}\text{C}(\vec{d}, ^2\text{He})$ and $^{12}\text{C}(^{13}\text{C}, ^{13}\text{N})$ measurements in which dominance of the 2^- state is clearly shown for this resonance. On the other hand, less clear result of the 1^- assignment has been also reported by an angular correlation measurement of the decay products. In order to obtain additional information, we have performed multipole decomposition analysis (MDA) of the double differential cross sections and spin observables of the $^{12}\text{C}(p, n)$ reaction at $E_p=197$ MeV. The MDA result shows the dominance of the 1^- state together with minor contribution of the 2^- state. This contradicts again with the results by the $^{12}\text{C}(\vec{d}, ^2\text{He})$ and $^{12}\text{C}(^{13}\text{C}, ^{13}\text{N})$ measurements.
5. A double GT giant resonance (DGTR) has been searched for by measuring the double spin-flip probability (S_2) of the $^{12}\text{C}(\vec{d}, \vec{d}')$ reaction at $E_d=270$ MeV. The obtained S_2 values are consistent with zero in the measured excitation energy region (≤ 50 MeV). No signature of the DGTR excitation is found.

Lastly, in June of 2000, we have organized the International Symposium on Strong Correlations in Many-Body Systems (SCMS) at Tokyo/Mount Nikko in the framework of celebration of 400 years of relations between Japan and the Netherlands as well as celebration of the treaty of Academic Exchange Program between the University of Tokyo and the Groningen University. In total 46 people, 21 from the Netherlands and 25 from Japan, have participated the symposium. Detailed information can be found at the home page, <http://tkynx0.phys.s.u-tokyo.ac.jp/scms/>.

4 Hayano Group

Research Subjects:

- (1) ASACUSA project (Atomic Spectroscopy and Collisions Using Slow Antiprotons) at CERN.
- (2) Study of deeply bound pionic atoms in ^{207}Pb and ^{205}Pb nuclei at GSI.
- (3) Gamma-ray spectroscopy of Λ -hypernuclei.

Member: Ryugo S. Hayano, Takashi Ishikawa, Eberhard Widmann, Nobuhiro Yamanaka, Makoto C. Fujiwara, Masaki Hori, and Kiyoshi Tanida

The subjects of our research activity are summarized in the list given above.

The major achievement of our research is spectroscopy of antiprotonic helium at CERN-AD.

In summer of 2000, the Antiproton Decelerator (AD) started operation at CERN in Geneva. Within the framework of the ASACUSA collaboration we are continuing the precision spectroscopy experiments of antiprotonic helium that were previously performed by our group at LEAR of CERN.

Antiprotonic helium is an exotic three-body system consisting of a helium nucleus, an antiproton, and an electron: $\text{He}^{++}-\bar{p}-e^{-}$ (short $\bar{p}\text{He}^{+}$). The antiproton occupies highly excited metastable states with lifetimes of the order of microseconds, thus enabling their study with laser and microwave spectroscopy. The highlights of the results obtained in the year 2000 are:

- **High-precision laser spectroscopy:** using a new laser system with improved bandwidth and the capability to create UV laser light, we succeeded in finding 3 new resonant laser transitions, two of them in the previously unexplored UV region at 372 nm and 296 nm. By accurately measuring the density dependence of the transition energy for these and three more transitions, we could improve the accuracy of the zero-density values by a factor 4 to ~ 130 ppb (1.3×10^{-7}) in the best case. For the majority of transitions we found agreement with the most precise three-body calculations that include QED corrections up to order α^4 at the same level. This is an impressive test on the accuracy of the variational calculations. Assuming the correctness of both experiment and calculations, the agreement can be used to perform a CPT test on the equality of proton and antiproton charge and mass, since the theory uses the numerical values of the proton that are much more precisely known. With the new measurement we could improve the constraint on the equality of proton and antiproton charge and mass by a factor 8 over our previous value to 60 ppb (6×10^{-8}).
- **Auger decay rates:** two of the newly found transitions at $\lambda = 616$ nm and 296 nm had daughter states with lifetimes that were several orders of magnitude shorter than most of theoretical calculations of Auger transition rates had predicted. This was explained by one theoretician to be due to the coupling of close-lying short-lived states where the electron in $\bar{p}\text{He}^{+}$ is not in its ground state but in an excited state.
- **Hyperfine structure measurement:** Due to the magnetic moment of the electron and antiproton, the levels in $\bar{p}\text{He}^{+}$ are split into a quadruplet, where the dominant splitting arises from the interaction of the \bar{p} angular momentum (that is large because $l \sim 35$) and the electron spin. A first test of a 2-laser microwave triple resonance method to measure the splitting of the $(n, l) = (37, 35)$ state has been performed, and a resonance signal was observed. A precise scan of the resonance line will be done in summer 2001.
- **Quenching by Deuterium:** By selectively shortening the lifetime of certain levels by adding different concentrations of Deuterium molecules in ppm concentrations to our helium target, we could measure the quenching cross section due to collisions with D_2 for 5 states. The same had been done before with H_2 , and the results show a clear isotope effect that is not simply due to the different thermal velocity of the D_2 molecules. These studies aim at clarifying the mechanisms of the violent destruction of the metastability by molecular admixtures, which is in contrast to the observed insensitivity of $\bar{p}\text{He}^{+}$ to collisions with “normal” helium atoms and noble gas atoms.
- **Primary populations:** The primary populations of metastable states in antiprotonic helium atoms are measured. Most atoms were found in a narrow region of states having principal quantum numbers of $n = 36 - 40$, which accounted for most of the observed ~ 3 % metastability of antiprotonic helium.

5 Sakurai Group

Research Subjects: Structures and Reactions of Extremely Neutron-rich Nuclei, and Nuclear Reactions Related with Astrophysical Phenomena

Member: Hiroyoshi Sakurai, Nori Aoi

Research activities covered by our laboratory are a particular domain of nuclear physics, i.e., the field brought out by the advent of the radioactive isotope (RI) beams, emphasizing an isospin degree of freedom in nuclei. The recent developments of RI beams have opened an access to a drastically enlarged range of nuclear species as well as nuclear reactions involving such radioactive isotopes. Our research programs are coordinated to exploit these new opportunities and are directed to subjects related to 1) stability of nuclei and exploration of new domain of nuclear chart towards the drip lines, 2) exotic properties of nuclear structure and reactions of extremely neutron-rich nuclei, such as neutron halos and skins, magicity-loss, appearance of new magic numbers, and 3) nuclear reaction rates and nuclear properties concerning the stellar nuclear synthesis.

The experiments are mainly performed using the RI beam facility RIPS (RIKEN Projectile-fragment Separator) at RIKEN.

1. Development of RI beams by using a ^{86}Kr beam.
2. Mass measurement for very neutron-rich nuclei with $A=29\sim 47$ and disappearance of the $N=28$ shell gap.
3. Coulomb excitation of ^{84}Se and investigation of magicity at $N=50$.
4. Proton inelastic scattering to investigate neutron-matter deformations for ^{12}Be , ^{32}Mg and to determine low lying excited state energies of very neutron-rich nuclei, ^{22}C , ^{24}O and ^{30}Ne .
5. Doppler-shift-attenuation method for life time measurements of excited states in light and very neutron-rich nuclei, ^{12}Be and ^{16}C .
6. Gamma ray spectroscopy with the RI beam fragmentation method for structure of very neutron-rich nuclei with $N\sim 20$ and 28
7. Development of Germanium telescope.
8. beta spectroscopy for proton-rich nuclei, ^{24}Si and ^{46}Cr .
9. Reaction mechanism of Coulomb dissociation with a neutron-halo nucleus, ^{11}Be .
10. Systematic study of sub-barrier fusion reactions induced by neutron-rich nuclei, $^{4,6,8}\text{He}$ and $^{27,29,31}\text{Al}$.
11. Coulomb dissociation of ^{23}Al to study a key reaction of the rp-process path, $^{22}\text{Mg}(p,\gamma)^{23}\text{Al}$.
12. Application of transfer reactions to radiative capture reactions in stellar evolutions, $^7\text{Be}(p,\gamma)^8\text{B}$, $^8\text{B}(p,\gamma)^9\text{C}$, by means of the ANC method.

6 Komamiya group

Research Subjects: (1)OPAL experiment at LEP e^+e^- collider;(2) preparation for experiment at the linear e^+e^- collider JLC;(3)research on astroparticle physics with balloon-borne high resolution spectrometer (BESS experiment);(4) Detector researches and developments for future particle physics experiments.

Member: Sachio Komamiya, Tomoyuki Sanuki

1) OPAL experiment:The elementary particle physics experiment of a large international collaboration using the highest energy e^+e^- collider LEP is running at CERN. In 2000 data were taken at increased energies in the range from 202 GeV to 209 GeV. Important physics subjects at LEP are (a) Higgs boson searches, (a) Supersymmetric particle searches and (c) W-boson physics. We have extensively searched for the Higgs boson at LEP, and a hint of 115 GeV Higgs Boson was observed with a significance of 2.9σ (four LEP experiments combined). The probability to explain this excess as Standard Model background is about 0.3%. The lower limit of the Higgs Boson of the Standard Model was set to be 113 GeV which is just below the mass region of the excess. For the Minimal Supersymmetric Standard Model (MSSM) the lightest Higgs boson was excluded in the large MSSM parameter space, so that it is restricted into rather narrow parameter space. For supersymmetric particles searches the lower mass limit of the lightest neutralino, which is the most important candidate of the dark matter material, was set to be 36.6 GeV. This limit is quite independent of the models. The W boson mass was determined to be $80.468 \pm 0.039 \pm 0.039$ GeV from the direct W mass reconstruction. Anomalous interactions of the W boson was searched for, and strict limits were set for these interactions.

2) Preparation for the e^+e^- linear collider JLC: JLC is the energy frontier machine for e^+e^- collisions in the near future. We have been studying the possible physics and experiments at JLC.

3) BESS experiment: The spectrum of cosmic anti-proton is measured in a wide energy range 0.2 to 4.2 GeV, based on 900 events unambiguously detected in BESS '95, '97 and '98 data. In the resultant spectrum, we observe a distinctive peak at 2 GeV of the secondary anti-protons (i.e. produced by the cosmic ray interactions with interstellar gas) for the first time. The BESS detector had its seventh successful flight at Canada in August '00, and was safely recovered. A new upper limit (95 % confidence level) on anti-helium to helium ratio of 7×10^{-7} is obtained.

4) Detector R&D: We are starting research and development for possible detectors in the future experiments. To begin with this project methods of particle identification of low energy muons from charged pions, specially for $\tau^\pm \rightarrow \mu^\pm \gamma$ search experiment, were studied.

7 Minowa-Group

Research Subjects: Experimental Particle Physics without Accelerators

Member: MINOWA, Makoto and INOUE, Yoshizumi

The direct experimental search for supersymmetric particle dark matter is running in a newly caved underground cell in the Kamioka Observatory.

The detector consists of 8 pieces of 20-gram lithium fluoride bolometers, and has an inside shield with very old lead which contains very little radioactivities. The fluorine is estimated to be one of the best nuclide for the detection of spin-dependently interacting neutralinos. The measurement started in January 2000 and has accumulated data to study environmental radioactivity background. To get rid of possible background caused by high radioactive radon contamination in the air in Kamioka mine, fresh air is introduced from outside of the mine into the laboratory. We also replaced the lithium fluoride crystals with ones with lower radioactive background.

We are also running an experiment to search for axions, light neutral pseudoscalar particles yet to be discovered. Its existence is implied to solve the so-called strong CP problem. The axion would be produced in the solar core through the Primakoff effect if its mass is a few electronvolts. It can be converted back to an x-ray in a strong magnetic field in the laboratory by the inverse process. We search for such x-rays coming from the direction of the sun with the AXION HELIOSCOPE. The axion helioscope consists of a cryogen-free 4 T superconducting magnet with an effective length of 2300 mm and PIN photodiodes as x-ray detectors.

After the first stage experiment with sensitivity in the low axion mass region, we have made the second stage experiment in which the cold conversion gas is filled in the magnetic field region. We got upper limits to the coupling constant of axions to photons in m_a region less than 0.26 eV.

The AXION HELIOSCOPE has also been used to search for possible axions emitted by other celestial objects. We scanned about 10% of the celestial sphere and searched for point axion sources. We also searched for axions from four compact objects, the galactic center, Sco X-1, Vela X-1, and Crab nebula.

8 Aihara Group

Research Subjects: Study of CP-Violation in the B Meson System, Precise Measurements of CKM Matrix Elements, Search for Physics Beyond the Standard Model in the B Meson and τ Lepton, R&D for Silicon Detectors

Members: H. Aihara, H. Tajima

The main research activity of our group is to study CP-violation in the B meson system using the KEK B -factory (KEKB). We have reported a measurement of the standard model CP violation parameter $\sin 2\phi_1$ based on our initial data sample of 10.5 fb^{-1} collected at the $\Upsilon(4S)$ resonance. One neutral B meson is reconstructed in the $J/\psi K_S$, $\psi(2S)K_S$, $\chi_{c1}K_S$, $\eta_C K_S$, $J/\psi K_L$, or $J/\psi\pi^0$ CP -eigenstate decay channel and the flavor of the accompanying B meson is identified from its charged particle decay products. From the asymmetry in the distribution of the time interval between the two B -meson decay points, we have determined $\sin \phi_1 = 0.58^{+0.32}_{-0.34}(\text{stat})^{+0.09}_{-0.10}(\text{syst})$ [1]. Our measurement is more precise than the previous measurements and consistent with the standard model constraints.

We have also measured B_d^0 and B^\pm lifetimes and $B_d^0 - \overline{B}_d^0$ mixing [2] using the silicon vertex detector [3] that our group built and has been responsible for operating. Combining measurements from the semileptonic decay mode, $B_d^0 \rightarrow D^{*-}\ell^+\nu$, and the hadronic decay modes, $B_d^0 \rightarrow D^{(*)-}\pi^+$ and $D^{(*)-}\rho^+$, we obtain $\tau_{B_d^0} = 1.548^{+0.035}_{-0.034}$ ps. From $B^+ \rightarrow D^{*0}\ell^+\nu$ and $D^0\pi^+$ we obtain $\tau_{B^\pm} = 1.656 \pm 0.038$ ps. We have determined the $B_d^0 - \overline{B}_d^0$ mixing parameter Δm_d as $\Delta m_d = 0.522 \pm 0.026 \text{ ps}^{-1}$ from $B_d^0 \rightarrow D^{*-}\ell^+\nu$, and $\Delta m_d = 0.527 \pm 0.032 \text{ ps}^{-1}$ from $B_d^0 \rightarrow D^{(*)-}\pi^+$ and $D^{(*)-}\rho^+$.

In addition to B physics, we have performed high precision measurements [4] of the charmed meson lifetimes and searched for $D^0 - \overline{D}^0$ mixing, taking advantage of the high statistics data and the superb performance of the silicon vertex detector. We have determined the lifetimes of charmed mesons: $\tau_{D^0} = 414.5 \pm 1.7^{+1.8}_{-1.7}$ fs, $\tau_{D^\pm} = 1033 \pm 12^{+5}_{-6}$ fs and $\tau_{D_s^\pm} = 484.7^{+7.9+2.9}_{-7.7-4.2}$ fs. The mixing parameter y_{CP} is measured to be $y_{CP} = (1.8 \pm 1.7^{+1.0}_{-1.3}) \times 10^{-2}$ based on the lifetime difference between $D^0 \rightarrow K^-\pi^+$ (CP -mixed state) and $D^0 \rightarrow K^+K^-$ (CP eigenstate).

The goal of our instrumentation R&D program has been to develop the next generation vertex detector for the Belle experiment. We have investigated radiation-hardness of CMOS preamplifier based on deep sub-micron technology and fabricated readout preamplifier VLSI chip based on 0.35 micron process. We have verified that the 0.35 micron chip is radiation hard up to 20 Mrad, which is well beyond the total radiation dose expected for several years of the B -factory operation. Following this result we have designed pseudo-pixel detector, which consists of silicon strip sensors with very short (~ 9 mm) strip readout via Kapton flex circuits. The use of flex circuits enables us to install amplifier hybrids outside the active volume and to connect short strips to readout VLSI inputs without complex electrical layout on the sensor. We have finished a detailed design of the 5-layer silicon vertex detector as the next generation silicon vertex detector [5]. This new detector is scheduled to be installed in the beamline summer 2002.

1. A. Abashian *et al.* [Belle Collaboration], Measurement of the CP violation parameter $\sin 2\phi_1$ in B_d^0 meson decays, Phys. rev. Lett. **86**, 2509 (2001).
2. H. Tajima, B CP-violation, mixing and lifetime results from Belle, XXXVth Rencontres de Moriond, QCD and hadronic interactions at high energy, March 17–24, 2001, Les Arcs, France.
3. G. Alimonti *et al.* [Belle Collaboration], The Belle Silicon Vertex detector, Nucl. Instrum. Meth. **A453**, 71 (2000).
4. J. Tanaka, Measurements of $D(D_s)$ lifetimes and search for $D^0 - \overline{D}^0$ mixing, 4th International Workshop on B Physics and CP Violation, february 19–23, 2001. Ise-Shima, Japan.
5. Belle SVD Upgrade Technical Design report, <http://hep.phys.s.u-tokyo.ac.jp/SVD/upgrade/documents/>

9 Wadati Group

Research Subjects: Nonlinear Physics, Statistical Mechanics, Condensed Matter Physics

Member: Miki WADATI & Kazuhiro HIKAMI

We investigate fundamental problems in statistical mechanics and condensed matter physics. We aim to find and clarify novel phenomena, and to develop new non-perturbative analytical methods. Research themes of publications in 2000 are listed in the followings.

1. Bose–Einstein Condensation (BEC)
 - (1) Free Fall of Atomic Laser Beam with Weak Inter-Atomic Interaction
 - (2) Ground State Properties of a Toroidally Trapped BEC
 - (3) Phase Separation and Collective Excitations of Two-Component BEC in Traps
 - (4) BEC of Ideal Bose Gases
2. Nonlinear Waves
 - (1) Cellular Automaton and Crystal Base
 - (2) Lattice W Algebra and Integrable Systems
 - (3) Quantum Soliton Equation and Baxter Equation
3. Spin Chain
 - (1) Integrable Vertex Model
 - (2) Magnetization, Correlation Function and Riemann–Hilbert problem
4. Strongly Correlated Electron System
 - (1) Thermodynamics in the Hubbard Model, t - J Model
 - (2) Integrable Boundary Condition
5. Knot Theory and Low-Dimensional Topology
 - (1) Hyperbolic Volume of Knot Complement
 - (2) Bloch Group
6. Quantum Many-Body Problem
 - (1) δ -function Bose gas
 - (2) Calogero–Sutherland Model
 - (3) Exclusion Statistics and Chiral Partition Function
7. Quantum Computing and Quantum Information
 - (1) Quantum Cloning
 - (2) Geometric Aspects of Quantum Search
8. Dynamical System
 - (1) Nambu Bracket, Deformation Quantization

10 Tsukada Group

Research Subjects: Theory of Solid Surface and Interface,

Theory of Artificial Nano-Structures,

Development of Computational Material Science

Member: Masaru Tsukada, Ryo Tamura

A new method for the first-principles calculation of electronic structure of surface under strong field and current is developed. The mechanism of atom extraction by the tip and nano-scale point contact formation are clarified by this method. The concept of eigen-channels for the quantum transport through atom bridges is developed by this method. Ultrasoft pseudopotential method for the first-principles molecular dynamics is developed with the implementation of the core orthogonalization and the generalized gradient correction. The method is applied to the problems as the substitutional penetration of adsorbed Ge on Si(001) surface, the molecular chemisorption of acetylene on Si(001) surface, quantum dynamics of dimers of Si(001) surface and a new symmetry broken structure of Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag. Interaction of water clusters with clean or hydrogenated Si(001) surfaces is investigated by the first-principles molecular dynamics. An important concept obtained by the calculations is the proton relay dissociation of water molecules on solid surfaces. The first-principles density functional calculations as well as numerical Greens function method are applied to various problems related nano-structures and surface science. The problems we studied this year include the structure and hydrogenation of C₃₆ clusters, the transport properties of carbon nanotube metal-semiconductor junctions, effect of the tip on the noncontact atomic force microscopy (ncAFM) images , the phase transition of Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface, quantum transport through atomic wires and C₆₀. Successful development of the new numerical algorithm for the integration of the time-dependent Kohn-Sham equation has been also achieved. We examined the structures and energies of isomers of C₃₆ with the first-principles density functional calculation based on the real space finite-element method (FEM). Two hydrogenation way up to octahydrogenation was revealed. The theoretical nc-AFM image by the density functional calculation reproduced excellently the experimental image of Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface, if the thermal average of the images of the two IET phases is taken into account. The influence of the tip on the nc-AFM image is revealed by the theoretical calculation. Mechanism of damping and dissipation of the cantilever oscillation is theoretically analyzed, and the relation with non-conservative atomic process is clarified. The transport property of the semiconductor Ξ metal nano-tube junction is investigated with the effects of the atomic structures, We found that the junction becomes a backward diode. Electron transmission through a C₆₀ molecular bridge is studied and a loop current feature is found, when the electron energy is near the degenerate molecular levels. We developed an efficient method for solving the time dependent Kohn-Sham equation in real space and real time. Applying this method to He atom and Be atom, we confirmed the efficiency and accuracy of the method.

N. Sasaki, H. Aizawa and M. Tsukada: Theoretical simulation of noncontact AFM images of Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag Surface based on Fourier expansion method, Appl. Surf. Sci. **157** (2000)367

N. Watanabe and M. Tsukada: Fast and stable method for simulating quantum electron dynamics, Physical Review E **62** (2000)2914

M. Tsukada, N. Kobayashi, M. Brandbyge and S. Nakanishi: Physics of Artificial Nano-Structures on Surfaces, Progr. Surf. Sci. **64** (2000)139

K. Tagami, E. Tsuchida, M. Tsukada: First-principles study of vibrational spectra on dihydride-terminated Si(001)/H surfaces, Surface Sci. **446** (2000)L108

N. Kobayashi, M. Brandbyge, M. Tsukada: First-principles study of electron transport through monatomic Al and Na wires, Phys. Rev. B. **62** (2000)8430

M. Gauthier, and M. Tsukada: Damping Mechanism in Dynamic Force Microscopy, Phys. Rev. Lett. **85** (2000)5348

R. Tamura and M. Tsukada: Relation between the transmission rates and the wave functions in the carbon nanotube junctions, Phys. Rev. B **61** (2000)8548

11 Aoki Group

Subject: Theoretical condensed-matter physics

Members: Hideo Aoki, Ryotaro Arita

Our main interests are in many-body effects in electron systems:

- Superconductivity in repulsively interacting electron systems
 - Numerical and analytic studies for the Hubbard model in 2D and 3D [1]
incl. models for high- T_C cuprates[2], organic conductors[3] and “fermiology”[4],
 - Spin-triplet superconductivity in oxides[5] and organic conductors[6],
 - Tomonaga-Luttinger and numerical studies for ladders and quasi-1D systems.
- Magnetism in repulsively interacting electron systems
 - Ferro- and antiferromagnetism in 2D and 3D correlated electron systems [7],
 - Electron-correlation-dominated magnetotransport[8].
- Quantum Hall systems
 - Incompressible and compressible quantum liquids [9]; electron solid [10],
 - Single and double layer fractional quantum Hall systems,
 - Integer quantum Hall effect and Hofstadter butterfly in three dimensions [11],
 - Electron-molecule picture for quantum dots [12],
- Crystal structures and electronic properties [13]

[1] R. Arita, K. Kuroki and H. Aoki, *J. Phys. Soc. Jpn.* **69**, 1181 (2000).

[2] K. Kuroki, R. Arita and H. Aoki, *Phys. Rev. B* **60**, 9850 (1999).

[3] K. Kuroki and H. Aoki, *Phys. Rev. B* **60**, 3060 (1999).

[4] K. Kuroki and R. Arita, *Phys. Rev. B* **63**, 174507 (2001).

[5] K. Kuroki, M. Ogata, R. Arita and H. Aoki, *Phys. Rev. B* **63**, 60506(R) (2001).

[6] K. Kuroki, R. Arita and H. Aoki, *Phys. Rev. B* **63**, 94509 (2001).

[7] R. Arita, S. Onoda, K. Kuroki and H. Aoki, *J. Phys. Soc. Jpn.* **69**, 785 (2000).

[8] R. Arita, K. Kuroki and H. Aoki, *Phys. Rev. B* **61**, 3207 (2000).

[9] M. Onoda, T. Mizusaki, T. Otsuka, and H. Aoki, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 3942 (2000).

[10] S. Muto and H. Aoki, *Phys. Rev. B* **59**, 14911 (1999).

[11] M. Koshino, H. Aoki, K. Kuroki, S. Kagoshima, and T. Osada, *PRL* **86**, 1062 (2001).

[12] P. A. Maksym, H. Imamura, G. Mallon and H. Aoki, *J. Phys. Condensed Matter* **12**, R1 (2000).

[13] Hideo Aoki, Yasuhiko Syono and Russell J. Hemley (editors): *Physics Meets Mineralogy*
— *Condensed-Matter Physics in Geosciences* (Cambridge Univ. Press, 2000).

12 Ogata Group

Research Subjects: Condensed Matter Theory

Member: Masao Ogata, Youichi Yanase

We are studying condensed matter physics and many body problems, such as strongly correlated electron systems, high- T_c superconductivity, Mott metal-insulator transition, magnetic systems, low-dimensional electron systems, mesoscopic systems, organic conductors, materials with spin, charge and orbital degrees of freedom, unconventional superconductivity, and Tomonaga-Luttinger liquid theory. From October 1, 2000 Youichi Yanase joined our group as a research assistant from Kyoto University. The followings are the current topics in our group.

- High- T_c superconductivity
 - Fermi surfaces in strongly correlated electron systems.
 - Numerical studies of Stripe states in the two-dimensional t - J model.
 - Pseudo-gap phenomena in high- T_c superconductors.
 - Low temperature specific heat and entropy in the t - J model and its spin-charge separation.
 - Extension of Gutzwiller approximation to clarify the effect of strong correlation.
- Electronic states around impurities and vortex cores in $d_{x^2-y^2}$ -wave superconductivity
 - Quasiparticle states and magnetism around nonmagnetic and magnetic impurities.
 - Antiferromagnetic vortex core and its charging effect.
- Triplet superconductivity in Sr_2RuO_4
 - Microscopic mechanism of triplet superconductivity due to antiferromagnetic spin fluctuation.
- Spin excitations in two-dimensional insulators
 - Spin waves and high-energy spin excitations in RVB or π -flux states.
- Organic conductors
 - Coexistence between $2k_F$ SDW and $2k_F$ CDW in the quarter-filled organic conductors and its crossover.
 - Localized spin configuration around the doped impurities in the molecular ladder p -EPYNN·[Ni(dmit) $_2$].
- Frustrated electronic systems
 - Melting of CDW state due to frustration in $\text{PrBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$.

- [1] H. Tsuchiura, Y. Tanaka, M. Ogata and S. Kashiwaya: Phys. Rev. Lett. **84**, 3165-3168 (2000). "Local density of states around a magnetic impurity in high- T_c superconductors based on the t - J model"
- [2] A. Himeda and M. Ogata: Phys. Rev. Lett. **85**, 4345-4348 (2000). "Spontaneous Deformation of the Fermi Surface due to Strong Correlation in the Two-Dimensional t - J Model"
- [3] T. Kuwabara and M. Ogata: Phys. Rev. Lett. **85**, 4586-4589 (2000). "Spin-Triplet Superconductivity due to Antiferromagnetic Spin-Fluctuation in Sr_2RuO_4 "
- [4] K. Kuroki, M. Ogata, R. Arita and H. Aoki: Phys. Rev. B **63**, 060506(R) (2001). "Crib-shaped triplet-pairing gap function for an orthogonal pair of quasi-one-dimensional Fermi surfaces in Sr_2RuO_4 "
- [5] C.-M. Ho, V. N. Muthukumar, M. Ogata, and P. W. Anderson: Phys. Rev. Lett. **86**, 1626-1629 (2001). "Nature of Spin Excitations in Two-Dimensional Mott Insulators: Undoped Cuprates and Other Materials"
- [6] Y. Tanuma, Y. Tanaka, M. Ogata and S. Kashiwaya: J. Phys. Soc. Jpn. **69**, 1472-1476 (2000). "Local density of states near the surface of a d+s-wave superconductor in the two-dimensional t - J model"
- [7] T. Otsuka, M. Yoshimaru, N. Wada, M. Ogata, K. Awaga, H. Imai, and T. Inabe: preprint. "Magnetic transition induced by paramagnetic lattice defects in the molecular ladder p -EPYNN·[Ni(dmit) $_2$]"
- [8] M. Ogata and A. Himeda: preprint. "Effect of Exclusion of Double Occupancies in t - J Model: Extension of Gutzwiller Approximation"
- [9] H. Seo and M. Ogata: submitted to Phys. Rev. B. "Metallic State Driven by Frustrated Electronic Correlation in Cu-O Double Chain of $\text{PrBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ "
- [10] A. Himeda, T. Kato and M. Ogata: preprint. "Coexistence between charge stripes and d-wave superconductivity in the two dimensional t - t' - J model"

- [11] H. Tsuchiura, Y. Tanaka, M. Ogata and S. Kashiwaya: preprint. “Local magnetic moments around a nonmagnetic impurity in the two-dimensional t - J model”
- [12] Y. Yanase and K. Yamada: J. Phys. Soc. Jpn. **69**, 2209-2220 (2000). “Effect of Magnetic Field on the Pseudogap Phenomena in High- T_c Cuprates”
- [13] T. Jujo, Y. Yanase and K. Yamada: J. Phys. Soc. Jpn. **69**, 2240-2249 (2000). “Theory on Pseudo gap and Superconducting State in Strong Coupling Superconductors”
- [14] Y. Yanase, T. Jujo and K. Yamada: J. Phys. Soc. Jpn. **69**, 3664-3677 (2000). “Theory on Superconducting Transition from Pseudogap State”
- [15] Y. Yanase and K. Yamada: to appear in J. Phys. Soc. Jpn. **70** No.6 (2001). “Pseudogap Phenomena and Superconducting Fluctuations in Hubbard Model for High- T_c Cuprates”

13 Suematsu Group

Research Subjects: Experimental Solid State Physics,

Structural, electronic and magnetic properties of fullerenes, metallofullerenes and carbon nanotubes.

Member: Hiroyoshi Suematsu, Akihiko Fujiwara, and Kenji Ishii

The principal research subject of the laboratory is the solid state physics and materials science of artificial and novel materials.

The current topics are following :

1. Electronic and quantum properties of carbon nanotubes:

The nanotube is a very attractive material in relation to the quantum transport effects because of its mesoscopic dimension. We have observed the quantum interference effect similar to the Aharonov-Bohm effect in the magnetic field dependence of conductivity at low temperatures. We also investigate electronic and optical properties of single-walled nanotubes, which show unique features of the one-dimensional conductor.

2. Giant magnetoresistance of fullerene compounds:

The fullerene compounds show various types of electronic (superconducting) and magnetic transitions as well as structural transitions. We have revealed the ferromagnetic transition in Eu-C₆₀ compounds at low temperatures. A most remarkable feature is the negative giant magnetoresistance below T_C , which shows the resistivity reduction of three orders of magnitudes on application of high magnetic fields. The phenomenon is discussed in relation to the spin-dependent tunneling effect and the electronic transition effect.

3. The structural stability of endohedral metallofullerene crystals:

The endohedral metallofullerene is a complex system consisting of a fullerene cage outside and metal atom(s) inside, and shows quite unique features in structural, electronic, magnetic properties. Very recently we have observed a structural phase transition in La@C₈₂ induced by intense X-ray irradiation, which possibly comes from the competition of electric-dipole and elastic interactions between molecules.

14 Nagasawa Group

Research Subjects: Optical Spectroscopy on Semiconductor

Member: Nobukata Nagasawa and Nobuko Naka

Current studies are devoted to following subjects.

1) Two-photon spectroscopy on stress-induced 3D-exciton traps in Cu_2O [1]. The purpose of this work is to find proper conditions to realize the excitonic Bose Condensation. The two-photon spectroscopy is mainly used. The advantage is twofold. One is to characterize the structure of the stress-induced exciton trap in space and in energy. This is possible because the energy of the exciton level changes depending on the spatial distribution of the stress field. The intensity distribution of the prompt resonance emission excited by two-photon resonant excitation shows the shape and corresponding potential energy of the trap. This makes it possible to perform 3D diagnostics of the trap. Another advantage is to monitor the dynamical distribution of the long-life excitons in the trap by spectral observation of the luminescence. The spectral shape reflects the exciton population at respective locations in the trap. We found that excitons generated at a rim of the trap by two-photon resonance have a lifetime long enough to reach the bottom of the trap.

2) Quantitative examination of the effects of elastic scattering light in samples to optical absorption and related optical signals in excitonic resonance energy range in Cu_2O [2, 3, 4]. In our previous study, it was found that the excitonic absorption looks three times stronger in off-axis geometry than in usual configuration. In order to understand the excess factor of the absorption, a Monte Carlo simulation was performed. We conclude that the origin is elastic scattering and internal reflections in the samples. It was found that this model is also suitable for explaining the spectral modulation of electroluminescence due to reabsorption and the spectral shape of the photovoltaic signals.

3) Optical Spectroscopy of Carbon Nanotubes formed in Zeolite single crystals [5]. The electronic band structure of the carbon nanotubes depends on the diameter and the chiral vector, $C=ma+nb$, where a and b are the lattice vectors. Tang et al. have developed a method to grow mono-sized, aligned and single-walled carbon nanotubes (SWCNs) of about 0.4 nm diameter inside micro-channels of a zeolite single crystal. The channels are packed in hexagonal arrays. They considered that the zigzag SWCNs of $(m,n)=(5,0)$ are formed in each channel of 0.7 nm diameter. Since the SWCNs are forced to align along c -axis of the crystal, the crystal containing SWCNs should show optical absorption of strong polarization anisotropy. The anisotropy was observed in the region from near infrared to visible. To understand the polarization anisotropy, we have examined the symmetry consideration of the dipole matrix elements on the bases of the band calculation by the LDA method.

We also have an interest that has not been discussed in literature: Does such a SWCN show any emissions associated with the resonant photo-excitation? Our answer is: Yes, it does. We found that strong visible emissions are observed under the laser light irradiation at room temperature.

The detailed researches on the polarization characteristics of the emissions correlated to the polarization anisotropy of the absorption are in progress. We also found that the emissions are useful to characterize the samples. For this purpose, we have performed 3D microscope tomographic studies of the intensity distribution of the emissions in nanoscale spatial resolution with the use of a new instrument named Nanofinder developed by Tokyo Instruments, Inc. These works are performed as collaboration with Tokyo Instruments, Inc. and Prof. Z. K. Tang of Hong Kong University of Science and Technology.

- [1] N. Naka and N. Nagasawa: Two-photon spectroscopy on cold ortho-excitons in a stress trap in Cu_2O crystals, *J. Lumin.*, **87–89** (2000) 201.
- [2] A. Mori, N. Naka and N. Nagasawa: Effects of Rayleigh scattering on photovoltaic spectra associated with 1s orthoexcitons in Cu_2O , *Phys. Rev. B*, **63** (2001) 033202.
- [3] Y. Nakamura, N. Naka and N. Nagasawa: Effect of reabsorption on electroluminescence of excitonic origin in Cu_2O , in *Proceedings of 25th International Conference on The Physics of Semiconductors*, in press.
- [4] Y. Nakamura, N. Naka and N. Nagasawa: Effects of wandering photons on the excitonic optical signals in Cu_2O crystals, *Phys. Rev. B*, **63**, in press.
- [5] N. Nagasawa, I. Kudryashov, S. Tusda and Z. K. Tang: Polarization characteristics of Zeolite single crystals containing carbon nanotubes, in *AIP Conference Proceedings*, in press.

15 Tarucha Group

Research Subjects: Low-dimensional electron transport, Electronic properties of artificial atoms and molecules, Many-particle interactions in semiconductor nanostructures

Member: Seigo Tarucha, Keiji Ono

We carry out experimental studies on electronic properties of semiconductor nanostructures.

1. Electronic properties of artificial atoms: We use semiconductor quantum dots to study the Kondo physics. The Kondo effect in quantum dots arises from the singlet coupling between a localized electron spin ($S=1/2$) in a dot and a Fermi sea of conducting electrons in the leads. This is usually observed when the dot holds an odd number of electrons. We use a vertical quantum dot with good tunability of orbital degeneracy in the few-electron regime as a function of magnetic field, and observe a strong Kondo effect when the spin singlet ($S=0$) and triplet ($S=1$) are degenerate. This is the case when the dot holds an even number of electrons. In addition, we use a lateral quantum dot having good tunability of the tunnel coupling between the dot and the leads, and observe the Kondo effect in the unitary limit but associated with the $S=1/2$ spin. This observation indicates that the local spin is fully screened by the Fermi sea of conducting electrons in the leads.
2. Electronic properties of artificial two-dot molecules: We use vertically strongly coupled double quantum dot structures to study the few-electron ground states as a function of number of electrons and magnetic field. The vertical coupling between two dots gives rise to a set of bonding states and a set of anti-bonding states, each set of which is composed of lateral states confined by a two-dimensional harmonic potential. We observe the consecutive filling of the bonding states for the strongly coupled dot. When compared to single dots, the double dot suffers from the weaker interaction effects due to the larger system volume. We find this makes weaker Hund's coupling and unstable the spin-polarized state induced by magnetic field, both of which are significantly stabilized in single dots. For a vertically weakly coupled quantum dot we study inelastic tunneling between the two zero-dimensional states. We for the first time observe LO-phonon assisted tunneling between the Fock-Darwin states in the two dots, which are the eigenstates in each quantum dot in the presence of magnetic field.
3. Tomonaga-Luttinger liquid effects in quantum wires: We study the Tomonaga-Luttinger effect in a coupled two quantum wire system and in a quantum wire with a periodic potential modulation along the wire. For the first system we observe a strong Coulomb drag effect at low temperatures. The temperature dependence of the Coulomb drag is consistent with the theory for strongly coupled two Tomonaga-Luttinger liquids. For the second system we observe the Bragg reflection effect associated with the Fermi liquid edge states in the presence of a high magnetic field. The Bragg reflection effect reflecting the signature of Tomonaga-Luttinger liquid is only observed when the magnetic field is very low.
4. Development of scanning probe technologies: A new scanning probe technology is under construction toward direct observation of spatial distribution of electron density in nanostructures.

S. Sasaki et al: Kondo effect in an integer-spin quantum dot, *Nature*, 405 (2000) 764.

W.G. van der Wiel et al: The Kondo effect in the Unitary limit, *Science*, 289 (2000) 2105.

S. Tarucha et al: Effects of Coulomb interactions on spin states in vertical semiconductor quantum dots, *Appl. Phys.* A71 (2000) 367.

16 Fujimori Group

Research Subjects: Photoemission Spectroscopy of Condensed Matter, Electronic Structure Studies of Correlated Systems

Member: Atsushi Fujimori

The electronic structures of strongly correlated systems are studied using electron spectroscopic techniques (photoemission, inverse-photoemission and x-ray absorption spectroscopies) and subsequent analyses using various theoretical models (cluster-model, Anderson-model and band-structure calculations and phenomenological self-energy analyses). We are investigating metal-insulator transitions, magnetic fluctuations, mass renormalization, spin and charge density modulations, narrow-gap and pseudogap formation, electron-phonon coupling, etc., in *d*- and *f*-electron systems (transition-metal and rare-earth compounds, respectively) in one, two and three dimensions. Particular emphasis is made on novel phenomena near metal-insulator transitions including high-temperature superconductivity and giant magnetoresistance. Low-energy electronic structures near the Fermi level are studied using high-resolution photoemission. Angle-resolved photoemission is used to study band dispersions and Fermi surfaces.

T. Konishi, K. Mamiya, K. Morikawa, K. Kobayashi, T. Mizokawa, A. Fujimori, F. Iga, H. Kawanaka, Y. Nishihara, A. Delin and O. Eriksson: Electronic Structure of Valence-Fluctuating Ferromagnet CeFe₂, Phys. Rev. B **62** (2000) 14303.

A. Ino, C. Kim, M. Nakamura, T. Mizokawa, Z.-X. Shen, A. Fujimori, Y. Kakeshita, H. Eisaki and S. Uchida: Electronic Structure of La_{2-x}Sr_xCuO₄ in the Vicinity of Superconductor-Insulator Transition, Phys. Rev. B **62** (2000) 4137.

T. Mizokawa, C. Kim, Z.-X. Shen, A. Ino, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Goto, H. Eisaki, S. Uchida, M. Tagami, K. Yoshida, A. I. Rykov, Y. Siohara, K. Tomimoto, S. Tajima, Y. Yamada, S. Horii, N. Yamada, Y. Yamada and I. Hirabayashi: Angle-Resolved Photoemission Study of Insulating and Metallic Cu-O Chains in PrBa₂Cu₃O₇ and PrBa₂Cu₄O₈, Phys. Rev. Lett. **85** (2000) 4779.

17 Hasegawa Group

Research Subject: Experimental Surface Physics

Members: Shuji HASEGAWA and Tadaaki NAGAO

Topics in our research group are (1) electronic/mass transports, (2) atomic/electronic structures, (3) phase transitions, (4) electronic excitations, and (5) epitaxial growths of coherent atomic/molecular layers on semiconductor surfaces. The surfaces we are interested in are covered by a variety of surface superstructures with various kinds of adsorbates. Peculiar atomic arrangements and surface electronic states, characteristic of the surface superstructures, are our platforms for studying physics of atomic-scale low dimensional systems by using ultrahigh vacuum experimental techniques such as electron diffractions, scanning electron microscopy, scanning tunneling micro/spectroscopy, photoemission spectroscopy, electron energy-loss spectroscopy, and in-situ 4-point-probe conductance measurements. Main results in this year are as follows.

- (1) **Surface electronic transport:** measurements with micro-4-point probes (under collaboration with Denmark Technical Univ.), and with a four-tip STM for nano-scale 4-point probe measurements, correlation with surface phase transitions or epitaxial growths.
- (2) **Surface phases and phase transitions:** one-dimensional surface superstructures of Si(111)- 4×1 -In and Si(111)- 3×1 -Ag (under collaboration with Yonsei Univ. (Korea), and Tohoku Univ. and Lund Univ. (Sweden), respectively). 2D surface charge-density-wave transitions on Pb- or Sn-covered Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$.
- (3) **Surface electronic excitations:** plasmons in surface-state bands.
- (4) **Epitaxial growths of atomic/molecular layers:** perfect layer-by-layer growth of Bi films on Si, un wetting growth of Ag on Si.

- [1] S. Hasegawa, K. Tsuchie, K. Toriyama, X. Tong, and T. Nagao: Surface electronic transport on silicon — Donor- and acceptor-type adsorbates on Si(111)- 3×3 -Ag substrate—, *Applied Surface Science* **162/163**, 42-47 (2000).
- [2] S. Hasegawa, N. Sato, I. Shiraki, C. L. Petersen, P. Boggild, T. M. Hansen, T. Nagao, F. Grey: Surface-state Bands on silicon — Si(111)- 3×3 -Ag surface superstructure — : *Japanese Journal of Applied Physics* **39**, 3815-3822 (2000).
- [3] F. X. Shi, I. Shiraki, T. Nagao, S. Hasegawa: Diffusion Anisotropy of Ag and In on Si(111) Surface Studied by UHV-SEM, *Ultramicroscopy* **85**, 23-33 (2000).
- [4] F. X. Shi, I. Shiraki, T. Nagao, and S. Hasegawa: Substrate-structure dependence of Ag electromigration on Au-precovered Si(111) surfaces, *Japanese Journal of Applied Physics* **39**, 4438-4442 (2000).
- [5] T. Nagao, T. Sekiguchi, and S. Hasegawa: Epitaxial growth of single-crystal ultrathin film of Bi on the Si(111) surface, *Japanese Journal of Applied Physics* **39**, 4567-4570 (2000).
- [6] S. Hasegawa: Surface-State Bands on Silicon as Electron Systems in Reduced Dimensions at Atomic Scales, *Journal of Physics: Condensed Matters*, **12**, R463-R495 (2000).
- [7] T. Nagao and S. Hasegawa: Construction of an ELS-LEED – an electron energy-loss spectrometer with electrostatic two-dimensional angular scanning –, *Surface and Interface Analysis* **30**, 488-492 (2000).
- [8] I. Shiraki, C. L. Petersen, P. Boggild, T. M. Hansen, T. Nagao, F. Grey, and S. Hasegawa: Micro-four-point probes in an UHV-scanning electron microscope for *in-situ* surface conductivity measurements, *Surface Review and Letters* **7**, 533-537 (2000).
- [9] C. L. Petersen, F. Grey, I. Shiraki, S. Hasegawa: Microfour-point probe for studying electronic transport through surface states, *Applied Physics Letters* **77**, 3782-3784 (2000).
- [10] I. Matsuda, H.-W. Yeom, T. Tanikawa, K. Tono, T. Nagao, S. Hasegawa, and T. Ohta: Growth and electron quantization of the metastable silver films on Si(001), *Physical Review* **B63**, 125325 (2001).

18 Fukuyama Group

Research Subjects: Low Temperature Physics:

Low temperature properties of liquid and solid ^3He , Ultra-low temperature scanning probe microscope, Two-dimensional rare-gas solids, Superconductivity and charge density waves in low dimensional conductors.

Member: Hiroshi Fukuyama, Hiroshi Kambara

Our current research interests are (i) quantum many body phenomena such as nuclear magnetic orderings and superfluidity in liquid and solid ^3He or ^4He especially in two dimensions (2D), (ii) structural phase transitions in 2D rare-gas solids, (iii) exotic superconductors and charge density waves in low dimensional conductors, and etc. We are investigating these topics at very low temperatures down to several tens micro kelvin.

1. **Construction of a new ultra-low temperature scanning tunneling microscope (ULT-STM)**
We have constructed a new ULT-STM which works at temperatures down to 20 mK in ultra-high vacuum (UHV) and magnetic fields up to 6 T with an atomic resolution. Samples and STM tips are loaded from the bottom of the cryostat keeping low temperatures below 2 K and the UHV environment. This instrument allows us to study new 2D physics in a variety of samples ranging from exotic superconductors with low T_c to 2D rare-gas solids adsorbed on various substrates.
2. **STM observations of 2D rare-gas solids**
Crystalline structures of 2D rare-gas solids physisorbed on a graphite surface have been studied with a low-temperature STM at $T = 4$ K. We have obtained atomically resolved STM images of the $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ commensurate phase of submonolayer krypton (Kr) for the first time as well as that of xenon (Xe). Distinct changes in the local density of states of these Kr/graphite and Xe/graphite systems have been observed in site specified tunneling spectroscopy measurements.
3. **Unconventional superconductivity in Sr_2RuO_4**
We have studied so called 1.5 K and 3 K phases of superconducting Sr_2RuO_4 with tunneling spectroscopy using a low-temperature STM. Several characteristic gap structures have been observed which may be indicative of pseudo gaps existing even at temperatures above T_c .
4. **2D nuclear magnetism of monolayer solid ^3He**
 - (a) Possible spin polaron effects and zero-point vacancies in 2D commensurate quantum solids
A heat capacity anomaly, a small bump near 20 mK, in the $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ commensurate solid ^3He adsorbed on graphite has been found. It disappears quickly in the higher density incommensurate phase, which is similar to the anomaly previously observed in the second layer $\sqrt{7} \times \sqrt{7}$ phase. We claim that these anomalies may be associated with the spin polaron effects due to zero-point vacancies in the low density commensurate quantum solids. To test this hypothesis, we are developing now a low heat-capacity and high sensitivity magnetic thermometer based on a SQUID to carry on high precision heat-capacity measurements.
 - (b) Low temperature specific-heat of 2D amorphous ^3He
We have investigated thermodynamic properties of 2D amorphous ^3He which is characterized by a wide distribution of the lattice constant. It has a weakly temperature dependent specific-heat below several tens mK indicating a wide distribution of exchange interactions among the nuclear spins.
5. **Quantum spin liquid state in 2D solid ^3He**
Our previous heat capacity measurements of the low density second layer solid ^3He adsorbed on graphite strongly suggest the “quantum spin liquid” state for the ground state. To study this unusual ground state, we are preparing heat capacity and magnetization measurements at temperatures below 300 μK in magnetic fields below 1 T. A powerful and compact nuclear demagnetization refrigerator is also under construction now.

19 Okamoto Group

Research Subjects: Experimental Condensed Matter Physics,

Low temperature electronic properties of two-dimensional systems.

Member: Tohru Okamoto and Yukio Kawano

We studies low temperature electronic properties of two-dimensional systems formed in the semiconductor interfaces such as silicon metal-oxide-semiconductor field-effect transistors (Si-MOSFET) and GaAs/AlGaAs heterostructures. T. Okamoto has moved from the Department of Physics, Gakushuin University on May 1, 2000. Y. Kawano joined our group on April 1, 2001.

The current topics are following:

1. Magnetism in 2D electron solids and the Aharonov-Bohm effect:

We studies exchange interactions in the quantum solid phase formed in strongly correlated two dimensional electron systems. The nature of the interactions between neighboring spins can be controlled using the magnetic flux through the exchange path. Our experimental results on the magnetic field dependence of the thermal activation energy in Si-MOSFET's have been explained by a model based on this effect.

2. Metal-insulator transition in strongly correlated two-dimensional systems:

A metal-insulator transition in 2D systems attracts a great deal of attention since it seems to contradict an important result of the scaling theory that the conductance of a disordered 2D system at zero magnetic field goes to zero for $T \rightarrow 0$. To clarify the electronic state in the metallic phase, we have studied magnetotransport in silicon two dimensional electron systems formed in Si-MOSFET's and Si/SiGe quantum wells at low temperatures. Metallic temperature dependence of resistivity was observed for the n -Si/SiGe sample even in a parallel magnetic field of 9 T, where the spins of electrons are expected to be polarized completely.

3. Breakdown of Integer Quantum Hall Effect at High Currents:

Filling factor dependence and temperature dependence of the critical current for the intrinsic breakdown of the integer quantum Hall effect have been studied.

20 Theoretical Astrophysics Group

Research Subjects: Particle Astrophysics, Relativistic Astrophysics, Physics of Supernovae and High Density Matter, Observational Cosmology

Member: Katsuhiko Sato, Yasushi Suto, Tetsuya Shiromizu & Atsushi Taruya

Astrophysics is a very broad field of research, and it is hard to cover various important astrophysical research subjects in our group only. Therefore we are currently working on the three specific areas of research interest; “Physics of the Early Universe”, “Observational Cosmology”, and “Nuclear Astrophysics”, all of which are definitely interrelated very closely. Let us describe more specifically the current interests and activities of our group in the above areas.

The understanding of the very early universe has made rapid progress in 1980’s by applying the ideas of particle physics around the epoch close to the Planck time, one notable example of which is the inflationary universe scenario. On the basis of such recent development, “Physics of the Early Universe” aims at describing the birth of the universe in a language of physics. Our group activities in this area include inflationary universe models, cosmological phase-transition and topological defects, big-bang nucleosynthesis, cosmic no-hair conjecture and the fundamental problem of general relativity.

“Observational Cosmology” attempts to understand the evolution of the universe on the basis of the observational data in various wavebands. The proper interpretation of the recent and future data provided by COBE, ASCA, the Hubble telescope, SUBARU, and large-scale galaxy survey projects is quite important both in improving our understanding of the present universe and in determining several basic parameters of the universe which are crucial in predicting the evolutionary behavior of the universe in the past and in the future. Our current interests include nonlinear gravitational evolution of cosmological fluctuations, formation and evolution of proto-galaxies and proto-clusters, X-ray luminosity and temperature functions of clusters of galaxies, hydrodynamical simulations of galaxies and the origin of the Hubble sequence, thermal history of the universe and reionization, prediction of anisotropies in the cosmic microwave background radiation, statistical description of the evolution of mass functions of gravitationally bound objects, and statistics of gravitationally lensed quasars.

“Nuclear Astrophysics” is exploring the interface between nuclear physics and astrophysics, in particular the physics of supernovae. It includes a rich variety of micro- and macro-physics, for example, neutrino transport, equation of state of high density matter, r-process nucleosynthesis, convective instability, fast rotation of a stellar core, strong magnetic field, gravitational radiation, and so on. In particular, the mechanism of the Type II supernovae itself has not been properly explained for more than 25 years. It is, therefore, quite important to make clear the physics of supernova phenomena not only for astrophysics but also for other fields of elementary physics. We are currently working on the multi-dimensional aspects of supernovae such as rotating core collapse, asymmetric neutrino emission, convective energy transfer near the neutrino sphere, possibility of r-process nucleosynthesis in the hot bubble region, and gravitational radiation from an asymmetrically bouncing core.

Let us summarize this report by presenting recent titles of the doctor and master theses in our group;

Double inflation in supergravity and its observational implications(2000),

Propagation of UHERCRs in the inhomogeneous source model(2000),

Effects of neutrino oscillation on the supernova neutrino spectrum(2000),

A Biasing Model for Cosmological Two-Point Statistics and the Probability Distribution Function of Nonlinear Mass Fluctuations (2000),

Genus Statistics for Large-Scale Structure as a probe of Primordial Random-Gaussianity and Nonlinear Stochastic Biasing(2000),

Velocity Distribution Functions for Nonlinear Gravitational Many-body Systems (2000),

The cosmological redshift-space distortion on two-point statistics of high-z objects (1999),

Gravitational lens theory from the wave-optics viewpoint and its application to gravitational wave astronomy (1999),

Gravitational particle productions in the early universe (1999),

Thermodynamics properties of nuclear “Pasta” in super dense matter (1999),

Dynamics of cosmological phase transition and evolution of global strings (1998),

-
- The gamma-ray burst as a probe of cosmic star formation history and ultra-high energy cosmic rays (1998)
- Imprints of Structure Formation on Cosmic Microwave Background (1998),
Topological Defects in the Early Universe (1998)
Modeling Galaxy Formation in a Hierarchical Universe (1998)
Topological Defects in the Early Universe (1998)
Quantum creation of the universe with the inner space (1998)
Phase transitions in high-density matter and neutron star evolution (1997)
Cosmological implications of the abundances of clusters of galaxies (1997)
Effects of axisymmetric explosion in collapse-driven supernovae (1997)
Hybrid inflation and axionic isocurvature fluctuations in supergravity (1997)
Asymptotic structure of time-like infinity (1997)
Gravitational collapse of cylindrically symmetric space-time (1996)
Propagation of cosmic rays in extragalactic space (1996)
Cosmological density probability distribution
– a numerical study for the future redshift surveys of galaxies – (1996)
A new method to estimate the cosmological constant from cosmological redshift distortion effect (1996)
Toward definition of quasi-local energy in non-asymptotically flat spacetime (1996)
Hydrodynamical simulation of structure formation in the universe (1996)
Density perturbations and the thermal history of the universe (1996)
Velocity function and gravitational lensing statistics (1995)
Implications on cosmology and neutrino physics from supernova neutrinos (1995)
First order phase transition in the early universe (1995)
Explosion mechanism of supernovae with rotation and anisotropic neutrino radiation (1995)

21 Kobayashi Group

Research Subjects: Ultrafast and Nonlinear Optical Processes, Quantum Optics

Member: Takayoshi Kobayashi, Takao Fuji, Akikatsu Ueki

In order to evaluate ultrafast nonlinear optical susceptibilities of optoelectronic device materials, we develop new methods for time-resolved nonlinear spectroscopy and measure time dependence of optical nonlinearities. On the basis of these measurements we clarify mechanisms of nonlinearities, and provide guiding principles for designing new optoelectronic devices.

1. Sub-5-fs real-time spectroscopy

i) **Solitons in polyacetylenes:** Time dependent frequencies of carbon-carbon stretching modes were for the first time measured using sub-5-fs pulses. This phenomenon is explained by the formation of breather, the bound state of the charged soliton pair, which had been theoretically predicted but has not been found.

ii) **Novel vibrational dynamic behaviors in molecules:** Excitation-induced modulation of vibrational frequency and amplitude in dye molecules was studied using sub-5-fs pulses. The frequency and amplitude modulations of the ring-breathing mode of cresyl violet doped in poly(vinyl alcohol) film were clearly observed, indicating that the mode is coupled to another vibrational mode. The mode coupling represents the Duschinsky effect.

Dynamics of C–N stretching mode and N=N stretching mode of azobenzene dimethyl sulfoxide solution was investigated using sub-5-fs pulses. The vibrational spectra during the photo-isomerization reaction was observed for the first time.

iii) **Dynamic intensity borrowing in J-aggregates:** Sub-5-fs spectroscopy of porphyrin J-aggregates reveals a coherent molecular vibration coupled to the Frenkel exciton. The bleaching and induced absorption signals show synchronous oscillations with the frequency of 244 cm^{-1} . The coherent oscillation is explained by a modulated transition dipole moment, which is due to dynamic intensity borrowing from an intense B-transition to a weak Q-transition through the ruffling mode with the 244 cm^{-1} -frequency.

iv) **Quasi-one-dimensional halogen-bridged mixed-valence metal complex:** An ultrafast optical response is studied in $[\text{Pt}(\text{en})_2][\text{Pt}(\text{en})_2\text{I}_2](\text{ClO}_4)_4$ with sub-5-fs time-resolution. Wave packet motions both in ground and self-trapped exciton (STE) states are observed as oscillatory modulations in the time-resolved reflectivity. The wave packet motion on the STE potential surface begins after about 50 fs with respect to the photoexcitation. This delay is attributed to the lattice relaxation from the free exciton state to the STE state.

2. Development of new measurement system

i) **Multiplex method for nonlinear susceptibility spectrum measurement:** Continuous spectrum of nonlinear susceptibility can be measured by single shot using this system. Convolution term and chirp effect were calculated and quantified.

ii) **Mid infra red of time-resolved spectroscopy apparatus:** Ultrashort pulse laser in mid IR was constructed by optical parametric amplifier. The spectrum region was $5\text{ }\mu\text{m}\sim 10\text{ }\mu\text{m}$. Dynamics of Carbon–Carbon stretching mode in excited state of polydiacetylenes was investigated using the system.

iii) **Scanning near-field optical microscope(SNOM):** In order to observe an optical nonlinearity of a single J-aggregate, a SNOM has been constructed. Both fluorescent and absorption spectra are successfully observed with a special resolution more than 100 nm at room temperature and liquid helium temperature.

3. Quantum optics and teleportation

i) **Frequency-resolved optical gating(FROG):** Second-harmonic-generation FROG (SHG FROG) and cross-correlation FROG (XFROG) were used as a characterization method of pulses propagated through an optical medium. Time variations of intensity and phase of ultrashort pulses transmitting through a Nd^{+3} -doped glass plate were measured using there techniques.

ii) **Quantum teleportation and quantum information:** The goal of our research is to achieve more than 0.58 fidelity which is the current limit of accuracy in quantum teleportation. Detection system of quantum noise and optical parametric oscillator were constructed.

22 Makishima Group

Research Subjects: High Energy Astrophysics using Scientific Satellites, X-Ray Probing of the Universe, Development of Cosmic X-Ray/ γ -Ray Instruments

Member: Kazuo Makishima, Makoto Tashiro \rightarrow Motohide Kokubun

We study cosmic and solar high-energy phenomena in the X-ray and γ -ray frequencies, using scientific satellites launched by the Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), as well as foreign missions.

Instrumental Developments: We have developed the Gas Imaging Spectrometer (GIS) for the *ASCA* mission launched in February 1993. We have also been developing the Hard X-ray Detector (HXD) onboard the ASTRO-E mission. Although the launch of ASTRO-E by the M-V-4 rocket of the ISAS was unsuccessful, its recovery mission, ASTRO-E II, to be launched in January 2005, has been approved. We rebuild the HXD.

Extra-Galactic black holes: Through *ASCA* observations, we have obtained firm pieces of evidence that the ultra-luminous compact X-ray sources, found in arm regions of nearby galaxies, are massive ($\sim 100 M_{\odot}$), accreting, black holes [2]. In particular, we have discovered clear spectral state transitions from two such objects [6], and furthermore, found evidence for a 31 hour periodicity from one of them. The period is consistent with the binary period of a massive mass-exchanging close binary.

Black hole binaries: Using the data from the *RXTE* satellite, we have discovered that the optically-thick accretion disk in some black-hole binaries are perfectly described by the standard accretion-disk model, while the description fails in other systems. In the latter case, a strong disk Comptonization sets in at a luminosity significantly lower than the Eddington limit, beyond which an optically-thick advection-dominated solution is realized. Such objects might be Kerr black holes.

Particle Acceleration in the Inter-Stellar and Inter-Galactic Space: Diffuse, probably non-thermal, X-ray emission has been detected from several galaxy groups [5], as well as from the entire region of our Galactic bulge. The inter-stellar and inter-galactic space may be a site of significant quasi-stationary particle acceleration. The particles and magnetic fields may have different spatial distributions [4].

Physics at the Cluster Core Region: We have developed a novel view of the cluster core region. The ingredients are; hierarchical or scale-free [1] dark-matter distribution; two-temperature plasma structure; metal escape from galaxies to the intra-cluster space [3]; and magnetohydrodynamic energy transfer from galaxies to the intra-cluster plasma.

1. Tamura, T., Makishima, K., Fukazawa, Y., Ikebe, Y., & Xu, H.: X-Ray Measurements of the Gravitational Potential Profile in the Central Region of Abell 1060 Cluster of Galaxies, *Astrophys. J.* **535**, 602 (2000)
2. Makishima, K., Kubota, A., Mizuno, T., Ohnishi, T., Tashiro, M. et al.: The Nature of Ultra-Luminous Compact X-ray Sources in Nearby Spiral Galaxies, *Astrophys. J.* **535**, 632 (2000)
3. Fukazawa, Y., Makishima, K., Tamura, T., Nakazawa, K., Ezawa, H., Ikebe, Y., Kikuchi, K., & Ohashi, T.: Statistical Properties of Metal Abundances of the Intracluster Medium in the Central Region of Clusters, *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.* **313**, 21 (2000)
4. Tashiro, M., Makishima, K., Iyomoto, N., Isobe, N., & Kaneda, H.: X-Ray Measurements of the Field and Particle Energy Distributions in the West Lobe of the Radio Galaxy NGC 1316 (Fornax A), *Astrophys. J. Lett.* **546**, 19 (2001)
5. Fukazawa, Y., Nakazawa, K., Isobe, N., Makishima, K., Matsushita, K., Ohashi, T., & Kamae, T.: Detection of Excess Hard X-Ray Emission from the Group of Galaxies HCG 62, *Astrophys. J. Lett.* **546**, 87 (2001)
6. Kubota, A., Mizuno, T., Makishima, K., Fukazawa, Y., Kotoku, J., Ohnishi, T., & Tashiro, M.: Discovery of Spectral Transitions from Two Ultraluminous Compact X-Ray Sources in IC 342, *Astrophys. J. Lett.* **547**, 119 (2001)

23 Takase Group

Research Subjects: High Temperature Plasma Physics Experiments, Spherical Tokamak, MHD Stability, RF Heating and Wave Physics, Advanced Plasma Diagnostics Development, Fluctuations and Transport

Members: Yuichi Takase, Akira Ejiri, Syun'ichi Shiraiwa, Kenichi Yamagishi

Thermonuclear fusion, the process that powers the sun and stars, is a promising candidate for generating abundant, safe, and clean power. In order to produce sufficient fusion reactions, isotopes of hydrogen, in the form of plasma, must have high enough density, temperature, and confinement time. A magnetic configuration called the tokamak has reached the break-even condition, and an international project to study "burning plasma" physics (ITER) is progressing. However, it is necessary to improve the cost-effectiveness of the fusion reactor. The spherical tokamak (ST) offers a promising approach to increasing the efficiency by raising the plasma beta (defined as the ratio of the plasma pressure to the confining magnetic pressure), several times greater than the conventional tokamak. High beta plasma research using the ST approach is a rapidly developing field worldwide.

High temperature, high beta plasmas are typical examples of nonlinear complex system that exhibit interesting collective phenomena. Such plasmas have very high dielectric constants compared to conventional tokamaks, and therefore, methods to heat and drive current using different waves must be developed. The TST-2 spherical tokamak was constructed to address these issues. Most of the magnets and power supplies have been commissioned to full design capabilities in 2000. Our group also maintains active research collaborations with Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI), National Institute for Fusion Science (NIFS), and Princeton Plasma Physics Laboratory (PPPL). Research activities of the academic year 2000 are summarized below.

Study of MHD phenomena

Internal reconnection event (IRE) is an MHD phenomenon that is peculiar to the ST. On TST-2, an abrupt increase of the plasma current concomitant with a decrease of the loop voltage is observed at an IRE. The simultaneous decrease of the density and soft-X ray emission and an increase of H_α emission indicate that magnetic reconnection inside the plasma causes a flattening of the current density profile and expulsion of heat and particles from the plasma core. Insertion of magnetic pickup coils revealed that a 10 kHz $n = 1$ magnetic fluctuation grows around $r/a \sim 0.6$, followed by a growth of higher harmonics (up to the 4th harmonic). The frequency spectrum showed stabilization of harmonics and a growth of modes with frequencies of 15 kHz and 30 kHz, just before the loop voltage drop. These observations suggest that non-linear coupling of multiple helicity modes is occurring.

Wave physics experiments

High harmonic fast wave (HHFW) excitation, propagation, and absorption are being investigated using a 6-element combline antenna. A new antenna and high power transmitters are being prepared for plasma heating experiments, scheduled to start in late 2001.

Diagnostic development

A single-channel microwave interferometer has been upgraded to 2 channels by use of a PIN switch. The use of this technique reduces the number of costly microwave components.

In order to measure fine scale fluctuations in the visible light emission, feasibility of the four-beam correlation method was examined. This is an extension of the conventional cross beam technique, and uses 4 lines of sight which lie in two parallel planes. While two beams in the same plane provide the fluctuation level in the intersection volume, two beams in different planes provide the correlation function as a function of the distance between the planes. This method is useful for reconstructing the 2- or 3-dimensional wavenumber spectrum, as well as the direction of the magnetic field.

Theory of electric field structural formation

A peaked structure in the radial electric field profile is observed in plasma biasing experiments using electrodes. The radial electric field structure was derived from an approximate equation for E_r with a diffusion term and a model conductivity term for tokamak plasmas. Structures with multiple peaks are allowed when the distance between electrodes is finite.

24 Tsubono Group

Research Subjects: Experimental Relativity, Experimental Gravitation, Gravitational Wave Physics, Laser Interferometer

Member: Kimio TSUBONO, Keita KAWABE and Masaki ANDO

The detection of gravitational waves is expected to open a new window into the universe and brings us a new type of information about catastrophic events such as supernovae or coalescing binary neutron stars; these information can not be obtained by other means such as optics, radio-waves or X-ray. Worldwide efforts are being continued in order to construct detectors with sufficient sensitivity to catch possible gravitational waves. Now the detection of the gravitational waves is one of the biggest challenges in the field of physics and astronomy.

TAMA300 is a 300-m baseline laser interferometric gravitational wave detector constructed in Mitaka. We started the operation of the detector in 2000. The achieved sensitivity, $h \sim 5 \times 10^{-21}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 700Hz to 1.5kHz, is sufficient to catch possible gravitational wave events in our galaxy. We can operate the detector for over 10 hours stably and continuously. Last summer we performed 2-week data taking run and collected 160 hours data. We are now analyzing the obtained data searching for the gravitational waves from coalescing binaries using matched filtering technique with templates of chirping signal.

We summarize the subjects being studied in our group.

- Laser interferometric gravitational wave detectors
 - TAMA project
 - Diagnosis of the TAMA detector
 - Suspension point interferometer for vibration isolation
 - Study of the next generation laser interferometer
 - GEO600 project
- Experimental study of the relativity
 - Test of the space isotropy
- Study of thermal noise
 - Study of the thermal noise due to the inhomogeniously distributed loss
 - Measurement of the intrinsic Q of low-loss materials
- Study of the precise measurement
 - Development of the low-frequency vibration isolation system (SAS)

references

- [1] Masaki Ando, et al. and the TAMA collaboration, Stable Operation of a 300-m Laser Interferometer with Sufficient Sensitivity to Detect Gravitational-Wave Events within our Galaxy, *Phys. Rev. Lett.* **86** (2001) 3950.
- [2] Hideyuki Tagoshi et al. and the TAMA Collaboration, First search for gravitational waves from inspiraling compact binaries using TAMA300 data, *Phys. Rev. D* **63** (2000) 062001.
- [3] K. Yamamoto, S. Otsuka, M. Ando, K. Kawabe, and K. Tsubono, Experimental study of thermal noise caused by an inhomogeneously distributed loss, *Phys. Lett. A* **280** (2001) 289.
- [4] K. Numata, G. Bertolotto Bianc, N. Ohishi, A. Sekiya, S. Otsuka, K. Kawabe, M. Ando, K. Tsubono, Measurement of the intrinsic mechanical loss of low-loss samples using a nodal support, *Phys. Lett. A* **276** (2000) 37.

25 Sano Group

Research Subjects: Nonlinear Dynamics and Fluid Mechanics

Member: Masaki Sano

Our research group studies nonlinear dynamics and pattern forming phenomena in dissipative nonlinear systems. Oscillation, chaos, and turbulent behavior of fluid, solid, granular systems, chemical reactions and biological systems are investigated based on dynamical system's theory and laboratory experiments. Through these efforts we search for novel phenomena, and aim to develop new methods in understanding complex phenomena arising in the systems far from equilibrium. The followings are main subjects of our study.

1. Study of turbulence

- (1) Search for the ultimate scaling regime in developed thermal turbulence
- (2) Study of statistical properties and coherent structures in turbulence
- (3) Turbulence - turbulence transition in electro-hydrodynamic convection of liquid crystals

2. Nonlinear Dynamics and Chaos

- (1) Pattern forming phenomena and their universalities in dissipative systems
- (2) Spatio-temporal dynamics in spatially extended dissipative systems

3. Dynamical aspects of biological systems

- (1) Single molecule level measurement of DNA collapsing, DNA-protein interaction, and gene expression
- (2) Collective behavior of the activities in biological neural assemblies

26 Yamamoto Group

Research Subjects: Submillimeter-wave Astronomy, Physical and Chemical Evolution of Interstellar Molecular Clouds, Laboratory Spectroscopy of Interstellar Molecules

Member: Satoshi Yamamoto & Tomoharu Oka

Molecular clouds are birthplaces of new stars, and understanding their physical and chemical properties provides us with fundamental bases for detailed studies on star formation, which is an elementary process in evolution of the Galaxy. With this in mind, we are studying submillimeter-wave astronomy as well as the laboratory microwave spectroscopy, as described below.

Our group is running the Mt. Fuji submillimeter-wave telescope in order to explore formation processes, detailed structure, and chemical evolution of molecular clouds. The main reflector of the telescope has a diameter of 1.2 m, and the telescope is enclosed in a space frame radome with a Gore-Tex membrane. We have developed a triple band superconductor mixer receiver for this telescope to observe the spectral lines of the atomic carbon (CI) ($^3P_1 - ^3P_0$ 492 GHz; $^3P_2 - ^3P_1$ 809 GHz) and that of the carbon monoxide (CO) ($J = 3 - 2$ 345 GHz). The telescope system was installed at the summit of Mt. Fuji (el. 3700 m) in July 1998, and we started astronomical observations from November 1998 in a remote way by using a commercial satellite communication system. The Mt. Fuji submillimeter-wave telescope is being operated as a research project of Research Center for the Early Universe (RESCEU) in collaboration with researchers of National Astronomy Observatory, National Space Development Agency, and Fukui University.

With this telescope, we are conducting large scale mapping observations of the 492 GHz line of CI toward a number of molecular clouds in our Galaxy. Until now we have observed dark clouds like HCL2, L183, and ρ Oph, giant molecular clouds like Ori A, Ori B, M17, W3, W28, W44, W51, DR21, and NGC1333, infrared dark clouds, and translucent clouds. Total observing area is about 35 square degrees, which is the largest survey of the CI line so far made. Furthermore, a few representative clouds (Orion A, Orion B, M17, and DR21) have been mapped with the 809 GHz line of CI. By comparing the CI distribution with the CO distribution, we are studying formation and evolution of molecular clouds in detail.

In addition to this, our group is developing the transportable 18 cm submillimeter-wave telescope. The main purpose of this telescope is to survey the 492 and 809 GHz CI lines over the Milky Way. From the result, we can study formation and evolution of molecular clouds in the galaxy scale. In March 2001, we have conducted the first test run at the Pampa la Bola site (alt. 4800 m) in the northern Chile.

We are also studying rotational spectra of transient molecules in the laboratory with the submillimeter-wave spectroscopy and Fourier transform millimeter-wave (FTMW) spectroscopy. Particularly we have extended observable frequency of the FTMW spectrometer up to 85 GHz in order to cover fundamental molecules which are important in astrochemistry. With this spectrometer, the rotational spectra of the ethyl radical has Recently been detected for the first time. We determined the molecular constants including hyperfine interaction constants in the $K_a=0$ state accurately. We have also observed the rotational spectrum of the FCO radical with the FTMW spectrometer, which would be useful for the upper atmosphere chemistry.

- [1] S. Yamamoto et al., "Observations of the CI $^3P_2 - ^3P_1$ Line toward the Orion Kleinmann-LowRegion. The Astrophysical Journal, **547**, L165 (2000)
- [2] T. Oka et al., "Atomic Carbon and CO Isotope Emission in the Vicinity of DR15", The Astrophysical Journal, **556**, in press (2001)

27 Sakai (Hirofumi) Group

Research Subjects: Experimental study of quantum optics and atomic/molecular physics

Members: Hirofumi Sakai and Shinichirou Minemoto

Our research interests are as follows: (1) Alignment, orientation, and deflection of neutral molecules by strong nonresonant laser fields and their applications. (2) Structures and dynamics of molecular wave packets. (3) Interaction of atoms and molecules with intense, ultrashort laser pulses.

The summary of our research activities in the academic year of 2000 is as follows:

(1) Development of 2-dimensional ion imaging system

We have developed a 2-dimensional ion imaging system, which is a powerful tool to study photodissociation dynamics of molecules and to determine the instantaneous direction of molecular axis. Points in the design of our system are as follows: 1) We made the molecular beam parallel to the time-of-flight axis. Thereby, we can observe centrosymmetric, undistorted images. 2) We adopted a velocity map imaging technique. Since each fragment ion having the same initial velocity vector arrives at the same spot on the detector surface, high spatial resolution can be achieved. In connection with the development of the system, we have also developed an interface between the CCD camera and the PC, and a fast, high-voltage power supply to selectively observe specific fragment ions. So far we have confirmed that the whole system works correctly.

(2) Numerical simulations of molecular orientation using strong, nonresonant, two-color laser fields

We have already examined the possibility of molecular orientation using an asymmetric field, i.e., an asymmetric potential created by the superposition of two-color ($\omega + 2\omega$) laser fields in an adiabatic regime where the orientation proceeds slowly compared to the rotational period of molecules. It was found that our approach could be applicable to the rotationally well-cooled molecules. Recently we have investigated the time evolution of molecular orientation in nonadiabatic regime by solving the time-dependent Schrödinger equation. In nonadiabatic regime, orientation can be realized after the interaction of the laser pulse with molecules. Such behavior can be utilized to achieve orientation under field-free conditions.

(3) Numerical experiments on interferences of nuclear wave packets in a molecule

Using successive two laser pulses of femtosecond duration we can excite a diatomic molecule to a dissociative state where the wave function is localized around two internuclear separations. Under an appropriate condition, it can be expected that a fast part of the second wave packet catches up with a slow part of the first wave packet and they eventually interfere with each other. We have developed a simulation code to investigate the time evolution of interferences of nuclear wave packets in a molecule. We used X and B states of I_2 molecule in model calculations and solved the time-dependent Schrödinger equation using the split-operator technique (SOT). Interference patterns can be controlled by the relative amplitude, the temporal separation, and the wavelengths of the exciting laser pulses. Formation and observation of interferences of nuclear wave packets in a molecule are important from the viewpoints of the fundamentals of quantum optics and the entirely new molecular devices such as a molecular quantum grating.

(4) Nonsequential double ionization of D_2 molecules with intense 20 fs pulses

We found the experimental evidence of nonsequential double ionization of D_2 molecules. The kinetic energy distribution of D^+ fragments obtained from the Coulomb explosion of D_2 molecules with intense 20 fs pulses includes a high energy component extending up to ~ 10 eV. The energetic fragments are reasonably explained by the so-called quasi-classical model, i.e., nonsequential double ionization. In fact they disappear when circularly polarized pulses are employed. (The experiment was performed as one of collaborative studies with Prof. Henrik Stapelfeldt's group of Department of Chemistry, University of Århus, Denmark.)

[1] Tsuneto Kanai and Hirofumi Sakai, "Numerical simulations of molecular orientation using strong, nonresonant, two-color laser fields," to appear in *J. Chem. Phys.*

[2] (Invited paper) Hirofumi Sakai *et al.*, "Alignment of neutral molecules by a strong nonresonant laser field," *Advances in multiphoton processes and spectroscopy* (World Scientific) Vol. 14, Ed. by R. J. Gordon and Y. Fujimura, pp. 135-150 (2000).

[3] (Invited paper) Hirofumi Sakai *et al.*, "Alignment of neutral molecules by a strong nonresonant linearly-polarized laser field," to appear in *Laser control and manipulation of molecules* (ACS (American Chemical Society) Books), Ed. by A. Bandrauk, R. J. Gordon, and Y. Fujimura, (2001).

28 Wakabayashi Group

Research Subjects: Molecular Mechanisms of Muscle Contraction and Its Regulation,
Three-dimensional Image Analysis of Molecular Assemblies

Member: Takeyuki Wakabayashi, Takuo Yasunaga,
Kimiko, Saeki

Our goal is to understand the molecular mechanism of motor proteins on the basis of atomic structure of proteins. To achieve this purpose, we use several approaches including

- (1) the development of new image reconstruction technique from electron cryomicrographs,
- (2) X-ray crystallography and high resolution electron cryomicroscopy,
- (3) the development of an electron microscope system with an energy filter and an high-resolution CCD camera.
- (4) protein engineering and biochemical techniques.

The electron cryo-microscopy is the most promising method to visualize proteins under the physiological conditions. Because the amplitude contrast produced by the frozen hydrated proteins is low, phase-contrast should be enhanced by defocusing. This requires the high spatial coherence of electron beam. We could compensate the blurring due to defocusing using the holographic image reconstruction technique (HIRT) we developed. We applied this method to visualize the three-dimensional structure of thin filaments and showed the calcium-induced changes of troponin. We reconstructed three-dimensional structure of actin-tropomyosin-troponin complex from rabbit skeletal muscle by electron cryo-microscopy and image analysis using a single particle method. We found the mass of troponin head over the inner domain of actin in the presence of Ca^{2+} . On the other hand, troponin covered the whole frontal surface of actin in the absence of Ca^{2+} including the C-terminal region. Tropomyosin was shifted differentially at low Ca^{2+} concentrations. We proposed a new model of calcium regulation from this new data [1].

We use protein engineering to produce the mutant actins that activate myosin ATPase much higher than the wild-type actin in the presence of tropomyosin-troponin and Ca^{2+} . We found that the replacement of a single amino acid alanine 230 to tyrosine is sufficient to produce this effect. We solved the atomic structure of the wild-type actin and mutant ones and found that the side chain of leucine236 was displaced so that the hydrophobic pocket in the subdomain 4 of actin was more exposed to solvent. When the side chain was truncated by replacing leucine 236 to alanine, the mutant actin could activate myosin ATPase in the presence of tropomyosin much higher than the wild-type actin: The allosteric T-R equilibrium shifted towards the R-state in the mutant actin [2].

Using probabilistic distance geometry, which can combine fluorescence energy resonance transfer (FRET) data and other structural information, the crystal structure of myosin classified to type III was found to be inconsistent with FRET data [3]. Actin Cys374 was also found to be relocated by labelling fluorescent dyes. This result could resolve the apparent inconsistency of the position of actin Cys374 between other structural studies [4].

(References)

1. Narita, A., Yasunaga, T., Ishikawa, T., Mayanagi, K. and Wakabayashi, T. Ca^{2+} -induced switching of troponin and tropomyosin on actin filaments as revealed by electron cryo-microscopy. *J. Mol Biol.* (2001) **308**, (2)241-261.
2. Saeki, K., Yasunaga, T., Matsuura, Y., and Wakabayashi, T.: Role of residues 230 and 236 of actin in myosin-ATPase activation by actin-tropomyosin. *Biochem. Biophys. Res. Commun* (2000) **275** 428-433.
3. Yasunaga, T., Suzuki, Y., Ohkura, R., Sutoh, K., and Wakabayashi, T.: ATP-induced Transconformation of Myosin Revealed by Determining Three-Dimensional Positions of Fluorophores from Fluorescence Energy Transfer Measurements. *J. Struct. Biol.*, (2000) **132**, 6-18.
4. Yasunaga T. and Wakabayashi T.: Relocation of Cys374 of Actin Induced by Labeling with Fluorescent Dyes. *J. Biochem.*, (2001) **129**, 201-204.
5. Yokoyama, K., Ohkuma, S., Taguchi, S., Yasunaga, T., Wakabayashi, T. and Yoshida, M.: V-Type H⁺-ATPase/Synthase from a Thermophilic Eubacterium, *Thermus Thermophilus*. *J. Biol. Chem.*, (2000) **275**, 13955-13961.

29 Kuwajima Group

Research Subjects: Protein Folding, Molecular Chaperones, Protein Stability, Physicochemical Studies of Biological Macromolecules

Member: Kunihiro Kuwajima, Munehito Arai, & Teikichi Ikura¹

We are studying the mechanism of *in vitro* protein folding and the mechanism of molecular chaperone action. Our goals are to elucidate the physical principles by which a protein organizes its specific native structure from the amino acid sequence and to elucidate how these principles are utilized or qualified by the molecular chaperones in a biological cell. For this purpose, we are using various physicochemical and protein engineering techniques including rapid reaction techniques.

The equilibrium and kinetics of the unfolding and refolding of authentic and recombinant human α -lactalbumin were studied by circular dichroism spectroscopy, and the results were compared with the results for bovine and goat α -lactalbumins. As observed in the bovine and goat proteins, the presence of the extra methionine residue in the recombinant protein remarkably destabilized the native state, and the destabilization was entirely ascribed to an increase in the rate of unfolding. The population of the molten globule intermediate during the equilibrium unfolding was higher in human α -lactalbumin than in the other α -lactalbumins because of lower thermodynamic stability of the human protein. Furthermore, the human α -lactalbumin molten globule showed remarkably more intense circular dichroism ellipticity than the native state in the far-ultraviolet region below 225 nm. During refolding from the unfolded state, the protein thus exhibited overshoot kinetics, in which the α -helical peptide ellipticity exceeded the native value when the molten globule folding intermediate was formed in the burst phase. The subsequent folding involved reorganization of non-native secondary structures. It should be noted that the rate constant of the major refolding phase was approximately the same among the three types of α -lactalbumin and that the rate constant of unfolding was accelerated 18-600 times in the human protein, and these results interpreted the lower thermodynamic stability of this protein.

Chaperonin-assisted protein folding proceeds through cycles of ATP binding and hydrolysis by GroEL, which undergoes a large structural change by the ATP binding or hydrolysis. One of the main concerns of GroEL is the mechanism of the productive and cooperative structural change of GroEL induced by the nucleotide. We studied the cooperative nature of GroEL by nucleotide titration using isothermal titration calorimetry and fluorescence spectroscopy. Our results indicated that the binding of ADP and ATP analogs to a single ring mutant (SR1), as well as that to GroEL, was noncooperative. Only ATP induces an apparently cooperative conformational change in both proteins. Furthermore, the fluorescence changes of pyrene-labeled GroEL indicated that GroEL has two kinds of nucleotide binding site. The fluorescence titrating result fit well with a model in which two kind of binding sites are both noncooperative and independent of each other. These results suggest that the binding and/or hydrolysis of ATP may be necessary for the cooperative transition of GroEL.

- [1] Y. Kobashigawa, M. Demura, T. Koshiba, Y. Kumaki, K. Kuwajima, and K. Nitta: Hydrogen exchange study of canine milk lysozyme: Stabilization mechanism of the molten globule. *Proteins* **40** (2000) 579-589.
- [2] H. Fukuda, M. Arai, and K. Kuwajima: Folding of green fluorescent protein and the Cycle3 mutant. *Biochemistry* **39** (2000) 12025-12032.
- [3] T. Yoda, M. Saito, M. Arai, K. Horii, K. Tsumoto, M. Matsushima, I. Kumagai, and K. Kuwajima: Folding-unfolding of goat α -lactalbumin studied by stopped-flow circular dichroism and molecular dynamics simulations. *Proteins* **42** (2001) 49-65.
- [4] T. K. Chaudhuri, M. Arai, T. P. Terada, T. Ikura, and K. Kuwajima: Equilibrium and kinetic studies on folding of the authentic and recombinant forms of human α -lactalbumin by circular dichroism spectroscopy. *Biochemistry* **39** (2000) 15643-15651.
- [5] T. Inobe, T. Makio, E. Takasu-Ishikawa, T. P. Terada, and K. Kuwajima: Nucleotide binding to the chaperonin GroEL: Noncooperative binding of ATP analogs and ADP, and cooperative effect of ATP. *Biochimica et Biophysica Acta* **1545** (2001) 160-173.

¹on leave of absence for working at Cambridge in England

30 Nose Group

Research Subjects: Molecular Mechanism of Neural Network Formation

Member: Akinao Nose, Takako Morimoto-Tanifuji and Etsuko Takasu

What is the physical basis of formation of the brain? The aim of our laboratory is to elucidate the molecular mechanism of neural development by using techniques of biophysics and molecular genetics. We are trying to identify molecules that function during neural wiring by using, as a model, the simple nervous system of a fruitfly, *Drosophila*. We are currently conducting the following research projects.

1. Molecular Mechanisms of Axon Guidance

1.1. Neuromuscular target recognition molecules, Connectin and Capricious

By using the enhancer trap method, we identified two genes, Connectin and Capricious, that encode cell surface proteins with leucine-rich repeat. During the formation of neuromuscular connectivity, these molecules are expressed in different subsets of neuromuscular synaptic partners. Loss-of-function or ectopic expression of these molecules alter neuromuscular target specificity, indicating their roles in selective synapse formation. We are currently studying the roles of these molecules during selective synapse formation more in detail and also trying to identify the downstream signaling mechanisms of these molecules.

1.2. Gain of function mutant screening

To systematically identify novel genes involved in axon guidance, we adopt a recently developed genetic method, gain-of-function mutant screening. We isolated genes whose ectopic expression in all muscles or neurons cause defects in axon projection and/or synaptogenesis. By molecularly characterizing these genes, we have identified several molecules that are implicated in axon guidance and/or synaptogenesis. We are currently studying the function of these genes.

2. Molecular Mechanisms of Synaptogenesis

2.1. Wheat germ agglutinin (WGA) as an indicator of synaptogenesis

Wheat germ agglutinin (WGA) is a tracer that undergoes an interneuronal transfer. A recent study showed that this transfer of WGA is correlated with the activity of neurons. When WGA is expressed in muscles by transgene techniques, we found that it is transported to the axons and cell bodies of motoneurons. We plan to use this system to screen for novel genes involved in synaptogenesis. To make the screening easier, we tried to use WGA fused with green fluorescent protein (GFP) (GFP-WGA) instead of WGA. We are currently testing the validity of GFP-WGA as an indicator of synaptogenesis.

2.2 Electrophysiological technique to detect a functional synapse formation

As synapses form, neural cells become capable of high fidelity transmission, which is important for neurons to communicate each other. Most sensitive way to detect the neurotransmission is to measure it electrophysiologically. We established this technique in the developing neuromuscular junctions of *Drosophila* embryos and larvae. Currently, we are examining factors that affect the establishment of synaptic transmission during synaptogenesis. We hope to clarify the molecular mechanisms of how a high fidelity transmission is established in synapses during development.

31 Nose Group

Research Subjects: Molecular Mechanism of Neural Network Formation

Member: Akinao Nose, Takako Morimoto-Tanifuji and Etsuko Takasu

What is the physical basis of formation of the brain? The aim of our laboratory is to elucidate the molecular mechanism of neural development by using techniques of biophysics and molecular genetics. We are trying to identify molecules that function during neural wiring by using, as a model, the simple nervous system of a fruitfly, *Drosophila*. We are currently conducting the following research projects.

1. Molecular Mechanisms of Axon Guidance

1.1. Neuromuscular target recognition molecules, Connectin and Capricious

By using the enhancer trap method, we identified two genes, Connectin and Capricious, that encode cell surface proteins with leucine-rich repeat. During the formation of neuromuscular connectivity, these molecules are expressed in different subsets of neuromuscular synaptic partners. Loss-of-function or ectopic expression of these molecules alter neuromuscular target specificity, indicating their roles in selective synapse formation. We are currently studying the roles of these molecules during selective synapse formation more in detail and also trying to identify the downstream signaling mechanisms of these molecules.

1.2. Gain of function mutant screening

To systematically identify novel genes involved in axon guidance, we adopt a recently developed genetic method, gain-of-function mutant screening. We isolated genes whose ectopic expression in all muscles or neurons cause defects in axon projection and/or synaptogenesis. By molecularly characterizing these genes, we have identified several molecules that are implicated in axon guidance and/or synaptogenesis. We are currently studying the function of these genes.

2. Molecular Mechanisms of Synaptogenesis

2.1. Wheat germ agglutinin (WGA) as an indicator of synaptogenesis

Wheat germ agglutinin (WGA) is a tracer that undergoes an interneuronal transfer. A recent study showed that this transfer of WGA is correlated with the activity of neurons. When WGA is expressed in muscles by transgene techniques, we found that it is transported to the axons and cell bodies of motoneurons. We plan to use this system to screen for novel genes involved in synaptogenesis. To make the screening easier, we tried to use WGA fused with green fluorescent protein (GFP) (GFP-WGA) instead of WGA. We are currently testing the validity of GFP-WGA as an indicator of synaptogenesis.

2.2 Electrophysiological technique to detect a functional synapse formation

As synapses form, neural cells become capable of high fidelity transmission, which is important for neurons to communicate each other. Most sensitive way to detect the neurotransmission is to measure it electrophysiologically. We established this technique in the developing neuromuscular junctions of *Drosophila* embryos and larvae. Currently, we are examining factors that affect the establishment of synaptic transmission during synaptogenesis. We hope to clarify the molecular mechanisms of how a high fidelity transmission is established in synapses during development.

III

2000年度 物理学教室全般に関する報告

1 学部講義概要

1.1 2年生 冬学期

1.1.1 物理数学 I : 松尾 泰

1. 複素関数論

- 1.1 無限和と収束性
- 1.2 正則関数
- 1.3 多価関数とリーマン面
- 1.4 Taylor 展開, Laurent 展開
- 1.5 留数積分
- 1.6 部分分数展開と無限積展開
- 1.7 ガンマ関数とベータ関数

1.8 漸近展開と最急降下法

2. フーリエ変換

- 2.1 フーリエ級数
- 2.2 フーリエ級数の数学的側面
- 2.3 フーリエ変換
- 2.4 ラプラス変換
- 2.5 微分方程式への応用

1.1.2 解析力学 : 塚田 捷

1. つりあいの条件 –仮想変位と仮想仕事–
2. Lagrange の運動方程式
3. 微小振動
4. 電磁場の中の電子の Lagrangean
5. Hamilton の原理
6. 変分法の応用
7. 対称性と保存則
8. Hamilton の正準方程式
9. 正準変換 –母関数–
10. 正準変換 –不変式 μ –

11. Liouville の定理

12. Poisson 括弧式
13. Poisson 括弧式による運動方程式
14. 無限小正準変換と連続正準変換
15. Hamilton-Jacobi の方程式
16. 古典力学と幾何光学
17. 作用変数・角変数と断熱定理
18. 古典物理学の限界と量子物理学の誕生
19. Schroedinger 方程式の導入

1.1.3 量子力学 I : 大塚 孝治

1. ドブロイ波とシュレーディンガー方程式
 - 1.1 ドブロイ波
 - 2.2 時間に依存しないシュレーディンガー方程式
2. 1次元の時間に依存しないシュレーディンガー方程式
 - 2.1 波動関数の性質
 - 2.2 1次元の井戸型ポテンシャル
 - 2.3 固有状態の縮退
 - 2.4 パリティ対称性
 - 2.5 連続状態
 - 2.6 1次元の調和振動子ポテンシャル
3. 量子力学の基本的性質
 - 3.1 量子状態と重ね合わせの原理
 - 3.2 固有状態の直交性とハミルトニアンのエルミート性
 - 3.3 物理量と演算子
 - 3.4 物理量の演算子のエルミート性及び期待値

3.5 固有状態とベクトル空間

- 3.6 ハミルトニアンの行列表示と対角化
- 3.7 ブラとケット
4. 位置と運動量
 - 4.1 位置の固有ケット
 - 4.2 運動量
5. ブラ・ケットによる量子力学の定式化
6. 時間発展
 - 6.1 時間発展の演算子
 - 6.2 状態の時間発展
 - 6.3 期待値の時間発展
 - 6.4 ハイゼンベルグ表示
 - 6.5 確率波の流れ
7. 量子化について
 - 7.1 正準量子化
8. 不確定性関係

9. 波束

9.1 波束の運動

9.2 ニュートン方程式

9.3 エネルギーと時間の不確定性

1.1.4 電磁気学 : 相原 博昭

1. ベクトル解析の復習

1.1 極座標と円柱座標

1.2 任意の直交曲線座標におけるベクトル解析

1.3 ディラックのデルタ関数

1.4 ヘルムホルツの定理

2. マクスウェル方程式

2.1 電場の発散と回転 (クーロンの法則、ガウスの法則、静電ポテンシャル、ファラデーの電磁誘導の法則)

2.2 磁場の発散と回転 (磁荷、アンペールの法則、マクスウェルの変位電流)

2.3 真空中のマクスウェル方程式 (磁荷、光)

2.4 単位系: MKS vs CGS

2.5 エネルギー保存則 (ポインティングの定理)

2.6 マクスウェルの応力テンソル

2.7 運動量保存と角運動量保存

2.8 真空中の平面波と偏光平面波

2.9 電磁波のエネルギーと運動量

2.10 マクスウェル方程式のポテンシャル形式

2.11 ゲージ変換

2.12 クーロンゲージとローレンツゲージ

2.13 ローレンツ力のポテンシャル形式

3. 特殊相対論とローレンツ共変なマクスウェル方程式

3.1 ローレンツ変換

3.2 速度合成則、時間の遅れとローレンツ収縮

3.3 時空のダイアグラム

3.4 4元ベクトル、スカラー、テンソル

3.5 連続の方程式と4元カレント

3.6 4元ベクトルポテンシャル、場のテンソルとマクスウェル方程式の共変形

3.7 電磁場の変換

3.8 一定速度で運動する点電荷が作る電場と磁場

3.9 導線中を流れる電流の作る場

1.1.5 物理実験学 : 長谷川修司、能瀬聡直

1. 序論

1.1 現代の物理学の分野および周辺分野

1.2 ノーベル賞の実験

1.3 物理学で扱う長さ・エネルギー

2. 歴史的な物理実験

2.1 X線の発見と利用

2.2 電子の発見と素電荷の決定、波動性の実証

2.3 原子核の発見と原子模型の実証

3. 生物物理・分子生物学の歴史

3.1 DNA 2重らせんの発見

3.2 組み替え DNA 技術

3.3 ゲノム時代の生物物理

4. 実験の基礎

4.1 真空

4.2 低温・高温

4.3 単位系と標準

5. 実験データの統計処理

5.1 誤差、母集団、サンプル

5.2 確率分布関数

5.3 推定と仮説検定

1.2 3年生 夏学期

1.2.1 統計力学 I : 藤川 和男

1. 熱力学の復習

熱力学の第一, 第二および第三法則

エントロピー, Helmholtz の自由エネルギー, Gibbs の自由エネルギー

2. 量子力学の復習

Bose 粒子と Fermi 粒子 (スピンと統計)

3. Shannon の推定の理論

バイアス最小の推定

4. 量子統計力学

Gibbs の正準集団, 小正準集団および大正準集団

熱力学との関連, 揺らぎの一般論および2つの正準集団の接触

5. 理想 Bose-Einstein 気体, 理想 Fermi-Dirac 気体および理想 Boltzmann 気体の一般論

6. 理想 Boltzmann 気体 (Maxwell-Boltzmann 分布) の概要

- 量子系の古典的考察 (格子点に固定された原子の統計力学)
7. 理想 Bose-Einstein 気体の概要 (含む Planck の公式)
Bose-Einstein 凝縮
8. 理想 Fermi-Dirac 気体の概要
縮退した Fermi-Dirac 気体
9. 相対論的な Fermi-Dirac 気体
10. 統計力学の基礎づけの試み
時間反転不変性とエントロピー増大則

1.2.2 量子力学 II : 大塚 孝治

1. ドブロイ波とシュレーディンガー方程式
- 1.1 ドブロイ波
- 2.2 時間に依存しないシュレーディンガー方程式
2. 1次元の時間に依存しないシュレーディンガー方程式
- 2.1 波動関数の性質
- 2.2 1次元の井戸型ポテンシャル
- 2.3 固有状態の縮退
- 2.4 パリティ対称性
- 2.5 連続状態
- 2.6 1次元の調和振動子ポテンシャル
3. 量子力学の基本的性質
- 3.1 量子状態と重ね合わせの原理
- 3.2 固有状態の直交性とハミルトニアンのエルミート性
- 3.3 物理量と演算子
- 3.4 物理量の演算子のエルミート性及び期待値
- 3.5 固有状態とベクトル空間
- 3.6 ハミルトニアン行列表示と対角化
- 3.7 ブラとケット
4. 位置と運動量
- 4.1 位置の固有ケット
- 4.2 運動量
5. ブラ・ケットによる量子力学の定式化
6. 時間発展
- 6.1 時間発展の演算子
- 6.2 状態の時間発展
- 6.3 期待値の時間発展
- 6.4 ハイゼンベルグ表示
- 6.5 確率波の流れ
7. 正準量子化
- 7.1 正準交換関係
8. 時間発展
- 8.1 時間発展の演算子
- 8.2 状態の時間発展
- 8.3 期待値の時間発展
- 8.4 ハイゼンベルグ表示
- 8.5 確率波の流れ
9. 古典的描像との対応
- 8.1 波束の運動
- 8.2 ニュートン方程式
- 8.3 エネルギーと時間の不確定性

1.2.3 量子力学 IIa : 初田 哲男

1. 三次元のシュレーディンガー方程式
- 1.1 角運動量と球面調和関数
- 1.2 水素原子とそのスペクトル
- 1.3 三次元調和振動子と井戸型ポテンシャル
2. 角運動量の一般論
- 2.1 対称性と保存則
- 2.2 角運動量とスピン
- 2.3 角運動量の合成
- 2.4 磁場中でのスピン
3. 量子力学における近似法
- 3.1 相互作用の強さによる摂動論
- 3.2 時間に依存する摂動論
- 3.3 準古典近似と WKB 法
- 3.4 変分法とその応用

1.2.4 現代実験物理学 I : 長谷川修司、福山寛、桑島邦博

1. 序論
- 1.1 現代物理学の分野と周辺
- 1.2 ノーベル賞の実験
- 1.3 物理学で扱う長さ・エネルギー
2. 実験環境をつくる
- 2.1 真空の生成
気圧、真空技術と物理学の発展の歴史、
真空の生成・計測、気体分子運動論
- 2.2 低温の生成
寒剤の性質、 ^3He - ^4He 希釈冷却と断熱消磁冷却の原理
- 2.3 温度測定
温度スケール、各種の温度計
- 2.4 基礎的な実験技術

- 熱伝達と熱絶縁、除振と電磁シールド、超伝導マグネット、SQUID
- 2.5 低温での物性実験
超伝導、超流動、磁性体の実験
3. 物質の多様性
- 3.1 構造による分類
- 3.2 物性による分類
4. 物質の構造・状態を調べる
- 4.1 X線の利用
X線の発見・発生、分光、散乱・回折、透過、CT、光電子分光、X線天文学、X線リソグラフィー
- 4.2 電子線の利用
電子線の発生、散乱・回折
- 4.3 顕微鏡法
光学顕微鏡、電子顕微鏡、トンネル顕微鏡
5. 生物物理実験学
- 5.1 生物物理学概論
- 5.2 タンパク質・核酸の立体構造解析法
分光学的測定法
X線溶液散乱
- 5.3 生体分子反応の解析法
反応の熱力学的解析法、速度論的解析法
酵素反応解析法
- 5.4 遺伝子実験法
制限酵素、遺伝子クローニング

1.2.5 光学：長澤 信方

0. イントロダクション
はじめに：光学を学ぶ意義 * 講義の内容 * CD Player
に光学をみる
1. 幾何光学
- 1.1 光線の数学的表示とレンズによる結像
- 1.2 不均一媒質中の光線
- 1.3 おまけ レンズのレシピ
- 1.4 幾何光学の限界と波動論
2. 波動光学（回折）
- 2.1 はじめに
- 2.2 ホイヘンスの理論
- 2.3 数式化
- 2.4 再びレンズの公式について
- 2.5 光の回折の実例と応用
- 2.6 境界条件の実験的検証の試み
3. 波動光学（その2）干渉
- 3.1 はじめに
- 3.2 ヤングの2重スリットの実験 c.f 理科教育1
- 3.3 ホログラフィー
- 3.4 ホログラフィーの関連事項
- 3.5 原子ホログラフィーと非線形原子光学
- 3.6 多重干渉
4. 光の分散論
- 4.1 はじめに
- 4.2 ローレンツ・モデル
- 4.3 媒質中の場
- 4.4 異方性媒質における光の分散と偏光
- 4.5 レーザーとは

1.2.6 計算機：早野 龍五

1. Introduction
2. 物理の研究現場における計算機
- 2.1 日常の道具として
- 2.2 研究の道具として：理論編
- 2.3 研究の道具として：実験編
3. 計算機の歴史
- 3.1 計算能力の進化
- 3.2 素子の歴史
- 3.3 Supercomputer
- 3.4 Microprocessor
4. 計算機の内部
- 4.1 データの内部表現
- 4.2 CPUの動作を理解しよう
- 4.3 入出力と割り込み
- 4.4 性能向上の手段
5. OS
- 5.1 OSの構成要素
- 5.2 スケジュール
- 5.3 メモリー管理
6. Supercomputing
- 6.1 Supercomputerを必要とする物理の例 - QCD
- 6.2 ベクトル型スーパーコンピューター
- 6.3 超並列スーパーコンピューター
- 6.4 QCD専用計算機など
7. 数値計算をする前に
- 7.1 浮動小数点演算
- 7.2 解の安定性
- 7.3 桁落ちと結合則
- 7.4 最適化の影響
8. データ収集
- 8.1 計算機登場以前
- 8.2 泡箱実験
- 8.3 オンラインデータ収集実験の例
- 8.4 データ収集インターフェース
- 8.5 データ収集ソフトウェア

- 9. プログラミング・パラダイム
 - 9.1 悪いプログラムの例
 - 9.2 Structured programming
 - 9.3 なぜ Object 指向?
- 10. インターネット

- 10.1 前史
- 10.2 基本的な技術
- 10.3 Internet とは
- 10.4 CERN における WWW の誕生

1.3 3年生 冬学期

1.3.1 電気力学：坪野 公夫

- 1. 電磁波の伝播
 - 1.1 Maxwell 方程式
 - 1.2 平面波
 - 1.3 偏光
 - 1.4 伝播の速度
 - 1.5 反射と屈折 (誘電体)
 - 1.6 導体の境界条件
- 2. 電磁波のモード
 - 2.1 guided waves
 - 2.2 導波管
 - 2.3 空洞共振器
- 3. 電磁波の放射
 - 3.1 ポテンシャルの方程式
 - 3.2 遅延ポテンシャル
 - 3.3 電気双極子放射
 - 3.4 多重極放射
- 4. 荷電粒子の出す放射
 - 4.1 運動荷電粒子の作る電磁場
 - 4.2 荷電粒子のエネルギー放射
 - 4.3 直線運動による放射
 - 4.4 円運動による放射
 - 4.5 $v > c/n$ 粒子による放射

1.3.2 現代実験物理学 II: 駒宮 幸男、櫻井 博儀

- 1. Introduction
- 2. 重要な概念
 - 2.1 次元と単位
 - 2.2 粒子運動の相対論的取り扱い
 - 2.3 断面積
 - 2.4 崩壊寿命とエネルギー幅
 - 2.5 保存則と対称性
- 3. 粒子と物質の相互作用
 - 3.1 荷電粒子の電離損失、飛程、多重散乱
 - 3.2 光電効果、コンプトン散乱、電子陽電子対生成
 - 3.3 制動放射、電磁シャワー
- 4. 検出器の発達と発展の歴史
 - 4.1 粒子検出器の原理、分解能
 - 4.2 同軸ケーブル・電気信号の処理
 - 4.3 ワイヤーチェンバー、磁気スペクトロメータ
 - 4.4 シンチレーション検出器、カロリメータ
 - 4.5 半導体検出器
- 5. 測定データの処理
 - 5.1 確率分布 (二項分布、ポアソン分布、正規分布)
 - 5.2 統計誤差、誤差の伝播
 - 5.3 最小二乗法、二乗フィット
 - 5.4 最尤法、統計的検定
- 6. 素粒子・原子核実験などの最新のトピックス

1.3.3 物理数学 III : 和達 三樹

- 1. 微分形式
 - 1.1 p-ベクトル空間
 - 1.2 外積
 - 1.3 星印作用素
 - 1.4 微分形式
 - 1.5 直交曲線座標系
 - 1.6 微分形式の積分
- 2. 群論
 - 2.1 群と対称操作
 - 群、点群、空間群
 - 2.2 群論の基本的概念
 - 部分群、共役類、不変部分群、因子群、同型と準同型、直積
 - 2.3 有限群の表現
 - 表現、既約表現、指標、基底関数、固体のバンド理論
 - 2.4 対称群
 - 多粒子状態、既約表現、ヤング図

- 2.5 リー群
リー群、リー代数、半単純リー代数の分類、ディンキ

ン図形

1.3.4 統計力学 II : 小形正男

- | | |
|---|--|
| <p>1. 相転移現象</p> <p>1.1 対称性の自発的破れ</p> <p>1.2 ランダウの2次相転移理論</p> <p>1.3 平均場近似</p> <p>1.4 厳密に解けるモデル</p> <p>1.5 GL 理論</p> | <p>1.6 くりこみ群の基礎</p> <p>2. 非平衡統計力学</p> <p>2.1 線形応答理論</p> <p>2.2 ボルツマン方程式</p> <p>2.3 種々の輸送係数</p> |
|---|--|

1.3.5 流体力学 : 佐野 雅己

- | | |
|--|--|
| <p>1. 流体と流体力学</p> <p>1.1 流体運動の例</p> <p>1.2 巨視的運動と微視的運動</p> <p>1.3 流体力学の広がり</p> <p>2. 流体運動の記述と運動方程式</p> <p>2.1 オイラー的記述とラグランジュ的記述</p> <p>2.2 変形体に作用する力、応力、ひずみ速度</p> <p>2.3 流体の運動に伴う変形</p> <p>2.4 保存方程式</p> <p>質量保存、運動量保存、エネルギー保存</p> <p>2.5 Navier-Stokes 方程式の性質と対称性</p> <p>3. 完全流体モデルと運動方程式</p> <p>3.1 ベルヌーイの諸定理、ケルピンの循環定理</p> <p>3.2 ポテンシャル流</p> <p>3.3 2次元ポテンシャル流</p> <p>複素速度ポテンシャル、物体に働く力とモーメント、Joukowski 変換</p> | <p>4. 水波</p> <p>4.1 静水圧と境界条件</p> <p>4.2 微小振幅の波</p> <p>4.3 表面張力波と重力波</p> <p>4.4 ソリトン解</p> <p>5. 渦運動</p> <p>5.1 渦度と渦糸</p> <p>5.2 渦糸群の運動</p> <p>6. 粘性流体の運動</p> <p>6.1 Reynolds の相似則</p> <p>6.2 様々な粘性流</p> <p>6.3 境界層</p> <p>7. 流れの安定性</p> <p>7.1 安定性理論、分岐</p> <p>7.2 レーリー・ベナール対流とカオスへの遷移</p> <p>8. 乱流</p> |
|--|--|

1.3.6 物質科学基礎 : 藤森 淳

- | | |
|---|--|
| <p>1. 原子の電子状態</p> <p>1.1 水素原子</p> <p>波動関数とエネルギー固有値</p> <p>スピンと Zeeman 効果</p> <p>1.2 軌道状態</p> <p>1.3 多電子原子と Hund 則</p> <p>Hartree-Fock 近似</p> <p>多重項構造</p> <p>1.4 周期律表</p> <p>2. 分子の電子状態</p> <p>2.1 Heitler-London 法</p> <p>Heitler-London 法</p> | <p>多原子分子への拡張 : 共鳴原子価状態</p> <p>電荷移動の効果</p> <p>2.2 スピン自由度</p> <p>2.3 分子軌道法</p> <p>Hartree-Fock 近似</p> <p>原子軌道線型結合近似</p> <p>多原子分子への拡張</p> <p>非制限 Hartree-Fock 近似</p> <p>配置間相互作用の効果</p> <p>3. 原子・分子から凝縮系へ</p> <p>3.1 tight-binding モデル</p> <p>3.2 絶縁体、半導体、金属</p> |
|---|--|

1.3.7 量子力学 III : 柳田 勉

1. Fundamental Dynamics in Quantum Theory

- 1.1 Time evolution of state
- 1.2 Heisenberg picture
- 1.3 Schrodinger wave function
- 1.4 Harmonic oscillator

2. Identical Particles

- 2.1 Exchange degeneracy
- 2.2 Bosons and Fermions
- 2.3 The second quantization

3. Scattering Theory

- 3.1 Cross section
- 3.2 An integral equation for scattering
- 3.3 Born approximation
- 3.4 The Lippmann-Schwinger equation
- 3.5 Eikonal approximation
- 3.6 Partial wave method
- 3.7 Scattering of identical particles
- 3.8 Symmetry in scattering

1.3.8 生物物理学 : 桑島 邦博、若林 健之、能瀬 聡直

1. 序 (桑島)

生物物理学について、タンパク質科学について

2. タンパク質の生物物理学 (桑島)

- 2.1 タンパク質の化学構造と立体構造
タンパク質の化学構造 (一次構造)、タンパク質の立体構造、二次構造、タンパク質の三次元構造とその階層性、タンパク質構造ファミリー
- 2.2 タンパク質立体構造の安定化因子
静電相互作用、van der Waals 相互作用、水素結合、水の性質と疎水性相互作用
- 2.3 タンパク質の構造転移
タンパク質のアフォールディング転移、二状態モデル、モルテン・グロビュール状態、タンパク質の立体構造形成 (フォールディング) 機構

3. 生体分子構造と機能の生物物理学 (若林)

- 3.1 真核細胞の特徴 (1)
機能タンパク質であるチャンネルタンパク質、ポンプ蛋白質

3.2 真核細胞の特徴 (2)

アクチン・フィラメントの構造とそのセルフ・アセンブリ、ミオシン・フィラメント構造とその形成、ATPとの相互作用、ミオシン・スーパーファミリー

3.3 モータータンパク質の原子構造

電子顕微鏡像からの三次元構造再構成とX線結晶解析

3.4 モータータンパク質によるエネルギー変換機構

4. 遺伝情報、個体発生、生体高次機能 (能瀬)

- 4.1 組み換え DNA 技術
制限酵素、塩基配列決定法、DNA クローニング、遺伝子工学、ゲノムプロジェクト
- 4.2 個体発生の分子機構
細胞の多様性の生成機構、遺伝子発現の調節機構、位置情報、形態形成
- 4.3 脳神経系の生物物理
脳神経系における情報の流れ、神経ネットワーク形成機構、神経細胞の電気的性質、記憶の分子機構

1.4 4年生 夏学期

1.4.1 プラズマ物理学 : 高瀬 雄一

0. プラズマとは?

1. 単一荷電粒子の運動

- 1.1 一様電磁場中の粒子ドリフト
- 1.2 非一様磁場中の粒子ドリフト
- 1.3 時間変化する電磁場中の粒子ドリフト
- 1.4 マッピング

2. 流体としてのプラズマ

- 2.1 プラズマの流体方程式
- 2.2 流体方程式と粒子ドリフトの関係
- 2.3 一流体電磁流体力学
- 2.4 電磁流体力学的平衡

3. プラズマ中の衝突過程

3.1 完全電離と非完全電離プラズマ

3.2 完全電離プラズマ中の衝突

3.3 プラズマの拡散

4. 流体プラズマ中の波動と不安定性

- 4.1 非等方分散媒体中の小振幅波動
- 4.2 磁場のないプラズマ中の波動
- 4.3 磁場のあるプラズマ中の波動
- 4.4 流体プラズマの不安定性

5. プラズマの運動論

- 5.1 ヴラソフ方程式
- 5.2 プラズマ波動の運動論的效果
- 5.3 速度空間不安定性と非線形理論

1.4.2 原子核物理学：酒井 英行

1. 原子核の大きさ
 - 1.1 電子散乱と電荷分布
2. 質量公式と安定性
 - 2.1 半実験的質量公式
 - 2.2 超重元素 ($Z=114$) 発見へ
 - 2.3 中性子星の大きさを見積もる
3. 核力と中間子
 - 3.1 二核子系
 - 3.2 交換力とスピン軌道力
4. 重陽子
 - 4.1 テンソル力と D 状態
 - 4.2 磁気モーメントと四重極モーメント
5. 魔法数と殻模型
6. 原子核のハートリー・フォック理論
7. 原子核の集団運動
 - 7.1 回転運動モデル
 - 7.2 振動モデル
8. 核反応と巨大共鳴
 - 8.1 和則
 - 8.2 電気双極巨大共鳴と TDA
 - 8.3 スピン振動巨大共鳴とクオーク自由度
9. 最近の話題
 - 9.1 スピン偏極現象の核物理
 - 9.2 原子核とクオーク模型

1.4.3 一般相対論：須藤 靖

1. 特殊相対論
 - 1.1 Newton 力学と Galilei の相対性原理
 - 1.2 Maxwell 方程式と Lorentz 変換
 - 1.3 光速度の測定とエーテル仮説
 - 1.4 Minkowski 時空
 - 1.5 Minkowski 時空におけるスカラー、ベクトル、テンソル
 - 1.6 物理法則の共変形式
2. 一般相対性原理とその数学的表現
 - 2.1 特殊相対論の限界
 - 2.2 一般相対論の概念構成
 - 2.3 一般座標変換とテンソル
 - 2.4 共変微分
 - 2.5 リーマン接続とクリストッフェル記号
3. 重力場における粒子の運動
 - 3.1 測地線方程式
 - 3.2 Newton 理論との比較
 - 3.3 接続係数と相互作用: $\Gamma_{\alpha\beta}^{\mu}$ と A^{μ}
 - 3.4 エネルギー運動量テンソル
4. 重力場の方程式
 - 4.1 Mach の原理
 - 4.2 Einstein 方程式
 - 4.3 宇宙定数
 - 4.4 変分原理による定式化
 - 4.5 座標変換に対する不変性: Bianchi の恒等式とエネルギー運動量保存則
5. Schwarzschild 時空
 - 5.1 球対称重力場の計量
 - 5.2 導出の概略
 - 5.3 一般相対論の検証
 - 5.4 Schwarzschild black hole
 - 5.5 Black hole 近傍での質点の運動
 - 5.6 Black hole 近傍からの輻射: Eddington luminosity
6. 重力波
 - 6.1 Einstein 方程式の弱場近似
 - 6.2 重力波の平面波解
 - 6.3 重力波の偏光
 - 6.4 測地線偏差の方程式と重力波検出原理
 - 6.5 保存則とエネルギー運動量擬テンソル
 - 6.6 弱い重力波に対するエネルギー運動量擬テンソル
 - 6.7 重力波輻射の四重極公式

1.4.4 場の量子論：江口 徹

1. 相対論的量子力学
 - 1.1 クライン-ゴルドン方程式
 - 1.2 ディラック方程式とスピン
 - 1.3 ディラックの海と陽電子
2. 場の量子化
 - 2.1 自由スカラー場の量子化
 - 2.2 ネーターの定理
 - 2.3 ネーターの定理
 - 2.4 スピノル場の量子化
 - 2.5 ウィックの定理
3. 共变的摂動論
 - 3.1 相互作用表示
 - 3.2 相互作用を持つ場の量子化
 - 3.3 ダイソンの公式
 - 3.4 ファインマン グラフ

1.4.5 固体物理 I : 青木 秀夫

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> 1. 固体の凝縮メカニズム <ul style="list-style-type: none"> 1.1 原子から固体へ 1.2 化学結合と結晶構造 2. 結晶構造 <ul style="list-style-type: none"> 2.1 点群と空間群 2.2 Bravais 格子と Brillouin 帯 3. 電子のバンド構造とフェルミ面 <ul style="list-style-type: none"> 3.1 Bloch の定理 | <ul style="list-style-type: none"> 3.2 バンド・ギャップとフェルミ面 3.3 強結合模型 4. 半導体 <ul style="list-style-type: none"> 4.1 バンド構造と電子物性 4.2 電子と正孔 5. 金属と絶縁体 <ul style="list-style-type: none"> 5.1 Wilson の理論 5.2 金属・絶縁体転移 |
|---|---|

1.4.6 素粒子物理学 : 蓑輪 眞

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> 1. 自然単位系と物理量の次元 2. 断面積と崩壊率 3. 崩壊率と質量の幅 4. レプトンの現象と 2 種の弱い相互作用 5. レプトン数保存則・レプトンユニバーサルティ 6. クォークの現象と 2 種の弱い相互作用 7. 電子・陽電子衝突実験とクォークの色 8. 4 次元 vector と Mandelstam 変数 | <ul style="list-style-type: none"> 9. 状態の混合とニュートリノ振動 10. 電磁相互作用、Dirac 方程式と Feynman diagram 11. 素粒子の発生と検出 12. spin と parity とヘリシティ 13. ベータ崩壊と弱い相互作用 14. GIM 機構と charm の発見 15. ゲージ変換と相互作用、weak boson と電・弱統一理論 |
|--|--|

1.5 4年生 冬学期

1.5.1 化学物理学 : 山本 智

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> 1. 原子の電子構造とスペクトル <ul style="list-style-type: none"> 1.1 水素原子とアルカリ原子 1.2 ヘリウム原子 1.3 HF-SCF 法と CI 法 1.4 LS 結合、j j 結合 2. 分子の対称性と群論 <ul style="list-style-type: none"> 2.1 点群 2.2 対称操作の行列表現 2.3 規約表現の性質 2.4 分子振動などへの応用 | <ul style="list-style-type: none"> 3. 分子の電子状態 <ul style="list-style-type: none"> 3.1 水素分子 3.2 2 原子分子の電子状態 3.3 非経験的分子軌道法 3.4 近似的分子軌道法 4. 分子分光学の初歩 <ul style="list-style-type: none"> 4.1 回転スペクトルとその応用 4.2 振動スペクトル 4.3 Wilson の GF 行列法 4.4 大振幅振動 |
|---|--|

1.5.2 宇宙物理学 : 牧島 一夫

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> 1. 重力 <ul style="list-style-type: none"> 1.1 ケプラー運動 1.2 ブラックホール 1.3 自己重力多体系 1.4 太陽 1.5 暗黒物質 2. 電磁放射 <ul style="list-style-type: none"> 2.1 黒体放射 | <ul style="list-style-type: none"> 2.2 光子ガスの熱力学 2.3 宇宙マイクロ波背景放射と宇宙の膨脹 3. 星の物理学 <ul style="list-style-type: none"> 3.1 星の熱力学 3.2 システムとしての星 3.3 星の内部の核融合 3.4 宇宙と重元素 3.5 星の進化 |
|--|---|

- 4. 高密度の星
 - 4.1 電子が縮退した星
 - 4.2 中性子星
- 5. ビッグバン宇宙論
 - 5.1 膨張宇宙の記述
 - 5.2 膨張宇宙の力学
 - 5.3 膨張宇宙のパラメータ
 - 5.4 宇宙の最初の3分間
- 6. 宇宙から見た地球
 - 6.1 地球は稀な天体か？
 - 6.2 人類活動の影響
 - 6.3 地球に優しく

1.5.3 量子光学：酒井広文

- 1. Planck の放射法則と Einstein 係数
 - 1.1 空洞内の場のモードの密度
 - 1.2 場のエネルギーの量子化
 - 1.3 Planck の法則
 - 1.4 光子数の揺らぎ
 - 1.5 Einstein の A 係数と B 係数
 - 1.6 熱平衡の場合
 - 1.7 簡単な光学過程に関する考察
 - 1.8 ミクロな過程の性質
 - 1.9 原子の光励起
 - 1.10 吸収のマクロな理論
 - 1.11 吸収のミクロな理論
 - 1.12 反転分布
- 2. 原子と放射の相互作用
 - 2.1 時間に依存する Schrödinger 方程式
 - 2.2 相互作用ハミルトニアン
 - 2.3 遷移速度
 - 2.4 B 係数の表式
 - 2.5 光学 Bloch 方程式
 - 2.6 Rabi 振動
 - 2.7 放射広がり
 - 2.8 飽和広がり
 - 2.9 放射減衰を伴う Rabi 振動
 - 2.10 衝突広がり
 - 2.11 Doppler 広がり
 - 2.12 合成吸収線の形状
 - 2.13 Bloch 方程式とレート方程式
- 3. 電磁場の量子化
 - 3.1 古典電磁場のポテンシャル論
 - 3.2 Coulomb ゲージ
 - 3.3 自由古典場
 - 3.4 量子力学的調和振動子
 - 3.5 場の量子化
 - 3.6 場の交換の性質
 - 3.7 零点エネルギー
 - 3.8 モード位相演算子
 - 3.9 単一モード個数状態の物理的性質
 - 3.10 コヒーレント光子状態
 - 3.11 単一モードコヒーレント状態の物理的性質
 - 3.12 放射密度演算子
 - 3.13 純粋状態に対する密度演算子
 - 3.14 放射場の統計的混合状態
- 4. 量子化した場と原子との相互作用
 - 4.1 原子の多極モーメント
 - 4.2 多極相互作用ハミルトニアン
 - 4.3 電気双極子近似
 - 4.4 原子ハミルトニアンの第2量子化
 - 4.5 光子の吸収速度と放出速度
 - 4.6 光電効果による電子の放出速度
 - 4.7 光子強度演算子
 - 4.8 Schrödinger 表示
 - 4.9 Heisenberg 表示
 - 4.10 相互作用表示
- 5. レーザーの基礎
 - 5.1 光共振器のモード
 - 5.2 光共振器の安定性
 - 5.3 発振条件
 - 5.4 波動方程式に基づくレーザー理論
 - 5.5 定常状態におけるレーザー発振
 - 5.6 各種のレーザー
 - 5.6.1 3準位レーザーと4準位レーザー
 - 5.6.2 固体レーザー
 - 5.6.3 気体レーザー
 - 5.6.4 色素レーザー
 - 5.6.5 半導体レーザー
- 6. 非線形光学の基礎
 - 6.1 非線形分極
 - 6.2 非線形分極の対称性
 - 6.3 第2高調波の発生
 - 6.4 結晶を用いた位相整合

1.5.4 固体物理学 II：樽茶 清悟

- 1. 格子振動
 - 格子振動と比熱、格子振動の量子化など
- 2. 電子間相互作用
 - 自由電子ガス、誘電関数、スクリーニング、モット絶

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> 縁体、プラズマ振動など 3. 電子・格子相互作用 <ul style="list-style-type: none"> コーン異常、パイエルス移転、ポーラロンなど 4. 電気伝導 <ul style="list-style-type: none"> ドルーデ公式、散乱問題など 5. 磁性 | <ul style="list-style-type: none"> 反磁性と常磁性、スピン間相互作用、磁気秩序と近似理論、磁気共鳴 6. 超伝導 <ul style="list-style-type: none"> 超伝導現象、BCS理論、磁束の量子化、ジョセフソン効果 |
|---|--|

1.5.5 一般相対論統論：須藤 靖

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> 1. 相対論的宇宙モデル <ul style="list-style-type: none"> 1.1 一様等方宇宙モデル 1.2 Robertson – Walker 計量 1.3 Friedmann 方程式 1.4 状態方程式 1.5 エネルギー密度の進化 1.6 Newton 力学的解釈 1.7 宇宙定数と真空のエネルギー密度 1.8 ハッブルの法則 1.9 Einstein – de Sitter 宇宙モデル 1.10 宇宙論パラメータ 1.11 スケール因子の時間発展と宇宙年齢 1.12 宇宙の温度 1.13 粒子の統計的自由度 1.14 宇宙の歴史 2. 重力レンズの基礎理論 <ul style="list-style-type: none"> 2.1 レンズ方程式 2.2 光線の曲がり角 2.3 レンズ方程式の解の定性的振る舞い 2.4 重力レンズの増光率 | <ul style="list-style-type: none"> 2.5 Cosmological distances の定義 2.6 Cosmological distances の定性的振る舞い 3. 曲がった時空での幾何光学 <ul style="list-style-type: none"> 3.1 曲がった時空での Maxwell 方程式 3.2 幾何光学 3.3 Fermat の原理 3.4 光線束の伝播 3.5 Focusing equation 3.6 Dyer – Roeder distance 4. 重力レンズ天文学 <ul style="list-style-type: none"> 4.1 重力レンズの天文学的意義 4.2 Fermat の原理によるレンズ方程式の導出 4.3 lens mapping 4.4 円対称レンズにおける critical curve と像の変形 4.5 レンズ像の分類と odd number theorem 4.6 time delay と H_0 4.7 重力レンズに対する断面積 4.8 重力レンズの確率 4.9 microlensing の光度曲線 |
|---|---|

2 各賞受賞者紹介

2.1 若林健之教授：内藤記念科学振興賞

若林健之教授は、「筋収縮の分子機構の三次元構造に基づく研究：「Molecular mechanism of muscle contraction on the basis of three-dimensional structure」に対して、内藤記念科学振興財団より、内藤記念科学振興賞を受賞された。これは、電子顕微鏡法を中心とした構造学的手法を用いて、筋収縮関連タンパク質の三次元構造を明らかにし、筋収縮およびその制御の分子機構の新しいモデルを提唱するなどの多くの顕著な功績に対するものである。若林教授は、筋肉の主要タンパク質（アクチン、ミオシンおよびその複合体）の三次元構造を明らかにし、世界に先駆けてその活性部位の三次元位置を決定した。また、世界で初めて、カルシウム濃度に依存した制御タンパク質（トロポニン・トロポミオシン複合体）の三次元構造変化を可視化する事に成功し、筋収縮制御機構を分子レベルで解明した。新しい電子顕微鏡法や解析手法の開発などの独創的な研究に関して国内外で高く評価され、特に「生物物理学」や「構造生物学」の分野に多大な貢献をされた。

2.2 小林孝嘉教授：アメリカ光学会フェローの称号

アメリカ光学会はアメリカを中心とし世界中に約13000人の会員を有する学会である。2000年10月に「超短パルスレーザーの新設計と開発およびそれを用いた分子分光への応用と高分子の非線形光学過程の研究」に対して、アメリカ光学会は、小林孝嘉教授をフェローにノミネートした。位相速度・群速度・パルス面整合を全て満たす、非同軸パラメトリック増幅器に基づく新しい光学系を設計し、世界で最も短い4.7 fsの可視光パルスを発生した。更に、その光源を用いて、分子振動^{*}を実時間的に測定し、動的モード結合・動的ダシンスキー効果・動的インテンシティーポロイングなどのこれまで見られたことの無かった新しい超高速現象を見いだした。更に化学反応の中間体だけでなく、過渡状態の分子構造に関する情報を与える振動スペクトルの測定も始めて行った。

2.3 上坂友洋博士（酒井（英）研究室）：井上研究奨励賞および原子核談話会新人賞

上坂友洋博士は、博士論文「Measurement of Polarization Correlation Coefficient for the ${}^3\text{He}(d,p){}^4\text{He}$ Reaction」により井上研究奨励賞を受賞した。この論文では、重陽子D状態波動関数の高運動量成分を調べる有効なプローブとして ${}^3\text{He}(d,p){}^4\text{He}$ 反応の偏極相関係数測定を提案し、世界で初めて測定し、且つその結果について報告した。得られた値は歪曲波ボルン近似では再現できず、D状態波動関数のみならず反応機構まで含めた包括的な研究の必要性を示唆するものとなった。

上坂友洋は、論文「Polarization Correlation Coefficient for the ${}^3\text{He}(d,p){}^4\text{He}$ Reaction」に対して原子核談話会新人賞も受賞した。

2.4 板橋健太博士（早野研究室）：原子核談話会新人賞

板橋健太博士は、「Deeply bound π^- states in ${}^{207}\text{Pb}$ formed in the ${}^{208}\text{Pb}(d,{}^3\text{He})$ reaction. II. Deduced binding energies and widths and the pion-nucleus interaction」の論文に対して、原子核談話会新人賞を受賞した。この論文では、鉛208ターゲットに重陽子を入射し中性子ピックアップ反応で生ずるヘリウム3の運動量を精密に測定することにより、 π^- 中間子が鉛207原子核に深く束縛された状態の励起エネルギースペクトルを得ることができた。このスペクトルは、理論的に予想されたものと非常に良く一致し、スペクトル中に見つかった細くて巨大なピークは、3p軌道にあった中性子が抜き取られ、 π^- 中間子が2p軌道に束縛された状態と同定された。詳しい解析の結果、鉛207原子核の中心で、 π^- 中間子の質量が、真空中での値に比べ、23~27MeV重くなっていることが、つきとめられた。

2.5 深沢泰司博士（元釜江研究室）：日本天文学会欧文誌論文賞

「Fukazawa, Y., Makishima, K., Tamura, T., Ezawa, H., Xu, H., Ikebe, Y., Kikuchi, K., and Ohashi, T.: ASCA Measurements of Silicon and Iron Abundances in the Intracluster Medium”, *Publ. Astr. Soc. J.***50**, 187 (1998)」が、2000年度の日本天文学会欧文誌論文賞を受賞した。これは深沢泰司氏（元釜江研助手、現在は広島大学助教授）の主導のもと、釜江研と牧島研の共同研究として行なわれたもので、同氏の博士学位論文の主要部分の公表にもなっている。銀河団に充満する大量の高温プラズマの元素組成を「あすか」衛星で診断した結果、大規模な銀河団ほど、鉄に比べてシリコンの存在比が高くなっていることが判明した。これは大規模な天体ほど深い重力ポテンシャルをもつ結果、銀河団が形成された初期の、シリコンに富んだII型超新星の放出物が、効率良く閉じ込められた結果と解釈できる。すでに40件に達する引用があり、国際的に高い評価を受けている。

3 人事異動

[物理教室に來られた方々]

| | | | |
|-------|-------|-------------|-----------------------|
| 佐野雅己 | 教授 | 2000年4月1日 | 転入(東北大) |
| 初田哲男 | 教授 | 2000年4月1日 | 転入(京都大) |
| 小形正男 | 助教授 | 2000年4月1日 | 配置換(教養学部) |
| 櫻井博儀 | 助教授 | 2000年4月1日 | 採用(理化学研究所) |
| 岡本 徹 | 助教授 | 2000年5月1日 | 採用(学習院大) |
| 佐貫智行 | 助手 | 2000年4月1日 | 採用(学振) |
| 峯本紳一郎 | 助手 | 2000年4月1日 | 採用(Berlin 自由大) |
| 板垣直之 | 助手 | 2000年4月1日 | 採用(理化学研究所) |
| 今村洋介 | 助手 | 2000年7月1日 | 採用(Massachusetts 工科大) |
| 佐々木勝一 | 助手 | 2000年10月1日 | 採用(理研 BNL 研究センター) |
| 有田亮太郎 | 助手 | 2000年10月1日 | 採用((株)日本総合研究所) |
| 柳瀬陽一 | 助手 | 2000年10月1日 | 採用(京都大) |
| 熊崎文晴 | 事務室主任 | 2000年4月1日 | 採用(放送大学) |
| 和島修子 | 事務分室 | 2000年4月1日 | 採用 |
| 勝見順恵 | 事務分室 | 2000年11月20日 | 採用 |
| 山田はるひ | 図書室 | 2000年12月1日 | 採用 |

[物理教室から移られた方々]

| | | | |
|-------|-------|-------------|------------|
| 折戸周治 | 教授 | 2000年11月14日 | 退職(逝去) |
| 壽榮松宏仁 | 教授 | 2001年3月31日 | 定年退職 |
| 若林健之 | 教授 | 2001年3月31日 | 定年退職 |
| 伊倉貞吉 | 助手 | 2000年7月31日 | 辞職(キリンビール) |
| 山田章一 | 助手 | 2000年8月16日 | 転出(大阪大) |
| 田代 信 | 助手 | 2000年9月1日 | 転出(埼玉大) |
| 松原隆彦 | 助手 | 2000年9月16日 | 転出(名古屋大) |
| 黒木和彦 | 助手 | 2000年10月1日 | 転出(電通大) |
| 白水徹也 | 助手 | 2000年12月16日 | 配置替(ビッグバン) |
| 杉之原立史 | 助手 | 2001年4月1日 | 転出(小樽商科大) |
| 長尾忠昭 | 助手 | 2001年4月1日 | 転出(東北大金材研) |
| 杉田篤史 | RA | 2001年2月28日 | 転出(静岡大) |
| 石井賢司 | RA | 2001年3月31日 | 辞職(原研関西研) |
| 小野瀬英寿 | 物理事務室 | 2000年4月1日 | 配置替(農学部牧場) |
| 志村政子 | 事務補佐員 | 2000年11月17日 | 辞職 |

4 役務分担

| 役務 | 担当教官 | 技官・事務官・事務補佐官 |
|-------------|---|----------------------------|
| 専攻長・学科長 | 塚田 | 後藤、中丸、熊崎、麻生、新沼 武田、小沢、小原 |
| 幹事 | 牧島、酒井（英） | 後藤、中丸、熊崎、麻生、新沼 武田、小沢、小原 |
| 専攻主任 | 早野 | 武田、小沢、小原 |
| 理系委員（専攻副主任） | 柳田 | |
| 常置委員 | 樽茶、青木 | |
| 教務係 | 大塚（孝）（理学部教務委員） 蓑輪、松尾、須藤（大学院） 藤森、相原、山本 | 武田、小沢、小原 |
| 学生実験 | 樽茶 | 櫻村 横山、後藤、武田 |
| 就職係 | 坪野 | 樋上 後藤 後藤 |
| 奨学金 | 福山、柳田 | |
| 会計係 | 1号館：大塚、4号館：和達 旧1号館運営委員：坪野 | |
| 号館長 | 長谷川、藤川 | 樋上、井上 大塚（茂） |
| 部屋割（電話） | 坪野 | |
| 技術部門 | 坪野 | |
| 試作室（ガラス） | 坪野 | |
| 回路 | 蓑輪 | |
| 低温 | 福山、岡本 | |
| 研究材料 | 酒井（英） | |
| 電顕 | 若林 | |
| 計算機・ネットワーク | 相原、早野 | 櫻村 柿沼、大木、志村 |
| 図書係 | 小林（理図書委員） 桑島、松尾、小形 | |
| 複写係 | 桑島 | 麻生 佐々木 横山 |
| 談話会 | 青木、長沢、佐野、初田 | |
| 年次報告 | 高瀬 | |
| 記録係 | 小形、岡本、桜井 | |
| 物品供用官 | 酒井（英） | 後藤 |
| 環境安全 | 能瀬 | |
| 放射線管理 | 蓑輪 | |
| 事務分室 | 第1：酒井（英） 第2：須藤、第3：和達 | 後藤 後藤 |
| 理交会 | 酒井（広） | |
| 教職員親睦会 | 山本 | |
| 建物 | 長谷川 | 後藤、櫻村 |
| 進学指導担当 | 和達 | |

5 教室談話会

< 2000 年 >

- 4月28日 Francesco Iachello (Yale University)
「The Role of Dynamic Symmetries and Supersymmetries in Physics」
- 5月12日 松井 哲男 (東大相関基礎科学系)
「超相対論的原子核衝突 - CERN/SPS 実験から学んだ物理と RHIC」
- 7月7日 桑島 邦博 (東大理学系研究科)
「蛋白質のフォールディング問題」
- 7月14日 伏見 譲 (埼玉大工学部)
「分子を進化させる - Evolvability of Biopolymers」
- 7月21日 Leo Kouwenhoven (Delft University of Technology)
「The Kondo Effect in Quantum Dots」
- 9月29日 武田 暁 (東大・東北大名誉教授)
「物理学は脳を理解できるか？」
- 10月6日 三浦 登 (東大物性研)
「超強磁場における量子現象」
- 10月20日 酒井 広文 (東大理学系研究科)
「レーザー光で分子を操る」
- 11月10日 E.L. Turner (Princeton University Observatory)
「The Detection and Characterization of Extrasolar Planets」
- 11月17日 福山 淳 (京都大学工学研究科)
「プラズマにおける輸送障壁」
- 11月21日 David Spargel (プリンストン大学、宇宙科学教室)
「Cosmic Microwave Background Radiation: Current Status
And Future prospects」
- 11月29日 新庄 輝也 (京都大学化学研究所)
「ナノスケール磁性体」
- 12月15日 田仲 由喜夫 (名古屋大学工学研究科)
「異方的超伝導体のトンネル現象の理論」

- 1 2月22日 坪野 公夫 (東大理学系研究科)
「動き始めたTAMA300 重力波検出器」
- < 2001 年 >
- 1月26日 櫻井 博儀 (東大理学系研究科)
「不安定核ビームが拓くエキゾチックな核構造の研究」
- 2月2日 H. Witala (ヤゲロニアン大学)
「Few Nucleon Physics - Insights and Applications」
- 2月9日 壽榮松 宏仁 (東大理学系研究科)(最終講義)
「物質科学の発展と共に」
- 2月9日 若林 健之 (東大理学系研究科)(最終講義)
「生命を電子で見る - タンパク質の構造変化と生命機能」
- 2月16日 Renzo Ricca (ニュートン研究所)
「Topological Fluid Mechanics」
- 2月23日 E. Wintner (ウィーン工科大学フォトンクス研究所)
「超短パルスレーザーの開発とその応用」
- 3月13日 Alon Klug (Cambridge 大学分子生物学研究所)
「生命と対称性 - 生命を担う分子集合体の対称性を求めて」