ISSN 0910-0709

Department of Physics School of Science University of Tokyo

# Annual Report

# $\boldsymbol{2002}$

# 平成14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

平成14年度(2002年4月~2003年3月)、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。この小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。

まず初めに教官の異動についてですが、平成14年度には、内田慎一教授が新領域創成科から、常行真司 助教授が物性研究所からそれぞれ着任されました。内田教授の専門は、強相関電子系に関する物性実験、特 に高温超伝導機構の解明です。一方、常行助教授の専門は、分子動力学法や第一原理電子状態計算といった 計算物理学的手法を用いた物質の物性理論です。当教室でますます研究を発展させられるとともに、教育に も多いに寄与していただけるものと期待しております。

続いて、今年度は定年年齢が 61 歳に延長になり、長澤信方教授が定年退官されました。長澤先生は光物 性の分野において優れた業績をあげられました。最近の励起子系でのボーズ・アインシュタイン凝縮 (BEC) の研究は、世界的に高く評価されています。長澤先生の多年にわたる研究・教育におけるご貢献と教室運営 におけるご尽力にたいしまして、深く感謝申し上げます。

次に、本年度はたいへん喜ばしいご報告を数多くすることができます。5月に、佐藤勝彦教授が宇宙物理 学における業績によって紫綬褒章を受章されました。また、11月には和田昭允名誉教授が生物物理学におけ る業績によって勲二等瑞宝章を受章されました。12月には樽茶清悟教授が、人工原子-分子の実現の業績で、 2002年度仁科記念賞を受賞されました。そしてみなさまご存じのように、小柴昌俊名誉教授が 2002年度ノー ベル物理学賞を受賞されました。今度こそは受賞されるのではないかと、ここ数年多くの方によって期待さ れていたことがようやく実現しました。教室としましてもほんとうに喜ばしいことです。小柴先生は、岐阜 県神岡町の地下実験室内に建設された水チェレンコフ装置「カミオカンデ」により、1987年大マゼラン星雲 中で起こった超新星 SN1987aの爆発で発生したニュートリノを検出するのに成功しました。このことによっ て「ニュートリノ天文学」という新しい学問分野が切り拓かれました。我々教室のメンバーー同にとりまして は、この業績が小柴先生が本物理学教室に在任中の研究であり、ことさら先生のご受賞を誇りに思う次第で す。また、小柴名誉教授は同時に 2003年ベンジャミン フランクリン メダルも受賞されました。さらに、安 東正樹助手は 2002年度宇宙線物理学奨励賞を受賞されました。

ここに改めて物理学教室を代表いたしまして、皆様の受章(受賞)に心からお祝いを申し上げます。

さて、平成 14 年度は、物理学教室にとって異例に慌ただしい一年でもありました。その主な理由は、平 成 16 年度からの国立大学法人に向けた「中期目標・中期計画」の作成、ならびに「21 世紀 COE プログラム」 (旧名称トップ 30)の申請のためでした。当然のことながら、どちらも物理学教室の将来に大きな影響を与え るものであることから、教室内にそれぞれ特務委員会を立ち上げ対応しました。

「中期目標・中期計画」は今後の6年間にわたる教育・研究の目標を掲げ、その目標を実現させるための 行動計画を立てるものです。おおまかな内容は、理学系研究科・理学部に関するものと物理学専攻・物理学 科に関するものに分かれています。後者の主要な項目は、1)教育の質の向上、2)研究の質の向上、3)国際交 流の推進と貢献、4)業務運営の改善と効率化、等々です。この1)や2)の項目などは、わが国で初めて外部 評価(Review)を実施するなど、物理学教室は常日頃から研究と教育の向上に努めてきました。しかし、これ ら大学としては本来当然である取り組みも改めて現状を点検し、将来へつなぐ文書として明文化する作業は なかなか時間のかかる困難なものでした。早野教授を委員長とする特務委員会で議論していただき、その過 程でさまざまなアイディアも出されましたが、常に理想と実現性の間に横たわる深い溝を前にして?????」と 果てしないクエスチョンマークに思い悩むことも多々ありました。

もう一つの申請「21 世紀 COE プログラム」に触れたいと思います。このプログラムは、世界の教育研究

拠点を形成することを目的としています。従って、ある特定の分野を強調したプロジュクト指向の提案が望 ましいとされています。しかしながら、この年次報告においても示されているように、我々の物理学教室の 最大の特徴は、様々な分野が切磋琢磨しつつ活発に研究を進めていることだと考えています。そこで、この 教室の特徴を最大限に活かし、多くの分野を包含し、且つ全体を括れるプロジュクトとして「極限量子系と その対称性」を提案しました。紆余曲折がありましたが、最終的には、物理学専攻を中核とし、天文学専攻、 原子核科学研究センター、ビッグバンセンター、天文学教育研究センター、素粒子物理国際研究センター、宇 宙線研究所、物性研究所の大同団結の形で申請することになりました。このプログラムが認められれば、こ れまでは予算や制度上の制約から難しかった教育や研究の環境をおおきく改善することができそうです。そ の上、国際的により一層ビジビリティの高い物理学教室が実現できると期待しています。申請書にまとめる に際し、ご協力いただきました宇宙線研究所ならびに物性研究所に感謝するとともに、多くの実務を処理し ていただいた特務委員会の方々、とりわけ常行助教授にお礼を申しあげます。

最後になりましたが、大切な報告をさせていただきます。

昨年度、大学入試センター宛に試験の出題教科・科目についての要望書を提出いたしました。物理学教室 としてはかってなかったことだと思いますし、こういった要望書を出さないのが物理学教室の見識だと伺っ たこともあります。しかし、平成18年度より大学入試センターが実施予定の試験日程案が、あまりにも物理 を選択する受験生に影響を与え、高校生の「物理離れ」を加速させる恐れが多いにあることが明らかになり ました。そこで、物理学教室の教官はこの日程案を看過することができないという判断に至り、それが要望 書の提出になりました。

国立大学法人法案が2月28日閣議決定され、いよいよ平成16年度から「国立大学法人東京大学」として 新たな歴史が始まろうとしています。法人化に伴う大学の組織・運営の大枠は法案に記載されておりますが、 肝心な部分の制度設計はこれから本格化いたします。前述しました「中期目標・中期計画」の中に物理学専 攻・物理学科の望むべく方向性は盛り込みましたが、それを実現する制度設計がなされなければなりません。 最近、東京大学の物理学関係の論文の引用回数が世界一であるという嬉しい記事が新聞に出ました。これは これまでの自由で高度な研究教育活動によってもたらされた結果でありますが、今後もこのような物理学教 室の伝統的な環境を守りながら、更なる躍進がなされるように、不断の努力を傾けなければならないと改め て考えております。平成15年度は、まさにその正念場になりそうです。諸先輩方、関係各位の皆様におかれ ましても、今後のご支援ならびにご助言を改めてお願い申し上げる次第です。

この年次報告は岡本徹助教授の大変なご尽力によって、編集作成されたものです。この場を借りて同助教 授に深く感謝いたします。

2003年5月16日

物理学専攻長・学科長 (教室主任) 酒井英行

目 次

# I 研究室別 2002 年度 研究活動報告

1		原子核	・素粒子理論	3
	1.1	原子核	理論研究室 ( 大塚 · 初田 ) ..................................	3
		1.1.1	原子核構造	3
		1.1.2	ハドロン物理	5
	1.2	素粒子	論研究室 (藤川・江口・柳田・松尾)	12
		1.2.1	弦理論	12
		1.2.2	高エネルギー現象論....................................	14
		1.2.3	場の理論....................................	16
<b>2</b>		原子核	・素粒子実験	<b>21</b>
		2.0.4	ガモフテラー遷移強度の測定によるランダウ・ミグダル係数 $g'_{ m N\Delta}$ の決定 (酒井研究室)	21
		2.0.5	偏極中性子 - 重陽子弾性散乱測定による三体力の検証 (酒井研究室)	22
		2.0.6	超狭幅ダイバリオンの探索 (酒井研究室)....................................	22
		2.0.7	2 陽子系のスピンを用いたベルの不等式の検証 (酒井研究室)	23
		2.0.8	不安定核ビームを用いた散乱実験のための偏極陽子固体標的の開発 (酒井研究室)	23
		2.0.9	冷たい反水素の生成と検出(早野研究室)	24
		2.0.10	反陽子ヘリウム $\overline{p}\mathrm{He}^+$ の精密なレーザー分光:反陽子と陽子の質量差、電荷の絶対値の差に対す	
			る新しい上限(早野研究室)	24
		2.0.11	長寿命 $\overline{p}$ He <sup>2+</sup> イオンの観測 (早野研究室 )	25
		2.0.12	$\overline{p}$ He <sup>+</sup> 原子の初期ポピュレーションの研究 (早野研究室)	26
		2.0.13	オ - ジェ崩壊率 (早野研究室 )	26
		2.0.14	反陽子ヘリウムの重水素との衝突における量子トンネル効果 (早野研究室 )	26
		2.0.15	パイ中間子原子が解き明かす陽子の質量起源(早野研究室)	27
		2.0.16	反 K 中間子の <sup>3</sup> He 原子核による深い束縛状態の研究 (早野研究室 )	27
		2.0.17	$\eta$ 中間子の原子核による束縛状態探索実験のための検出器開発と動作テスト (早野研究室)	27
		2.0.18	中性子過剰核の安定性 (櫻井研究室)	28
		2.0.19	インビーム $\gamma$ 線核分光法による不安定核の構造研究 (櫻井研究室)	28
		2.0.20	位置感応型ゲルマニウム検出器の開発 (櫻井研究室)	30
		2.0.21	中性子過剰核の分解反応(櫻井研究室)	30
		2.0.22	$\beta$ 分光を用いた陽子過剰核 <sup>46</sup> Cr の核構造研究 (櫻井研究室)	30
		2.0.23	天体核物理 (櫻井研究室)	30
		2.0.24	日米共同研究 (櫻井研究室)	31
		2.0.25	RIBF 開発研究 (櫻井研究室)         (根本	32
	2.1	駒宮 研	[究室	39
		2.1.1	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	39
		2.1.2	電子・陽電子リニアコライダー JLC 計画	40
		2.1.3	LHC 実験におけるブラックホール (BH) 事象の解析に関する研究	41
		2.1.4	BES 実験データを用いた、 $J/\psi$ の崩壊過程の研究	41
		2.1.5	大気上層部における $\mu$ 、p、及び He のエネルギースペクトラム測定	41
	2.2	蓑輪 研	究室	47
		2.2.1	ボロメータを用いた暗黒物質の直接検出実験	47
		2.2.2	有機単結晶シンチレーターを用いた暗黒物質検出器の開発	47
		2.2.3	軟 $\gamma$ 線リビーターからのアクシオン検出実験	48

1

	2.3	相原研	究室	51
		2.3.1	中性 B 中間子と反中性 B 中間子混合による CP 非対称の精密測定	51
		2.3.2	中性 $B$ 中間子の $\pi^+\pi^-$ 崩壊における $CP$ 非対称の証拠	51
		2.3.3	B 中間子の時間発展の精密測定	52
		2.3.4	B 中間子の非常に稀な崩壊の測定	52
		2.3.5	Belle 実験用第二世代シリコンバーテックス検出器の完成........................	52
		2.3.6	JHFnu 長期線ニュートリノ振動実験用陽子ビームラインの設計	52
		2.3.7	陽子ビームプロファイルモニターの開発....................................	52
		2.3.8	ハドロン生成の不定性がニュートリノビームに与える影響の研究.................	53
		2.3.9	ハイブリッド光検出器を使った水チェレンコフ検出器の開発	53
		2.3.10	リニアコライダー Beam Delivery System の検討	53
		2.3.11	リニアコライダー実験用半導体中央飛跡検出器の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	53
		2.3.12	リニアコライダーを使ったトップクォーク物理の研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	54
3		物性理		57
	3.1	和達研	究室	57
		3.1.1	ボース・アインシュタイン 凝縮	57
		3.1.2	量子多体系	57
		3.1.3	ランダム行列理論とその応用	58
		3.1.4	非平衡統計物理	59
		3.1.5	ソリトン理論・力学系	59
		3.1.6	量子計算と量子情報・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	59
		3.1.7		60
	3.2	塚田研		62
		3.2.1		62
		3.2.2	ポルフィリン分子ワイヤーの伝導特性と磁性の制御・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	62
		3.2.3	カーボンナノチューブ2重接合系によって誘起されるスピン偏極流	62
		3.2.4	DNA の電気伝導特性	62
		3.2.5	非接触 AFM 探針が Si(111)√3 × √3-Ag 表面に与えるナノ力学効果の第一原理的研究	63
		3.2.6	非接触原子問題微鏡の散逸と減衰	63
		3.2.7	非接触原子間力顕微鏡における第一原理シミュレーション解析	63
		3.2.8	時間依存 Kohn-Sham 方程式の SCF ループに 頼らない 数値解決の提案	63
		3.2.9	時間発展する電子状態の第一原理シミュレーション法	63
	3.3	青木研		67
	0.0	3.3.1	超伝導	67
		3.3.2	平坦バンド強磁性-5 冒環高分子における可能性	68
		3.3.3	アルカリ金属吸蔵ゼオライトの雷子状態 — supercrystal	68
		3.3.4		68
		3.3.5	非平衡・非線形な強相関電子系 — 強雷場下のモット絶縁破壊におけるユニバーサルな Landau-Zener	00
		0.0.0	過程	69
		3.3.6	分数量子ホール効果 — 複合フェルミオン相互作用と BCS ペアリング	69
		3.3.7	3次元系における整数量子ホール効果、butterfly、表面電流	69
		3.3.8	3次元系における磁場誘起スピン密度波	69
		3.3.9	周期的極小曲面上の電子・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	70
		3.3.10	その他	70
	3.4	小形研	究室	73
		3.4.1	高温超伝導の理論	73
		3.4.2	d 波超伝導体中での電子状態	73
		3.4.3	スピン三重項超伝導体	. 9 74
		3.4.4	フラストレーションのある系での電子状態	74
		3.4.5	弱い強磁性	75
		3.4.6	1 次元物質に関する理論	75
	3.5	常行研		79
	0.0	3.5.1	新しい雷子状態計算法の開発:トランスコリレイティッド法	79
		352		70
		0.0.4		13

		3.5.3 シリコン (100) 表面の環式炭化水素	80
		3.5.4 Pt(111) 表面に吸着した NO 分子の振動スペクトル	80
		3.5.5 <b>シリコン表面の酸化機構</b>	80
		$3.5.6$ 高圧下の水素結合: $\delta$ -AlOOH と $\delta$ -Al $_{1-2x}$ Mg $_x$ Si $_x$ OOH	80
<b>4</b>		物性実験	83
	4.1	長澤研究室	83
		4.1.1 亜酸化銅における励起子系の BEC 相の探査	83
		4.1.2 ゼオライト結晶中のカーボン・ナノチューブの光学応答	84
	4.2	樽茶研究室	87
		421 人工原子の雷子相関の研究	87
			88
			00
			09
		4.2.4 电サイビノ 前脚C 里丁司昇のハート リエア 夫現に回り C	89
		4.2.5	90
	4.3	滕箖研究至	95
		4.3.1 高温超伝導	95
		4.3.2 遷移金酸化物おける金属-絶縁体転移	95
		4.3.3 磁性半導体	96
		4.3.4 1次元電子系	96
		4.3.5 遷移金属化合物	96
	4.4	内田研究室	02
		4.4.1 梯子型 Cu酸化物の電子相図	02
		4.4.2 磁場と構造制御による高温超伝導体のテラヘルツ光学スペクトル操作	02
		443 高温超伝導体における超伝導 ストライプ秩序競合の圧力による制御 1	03
		AAA 高温超伝導体にの力 $2$ 定位等 $(A + y + y + y)$ ( $A + y$ ) には $2$ () ( $A + y$ ) ( $A$	00
	45		00
	4.0		00
		4.0.1 夜凪电丁制区	00
		4.0.2 衣岨超傾垣C伯転移	07
		4.5.3 新しい装直の立ち上げ	08
	4.6	福山研究室	12
		4.6.1 2 次元のフェルミ量子流体 · 固体の研究	12
		4.6.2 超低温実験技術の開発1	13
		4.6.3 Exfoliated graphite の物性評価と表面の STM 観測	14
	4.7	岡本 研究室	17
		4.7.1 強相関2次元電子系	17
		4.7.2 走査型プローブ顕微鏡を用いた量子ホール系電子輸送現象の研究	17
		4.7.3 InAs 表面反転層における電気伝導 1	19
<b>5</b>		一般物理理論 12	20
	5.1	宇宙理論研究室 (佐藤・須藤)	20
		5.1.1 初期宇宙·相対論	20
		5.1.2 <b>観測的宇宙論</b>	21
		513 超新星·高密度天体 1	24
		51/1 <b>子</b> の他	26
	59		20
	5.2	1) 尾柳九里・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	94 94
		0.2.1 11 11 11 11 12 12 12 12 12 12 12 12 12	34
		5.2.2 無限準位系にありるエノダノグルメノトと重于通信	34
6 一船物理宝路			26
U	61		36
	0.1	1917WIJU主・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	00 90
		0.1.1 <u>旭</u> 椏ル/ <i>NV</i> AV <sup>ー</sup> ソー	აი ა_
			37
		6.1.3 マルナナヤンネル・タフルロックインアンフによる電場変調分光法の開発1	38
		6.1.4 近接場分光	38

6	6.1.5 9 切自和	_ 量子光学・量子情報	39 45
U	0.4 1X回W より1	九王・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	40 45
	0.2.1	▲陽C生のノレアの研九	40
	0.2.2	ノノックホール人体の観測的研究 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	40
	0.2.3		40
	6.2.4		40
	6.2.5	$Astro-EZ$ 衛星に回じに使 $\Lambda$ 緑快山谷 $(HAD-H)$ の用先彩作 $\dots \dots \dots$	47
	6.2.6	「将米に回けての技術開発」・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	47
6	0.3 局潤切		52 72
	6.3.1	TST-2 球状トカマク実験	52
	6.3.2	トカマクフラズマ中の径電場構造における電極バイアスの効果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	54
_	6.3.3	字外機関との共同研究	54
6	5.4 坪野研	究室	60
	6.4.1	レーザー干渉計を用いた重力波の検出1	60
	6.4.2	熱雑音の研究	61
	6.4.3	精密計測の研究	62
6	5.5 佐野研	<b>!究室</b>	66
	6.5.1	散逸系の研究	66
	6.5.2	非線形系としての生命システム....................................	67
6	5.6 山本研	<b> 究室</b>	70
	6.6.1	はじめに	70
	6.6.2	富士山頂サブミリ波望遠鏡1	70
	6.6.3	可搬型 18cm サブミリ波望遠鏡	72
	6.6.4	Atacama Submillimeter Telescope Experiment (ASTE)	73
	6.6.5	Hot-Electron Bolometer(HEB) 素子の開発 1	73
	6.6.6	実験室分子分光	73
6	5.7 酒井应	☆ 研究室	76
	6.7.1	楕円偏光したレーザー電場と静電場の併用による分子の3次元配列制御	76
	6.7.2	フィードバック型パルス整形システムによる分子内の量子過程制御	77
	6.7.3	高強度レーザー電場による van der Waals 二量体の配向制御と分極率の評価	78
	6.7.4	高次高調波発生を用いたアト秒パルスの発生とその計測	79
	6.7.5	その他	79
7	生物物	理 1	33
7	7.1 桑島研	<b> 究室</b>	83
	7.1.1	蛋白質工学を用いた蛋白質のフォールディング研究	83
	7.1.2	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	85
	7.1.3	新しい測定技術と計算機シミュレーションを利用した蛋白質のフォールディング研究1	86
7	7.2 能瀬	研究室	90
	7.2.1	神経配線形成の分子機構	90
	7.2.2	シナプス形成の分子機構	92
8	技術剖	門 15	95
8	3.1 技術音	門	95
	8.1.1	実験装置試作室	95
тт	Summ	non- of moun patinitias in 2002	17
11	Summ	lary of group activities in 2002	<b>1</b>
1	Theor	etical Nuclear Physics Group	99
2	Theor	etical Particle and High Energy Physics Group $\ldots \ldots 2$	U1 01
3	Sakai	Group	04 07
4	Hayaı	10 Group	05
5	Sakur	aı Group	06
6	Koma	mıya group	07
7	Minov	va-Group $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $2$	08

8	Aihara Group
9	Wadati Group
10	Tsukada Group
11	Aoki Group
12	Ogata Group
13	Tsuneyuki Group
14	Nagasawa Group
15	Tarucha Group         216
16	Fujimori Group
17	Uchida Group
18	Hasegawa Group
19	Fukuyama Group
20	Okamoto Group
21	Theoretical Astrophysics Group
22	Murao Group
23	Kobayashi group
24	Makishima Group
25	Takase Group         228
26	Tsubono Group
27	Sano Group
28	Yamamoto Group
29	Sakai (Hirofumi) Group
30	Kuwajima Group
31	Nose Group

 $\mathbf{235}$ 

# III 2002 年度 物理学教室全般に関する報告

1		学部講義概要 2	<b>37</b>
	1.1	2年生冬学期	37
		1.1.1 電磁気学I: 櫻井 博儀 2	37
		1.1.2 解析力学・量子力学I: 相原 博昭	37
		1.1.3 物理数学 I: 村尾 美緒 2	38
		1.1.4 物理実験学: 長谷川修司、桑島邦博 2	38
	1.2	3年生夏学期	38
		1.2.1 光学:小林孝嘉	38
		1.2.2 量子力学 II: 小形正男	38
		1.2.3 物理数学 II : 松尾 泰	39
		1.2.4 現代実験物理学 I: 樽茶清悟、福山寛、能瀬聡直	39
		1.2.5 電磁気学 II : 高瀬 雄一 2	40
		1.2.6 生物物理学:桑島邦博、能瀬聡直 2	40
		1.2.7 統計力学I:藤川和男2	40
	1.3	3年生 冬学期	41
		1.3.1 電気力学: 坪野 公夫	41
		1.3.2 物質科学基礎: 藤森 淳 2	41
		1.3.3 現代実験物理学 II : 蓑輪 眞・早野龍五	41
		1.3.4 物理数学 III : 和達三樹 2	42
		1.3.5 量子力学 III : 初田哲男 2	42
		1.3.6 流体力学 : 佐野 雅己	42
		1.3.7 統計力学 II : 青木 秀夫	43
	1.4	4年生夏学期	43
		1.4.1 素粒子物理学 : 駒宮 幸男	43
		1.4.2 原子核物理学: 大塚孝治・酒井 英行	43
		1.4.3 固体物理学 I : 常行 真司 . 2	44
		1.4.4 場の量子論:江口 徹	44

	1.5	1.4.5       プラズマ物理学:江尻晶	244 244 245 245 245 245 246 246
		1.5.4   固体初理字 11 : 阿本 徹 .	247
<b>2</b>		各賞受賞者紹介	<b>248</b>
	2.1	佐藤勝彦教授:紫綬褒章	248
	2.2	和田昭允名誉教授:勲二等瑞宝章....................................	248
	2.3	樽茶清悟教授:仁科記念賞	248
	2.4	小柴昌俊名誉教授:2002 年ノーベル物理学賞	248
	2.5	小柴昌俊名誉教授: Benjamin Franklin Medal in Physics 受賞	249
	2.6	佐貫智行助手 ( 駒宮研究室 ): 宇宙線物理学奨励賞	249
	2.7	安東正樹助手 ( 坪野研究室 ): 宇宙線物理学奨励賞	249
	2.8	平野哲文博士 (初田研究室):核理論新人論文賞	249
	2.9	横山将志博士 ( 相原研究室 ): 第 4 回高エネルギー物理学若手奨励賞 ..................	249
	2.10	樋口岳雄博士 (相原研究室):第19回井上研究奨励賞	250
	2.11	堀正樹博士 ( 早野研究室 ): 第19回井上研究奨励賞	250
	2.12	関口仁子博士 (酒井 (英) 研究室): 原子核談話会新人賞	250
3		人事異動	<b>251</b>
4		役務分担	252
<b>5</b>		教室談話会	<b>253</b>

Ι

# 研究室別 2002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) 不安定核の構造と反応
- 2) モンテカルロ殻模型による原子核の多体構造の 解明
- 3) 原子核多体問題や核力の新しい方法論の模索

の3つのテーマを主に追求している。1番目のもの は、対象としては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、大体等しい。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。その例として、魔法数があげら れる。原子の場合と同じように原子核でも(陽子或 は中性子の数としての) 魔法数があり、構造上決定 的な役割を果たす。魔法数は1949年のメイヤー・ イェンゼンの論文以来、安定核では変わってこなかっ た。しかし、不安定核での魔法数は安定核のそれと は系統的に異なり、そのメカニズムは核力のスピン アイソスピン依存性による、という成果がここ数年 我々の研究室で得られつつあり、殻進化と呼ばれる。 この研究成果は今後の核構造論研究の方向性を左右 し、進める原動力となり、その方向での平均場理論 の再構築なども始めた。さらに、いわゆる原子核に おける分子的構造理論、確率論的配位法やゆるく束 縛された粒子を含んだ殻模型計算などにより、不安 定核の構造・反応の研究を様々に進めている。また、 2番目の方法を応用しての研究の主要な対象も不安 定核である。2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。平成14年度からは科学研究費特別推進研 究に採択され、最終的には200個の CPU からなる 超並列専用計算機を導入して、大規模な研究を展開 している。3番目については、相対論的な多体理論 への入口となるべき相対論的平均場理論の発展、低 い運動量空間への投影やカイラル性に注目した新し い有効相互作用理論とその多体問題への応用などを 目指しての可能性を探っている。

#### ハドロン物理学

ハドロン(核子、中間子、及びその励起状態)は、 クォークとグルオンの強い束縛状態で、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の形からは予想も できないような様々な現象を示す。 我々の研究室 では、ハドロンのクォーク・グルオン構造、QCDの 真空構造、及び高温高密度における QCD 相転移を、 クォーク・グルオンの量子多体問題という観点から 統一的に理解すべく研究を行っている。研究手法と しては、場の量子論における非摂動的方法による解 析的アプローチ、格子 QCD の数値シミュレーション による第一原理的アプローチ、そして相対論的流体 力学に基づいた重イオン衝突シミュレーションなど、 多岐にわたっている。

今年度は、ハドロンの励起状態スペクトルの構造 とカイラル対称性、カイラル相転移の新しい秩序変 数の探索、宇宙初期の高温プラズマの動的性質、中 性子星やクォーク星内部におけるカラー超伝導相の 有限温度相転移、相対論的重イオン衝突実験におけ るクォーク・グルオン・プラズマ信号としてのジェッ ト抑制などについての研究が主として行われた。

#### 1.1.1 原子核構造

#### 殻構造の進化と核力

上で述べたように原子核の殻構造は陽子数、中性 子数の変化とともに進化する。メカニズムには二つ あって、その2番目のものはテンソル力による事、そ れはスピン軌道力の消長のように見える事、などを 示したのが今年度の成果である。この効果により、殻 構造、ひいては原子核の構造が大きく変わる事があ る。炭素の原子核では中性子の 1d5/2軌道は2s1/2軌道よりも上にあるが、陽子数が2だけ多い酸素の 原子核ではその順番は逆転する。様々な原子核で起 こるこのような一粒子軌道の変化を統一的に説明す る事を可能とした。このテンソル力による殻進化は  $\pi$  及び  $\rho$  中間子の交換で定量的に説明できる事も示 した。殻進化の一つの表れとして、炭素の原子核の エキゾチックな構造を殻模型により統一的に解明し た。[3, 6, 45, 78, 79, 80, 106]

#### 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)簡単化さ れた模型による理解、(2)核力から出発した第一原 理的な方法、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記述が可能である。殻 模型によりそのような方法論が展開可能である。た だし、殻模型のハミルトニアンに含まれる核子間の 有効相互作用はまだ理論的に完成したものではなく、 多少の現象論的な補正も必要である。そのような自 由度まで含めて、殻模型は非常に軽いものを除いて ほとんど全ての原子核の構造の理解を与えるはずの ものと考えられている。そこで、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大行列の対角化をしなけれ ばならず、数値計算上の制約を受けている。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、また、適用可能な物理量の狭 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、有限量 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。咋年度からは科学研究費特別推進研究に も採択され、従来からの理化学研究所に加え、東京 大学原子核科学研究センターとも共同して、専用の 大規模並列計算機の運転を行っている。このように、 モンテカルロ殻模型を用いての核構造の解明を系統 的に進めている。具体的な成果は下に示されている。 [2, 4, 5, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 106]

中性子過剰核 Be、C 同位体におけるクラスター状態

BeやCといった中性子過剰核におけるクラスター 構造を分子軌道法を用いて分析した。特に、<sup>10</sup>Be核 と<sup>10</sup>C核のミラー対称性が破れ、それは主に非軸対 称変形の違いとなって現れる事を議論した。また、最 もエキゾチックなクラスター状態である3つの αク ラスターの直線配位を、そのまわりに中性子を運動 させることで準安定化させる試みを行った。また、こ のような配位が存在した場合、どのような新しい励 起モードが存在しうるかの提案を行った。

[33, 34, 35, 36, 37, 50, 52, 81, 93]

#### <sup>9</sup>Beの photodisintegration 断面積

<sup>9</sup>Be 原子核の光分解反応 ( ${}^{9}Be+\gamma \rightarrow \alpha+\alpha+n$ )を 微視的クラスター模型により計算した。この反応の 逆反応は、超新星爆発などの後におこる r-process と 呼ばれる重い元素を合成する過程の最初の部分で決 定的な重要性を持っているが、最近の実験により、そ の E1 遷移確率が、従来と2倍ほどずれた値である ことが示唆された。今回の理論計算により、この新 しい実験値が理論的に妥当なものである事が示され た。[8,51]

軽い中性子過剰核を計算する新しい理論的枠組の開発

反対称化分子動力学 (AMD) をさらに発展させ、軽 い原子核のクラスター構造をより定量的に計算する 新しい枠組みの開発を行った。この方法により、ク ラスター構造と中性子ハロー等弱結合系に現れる特 徴的な構造が同時に記述可能であることが示された。 また、この方法に解析接続の方法と組み合わせるこ とによって、励起状態である共鳴状態の寿命の計算 も可能であることが示された。[94]

#### Relativistic mean field theory of the nuclear many-body problem

Relativistic mean field (RMF) theories are phenomenological approaches to the study of the nuclear many-body problem. They describe nuclear systems in terms of pointlike nucleons interacting between themselves only by the exchange of virtual mesons, whose masses and couplings are fitted to reproduce experimental data. A connection of RMF phenomenologies with the underlying realistic Nucleon-Nucleon (NN) interaction has been investigated by using a microscopical method that allows to describe the bare NN potential in the medium. It has been found that the  $\sigma$ -meson, which is responsible for the attraction between nucleons in RMF interactions, carries a large contribution of the tensor term of the nuclear force. Along this line, it has also been found that the  $T = 1 \delta$ -meson, giving rise to isospin dependence, plays an important role and should be included in RMF theories.

Relativistic Hartree-Fock (RHF) calculations including one  $\pi$ -exchange have been carried out to investigate the  $\sigma \cdot \sigma \tau \cdot \tau$  interaction in RMF models. Results for single-particle levels in chains of isotones have shown that with the inclusion of the Fock term of the  $\pi$ -exchange, RMF models can reproduce the lowering of the neutron levels due to the neutron-proton interaction. However, this effect alone is too strong and this leads to study the cancellation with the tensor term of the  $\rho$ -meson exchange.[9, 10, 11, 53, 54]

# Systematic analysis of neutron-rich carbon isotopes

The structure of low-lying states of the carbon isotopes has been investigated using the improved version of the Antisymmetrized Molecular Dynamics (AMD) Multi-Slater Determinant model [12]. Systematic comparison of the calculated binding energies and r.m.s. radii with the experimental data is performed for even-even and even-odd <sup>12</sup>C-<sup>22</sup>C isotopes. The B(E2) values and the  $2^+_1$  excitation energies of the even-even isotopes are also calculated. The behaviour of the calculated quantities indicate the change from spherical to deformed structure at N = 8 and supports the assumption about the neutron magic number N = 16. The double projection method which is important for weakly bound systems is adopted for  ${}^{15}C$ . In this way the tail of the wave function can be described more properly.

#### 超重核領域における融合分裂機構

新しい超重元素の合成を目指して、重イオン融合 反応を用いた実験的研究が活発に行われているが、 この領域での反応理論を構築し、実験計画に有用な 情報を与えるが本研究の目標である。超重元素領域 を扱う際、標的核と入射核が接触した後、複合核の 形成と quasi-fission との競合過程は非常に重要であ り、本年度は特にこの段階の動力学的機構を解明す ることに重点を置いた。分裂片の質量分布および全 運動エネルギー分布を散逸揺動模型を用いて動力学 的に計算し、実験値と比較した。入射エネルギーの 違いによって質量対称分裂と質量非対称分裂が起こ る機構を、軌道計算により、原子核の形状を表すそ れそれのパラメーターの時間発展を詳細に解析する ことで解明した。また系による分裂片の質量分布の 様子の違いについても、ポテンシャルの表面の傾斜 の違いから軌道が影響を受けることを定量的に調べ、 その機構を明らかにした。分裂片の運動エネルギー 分布に関しては、大まかな傾向は再現できたが、さ らに詳細に解析するには、原子核の形状を表すパラ メーターの次元を増やし、分裂点での原子核の形状 を正確に記述しなければいけないことが分かった。 今後の課題である。理化学研究所で cold fusion 反応 という手法で 108 番元素、110 番元素、111 番元素 の合成に成功したが、このような反応を扱うために、 標的核と入射核が接触するまでの過程を詳細に取り 扱った。この過程で起こる入射核、標的核のおのお の動的な変形、および変形核の場合は回転を考慮し て、接触確率を計算した。このような効果は、最終 的な蒸発残留核断面積に大きく影響を与えるが、計 算値は実験値を1桁の範囲で再現した。

[38, 39, 40, 41]

#### 軽い不安定核における殻模型

軽い不安定核の性質を殻模型を用いて解析した。p 殻内の相互作用に中間子の交換に基づいた核力の特 徴を適切に取り込むことで、安定核領域と同時に中 性子過剰の不安定な原子核についてもその構造をよ く記述できることを示し、系統的に各物理量につい て詳しく調べた。[6,45] また、p 殻と sd 殻間のテン ソル相互作用についても着目し、炭素原子同位体に おけるエネルギー準位や遷移確率の特徴的な性質を 説明した。これらの結果は学位論文としてまとめた。 [45]

#### 修正された Gogny 相互作用と不安定核の殻構造

近年,不安定核における殻構造について,核力のス ピン・アイソスピン自由度が重要な役割を果たすこ とが明らかにされた.従来のGogny相互作用にはそ の自由度が正しく取り入れられていないことを指摘 し,具体的に酸素同位体やカルシウム同位体の殻構 造に着目して,Gogny相互作用を改善することを試 みた[95].

#### 相対論的平均場理論への δ 中間子の導入

相対論的に原子核を扱うための現象論的有効理論で あるRMF(相対論的平均場)理論において、G-matrix 計算から得られる有効核子・核子ポテンシャルとRMF 理論に現われるポテンシャルとを比較し、アイソベ クトルのスカラー中間子である $\delta$ 中間子の導入の必 要性を示し、 $\delta$ 中間子と $\sigma$ 中間子の質量と結合定数 を決定した。

[10, 11]

#### 多体経路積分法による有限温度原子核の研究

補助場を用いた経路積分によって記述された Perturbed Static Path Approximation (PSPA) を初め て原子核に適用し、有限温度における原子核の振舞 を分析した。超新星爆発による元素合成過程に必要な <sup>10</sup>Be、<sup>10</sup>Bの内部エネルギー、Gamow-Teller Strength (B(GT))を求め、温度 3MeV 以上で <sup>10</sup>Bの B(GT) が増加することが示された。[46, 96]

#### 1.1.2 ハドロン物理

#### 有限温度における格子上のハドロンスペクトル関数

非等方格子を用いた QCD シミュレーションから、 有限温度における中間子のスペクトル関数を最大エ ントロピー法を用いて引き出した。特に、カイラル 相転移点より高温側でも、幅の狭い集団励起が、チャ ンネルによらず存在する可能性を見出した。これは、 重イオン衝突実験で生成されるクォーク・グルオン・ プラズマのシグナルとなりうる。[42,82,83,84,85]

核媒質中での中間子とカイラル対称性

原子核や中性子星内部などの有限バリオン物質中 では、 $\pi$ 中間子をはじめとするさまざまな中間子が 真空中と異なる性質を持つ。特に、 $\pi$ 中間子対の共 鳴状態である $\sigma$ 中間子や $\rho$ 中間子に、媒質効果が大 きく作用し、しかもその作用はカイラル対称性の部 分的回復と関連したユニバーサルな関数(ランバー ト関数)で支配される事を示した。また、このよう な媒質効果と中間子原子核の存在との関連をカイラ ル摂動論の立場から考察した。[2, 1, 107]

格子 QCD 数値実験によるローパー共鳴状態の研究

核子と全く同じ量子数を持つ動径励起状態(ロ-パー共鳴) N'(1440) のような場合は、ハドロンの虚 時間2点相関関数の虚時間遠方での漸近的振る舞い からハドロンの質量を求めるという従来からの方法 では難しい。そこで最近、発展著しい最大エントロ ピー法を用いて、格子 QCD 数値計算によってもたら されたハドロンの虚時間2点相関関数から直接ハド ロンのスペクトル関数を導出することを試みた。ス ペクトル関数は、ハドロンの基底状態のみならず動 径励起状態の性質について多くの情報を得ることが できる。得られたスペクトル関数の解析により、ロー パー共鳴はクォーク3体の状態が支配的であること が判明した。また有限体積効果についても調べ、ロー パー共鳴が基底状態(核子)よりも有限体積効果に 非常に敏感であり、かなり広がりを持った状態であ ることを指摘した。[10,44,101,102]

格子 QCD 数値実験による中性子 崩壊定数の研究

中性子ベータ崩壊定数は実験でも高精度で測定さ れており、理論的にも非常に基礎的な物理量である。 しかしながら、格子 QCD 数値計算によって実験値 を長年再現することができなかった。今回、Domain Wall Fermion(DWF)の定式化を用いた格子 QCD 数 値実験を用いてその長年の問題を解決するに至った。 問題を解決する糸口は格子上での厳密な軸性ベクト ル対称性の維持と有限体積効果である。中性子ベー タ崩壊定数は軸性カレントを核子状態で挟んだ行列 要素として定義されることからも推察できるように、 軸性ベクトル対称性によりこの行列要素は繰り込み を受けない。DWF は格子上で厳密に軸性ベクトル 対称性を取り扱えるフェルミオン形式であり、厳密 な対称性を持たない他のフェルミオン形式のときに 直面する複雑な繰り込みの問題がなく、非常に精度 の良い計算が系統的に行える。第二点目は物理的に 重要な視点で、中性子ベータ崩壊定数がカイラル対 称性の自発的破れに伴う南部ゴールドストンボソン (パイオン)と直接結合する行列要素であることから

パイオンのコンプトン散乱長さよりも充分大きな物 理的な空間サイズを用いて数値実験をしなければ実 験値を再現できないはずである。この点を世界に先 駆けて指摘し、最終的に我々の数値計算によって、実 験値を数%の誤差の範囲内で再現できることを示し た。[61]

重いクォーコニウムの回折レプトン生成に対する摂 動論的 QCD を用いた研究

HERA(DESY)を中心に実験が行われている高エ ネルギーレプトン-核子回折散乱の研究を行った。今 回新しい改良点は散乱に寄与する J/ψ 光円錐波動関 数の1S成分のみを保証するための方法として、射影 演算子をコバリアントな枠組みから導入した点、さ らにこれまで理論的枠組みの欠点として残っていた クォークプロパゲータの off-shell 効果を取り込んだ 点にある。さらに今年度は上記のチャーモニウム生 成回折散乱過程における摂動論的アプローチを応用 して、高エネルギーニュートリノ-核子散乱から擬ス カラー粒子  $(\eta_c, \eta_b)$  を生成する過程を研究した。擬 スカラー中間子 ( $\eta_c$ ) 生成断面積はベクトル中間子  $(J/\psi)$ 生成断面積に比べ、約10倍大きくなること が分かった。このことは擬スカラー中間子の観測可 能性を示唆しており、更に重い nb 粒子観測への希望 を開くものである。

[11, 62, 63]

相対論的流体モデルに基づく高エネルギー重イオン 衝突反応の解析

相対論的流体モデルを用いて、重イオン衝突反応で 生成される高温核物質のサイズに関連のあるHBT半 径を求め、ブルックヘブン国立研究所の加速器RHIC とCERNの加速器SPSの衝突エネルギーおける時 空発展の違いを議論した。[4,6]

また、相対論的流体モデルに化学平衡凍結機構を 取り入れて、その物理量に対する影響を調べた。こ の機構が重イオン衝突反応において生成される高温 核物質の時空発展に重要な役割を果たすことを指摘 した。[7,64,90,108]

新たに (3+1) 次元相対論的流体モデルを拡張し hydro+jet モデルを構築した。非常に大きな横運動 量のパートン (ジェット)を顕に流体素片の中を通過 させ、そのジェットと流体の相互作用が物理量に与 える影響を調べた。RHICにおける対のジェットのう ち片方が消えてしまうという現象がこのモデルを用 いて初めて再現された。[5, 65, 91, 92]

数年後に実験が予定されている J-PARC(旧 JHF) での重イオン衝突実験において予想される現象につ いて、流体モデルの立場から議論を行った。[97] クォーク数正準集合による非閉じ込め相転移の記述

QCD において、クォーク数を固定した正準集合 が、熱力学的極限で中心対称性を失うメカニズムを 明らかにし、動的クォークが熱励起する系での非閉 じ込め相転移の指標を提案した。またその際、非閉 じ込め相転移の秩序変数を定義する問題と、有限密 度 QCD の符号問題とが、密接な関わりを持ってい ることを指摘した。[8]

臨界終点における  $\sigma$  チャンネルのスペクトル関数

カイラル相転移の臨界終点における  $\sigma$  チャンネル のスペクトル関数を求め、その性質を詳しく調べた。 特に、ゼロエネルギー近傍で、赤外発散の影響によっ て  $\sigma$  チャンネルの粒子的ピークが抑制されるという 機構を見出した。さらに具体的な観測量への効果を、 光子対放出過程に対して見積もった。その結果、放 出される光子対数は、赤外抑制機構によって、直感 的に期待されるよりも遥かに少ないことが分かった。 [3, 66, 67, 98, 99]

非閉じ込め相転移とカイラル相転移の関係

格子上での非摂動的な解析的手法を用いることに よって有効模型を構築し、有限温度カイラル相転移 がポリアコフループの振舞いに及ぼす影響を、定性 的且つ定量的に調べた。その結果、有効模型の範囲 内で、有限温度格子ゲージ理論の数値シミュレーショ ン結果を再現することに成功し、ポリアコフループ の振舞いがカイラル相転移からの影響を強く受けて いることを明らかにした。さらに随伴表現クォーク に付随するカイラル相転移に対しても、同様にポリ アコフループの振舞いとの関係を調べ、数値シミュ レーション結果を直感的に説明できる描像を提唱し た。[9, 23, 68]

カラー超伝導における有限温度での相転移現象と QCD 相図におけるストレンジクォーク質量の効果

2SC と CFL という 2 つの代表的秩序状態を、高密度から低密度まで統一的に記述することができる、 改良梯子近似シュウィンガー・ダイソン法という同じ土台の上で扱い、有限温度でのカラー超伝導の相転移現象を詳細かつ系統的に調べた。また、運動学的判定基準を用いて CFL から 2SC への非結合転移を調べ、相図におけるストレンジクォーク質量の果たす役割について明らかにした。カイラル極限ではCFL が 2SC を凌駕し、ストレンジクォーク質量の効果によってのみ 2SC が現れ得るという従来 NJL 等のモデルで得られている描像をより確実なものにした。また、 $m_s < 200$  MeV の時に、カイラル対称性が破れた QCD 真空が CFL 相へと相転移へ隔てず連続的につながってる可能性 (クォーク・ハドロン連続性) が強く示唆された。 [47, 100]

カラー超伝導の有限温度相転移における場の熱揺ら ぎの効果

低温高密度においてクォーク物質はカラー超伝導 状態にあると考えられている。このカラー超伝導の 有限温度における相転移をGinzburg-Landau 理論を もとに、場の熱揺らぎの効果を考慮に入れて調べた。 この相転移は平均場理論では2次転移を示すが、主 にカラーゲージ場の揺らぎによって相転移は1次に なること、また転移の大きさは低密度になるほど大 きくなることがわかった。

[48, 104]

有限温度密度 QCD における階層的カイラル相転移

カイラル相転移に対する新しい秩序変数を提案した。質量零 1 フレーバー QCD での例は  $\sigma \sim \bar{q}q, \pi \sim \bar{q}i\gamma_5q$ として  $\langle \sigma^2 - \pi^2 \rangle$  である。これは通常の秩序変数  $\langle \sigma \rangle$  と異り、 $Z_2$  離散対称性を持つ。この新しい秩序変数による有限温度密度 QCDの相図を調べるために、3 次元  $\Phi^6$ 有効理論を用いて、CJT ポテンシャルを  $\langle \sigma^2 - \pi^2 \rangle$  に対して評価した。その結果、QCD の 3 重臨界点近傍において非自明な準安定状態 ( $\langle \sigma \rangle = 0$  かつ  $\langle \sigma^2 - \pi^2 \rangle \neq 0$ ) が存在することが明らかになった。この状態は CJT ポテンシャルのフォック項によって引き起こされる。[49, 105]

<受賞>

 [1] 平野哲文、第4回核理論新人論文賞、核理論懇談会、 2002年9月15日。

<報文>

(原著論文)

- [2] M. Honma, T. Otsuka, B.A. Brown and T. Mizusaki : Effective interaction for pf-shell nuclei, Phys. Rev. C 65, 061301 (2002)
- [3] T. Otsuka : Shell, shape and spin/isospin structures of exotic nuclei, Prog. Theor. Phys. Suppl. 146, 6-15 (2002).
- [4] R.V.F. Janssens, B. Fornalb, P.F. Mantica, B.A. Brown, R. Broda, P. Bhattacharyya, M.P. Carpenter, M. Cinausero, P.J. Daly, A. D. Davies, T. Glasmacher, Z.W. Grabowski, D.E. Groh, M. Honma, F.G. Kondev, W. Krolas, T. Lauritsen, S.N. Liddick, S. Lunardi, N. Marginean, T. Mizusaki, D.J. Morrissey, A.C. Morton, W.F. Mueller, T. Otsuka, T. Pawlat, D. Seweryniak, H. Schatz, A. Stolz, S.L. Tabor, C.A. Ur, G. Viesti, I. Wiedenhover, and J. Wrzesiski : Structure of <sup>52,54</sup>Ti and shell closures in neutron-rich nuclei above <sup>48</sup>Ca, Phys. Lett. B 546, 55-62 (2002).

- [5] P.F. Mantica, A.C. Morton, B.A. Brown, A.D. Davies, T. Glasmacher, D.E. Groh, S.N. Liddick, D.J. Morrissey, W.F. Mueller, H. Schatz, A. Stolz, S. L. Tabor, M. Honma, M. Horoi, and T. Otsuka : β decay studies of the neutron-rich 56-58V isotopes" Phys. Rev. C 67, 014311 (2003)
- [6] T. Suzuki, R. Fujimoto and T. Otsuka : Gamov-Teller transitions and magnetic properties of nuclei and shell evolution, Phys. Rev. C 67, 044302 (2003)
- [7] S. Shimoura, A. Saito, T. Minemura, Y.U. Matsuyama, H. Baba, H. Akiyoshi, N. Aoi, T. Gomi, Y. Higurashi, K. Ieki, N. Imai, N. Iwasa, H. Iwasaki, S. Kanno, S. Kubono, M. Kunibu, S. Michimasa, T. Motobayashi, T. Nakamura, H. Sakurai, M. Serata, E. Takashita, S. Takeuchi, T. Teranishi, K. Ue, K, Yamada, Y. Yanagisawa, M. Ishihara, and N. Itagaki: Isomeric 0<sup>+</sup> state in <sup>12</sup>Be, Physics Letter B560 (2003) 31
- [8] N. Itagaki and K. Hagino: Low-energy photodisintegration of <sup>9</sup>Be with the molecular-orbit model, Physical Review C66 (2002) 057301
- [9] "Relativistic Hartree-Bogoliubov theory for finite nuclei", M. Serra and P. Ring, Phys. Rev. C65, 64324 (2002)
- [10] "Novel realistic origin of  $\sigma$  meson in nuclei and tensor force between nucleons", M. Serra, T. Otsuka, Y. Akaishi, P. Ring and S. Hirose, submitted.
- [11] "Field theoretical description of exchange terms in nuclear systems", M. Serra, T. Otsuka, Y. Akaishi, P. Ring and S. Hirose, to appear in Nuclear Physics, Section A.
- [12] N. Itagaki and S. Aoyama, Phys. Rev. C 61, 024303 (2000).
- [13] S. Hirenzaki, H. Nagahiro, T. Hatsuda, and T. Kunihiro, Formation of Sigma mesic Nuclei in (d, t)and  $(d, He^3)$  Reactions. Nucl. Phys. **A710**, 131-144 (2002).
- [14] K. Yokokawa, T. Hatsuda, A. Hayashigaki and T. Kunihiro, Simultaneous Softening of  $\sigma$  and  $\rho$ Mesons associated with Chiral Restoration. Phys. Rev. **C66**, 022201 (2002).
- [15] A. Hayashigaki, K. Suzuki, K. Tanaka : DIFFRACTIVE ETA(C) AND ETA(B) PRO-DUCTIONS BY NEUTRINOS VIA NEUTRAL CURRENTS, To appear in Phys.Rev.D, 2003 (already accepted)
- [16] T. Hirano, K. Morita, S. Muroya and C. Nonaka: Hydrodynamical analysis of hadronic spectra in the  $\sqrt{s_{NN}} = 130 \text{ GeV/nucleon Au+Au}$  collisions, Phys. Rev. **C65**, 061902 (2002).
- [17] T. Hirano and Y. Nara: Energy loss in high energy heavy ion collisions from the hydrodynamic and jet model, Phys. Rev. C66, 041901 (2002).
- [18] K. Morita, S. Muroya, C. Nonaka and T. Hirano: Comparison of space-time evolutions of hot, dense

matter in  $\sqrt{s_{NN}} = 17$  and 130 GeV relativistic heavy ion collisions based on a hydrodynamical model, Phys. Rev. **C66**, 054904 (2002).

- [19] T. Hirano and K. Tsuda: Collective flow and twopion correlations from a relativistic hydrodynamic model with early chemical freeze out, Phys. Rev. C66, 054905 (2002).
- [20] K. Fukushima, "Thermodynamic limit of the canonical partition function with respect to the quark number in QCD", Annals of Physics 304, 72 (2003).
- [21] K. Fukushima, "Spectral functions in the  $\sigma$  channel near the critical end point", Physical Review C67, 025203 (2003).
- [22] K. Fukushima, "Effects of chiral restoration on the behaviour of the Polyakov loop at strong coupling", Physics Letters B553, 38 (2003).
- [23] K. Fukushima, "Relation between the Polyakov loop and the chiral order parameter at strong coupling", hep-ph/0303225, 投稿中.
- (会議抄録)
- [24] T. Otsuka, N. Shimizu, T. Mizusaki and M. Honma : Microscopic realization of O(6) and E(5) symmetries, AIP Conference Proceedings 638, p.97 (2002).
- [25] T. Otsuka, Y. Utsuno, R. Fujimoto, B.A. Brown, M. Honma and T. Mizusaki : Frontiers and challenges of nuclear shell model, Eur. Phys. J. A 15, 151-155 (2002).
- [26] T. Otsuka : Tokyo-RIKEN shell model project, Nucl. Phys. A 704, 21-26 (2002).
- [27] Y. Utsuno, T. Otsuka, T. Mizusaki and M. Honma : Monte Carlo shell model calculation for unstable nuclei around N=20, Nucl. Phys. A 704, 50-59 (2002).
- [28] T. Suzuki and T. Otsuka : Shell structure of Be and Li isotopes studied by electroweak probes, Nucl. Phys. A 704, 79-87 (2002).
- [29] P. von Brentano, C. Friessner, R.V. Jolos, A.F. Lisetskiy, A. Schmidt, I. Schneider, N. Pietralla, T. Sebe and T. Otsuka : Low spin structure of odd-odd N=Z nuclei <sup>54</sup>Co and <sup>50</sup>Mn, Nucl. Phys. A 704, 115-123 (2002).
- [30] M. Honma, B.A. Brown, T. Mizusaki and T. Otsuka : Full pf-shell calculations with a new effective interaction, Nucl. Phys. A 704, 134-143 (2002).
- [31] T. Mizusaki, T. Otsuka, M. Honma and B.A. Brown : Normal and superdeformation in <sup>56</sup>Ni, Nucl. Phys. A 704, 190-199 (2002).
- [32] N. Shimizu, T. Otsuka, T. Mizusaki and M. Honma : Collective excitations of nuclei in the Monte-Carlo shell model, Nucl. Phys. A 704, 244-253 (2002).

- [33] N. Itagaki, K. Ikeda, S. Okabe, and T. Otsuka: "Exotic cluster shape in neutron-rich Be and C isotopes", Proc. of Int. Conf. YKIS, Supplement of Progress of Theoretical Physics No. 146 (2002) 207
- [34] N. Itagaki, T. Otsuka, S. Okabe, and K. Ikeda, "Exotic cluster structure in light neutron-rich nuclei": Proc. of Japan-Italy Conf. on Nuclear Reaction, published from World Scientific (2002)
- [35] N. Itagaki, T. Otsuka, S. Okabe, and K. Ikeda, "Exotic cluster structure in light neutron-rich nuclei": Proc. of Int. Conf. on Nuclear cluster from light exotic to superheavy nuclei, published from World Scientific (2002)
- [36] N. Itagaki, S. Okabe, K. Ikeda, and I Tanihata, "Molecular-orbital structure in neutron-rich Be and C isotopes", Proc. of Int. Conf. on RI Beam 2000, Euro. Phys. J A1339-07 (2002), 43
- [37] N. Itagaki, K. Ikeda, S. Okabe, and T. Otsuka: "Cluster structure in light neutron-rich nuclei", Proc. of Int. Conf. on ENAM 2001
- [38] Y. Aritomo and M. Ohta : Analysis of fusionfission process with neutron evaporation in superheavy mass region. Yedernaya Fizika. 66. (2003) 1-9.
- [39] Y. Aritomo and M. Ohta : Dynamical calculation of fusion-fission process with neutron evaporation in superheavy mass region. Heavy Ion Physics, to be publ.
- [40] M. Ohta and Y. Aritomo : An idea of prediction the evaporation residue cross section in superheavy mass region, Yedernaya Fizika. 66. (2003), to be publ.
- [41] M. Ohta and Y. Aritomo :On evaporation residue cross sections producing nuclai with Z=104-120. Heavy Ion Physics, to be publ
- [42] M. Asakawa, T. Hatsuda, and Y. Nakahara, Hadronic Spectral Functions above the QCD Phase Transition, in Proceedings of 20th International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2002), hep-lat/0208059.
- [43] S. Sasaki, K. Sasaki, T. Hatsuda and M. Asakawa: Bayesian approach to the first excited nucleon state in lattice QCD, in Proc. of 20th Int. Symp. on Lattice 2002. To be published in Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.).
- [44] S. Sasaki: Latest results from lattice QCD for the Roper resonance, in Proc. of Adelaide-Tokyo Joint workshop. To be published in Prog. Theor. Physics (Suppl.), nucl-th/0305041

(学位論文)

[45] R. Fujimoto: Shell-model description of light unstable nuclei, 博士論文.

- [46] A. Kobayakawa: Atomic Nuclei at Finite Temperature studied by Many-Body Path-Integral Methods, 修士論文.
- [47] H. Abuki : Color superconductivity in Schwinger-Dyson approach, 博士論文.
- [48] 松浦 妙子: 有限温度のカラー超伝導に対する揺らぎ の効果,修士論文.
- [49] 渡邊吉喜: 有限温度密度 QCD における階層的カイラ ル相転移,修士論文.

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [50] N. Itagaki, T. Otsuka, S. Okabe, and K. Ikeda: "Exotic Cluster Structure of Light Neutron-rich Nuclei", Int. Conf. CRIS 2002 (Catania, Italy)
- [51] N. Itagaki, K. Hagino, t. Otsuka, S. Okabe, and K. Ikeda: "Importance of Clustering in Light Neutron-rich Nuclei" Int. Conf. on Nuclear Physics in Astrophysics (Debrecen, Hangary)
- [52] N. Itagaki, T. Otsuka, S. Okabe, and K. Ikeda: "Exotic cluster structure in light neutron-rich nuclei", The Third Int. Conf. on Fisson and Properties of Neutron-rich Nuclei (Florica, USA).
- [53] M. Serra: Field theoretical description of exchange terms in nuclear systems, International Symposium on Physics of Unstable Nuclei (ISPUN02), November, 20-25, 2002 Ha Long Bay, Vietnam
- [54] M. Serra: Nucleon-Nucleon correlations from nucleon-meson couplings in relativistic man field calculations, Workshop on Effective Interactions in models for nuclear study, March, 10-11, 2003, KEK, Tsukuba, Japan
- [55] G. Thiamova : Systematic analysis of neutron-rich carbon isotopes Seminar delivered at ATOMKI, Debrecen, Hungary, March 6, 2003 Feb. 20-22, 2001, Seoul, Korea.
- [56] G. Thiamova : Systematic analysis of neutron-rich carbon isotopes
   Workshop on nucleon-nucleon interactions, Tsukuba, March 10-11, 2003.
- [57] Y. Aritomo and M. Ohta : Analysis of fusionfission process with neutron evaporation in superheavy mass region. ,VII International School Seminar on Heavy Ion Physics , May 27 - June 1, 2002, Dubna, Moscow Region, Russia.
- [58] Y. Aritomo and M. Ohta : Dynamical calculation of fusion-fission process with neutron evaporation in superheavy mass region. WE-Heraeus-Seminar Symposium on Nuclear Clusters, (Marburg, Hessen, Germany) 5-9 August 2002

- [59] Y. Aritomo and M. Ohta :Dynamical calculation for Synthesis of Superheavy Elements . International Symposium on New projects and lines of research in Nuclear Physics. October 24-26, 2002 Messina Italy.
- [60] Shoichi Sasaki for MELQCD Collaboration: Bayesian approach to the fisrt excited nucleon state in lattice QCD, The XX International Symposium on LATTICE FIELD THEORY (LAT-TICE 2002) June 24 - 29, 2002, MIT, Cambridge, MA USA
- [61] Shoichi Sasaki for RBC Collaboration: Nucleon structure from quenched lattice QCD with domain wall fermions The XVI International Conference on Particles and Nuclei (PaNic 2002) September 29 - October 4, 2002, Osaka, Japan
- [62] A. Hayashigaki, K. Suzuki, K. Tanaka : DIFFRACTIVE HEAVY PSEUDOSCALAR ME-SON PRODUCTIONS BY WEAK NEUTRAL CURRENTS, 15th International Spin Physics Symposium (SPIN 2002), Long Island, New York, 9-14 Sep. 2002
- [63] A. Hayashigaki, K. Suzuki, K. Tanaka : RE-DUCED FERMI-MOTION EFFECT BY KINE-MATICAL CORRECTIONS IN DIFFRACTIVE LEPTOPRODUCTION OF HEAVY QUARKO-NIUM, XVI Particles and Nuclei International Conference (PaNic02), Osaka, Japan, Sep. 30 -Oct. 4 2002
- [64] T. Hirano and K. Tsuda: Collective flow and HBT radii from a full 3D hydrodynamic model with early chemical freezeout, the 16th International Conference on Ultra-Relativistic Heavy Ion Collisions, Quark Matter 2002, Nantes, France, July 18-24, 2002.
- [65] T. Hirano and Y. Nara: Energy loss of partons traversing a QGP fluid, Particle and Nuclei international conference, PaNic 2002, Osaka, Japan, September 30-October 4, 2002.
- [66] K. Fukushima, "Spectral functions in the  $\sigma$  channel near the critical end point", NP02 International Workshop on Nuclear and Particle Physics at 50-GeV PS (Kyoto Univ., Kyoto, Japan, September 27-29, 2002).
- [67] K. Fukushima, "Spectral functions in the  $\sigma$  channel near the critical end point", The 7th APCTP Winter School (POSTECH, Pohang, Korea, January 21-24, 2003).
- [68] K. Fukushima, "Effects of chiral restoration on the behavior of the Polyakov loop", Tokyo-Adelaide Joint Workshop on Quarks, Astrophysics and Space physics (Univ. of Tokyo, Tokyo, Japan, January 6-10, 2003).
- [69] K. Yokokawa, T. Hatsuda, A. Hayashigaki and T. Kunihiro, Simultanoues softening of sigma and rho mesons associated with chiral restoration,

PaNic02, Sep.30-Oct.4, 2002 (Osaka International House, Osaka, Japan)

[70] K. Yokokawa, T. Hatsuda, A. Hayashigaki and T. Kunihiro, Simultanoues softening of sigma and rho mesons associated with chiral restoration, The 7th APCTP Winter School, Jan.21-24, 2003 (APCTP, Pohang, Kyungbuk, Korea)

#### 招待講演

- [71] T. Otsuka, Microscopic realization of O(6) and E(5) symmetries, Nuclear Structure Conference, Grand Teton, U.S.A., May 22-25, 2002.
- [72] T. Otsuka : Frontiers of Nuclear Shell Model, Conf. on Frontiers of Nuclear Structure, Berkeley, U.S.A., July 29 - August 2, 2002.
- [73] T. Otsuka : Shell Structures and Collectivities of Exotic Nuclei, 3rd International Balkan School on Nuclear Physics, Thessaloniki, Greece, Sep. 18-24, 2002.
- [74] T. Otsuka : Shell model results for exotic nuclei, Conf. on Nuclear Structure with Large Gamma -Arrays: Status & Perspectives, Padova, Italy, Sep. 23-27, 2002.
- [75] T. Otsuka and N. Shimizu : Large-scale shell model calculations for atomic nuclei and Alphleet project, Workshop on Large-Scale Computations in Nuclear Physics Using the QCDOC, Brookhaven, U.S.A., Sep. 26-28, 2002.
- [76] T. Otsuka : Shell-model analyses and predictions for gamma-ray spectroscopy, 2002 Fall Meeting of the Division of Nuclear Physics, East Lansing, U.S.A., Oct. 9-12, 2002.
- [77] T. Otsuka: Intruders in exotic nuclei and shell evolution, The Nuclear Many-Body System : Exploring the Limits, Gent, Belgium, Oct. 23-25, 2002.
- [78] T. Otsuka : Shell evolution in exotic nuclei, International Symposium on Frontiers of Collective Motions, Aizu, Japan, Nov. 6-9, 2002.
- [79] T. Otsuka : Shell Evolution : A Paradigm of Structure of Exotic Nuclei ?, Int. Symp. on Physics of Unstable Nuclei, Halong Bay, Vietnam, Nov. 20-25, 2002.
- [80] T. Otsuka : Evolution of Shell and Deformation in Exotic Nuclei, Workshop on Nuclear Structure at the Limits of Stability, Surrey, Great Britain, Jan. 9-11, 2003.
- [81] N. Itagaki, T. Otsuka, S. Okabe, and K. Ikeda: "Exotic cluster structure in light neutron-rich nuclei", Int. Conf. on Nuclear Structure (Rauischholzhausen, Germany)
- [82] T. Hatsuda : Hadronic Spectral Functions at Zero and Nonzero Temperature in Lattice QCD, QCD and Gauge Theory Dynamics in the RHIC Era, (KITP, Santa Barbara, USA, May, 2002).

- [83] M. Asakawa and T. Hatsuda : Hadronic Spectral Functions below and above the QCD Phase Transition, The XVI International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions, *Quark Matter 2002*, (Nantes, France, July 18-24, 2002).
- [84] T. Hatsuda : Hadronic Spectral Functions below and above the Deconfinement Phase Transition, XVI Particles and Nuclei International Conference, *PANIC02* (Osaka, Japan, Sep.30-Oct.4, Osaka, 2002).
- [85] T. Hatsuda : QCD spectral functions, YITP-RCNP International Workshop on Chiral Restoration in Nuclear Medium, (Kyoto, Japan, October 7-9, 2002).
- [86] Shoichi Sasaki: Physics of the Nucleon Excited States using Domain Wall Fermions in Lattice QCD ECT\* Workshop on THE PHYSICS OF THE ROPER RESONANCE April 10 - 12, 2002, ECT\*, Trento, Italy
- [87] Shoichi Sasaki: Latest results from lattice QCD for the Roper resonance Tokyo-Adelaide Joint Workshop on QUARKS, ASTROPHYSICS AND SPACE PHYSICS January 6 - 10, 2003, Hongo, Univ. of Tokyo, Japan
- [88] Shoichi Sasaki: Spectroscopy of baryon excited states from Lattice QCD USA-Japan Joint Workshop on NUCLEAR CHIRAL DYNAMICS February 18 - 22, 2003, Honolulu, Univ. of Hawaii, USA
- [89] Shoichi Sasaki: Numerical Calculations of Excited Baryon Masses in Lattice QCD International Symposium on HADRON SPECTROSCOPY, CHI-RAL SYMMETRY AND RELATIVISTIC DE-SCRIPTION OF BOUND SYSTEMS February 24 - 26, 2003, Ichigaya, Tokyo, Japan
- [90] T. Hirano: Elliptic flow and HBT radii from a relativistic hydrodynamic model with early chemical freeze out, Workshop on two-particle interferometry and elliptic flow at RHIC, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, U.S.A., June 14-15, 2002
- [91] T. Hirano: A dynamical approach to jet quenching in relativistic heavy ion collisions, CNS/RIKEN Joint International Workshop, Physics of QCD Many Body Systems, -Future perspective based upon RHIC-, RIKEN, Wako, Saitama, Japan, November 5-6, 2002
- [92] T. Hirano: Dynamical Parton Energy Loss in Relativistic Heavy Ion Collisions, Tokyo-Adelaide Joint Workshop on Quarks, Astrophysics and Space Physics, Univ. of Tokyo, Tokyo, Japan, January 6-10, 2003

(国内会議)

一般講演

[93] 板垣 直之: ドリップライン近傍 Be 同位体のクラス ター構造、日本物理学会 2002 年秋季大会 (立教大学)

- [94] 板垣 直之:C 同位体におけるアルファ・チェイン状態 の励起構造、日本物理学会第58回年次大会(東北学院大学)
- [95] 松尾利明, 大塚孝治:修正された Gogny 相互作用と 不安定核の殻構造, 日本物理学会第58回年次大会(東 北学院大学, 宮城県仙台市, 2003年3月).
- [96] 小早川彰、大塚孝治:多体経路積分法を用いた有限 温度原子核日本物理学会第58回年次会(東北学院大 学、宮城、2003年3月)
- [97] 平野哲文: Comment on Heavy-Ion Physics at JHF, From a Hydrodynamic Point of View, JHF での原 子核物理に関する理論研究会, (高エネルギー加速器 研究機構、2002 年 5 月)
- [98] 福嶋健二, "Comment on the diphoton emission from hot and dense matter", 第 2 回 JHF での原 子核物理に関する理論研究会 (KEK, つくば, 2002 年 5 月).
- [99] 福嶋健二, "Spectral functions in the σ channel near the critical end point", 日本物理学会第 58 回年次大 会 (東北学院大学, 宮城, 2003 年 3 月).
- [100] 阿武木啓朗、初田哲男:シュウィンガー・ダイソン 法に基づく有限温度におけるカラー超伝導-QCD相 図におけるストレンジクォーク質量の効果 - 原研研 究会「極限条件におけるハドロン科学」(原研、東海 村、2003 年 3 月)
- [101] 佐々木潔、佐々木勝一、初田哲男、浅川正之(京大) 最大エントロピー法を用いた格子 QCD 数値実験によ る核子励起状態の研究(II)日本物理学会 2002年 秋の年会(立教大学、池袋、2002年9月)
- [102] 佐々木潔、佐々木勝一、初田哲男、浅川正之(京大) 最大エントロピー法を用いた格子 QCD 数値実験に よる核子励起状態の研究(III)日本物理学会 2003 年春の年会(東北学院大学、仙台、2003年3月)
- [103] 横川一夫,初田哲男,林垣新,国広悌二:カイラル 対称性の回復に伴う 中間子と 中間子の同時ソフ ト化,日本物理学会秋季大会,(立教大学,東京,9月)
- [104] 松浦妙子、飯田圭、初田哲男、佐々木勝一、Gordon Baym: クォーク物質のカラー超伝導相転移:有限温 度におけるゆらぎの効果日本物理学会第58回年次会 (東北学院大学、宮城、2003年3月)
- [105] 渡邊吉喜、福嶋健二、初田哲男:有限温度密度 QCD における階層的カイラル相転移原研研究会「極限条 件におけるハドロン科学」(原研、東海村、2003年3 月)

招待講演

- [106] 大塚 孝治:原子核構造理論と元素合成、日本物理 学会第 58 回年次大会、(東北学院大学、2003年 3月).
- [107] 初田哲男:原子核におけるカイラル対称性と中間子 原子,日本物理学会第58回年次大会、(東北学院大 学、2003年3月).
- [108] 平野哲文: Collective Flow and HBT Radii from a Full 3D Relativistic Hydrodynamic Model, 日本物 理学会 秋季大会 (立教大学、2002 年 9 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を続けている。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 弦理論

超対称ゲージ理論と超弦理論

超対称ゲージ理論や超弦理論のモジュライ空間の 特異点付近では、ソリトンが質量零になるなど非摂 動論的効果が顕著に現れる。特に弦理論においては、 張力が零の弦が出現することがある。その実例とし て小弦 (little string) や E 弦 (E-string) といった非臨 界弦が発見されたが、これらの弦は基本弦 (F-string) やD1ブレイン (D-string) と異なり直接的な定式化が 与えられていないため、性質には未知の部分が多い。 E弦については円周にコンパクト化して BPS スペク トラムを調べる試みが部分的になされてきたが、江 口と酒井は最も一般にモジュライパラメータを入れた場合に対して、BPS分配関数を生成する Seiberg-Witten 曲線を構成した [1, 59, 118]。さらに江口と 酒井はこの Seiberg-Witten 曲線の幾何学的性質を詳 しく調べ、E 弦理論のモジュライパラメータの幾何 学的意味づけを明らかにした [79, 120]。また E 弦の Seiberg-Witten 曲線は様々な既知の Seiberg-Witten 曲線を特殊な場合として含むが、特にその効用とし てフレーバー数 4 の SU(2)  $\mathcal{N} = 2$  ゲージ理論の 電磁トライアリティが自然に導かれることを示した [82, 83, 119].

川野、岸本、大森は、最近、Berkovitz によって提唱された Pure Spinor を用いた超弦理論の明白なローレンツ共変性をもつ量子化への試みとその点粒子極限である  $\mathcal{N} = 4$ の Yang-Mills 理論の超場形式で書かれた作用を得る可能性を調べた。

小西は博士論文[68]において物質場が存在する場 合の4次元超対称SU(2)ゲージ理論のジオメトリッ ク・エンジニアリングを調べ、カラビ・ヤウ多様体 の種数ゼロの正則曲線の数の分布の漸近的な様子を 求めた。

曲がった背景上の弦理論と D-ブレーン

江口、菅原、山口は、先年度の江口、菅原の研究、 及び、下記の山口の研究を発展させて、特殊ホロノ ミー多様体上の超弦真空の系統的な研究を行った。 コニカルな特異性を持つ non-compact な特殊ホロノ ミー多様体は、特定の幾何学的構造( $SU(n), Sp(n), G_2, Spin(7)$ ホロノミーに対し、それぞれ、"Sasaki-Einstein", "tri-Sasakian", "nearly Kähler non-Kähler", "weak  $G_2$ ")を持つEinstein 多様体上のcone として 実現されることが知られている。これらの構造を持 つEinstein 均質空間に自然に対応する coset SCFT と $\mathcal{N} = 1$ 超対称 Liouville 理論からなる系("CFT cone")が、期待される数の超対称性を持つことを証 明し、非常に広いクラスの可解な超弦真空を得るこ とに成功した。こうした  $\mathcal{N} = 1$  SCFT に基づいた 超弦真空の構成は、これまであまり研究されて来な かったテーマである。更に、AdS/CFT 対応との関 係、模型の幾何学的解釈、特異性を解消する摂動項 と Ramond 基底状態の対応関係などについての考察 を行った [2]。

山口は、京大の杉山氏とともに例外ホロノミー多 様体の coset CFT による記述についての研究を行っ た。[48] 世界面の超対称性線形ディラトン系と coset CFT を組み合わせたモデルが、時空の超対称性を持 つための条件を求めた。このようなモデルに関して 分配関数が実際に消えることを示した。また世界面 上の対称性として例外ホロノミー特有の代数がここ で取り扱った系に存在していることを確かめた。

時間方向も曲がっていてかつ解ける弦理論はあま り良く知られていないが、その一つとして Melvin 背 景を時間方向も曲げて拡張したものが知られている。 これは時空の特異点を含む場合もあるが、その特異 点が弦理論的に解消されている可能性がありそれを 調べることは興味深い。そこで高柳(博)と高柳(匡) はその背景の弦理論的な性質を調べるためのプロー ブとして使うことができる D-brane を、boundary state の手法を用いて構成した。この brane 上の開弦 の立場から見ると、特異点がスムーズになっているよ うに見えることを確かめた。またこの背景は Penrose 極限で Nappi-Witten 背景になることが知られてい るが、D-brane 上の開弦スペクトルが Penrose 極限 で正しく Nappi-Witten 背景上のそれになることを 確かめた [40]。

高柳(匡)は博士論文として、Melvin 背景におけ る超弦理論を閉弦と開弦(D-brane のスペクトラム) の両方の立場で解析した [70]。

山口は、AdS のブレーンと defect をもつ CFT の 対応(AdS/dCFT 対応)についての研究を行った。 [49] defect 上の繰り込み群について AdS のブレーン の立場からの解析をおこない、defect 上の質量変形 に対応する繰り込み群の流れを記述するブレーンの 解を構成した。また AdS 側の理論で g 関数に当た るものを提案し、実際にこれが繰り込み群の流れに 対して単調減少であることを証明した。

疋田は D ブレーンと同様に重要な弦理論の高次元 の物体であるオリエンティフォールドの研究を行っ た。SU(2)/U(1)WZW 模型の例では、T 双対をうま く利用することで新しい種類のオリエンティフォー ルドを構成できることを示した。[16] また AdS<sub>3</sub> 空 間の例では、共形場理論の無矛盾条件を用いてオリ エンティフォールドを構成した。[17] 弦の場の理論

松尾は USC の Bars 氏と共同で開弦の場の理論の 研究を行った。まず弦の場の理論の基本的な問題点 として無限自由度の行列演算に伴う結合則の破れを 指摘し、この問題を回避できる正則化を提案した。 [31] 次にこの正則化を用いて弦の場の理論の非可換 幾何学的な定式化を行い、従来の作用素形式の定式 化と極限で一致していることを Neumann 行列の一 致などを通じて証明した。あからさまに結合則を満 たすような形で弦の場の理論が定式化されたのはこ れが最初である。[32]

岸本と松尾は USC の Bars 氏と共同で、この非可 換積を用いた弦の場の理論の定式化を用いて、任意 の摂動補正を閉じた形で導いた。従来弦理論の摂動 補正はリーマン面の正則形式の知識を用いて幾何学 的に導くしかなかったものであるが、弦の場の理論 を用いると少数の行列の組み合わせで代数的に書く ことが可能になった。[33] さらにこの定式化を使っ て、弦理論の非摂動論的な解を導いた。開弦の非摂 動論的な解はいろいろなブレーンの生成消滅に関係 する解であり、将来タキオン凝縮などについて厳密 な取り扱いを可能にするものであると思われる。[34]

岸本は奈良女大の高橋氏との共同研究において Witten の弦の場の理論の古典解の一つとして提案 されていた高橋-谷本の解のまわりの BRST 電荷を 調べ、摂動的な開弦の励起が消えていることを示し た [23]。これはタキオン凝縮解としてもつべき性質 の一つである。

開弦の場の理論においては、古くから \*-代数の単 位元 (identity string field) を用いた解の構成が議論 されてきた。岸本と大森は、弦の場の理論の共形場理 論による定式化を用いて identity string field を精確 に取り扱う方法について議論した。さらに、identity に基づいた古典解を構成することで VSFT 作用の導 出を試みた [24]。

大森は、開弦のタキオンが凝縮した後に残る安定な 真空を記述する理論(VSFT)の超弦の場合への拡張 について議論した。VSFTにおいては、\*-projector が D-braneを表す古典解であるということが議論さ れてきたが、Berkovitsによる超弦の場の理論ではこ れは pure gauge 解であり、D-braneには対応してい ないということを指摘した[36]。また、ghost 変数の みで書かれた kinetic operator の具体的な形を 1 つ 提案し、それがタキオン真空を記述するのにふさわ しい性質持っているということを示した[37]。

PP-wave 上の弦理論とホログラフィック・デュアリ ティー

近年、"PP-wave"と呼ばれるある種の重力平面波 背景上の弦理論が、AdS/CFT 対応の stringy level での解析の有力な手段として、また、曲がった時空 上の厳密に解ける超弦真空を与える新しい枠組みと して注目されている。

高柳(匡)は、寺嶋氏(アムステル大)とともに、 超対称性がより少ないPP-wave背景に対して弦理論 とゲージ理論の間の双対性が成り立つか調べるため に、PP-waveのオービフォールドを解析した。その 結果、N=2の超対称性ゲージ理論に対しては、特に twisted sectorと呼ばれる弦理論特有の状態について も対応がうまく成り立つことが分かった。[42]

今村は、PP-wave 背景上の弦の状態と 4 次元ゲージ理論の BPS にきわめて近いゲージ不変演算子の間の対応について弦の摂動論を用いて議論した。ゲージ理論における R-電荷が角運動量に対応していることと角運動量の保存則より、平坦な時空上で非常に大きい角運動量を持った 弦の状態が結合する D-ブレーン上のゲージ不変演算子は、非常に大きな R-電荷を持ったものであろうと予想される。今村は実際にこの振幅をゲージ結合定数や角運動量の逆数による展開の初項について計算することで、BMN 対応と呼ばれる演算子と弦の励起状態の間の対応が  $\mathcal{N} = 4$  の U(N) 理論 [21] および  $\mathcal{N} = 2$  の Sp(N) 理論 [22] について再現されることを示した。

疋田と菅原は、NSNS-flux のある場合における 6 次元の PP-wave/CFT 対応の研究を行った。Penrose 極限をうまく利用することで、PP-wave 上の超弦理 論の状態が、双対な共形場理論における少し BPS 条 件から外れた状態と対応していることを示した [18]。 また、4 次元の PP-wave と N=2 超対称共形場理論を 組み合わせることで、拡大した超対称性を持つ広い クラスの可解な超弦理論の真空を構成した。この超 弦真空は、時間方向も曲がっている超対称背景の非 自明なモデルとなっており、通常のカラビヤウ・コン パクト化と比較すると、fractional な  $U(1)_R$ -charge を持つセクターも物理的状態空間に寄与するという 点で興味深い [19]。疋田はこれらの結果を元に ppwave/CFT 対応のレビゥーを合わせて博士論文とし てまとめた。[66]

高柳(匡)は、PP-wave 背景の超弦理論の性質を 理解するために分配関数のモジュラー不変性を調べ た。さらにそれを利用して、PP-wave 背景において、 type0 理論と呼ばれるフェルミオンを全く含まない 弦理論のスペクトラムを決定し、ゲージ理論との双 対性を考察した。[43]

菅原は、様々な PP-wave 背景上の閉弦及び開弦 の thermal ensemble に対し、自由エネルギーの解 析を行った。世界面上の描像ではこれは torus 及び cylinder amplitude に対応する。DLCQ の立場で演 算子形式と経路積分の二つの方法で計算を実行し、 それらの間の等価性を確かめた。特に経路積分では、 モジュラー不変性、カーディ条件などがあからさま にチェックでき、その事実を利用して Hagedorn 的ふ るまいを調べた [38]。また、コンパクト化された PPwave に対しても同様の解析を行い、KK 運動量モー ドが decouple しているにも関わらず、モジュラー不 変な thermal amplitude が得られることを示した。 このモデルでは、ワインディング・モードが、DLCQ においては longitudinal な量子数に非自明に依存し、 更に non-DLCQ 極限においては、自由エネルギーに 寄与できないという、平坦な背景とは著しく異なっ た性質を持ち、大変興味深い[39]。

 $AdS_5 \times S^5$ 背景上には球面状に膨らんだ D3-brane が BPS ソリトンとして安定に存在することが知られ

ている。このD3-braneはAdS/CFT対応ではGravitonと等価であるためGiant Gravitonと呼ばれてい るが、これまでこの背景上の弦理論は厳密に解かれ ていないため、超重力理論の範囲内でのみ解析され てきた。高柳(博)と高柳(E)はGiant Gravitonの 弦理論的性質を調べるため、Type IIB maximal PPwave 背景上のGiant Gravitonの性質を調べた。特 に一部のGiant Gravitonは開弦の境界として扱え て、弦理論の観点からもBPSソリトンで安定である ことがわかった[41]。

疋田と山口は pp-wave 背景における D ブレーン の研究を行った。pp-wave 背景上の D ブレーンで時 空の超対称性が残る場合を調べ、D ブレーン上に端 を持つ弦の世界面上の理論において超対称性を保つ ような境界条件と比較した。その際、弦上の理論と して光錘ゲージでの Green-Schwarz 作用を用いた。 [20]

井手口は修士論文において、pp-wave 背景上の超 弦理論と超対称ヤン・ミルズ理論との間の双対性に 関する最近の発展についてまとめた [75]。

#### 非可換幾何,数理物理学

非可換空間上のゲージ理論は、背景磁場 (B場) 中 の D ブレインの有効理論として近年非常に精力的に 調べられた。特に非可換インスタントンは ADHM 構成法によって具体的に厳密に構成され、対応する D ブレインの性質についても理解が進んだ。これは 自己双対 Yang-Mills 方程式が非可換空間でも「解け る」すなわち「可積分である」ことを意味する。

浜中は富山県立大の戸田晃一氏と共同で、非可換 空間上のLax方程式(KdV, KP etc.)の生成法を提 唱し、様々な新しい非可換Lax方程式を見出すとと もに、Ward予想の非可換版にあたる次の予想を提 唱した:「非可換Lax方程式は可積分であり、4次元 非可換自己双対Yang-Mills方程式の次元還元によっ て得られるであろう。」これは可積分系研究の新しい 地平を切り開く可能性を秘めており、注目されてい る[85, 95, 139, 140]。弦理論との関わりも非常に興 味深い。

超弦理論の非摂動論的側面の理解には双対性が重要な鍵を握っている。浜中は東大数理の梶浦氏と共同で、超弦理論のT双対性のゲージ理論的取り扱いを考察し、D0-D2pブレイン系に対するT双対変換の厳密な定式化に成功した[14]。これはD0-D4ブレイン系に対するNahm変換と呼ばれるものの一般化になっており、数学的にも興味深い。

浜中はこれら一連の非可換空間上のソリトンとD ブレイン力学の研究について、博士論文にまとめた [65]。特に ADHM(N)構成法については、基礎から最 近の発展まで包括的レヴューとして [63] にまとめた。

小笠はn次元多様体の中で(n-2)次元部分多様体が 交叉しているときのようすを調べてある場合を決定 した。このような部分多様体の交叉の仕方の研究は 近い将来 D-braneの研究に役立つと期待される[35]。

### 1.2.2 高エネルギー現象論

#### 素粒子論的宇宙論,超対称統一模型

大気及び太陽ニュートリノの振動実験は、ニュー トリノに0.1-0.01 eV 程度の質量があること を示している。 この小さい質量は、シーソー機構に よれば、非常に大きな質量を持つ Majorana 粒子が 存在することを意味する。この重い Majorana 粒子 は高温の初期宇宙で大量に生成されたと考えられる。 これらの Majorana 粒子は崩壊する時にレプトン数 の非対称性を生む、このレプトン数非対称性は弱い 相互作用の非摂動論的効果によりバリオン数に移り 変わる。このようにして、宇宙のバリオン数とに トリノの質量は強い関係にある。柳田は、CERN の J. Ellis 氏、M. Raidal 氏らとともにこれらの関係に ついて一連の研究を行った [50] [51]。

 $LH_u$  flat direction を利用した Affleck-Dine leptogenesis は、観測される宇宙のバリオンの量と最も 軽いニュートリノの質量が直接関係づく興味深いバ リオン生成モデルの一つである。このモデルは、有 限温度効果を取りいれることで、宇宙の熱史にほぼ 無関係に必要とされるニュートリノの質量が予言さ れる。藤井、濱口、柳田はこの事実をもとに  $0\nu\beta\beta$  崩 壊率に関する予言をまとめ、将来の実験計画につい て検証可能なことを示した [3]。

Affleck-Dine baryogenesis は超対称標準模型の中 に存在する flat direction における scalar 場の運動を 利用したバリオン生成機構である。この scalar 場は振 動開始後まもなく Q-ball と呼ばれる non-topological soliton になることが分かっている。この Q-ball が 非常に低い温度で崩壊することが、安定な LSP を 過剰に生成し宇宙を overclose する問題が指摘され てきていた。藤井、濱口は通常は暗黒物質とは考え られていない higgsino あるいは wino が LSP の場 合には、この overclose の問題を解決すると同時に、 必要とされる暗黒物質を自然に説明することを明ら かにした [4]。また、いくつかの主要な超対称性の破 れのモデルにおいて、このモデルが暗黒物質を説明 可能な parameter space を選びだし、そこでの直接 検出実験、mono-energetic な photon を利用した間 接検出実験の可能性について議論し、近い将来に十 分検出可能なことを明らかにした。

藤井、濱口の研究は、Affleck-Dine baryogenesis が 宇宙のバリオンと暗黒物質を同時に生成可能なことを 明らかにしたが、藤井、柳田はある種の Affleck-Dine モデルにおいては、この二つの量が実際直接関係づ けられることを発見した [5]。このモデルでは、バリ オンと暗黒物質量は共に inflation の再加熱温度など の初期宇宙を記述する高エネルギーの parameter と 独立に決定できる。この二つの物質量の比は squark の質量と LSP の対消滅断面積で記述できるのだが、 典型的な squark の質量において higgsino あるい は wino が LSP の場合には、予言されるバリオン と暗黒物質の量の比が観測を非常に良く説明し、バ リオンと暗黒物質の量がなぜ同程度であるかという coincidence 問題に一つの解を与えた。

gauge-mediation モデルは FCNC や SUSY CP

問題を美しく解決する超対称性の破れの機構である。 この class のモデルは gravitino LSP を予言するが、 gravitino が宇宙を overclose しない為に inflation の 再加熱温度には厳しい上限が存在し、可能なバリオン 生成機構を制限すると同時に不自然な微調整を要求し ていた。また、LSP である gravitino で暗黒物質を説 明するにも inflation の再加熱温度に微調整が必要で あった。藤井、柳田は  $\mu$ -term 程度の超対称質量項を もった extra matter が存在すれば、AD baryogenesis によりバリオン数と暗黒物質を inflation モデルには 依らずに同時に説明可能なことを示した [6]。このモ デルでは、バリオン数と暗黒物質の量の間に低エネ ルギーの物理量による関係式が存在する。

藤井、柳田は direct type の gauge-mediation モ デルにおいて、宇宙項をキャンセルする為に必然的に 要求される R-symmetry の破れを利用することで、 gravitino 問題を解決すると同時に、inflation の再加 熱温度とは全く無関係に暗黒物質が自然に gravitino で説明可能なことを明らかにした [7]。R-symmetry の破れは、SUSY-breaking sector から Standard model sector に超対称性の破れを伝える働きをする messenger 粒子が低い温度で崩壊することを予言し、この際 の entropy production が gravitino を暗黒物質とし て適当な量まで薄める働きをする。このモデルでは、 gravitino 問題に由来していた inflation の再加熱温度 の上限が消えることにより、標準的な thermal leptogenesis が自然に働くことできる。これは、超対称理 論の中で gravitino 問題無しに thermal leptogenesis が働く初めてのモデルである。

HEIDELBERG-MOSKOWグループは、2重ベータ崩壊の兆候を世界ではじめて捉えた。植原は、この2重ベータ崩壊をRパリティの破れで説明することが可能か否かを調べた。結果、K中間子の振動からくる制限が厳しいために、Rパリティの破れを世代に依存する形にする必要があり、また、第1世代のある特定のカップリングにより2重ベータ崩壊が説明できることを明確にした。[44]

鈴木は、博士論文においてノースケール型超対称 モデルを現象論的視点から詳細に研究した。特に、 このモデルではヒッグス場の質量の下限値(実験値) とLSPが電気的に中性であるという宇宙論的要請 が両立しない問題があることに着目し、標準模型の U(1)<sub>B-L</sub>対称性がゲージ化されている模型の性質を 解析した[69]。

伊部は、修士論文において、超対称性を持つ統一 理論についてまとめた。前半では種々の統一理論に おける陽子崩壊からの制限について調べ、後半では 特に4次元時空中での直積群を用いた統一模型にお ける陽子崩壊の解析を行なった。その結果そのモデ ルにおける陽子寿命の上限を得た[74]。

高次元モデル,ブレーンワールド

ニュートリノ振動の解析は、クォークセクターと は異なり、1-2世代間、2-3世代間が大角度混合を起 こしていることを示唆している。一方で、1-3世代間 の混合は小さい。この特殊な構造は、1つ余分な仮 定を導入することにより、デモクラティック仮説に よってうまく説明されることが知られている。渡利、 柳田は、デモクラティック構造と上記余分な仮定が、 いかにして自然に導かれるかを、高次元超対称時空 を仮定した模型で説明した [47]。

強い相互作用におけるCP問題の素直な解決が Pecci-Quinn(PQ)対称性のもとで得られることは、 よく知られている。しかしながらPQ対称性は、あ らわに破れた大局的対称性であるため、その存在に は必然性がなく、特に重力の量子効果を考慮すると 要請としては置きにくい。福永と井沢は、高次元の warped QCDを考えて、色つきのフェルミオンが余 次元方向に分離した、比較的ありふれた状況が実現 されていると、以前に考察したflatな場合と同じく 自然に、PQ対称性が帰結として現れ、結果的にC P問題の解決が内包された4次元のQCDが得られ ることを示した [13]。

小林(京大)、丸、吉岡(東北大)は、高次元バルク 中で超対称性が破れる機構を低エネルギー有効理論 で再現しうる4次元直積群を持つゲージ理論を構成 した。Dilaton/Moduli dominated SUSY breaking, Radion mediated SUSY breakingと呼ばれる高次元 特有のシナリオがモジュライ場のF項の真空期待値 の空間の様々な極限に対応していることを明らかにし た。実際に、tree level のゲージーノ質量を陽に計算 してこの対応関係が成立していることを示した[25]。

波場 (三重大)、丸は、5次元超対称理論中にドメ インウォールを考え、その上にゲージ多重項が平坦 に広がり、物質場はドメインウォールによってダイナ ミカルに局在しているセットアップを考えた。まず ヒッグスが wall 上の brane に局在しているとして、 フェルミオンの質量階層性をオーダーレベルで生成 する物質場の非常に単純な配位を3タイプ見つけた。 次に、SUSY breaking VEV を持つ場が局在するブ レーンを導入し、上で見つけた物質場の配位に対す るスフェルミオンの質量スペクトルを調べた。その ブレーンが1世代と2世代の間に局在しているとき は、1,2世代が10TeV、3世代が100GeVのデカプリ ングスペクトルになり、ヒッグス場が物質場から離 れたところに局在すると、no scale 型スペクトルに なることがわかった [26, 27]。

安倍 (広島大)、小林 (京大)、丸、吉岡 (東北大) は、 余次元が曲がった高次元理論を低エネルギーで再現 する4次元直積群ゲージ理論を構成した。例として、 5次元 (超対称) Randall-Sundrum モデルが4次元平 坦な(超対称) 直積群ゲージ理論の特別な極限として 構成できることを示した。様々なバルク場の質量ス ペクトル、波動関数の局在の性質が4次元理論にお いても再現することを示した。また、この4次元理 論はゼロ質量ゲージ場の局在機構を与えた。現象論 への応用として、湯川階層性が波動関数の重なり積 分で生成されることを定性的に議論した [28]。

衛藤(東工大)、坂井(東工大)、丸、佐方(東工大) は、場の空間に巻きつき数を許す厳密な BPSドメイ ンウォールの古典解を4次元超重力理論に結合する sine-Gordon モデルで見つけた。ブレーン境界上に 宇宙項を導入することによって、巻きつき数のある もの、ないものの複数のドメインウォール非 BPS 解 を構成する方法を与え、数値解を陽に示した。重力 が弱い場合の近似解析解を求め、重力を切ったとき に大局的超対称理論での非 BPS 解が再現できること を示した [29]。

波場 (三重大)、丸、中村 (名大) は、高次元理論に おけるフェルミオン質量階層性とスフェルミオンの スペクトルを研究した。[26], [27] と同じセットアッ プで、オーダー1の係数まで含めて実験データに合 うフェルミオン質量階層性とその混合角を導出した。 一方、スクォークの質量スペクトルはデカップリン グ解を出し、同時にスレプトンセクターでオーダー 1の第2、3世代の混合角が出るような物質場の配 位を見つけた。またその配位から十分大きなミュー オン異常磁気モーメントがレプトンフレーバーの破 れの拘束条件を満たしつつ、生成されることがわかっ た [30]。

早川は昨年度に引き続き、五次元時空に brane と 質量ゼロのスカラー場を導入することで、四次元の 宇宙項を理論の積分定数とするモデルについて、様々 な角度から検証と解析を行なった。その結果、4次 元の宇宙項をゼロにするためにラグランジアンパラ メータの fine tuning は必要ないことが明確になっ た。またこのモデルは negative tension brane を導 入していて、更に orbifolding をしていないにもかか わらず、安定であることが解析から分かった。

早川は白水氏と井田氏 (Tokyo Inst. Tech)、田中 氏 (Kyoto U., FIHS) と共に六次元時空中の 3-brane 上の重力理論を調べた。この結果、低エネルギーで は Einstein 重力が補正項を含んだ形で実現すること が分かった [15]。

時空が4次元以上だとして階層性問題を解決する 理論において、植原は様々な実験事実から導かれる 「基本スケール」についての制限をまとめた。結果、 天体物理学からくる制限が非常に厳しく、余次元の 数が3以下だともはや高次元理論は階層性問題を説 明できないことを明確にした。[45]

将来建設が予定されている線形加速器において、 高次元物理は重力子の共鳴状態の生成を予言する。 植原は、小田切(KEK)、淺川(ICEPP、KEK)と 共に、どのようなシグナルが重力子生成を見るのに 用いられるかを考え、それから重力子のスピンを測 定する手法についてまとめた。[46]

#### 1.2.3 場の理論

#### 格子ゲージ理論

藤川は、昨年に引き続き、格子ゲージ理論におけ るフェルミ粒子の扱いの進展に伴った研究を行った。 特にカイラルな理論を最近のフェルミ粒子の定式化 に従って扱うと、CP対称性を自明な形では定式化で きないことを一般的に示し[8]、さらにこの破れがカ イラルなフェルミ粒子の量子化においてどのような 効果を出すかの詳細な研究を行った[9]。さらに、関 連した問題として超対称性を格子上で定義するとき に問題となる Leibniz 則の破れに伴う問題点および それをいかに解決するかという問題を Wess-Zumino 模型をもとに考察した [10]。 一般に理論が有限で あれば、Leibniz 則の破れは連続極限では解消される ことを、2次元の有限な理論において具体的に示し た [11]。CPの破れに関しては、domain wall 型の格 子上のフェルミ粒子においても存在すること、およ びこの定式化に基づくカイラルな理論は位相的な性 質を局所性を満たす形では実現できないことを示し た [12]。

#### 場の理論の基礎的な考察

藤川は、P. Nieuwenhuizen 氏 (YITP, Stony Brook) と共同して、2次元の超対称性に現れる中心拡大に 対する量子異常およびより一般の超共形量子異常の 経路積分に基づく定式化を与えた。さらに、藤川は R. Shrock 氏と共同して、ニュートリノの電磁的な 性質に関する一般的な考察を行った。

西川は、標準理論の各素粒子対の2体問題を、ス ピンを無視する近似のもとで研究した。ポテンシャ  $\nu \phi(r)$  つき Klein-Gordon 方程式の固有関数 R(r) は 自由場項が有界で、今度はこれが新しい力  $\propto -\nabla R$ を生む…とき、可能な冪を分類すると、長距離極限 で定理

- 支配的な逆2乗力を感じるボソンは、逆2乗力を 生めない。
- もし重力が支配的でなければ、湯川型の短距離力の電荷をもつボソンは、長距離力の電荷を併せ 持つか、(換算)質量0である。

が示せる [58][64][113]。 $\nu$  に適用できれば、 $SU(2)_L \times U(1)$ の統一が必然的に示せて興味深い。つぎに Higgs 機構の起源に漸近展開の縮退を提案した。真空の相転移と異なり、2体問題でもなりたつ。さらに西川は、積分定数項 a + b/rを重力と再定義してみた。K-G 方程式にはその2乗が現れる。 $b \propto M_X + M_Y$ として換算質量でスケールすれば1次項は Newton項を生じ、かつ質量0光子も重力を感じる。2次項は Schwarzschild 補正になる。平坦時空でも重力が扱えて、blackhole 解はない。

<報文>

#### (原著論文)

- T. Eguchi and K. Sakai, "Seiberg–Witten Curve for the E-String Theory," JHEP 0205 (2002) 058.
- [2] T. Eguchi, Y. Sugawara and S. Yamaguchi, "Supercoset CFT's for String Theories on Noncompact Special Holonomy Manifolds," Nucl.Phys. B657 (2003) 3-52.
- [3] M. Fujii, K. Hamaguchi and T. Yanagida, Phys. Lett. B 538, 107 (2002).
- [4] M. Fujii and K. Hamaguchi, Phys. Rev. D 66, 083501 (2002).
- [5] M. Fujii and T. Yanagida, Phys. Lett. B 542, 80 (2002).

- [6] M. Fujii and T. Yanagida, Phys. Rev. D 66, 123515 (2002).
- [7] M. Fujii and T. Yanagida, Phys. Lett. B 549, 273 (2002).
- [8] K. Fujikawa, M. Ishibashi and H. Suzuki: " Ginsparg-Wilson operators and a no-go theorem ", Phys. Lett., B538 (2002) 197.
- [9] K. Fujikawa, M. Ishibashi and H. Suzuki: "CP breaking in lattice chiral gauge theories", JHEP04(2002)046.
- [10] K. Fujikawa: "Supersymmetry on the lattice and the Leibniz rule", Nucl. Phys. B636(2002) 80.
- [11] K. Fujikawa: "N=2 Wess-Zumino model on the d=2 Euclidean lattice", Phys. Rev. D66 (2002) 074510.
- [12] K. Fujikawa and H. Suzuki: "Domain wall fermion and CP symmetry breaking", Phys, Rev. D (2003)
- [13] A. Fukunaga and K.-I. Izawa: "Warped QCD without the Strong CP Problem", Phys. Lett. B (2003), in press.
- [14] M. Hamanaka and H. Kajiura, "Gauge Fields on Tori and T-duality," Phys. Lett. B 551 (2003) 360-368.
- [15] S. Hayakawa, D. Ida, T. Shiromizu and T. Tanaka, "Gravitation In The Codimension Two Brane World," Prog. Theor. Phys. Suppl. 148, 128 (2002).
- [16] Y. Hikida, "Orientifolds of SU(2)/U(1) WZW models", JHEP 0211, 035 (2002).
- [17] Y. Hikida, "Crosscap states for orientifolds of euclidean AdS<sub>3</sub>", JHEP **0205**, 021 (2002).
- [18] Y. Hikida and Y. Sugawara, "Superstrings on PP-wave backgrounds and symmetric orbifolds", JHEP 0206, 037 (2002).
- [19] Y. Hikida and Y. Sugawara, "Superstring vacua of 4-dimensional pp-waves with enhanced supersymmetry", JHEP 0210, 067 (2002).
- [20] Y. Hikida and S. Yamaguchi, "D-branes in ppwaves and massive theories on worldsheet with boundary," JHEP 0301 (2003) 072.
- [21] Y. Imamura: "Large angular momentum closed strings colliding with D-branes' ', JHEP 0206 (2002) 005.
- [22] Y. Imamura: "Open string BMN operator correspondence in the weak coupling regime", Prog.Theor.Phys. 108 (2003) 1077.
- [23] I. Kishimoto and T. Takahashi, "Open string field theory around universal solutions," Prog. Theor. Phys. 108, 591 (2002)
- [24] I. Kishimoto and K. Ohmori, "CFT Description of Identity String Field: Toward Derivation of the VSFT Action," JHEP 0205 (2002) 036.

- [25] T. Kobayashi, N. Maru and K. Yoshioka, "4D construction of bulk supersymmetry breaking," arXiv:hep-ph/0110117, Euro. Phys. Jour. C, in press.
- [26] N. Haba and N. Maru, "Decoupling solution to SUSY flavor problem via extra dimensions," Mod. Phys. Lett. A 17, 2341 (2002)
- [27] N. Haba and N. Maru, "(S)fermion masses in fat brane scenario," Phys. Rev. D 66, 055005 (2002)
- [28] H. Abe, T. Kobayashi, N. Maru and K. Yoshioka, "Field localization in warped gauge theories," Phys. Rev. D 67, 045019 (2003)
- [29] M. Eto, N. Maru, N. Sakai and T. Sakata, "Exactly solved BPS wall and winding number in N = 1 supergravity," Phys. Lett. B 553, 87 (2003)
- [30] N. Haba, N. Maru and N. Nakamura, "Decoupling and lepton flavor violation in extra dimensional theory," Phys. Lett. B 557, 240 (2003)
- [31] I. Bars and Y. Matsuo, "Associativity anomaly in string field theory," Phys. Rev. D 65 (2002) 126006
- [32] I. Bars and Y. Matsuo, Phys. Rev. D 66 (2002) 066003
- [33] I. Bars, I. Kishimoto and Y. Matsuo, "String amplitudes from Moyal string field theory," Phys. Rev. D 67 (2003) 066002
- [34] I. Bars, I. Kishimoto and Y. Matsuo, "Analytic study of nonperturbative solutions in open string field theory," arXiv:hep-th/0302151, accepted for publication by Phys. Rev. D.
- [35] E. Ogasa, "The intersection of spheres in a sphere and a new geometric meaning of the Arf invariants," Journal of knot theory and its ramifications, 11(2002) 1211-1231.
- [36] K. Ohmori, "Comments on Solutions of Vacuum Superstring Field Theory," JHEP 0204 (2002) 059.
- [37] K. Ohmori, "On Ghost Structure of Vacuum Superstring Field Theory," Nucl. Phys. B648 (2003) 94-130.
- [38] Y. Sugawara, "Thermal amplitudes in DLCQ superstrings on pp-waves," Nucl. Phys. B650 (2003) 75-113
- [39] Y. Sugawara, "Thermal partition function of superstring on compactified pp-wave," arXiv:hepth/0301035. Nucl. Phys. B, in press.
- [40] H. Takayanagi and T. Takayanagi, "Open strings in exactly solvable model of curved space-time and pp-wave limit," JHEP 0205 (2002) 012.
- [41] H. Takayanagi and T. Takayanagi, "Notes on giant gravitons on pp-waves," JHEP **0212** (2002) 018.
- [42] T. Takayanagi and S. Terashima, "Strings on orbifolded pp-waves," JHEP 0206 (2002) 036.
- [43] T. Takayanagi, "Modular invariance of strings on pp-waves with RR-flux," JHEP 0212 (2002) 022.

- [44] Y. Uehara, "Neutrinoless double beta decay with R-parity violation," Phys. Lett. B 537, 256 (2002)
- [45] Y. Uehara, "A mini-review of constraints on extra dimensions," Mod. Phys. Lett. A 17, 1551 (2002)
- [46] E. Asakawa, K. Odagiri and Y. Uehara, "Measuring the spin of invisible massive graviton excitations at future linear colliders," JHEP 0301, 062 (2003)
- [47] T. Watari and T. Yanagida, "Geometric origin of large lepton mixing in a higher dimensional spacetime," Phys. Lett. B 544 (2002) 167
- [48] K. Sugiyama and S. Yamaguchi, "Coset construction of noncompact Spin(7) and G<sub>2</sub> CFTs," Phys. Lett. B 538 (2002) 173.
- [49] S. Yamaguchi, "Holographic RG flow on the defect and g-theorem," JHEP **0210** (2002) 002.
- [50] J.R. Ellis, M. Raidal and T. Yanagida: "Observable Consequences of Partially Degenerate Leptogenesis", Phys. Lett. B 546 (2002) 228.
- [51] P. Frampton, S. L. Glashow and T. Yanagida: "Cosmological Sign of Neutrino CP Violation", Phys. Lett. B 548 (2002) 119.

#### (会議抄録)

- [52] K. Fujikawa: "Lattice chiral symmetry, CP invariance and Majorana fermions": Proceedings of International Conference in Theoretical Physics in Paris, TH2002, edited by H. Iagonitzer and J. Zinn-Justin (in press).
- [53] 浜中 真志, "D0-D4 ブレイン系のゲージ理論的解析," 基研研究会「場の量子論 2002」研究会報告,素粒子 論研究 106-3 (2002-12) C86.
- [54] 戸田 晃一,浜中 真志, "A Construction of Soliton Equations on Non-commutative Spaces,"研究集会 「非線形波動および非線形力学系に関する最近の話題」 研究会報告 (2003) 掲載予定.
- [55] 疋田 泰章, "Superstrings on PP-wave backgrounds and symmetric orbifolds", 基研研究会「場の理論 2002」研究会報告,素粒子論研究.
- [56] 岸本 功, "Open String Field Theory around Universal Solutions," 基研研究会「場の理論 2002」研 究会報告,素粒子論研究, 106-3 (2002-12) C-81.
- [57] 岸本 功, "Moyal formulation of String Field Theory," 基研研究会「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)
- [58] M. Nishikawa, "Alternative to Higgs and Unification", proceedings of the 12th Workshop on General Relativity and Gravitation, University of Tokyo, Tokyo, Japan, November 2002.
- [59] 酒井 一博: "Seiberg-Witten Curve for the *E*-String Theory", 基研研究会「場の量子論 2002」研究会報 告,素粒子論研究 106-3 (2002-12) C90
- [60] 鈴木 功至郎, "Investigation of no-scale supersymmetry breaking models with a gauged U(1)<sub>B-L</sub> symmetry", 日本物理学会(於立教大学、2002年9月)概要集

- [61] 高柳 博充, "Open strings in exactly solvable model of curved spacetime," 基研研究会 「場の量子論 2002」研究会報告,素粒子論研究 **106-3** (2002) C72.
- [62] 高柳 博充, "Notes on Giant Gravitons on PPwaves," 基研研究会「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).

#### (国内雑誌)

- [63] 浜中 真志, "ADHM/Nahm 構成法とその双対性,"素 粒子論研究 106-1 (2002-10) 1-60.
- [64] 西川 美幸,「繰り込みと真性特異点」,素粒子論研 究 105-4(2002)118; 106-5(2003)110.

#### (学位論文)

- [65] M. Hamanaka, "Noncommutative Solitons and Dbranes,"
- [66] Y. Hikida, "Superstrings on NSNS pp-waves and their CFT duals".
- [67] M. Ishibashi, "CP symmetry and lattice chiral gauge theories".
- [68] Y. Konishi, "Geometric Engineering of N=2 SU(2) Gauge Theory with Massive Matter Fields"
- [69] K. Suzuki, "Phenomenological analysis of no-scale supersymmetry breaking models"
- [70] T. Takayanagi, "Superstring Theory in Melvin Background".
- [71] T. Uesugi, "Worldsheet description of tachyon condensation in open string theory".
- [72] T. Watari, "Product-group Unification and its Extension to Higher Dimensional Spacetime."

#### (修士論文)

- [73] 福永 顕人、"強い CP 問題と曲がった高次元"
- [74] 伊部 昌宏,"直積群による統一理論と陽子崩壊"
- [75] 井手口 恒太, "pp-wave 背景上の弦理論と超対称ゲー ジ理論"
- [76] 西山 知宏, "pure spinor による super Poincare covariant な量子化への展望"
- [77] 清水 寿顕, "Superstring and M Theory on a Manifold with G<sub>2</sub> Holonomy"

#### <学術講演>

#### (国際会議)

一般講演

[78] T. Watari, "Three Family Structure from Supersymmetric Higher Dimensions," SUSY 2002 at DESY, June 2002.

#### 招待講演

[79] 江口 徹: "Seiberg-Witten curve for E-string theory", JAMI conference, John's Hopkins University, 3/16-19/2002

- [80] 江口 徹: "String compactification on manifolds with special holonomy", Theoretical Physics 2002 (TH-2002), Paris, 7/22-26/2002
- [81] 江口 徹: "CFT analysis of the geometry of  $G_2$  manifolds", 8/12-15/2002, String Theory conference at inauguration of Center of Mathematical Science, Zhejiang University, China
- [82] 江口 徹: "Seiberg-Witten curve for E-string theory", 8/17-19/2002, satelite meeting of ICM2002, Institute for Theoretical Physics, Beijing, China
- [83] 江口 徹: "Seiberg-Witten curve for E-string theory",「String Theory」,西宮記念シンポジウム、 11/12-15/2002
- [84] K. Fujikawa: "Lattice chiral symmetry, CP invariance and Majorana fermions": International Conference in Theoretical Physics in Paris, TH2002, UNESCO, Paris, France, July 2002
- [85] M. Hamanaka, "Towards Noncommutative Integrable Systems," XV Workshop on Beyond the Standard Model, Bad Honnef, Germany, March 2003.
- [86] Y. Matsuo, "Computing String Diagrams by Moyal Product", International Workshop on Quantum Field Theory and Noncommutative Geometry, Tohoku University, November 26-30, 2002
- [87] T. Yanagida: "Leptogenesis", Neutrino 2002, Munich, Germany, June 2002.
- [88] T. Yanagida: "Neutrino Mass and Leptogenesis" SUSY 2002, DESY Hamburg, Germany, July 2002.

#### (国内会議)

一般講演

- [89] "Supersymmetry on the lattice and related topics" 基礎物理学研究所「場の理論」研究会, 2002 年 12 月 18 日 20 日.
- [90] 浜中 真志, "D0-D4 ブレイン系のゲージ理論的解析,"
   場の量子論 2002, 京都大学基礎物理学研究所, 2002
   年7月.
- [91] 浜中 真志, "T-duality, Morita Equivalence and Nahm Transformation," 日本物理学会, 立教大学, 2002 年 9 月.
- [92] 浜中 真志, "非可換ソリトンと D ブレイン," Summer School 数理物理 2002, 東京大学, 2002 年 9 月.
- [93] 浜中 真志, "非可換 BPS 方程式の自己ベックルント 変換,"日本数学会, 島根大学, 2002 年 9 月.
- [94] 浜中 真志, "非可換空間上のインスタントンの ADHM 構成法,"日本数学会, 島根大学, 2002 年 9 月.
- [95] 浜中 真志, "非可換空間上の場の理論と可積分系,"場の理論の数理とその応用,京都大学数理解析研究所, 2002 年 10 月.
- [96] 浜中 真志, "Nahm 変換の一般化と T-duality," 日本 数学会, 東京大学, 2003 年 3 月.
- [97] 浜中 真志, "非可換ソリトンの低エネルギーの散乱に ついて,"日本数学会, 東京大学, 2003 年 3 月.

- [98] 早川祥子: Simple Brane World Scenario with Positive Five Dimensional Cosmological Constant」素 粒子物理学の進展,京都大学基礎物理学研究所,2002 年7月
- [99] 疋田 泰章, "Superstrings on PP-wave backgrounds and symmetric orbifolds", 場の理論 2002, 京都大学 基礎物理学研究所, 2002 年 7 月.
- [100] 疋田 泰章, "Superstrings on PP-wave backgrounds and symmetric orbifolds", 日本物理学会, 立教大学, 2002 年 9 月.
- [101] 疋田 泰章, "Orientifolds of SU(2)/U(1) WZW models", 日本物理学会, 東北学院大学, 2003 年 3 月.
- [102] 伊部 昌宏, "直積群を用いた統一理論における陽子 崩壊の解析"日本物理学会、東北学院大学、2003 年3月
- [103] 岸本 功, "Open String Field Theory around Universal Solutions," 場の量子論 2002, 京都大学基礎物 理学研究所, 2002 年 7 月.
- [104] 岸本 功, "Open String Field Theory around Universal Solutions," 日本物理学会, 立教大学, 2003 年 9 月.
- [105] 岸本 功, "Moyal formulation of String Field Theory," 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, 2003 年 12 月.
- [106] 岸本 功, "Developments in Moyal String Field Theory II," 日本物理学会, 東北学院大学, 2003 年 3 月.
- [107] 丸 信人, "Light Higgs Triplets in Extra Dimensions", 日本物理学会, 立教大, 2002 年 9 月.
- [108] 九 信人, "(S)fermion Masses in Fat Brane Scenario", 日本物理学会, 立教大, 2002 年 9 月.
- [109] 丸 信人, "Quantum Effects of Modulus Fields and Finite Soft Terms in Product-Group Gauge Theories", 日本物理学会, 東北学院大, 2003 年 3 月.
- [110] 九 信人, "(S)fermion Masses in Fat Brane Scenario", "Summer Insitute 2002", 日経連富士研修所, 2002 年 8 月.
- [111] 九 信人, "Fat Branes and Its Phenomenology", "Extra Dimensions and Braneworld",京都大学基礎物理学研究所, 2003 年 1 月.
- [112] 西川 美幸,「必要最小限の仮定に基づく量子重力 理論の構成に向けて」,日本物理学会,立教大学,2002 年9月.
- [113] M. Nishikawa, "Alternative to Higgs and Unification", 場の理論の数理とその応用, 京都大学数理解析 研究所, 2002 年 10 月, hep-th/0207063.
- [114] 西川 美幸,「ヒッグス機構を用いない電弱統一お よび量子重力理論の導出」,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,2002 年 12 月.
- [115] 大森 一樹, "Ghost Kinetic Operator of Vacuum Superstring Field Theory," 場の量子論 2002,京都 大学基礎物理学研究所,2002年7月.

- [116] 大森 一樹, "Construction of Brane Solutions in Vacuum Superstring Field Theory," 日本物理学会、 立教大学、2002 年 9 月.
- [117] 大森 一樹, "Some issues on vacuum superstring field theory," 日本物理学会、東北学院大学、2003 年 3 月.
- [118] 酒井一博: "Seiberg-Witten Curve for the *E*-String Theory", 場の量子論 2002, 京都大学基礎物理学研究 所, 2002 年 7 月
- [119] 酒井 一博: Seiberg-Witten 曲線の正則断面と強弱 双対性再考」,日本物理学会,立教大学,2002 年 9 月
- [120] 酒井 一博:「E 弦理論の Seiberg-Witten 曲線と有 理楕円曲面の幾何学」,日本物理学会,東北学院大学, 2003 年 3 月
- [121] 菅原 祐二, "Superstring vacua of 4-dimensional pp-waves with enhanced supersymmetry", 日本物 理学会, 立教大学, 2002 年 9 月.
- [122] 菅原 祐二, "Thermal Amplitudes in Superstrings on PP-waves,", 日本物理学会, 東北学院大学, 2003 年 3 月.
- [123] 鈴木 功至郎, "Investigation of no-scale supersymmetry breaking models with a gauged  $U(1)_{B-L}$ symmetry", 日本物理学会、立教大学、2002 年 9 月
- [124] 高柳 博充, "Open strings in exactly solvable model of curved spacetime," 場の量子論 2002, 京都大学基 礎物理学研究所, 2002 年 7 月.
- [125] 高柳 博充, "拡張メルビンモデル上の D-brane,"日 本物理学会, 立教大学, 2002 年 9 月.
- [126] 高柳 博充, "Notes on Giant Gravitons on PPwaves," 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, 2002 年 12 月.
- [127] 高柳 博充, "Boundary States for D-branes with Traveling Waves," 日本物理学会, 東北学院大学, 2003 年 3月.
- [128] 渡辺 英徳:「時間依存性のある背景中の D-brane に ついて」、日本物理学会、東北学院大学、2003 年 3 月
- [129] 山口 哲, "Coset construction of noncompact Spin(7) and G<sub>2</sub> CFTs," 場の量子論 2002, 基礎物 理学研究所, 2002 年 7 月.
- [130] 山口 哲, "Holographic RG flow on the defect and g-theorem," 日本物理学会, 立教大学, 2002 年 9 月.
- [131] 山口 哲, "PP-wave 背景中の D-brane と 境界のある2次元面上の場の理論,"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,2002年12月.
- [132] 山口 哲, "AdS/dCFT correspondance, g-theorem, and special Lagrangian singularities," Extra dimension と Braneworld — 素粒子理論、現象論、宇 宙論 — , 京都大学基礎物理学研究所, 2003 年 1 月.
- [133] 山口 哲, "PP-wave 背景中の D-brane と境界のある2次元面上の場の理論,"日本物理学会,東北学院大学,2003年3月.

- [134] 江口 御:「超弦理論の現在」、9月21日,22日,23日、 東大数理科学「数理物理 2002」
- [135] 江口 徹:「超弦理論の現在」、9月28日,日本数学 会特別講演、島根
- [136] K. Fujikawa: "Lattice chiral symmetry and related topics" Sapporo Winter School, Furano, January 9-11, 2003.
- [137] K. Fujikawa: "Lattice chiral symmetry, CP symmetry and Majorana fermions" KEK 研究会「超弦 理論のダイナミクス」, 2003年3月18日 2 0日.
- [138] 浜中 真志, "非可換空間上のゲージ理論とソリトン," 量子化の幾何学2, 早稲田大学, 2002年9月.
- [139] 浜中 真志, "非可換ソリトンと可積分系," KEK 理 論研究会 2003 - 超弦理論のダイナミクス -, KEK, 2003 年 3 月.
- [140] 浜中 真志, "ソリトン理論の非可換化に向けて,"日本物理学会 特別講演, 東北学院大学, 2003 年 3 月.
- [141] 岸本 功, "Developments in Moyal String Field Theory," KEK 理論研究会 2003, 2003年3月, KEK.
- [142] 丸 信人, "Supersymmetry and Extra Dimensions", "素粒子物理学の進展", 京都大学基礎物理学 研究所, 2002 年 7 月.
- [143] 高柳 匡, "Strings on PP-Waves from Super Yang-Mills," 場の量子論 2002, 京都大学基礎物理学研究所, 2002 年 7 月.

招待講演

# 2 原子核・素粒子実験

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で構成される。互いに密接に連 絡を取りながら、原子核物理を中心とし、原子物理、 素粒子物理などとの境界分野も含めた領域の実験研 究を行っている。

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、ガモフテラー遷移強度測定によるラン ダウ・ミグダル係数 g'<sub>NA</sub>の決定、中性子-重陽子弾性 散乱による三体力の検証、超狭幅ダイバリオンの探 索を行なった。また、来年度の本実験に向けて、ベ ルの不等式の検証実験のための偏極度計の開発、お よび不安定核ビーム散乱実験のための偏極陽子固体 標的の開発を進行している。

早野研究室では、先年度に引続き、ジュネーブに ある CERN 研究所において反陽子減速器 (AD)を利 用し、反陽子を含む原子の研究を行っている。

ASACUSA プロジェクト (Atomic Spectroscopy and Collisions Using Slow Antiprotons) においては、 エキゾティック原子・反陽子へリウムの分光により、 さらなる高精度で反陽子の質量決定が行われ、そして 反水素を用いた CPT 対称性検証を目指す ATHENA プロジェクトにおいては、初めて反水素の大量合成 に成功した。

また核物質中での中間子の質量がどのように変化 するかを調べるために、原子核中に深く束縛された 中間子原子を生成させる実験を、1996年以来行って いる。2002年度には、パイ中間子の<sup>115,119,123</sup>Sn原 子核中における束縛状態から、原子核中でのクォーク 凝縮の減少効果を明らかにした。また、新しく他の中 間子の同様な束縛状態を探索する実験が開始された。 1つはヘリウム中でのK中間子束縛状態の存在を調 べるという、KEKにおける実験(KEK-PS E471)で あり、もう1つはこの度GSI研究所でのテスト実験 が開始された、 $\eta$ 中間子の<sup>12</sup>C中における束縛状態 を探索する研究である。

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 Projectilefragment Separator)で生成された不安定核ビーム を利用している。

## 2.0.4 ガモフテラー遷移強度の測定による ランダウ・ミグダル係数 g'<sub>N∆</sub>の決定 (酒井研究室)

高密度な中性子星の内部では、パイ中間子による ボーズ・アインシュタイン凝縮相が発現していると言 われており、原子核物理学の長年の興味の的であっ た。このパイ中間子凝縮相の臨界密度を定量的に推 定するためには、核内パイ中間子相関の振る舞いを 決めるランダウ・ミグダル相互作用の未知係数 g'<sub>NA</sub> を実験的に与える必要がある。

遷移量子数  $\Delta S = \Delta T = 1$ 、  $\Delta L=0$ を持つガモフ テラー型遷移について、遷移強度の和則値からの減少 (クエンチング)を精度良く求めると、 $g'_{N\Delta}$ を決定す ることができる。クエンチングの度合を表すガモフテ ラー抑制係数は  $\beta^-$  側反応の遷移強度と  $\beta^+$  側反応の 遷移強度の差  $(S_{\beta^-} - S_{\beta^+})$ を和則値 3(N-Z)で割っ た値として定義される。我々は、既に  ${}^{90}\text{Zr}(p, n)^{90}\text{Nb}$ 反応の測定により  $\beta^-$  側の 高精度データを得ている。 対を成す  $\beta^+$  側の遷移強度を得るため、入射エネル ギー 300 MeV において  ${}^{90}\text{Zr}(n, p)^{90}\text{Y}$ 反応の精密 測定を行い、励起エネルギー 70 MeV 以下、散乱角  $\theta = 0^\circ - 12^\circ$ の範囲の二階微分散乱断面積を取得した。

得られたデータを多重極展開の手法を用いて解析 し、 $S_{\beta^+}$ 、 $S_{\beta^-}$ を求め、ガモフテラー抑制係数を決 定した。多重極展開とは、微分断面積の角度分布が  $\Delta L$  に依存して特徴的な形を持つことを利用し、微 分断面積の実験値を最も良く再現するように、各励 起エネルギー毎に  $\Delta L$  成分を分離するという解析方 法である。今回、(p,n)、(n,p) スペクトルを同一の 方法で解析することで解析結果の信頼性を高め、ガ モフテラー抑制係数  $Q = 0.89 \pm 0.06$  を得た。図 2.0 a に示す様に、この抑制係数からランダウ・ミグダル 相互作用の係数が  $g'_{N\Delta} = 0.24 \pm 0.10$  と求まり、パ イ中間子凝縮の臨界密度が従来提唱されていた値よ り小さい事が示された。この結果から、中性子星内 でのパイ中間子凝縮相発現の可能性が示唆される。 [31, 33, 62, 76, 86, 88, 103, 104]



☑ 2.0 a: Landau-Migdal parameter  $g'_{N\Delta}$  in Chew-Low model estimated as a function of quenching factor Q. When the correction for the finite size effects of the <sup>90</sup>Zr nucleus is made, the  $g'_{N\Delta}$  value increases by ~ 0.07.

# 2.0.5 偏極中性子 - 重陽子弾性散乱測定 による三体力の検証(酒井研究室)

近年、現実的な二核子間力を用いる事で三核子系 を厳密に記述するファデーエフ(Faddeev)理論計算 と、陽子と重陽子の弾性散乱における様々な観測量 との比較から、三体力の検証が盛んに行われている。 しかし、現在の理論計算にはクーロン力が取り入れ られていない為、陽子-重陽子間に働くクーロン力の 効果を無視して実験値と理論計算の比較を行ってい ることになる。この仮定の妥当性は未だ明らかでは ない。我々は、このクーロン力による不定性のない 系での三体力の検証を行なう為、偏極中性子-重陽子 弾性散乱の測定を行なった。

実験は大阪大学核物理研究センターにて行った。 一昨年度に行った後方角度( $\theta = 85-180^{\circ}$ )での偏極 中性子-重陽子弾性散乱の測定に続き、今年度はクー ロン力の効果が顕著であると予測される前方角度( $\theta = 10-60^{\circ}$ )の測定を行った。実験は、生成した 250 MeV 偏極中性子ビームを重水素化液体シンチレータ 標的に照射して行い、微分散乱断面積および偏極分 解能を測定した。散乱中性子のエネルギーは飛行時 間測定法(TOF)で決定し、反跳重陽子をシンチレー 夕標的自身で検出し、同時測定を行った。

微分散乱断面積の実験結果を図 2.0 b に示す。黒 丸は実験結果、薄いバンドは現実的な核子-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 入れた計算が濃いバンドである。微分散乱断面積に ついては 二体力のみを用いた計算より三体力を含ん だ計算の方が実験を比較的良く再現する。この傾向 は 135MeV/A 以下のエネルギーでの重陽子-陽子散 乱実験の結果と同じであるが、三体力を含んだ計算

も実験値を再現できていない。この差が生じる原因 として、核子当たりのエネルギーが高くなったこと により現れる相対論的効果が理論計算に取り入れら れていないことが考えられる。また、図の白丸は同 じエネルギーで行った陽子-重陽子散乱実験の結果で ある。今後、2つの実験結果の比較から、クーロン 力の効果についての定量的な議論をする予定である。 [7, 26, 28, 31, 36, 40, 69, 84, 92, 102]



 $\boxtimes$  2.0 b: Results of the cross sections for the  $\vec{n}d$  elastic scattering at 250 MeV (black circles). The dark (light) shaded band represents the results of Faddeev calculations with (without) the three nucleon force. Open circles are the results of the  $\vec{p}d$  elastic scattering at 250 MeV.

### 2.0.6 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 6 つのクオークにより構成され る複合粒子である。その存在は量子色力学 (QCD)の 範囲内で可能であるが、存在の確証は未だに得られ ていない。ダイバリオンの発見は新粒子の存在を指 し示すだけでなく、QCDの分野に於いても大きな進 展となる、非常に興味深いものといえる。

近年のモスクワのグループの報告では、陽子-重陽 子散乱のスペクトルから幅の狭い共鳴状態ピークが 3つ発見され、超狭幅ダイバリオンの可能性がある とされている。超狭幅ダイバリオンとは、パウリ原 理より強い相互作用による崩壊が禁止され、電磁相 互作用によって崩壊するダイバリオンである。その ためダイバリオンの中でも特に寿命が長く、崩壊幅 は1keV以下とされている。

昨年度我々は大阪大学核物理研究センターにて、重 水素化ポリエチレン (CD<sub>2</sub>) に 300 MeV の陽子ビー ムを照射し、陽子-重陽子散乱を用いて、モスクワで 発見された候補の一つ (1905MeV)を高分解能質磁気 スペクトロメータで測定した。しかしこの質量領域 には、ピークは観測されなかった。 モスクワで発見されたピークに関して最終的な結 論を出すため、さらにダイバリオンの探索実験を行 なった。標的として液体重水素を用いることにより、 ダイバリオン生成反応の感度を上げ、収量を増やす 工夫をおこなった。また、測定する質量領域を1897-1911 MeV/c<sup>2</sup>に広げ、モスクワで発見された全ての ピークを覆える範囲にした。

今後のデータの解析により、モスクワのグループ の実験結果によるダイバリオンの存在の有無、およ び測定した質量領域における異なる質量を持つダイ バリオンの存在の可能性を明らかにすることができ る。[3, 38, 67, 79, 81, 91]

### 2.0.7 2陽子系のスピンを用いたベルの不 等式の検証 (酒井研究室)

量子力学では、相互作用していない2粒子が遠く 離れているとき、一方の粒子に対するある物理量の 測定が、他方の粒子に対する測定結果に影響を及ぼ すことがある。量子力学のこのような「非局所的性 質」を疑ってアインシュタインらが1935年にパラ ドックスを提示したのは有名である。非局所性を解 決するために、2粒子は測定前にある共通の「隠れた 変数」を持っており、その変数が将来の測定結果を 決定しているという解釈が提案された。しかし、そ のような解釈は2粒子の測定量の相関に関して量子 力学の予言を完全には再現することができないこと が1951年にベルによって示された(ベルの不等式)。

ベルの不等式の発見により、もつれた状態にある 2 光子の偏光の相関の測定実験がこれまでに多数行 われ、殆どの実験が量子力学を支持する結果を得て いる。しかし、質量を持つ粒子を用いた検証実験は ほとんど行われていない。

我々は、2陽子のスピンを用いたベルの不等式の 検証実験を計画している。スピン1重項状態 ( ${}^{1}S_{0}$ ) の陽子対を用意し、2陽子のスピン相関関数  $P(\theta) =$  $< \sigma_{1} \cdot \vec{a} \sigma_{2} \cdot \vec{b} > を測定する。ここで、<math>\vec{a}$ 、 $\vec{b}$ はそれぞ れ陽子1、2のスピンを測定する方向の単位ベクトル であり、 $\theta$ は $\vec{a}$ 、 $\vec{b}$ の間の角度である。この関数は2 陽子のスピンの符号の積の期待値に相当し、量子力 学では  $P_{\rm QM}(\theta) = -\cos\theta$ となる。一方、「隠れた変 数」の理論では、例えば、 $|P_{\rm HV}(45^{\circ})| \le 1/2$ となり 量子力学の予言と両立しない為、 $P(\theta)$ を実験的に測 定することで量子力学と「隠れた変数」の理論のど ちらが正しいかを判定することが可能である。

 ${}^{1}S_{0}$  状態の陽子対を生成するために A $(d, {}^{2}\text{He})$  反応を利用する。この反応は、原子核 A に重陽子を入射し、終状態相互作用によって ${}^{1}S_{0}$  状態の陽子対  $({}^{2}\text{He})$ が出てくる反応である。

実験は 2003 年度中に理化学研究所加速器研究施設 で行う予定である。270 MeV の重陽子ビームを液体 水素標的に照射し、生成した陽子対 (<sup>2</sup>He)を現在建 設中のスピン相関偏極度計 EPOL (図 2.0 c)で検出 する。EPOL は、偏極分析標的用の炭素ブロックと、 その前後に設置された他線式ドリフト検出器、及び プラスチックシンチレータのホドスコープから構成 される。陽子対は炭素ブロックで散乱され、2 陽子 の散乱方向の相関を測定することで P(θ) を求める ことができる。最終的に、ベルの不等式の妥当性も しくは破れを 5 標準偏差の精度で決定することを目 指す。[90, 105, 140]



 $\boxtimes$  2.0 c: Schematic view of the proton spincorrelation polarimeter EPOL. EPOL consists of three multi-wire drift chambers (MWDCs), an analyzer target (carbon block), and two sets of hodoscopes.

## 2.0.8 不安定核ビームを用いた散乱実験の ための偏極陽子固体標的の開発(酒 井研究室)

我々は、核子当り 71 MeV での  $\vec{p}$  +<sup>6</sup> He 弾性散乱 における偏極分解能測定に向けて、偏極陽子固体標 的の開発を進めている。自然界には安定に存在しえ ない不安定な原子核である <sup>6</sup>He 核は、中性子の密度 分布が陽子の密度分布に比べて 1 fm ほど広がった 中性子スキンと呼ばれるエキゾチックな構造を持つ と考えられている。 $\vec{p}$  +<sup>6</sup> He 弾性散乱では微分散乱 断面積が既に測定されているが、偏極陽子標的を用 いた偏極分解能測定により、これまで決めることの 出来なかったスピン-軌道ポテンシャルを決める事が 可能である。この情報により、中性子スキン核の表 面の構造に関する情報を引出す計画である。

偏極陽子固体標的システムのプロトタイプ機を用 いた開発では、より強度の強いアルゴンイオンレー ザーを導入することにより、ほぼ同サイズ(4×5×3 mm<sup>3</sup>)の単結晶に対して、0.3 T、100 K、レーザー パワー 10 W (CW モード)の条件下で昨年度のほ ぼ倍の36.8±4.2%の陽子偏極度を得ることに成功し た。また、実際にイオンビームを照射するための実 用システムを製作し、陽子偏極に成功した。昨年11 月のビーム照射テスト実験においては、陽子を偏極 させる事ができなかったが、その原因を解決するた め、冷却状態でも共振器、NMR コイルの整合を調 節することが可能な新しい実験用システムを開発し、 陽子を偏極させる事に成功した。今後は、偏極標的 に核子当り 80 MeV の  ${}^{4}$ He ビームを当て、ビームに よる偏極度の緩和を調べるテスト実験を行なう。そ の後、本実験である核子当り 71 MeV の  $\vec{p}$  +  ${}^{6}$  He 弾 性散乱測定を行なう予定である。[29, 32, 34]

### 2.0.9 冷たい反水素の生成と検出(早野研 究室)

自然法則における対称性の検証は物理学の基本課題の一つである。ATHENA 実験は低速の(「冷たい」)反水素原子を用いて CPT 対称性を精密検証することを目的とする。相対論的局所場の理論では定理により CPT 対称性が保証されているが、弦理論等、素粒子標準模型を超える理論では、CPT 定理の前提が必ずしも成り立たない。これまで既に、CERN -LEAR および、Fermilab において数十個程度の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、冷たい反水素を大量に生成することを第一の目標として、1999 年以来 CERN の反陽子減速施設 AD で研究を続けて来たが、このほど世界で初めて冷たい反水素原子を生成することに成功した。[12]

ATHENA 実験は主に (1) 反陽子捕獲トラップ、(2) 陽電子集積装置、(3) 混合トラップ、および (4) 検出 器系、等の部分で成り立っている。AD からの反陽 子は磁場 3T 中のペニングトラップで捕獲され、さ らに電子冷却を施される。これとは別に<sup>22</sup>Na 線源 からの陽電子を捕獲・蓄積する。反陽子、陽電子は 混合トラップ輸送され、15K の低温環境で両者を混 ぜ合わせることにより、反水素の生成を試みた。下 に ATHENA トラップおよび反水素検出器の概略図 を示す (図 2.0 d)。



 $\boxtimes$  2.0 d: Mixing trap and detectors of ATHENA.

生成された中性の反水素はトラップポテンシャル を感じないため、トラップ壁に衝突し、そこで反陽 子および陽電子がほぼ同時に消滅する。反陽子消滅 によるパイオン軌跡をシリコン・バーテックス検出 器で検出し、陽電子消滅の back-to-back 511keVγ線 を位置に敏感な分割型 CsI 結晶で検出することによ り、反水素生成事象を再構築した。図 2.0 eに示すの は、反陽子消滅バーテックスから見た 2 つの  $\gamma$  間の 角度である。図 A のヒストグラムにおいて反水素生 成を示す  $\cos\theta \sim -1$  の所でピークが見える。しかし 陽電子を加熱した場合(三角印)、反陽子のみ(B:ヒ ストグラム)、あるいは  $\gamma$  エネルギーカットを故意 にずらした場合(丸印)には、予想通り反水素信号 はみられない。詳しい解析の結果、50000 個以上の 冷たい反水素が生成されたと考えられる。2002 年 9 月に発表された我々の結果は、米国物理学会、英国 物理学会などにより、2002 年の物理トップ・ニュー スの一つに挙げられるなど、国内外の大きな反響を 呼んだ。



 $\boxtimes$  2.0 e: Opening angle of two gamma rays seen from annihilation vertex of antiproton.

# 2.0.10 反陽子ヘリウム pHe<sup>+</sup>の精密なレー ザー分光:反陽子と陽子の質量差、 電荷の絶対値の差に対する新しい 上限(早野研究室)

我々は 2002 年に、 $\bar{p}^4$ He<sup>+</sup> と  $\bar{p}^3$ He<sup>+</sup> 原子の 12 の遷 移周波数を、レーザー分光の手法によって測定した。 測定精度は最も良い遷移では  $8 \times 10^{-8}$  程度である。 この精密測定は、新規導入された実験装置、RF 四重 極減速器 (RFQD) と磁場収束スペクトロメーターに よって達成された成果である。(図 2.0 fを参照。) 過去の我々の実験において、ターゲットに用いら



 $\boxtimes$  2.0 f: Experimental layout. (Drawing not to scale.)

れる低温ヘリウム気体は、ADからの比較的高いエネ ルギー (運動エネルギー T = 5.3 MeV) の反陽子を 静止させるため、高密度 ( $ho \sim 10^{21}$ – $10^{22}$  cm<sup>-3</sup>、室温 では 20-200 bar に相当。) で使われており、それが 精度を制限する要因となっていた。すなわち、 pHe+ 原子は、ターゲット中で周囲のヘリウム気体と何度 も衝突を繰り返す為に、遷移周波数に大きなシフト  $(|\Delta \nu| = 0.5-5.0 \text{ GHz}$ 程度)を引き起こす。過去の 測定においては、ターゲット密度  $\rho = 0$ 、すなわち 真空中の原子の遷移周波数を得るためには、高い密 度での測定を繰り返し、密度シフトの線形性を仮定 し、 $\rho = 0$ への外挿を行う必要があった。しかし、 2002年の実験においては、RFQD により AD の 5.3 MeV 反陽子ビームが 100 keV 以下にまで減速され、  $\overline{p}$ He<sup>+</sup> 原子は低密度( $\rho \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ) ターゲット 内で生成可能となった。この密度は過去の実験より も、4~6桁低いものである。この場合、密度シフト は実験精度に対して無視できる程度(10 MHz 以下) であり、外挿無しで、真空中の原子の遷移周波数が 直接決定できるようになった。また、収束スペクト ロメーターを用いる事により、減速された反陽子の みが 5mm のビーム径で実験のターゲットに到達し、 減速されなかった反陽子に由来するバックグラウン ドは大幅に減少した。

図 2.0 gでは、遷移周波数が QED の高次項や核の 有限な大きさに対する補正等が考慮された理論計算  $\nu_{\rm th}$  と比較されている。理論の精度は < 1 × 10<sup>-7</sup> と されているが、主にオージェ幅 ( $\Gamma_A$  > 10 MHz)の大 きさによって制限されている。最新の理論値は、複 素座標回転 (complex coordiate rotation)の手法を用 いることで、以前の値に比べて改善されている。

遷移周波数 ( 質量、電荷依存性は、反陽子の Rydberg 定数  $R_p \propto M_p Q_p^2$  にほぼ比例すると考えて良 い。)の実験・理論値を比較すると、反陽子と陽子の 電荷・質量差に対して、ある上限  $\delta$  を決定する事が できる。他実験のペニングトラップにおいて測定さ れたサイクロトロン周波数 ( $\omega_p \propto Q_p B/M_p$ ) に反陽 子 - 陽子の差がない事を考慮し、反陽子の質量・電 荷は、陽子と比べて ~  $1 \times 10^{-8}$  程度以下の違いし



 $\boxtimes$  2.0 g: Comparisons between experimental (filled circles with errors) and theoretical (squares for Korobov and triangles for Kino calculations) transition frequencies,  $\nu_{exp}$  and  $\nu_{th}$ .

か無いという結論を得た。さらなる精度の向上には、 より安定した反陽子ビーム、新しいレーザー分光の 技術他、装置一般の改善が必要となるであろう。

## 2.0.11 長寿命 *p*He<sup>2+</sup> イオンの観測 (早野 研究室)

我々は過去の実験で、3体系である $\overline{p}$ He<sup>+</sup>原子を観 測してきた。しかし、2002年の実験において、長寿 命化した「反陽子へリウムイオン」( $\overline{p}^{4}$ He<sup>2+</sup> $\equiv \alpha + \overline{p}$ ) の存在を示す兆候が初めて観測された。

そのような主量子数  $(n \sim 30)$ 、角運動量  $(l \sim n)$ の大きなイオン状態は、衝突のない場合、マイクロ 秒程度の寿命を持つと理論的に予測される。しかし、 高密度  $(\rho \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上)のターゲットを使用す ると、イオン状態は Stark 効果によりピコ秒程度の 時間内に壊されてしまう。それ故に、5.3 MeV の反 陽子ビームを使った過去の実験では、そのようなイ オン状態を観測する事は不可能であった。2002 年、 我々は RFQD を用い、100keV 以下の反陽子ビーム を使って、低密度において (31, 30) と (32, 31)状態 にある  $\overline{p}\text{He}^{2+}$  イオンの検出を試みた。

図 2.0 h (a) は、ターゲット密度  $\rho = 5 \times 10^{21}$  cm<sup>-3</sup> で観測された、レーザー消滅スパイクである。この スパイクの減衰の時定数は、 $\tau_s \sim 6$  ns である。同 じ遷移を  $\rho = 1 \times 10^{17}$  cm<sup>-3</sup> で観測すると、その時 定数は  $\tau_s \sim 30$  ns に延びる (図 2.0 h (b)). 我々は また、 $\bar{p}^4$ He<sup>+</sup> の (39,35)→(38,34) 遷移 (波長 597.3 nm)のスパイクも測定し、同様の結果を得た。

図 2.0 h (c) に示されている通り、2つの遷移の 崩壊率  $1/\tau_s$  は、ターゲット密度に対して  $\rho < 10^{18}$  cm<sup>-3</sup> の領域ではほぼ線形に増加。さらに高い密度  $\rho > 10^{21}$  cm<sup>-3</sup> では飽和する。この結果は以下のように説明できる。高い密度では、スパイクの減衰は オージェ崩壊率によってほぼ説明できる。しかし、密 度を低くした場合には、 $\overline{p}^4 {\rm He}^{2+}$ イオンの寿命が大 きくなり、それが消滅スパイクの延びとして観測される。2003 年以降には、この説明が正しいかどうか 検証するために、実験、理論両面からの研究が必要 であろう。

この実験では、特定の準位 (n,l) の寿命が衝突に



⊠ 2.0 h: Laser spike of  $\overline{p}^{4}$ He<sup>+</sup> transition (37, 34)→(36, 33) measured at high (a) and ultralow (b) densities. Decay rate of this spike (filled circles), and that of the  $\overline{p}^{4}$ He<sup>+</sup> transition (39, 35)→(38, 34) (triangles) at various densities.

よってどう変化するか、2体エキゾティック原子において初めて観測された事になる。この結果は、ミューオン触媒核融合、X線分光、ハイパー核合成などの解析に長年用いられてきたような、カスケード理論計算と比較する事ができるだろう。そういった計算では、放射脱励起、オージェ遷移、Stark 遷移、クーロン脱励起、核による吸収などの効果が取り入れられているが、どの効果もこのような高励起の2体エキゾティック原子で検証された事は未だ無く、本実験が理論の検証に重要な役割を果たすと期待される。さらにこの実験は、冷えた $pHe^{2+}$ イオンを他の低エネルギー (~1 meV) ヘリウム原子と衝突させるので、その de Broglie 波長は非常に大きく、量子トンネル効果が重要となる可能性がある。

# 2.0.12 *p*He<sup>+</sup> 原子の初期ポピュレーション の研究(早野研究室)

初期ポピュレーションの系統的な研究は、2002 年 にも続けられ、 $\overline{p}$ He<sup>+</sup> 原子に反陽子が最初に捕らえ られる (primordial) 準位の、量子数 (*n*,*l*) に対する 知見が得られた。今回は、 $\overline{p}^{3}$ He の準位、(33,32)、 (34,33)、(35,33) のポピュレーションが、 $t = 0.3\mu$ s から 16  $\mu$ s の様々なタイミングでレーザー照射を行 い、共鳴の強度を測定するという手法で調べられた。 このような測定から、各準位のポピュレーションの 時間変化  $P_{(n,l)}(t)$ が導出できる。新しい測定結果を、 過去の結果と考え合わせ、ほぼ全ての $\overline{p}^{3}$ He<sup>+</sup> 原子 は、主量子数  $n \sim 37$ 付近で生成されているという 結果が得られた。

#### 2.0.13 オ-ジェ崩壊率(早野研究室)

 $\bar{p}$ He<sup>+</sup>の準安定性は、高い角運動量を持つ準位にお いてオージェ遷移が抑制される為であると説明でき る。そのオージェ崩壊率  $\gamma_A$  は、オージェ電子によっ て持ち去ることのできる角運動量 (transition multipolarity)の最小値に依存して、劇的に変化する。典 型的には、

$$\gamma_A \sim 10^{17-3L} \text{ s}^{-1} \text{ for } L = 2, 3, 4.$$
 (0.13.1)

である。放射遷移率  $(\gamma_r)$  は、およそ  $10^{5}$ – $10^{6}$  s<sup>-1</sup> である為、 $L \leq 3$  である準位は、オージェ過程が支配的な準位 (短寿命準位) である。

2001 年までに、我々は  $\bar{p}^4$ He<sup>+</sup> の9つの準位の崩 壊率を測定した。多くの準位は、上の式 (0.13.1) で 表される典型的な値と矛盾しないものであったが、 2つの例外が見つかった。1つは (37, 33) であり、 その原因は、近いエネルギーを持つ電子励起状態、 (32, 31) $\bar{p} \otimes (3d)_e$ の影響であると考えられている。も う1つの準位は、(32, 31) である。RFQDを用いた 測定の結果、この準位の崩壊率は、周囲の原子との 衝突により非常に大きくなっていたと結論付けられ た。我々はそれらを「異常」崩壊率と呼んだ。[14]

2002 年には、我々はさらに $\bar{p}$ He<sup>+</sup>の10の準位(うち7つは同位体、 $\bar{p}^{3}$ He<sup>+</sup>の準位)の崩壊率を導出した。2002 年度に得られた10個のデータに関して言えば、異常崩壊率の可能性がある準位が2つ発見された。それらは、 $\bar{p}^{4}$ He<sup>+</sup>の(35,32)と $\bar{p}^{3}$ He<sup>+</sup>の(34,31)であり、式(0.13.1)から期待される典型的な値よりも、2桁程度大きな崩壊率を持つことが明らかとなった。また、理論値(Korobov - 島村,Kartavtsev)も実験値と同じく、典型値よりも大きな値を示している。この状況は、電子励起状態の影響があった、 $\bar{p}^{4}$ He<sup>+</sup>の(37,33)の場合とよく似ている。同様に考えると、電子励起状態、 $\bar{p}^{4}$ He<sup>+</sup>の(35,32)に対し、(31,30) $_{\bar{p}} \otimes (3d)_{e} \times \bar{p}^{3}$ He<sup>+</sup>の(34,31)に対し、(30,29) $_{\bar{p}} \otimes (3d)_{e}$ が異常崩壊率を引き起こした可能性が考えられる。後者においては、電子励起状態の影響の可能性が、Kartavtsevによって既に指摘されている。

もう1つ特筆すべきは、 $\bar{p}^{3}$ He<sup>+</sup>の(36,32)準位で ある。理論の1つは4桁以上の大きな異常を予測し ていたが、測定された崩壊率は典型値からあまり離 れてはいない事が明らかとなった。これはオージェ 遷移という、連続状態とのカップリングが重要な現 象の取り扱いに、理論的な困難があった事を示して いると思われる。今後、理論の改善が期待される所 である。

2.0.14 反陽子ヘリウムの重水素との衝突 における量子トンネル効果(早野 研究室)

反陽子ヘリウムの寿命は、ヘリウム気体中の様々 な不純物 (水素、重水素、酸素、ネオン等) によって 短くなり得る事が知られている。このクエンチング 現象は水素の場合、反陽子ヘリウム原子の量子数 nとlに依存して大きく変化するという意味で、特に 興味深い。理論によれば、古典的にはクエンチ断面 積 $\sigma_q$ の温度依存性は、アレニウスの法則:

$$\sigma_a = \sigma_0 \exp(-E_b/kT), \qquad (0.14.2)$$

( $\sigma_0$  は高温極限での断面積、 $E_b$  はポテンシャル障壁 の高さ、k はボルツマン定数) に従う。これまでの測 定は、30 K で行われたため、温度依存性を知ること はできなかったが、2002 年に初めて高温での測定が 行われ、特に (38,37) 準位に対する重水素クエンチ 断面積の温度依存性が詳細に調べられた (rak QL.2.0 i)。 アレニウスの法則に従うならば、 $\log(\sigma_q)$  は 1/T に 対し、直線となる筈であるが、結果はそうでない事 を示している。代わりに、定数を加えた式、

$$\sigma_a = \sigma_0 \exp(-E_b/kT) + \sigma_t, \qquad (0.14.3)$$

がよく合う(図中の曲線)。 定数  $\sigma_t$ は、重水素が活性化障壁を量子トンネル効果によって乗り越える効果であると考えられる。



 $\boxtimes$  2.0 i: Quenching cross section of the state (38, 37) in collisions with deuterium molecules versus the inverse temperature.

これらの低温における分子衝突の測定は、物理化 学の分野にとって意義深いものであり、同様の量子 トンネル効果は、低温の星間物質などにおいても、重 要な役割を果たしていると考えられている。

# 2.0.15 パイ中間子原子が解き明かす陽子の質量起源(早野研究室)

陽子や中性子は、u, d クォークとグルーオンという、質量がゼロに近い粒子を「原料」としながら、ダイナミカルな機構で大きな質量を獲得している。ここでは、真空の「クォーク凝縮」が、素粒子物理における Higgs 粒子のような役割を果たしていると考えられ、クォーク凝縮の実験的解明が待たれている。 理論的には、クォーク凝縮 ( $| < \bar{q}q > |$ ) は原子核密度の増加とともに減少し、通常原子核の中心では約 65%の減少効果があるとされている。 我々は、(*d*,<sup>3</sup> He)反応を用いることによって π 中間 子と<sup>115,119,123</sup>Sn 原子核の深い束縛状態 (π 中間子原 子の 1s 状態)の生成に成功し、その束縛エネルギー の解析から、原子核中でのクォーク凝縮の減少効果 を明らかにする事に成功した。

具体的には、複数の Sn 原子核で得られたデータを 利用して  $\pi$ - 原子核ポテンシャルのアイソベクトル 項 ( $b_1$ )を決定し、これが  $\pi$ -N で知られている「真 空値」と有為に異なる事を示した。次に、 $b_1$ 項の大 きさとクォーク凝縮を結び付ける理論的な関係を用 い、原子核中心におけるクォーク凝縮と真空値との 比が、 $| < \bar{q}q > |_{\rho}/| < \bar{q}q > |_0 = 0.66 \pm 0.06$ である ことを導いた。これは、上記の理論予測と良い一致 を示している。[17, 63]

### 2.0.16 反 K 中間子の<sup>3</sup>He 原子核による 深い束縛状態の研究(早野研究室)

近年、反 K 中間子の原子核による深い束縛状態の 存在の有無が議論されている。一般に、核中に深く 束縛された中間子状態の観測は、強い相互作用の局 所部分に対する確かな情報を与え得ると考えられる。 中間子に関しては、そのような状態の一連の観測 は既に成されているが、ストレンジネスを持つ中間 子に関しては実験的情報は存在しない。

2002 年秋に KEK 陽子シンクロトロンの北カウン ターホールで行われた KEK-PS E471 実験は、<sup>3</sup>He 核中における  $K^-$ の深い束縛状態の探索を目的とし た。実験では、液体 <sup>4</sup>He 標的中に  $K^-$  を静止させ、 深い束縛状態が存在するならば、核 Auger 効果で放 出されると期待される中性子を、両端に PMT を据 え付けられた  $1.5m \times 20 \text{cm} \times 5 \text{cm}$  に分割されたプ ラスチックシンチレーターのスタックを用いて検出 する。一方、入射  $K^-$  及び 2 次荷電粒子をそれぞれ 別個の MWDC を用いて検出し崩壊頂点を決定する ことにより、Auger 中性子の飛行距離と飛行時間両 方の決定が可能であり、2 体の終状態と合わせて深い 束縛状態の束縛エネルギーと幅の決定が可能である。

現在解析が進行中であり、現在の統計量では断定 的ではないが、理論予想である 108MeVをはるかに 上回る深い束縛状態の存在を示唆するとも考えられ る結果が得られた。2003年度は6月に延長の2週間 のビームタイムが予定され、標的の改造と合わせて 実効統計を2倍に増やす予定である。

## 2.0.17 η 中間子の原子核による束縛状態 探索実験のための検出器開発と動 作テスト(早野研究室)

 $\eta$ 中間子と核の束縛状態探索実験は、ドイツの GSI 研究所で 2003 年に行われる予定である。この実験は、 中間子の核媒質中でのふるまいを系統的に理解する 事が目的で行われる。これまで我々実験グループは、 無反跳の反応である  $(d,^{3}\text{He})$ 反応を用いて  $\pi$  中間子
と核の束縛状態探索実験に成功した。η中間子と核 の束縛状態探索実験においても同様の反応を用いて 行う。

この実験に用いる検出器には十分な位置分解能と TOF を測定するのに十分な時間分解能の他、高エ ネルギー deuteron ビームによって標的核 (<sup>12</sup>C) 内 で生成される 100MHz にのぼる breakup 陽子を棄 却する性質が必要とされる。この性質を兼ね備えた Cherenkov 検出器を開発し、これまで KEK でテス ト実験を行ってきた。2002 年度は、この Cherenkov 検出器動作テストを初めて本実験と同様のセットアッ プでドイツの GSI 研究所において行った。この結果、 十分な位置分解能と時間分解能、そして検出すべき <sup>3</sup>He の検出効率を落とすことなく陽子を十分棄却す る性能がある事がわかった。[65]

## 2.0.18 中性子過剰核の安定性 (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、半減期( $t_{1/2}$ )及び  $\beta$  遅発中性子放 出確率( $P_{in}$ )の測定を試みている。[18, 19, 23, 150, 151, 152, 153, 154, 155]

粒子安定性の問題については、昨年度得られた大 強度<sup>48</sup>Caビームによる新同位元素探索データを詳細 に解析した。解析の結果、Z=10~14の範囲で新たに 発見した中性子過剰な新同位元素は、<sup>34</sup>Ne、<sup>37</sup>Na、 <sup>43</sup>Siであり、<sup>33</sup>Ne、<sup>36</sup>Na、<sup>39</sup>Mgは粒子非束縛な原 子核であることがわかった。<sup>43</sup>Siについては、大き な変形度を予想している理論がこの核の粒子束縛性 を正しく予言しており、Si同位体における*N*=28 で の「魔法数の喪失」を示唆している。また、重イオ ン核反応の理解に必要な、これら中性子過剰な不安 定核の生成断面積も決定した。以上の結果は、投稿 論文としてまとめた。[19]

中性子過剰核の  $t_{1/2} \& P_{in}$  については、過去に 得られたデータを新しい統計手法によって解析し、 <sup>19</sup>B、<sup>22</sup>C、<sup>23</sup>Nの中性子ドリップ線核について新た な知見を得た。新手法では、崩壊曲線を個別に扱う のではなく、それぞれの崩壊曲線について共通のパ ラメータを用意し、複数の崩壊曲線を同時に処理し て、パラメータ決定を行う。この方法によって総収 量が 100 個程度の同位体に対しても  $t_{1/2}$  等を決定す ることが可能となり、<sup>22</sup>C、<sup>23</sup>N に対しては  $t_{1/2} \& P_{in}$ が、<sup>19</sup>B については  $P_{in}$ が、初めて決定された。 以上の結果は、投稿論文としてまとめた。[23]

## 2.0.19 インビーム γ 線核分光法による不 安定核の構造研究 (櫻井研究室)

 $\gamma$ 線核分光は、不安定核の構造研究に有力な実験手 段の一つである。適当な核反応で原子核の励起状態 を生成し、脱励起する際の $\gamma$ 線のエネルギーと絶対 強度を測定することで、励起準位のエネルギー、ス ピン・パリティー、遷移強度等の知見が得られる。特 に、原子核の回転や振動運動に対応する低励起  $2^+$ 、  $4^+$ 状態、殻構造を特徴づける一粒子状態などは、原 子核の代表的な励起様式であるため、核構造研究の 重要な研究対象である。対象となる不安定核の種類 や得られるビーム強度、測定する物理量に応じて、 様々な測定方法、励起方法を用いた研究を行ってい る。また、より広範囲の原子核を対象とし、多様な 物理量を測定するための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。

### 中性子過剰核の励起状態の寿命測定法

従来、不安定核の電磁遷移確率を測定する手段と して中間エネルギーでのクーロン励起法が広く適用 されてきた。ところが軽い原子核では、クーロン励 起法によって電磁遷移確率を求めるのは困難である。 それは、対象とする原子核の陽子数が小さいために、 クーロン励起に対して核力励起が無視できなくなり、 純粋なクーロン励起だけを取り扱う事が出来ないか らである。そこで、我々は電磁遷移確率と直接結び 付く励起状態の寿命を測定する方法として Doppler Shift Attenuation (DSA) 法と In Beam  $\gamma$  Attenuation (IBGA) 法の二つの方法を新たに考案した。前 者は励起状態の寿命が 10ps 以下の場合に適用し、後 者はそれよりも長い場合に適用する。

軽い中性子過剰核の領域では励起状態の寿命は ps 単位なので直接的に測定することは不可能である。 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  $\gamma$  線のエネルギースペクトルの形 状から寿命を導出する。 $\gamma$ 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、ドップラシフトによって広が  $\delta \gamma$ 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 測定は可能となる。我々はこの方法を世界で初めて <sup>12</sup>Be に適用し、第一励起 2<sup>+</sup> 状態の寿命測定実験を 行った。その結果、測定したエネルギースペクトル がシミュレーションから求めた分布形状とほぼ一致 した。本手法が ps 単位の寿命を測定するのに有効で あることが分かった。現在寿命を精度良く決定する ために更なる解析を行っている。

一方、IBGA 法は  $\gamma$  線を放出するまでに原子核が ビーム軸方向に移動することを利用する。たとえば 核子あたり 50MeV の不安定核ビームを標的に照射 する。この時、励起された不安定核は、高速の 1/3 程 度の速さを持ち、励起状態の寿命を 30ps とすると、 平均 3mm 程度移動することになる。ここで、 $\gamma$ 線の放出位置によって、検出効率の異なる二つの検出器群を用いて測定すると、測定する $\gamma$ 線の収量の比が、励起状態の寿命に依存して変化する。二つの検出器群による収量の比と寿命の関係を、シミュレーションを用いて求め、寿命を決定することができる。我々は、この手法を $^{16}$ Cビームに適用し、 $^{2+}$ 状態からの脱励起の $\gamma$ 線を測定した(図 2.0 j)。解析の結果、 $^{16}$ Cの $^{2+}$ 状態の寿命が 30 ps 程度であることがわった。



■ 2.0 j: Energy spectra of  $\gamma$  rays measured by two sets of NaI(Tl) detectors (L1,L2). De-excitation  $\gamma$ rays from the first excited 2<sup>+</sup> state in <sup>16</sup>C were observed at around 1766 keV.

 $^{16}$ Cの $2^+$ 状態の励起エネルギー1766keV は、他 の同位体よりも小さく、 $^{16}$ Cが大きく変形している ことが予想される。同様に様々な理論でも大きな変 形が示唆され、3 ps 程度の短い寿命が予想されてい た。ところが今回測定した $2^+$ 状態の寿命は、予想よ り10倍程度長く、寿命の逆数に比例する電気四重極 遷移確率は、1/10程度に小さい。 $2^+$ 状態の励起エ ネルギーは、原子核全体の変形を反映し、寿命から 求めた電気四重極遷移確率は、陽子分布の変形を反 映していると考えられることから、今回の実験結果 は、 $^{16}$ C内では中性子分布が大きく変形しているに も関わらず、陽子分布はほぼ球形を成していると解 釈できる。[129]

陽子非弾性散乱

偶偶核の場合、原子核の形状は、基底状態と2<sup>+</sup>状 態とを結ぶ遷移強度に反映される。陽子非弾性散乱 は、核励起時において中性子側の寄与が大きいため、 その遷移強度は、中性子分布の変形をより強く反映 している。陽子非弾性散乱から求められる変形度と、 電気四重極遷移確率や、2<sup>+</sup>状態の寿命から求められ る陽子分布の変形度と比較することで、陽子・中性 子分布間のデカップリング、変形の違いを明らかす ることができる。

我々は、<sup>16</sup>Cの中性子分布の変形度を求めるため、 陽子非弾性散乱実験を行った。先に述べたように、 <sup>16</sup>Cでは、2<sup>+</sup>のエネルギーが低いにもかかわらず、 異常に長い励起状態の寿命が測定され、陽子・中性子 分布の変形の違いが示唆されている。実験では、<sup>16</sup>C を液体水素標的に照射し、基底状態から 2<sup>+</sup> 状態に 励起させ、脱励起ガンマ線の強度を測定することに より励起断面積を求めた。光学ポテンシャル模型を 用いて断面積から変形度を求めたところ、寿命から もとめた陽子分布の変形度より、およそ3倍大きな 変形度を得た。これは<sup>16</sup>Cの陽子分布と中性子分布 が異なることを示している。[133]

また、<sup>34</sup>Mg に関しても陽子非弾性散乱の測定を 行った。<sup>34</sup>Mg では、クーロン励起実験より大きな電 気四重極遷移確率が測定され、陽子分布の大きな変 形が示唆されてきた。中性子分布の変形に敏感な陽 子非弾性散乱の結果から、<sup>34</sup>Mg における陽子・中性 子分布の変形の違いを導出する予定である。

また、陽子非弾性散乱は、不安定核の励起状態を探 査する最も効率のよい手法としても重要である。こ れは、標的の質量数が小さいため、同じエネルギー損 失を与える他の標的等に比べ、最大二桁程度標的数 を大きくすることが出来るためである。したがって、 強度の非常に弱い不安定核ビームを対象とした実験 に特に有効な核分光手段となる。すでに、中性子過 剰核  ${}^{30}\mathrm{Ne}\, {m o}\, 2^+$  状態を探査する実験を行い、 $2^+$  状態 の励起エネルギーを 791±26keV と求めた。<sup>30</sup>Ne よ り陽子が2つ多い $^{32}$ Mgは、中性子数が魔法数N=20であるにも関わらず、変形していることが明らかに なってきており、長年注目を集めていた。今回測定 された <sup>30</sup>Neの 2<sup>+</sup> 状態のエネルギーは、<sup>32</sup>Mgの 2<sup>+</sup> エネルギー 885keV より低く、<sup>30</sup>Ne がより変形した 原子核であることを示唆しており、N=20の魔法数 の消失現象が、中性子過剰度とともにより顕著に発 現することを見いだした。本年度はさらに<sup>27</sup>Fを対 象に陽子非弾性散乱実験を行い、殻構造を特徴づけ る一粒子状態の探査を行った。

## クーロン励起法

クーロン励起法は、反応機構がよく理解されてお り、曖昧さなく電磁遷移確率を導出できるため、優 れた核分光手法である。クーロン励起は、従来、核力 の影響を避けるため低いエネルギーで行われてきた が、中間エネルギーにおいても、Z≥10の原子核に対 しては、クーロン励起が核力の励起を上まわるため、 適用可能であることがわかってきた。特に、中間エ ネルギーの不安定核ビームを用いた実験では、クー ロン励起法により、偶偶核の2+状態への電気四重極 遷移確率がさかんに測定され、四重極変形の発現強 度が調べられている。本年度は、クーロン励起法に より、これまで測定例のなかった  ${
m ^{46}Cr}$ 、 ${
m ^{50}Fe}$ 、 ${
m ^{54}Ni}$ の電気四重極遷移確率の導出を行った。鏡映核の電 気四重極遷移確率の測定値と比較することによって、 集団運動性に対する陽子・中性子分布の寄与の違い に関して知見が得られると期待される。[138]

## 一核子移行反応による一粒子状態の研究

魔法数の消滅や、新魔法数の出現といった殻模型 の変容は、一粒子状態の準位間隔を調べることで明 らかにできる。一核子移行反応は、こうした一粒子 状態を選択的に生成するのに有効である。一般に核 子移行反応は、核子あたり 10MeV 程度以下の低エネ ルギーで行われる。しかし、<sup>4</sup>Heを標的にした一核子 移行反応は、<sup>4</sup>He内の核子のフェルミ運動が大きく、 また核子分離エネルギーが大きいことから、断面積 のエネルギー依存性が比較的小さく、中間エネルギー の不安定核ビームに適用することが可能である。そ こで、魔法数 N=8、Z=8 に起因する殻構造の中性子 過剰領域での振る舞いを調べる目的で  ${}^{12}\text{Be}(\alpha,t){}^{13}\text{B}$ 、 <sup>22</sup>O(*a*,*t*)<sup>23</sup>F反応を測定した。一粒子状態からの脱励 起 γ 線を測定しており、散乱粒子の角分布、および 粒子-ガンマ角相関からスピン・パリティに関する情 報を得る予定である。[130]

## 2.0.20 位置感応型ゲルマニウム検出器の 開発(櫻井研究室)

γ線の測定は不安定核研究の強力な実験手段であ り、これまでに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、γ線検出器の高分解能化、高効 率化が重要になる。櫻井研究室では現在、位置感応 型ゲルマニウム検出器の開発をしている。

開発中のゲルマニウム検出器は、25本の2mm幅 ストリップ電極に分割された平板形結晶( $50 \times 50 \times 20 \text{ mm}^3$ )と、その背後に設置した同軸形結晶( $\phi70 \times 70 \text{ mm}^3$ )からなる。特徴は、一次元に特化した位置分解能の良い検出器と、全エネルギーピークを効率良く測定するために体積が大きな検出器とを組み合わせたことである。そのため、 $\beta = 0.3 \sim 0.5$ の不安定核ビームに対する高精度のドップラー補正が可能であり、かつ、 $1 \sim 2 \text{MeV}$ の $\gamma$ 線に対して高い検出効率を備えている。

これまでに、<sup>152</sup>Eu標準線源を用いてエネルギー分解能と検出効率等の基本性能を調べた。また、 $\beta = 0.3$ の <sup>12</sup>Be ビームを用い、薄い標的に照射し、脱励起の  $\gamma$ 線を分光測定する性能テスト実験を行った。結果、ドップラー補正後のスペクトルに <sup>12</sup>Be の 2<sup>+</sup> 状態からの 2.1MeV  $\gamma$ 線が観測され、15keV(~0.7%)という高い分解能を得た。これにより、中間エネルギーの不安定核ビームを用いたガンマ線核分光に極めて 有効な性能を持つことが確認された。[126]

## 2.0.21 中性子過剰核の分解反応 (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 反応が有効である。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。

中性子八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、八ロー構造を研究する優れたプローブと なる。これまでに、中性子過剰核<sup>11</sup>Be、<sup>19</sup>Cの1中 性子八ロー構造を解明し、低励起電気双極子遷移強 度が増大することを明らかにしている。本年度は、2 中性子八ロー核である<sup>11</sup>Liのクーロン分解反応に取 り組んだ。<sup>11</sup>Liでは、過去の複数の実験値に矛盾が 生じており、高統計、高い精度の実験結果が望まれ ている。現在、2 中性子八ロー核といわれる<sup>14</sup>Be、 <sup>17</sup>Bの分解反応のデータも含め、詳細な解析を行っ ている。[52, 127, 131]

## 2.0.22 β分光を用いた陽子過剰核<sup>46</sup>Crの 核構造研究(櫻井研究室)

β 崩壊は、その機構がよく理解されているため、崩 壊の始状態、終状態の核構造を知るための優れた手 法である。本年度は、陽子過剰核  ${}^{46}$ Cr のガモフテ ラー (GT)-β 崩壊の測定実験を行った。娘核である  ${}^{46}$ V は、アイソスピン自由度が最も対称な核であり、 核力のアイソスピン対称性について調べるのに適し た核である。また、 ${}^{46}$ Cr の GT-β 崩壊は、陽子数 Z、 中性子数 N が共に偶数で、N=Z-2、A=4n+2(n は 任意の整数) で表せられる原子核で成り立つとされ るウィグナーの超多重項理論を検証する上でも重要 である。

実験は、生成された <sup>46</sup>Cr を止め、そこから放出さ れる  $\beta$  線と  $\gamma$  線の同時測定を行った。その結果、<sup>46</sup>Cr の <sup>46</sup>V の 993 keV の 1<sup>+</sup> 状態への GT- $\beta$  崩壊を初め て観測し、対応する  $\gamma$  線を同定した (図 2.0 k)。<sup>46</sup>Cr の基底状態から <sup>46</sup>V の 993 keV の 1<sup>+</sup> 状態への分岐 比が当初の予想より 2 倍程度大きいことがわかった。 測定した寿命と分岐比から、log ft を 3.6±0.2 とは じめて決定することができた。今後は、理論との比 較を進めていく予定である。[139]

## 2.0.23 天体核物理 (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の反応断面 積はエネルギー収支および元素合成過程を理解する 上で不可欠な量である。特に超新星や、X線バース トといった高温、高密度状態では平均自由時間が短 くなり、原子核の崩壊よりも先に反応が起こり得る。 つまり、不安定核を含んだ反応が寄与することが可 能になり、これらの断面積を測定することが重要と なる。

しかし、ビーム強度が低く、エネルギーの高い(数 10AMeV)不安定核ビームの場合には、天体現象で典 型的なエネルギー(10 keV~1 MeV)での直接測定は



 $\boxtimes$  2.0 k: The  $\gamma$ -ray energy spectrum in the <sup>46</sup>Cr  $\beta$ -decay measurement. The  $\gamma$ -ray peak at 993 keV corresponds to the transition from the 1<sup>+</sup> state to the ground state in <sup>46</sup>V.

極めて困難で、別な実験手法を用いなければならない。本研究室では二つの方法、クーロン分解反応法と ANC 法を用いて、不安定核ビームを用いた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いる。

## クーロン分解反応法

クーロン分解反応法は、 $A(p,\gamma)B$ といった陽子捕 獲断面積の場合、逆反応学を応用し、B核のクーロン 分解反応<sup>208</sup>Pb(B,A+p)<sup>208</sup>Pbを測定する。この逆反 応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。この方法は、仮想光子数および 詳細釣合の為に、直接測定に比べて、断面積が 6~8 桁程度増大する。また、エネルギーの高いビームを 用いる為に、厚い標的を使うことができ、かつ前方 に散乱が収束するために高検出効率が見込める。以 上の様な様々な利点によって、不安定核の関与した 核反応でも断面積測定が可能になる。

本年度は、新星などで生じる rp-process(爆発的水 素燃焼過程) で重要な働きをする  $^{22}Mg(p,\gamma)^{23}Al 反$ 応、 $^{26}Si(p,\gamma)^{27}P$ 反応の断面積の決定を、逆反応で ある  $^{23}Al$ 、 $^{27}P$ のクーロン分解反応の測定を通じて 行った。これらの反応は、新星爆発直後に観測可能な  $\gamma$ 線源となる  $^{22}Na$ 、 $^{26}Al$ の生成量を左右するため、 反応断面積を精度よく知ることが重要である。実験 の結果、これまで rp-process をモデル化するネット ワーク計算で使用されている断面積を支持する値を 得た。[53, 136, 137]

この他にも、低質量の AGB(Asymptotic Giand Branch; 漸近巨星枝) 星内の CNO 中性子サイクルを 担う一反応である  ${}^{14}C(n,\gamma){}^{15}C$  反応の断面積を、 ${}^{15}C$  のクーロン分解反応測定によって求めた。 ${}^{14}C(n,\gamma){}^{15}C$  反応に関しては、直接反応の測定と、理論計算との 間に 3 倍近いずれが見られ、異なる方法による断面 積の測定が望まれていた。詳細な解析を進めた結果、 今回得られた  ${}^{14}C(n,\gamma){}^{15}C$  の反応断面積は、直接反 応測定の結果に比較して約3倍大きい値となり、 理 論計算とよく一致した。

### ANC 法

ANC 法は核子移行反応微分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 <sup>7</sup>Be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<sup>8</sup>B中での波 動関数の外縁部での振幅 (ANC:Asymptotic Normalization Coefficient) から計算できる。この ANC は、 同じく核外縁部で起こる、陽子移行反応<sup>7</sup>Be $(d, n)^{8}$ B  $(E_d=10~20 \text{ MeV})$ の前方散乱微分断面積を歪曲波ボ ルン近似 (DWBA)を用いて解析することで導出で きる。

我々は RIPS で得られる <sup>7</sup>Be、<sup>8</sup>Bビームを用いて、 <sup>8</sup>B $(d,n)^9$ C、<sup>7</sup>Be $(d,n)^8$ Bの測定を行った。ANC 法を 用いて <sup>8</sup>B $(p,\gamma)^9$ C、<sup>7</sup>Be $(p,\gamma)^8$ B反応の断面積を求め た。前者は既に出版済みで、後者についてもデータ 解析はほぼ終了し現在投稿論文を作成中である。[22]

天体現象で同じく重要な中性子捕獲反応では、クーロン障壁が無いために、反応が外縁部で起こるとは考えにくく、この手法は適用されていなかった。しかし、中心力障壁があれば、中性子捕獲反応の場合でも原子核外縁部でしか反応が起こらないと予想できる。我々は、ANC法が中性子捕獲反応においても適用できることを示す為に、 $^{12}C(d, p)^{13}C$ 反応微分断面積から $^{12}C(n, \gamma)^{13}C$ 反応断面積を求めた。後者は $^{20keV\sim1MeV}$ という低いエネルギーで測定されているが、ANC法を用いて計算した断面積はそれらを再現し、この方法が中性子捕獲反応においても有効であることを初めて示した。この件に関しては、現在、投稿論文を準備中である。

## 2.0.24 日米共同研究 (櫻井研究室)

研究対象を軽い中性子過剰核からより重い領域に 拡張すべく、米国ミシガン州立大学国立超電導サイ クロトロン研究所 (NSCL) との国際共同研究を推進 している。本年度は、日米双方で議論を重ね、次年度 の実験計画を決定した。この実験は、2002 年秋に開 催された NSCL の実験課題採択委員会に提案され、 採択されている。なお、本計画は、日本学術振興会・ 日米科学協力事業共同研究(日本側代表者:櫻井)に よって推進されている。

実験計画の研究対象は、殻構造の変化・集団性に関 して注目されている Z=26~30、N=40~50の中性子 過剰核である。N=40,50の同音核においては、中性 子過剰度とともに変形が促進し、(擬)魔法数を持っ た硬い核からソフトな核に移行し、「魔法数の喪失」 が観測される可能性がある。これら殻構造の変化に よる性質の変化は、超新星爆発や中性子星表面の原 子核組成など、天体現象にかかわる興味深いテーマ である。これら広範な不安定核に対し、陽子非弾性 散乱によるインビーム 線分光を行って、第一励起 準位のエネルギーの決定と電気四重極遷移確率の測 定を行う。実験計画の立案には櫻井研が先導的役割 を担った。特筆すべき実験上の工夫としては、不安定 核ビームの純度を敢えて上げず、広範な不安定核の データを同時に得られるようしたこと、強度が微弱 な不安定核に対しても有意な統計量を得るため、液 体水素標的を用いたルミノシティの増大を図ったこ と、高分解能スペクトロメータ S800 で得られる高い 粒子識別能力を利用して、S/N の良いデータを収集 すること、などが挙げられる。

## 2.0.25 RIBF 開発研究 (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。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 (RIBF) 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。櫻井研では、理研 RIBF 計画において重い不安 定核ビームに対応するための新しいスペクトロメー タ、Zero-degree Forward Spectrometer(ZFS)、の建 設を推進している。[144]

ZFSは、重い不安定核ビームに対応して2次標的 下流での粒子識別を高効率かつ高分解能で行えるよ うに設計されている。重い不安定核を用いた場合、 逆運動学の性質から標的で散乱した不安定核の散乱 角がビームの広がりと同等およびそれ以下であるた め、ZFSの立体角はビームの広がり程度である。また ZFSは、運動量分散面をもったダブルアクロマティッ クスペクトロメータであり、重い核の荷電状態の決 定をも容易に行うことができる。今後は、飛跡再構 成に必要な磁場測定の精度を見積もるとともに、2次 の効果や検出器分解能も考慮した詳細なシミュレー ションを行う予定である。

<受賞>

- [1] 堀 正樹: 第 19 回井上研究奨励賞、井上科学振興財 団、2003 年 2 月 4 日.
- [2] 関口仁子: 原子核談話会新人賞、原子核談話会·核物 理委員会、2003 年 3 月 29 日.

### <報文>

## (原著論文)

- [3] A. Tamii, K. Hatanaka, M. Hatano, D. Hirooka, J. Kamiya, H. Kato, Y. Maeda, T. Saito, H. Sakai, S. Sakoda, K. Sekiguchi, N. Uchigashima, T. Uesaka, T. Wakasa, and K. Yako: Search for narrow dibaryon resonances by the  $pd \rightarrow pdX$  and  $pd \rightarrow ppX$  reactions, Phys. Rev. C **65** (2002) 047001–1-4.
- [4] T. Kawabata, T. Ishikawa, M. Itoh, M. Nakamura, H. Sakaguchi, H. Takeda, T. Taki, M. Uchida,

Y. Yasuda, M. Yosoi, H. Akimune, K. Yamasaki, G.P. A. Berg, H. Fujimura, K. Hara, K. Hatanaka, J. Kamiya, T. Noro, E. Obayashi, T. Wakasa, H. P. Yoshida, H. Fujita, Y. Fujita, Y. Shimbara, H. Ueno, M. Fujiwara, K. Hosono, A. Tamii, and H. Toyokawa: Polarization transfer in the  ${}^{16}\mathrm{O}(p,p')$  reaction at forward angles and structure of the spin-dipole resonances, Phys. Rev. C **65** (2002) 064316-1–12.

- [5] T. Uesaka, J. Nishikawa, H. Okamura, K. Suda, H. Sakai, A. Tamii, K. Sekiguchi, K. Yako, S. Sakoda, H. Kato, M. Hatano, Y. Maeda, T. Saito, N. Uchigashima, N. Sakamoto, Y. Satou, T. Ohnishi, T. Wakui, T. Wakasa, and K. Itoh: <sup>3</sup>He(d, p)<sup>4</sup>He Reaction at Intermediate Energies and Impulse Picture of the (d, p) Reaction, Phys. Lett. B **533** (2002) 1–7.
- [6] Y. Nakaoka: Two-step contribution to the spinlongitudinal and spin-transverse cross sections of the quasielastic (p, n) reactions, Phys. Rev. C 65 (2002) 064616-1–7.
- [7] Y. Maeda, H. Sakai, K. Hatanaka, and A. Tamii: Production of Thick and Highly Uniform CD<sub>2</sub> Targets for n+d Measurements, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **490** (2002) 518–521.
- [8] K. Hatanaka, Y. Shimizu, D. Hirooka, J. Kamiya, Y. Kitamura, Y. Maeda, T. Noro, E. Obayashi, K. Sagara, T. Saito, H. Sakai, Y. Sakemi, K. Sekiguchi, A. Tamii, T. Wakasa, T. Yagita, K. Yako, H.P. Yoshida, V.P. Ladygin, H. Kamada, W. Glöckle, J. Golak, A. Nogga, and H. Witała: Cross Section and Complete Set of Proton Spin Observables in *pd* Elastic Scattering at 250 MeV, Phys. Rev. C 66 (2002) 044002-01–10.
- [9] H. Okamura, T. Uesaka, K. Suda, H. Kumasaka, R. Suzuki, A. Tamii, N. Sakamoto, and H. Sakai: Model-Independent Spin-Parity Determination by the  $(d,^2 \text{He})$  Reaction and Possible Evidence for a  $0^-$  State in <sup>12</sup>B, Phys. Rev. C **66** (2002) 054602-01-04.
- [10] M. Yosoi, H. Akimune, I. Daito, H. Ejiri, H. Fujimura, M. Fujiwara, T. Ishikawa, M. Itoh, T. Kawabata, M. Nakamura, T. Noro, E. Obayashi, H. Sakaguchi, H. Takeda, T. Taki, A. Tamii, H. Toyokawa, N. Tsukahara, M. Uchida, T. Yamada, and H.P. Yoshida: Structure and Decay of the s-Hole State in <sup>11</sup>B Studied via the <sup>12</sup>C(p, 2p)<sup>11</sup>B\* Reaction, Phys. Lett. B **551** (2002) 255–261.
- [11] Y. Satou, S. Ishida, H. Sakai, H. Okamura, N. Sakamoto, H. Otsu, T. Uesaka, A. Tamii, T. Wakasa, T. Ohnishi, K. Sekiguchi, K. Yako, K. Suda, M. Hatano, H. Kato, Y. Maeda, J. Nishikawa, T. Ichihara, T. Niizeki, H. Kamada, W. Glöckle, and H. Witała: Three-Body *dN* Interaction in the Analysis of the <sup>12</sup>C(*d*, *d'*) Reaction at 270 MeV, Phys. Lett. B **549** (2002) 307–313.

- [12] M. Amoretti, C. Amsler, G. Bonomi, *et al.*: "Production and detection of cold antihydrogen atoms", Nature **419** 456–459 (2002).
- [13] M. Hori, J. Eades, R.S. Hayano, et al.: "Primary populations of metastable antiprotonic <sup>4</sup>He and <sup>3</sup>He atoms", Phys. Rev. Lett. 89 (9) 093401-1-4 (2002).
- [14] H. Yamaguchi, T. Ishikawa, J. Sakaguchi, et al.: "Anomalies in the decay rates of antiprotonic helium-atom states", Phys. Rev. A 66 022504-1-6 (2002).
- [15] E. Widmann, J. Eades, T. Ishikawa, et al.: "Hyperfine structure of antiprotonic helium revealed by a laser-microwave-laser resonance method", Phys. Rev. Lett. 89 (24) 243402-1-4 (2002).
- [16] M. Hori, K. Yamashita, R.S. Hayano, T. Yamazaki: "Analog Cherenkov detectors used in laser spectroscopy experiments on antiprotonic helium", Nucl. Instr. and Meth. A **496** 102–122 (2003).
- [17] H. Geissel, H. Gilg, A. Gillitzer, R. S. Hayano, S. Hirenzaki, K. Itahashi, M. Iwasaki, P. Kienle, et al.: "Experimental indication of a reduced chiral order parameter from the 1s π<sup>-</sup>, state in <sup>205</sup>Pb ", Phys. Lett. B **549** 64–71 (2002)
- [18] N. Aoi, H. Sakurai et al.: Anomaly of N=8 Shell Closure in Neutron-Rich Be and B Isotopes Studied via Delayed Neutron Emitting <sup>14</sup>Be beta Decay, Phys. Rev. C **66**, 014301 (2002).
- [19] M. Notani, H. Sakurai et al.: New neutron-rich isotopes, <sup>34</sup>Ne, <sup>37</sup>Na and <sup>43</sup>Si, produced by fragmentation of a 64A MeV <sup>48</sup>Ca beam, Phys. Lett. B 542, 49–54 (2002).
- [20] E802 Collaboration and E866 Collaboration, T. Abbott, H. Sakurai *et al.*: System, centrality, and transverse mass dependence of two-pion correlation radii in heavy ion collisions at 11.6A and 14.6A GeV/c, Phys. Rev. C66, 054906 (2002).
- [21] H. Sakurai: Nuclear spectroscopy on very neutronrich nuclei at RIKEN, Indian J. Phys. 76S, 61–67 (2002).
- [22] D. Beaumel, H. Sakurai et al.: Some applications of an indirect method to determine direct radiative cross sections at astrophysical energies, Indian J. Phys. **76S**, 145–147 (2002).
- [23] K. Yoneda, H. Sakurai et al.: beta-decay half-lives and beta-delayed neutron multiplicities of the neutron drip-line nuclei <sup>19</sup>B, <sup>22</sup>C, and <sup>23</sup>N Phys. Rev. C 67, 014316 (2003).
- [24] T. Teranishi, H. Iwasaki et al.: Study of resonance states in <sup>12</sup>N using a radioactive ion beam of <sup>11</sup>C Phys. Lett. B 556, 27–32 (2003).

(レビュー)

[25] T. Yamazaki, N. Morita, R.S. Hayano, E. Widmann and J. Eades: "Antiprotonic helium", Phys. Rep. 366 183–329 (2002). (会議抄録)

- [26] H. Sakai, K. Sekiguchi, Y. Maeda, W. Glöckle, M.B. Greenfield, K. Hatanaka, M. Hatano, D. Hirooka, H. Kamada, J. Kamiya, H. Kato, T. Ohnishi, H. Okamura, J. Rapaport, T. Saito, N. Sakamoto, S. Sakoda, Y. Satou, K. Suda, A. Tamii, N. Uchigashima, T. Uesaka, T. Wakasa, H. Witała, and K. Yako: Clear Signature of Three-Nucleon Force Effects Via the Precise Measurements of dp and nd Scatterings, Proc. International Nuclear Physics Conference (AIP, New York, 2002) pp. 643–647.
- [27] K. Yoneda, H. Sakurai et al.: Deformation of the neutron-rich isotope <sup>34</sup>Mg studied via in-beam gamma-ray spectroscopy using two-step fragmentation, *ibid*, pp. 766–770.
- [28] H. Sakai: Search for Three-Nucleon Force Effects via the Polarization Measurements on  $\vec{dp}$  and  $\vec{nd}$ Scattering, Proc. IX Workshop on High Energy Spin Physics (Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 2002) pp. 336–342.
- [29] T. Wakui, M. Hatano, H. Sakai, A. Tamii, and T. Uesaka: Development of a Spin Polarized Solid Proton Target for Experiments by the Radio-Isotope Beams, *ibid*, pp. 379–382.
- [30] V.P. Ladygin, T. Uesaka, T. Saito, M. Hatano, A.Yu. Isupov, H. Kato, H. Kumasaka, N.B. Ladygina, Y. Maeda, A.I. Malakhov, J. Nishikawa, T. Ohnishi, H. Okamura, S.G. Reznikov, H. Sakai, N. Sakamoto, S. Sakoda, Y. Satou, K. Sekiguchi, K. Suda, R. Suzuki, A. Tamii, N. Uchigashima, and K. Yako: Tensor Analyzing Power T<sub>20</sub> in the dd → <sup>3</sup>Hp and dd → <sup>3</sup>He n Reactions at Intermediate Energies in the Collinear Geometry, *ibid*, pp. 312–319.
- [31] H. Sakai, K. Yako, Y. Maeda, A. Tamii, H. Okamura, K. Suda, T. Wakasa, J. Kamiya, and K. Hatanaka: Polarized Neutron Facility at RCNP, Proc. IX Int. Workshop on Polarized Sources and Targets (World Scientific, Singapore, 2002) pp. 243–248.
- [32] T. Wakui, M. Hatano, H. Sakai, A. Tamii, and T. Uesaka: Development of Polarized Solid Proton Target for RI Beam Experiment, *ibid*, pp. 133–137.
- [33] H. Sakai: Gamow-Teller Quenching to Pion Condensation, Proc. 4th Italy-Japan Symposium on Pesepectives in Heavy Ion Physics (World Scientific, Singapore, 2002) pp. 217–226.
- [34] M. Hatano, H. Sakai, A. Tamii, T. Wakui, and T. Uesaka: Spin Polarized Solid Proton Target (SPSPT) for Experiments with the Radio-Isotope Beam, *ibid*, pp. 363–369.
- [35] H. Iwasaki et al.: In-beam γ-ray spectroscopy of neutron-rich nuclei with inelastic scattering, *ibid*, pp 423-430.

- [36] H. Sakai: Nd Scattering at Intermediate Energy and Three-Nucleon Force Effects, Mod. Phys. Lett. A 18 (2003) 306–312.
- [37] K. Sekiguchi, H. Sakai, H. Okamura, A. Tamii, T. Uesaka, K. Suda, N. Sakamoto, T. Wakasa, Y. Satou, T. Ohnishi, K. Yako, S. Sakoda, H. Kato, Y. Maeda, M. Hatano, J. Nishikawa, T. Saito, N. Uchigashima, N. Kalantar-Nayestanaki, and K. Ermisch: Polarization Transfer Measurement for *d-p* Elastic Scattering, To Search for Three Nucleon Force Effects, *ibid*, 327–329.
- [38] A. Tamii, M. Hatano, H. Kato, Y. Maeda, T. Saito, H. Sakai, S. Sakoda, N. Uchigashima, K. Hatanaka, D. Hirooka, J. Kamiya, T. Wakasa, K. Yako, K. Sekiguchi, and T. Uesaka: Search for Super-Narrow Dibaryon Resonances by the  $pd \rightarrow pdX$ and  $pd \rightarrow ppX$  Reactions, *ibid*, 410–413.
- [39] T. Saito, M. Hatano, H. Kato, Y. Maeda, H. Sakai, S. Sakoda, A. Tamii N. Uchigashima, V.P. Ladygin, A.Yu. Isupov, N.B. Ladygina, A.I. Malakhov, S.G. Reznikov, T. Uesaka, K. Yako, T. Ohnishi, N. Sakamoto, K. Sekiguchi, H. Kumasaka, J. Nishikawa, H. Okamura, K. Suda, and R. Suzuki: Measurement of the Analyzing Powers for the  $\vec{dd} \rightarrow {}^{3}\text{H}en$  and  $\vec{dd} \rightarrow {}^{3}\text{H}p$  Reactions at Intermediate Energies, *ibid*, 294–297.
- [40] Y. Maeda, H. Sakai, A. Tamii, S. Sakoda, H. Kato, M. Hatano, T. Saito, N. Uchigashima, H. Kuboki, K. Hatanaka, D. Hirooka, Y. Shimizu, Y. Kitamura, K. Fujita, N. Sakamoto, H. Okamura, K. Suda, T. Ikeda, K. Itoh, Y. Sakemi, T. Wakasa, J. Kamiya, K. Yako, K. Sekiguchi, Y. Sato, M.B. Greenfield, J. Rapaport, and H. Kamada: Measurement of Differential Cross Sectoins and Vector Analyzing Powers for the *nd* Reaction at 250 MeV, *ibid*, 298–301.
- [41] Y. Shimizu, K. Hatanaka, Y. Sakemi, T. Wakasa, H.P. Yoshida, J. Kamiya, T. Saito, H. Sakai, A. Tamii, K. Sekiguchi, K. Yako, Y. Maeda, T. Noro, K. Sagara, and V.P. Ladygin: Three-Body Effects in *pd* Elastic Scattering at 250 MeV, *ibid*, 313–316.
- [42] A. Tamii, N. Uchigashima, H. Sakai, M. Hatano, Y. Maeda, T. Saito, T. Ishida, H. Kuboki, K. Hatanaka, T. Wakasa, J. Kamiya, Y. Shimizu, Y. Kitamura, H. Okamura, K. Suda, K. Yako, K. Sekiguchi, and Y. Satou: Measurement of p+dElastic Scattering at  $E_p=392$  MeV, *ibid*, 440–443.
- [43] D.P. van der Werf, L.V. Jorgensen, T.L. Watson, R. Funakoshi, *et al.*: "The ATHENA positron accumulator", Applied Surface Science **194** (1-4) 312-316 (2002).
- [44] M.C. Fujiwara, M. Marchesotti: "A novel current mode operating beam counter based on not preamplified HPDs", Nucl Instr. and Meth. A 484 (1-3) 162-173 (2002).

- [45] S. Momota, H. Sakurai et al.: Production of projectile-like fragments at intermediate energies, Nucl. Phys. A701, 150c-155c (2002).
- [46] Z. Dlouhy, H. Sakurai et al.: Characteristics of neutron-rich nuclei around shell closures N=20 and 28, *ibid*, 189c–192c.
- [47] K. Yoneda, H. Sakurai, et al.: Gamma-ray Spectroscopy of  $^{34}{\rm Mg}$  via RI beam fragmentation, ibid, 437c–440c.
- [48] T. Otsuka, H. Sakurai, I. Tanihata: Proceedings of the International RIKEN Symposium Shell Model 2000, Nucl. Phys. A 704. Editorial material.
- [49] H. Sakurai: Nuclear Spectroscopy on Unstable Nuclei at RIKEN, Nucl. Phys. A704, 27c–36c (2002).
- [50] H. Sakurai: Spectroscopy on very neutron-rich nuclei at RIKEN, ABSTR. RAP. AM. CHEM S 224: U90–U90 Part2 AUG 18 2002.
- [51] H. Sakurai: Spectroscopy on exotic nuclei at RIKEN, Proceedings of Yukawa International Seminar 2001 (YKIS01), Physics of Unstable Nuclei, Prog. Theor. Phys. Supp. 146, 39–48 (2002)
- [52] N. Fukuda, H. Sakurai et al.: Coulomb dissociation of halo nuclei, *ibid*, 462–466.
- [53] T. Gomi, H. Sakurai et al.: Coulomb dissociation of <sup>23</sup>Al, *ibid*, 557–558.
- [54] S. Kanno, H. Sakurai et al.: Coulomb excitation of <sup>24</sup>Si, *ibid*, 575–576.
- [55] Y. U. Matsuyama, H. Sakurai et al.: Inelastic Scattering of <sup>12</sup>Be with <sup>4</sup>He, *ibid*, 593–594.
- [56] A. Saito, H. Sakurai et al.: Molecular states in neutron-rich beryllium isotopes, *ibid*, 615–616.
- [57] H. Sakurai: Spectroscopy on unstable nuclei at RIKEN, Proceedings of International Symposium on "Exotic Nuclei at the Proton Drip Line", Sep. 25-28, 2001, Camerino, Italy, edited by C.M. Petrache and G. Lo Bianco, p.219–229, 2002, Universita di Camerino.
- [58] H. Sakurai: Spectroscopy on Very Neutron-Rich Nuclei in the Island-of-Inversion Region, Proceedings of International Symposium on Exotic Nuclei (EXON 2001), Jul. 24–28, 2001, Lake Baikal, Russia, edited by Yu.E. Penionzhkevich and E.A. Cherepanov, p.481–494, 2002, World Scientific.
- [59] N. Aoi: Shell Quenching in Neutron Rich Be and B isotopes, *ibid*, p.471–480.

### (国内雑誌)

- [60] 酒井英行、関口仁子:「陽子-重陽子弾性散乱の測定 と三体力の検証」、日本物理学会誌 57, No. 7 (2002) 500-504.
- [61] 早野龍五、堀正樹、藤原真琴:「反陽子原子の精密分光-反陽子へリウムと反水素原子-」、日本物理学会 誌 58, No.3 (2003) 166–174.

(学位論文)

- [62] 矢向謙太郎: Precise Determination of the Gamow-Teller Quenching Factor via the <sup>90</sup>Zr(n, p) Reaction at 293 MeV, (博士論文).
- [63] 鈴木謙: "Precise measurement of deeply-bound pionic 1s states in Sn isotopes and its implications on partial chiral symmetry restoration in nuclei" (錫同位体における π 中間子の深束縛 1s 状態の観測による原子核中でのカイラル対称性の部分的回復の研究、博士論文).
- [64] 坂口淳: "Observation of hyperfine and superhyperfine structure of antiprotonic helium atom by laser-microwave spectroscopy" (レーザー・マイクロ 波分光による反陽子ヘリウム原子の超微細構造と極 超微細構造の観測、博士論文).
- [65] 進藤美紀: "Towards experimental search for the ηnucleus bound states" (エータ中間子と原子核の束 縛状態探索実験に向けて、修士論文).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [66] K. Sekiguchi, H. Sakai, H. Okamura, A. Tamii, T. Uesaka, K. Suda, N. Sakamoto, T. Wakasa, Y. Satou, T. Ohnishi, K. Yako, S. Sakoda, H. Kato, Y. Maeda, M. Hatano, J. Nishikawa, T. Saito, N. Uchigashima, N. Kalantar-Nayestanaki, and K. Ermisch: Polarization Transfer Measurement for *d-p* Elastic Scattering to Search for Three Nucleon Force Effects, 2nd Asia Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics, August 27-30, 2002, Shanghai, China.
- [67] A. Tamii, K. Hatanaka, M. Hatano, D. Hirooka, J. Kamiya, H. Kato Y. Maeda, T. Saito, H. Sakai, S. Sakoda, K. Sekiguchi, N. Uchigashima, T. Uesaka, T. Wakasa, and K. Yako: Search for Super-Narrow Dibaryon Resonances by the  $pd \rightarrow pdX$  and  $pd \rightarrow ppX$  Reactions *ibid*.
- [68] T. Saito, V.P. Ladygin, T. Uesaka, M. Hatano, A.Y. Isupov, H. Kato, H. Kumasaka, Y. Maeda, N.B. Ladygina, M.H. Malakov, J. Nishikawa, T. Ohnishi, H. Okamura, S.G. Reznikov, H. Sakai, N. Sakamoto, S. Sakoda, K. Sekiguchi, R. Suzuki, K. Suda, A. Tamii, N. Uchigashima, and K. Yako: Measurement of the Analyzing Powers for the  $\vec{dd} \rightarrow {}^{3}\text{H}e\,n$  and  $\vec{dd} \rightarrow {}^{3}\text{H}p$  Reactions at Intermediate Energies, *ibid*.
- [69] Y. Maeda, H. Sakai, A. Tamii, S. Sakoda, H. Kato, M. Hatano, T. Saito, N. Uchigashima, H. Kuboki, K. Hatanaka, D. Hirooka, Y. Shimizu, Y. Kitamura, K. Fujita, N. Sakamoto, H. Okamura, K. Suda, T. Ikeda, K. Itoh, Y. Sakemi, T. Wakasa, J. Kamiya, K. Yako, K. Sekiguchi, Y. Sato, M.B. Greenfield, J. Rapaport, and H. Kamada: Measurement of Differential Cross Sectoins and Vector Analyzing Powers for the n + d Reaction at 250 MeV, *ibid*.

- [70] Y. Shimizu, K. Hatanaka, Y. Sakemi, T. Wakasa, H.P. Yoshida, J. Kamiya, T. Saito, H. Sakai, A. Tamii, K. Sekiguchi, K. Yako, Y. Maeda, T. Noro, K. Sagara, and V.P. Ladygin: Three-Body Effects in *pd* Elastic Scattering at 250 MeV, *ibid*.
- [71] A. Tamii, N. Uchigashima, K. Hatanaka, M. Hatano, T. Ishida, J. Kamiya, H. Kuboki, Y. Maeda, H. Okamura, T. Saito, H. Sakai, Y. Satou, K. Sekiguchi, Y. Shimizu, H. Suda, Y. Kitamura, T. Wakasa, and K. Yako: Measurement of *p*-*d* Elastic Scattering at *E<sub>p</sub>*=392 MeV, *ibid*.
- [72] K. Sekiguchi, H. Sakai, H. Okamura, A. Tamii, T. Uesaka, K. Suda, N. Sakamoto, T. Wakasa, Y. Satou, T. Ohnishi, K. Yako, S. Sakoda, H. Kato, Y. Maeda, M. Hatano, J. Nishikawa, T. Saito, N. Uchigashima, N. Kalantar-Nayestanaki, and K. Ermisch: Polarization Transfer Measurement for *d-p* Elastic Scattering - A Probe For Three Nucleon Force Properties, 15th International Spin Physics Symposium, September 9-14, 2002, Long Island, USA.
- [73] H. Okamura, T. Uesaka, K. Suda, H. Kumasaka, R. Suzuki, A. Tamii, N. Sakamoto, and H. Sakai: Model-Independent Spin-Parity Determination by the (d, <sup>2</sup>He) Reaction and a Possible Indication of 0<sup>-</sup> state in <sup>12</sup>B, *ibid*.
- [74] T. Kawabata, H. Akimune, H. Fujimura, H. Fujita, Y. Fujita, M. Fujiwara, K. Hara, K. Hatanaka, K. Hosono, T. Ishikawa, M. Itoh, J. Kamiya, M. Nakamura, T. Noro, E. Obayashi, H. Sakaguchi, Y. Shimbara, H. Takeda, T. Taki, A. Tamii, H. Toyokawa, M. Uchida, H. Ueno, T. Wakasa, K. Yamazaki, Y. Yasuda, H.P. Yoshida, and M. Yosoi: Polarization Transfer in the  ${}^{16}O(p, p')$  Reaction at  $E_p = 392$  MeV and Structure of the Spin-Dipole Resonance, *ibid*.
- [75] Y. Satou, S. Ishida, H. Sakai, H. Okamura, N. Sakamoto, T. Uesaka, A. Tamii, T. Wakasa, T. Ohnishi, K. Sekiguchi, K. Yako, K. Suda, M. Hatano, H. Kato, Y. Maeda, and T. Ichihara: Isoscalar Spin Response in the Continuum Studied via the  ${}^{12}C(d,d')$  Reaction at 270 MeV, *ibid*.
- [76] K. Yako, H. Sakai, M.B. Greenfield, K. Hatanaka, M. Hatano, J. Kamiya, Y. Kitamura, H. Kato, Y. Maeda, C.L. Morris, Y. Sakemi, H. Okamura, J. Rapaport, T. Saito, K. Sekiguchi, Y. Shimizu, K. Suda, A. Tamii, N. Uchigashima, and T. Wakasa: Determination of the Gamow-Teller Quenching Factor via the <sup>90</sup>Zr(n, p) Reaction at 293 MeV, *ibid*.
- [77] T. Saito, V.P. Ladygin, T. Uesaka, M. Hatano, A.Y. Isupov, H. Kato, H. Kumasaka, Y. Maeda, N.B. Ladygina, M.H. Malakov, J. Nishikawa, T. Ohnishi, H. Okamura, S.G. Reznikov, H. Sakai, N. Sakamoto, S. Sakoda, K. Sekiguchi, R. Suzuki,

K. Suda, A. Tamii,N. Uchigashima, and K. Yako: Study of the Spin Structure of  ${}^{3}\text{He}({}^{3}\text{H})$  via  $\vec{dd} \rightarrow {}^{3}\text{He}n({}^{3}\text{H}p)$  Reaction, *ibid*.

- [78] T. Uesaka, J. Nishikawa, H. Okamura, K. Suda, H. Sakai, A. Tamii, K. Sekiguchi, K. Yako, S. Sakoda, H. Kato, M. Hatano, Y. Maeda, T. Saito, N. Uchigashima, N. Sakamoto, Y. Satou, T. Ohnishi, T. Wakui, T. Wakasa, and K. Itoh: Polarized <sup>3</sup>He and Polarized Deuteron: Hadronic Approach to Structure of Light Nuclei, Int. Conf. on Polarized <sup>3</sup>He Beams and Gas Targets and Their Applications, September 8–13, 2002, Oppenheim, Germany.
- [79] A. Tamii, H. Sakai, S. Sakoda, H. Kato, M. Hatano, Y. Maeda, T. Saito, N. Uchigashima, K. Hatanaka, T. Wakasa, D. Hirooka, J. Kamiya, T. Uesaka, K. Yako, and K. Sekiguchi: Search for Narrow Dibaryon Resonances by the  $pd \rightarrow pdX$ and  $pd \rightarrow ppX$  Reactions, 16th Particles and Nuclei International Conference, September 30 - October 4, 2002, Osaka, Japan.
- [80] K. Sekiguchi, H. Sakai, H. Okamura, A. Tamii, T. Uesaka, K. Suda, N. Sakamoto, T. Wakasa, Y. Satou, T. Ohnishi, K. Yako, S. Sakoda, H. Kato, Y. Maeda, M. Hatano, J. Nishikawa, T. Saito, N. Uchigashima, N. Kalantar-Nayestanaki, and K. Ermisch: Polarization Transfer Measurement for *d-p* Scattering and Three Nucleon Force Effects, *ibid.*
- [81] A. Tamii, H. Sakai, S. Sakoda, H. Kato, M. Hatano, Y. Maeda, T. Saito, N. Uchigashima, K. Hatanaka, T. Wakasa, D. Hirooka, J. Kamiya, T. Uesaka, K. Yako, and K. Sekiguchi: Search for Super-Narrow Dibaryon Resonances by the pd → pdX and pd → ppX Reactions, The Kyudai-RCNP International Mini-Symposium on Nuclear Many-Body and Medium Effects in Nuclear Interactions and Reactions, October 25-26, 2002, Kyushu University, Fukuoka, Japan.
- [82] K. Sekiguchi, H. Sakai, H. Okamura, A. Tamii, T. Uesaka, K. Suda, N. Sakamoto, T. Wakasa, Y. Satou, T. Ohnishi, K. Yako, S. Sakoda, H. Kato, Y. Maeda, M. Hatano, J. Nishikawa, T. Saito, N. Uchigashima, N. Kalantar-Nayestanaki, and K. Ermisch: Measurement of *d-p* Elastic Scattering at Intermediate Energies and Three-Nucleon Force, *ibid*.
- [83] Y. Shimizu, K. Hatanaka, Y. Sakemi, T. Wakasa, H.P. Yoshida, J. Kamiya, T. Saito, H. Sakai, A. Tamii, K. Sekiguchi, K. Yako, Y. Maeda, T. Noro, K. Sagara, and V.P. Ladygin: Three-Body Effects in *pd* Elastic Scattering at 250 MeV, *ibid*.
- [84] Y. Maeda, H. Sakai, A. Tamii, S. Sakoda, H. Kato, M. Hatano, T. Saito, N. Uchigashima, H. Kuboki, K. Hatanaka, Y. Sakemi, T. Wakasa, J. Kamiya, D. Hirooka, Y. Shimizu, Y. Kitamura,

K. Fujita, N. Sakamoto, H. Okamura, K. Suda, T. Ikeda, K. Itoh, K. Yako, K. Sekiguchi, Y. Sato, M.B. Greenfield, J. Rapaport, and H. Kamada: Study of Three-Nucleon-Force via  $\vec{n}+d$  Elastic Scattering at 250 MeV, *ibid*.

- [85] T. Saito, V.P. Ladygin, T. Uesaka, M. Hatano, A.Y. Isupov, H. Kato, H. Kumasaka, Y. Maeda, N.B. Ladygina, M.H. Malakov, J. Nishikawa, T. Ohnishi, H. Okamura, S.G. Reznikov, H. Sakai, N. Sakamoto, S. Sakoda, K. Sekiguchi, R. Suzuki, K. Suda, A. Tamii,N. Uchigashima, and K. Yako: Study of the Spin Structure of <sup>3</sup>He(<sup>3</sup>H) via  $\vec{dd} \rightarrow$ <sup>3</sup>He n (<sup>3</sup>H p) Reaction at Intermediate Energies, *ibid*.
- [86] K. Yako, H. Sakai, M. Hatano, H. Kato, Y. Maeda, T. Saito, K. Sekiguchi, A. Tamii, N. Uchigashima, K. Hatanaka, J. Kamiya, K. Kitamura, Y. Sakemi, Y. Shimizu, T. Wakasa, H. Okamura, K. Suda, M.B. Greenfield, C.L. Morris, and J. Rapaport: Determination of the Gamow-Teller Quenching Factor via the  ${}^{90}$ Zr(n, p) Reaction at 293 MeV, *ibid*.
- [87] H. Takeda, H. Sakaguchi, S. Teranishi, T. Taki, M. Yosoi, M. Itoh, T. Kawabata, T. Ishikawa, M. Uchida, N. Tsukahara, Y. Yasuda, T. Noro, M. Yoshimura, H. Fujimura, H.P. Yoshida, E. Obayashi, A. Tamii, and H. Akimune: Extraction of Neutron Density Distributions from Proton Elastic Scattering at Intermediate Energies, *ibid*.
- [88] K. Yako: Measurement of the  ${}^{90}$ Zr(n, p) Reaction at 293 MeV and the Missing Gamow-Teller Strength, Int. Symp. on Frontiers of Collective Motions, November 6-9, 2002, Aizu, Japan.
- [89] H. Iwasaki: Low-lying structure of neutron-rich nuclei around N=8 and 20 from in-beam gamma-ray spectroscopy, *ibid*.
- [90] H. Sakai, Y. Satou, T. Saito, and A. Tamii: Spin Entanglement Measurement of Two Protons, Waseda International Symposium on Fundamental Physics - New Perspectives in Quantum Physics -, 12-15 November, 2002, Tokyo, Japan.
- [91] A. Tamii: Super-Narrow Dibaryon Search at RCNP, Discussion Meeting on Strategy for Few-Nucleon Problems and Related Topics, March 21-22, 2003, Fukuoka, Japan.
- [92] Y. Maeda: Study of Three Nucleon Force via the nd and pd Elastic Scattering at RCNP, *ibid*.
- [93] E. Widmann: "A possible antiproton facility at JKJ", talk at the 2nd International Workshop on Nuclear and Particle Physics at 50-GeV PS, Kyoto, Sep. 26–29, 2002.
- [94] J. Sakaguchi: "First observation of the hyperfine and superhyperfine structure of antiprotonic helium by laser-microwave spectroscopy" The XVI Particle and Nuclei International Conference (PANIC02), Osaka, Sep. 30–Oct. 4, 2002.

- [95] K. Suzuki: "Deeply bound pionic 1s states in Sn isotopes", *ibid.*
- [96] H. Yamaguchi: "Precise laser spectroscopy of the antiprotonic helium atom and CPT test on antiproton mass and charge", *ibid*.
- [97] M.C. Fujiwara: "First Production and Detection of Cold Antihydrogen Atoms", the International Conference on Low-Energy Antiproton Physics (LEAP'03), Yokohama, Japan, March 3–7, 2003. *ibid.*
- [98] B. Juhasz, J. Eades, R.S. Hayano *et al.*: "Effects of impurity molecules on the lifetime of antiprotonic helium atoms", *ibid.*
- [99] J. Sakaguchi, J. Eades, R.S. Hayano *et al.*: "Measurement of the hyperfine structure of antiprotonic helium by a laser-microwave spectroscopy technique", *ibid.*
- [100] E. Widmann, R.S. Hayano, M. Hori, and T. Yamazaki: "Measurement of the Hyperfine Structure of Antihydrogen", *ibid*.
- [101] H. Yamaguchi, J. Eades, R.S. Hayano *et al.*: "Auger Decay Rates of Antiprotonic Helium Atom States", *ibid*.

## 招待講演

- [102] H. Sakai: Nd Scattering at Intermediate Energy and Three-Nucleon Force Effects, 2nd Asia Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics, August 27-30, 2002, Shanghai, China.
- [103] H. Sakai: Extraction of Precise Gamow-Teller Quenching Value Q, Landau-Migdal Parameter  $g'_{N\Delta}$  and Pion Condensation, Int. Symp. on Frontiers of Collective Motions, November 6-9, 2002, Aizu, Japan.
- [104] H. Sakai: Gamow-Teller Quenching Value, Landau-Migdal Parameter  $g'_{N\Delta}$  and Pion Condensation, Int. Symp. on Physics of Unstable Nuclei November 20-25, 2002, Halong Bay, Vietnam.
- [105] H. Sakai: Measurement of the Spin Entanglement of Two-Proton System, Int. Conf. on Symmetries in Nuclear Structure, March 23-29, 2003, Erice-Sicily, Italy.
- [106] E. Widmann: "High-precision laser and microwave spectroscopy of antiprotonic helium", invited talk at the XIVth Rencontres de Blois: Matter-Antimatter Asymmetry, Château de Blois, France, June 16–22, 2002.
- [107] R.S. Hayano: "Production and Detection of Cold Antihydrogen Atoms". The XVI Particle and Nuclei International Conference (PANIC02), Osaka, Sep. 30–Oct. 4, 2002.
- [108] E. Widmann: "Study of the ground-state hyperfine structure of antihydrogen", EXA02 - International workshop on exotic atoms - future perspectives, Vienna, Austria, Nov. 28–30, 2002.

- [109] T. Suzuki: "Search for Deeply Bound  $K^-$  ppn in the  ${}^{4}\text{He}(K^-, n)$  reaction.", *ibid*.
- [110] E. Widmann: "Exotic atomic systems in traps", the HITRAP Workshop, GSI, Darmstadt, Germany, December 11, 2002.
- [111] H. Sakurai: Spectroscopy on very neutronrich nuclei at N=20~28, International Workshop, Hirschegg 2003, Nuclear Structure and Dynamics at the Limits, Jan. 12–18, 2003, Hirschegg, Austria.
- [112] H. Sakurai: Spectroscopy on very neutron-rich nuclei at RIKEN, Symposium on "What is exotic about exotic nuclei?", American Chemical Society, Aug. 18–22, 2002, Boston, USA.

(国内会議)

一般講演

- [113] 関口仁子、酒井英行、岡村弘之、民井淳、上坂友洋、 須田健嗣、坂本成彦、若狭智嗣、佐藤義輝、大西哲哉、 矢向謙太郎、迫田誠太郎、加藤裕充、前田幸重、波田 野道夫、西川純、齋藤孝明、内ヶ島暢之、N. Kalantar-Nayestanaki、K. Ermisch: 「重陽子-陽子弾性散乱 の偏極移行量測定による三体力モデルの検証」、少数 粒子系物理学の現状と今後の展望研究会、2002 年 5 月 24-25 日、高エネルギー加速器研究機構.
- [114] 民井淳、内ヶ島暢之、酒井英行、波田野道夫、前田幸重、齋藤孝明、石田智之、久保木浩功、畑中吉治、若狭智嗣、神谷潤一郎、清水陽平、北村安之、岡村弘之、須田健嗣、佐藤義輝、矢向謙太郎、関口仁子:「E<sub>p</sub>=392 MeV における p+d 弾性散乱測定」、同上.
- [115] 清水陽平、畑中吉治、酒見泰寛、若狭智嗣、吉田英 智、大林恵美、神谷潤一郎、北村安之、酒井英行、民 井淳、関口仁子、矢向謙太郎、前田幸重、野呂哲夫、 相良建至、八木田貴典、V.P. Ladygin: 「pd 弾性散 乱による三体力の研究」、同上.
- [116] 山口 英斉, 堀正樹, E. Widmann 他: 反陽子ヘリ ウム原子のレーザー分光~準位の寿命測定、日本物 理学会 2002 年秋季大会、2002 年 9 月、中部大学.
- [117] 岡村弘之、上坂友洋、須田健嗣、熊坂弘一、鈴木涼 子、民井淳、坂本成彦、酒井英行:「(d,<sup>2</sup>He)反応の A<sub>ZZ</sub>によるモデル非依存スピン・パリティ同定」、日 本物理学会 2002 年秋季大会、2002 年 9 月、立教大学.
- [118] 近藤洋介、櫻井博儀、他:中性子過剰核 B 同位体の インビーム γ 分光、同上.
- [119] 小田原厚子、岩崎弘典、他:不安定核<sup>17</sup>N ビームの 生成とその利用、同上.
- [120] 工藤隆、相良建至、野呂哲夫、石田孝司、野副信也、 塩田理人、下本伸介、浅地瞬、米村孝久、畑中吉治、 若狭智嗣、酒見泰寛、吉田英智、神谷潤一郎、清水陽 平、民井淳:「 E<sub>p</sub>=250 MeV での pd breakup 反応 断面積および A<sub>y</sub> 測定」、日本物理学会第 58 回年次 大会、2003 年 3 月、東北学院大学・東北大学.
- [121] 川畑貴裕、秋宗秀俊、G.P.A. Berg、藤村寿子、藤 田浩彦、藤田佳孝、藤原守、原圭吾、畑中吉治、細野 和彦、石川貴嗣、伊藤正俊、神谷潤一郎、中村正信、

野呂哲夫、大林恵美、坂口治隆、新原佳弘、竹田浩 之、瀧伴子、民井淳、豊川秀訓、内田誠、上野秀樹、 若狭智嗣、山崎かおる、安田裕介、吉田英智、與曽井 優:「<sup>11</sup>Bの M1 遷移強度」、同上.

- [122] 與曽井優、豊川秀訓、坂口治隆、中村正信、竹田浩 之、瀧伴子、塚原尚彦、内田誠、安田裕介、藤原守、 酒見泰寛、藤村寿子、伊藤正俊、吉田英智、大林恵美、 原圭吾、R. Zegers、秋宗秀俊、山崎かおる、民井淳、 川畑貴裕、石川貴嗣、大東出、野呂哲夫、江尻宏泰、 山田泰一、伊藤好孝、塩澤真人、小林兼好:「軽い核 の深部空孔状態の崩壊様式」、同上.
- [123] 船越亮、藤原真琴、早野龍五: CERN AD における 低エネルギー反水素生成実験 - 低エネルギー反水素 生成の成功報告 - 、同上.
- [124] 鈴木謙:パイ中間子束縛状態から探る核中でのカイ ラル対称性の回復、同上.
- [125] 山口 英斉, 堀正樹, E. Widmann, 他: CERN 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 CPT テスト、同上.
- [126] 鈴木賢、他: ストリップゲルマニウムテレスコープ の開発、同上.
- [127] A. M. Vinodkumar、櫻井博儀、他: Coulomb breakup of <sup>11</sup>Li、同上.
- [128] 出道仁彦、櫻井博儀、他: <sup>12</sup>Be における 0<sup>+</sup><sub>2</sub> アイソ マー状態の寿命測定、同上.
- [129] 今井伸明、櫻井博儀、他: <sup>12</sup>Be、<sup>16</sup>C における第一 励起状態から基底状態への換算転移確率、同上.
- [130] 大田晋輔、櫻井博儀、他:核子移行反応 (α,t) を用 いた、中性子過剰核<sup>13</sup>Bの陽子一粒子状態について の研究、同上.
- [131] 杉本崇、櫻井博儀、他:<sup>17</sup>Bの分解反応 (2)、同上.
- [132] 宮武宇也、青井考、他:<sup>15,17</sup>Bのスピン偏極核分光 実験、同上.
- [133] H. J. Ong、他: <sup>16</sup>Cの陽子非弾性散乱、同上.
- [134] 長谷川浩一、櫻井博儀、他:<sup>30</sup>Ne による非弾性散 乱、同上.
- [135] 馬場秀忠、櫻井博儀、他: 逆運動学を用いた <sup>14</sup>O(α,α<sup>i</sup>) 反応、同上.
- [136] 五味朋子、櫻井博儀、他:<sup>23</sup>Alのクーロン分解反応 の測定、同上.
- [137] 栂野泰宏、櫻井博儀、他:<sup>27</sup>Pのクーロン分解反応 の測定、同上.
- [138] 山田一成、櫻井博儀、他: クーロン励起法を用いた 陽子過剰核<sup>46</sup>Cr、<sup>50</sup>Fe、<sup>54</sup>Niの B(E2) 測定、同上.
- [139] 大西健夫、他: <sup>46</sup>Cr のガモフテラーベータ崩壊、同上.

#### 招待講演

[140] 酒井英行:「(d,<sup>2</sup>He)反応による EPR パラドック スの検証実験」、少数粒子系物理学の現状と今後の展 望研究会、2002 年 5 月 24-25 日、高エネルギー加速 器研究機構.

- [141] 関口仁子:「重陽子-陽子弾性散乱測定による三体力 効果の検証」(第9回原子核談話会新人賞講演)、日本 物理学会第58回年次大会、2003年3月、東北学院 大学・東北大学.
- [142] 藤原真琴:冷たい反水素の生成と検出、日本物理学 会第58回年次大会、2003年3月、東北学院大学・東 北大学.
- [143] 櫻井 博儀:理研における中性子過剰核の核分光 現在と将来、物質科学シンポジウム「タンデム領域 の重イオン科学」、日本原子力研究所・物質科学研究 部・加速器管理室、東海村、1月、2003
- [144] 櫻井 博儀: Zero-degree forward spectrometer, ワークショップ「RIビームファクトリーと研究計画」、 理化学研究所、和光市、3月、2003.

(セミナー)

- [145] Makoto C. Fujiwara: "Muon catalyzed fusion with cold thin films", Experimental Physics Seminar, CERN, Geneva, Switzerland, February 10, 2003.
- [146] Miki Shindo: "Experimental search for the  $\eta$ -/ $\omega$ nucleus bound states", FRS users meeting, GSI Darmstadt, Germany, February 12, 2003.
- [147] Makoto C. Fujiwara: "First production and detection of cold antihydrogen atoms", Nuclear Physics Colloquium, No. 548, RCNP Osaka University, March 24, 2003.
- [148] Makoto C. Fujiwara: "First production and detection of cold antihydrogen atoms" KEK Physics-Theory Joint Seminar, KEK, March 26, 2003.
- [149] 藤原真琴:「冷たい反水素原子の生成と検出」、(筑 波大学・物理工学セミナー、2003 年 3 月 26 日).
- (記者発表)
- [150] 「中性子過剰同位元素 新たに3種類発見」、日刊 工業新聞、2002 年8月2日.
- [151] 「新同位元素 3 種類発見」、 日本工業新聞、2002 年 8 月 2 日.
- [152] 「新同位元素を発見」、化学工業日報、2002年8月2 日.
- [153] 「新同位元素 3 種類を発見」、日本経済新聞、2002 年 8 月 19 日.
- [154] 「中性子過剰な同位元素を発見」、原子力産業新聞、 2002 年 8 月 22 日.
- [155] 「新しい同位元素3種類」、科学新聞、2002年9月6 日.
- [156] 「反水素5万個生成」、読売新聞、2002年9月19日.
- [157] 「反水素原子を大量合成」、日本経済新聞、2002年 9月19日.
- [158] 「反水素を大量生成」、朝日新聞、2002年9月19日.
- [159] 「反物質大量生成に成功」、毎日新聞、2002 年 9 月 19 日.
- <その他>
- [160] 櫻井 博儀 訳: 118 番元素の証拠は偽造と判明、B. シュワルツシルド著、パリティ、18,69-72 (2003) 丸善.

## 2.1 駒宮 研究室

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、粒子検出器の開発研究、次世代加速器である電 子・陽電子リニアコライダーの研究開発と、リニア コライダーでの実験の検討も行なっている.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 測実験も行なってきた.

## 2.1.1 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<sup>+</sup>e<sup>-</sup> 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 てきた.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( $e^+ & e^-$ )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、 $e^+ & e^-$ 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 2.1 a 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 2.1 a:  $e^+e^-$  衝突からクォーク対が生成される断面積 の測定値と理論の予言. Wボソン対が生成される断面積は これに足されている. LEP-I と LEP-II や その他の  $e^+e^-$ コライダーのエネルギー領域が示されている.

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<sup>0</sup> 粒子を総数 500 万事象観測し、「統一ゲ-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 (LEP-I).

1995年からは衝突エネルギーを徐々に上げて行き (LEP-II), 2000年には 209GeV に達した. 2000年1 1月に実験が終了し、目下データ解析中である.

## 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<sup>+</sup>e<sup>-</sup> 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 114 GeV 以下の標 準理論で予言されるヒッグス粒子存在が棄却された. LEP-I などでの電弱相互作用に関わる物理量の精密 測定からヒッグス粒子の質量は約200 GeV 以下であ ることが結論されるので、ヒッグス粒子は 114 GeV から 200 GeV の狭い範囲に追い込められた.

## 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 うちー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 質の有力な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 2.1 b). 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、ОРАL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



図 2.1 b: 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 は超対称性理論で必要な 2 種類のヒッグス粒子の真空期待 値 の比  $(\tan \beta = v_2/v_1)$ . 薄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 が重い場合は濃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.

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. L E P-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、L E P-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言が可能となる. 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(図 2.1 c 参照). 2001 年度までの データ解析では OPAL 単独では、Wボソンの質量は  $80.490 \pm 0.065$  GeV (統計誤差と系統誤差の合計)、 と測定されている. LEP 4 実験の結果を統合すると、 Wボソンの質量は  $m_W = 80.412 \pm 0.042$  GeV (統計 誤差と系統誤差の合計)である.

## 電子やクォークの内部構造の探索

更に LEP-II では、電子・陽電子衝突の様々な基本 的過程の精密測定を行ない、「標準理論」を高精度で 検証するとともに、その僅かな破れを見つけ出そうと している。その一つの例として電子・陽電子が消滅 してクォーク・反クオークが生成された事象の生成 断面積の衝突エネルギー依存を図 2.1 a に示す。今ま で内部構造のない素粒子であると考えられている電 子などにもし構造があれば、高いエネルギーでの衝突 ではその内部を構成する粒子同士の衝突になり、散 乱反応が「素粒子」の場合とは異なって観測される。 測定値は「標準理論」の予言値と良く合っている。こ の結果から、電子やクォークなどのサイズに制限がつ き、電子やクォークのサイズは 0.2~1.0×10<sup>-17</sup> cm 以下であることが分かった(適用する理論によってサ イズの上限が異なる).



図 2.1 c: OPAL実験で観測されたWボソンの質量分布 (右図)と対応する事象のトポロジー(左図).上図はW 対の両方のWボソンがクォーク対に崩壊した事象のトポロ ジーと質量の分布. e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> → qq などから来るバックグラ ウンドは質量分布においてWボソンピークの下に見える。 下図はW対の片方のWボソンがクォーク対に崩壊し,もう 一方のWボソンが電子と電子ニュートリノのペア、もしく はミューオンとミューニュートリノのペアに崩壊したとき の事象のトポロジーと質量の分布. この場合はバックグラ ウンドは極めて小さい。

## 2.1.2 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. LEP が到達したエネルギーより も高いエネルギーに到達するためには半径を非常に 大きくする必要があるが, 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・陽電子を向かい会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, 米国などで盛んに続けられている. 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,技術開発を進めて さた. 既に主加速器の殆んど全てのコンポーネント 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,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・陽電子衝突実験は、実験環境がクリーンで ありその過程が単純であるが故に、新粒子の発見が 容易なだけでなく、ひと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<sup>+</sup>e<sup>-</sup> 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。2002年度もJLCに於ける物理 及び測定器の検討を行ない、その実現に向けて内外 の研究者と共に努力を重ねた。

エネルギーアップグレードの検討 (C+X オプション)

JLC 加速器計画が、諸外国の LC 計画と比較して 圧倒的に優れている点は、エネルギー増強の余地が 十分にあることである. すなわち、LEP-IIので詳細 な研究が行なわれたエネルギー領域のすぐ上のエネ ルギーを狙う加速器を直ちに建設し、存在が期待さ れる軽いヒッグス粒子を中心とした研究を行なった 後に、その研究結果を踏まえて加速器の性能を向上 し、超対称性粒子等の研究を目指すというシナリオ を描ける. このシナリオでは、リニアコライダーの初 期は, 到達エネルギーは十分に高くはないが量産や 運転が比較的容易であると考えられる C バンド加速 管 (加速に用いる高周波の周波数が 5.712 GHz) を用 いて確実に実験をスタートする. ヒッグス粒子を中 心とした詳細な研究を行なうことで,その後のアップ グレードの方向性(速やかにエネルギーを上げるべ きか、ビームの強度を上げるべきか、検出器の大幅な 改造を行なうか等)を見極める。最終的には、製作に も運転にも高度な技術を要する X バンド加速管 (加 速に用いる高周波の周波数が 11.424 GHz)を投入し, 1 TeV, ないしは, 1.3 TeV にまで到達する. このシ ナリオを活かすために、加速周波数の異なる C バン ド (5.712 GHz) 加速管と X バンド (11.424 GHz) 加 速管を連結する際の問題点と解決策を探った. 加速 周波数が変わると高周波の波長が変わることに伴い、 荷電粒子束の進行方向の長さを最適化する必要があ る. 検討の結果,異なる加速周波数の加速管を直結し ても、加速後のビームが持つエネルギーの単色性を 維持しつつ,空間分布な広がりを十分に小さくでき ることが分かった. すなわち,将来的には1 TeV を 越える高エネルギーでの実験を行なう準備をしつつ, 早期に建設・実験を開始できる.

### 主線形加速器内でのビーム散乱

開発中のJLC加速器では、主加速器中で残留ガス や熱光子とビームとの散乱によるビームエミッタン スの増大や、散乱粒子がコリメータに衝突すること で生じるバックグラウンドの問題が指摘されている。 現段階で、これらの現象は理解されていない点が多 いため、シミュレーションを通して、加速管内にお けるビーム物理をしっかりと分析し、加速管やバッ クグラウンド遮蔽システムの設計の最適化に有用な 研究結果の獲得をめざしている。

## 2.1.3 LHC 実験におけるブラックホール (BH) 事象の解析に関する研究

Superstring で従来仮定されるプランクスケールよ りも十分に大きく拡がった Large extra dimensions のモデルによれば、LHC 実験の陽子-陽子衝突にお いて、衝突する陽子内の 2 つのパートンが、extra dimensions でのシュバルツシルト半径以下に近づき、 かつその衝突エネルギーが BH の質量よりも大きい ときに BH が生成される。BHの生成断面積は、extra dimensions で定義される重力のプランク質量  $M_p$  及 び extra dimensions の次元数 n の 2 つのパラメータ に依存しており、我々は様々な  $(M_p, n)$  の組み合わ せについて、BH 発生のモンテカルロシミュレーショ ンを行い、LHC 実験での BH 発見の sensitivity や、 その性質の解析についての研究を進めている。

## 2.1.4 BES 実験データを用いた、J/ψの 崩壊過程の研究

これまでに発見された CP の破れは、 $K^0 - \overline{K}^0$  や  $B^0 - \overline{B}^0$  といった、mixing によっておこる、いわば 間接的な CP の破れであった。このような起源とは異 なる、崩壊過程の崩壊振幅を起源とする、直接的な CP のやぶれを探索することは、物理のテーマとし て興味ある 1 分野である。中国の高能研究所 (IHEP) において行われた BES-2 測定器を用いた  $J/\psi$  の崩 壊過程、特に  $J/\psi \rightarrow \Lambda\overline{\Lambda}$  の崩壊過程を用いて、その 解析を行った。また  $J/\psi \rightarrow \Lambda\overline{\Lambda}$  の崩壊分岐率も求め、 統計誤差が 1%という精度の良い結果を得ることが 出来た。これから系統誤差等の更にくわしい解析を 進めている。

## 2.1.5 大気上層部における μ、p、及び He のエネルギースペクトラム測定

宇宙から飛来する一次宇宙線中の陽子、ヘリウム などは地球大気中で大気の原子核と衝突してシャワー を起こし、大気 µ や二次起源陽子、ヘリウムそして 大気ニュートリノなどを生成する。この相互作用を 正確に理解するためには、大気中の各高度における µ、陽子、ヘリウムなどの精密なエネルギースペクト ラムを測定することが非常に重要である。スーパー カミオカンデ実験において観測されたニュートリノ 振動をさらに詳細に解析するためには、精密な大気 ニュートリノの絶対流束が必要であり、その流束計 算には大気と宇宙線との相互作用を正確な把握が不 可欠である。

大気中で生成される µ はその生成、崩壊過程にお いてニュートリノの生成を伴うが、その崩壊確率と エネルギー損失は µ のエネルギーに強く依存する。 従ってその絶対流束とエネルギースペクトラムの形 が重要で、大気各高度においてこれらの粒子の精密 な絶対流束とエネルギースペクトラムを測定し、そ の変化を知れば、大気ニュートリノ流束計算で使用 されているモデルを検証し、計算の正確さを向上さ せることができる。

大気各高度における宇宙線観測はこれまで、地上 や山頂における測定、気球を用いた測定が行われてお り、長時間の測定が可能な地上や山頂(0 km~3 km)、 気球到達高度(~35 km)では精度のよいデータが得 られている。しかし、崩壊による効果が少なく、相 互作用による効果を見る上で非常に重要となる大気 圧で数10 g/cm<sup>2</sup>から気球到達高度に至るまでの領 域においては気球上昇中に測定される短時間のデー タしか存在せず、そのため精度の高いエネルギース ペクトラムはこれまで求められていなかった。

BESS 測定器を用いて 2001 年に行われた飛翔実 験では、高度 37 km 大気圧 4.5 g/cm<sup>2</sup> から 27 km、 30 g/cm<sup>2</sup> の高度領域において 11.3 時間に及ぶ長時 間の観測を行なうことに成功し、この高度領域にお いて、これまでに得られたことのない高精度な大気  $\mu$ 、陽子、ヘリウムのエネルギースペクトラムを得る ことができた。

観測されたエネルギースペクトラムが図 2.1 d、 2.1 e に示してある。陽子については 0.5 GeV から 10 GeV の領域で 8%の精度で、ヘリウムについては 0.5 GeV から 10 GeV の領域で 10%の精度、μにつ いては 0.5 GeV から 10 GeV の領域で 20%の精度で 求められた。



図 2.1 d: BESS-2001 で得られた陽子、ヘリウムのエネ ルギースペクトラム

測定を行なったフォートサムナーでの地磁気カットオフ硬度が 4.2 GV で、硬度がこれ以下の一次宇宙線は地磁気による影響で地球に到達することができない。図 2.1 dの陽子、ヘリウムのエネルギースペクトラムにはこの効果をはっきりと見ることができ、カットオフ付近で急激に流束が減少している。陽子についてはカットオフ硬度以下の領域に大気中で生成される二次起源の陽子流束が見えており、μ流束と同様高度と共に増加している。

図 2.1 eには、大気ニュートリノ流束計算に用い られているのと同じ相互作用モデルを組み込んだシ ミュレーションを用いて計算した大気 µ 流束が実線



で示してある。シミュレーションによる計算値と測 定値はよく一致し、現在大気ニュートリノ流束計算 で用いられている相互作用モデルが実際の相互作用 をよく反映していることが確認された。

シミュレーションによる計算において大きな不確 定要素となっているのが、一次宇宙線の絶対流束、大 気構造、地磁気による一次宇宙線への影響、そして 相互作用の効果である。ミュレーションにおいて入 射させる一次宇宙線としてこの測定で得られた陽子、 ヘリウムのエネルギースペクトラムを使うことで一 次宇宙線の絶対流束、と地磁気による影響は正確に 再現することができる。また飛翔実験中に測定され た大気構造を使用することで、大気構造からの不確 定要素も取り除ける。BESS-2001の測定から得られ たデータは、シミュレーションにおける他の不確定 要素を取り除き、さらに精密に相互作用の効果を評 価していく上で非常に重要で貴重なデータである。

### BESS-TeV 実験

1998年にスーパーカミオカンデ実験において、ニ ュートリノ振動の確実な証拠が世界で初めて発表され たが、この解析をより詳細に行うためには大気ニュー トリノの精密な絶対流束が不可欠である。この大気 ニュートリノの流束を計算するためには親となる陽 子、ヘリウムなどの一次宇宙線流束と、大気ニュー トリノの生成過程である一次宇宙線と大気との相互 作用の正確な理解のために各大気高度における μ粒 子等、大気中で生成される二次宇宙線の流束が必要 である。

BESS 実験では、これまでに一次宇宙線について は約 100 GeV までの精密な流束を測定している。し かしニュートリノ振動の解析にはより高い TeV 付近 のエネルギー領域までの一次宇宙線の流束が必要と される。より高いエネルギーまでの一次宇宙線の精 密な流束を測定するために、中央飛跡検出器をアッ プグレードし、最外層に新しい飛跡検出器を搭載し (昨年度より)、それらの読み出しエレクトロニクス





🛛 2.1 f: 6.5cm

BESS-TeV 実験の結果から期待される陽子スペクトラム

今年度の飛翔実験は10月にカナダ、マニトバ州に おいて行なわれた。改良した BESS 測定器を使い、 ほぼ毎年行なわれて来た宇宙線反陽子の流束の精密 測定とともに、1 TeV 近くまでの高エネルギーー次 宇宙線の絶対流束測定を目的とした。高度38 km で 16時間のデータ収集に成功し、測定器、データテー プ共に無事回収された。測定されたデータは現在解析 中であるが、新たに開発した飛跡検出器が全て、飛行 中全般を通して設計通りの性能を発揮していたこと を確認した。また、運動量分解能がこれまで(BESS-98)の約6倍以上に大幅に向上していることも確認 されている。(図 2.1 g)

<報文>

(原著論文)

- [1] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Single Leptoquark and Squark Production in Electron-Photon Scattering at  $\sqrt{s} = 189$  GeV at LEP, Eur. Phys. J. C23 (2002) 1-11
- [2] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of Z/γ\* Production in Compton Scattering of Quasi-real Photons, Eur. Phys. J. C24 (2002) 1-15
- [3] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of the Hadronic Cross-section for the Scattering of Two Virtual Photons at LEP, Eur. Phys. J. C24 (2002) 17-31



## 図 2.1 g: BESS-TeV の運動量分解能と BESS-98 との比 較。縦軸は面積で規格化。

- [4] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Particle Multiplicity of Unbiased Gluon Jets from  $e^+e^-$  Three-Jet Events, Eur. Phys. J. C23 (2002) 597-613
- [5] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Yukawa Production of a Light Neutral Higgs Boson at LEP, Eur. Phys. J. C23 (2002) 397-407
- [6] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Doubly Charged Higgs Bosons with the OPAL Detector at LEP, Phys. Letts. B526 (2001) 221-232
- [7] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Leptoquarks in Electron-Photon Scattering at  $\sqrt{s}$  up to 209 GeV at LEP, Phys. Letts. B526 (2002) 233-246
- [8] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of the Hadronic Photon Structure Function  $F_2^{\gamma}$  at LEP2, Phys Lett B 533 (2002) 207-222
- [9] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of the Charm Structure Function  $F_2^c$  of the Photon at LEP, Phys Lett B 539 (2002) 13-24
- [10] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Charged Excited Leptons in  $e^+e^-$  Collisions at  $\sqrt{s}$  =183-209 GeV, Phys. Lett. B544 (2002) 57-72
- [11] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Assiciated Production of Massive States Decaying into Two Photons in  $e^+e^-$  Annihilation at  $\sqrt{s}$  of 88-209 GeV, Phys. Lett. B544 (2002) 44-56
- [12] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of Neutral-Current Four-Fermion

Production at LEP2, Phys. Lett. B544 (2002) 259-273

- [13] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Search for Scalar Top and Bottom Quarks at LEP, Phys. Lett. B545 (2002) 272-284
- [14] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Measurement of the b-Quark Forward-Backward Asymmetry around the  $Z^0$  Peak Using an Inclusive Tag, Phys. Lett. B546 (2002) 29-47
- [15] The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al. : Charged Particle Multiplicities in Heavy and Light Quark Initiated Events above the  $Z^0$  Peak, Phys. Lett. B550 (2002) 33-46
- [16] T. Sanuki, M. Fujikawa, K. Abe, K. Anraku, Y. Asaoka, H. Fuke, S. Haino, M. Imori, K. Izumi, T. Maeno, Y. Makida, N. Matsui, H. Matsumoto, H. Matsunaga, M. Motoki, J. Nishimura, M. Nozaki, S. Orito, M. Sasaki, Y. Shikaze, T. Sonoda, J. Suzuki, K. Tanaka, Y. Toki, A. Yamamoto, Y. Yamamoto, K. Yamato, T. Yoshida and K. Yoshimura : "Measurements of Atmospheric Muon Spectra at Mountain Altitude" Phys. Lett. B 541 (2002) 234-242.
- [17] K. Abe, T. Sanuki, K. Anraku, Y. Asaoka, H. Fuke, S. Haino, N. Ikeda, M. Imori, K. Izumi, T. Maeno, Y. Makida, S. Matsuda, N. Matsui, T. Matsukawa, H. Matsumoto, J. W. Mitchell, A. A. Moiseev, J. Nishimura, M. Nozaki, S. OritoJ. F. Ormes, M. Sasaki, E. S. Seo, Y. Shikaze, T. Sonoda, R. E. Streitmatter, J. Suzuki, K. Tanaka, K. Tanizaki, T. Yamagami, A. Yamamoto, Y. Yamamoto, K. Yamato, T. Yoshida, K. Yoshimura : Measurements of Proton, Helium and Muon Spectra at Small Atmospheric Depths with the BESS Spectrometer, Phys. Rev. Lett. B. submitting.
- [18] T. Sanuki "Review of Balloons Muon Measurement in the Atmosphere" Intl. J. of Modern Physics A17 (2002) 1635-1644
- [19] A. Yamamoto, Y. Makida, H. Ohmiya, K. Tanaka, T. Haruyama, T. Yoshida, K. Yoshimura, S. Matsuda, K. Kikuchi, Y. Ootani and S. Mizumaki "A Thin Superconducting Solenoid Magnet for Particle Astrophysics" IEEE Trans. Applied Superconductivity 12 (2002) 438-441
- [20] A. Yamamoto, K. Abe, K. Anraku, Y. Asaoka, M. Fujikawa, H. Fuke, S. Haino, M. Imori, K. Izumi, T. Maeno, Y. Makida, N. Matsui, H. Matsumoto, H. Matsunaga, F. B. McDonald, J. Mitchell, T. Mitsui, A. Moiseev, M. Motoki, J. Nishimura, M. Nozaki, S. Orito, J. F. Ormes, D. Righter, T. Saeki, T. Sanuki, M. Sasaki, E. S. Seo, Y. Shikaze, T. Sonoda, R. Streitmatter, J. Suzuki, K. Tanaka, K. Tanizaki, I. Ueda, J. Z. Wang, N. Yajima, T. Yamagami, Y. Yamamoto, H. Yamaoka, K. Yamato, T. Yoshida and K. Yoshimura : "BESS and Its Future Prospect for Polar Long Duration Flights" Adv. Space Res. 30 (2002) (5)1253-(5)1262

- [21] M. Sasaki, H. Matsumoto, M. Nozaki, T. Saeki, K. Abe, K. Anraku, Y. Asaoka, M. Fujikawa, H. Fuke, S. Haino, M. Imori, K. Izumi, T. Maeno, Y. Makida, N. Matsui, T. Matsukawa, H. Matsunaga, J. Mitchell, T. Mitsui, A. Moiseev, M. Motoki, J. Nishimura, S. Orito, J. F. Ormes, T. Sanuki, E. S. Seo, Y. Shikaze, T. Sonoda, R. Streitmatter, J. Suzuki, K. Tanaka, K. Tanizaki, I. Ueda, J. Z. Wang, N. Yajima, T. Yamagami, A. Yamamoto, Y. Yamamoto, K. Yamato, T. Yoshida and K. Yoshimura : "Progress in Search for Antihelium with BESS" Nucl. Phys. (Proc. Suppl.) B113 (2002) 202-207
- [22] A. Yamamoto, J. Mitchell, K. Abe, K. Anraku, H. Fuke, S. Haino, N. Ikeda, K. Izumi, M. Lee, T. Maeno, Y. Makida, S. Matsuda, N. Matsui, H. Matsumoto, A. Moiseev, J. Nishimura, M. Nozaki, H. Omiya, J. F. Ormes, M. Sasaki, E. S. Seo, Y. Shikaze, J. Suzuki, K. Tanaka, K. Tanizaki, T. Yamagami, Y. Yamamoto, K. Yamato, T. Yoshida and K. Yoshimura : "BESS-Polar:Long Duration Flights at Antarctica to Search for Primordial Antiparticles" Nucl. Phys. (Proc. Suppl.) B113 (2002) 208-212
- [23] M. Motoki, T. Sanuki, S. Orito, K. Abe, K. Anraku, Y. Asaoka, M. Fujikawa, H. Fuke, S. Haino, M. Imori, K. Izumi, T. Maeno, Y. Makida, N. Matsui, H. Matsumoto, H. Matsunaga, J. Mitchell, T. Mitsui, A. Moiseev, J. Nishimura, M. Nozaki, J. F. Ormes, T. Saeki, 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, Y. Yamamoto, K. Yamato, T. Yoshida and K. Yoshimura : "Precise Measurements of Atmospheric Muon Fluxes with the BESS Spectrometer" Astroparticle Phys. 19 (2003) 113-126
- [24] Z. D. Myers, E. S. Seo, J. Z. Wang, R. W. Alford, K. Abe, K. Anraku, Y. Asaoka, M. Fujikawa, M. Imori, T. Maeno, Y. Makida, H. Matsumoto, H. Matsunaga, J. Mitchell, T. Mitsui, A. Moiseev, M. Motoki, J. Nishimura, M. Nozaki, S. Orito, J. F. Ormes, T. Saeki, T. Sanuki, 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 : "Cosmic Ray <sup>1</sup>H and <sup>2</sup>H Spectra from BESS 98" Submitted to Adv. Space Res.
- [25] J. W. Mitchell, S. Orito, A. Yamamoto, T. Yoshida, K. Abe, K. Anraku, Y. Asaoka, M. Fujikawa, H. Fuke, S. Haino, T. Hams, N. Ikeda, M. Imori, A. Itazaki, K. Izumi, M. H. Lee, T. Maeno, Y. Makida, S. Matsuda, N. Matsui, T. Matsukawa, H. Matsumoto, H. Matsunaga, T. Mitsui, A. Moiseev, M. Motoki, J. Nishimura, M. Nozaki, H. Omiya, J. F. Ormes, T. Saeki, T. Sanuki, M. Sasaki, E. S. Seo, Y. Shikaze, T. Sonoda, A. Stephens, R. Streitmatter, J. Suzuki, Y. Takasugi, K. Tanaka, K. Tanizaki, I. Ueda, J. Z.

Wang, Y. Yajima, T. Yamagami, Y. Yamamoto, K. Yamato and K. Yoshimura : "Precise Measurements of the Cosmic Ray Antiproton Spectrum with BESS Including the Effects of Solar Modulation" Submitted to Adv. Space Res.

[26] T. Yoshida, A. Yamamoto, J. W. Mitchell, K. Abe, H. Fuke, S. Haino, T. Hams, N. Ikeda, A. Itazaki, K. Izumi, M. H. Lee, T. Maeno, Y. Makida, S. Matsuda, H. Matsumoto, A. Moiseev, J. Nishimura, M. Nozaki, H. Omiya, J. F. Ormes, M. Sasaki, E. S. Seo, Y. Shikaze, A. Stephens, R. Streitmatter, J. Suzuki, Y. Takasugi, K. Tanaka, K. Tanizaki, T. Yamagami, Y. Yamamoto, K. Yamato and K. Yoshimura : "BESS-Polar Experiment" Submitted to Adv. Space Res.

## (会議抄録)

- [27] S. Komamiya : "Concluding Remarks", International Workshop on Linear Colliders (Aug. 2002) Jeju Island, Korea
- [28] 松田晋弥他: BESS2002 フライト報告宇宙科学研究 所大気球シンポジウム (2003) 96-99.
- [29] 福家英之他:BESS-Polar 用太陽電池システムの三陸 検証実験宇宙科学研究所報告 特集 45 (2003) 37-58.
- [30] K. Abe: New Measurement of Primary Cosmicrays and Atmospheric muons with BESS-TeV Spectrometer, 23rd Intl. Symposium Space Tech. and Sci. (Matsue) (2002) 2060-2066

### (学位論文)

- [31] 倉田 正和:「J/ψからの A I バリオンの生成」, 2003
   年 3 月,(修士論文)
- [32] K. Abe: Measurements of μ, p and He Energy Spectra at Small Atmospheric Depths 博士 (理学) (2003 年 3 月) 東京大学

### <学術講演>

(国際会議)

## 招待講演

- [33] S. Komamiya : "Concluding Remarks", International Workshop on Linear Colliders (Aug. 2002) Jeju Island, Korea
- [34] S. Komamiya : "Summary and Closing", ACFA Linear Collider Symposium (Feb. 2003) Tsukuba, Japan

#### 一般講演

- [35] T. Sanuki "Fundamental data in astroparticle physics from cosmic-ray measurements with BESS" The 34th COSPAR Scientific Assembly (Oct.2002) Houston
- [36] K. Abe "Measurement of atmospheric muons with BESS" The 34th COSPAR Scientific Assembly (Oct.2002) Houston

- [37] K. Abe "A Measurement of μ, p and He Energy Spectra at the Small Atmospheric Depth" The 4th Workshop on "Neutrino Oscillations and their Origin" (Feb. 2003) Kanazawa
- [38] S. Haino "Progress in analysis of high energy primary cosmic-ray spectra measured in BESS-02" The 4th Workshop on "Neutrino Oscillations and their Origin" (Feb. 2003) Kanazawa

一般講演

(国内会議)

招待講演

[39] 駒宮幸男:「物質と時空の謎を探る」,素粒子物理国 際研究センター公開講演(2002年10月)東京大学安 田講堂

一般講演

- [40] 山村 大樹: リニアコライダーにおける電子ビームの 散乱,日本物理学会 (2003 年 3 月) 東北学院大学
- [41] 倉田 正和: J/ψ→ΛΛ 過程の研究, 日本物理学会 (2003 年 3 月) 東北学院大学
- [42] 福家英之: BESS-Polar 用太陽電池システムの三陸検 証実験日本物理学会 (2002 年 9 月) 立教大学
- [43] 山本康史: BESS 搭載用ドリフトチェンバーの開発日 本物理学会 (2002 年 9 月) 立教大学
- [44] 灰野禎一: 高エネルギーー次宇宙線スペクトル測定の ための BESS Tracking System の改良日本物理学会 (2003 年 3 月) 東北学院大学
- [45] 福家英之: BESS 実験による宇宙線反重陽子の探索日 本物理学会 (2003 年 3 月) 東北学院大学
- [46] 安部航: BESS 測定器を用いた大気上層部における宇 宙線流束測定日本物理学会 (2003 年 3 月) 東北学院 大学
- [47] 山本康史:BESS 測定器による大気ミューオンの高 度変化の観測日本物理学会(2003 年 3 月)東北学院 大学
- [48] 松田晋弥: BESS2002 フライト報告大気球シンポジ ウム (2001 年 11 月) 宇宙科学研究所
- [49] H. Fuke "Cosmic-Ray Antimatter and BESS Experiment" The 8th Accelerator and Particle Physics Institute (Feb.200) APPI
- [50] K. Abe "New Measurement of Primary Cosmicrays and Atmospheric Muons with BESS-TeV Spectometer" The 23rd Intl. Symposium Space Tech. and Sci. (May.2002) Matsue

(セミナー)

- [51] 駒宮幸男: 「リニアコライダーの推進」, リニアコラ イダー研究会総会 (2002 年 10 月) 東京大学山上会舘
- [52] 駒宮幸男:「リニアコライダー計画の現状と将来」, (2003 年 3 月)日本原子力産業会議
- [53] 駒宮幸男:「素粒子・宇宙・リニアコライダー」, (2003 年3月) 電源開発石川火力発電所

- [54] **安部航**: Measurements of  $\mu$ , p and He Energy Spectra at Small Atmospheric Depths 宇宙線研究所セミナー (2003 年 3 月) 東京大学宇宙線研究所
- [55] 浅岡陽一:宇宙線反陽子の起源と太陽風モジュレー ション宇宙惑星科学グループ拡大セミナー (2002 年 4月)東京大学

## 2.2 蓑輪 研究室

蓑輪研究室では、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。

## 2.2.1 ボロメータを用いた暗黒物質の直接 検出実験

宇宙の質量の大部分を占めると考えられている暗 黒物質の検出及び性質の詳しい解明は、素粒子、宇 宙物理にまたがる重要課題となっている。我々の研 究室では、この暗黒物質の有力候補であり、超対称 性理論から予言される粒子であるニュートラリーノ の直接検出を目的とした検出器の開発を行っている。 通常、ニュートラリーノの直接検出には原子核との弾 性散乱が利用されるのであるが、期待されるイベン トレートは $1 \sim 10^{-4}$  counts/day/kg と極めて低く、 また原子核に付与される反跳エネルギーも~10 keV と低い為、検出器としては、低バックグラウンド・低 しきい値なものが必要である。我々は、そのような 要求を満たす検出器としてボロメータの開発を行っ ており、宇宙線の影響を避ける為、大深度の地下実 験室である宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設で 測定を行っている。本研究は、筑波大学大塚洋一教 授との共同研究である。

ニュートラリーノと原子核の弾性散乱は、スピン に依存しない項とスピンに依存した項の和で表され、 どちらの項からの寄与がどの程度優勢であるのかは、 超対称性理論のパラメータ依存であり予言できない。 我々は、スピンに依存した相互作用による検出を目的 として、この相互作用に大きな断面積をもうとされ ている<sup>19</sup>Fを含む結晶であるフッ化リチウム(LiF) 及び フッ化ナトリウム (NaF) をボロメータの吸収 体として使用している。これまでに我々は、神岡に おける LiF ボロメータを用いた測定から、ニュート ラリーノと陽子および中性子とのスピンに依存した カップリング  $(a_{\rm p}, a_{\rm n})$  に対して、それぞれ  $|a_{\rm p}| < 32$ および  $|a_n| < 133$  という制限  $(30 \,\mathrm{GeV/c^2} \, \mathfrak{O}$ ニュー トラリーノに対して)を与えている。この結果は、ス ピンに依存した散乱断面積に対して最も厳しい制限 をつけている NaI 検出器を用いた英国の UKDMC 実験 から許されていた  $a_{\mathrm{p}}$ - $a_{\mathrm{n}}$  平面の領域の一部を新 しく排除するものである。この UKDMC 実験は、同 じく NaI 検出器を用いてスピンに依存しない相互作 用をする暗黒物質の直接検出に成功したという報告 を行った イタリアの DAMA 実験とほぼ同程度の感 度を有している。

我々は、さらに  $a_p-a_n$  平面に対する制限を厳しく する為、Li よりも大きな中性子スピン期待値をもつ ことから  $a_n$  に対する感度が良いと期待される Na を 含むフッ化物である NaF を吸収体とするボロメータ の開発を行った。この NaF ボロメータを用いて神 岡で行われた測定結果から導かれる  $a_p-a_n$  平面への 制限を図 2.2 a に示す。図 2.2 a の縦軸はニュートラ リーノと中性子とのカップリング、横軸はニュートラ リーノと陽子のカップリングを表している。太い実 線の外側が我々の実験で排除された領域である。比較 の為、太い点線で LiF ボロメータを用いて既に得ら れている制限を、細い破線で UKDMC 実験による制 限を示す。この実験から、 $50 \text{ GeV/c}^2$ のニュートラ リーノに対してそれぞれ  $|a_p| < 16$  および  $|a_n| < 68$ という制限が得られた。図 2.2 a より、 $10 \text{ GeV/c}^2$ の ニュートラリーノに対して、UKDMC 実験の付けた 制限をさらに厳しくし、 $50,100 \text{ GeV/c}^2$ のニュート ラリーノに対して LiF で得られている制限をさらに 狭めている事が分かる。



図 2.2 a: ニュートラリーノと核子のカップリングに関 する制限曲線 (90 % C.L.)。太い実線が今回 NaF を 用いて得られた結果を、太い点線が LiF を用いてこ れまでに得られている結果を、細い破線が UKDMC 実験によって得られている結果を表す。それぞれの 曲線の外側が実験によって排除される範囲である。

## 2.2.2 有機単結晶シンチレーターを用いた 暗黒物質検出器の開発

暗黒物質は銀河ハローにも付随していると考えられているが、地球は銀河の回転運動として 220km/sで動いている。このことに起因した地球上での"暗黒物質の風"を捕らえるため、方向に感度を持った検出器の開発を行っている。

われわれは、重荷電粒子の入射方向により発光効 率が異なる有機単結晶シンチレーターに注目し、ま ずスチルベンについて実験を開始した。

スチルベンシンチレーター中での炭素反跳の精密測定 暗黒物質の検出には原子核との弾性散乱を用いる が、スチルベンに含まれる原子核のうち暗黒物質に 感度のある炭素の反跳方向による発光量の変化を精 密に測定する必要がある。そこで、東京工業大学原 子炉工学研究所の井頭教授の協力のもと 3.2MV ペ レトロン加速器での<sup>7</sup>Li(p,n)<sup>7</sup>Be反応による中性子 ビームを利用した測定を行った。

また、昨年度までに確立した<sup>252</sup>Cfからの中性子 を利用する方法でも測定した。30keV-1MeVまでの スチルベン中の炭素反跳のクエンチングファクター を(図2.2b)に示す。水素反跳と同様、反跳方向が結 晶軸 c'に対し0°のときが最大、90°のときが最小、 変化の割合は7%ほどであることを確認した。また 低エネルギーではクエンチングファクターが増加す ることを確認し、これを定量的に理解した。



図 2.2 b: スチルベン C 反跳によるクエンチングファ クター

## 実験計画

具体的な暗黒物質探索は、スチルベンの光出力の スペクトルの日変化を見ればよい。クエンチングファ クターの測定結果に基づき、暗黒物質に対する方向 感度を見積もるシミュレーションを行った。その結 果を(図 2.2 c)に示す。暗黒物質の風向きに対する スチルベンの結晶軸の向きによって(a)のようなス ペクトルの違いが現れる。とくに 5keV 以上のでの カウントレートの差を捕らえることは暗黒物質存在 の決定的な証拠になると考えられる(b)。暗黒物質の 風向きは白鳥座の方向である。したがって、北緯 36 度の神岡では結晶軸を北極方向から水平方向に 6 度 傾けて置けば、地球の自転により結晶軸と風向きの 角度が最も変化すると考えられる。

極低バックグラウンド光電子増倍管の開発

実験を直接制限することになる PMT の放射線不 純物を可能な限り取り除くべく、極低バックグラウ ンド PMT の開発を東京大学宇宙線研究所神岡実験 施設と共同で行っている。本年度は暗電流対策など を行った。

ナフタレンシンチレーター

発光効率の角度依存性がより大きい結晶であれば、 暗黒物質の風に対する感度はより高くなる。ナフタ



図 2.2 c: スチルベン光出力の日変化

レンは有機単結晶で発光量の異方性が最も大きいと 予想される。しかし、昇華する性質や製造が難しいと いう問題がある。本年度はウクライナのクロスベー ター社とナフタレン結晶のサイズ、ハウジング材の 仕様などを決定した。

神岡地下実験室でのパイロットラン

実際に暗黒物質探索実験を行う神岡地下実験室で、 バックグラウンドレベルを見積もるためのパイロッ トランを開始した。ボロメーター実験で使用した  $\gamma$ 線シールド(銅、鉛)、中性子シールド(ポリエチレ ン)を利用し、ボロメーター実験と比較できる様にし ている。バックグラウンドのうち特に、原子核反跳 をおこす、中性子は非常に問題になる。しかし、神岡 地下実験室の環境中性子はこれまでに詳細に測定さ れていない。スチルベンは光出力の時定数が dE/dxの大きい粒子ほど大きく、非常に優れた中性子- $\gamma$  弁 別能力を持っている。中性子によるスチルベン発光 効率は詳細に測定してあるので、環境中性子のエネ ルギーを再構成できると期待される。

## 2.2.3 軟γ線リピーターからのアクシオン 検出実験

アクシオン (axion) は QCD での CP 対称性を保 証するために考えられた中性の擬スカラーボソンで ある。少しだけ質量をもち物質やゲージ場とはほと んど相互作用しないものと考えられている。

アクシオン模型からはアクシオン質量は一意に定 まらず、広い範囲の質量を取りうるが、1eV 近辺で は太陽がよいアクシオン源となることが知られてい る。我々はこの太陽からくるアクシオンを捕らえる ためにアクシオンヘリオスコープを開発した。これ は中心磁場4T、長さ2.3mの超電導磁石とX線検 出器をそなえ、東西南北ほぼ360°,上下±28°の範 囲で自由に天体を追尾できるようになっている。

2002 年度はこの装置を用いて γ線バーストに伴っ

て発生するアクシオンを捕らえる目的で軟 $\gamma$ 線リピー ター SGR 1900+14 を 5 月 20 日から 8 月 9 日にか けて計 84 日にわたって観測した。SGR 1900+14 は 度 $q\gamma$ 線バーストを起こしている天体でその正体は マグネター (magnetar) と呼ばれる通常の中性子星 より 2 桁強い磁場 (~10<sup>11</sup> T)を伴った若い中性子星 だと考えられている。アクシオンは相互作用が弱い ため、その発生源となる天体は高温、高密度である ことが望ましい。 $\gamma$ 線バーストはそのような場とし て都合がよいと考えられる。また、マグネターでは その強力な磁場のためアクシオンの発生に都合のよ い条件がそろっていると考えられる。

しかし残念ながら観測期間中に  $\gamma$ 線バーストは起らなかった。そのかわり SGR1900+14 からの定常アクシオン放射について上限値を与えた。アクシオンのエネルギー分布として平坦な連続スペクトルを仮定し、アクシオン光子結合定数  $g_{a\gamma\gamma} = 10^{-10} \text{GeV}^{-1}$ ,アクシオン質量  $m_a < 0.03 \text{ eV}$ として求めた SGR 1900+14 からのアクシオンフラックスの上限値は  $d\Phi_a/dE_a < 4.8 \times 10^{13} \text{keV}^{-1} \text{s}^{-1} \text{cm}^{-2}$  (95% C.L.)であった。これは太陽以外の天体からのアクシオンフラックスに関して直接観測から得られたもっとも低い値であるが、その距離 (D = 5.2 kpc)のためにマグネターやアクシオンの理論に影響をおよぼしうるような感度には至っていない。

アクシオンヘリオスコープは設置されていた旧1 号館の取り壊しに伴い解体された。現在は新しい観 測に向けて新1号館地下にて再構築中である。

<報文>

## (原著論文)

- Y. Inoue, T. Namba, S. Moriyama, M. Minowa, Y. Takasu, T. Horiuchi, A. Yamamoto: Search for sub-electronvolt solar axions using coherent conversion of axions into photons in magnetic field and gas helium, Phys. Lett. B536 (2002) 18–23, astro-ph/0204388.
- [2] K.Miuchi, M.Minowa, A.Takeda, H.Sekiya, Y.Shimizu, Y.Inoue, W.Ootani, and Y.Ootuka: First results from dark matter search experiment with LiF bolometer at Kamioka Underground Laboratory, Astroparticle Physics 19 (2002) 135–144, astro-ph/0204411.
- [3] Y. Shimizu, M. Minowa, H. Sekiya, Y. Inoue: Directional scintillation detector for the detection of the wind of WIMPs, Nucl. Instr. and Meth. A496 (2003) 347–352, astro-ph/0207529.
- [4] Hiroyuki Sekiya, Makoto Minowa, Yuki Shimizu, Yoshizumi Inoue, Wataru Suganuma: Measurement of Anisotropic Scintillation Efficiency for Carbon Recoils in a Stilbene Crystal for Dark Matter Detection, Submitted to Physics Letters B.

### (国内雑誌)

[5] 蓑輪 眞:「Axion Helioscope 実験」, 高エネルギー ニュース, Vol.21, Num.1, April/May 2002. [6] 蓑輪 眞: 「物理科学,この1年 素粒子物理 — 非加 速器物理」,パリティ、Vol.18,2003 年 1 月号.

### (学位論文)

- [7] 竹田敦: フッ化ナトリウムボロメータを用いた暗黒物 質探索実験、Dark Matter Search Experiment with NaF Bolometer、平成 15 年 3 月博士 (理学)、東京 大学大学院理学系研究科物理学専攻.
- [8] 一木輝久: 軟ガンマ線リピーター SGR 1900+14からのアクシオン探索実験、平成15年3月修士(理学)、 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻.
- (著書)
- [9] 蓑輪 眞,他 共著、パリティ編集委員会編 寿岳 潤 監修:『宇宙論はいま』、パリティブックス、丸善 (2002)

<学術講演>

(国際会議)

### 招待講演

[10] K. Miuchi, M. Minowa, Y. Inoue, W. Ootani, Y. Ootuka, Y. Shimizu, H. Sekiya, A. Takeda: First results from LiF bolometer at Kamioka, Invited talk given at the 4th International Workshop on the Identification of Dark Matter (IDM2002), York, England, 2–6 September 2002.

### (国内会議)

一般講演

- [11] 竹田敦: ボロメータを用いた神岡地下実験室での暗 黒物質探索実験 — LiF 及び NaF を吸収体に用いた 測定、日本物理学会 2002 年秋季大会、立教大学池袋 キャンパス 2002 年 9 月 14 日.
- [12] 清水雄輝:暗黒物質検出実験に用いるアントラセン・ スチルベンシンチレーターの研究、日本物理学会2002 年秋季大会、立教大学池袋キャンパス2002年9月 14日.
- [13] 関谷洋之:有機単結晶シンチレーターを用いた暗黒物 質用方向感度検出器の開発、日本物理学会2002年秋 季大会、立教大学池袋キャンパス2002年9月14日.
- [14] 一木輝久: 超強磁場天体からのアクシオン探索実験、 日本物理学会 2002 年秋季大会、立教大学池袋キャン パス 2002 年 9 月 15 日.
- [15] 竹田敦: ボロメータによる暗黒物質探索実験、宇宙線 研究所共同利用研究発表会、東京大学宇宙線研究所 (柏キャンパス)、2002 年 12 月 2 日.
- [16] 関谷洋之:スチルベンシンチレーターを用いた暗黒物 質探索、第9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2003年2月20日.
- [17] 関谷洋之:スチルベンシンチレーターによる暗黒物質 方向感度検出器の較正、日本物理学会第58回年次大 会、東北学院大学2003年3月31日.

招待講演

- [18] 蓑輪 眞:AXION 実験、京都大学基礎物理学研究所研究会『実験・観測にもとづく素粒子統一描像の構築―
   21 世紀の情報発信基地としての日本 ― 』、京都大学基礎物理学研究所 2002 年 8 月 23 日.
- (セミナー)
- [19] 蓑輪 眞: 加速器を使わない素粒子実験、集中講義、名 古屋大学大学院理学研究科、2003 年 1 月 29-31 日.
- [20] 蓑輪 眞: AXION 望遠鏡、名古屋大学大学院理学研 究科談話会、2003 年 1 月 30 日.

## 2.3 相原研究室

当研究室は、高エネルギー粒子加速器を用いた素粒子 物理学実験を専門としている。近年は、高エネルギー 加速器研究機構(KEK)のBファクトリーを使った 実験(Belle実験)を中心に活動しており、この実験 で、今年度は、2名の博士と2名の修士が誕生した。 昨年度の博士論文2編には、『第4回(2002年度)高 エネルギー物理学奨励賞』[79]と『第19回(2002年 度)井上研究奨励賞』[80]が与えられた。また、当研 究室は、茨城県東海村で建設が進む J-PARC施設の 50GeV 陽子シンクロトロンを用いたニュ-トリノ振 動実験の準備を開始し、ビームラインの設計や検出 器の設計を行っている。さらに、超高エネルギー電 子陽電子線形衝突型加速器(リニアコライダー)のた めのビームおよび測定器のシミュレーションも行っ ている。

## **2.3.1** 中性 *B* 中間子と反中性 *B* 中間子混 合による *CP* 非対称の精密測定

Belle 実験グループは、2001 年 7 月、B 中間子に おける粒子・反粒子非対称 (CP 非対称)を発見した。 当研究室は、シリコンバーテックス検出器 (SVD1) の製作とそのデータ解析を担当し、CP非対称発見に おいて中心的役割を果たした。今年度は、データ量 の増加を受けて、CP 非対称度の測定のさらなる精密 化をはかった。図 2.3 aは, 1999年4月から 2002年 7月までの3年3ヶ月におよぶ実験で得られた8500 万個の B 中間子・反 B 中間子ペアのうち、ペアの どちらかが  $J/\psi K_S$  をはじめとする CP 固有状態に 崩壊した 3000 個を使って作ったグラフである. 横軸 は、ペアの一方が崩壊してから、他方が崩壊するま での時間 (ピコ秒) で, データの黒丸(と実線)は, B 中間子が目的の反応に崩壊した場合, 白丸(と破線) は,反B中間子が崩壊した場合をプロットしたもの で,この崩壊をひき起こした弱い力が CP 対称なら ば,重なるはずのものである.実験データは,両者 の間の明らかな違いを示している.この差は $\sin 2\phi_1$ と呼ばれるパラメータで表現される。( $\sin 2\phi_1 = 0$ は、CP 対称を意味し、 $\sin 2\phi_1 = 1$ , or -1 は、CP非対称度が最大であることを意味する。)我々は、こ のデータから、

### $\sin 2\phi_1 = 0.719 \pm 0.074(\text{stat}) \pm 0.035(\text{sys})$

を得た。この測定値は、昨年度の結果より約2倍ほど 精度が向上している。この精密測定値は、K中間子 などにおける測定から間接的に得られた $\sin 2\phi_1$ の制 限値とよく一致しており、この結果によってクォーク の世界における CP 非対称が、小林・益川理論(CP非対称の起源は、3世代のクォーク対の混合にある とする理論)によって記述されることが確実となり、 40年来の謎の解明に終止符が打たれた[27,48]。



図 2.3 a: Belle 検出器で得られた, B 中間子と反 B 中間子の CP 固有状態への崩壊時間分布(単位:ピコ 秒 10<sup>-12</sup>s). 黒丸と白丸の分布の差が CP 非対称を 意味する.

## 2.3.2 中性 B 中間子の π<sup>+</sup>π<sup>-</sup> 崩壊における CP 非対称の証拠

 $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ は、*CP* 非対称の出現が期待される 崩壊モードの一つであるが、分岐比が 10<sup>-6</sup> と  $B^0 \rightarrow J/\psi K_S$  と比べて 2 桁小さく、かつグルーオンを含む プロセスからの寄与もあり、*CP* 非対称かどうか決 定することができなかった。我々は、8500 万個の *B* 中間子・反 *B* 中間子ペアから得られた約 150 個の  $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ 崩壊を含むペアを用いて *CP* 非対称パ ラメータの解析を行い、この崩壊においても *CP* 対 称性が破れている証拠をはじめて得た。

証拠の一つは、 $B^0 \rightarrow J/\psi K_S$ 同様、崩壊時間の分 布が、 $B^0$ 中間子と反 $B^0$ 中間子では違っていること である。もう一つは $B^0$ 中間子と反 $B^0$ 中間子が同数 ずつ生成されたにもかかわらず、反 $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ の 数が $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ の数より多いことである。図 2.3 bは崩壊時間分布で、データポイントは崩壊時間ご とに観測された崩壊事象の数である。 $B^0$ 中間子と反  $B^0$ 中間子からの崩壊がそれぞれ と〇で表されて いる。もし *CP*称性が成り立っているならふたつの カーブは同じになるはずである。ふたつのカーブの 形と面積に明らかな違いが見られ、この崩壊で*CP* 対称性が破れていることを示している。その結果、 *CP*非対称パラメータ*S*と*A*として、

$$\mathcal{S} = -1.23 \pm 0.41 (\text{stat.})^{+0.08}_{-0.07} (\text{syst.}),$$

 $\mathcal{A} = +0.77 \pm 0.27 (\text{stat.}) \pm 0.08 (\text{syst.}).$ 

CP 対称性が成り立っているにもかかわらず、この 観測結果が得られる確率はわずかに 1 万分の 7 しか なく、 $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ における CP 非対称の確かな証 拠と言える [2, 42, 49]。



図 2.3 b: B0 + -( )と反 B0 + -( ) 事象の崩壊時間分布。時間の単位はピコ秒 (10<sup>-12</sup> 秒)。

## 2.3.3 B中間子の時間発展の精密測定

前年度に引き続き、大量の B 中間子ペアの時間発展を測定することによって、荷電および中性 B 中間 子の寿命の精密測定を行った。さらに、 $B^0 - \overline{B}^0$  混合のパラメータ  $\Delta m_b$  の測定値も更新した。これらの値は、いずれも現在世界で最も精度のよい測定値である [6, 21, 48]。

## **2.3.4** *B* 中間子の非常に稀な崩壊の測定

超対称性など標準理論を越える新しい物理の出現 が期待される  $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$ プロセス(図 2.3 c 参照) の検出に成功し、その分稀比を

$$Br(B \to X_s \ell^+ \ell^- = (6.1 \pm 1.4^{+1.4}_{-1.2}) \times 10^{-6}$$

と決定した。この値は、新しい物理からの寄与に強い 制限を与えると同時に、この崩壊モードを使い新しい 物理を探索する可能性を世界に先駆けて示した [28]。



 $\boxtimes 2.3 \text{ c: } b \to s\ell^+\ell^-$  electroweak penguin process.

## Belle 実験用第二世代シリコンバー テックス検出器の完成

上に述べたような B 中間子の物理の研究には,B 中間子の崩壊点を精度よく決定できるシリコンバー テックス検出器 (SVD1)が,非常に重要な役割を果た した。我々は SVD1を上回る精度を持つ第二世代シリ コンバーテックス検出器 SVD2を完成した [50,51]。 SVD2 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 (20Mrad までの耐性)を持つ IC(VA1-TA)や新しいシリコンストリップセンサー を用いて、B 中間子崩壊点の位置測定精度を現在の 約 100µm から 70µm へ向上させることができる.ま た,レイヤー数を3 層から4 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.また、VA1-TA はトリガー機能を有しており、B 中間子反応データのより効率良い収集が可能である。 SVD2 は 2003 年夏にビーム衝突点に設置される。

## 2.3.6 JHFnu 長期線ニュートリノ振動実 験用陽子ビームラインの設計

JHF での 50GeV 陽子ビームは、KEK PS の約 50 倍もの強度を持つ。したがって、ビーム損失による ビームライン上に配置された電磁石等への影響を詳 細に見積もることが重要となる。特に神岡方向ヘビー ムを向ける機能のある Arc section では、多数の超 伝導磁石が配置され、それらの quench を防止するた めには、ビーム損失を 1W/m 以下に押える必要があ る。そこで我々は、GEANT4を用いたビームライン シミュレーションを構築し、ビームラインにおけるエ ネルギー損失の影響を見積もった。ビームのエネル ギーの誤差、配置する磁石の位置の誤差、および磁 場の誤差が与える影響についても詳細に研究を行っ た。また同時に、ビームハローを削り、Arc section でのエネルギー損失を抑えるために設置されるコリ メーターのデザインを行い、シミュレーションを用 いた詳細な研究を行った [68]。

## 2.3.7 陽子ビームプロファイルモニターの 開発

J-PARCでの50GeV陽子ビーム、およびスーパー カミオカンデ測定器を用いた次世代長期線ニュート リノ振動実験(JHFnu)では、Off Axisニュートリノ ビームを使用する。Off Axisビームを用いた場合、 陽子ビームとそこから生成されたニュートリノビー ム、双方の方向を精度よく測定し、正確に制御する ことが重要となる。当研究室は、陽子ビームを制御 するための(破壊型と非破壊型)ビームプロファイ ルモニターを開発している。破壊型では、ビームラ イン上に金属のストリップまたはワイヤーを設置し、 二次電子放出を利用して、プロファイルを測定する。 非破壊型では、残留ガスがビームで電離されること により生成された電子を収集して、プロファイルを 測定する。現在、これらのモニターの設計を行い、試 作機を製作中である。

## 2.3.8 ハドロン生成の不定性がニュートリ ノビームに与える影響の研究

長期線ニュートリノ振動実験で用いるニュートリ ノビームは、陽子ビームを標的に入射し、そこで生成された二次粒子 (主に  $\pi^{\pm}$ ) が崩壊することにより 作られる。したがって、生成されたニュートリノビームのエネルギーおよび角度分布を正確におさえるた めには、陽子ビームから生成された二次粒子のエネ ルギー分布と角度分布の測定が必要となる。我々は、 ハドロンの生成に関する不定性がニュートリノビー ムに与える影響について、シミュレーションを用いて 研究を行った。その結果、 $\pi$  粒子スペクトルの 5%の 不定性が、ミューオンニュートリノスペクトルの不 定性 1.4%に伝播することが分かった。JHFnu 実験 では、電子ニュートリノの appearance(出現)を発 見し、世代間の混合角 $\theta_{13}$ の測定を目指す。従って、 ニュートリノビーム中の電子ニュートリノのスペク トルの測定も重要である。電子ニュートリノは主に K 粒子とμ粒子の崩壊によって生成される。K 粒子 と µ 粒子の生成断面積に関しては測定実験結果が十 分でなく、いくつかの生成モデルが存在する。モデ ル間で最大 20%の違いがあり、μ 粒子の不定性が電 子ニュートリノフラックスに与える影響は7%、K粒 子による影響は15%となった。従って、K粒子によ る不定性を減少させることが重要であることが明ら かになった。

## 2.3.9 ハイブリッド 光検出器を使った水チ ェレンコフ検出器の開発

JHFnu 実験は、これまでのどの実験よりも高い ニュートリノフラックスを得ることができる。が、 同時に、これは、前置ニュートリノ検出器として水 チェレンコフ検出器を採用した場合の大きな問題と なる。例えば、ターゲットから 280m の距離に測定 器を置くと、水 100 トン、1 バンチあたりおよそ 1 事象が予想され、従来よりも優れた時間分解能の光 センサーが必要となる。当研究室では浜松ホトニク スと共同で、Hybrid Photodetector (HPD)を開発し ている。光電面から出た光電子を電場で加速し、ア バランシェダイオード (AD) に打ち込みさらに増幅 するもので、今年度は5 インチと 13 インチの HPD を試作した。



### 図 2.3 d: 13 インチ Hybrid Photodetector の試作品

## 2.3.10 リニアコライダー Beam Delivery Systemの検討

重心系エネルギー 500GeV 以上での電子陽電子衝 突実験を可能にする超高エネルギー線形衝突型加速器 リニアコライダーの加速器および実験の R&Dをして いる。特に, Beam Delivery System とよばれる加速 器の最終部のシミュレ - ション,加速器と測定器のイ ンターフェイスの設計を行っている [46, 55, 66, 68]。

## 2.3.11 リニアコライダー実験用半導体中 央飛跡検出器の開発

当研究室では、Belle 実験 SVD の経験をいかして、 リニアコライダー実験用半導体中央飛跡検出器の研 究開発を進めている。米国 SLAC でのリニアコライ ダー実験(SLD 実験)の経験から、リニアコライ ダーでの中央飛跡検出器は、ビームハローに起因す るバックグランドを多大に受けることが明らかになっ た。したがって、中央飛跡検出器は、バックグランド に対して堅固な検出器であることが要求される。-方、これまでの加速器実験の経験から、半導体を用 いた検出器は高いバックグランド環境の下で、安定 して動作することが知られている。これらの経緯よ り、欧米の研究機関、大学と協同で半導体中央飛跡 検出器の研究開発を行っている。我々は、GEANT4 を用いた測定器シミュレーションにより、半導体中 央飛跡検出器の基本的な性能について、研究を行っ た。その結果、ストリップ型半導体を用いた中央飛 跡検出器では、測定器の occupancy が約1%レベル、 と非常に低いことが明らかになった。また、加速器 に由来したバックグランドの影響もシミュレーショ ンを用いて見積もり、半導体検出器が高いバックグ ランドの環境に適していることが確認された。また、 高い磁場中で検出器を動作させた場合、低運動量の 荷電粒子の再構成が困難となる。このような場合で も、中央飛跡検出器とバーテックス検出器を組み合 わせることにより、低運動量の荷電粒子の再構成が

可能となることを示した [47, 53, 56, 58]。

## 2.3.12 リニアコライダーを使ったトップ クォーク物理の研究

エネルギーフロンティア実験であるリニアコライ ダー実験では、様々な物理成果が期待される。その 中でも、比較的低エネルギー(350GeV以上)から 成果のあがる実験として、標準理論のヒッグス粒子 に関する物理、およびトップクォークの物理があげ られる。特にトップクォークの物理は、Tevatron で の発見以来、350GeV以上のエネルギー領域で、必 ず成果があがることが確約されている。

我々は、500GeV リニアコライダーでのトップク オーク精密測定実験として、トップクォーク生成に 関する anomalous coupling 測定の研究を、シミュ レーションを用いて行った [54]。電子・陽電子対消滅 からトップ・反トップクォークが対生成される事象 の終状態は、トップクォークから崩壊して生成され た Wボソンの崩壊によって、次の3種類に分けられ る:1)2レプトン+2ジェット、2)1レプトン+ 4ジェット、3)6ジェット。今回、1レプトン+4 ジェット事象、および6ジェット事象を用いて解析を 行った。ここで、1レプトン+4ジェット事象での トップクォークの電荷はレプトンの電荷を用いて、6 ジェット事象では、トップクォークから崩壊した В 中間子の電荷を用いて同定した。結果、100fb<sup>-1</sup> に 対する sensitivity( $1\sigma$ ) は Axial-vector 部分に対して  $F_{1A}^{\gamma} \sim 0.01 \ F_{2A}^{\gamma} \sim 0.02 \ F_{1A}^{Z} \sim 0.01 \ F_{2A}^{Z} \sim 0.05$ となった。ここで、それぞれの sensitivity は標準理論 での coupling の大きさに対する相対値である。

<報文>

(原著論文)

- R. Abe *et al.*, "Status Of The Belle Svd Detector," Nucl. Instrum. Meth. A **478**, 296 (2002).
- [2] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], "Study Of Cp-Violating Asymmetries In B0 → Pi+ Pi- Decays," Phys. Rev. Lett. **89**, 071801 (2002).
- [3] J. Kaneko *et al.*, "Improvement Of Radiation Hardness Of Double-Sided Silicon Strip Detector For Belle Svd Upgrade," IEEE Trans. Nucl. Sci. 49, 1593 (2002).
- [4] K. Hara *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement Of The B0 Anti-B0 Mixing Parameter Delta(M(D)) Using Semileptonic B0 Decays," Phys. Rev. Lett. **89**, 251803 (2002).
- [5] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], "Study of three-body charmless B decays," Phys. Rev. D 65, 092005 (2002).
- [6] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], "Precise measurement of B meson lifetimes with hadronic decay final states," Phys. Rev. Lett. 88, 171801 (2002).

- [7] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of  $B+- \rightarrow p$  anti-p K+-," Phys. Rev. Lett. **88**, 181803 (2002).
- [8] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of mixing-induced CP violation in the neutral B meson system," Phys. Rev. D 66, 032007 (2002).
- K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of chi/c2 production in B meson decay," Phys. Rev. Lett. 89, 011803 (2002).
- [10] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], "Search for charmless two-body baryonic decays of B mesons," Phys. Rev. D 65, 091103 (2002).
- [11] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], "Measurements of branching fractions and decay amplitudes in B  $\rightarrow$  J/psi K\* decays," Phys. Lett. B **538**, 11 (2002).
- [12] S. Nishida *et al.* [Belle Collaboration], "Radiative B meson decays into K pi gamma and K pi pi gamma final states," Phys. Rev. Lett. **89**, 231801 (2002).
- [13] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of anti-B0  $\rightarrow$  D(\*)0 p anti-p," Phys. Rev. Lett. **89**, 151802 (2002).
- [14] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of chi/c2 production in two-photon collisions," Phys. Lett. B 540, 33 (2002).
- [15] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of double c anti-c production in e+ e- annihilation at s<sup>\*\*</sup>(1/2) approx. 10.6-GeV," Phys. Rev. Lett. **89**, 142001 (2002).
- [16] S. K. Choi *et al.* [BELLE collaboration], "Observation of the eta/c(2S) in exclusive  $B \rightarrow K K(S) K$ pi+ decays," Phys. Rev. Lett. **89**, 102001 (2002) [Erratum-ibid. **89**, 129901 (2002)].
- [17] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of the decay  $B0 \rightarrow D+-D^*-+$ ," Phys. Rev. Lett. **89**, 122001 (2002) [arXiv:hep-ex/0206014].
- [18] A. Gordon *et al.* [Belle Collaboration], "Study of  $B \rightarrow$  rho pi decays at Belle," Phys. Lett. B **542**, 183 (2002) [arXiv:hep-ex/0207007].
- [19] K. Abe *et al.* [Belle collaboration], "Studies of the decay  $B+- \rightarrow D(CP)$  K+-," Phys. Rev. Lett. **90**, 131803 (2003) [arXiv:hep-ex/0207012].
- [20] R. S. Lu *et al.*, "Observation of  $B+- \rightarrow$  omega K+- decay," Phys. Rev. Lett. **89**, 191801 (2002) [arXiv:hep-ex/0207019].
- [21] T. Tomura *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of the oscillation frequency for B0 - anti-B0 mixing using hadronic B0 decays," Phys. Lett. B 542, 207 (2002) [arXiv:hep-ex/0207022].
- [22] K. F. Chen *et al.*, "Measurement of CP-violating parameters in  $B \rightarrow eta$ ' K decays," Phys. Lett. B **546**, 196 (2002) [arXiv:hep-ex/0207033].
- [23] A. Drutskoy *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of  $B \rightarrow D(*)$  K- K(\*)0 decays," Phys. Lett. B **542**, 171 (2002) [arXiv:hep-ex/0207041].

- [24] K. Hara *et al.* [Belle Collaboration], "Mesurement of the B0 - anti-B0 mixing parameter Delta(m(d)) using semileptonic B0 decays," arXiv:hep-ex/0207045.
- [25] P. Krokovny *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of D/s+ K- and evidence for D/s+ pi- final states in neutral B decays," Phys. Rev. Lett. **89**, 231804 (2002) [arXiv:hep-ex/0207077].
- [26] B. C. Casey *et al.* [Belle Collaboration], "Charmless hadronic two-body B meson decays," Phys. Rev. D 66, 092002 (2002) [arXiv:hep-ex/0207090].
- [27] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], "Improved measurement of mixing-induced CP violation in the neutral B meson system," Phys. Rev. D 66, 071102(R) (2002) [arXiv:hep-ex/0208025].
- [28] J. Kaneko *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of the electroweak penguin process  $B \rightarrow X/s$  l+ l-," Phys. Rev. Lett. **90**, 021801 (2003) [arXiv:hep-ex/0208029].
- [29] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], "Study of charmless B decays to three-kaon final states," arXiv:hep-ex/0208030.
- [30] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of the inclusive semileptonic branching fraction of B mesons and |V(cb)|," Phys. Lett. B 547, 181 (2002) [arXiv:hep-ex/0208033].
- [31] N. Gabyshev et al. [Belle Collaboration], "Study of exclusive B decays to charmed baryons at Belle," Phys. Rev. D 66, 091102 (2002) [arXiv:hepex/0208041].
- [32] F. Fang et al., "Measurement of branching fractions for  $B \rightarrow eta/c K(*)$  decays," Phys. Rev. Lett. **90**, 071801 (2003) [arXiv:hep-ex/0208047].
- [33] K. Abe *et al.*, "A measurement of the rate of wrong-sign decays  $D0 \rightarrow K+$  pi-," arXiv:hep-ex/0208051.
- [34] K. Inami *et al.* [Belle Collaboration], "Search for the electric dipole moment of the tau lepton," Phys. Lett. B 551, 16 (2003) [arXiv:hepex/0210066].
- [35] A. Satpathy *et al.* [Belle Collaboration], "Study of anti-B0  $\rightarrow$  D(\*)0 pi+ pi- decays," Phys. Lett. B **553**, 159 (2003) [arXiv:hep-ex/0211022].
- [36] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], "Measurement of branching fractions and charge asymmetries for two-body B meson decays with charmonium," Phys. Rev. D 67, 032003 (2003) [arXiv:hepex/0211047].
- [37] N. C. Hastings *et al.* [Belle Collaboration], "Studies of B0 anti-B0 mixing properties with inclusive dilepton events," Phys. Rev. D 67, 052004 (2003) [arXiv:hep-ex/0212033].
- [38] N. Gabyshev *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of anti-B0  $\rightarrow$  Lambda/c+ anti-p decay," arXiv:hep-ex/0212052.

- [39] K. Abe *et al.* [BELLE Collaboration], "Study of time-dependent CP-violating asymmetries in b → s anti-q q decays," Phys. Rev. D 67, 031102 (2003) [arXiv:hep-ex/0212062].
- [40] P. Krokovny *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of anti-B0  $\rightarrow$  D0 anti-K0 and anti-B0  $\rightarrow$  D0 anti-K\*0 decays," Phys. Rev. Lett. **90**, 141802 (2003) [arXiv:hep-ex/0212066].
- [41] H. Tajima *et al.*, "Proper-time resolution function for measurement of time evolution of B mesons at the KEK B-factory," arXiv:hep-ex/0301026.
- [42] K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], "Evidence for CP-violating asymmetries  $B0 \rightarrow pi+pi$ - decays and constraints on the CKM angle phi(2)," arXiv:hep-ex/0301032.
- [43] M. Z. Wang *et al.* [Belle Collaboration], "Observation of B0  $\rightarrow$  p Antilambda pi-," arXiv:hep-ex/0302024.
- [44] S. K. Swain *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of branching fraction ratios and CP asymmetries in  $B+- \rightarrow D(CP)$  K+-," arXiv:hep-ex/0304032.

### (会議抄録)

- [45] H. Aihara, "Results From The Current Experiments: Babar, Belle, Cleo," Eur. Phys. J. directC 4S1, 27 (2002).
- [46] H. Aihara, M. Iwasaki and K. Tanabe, "Study of backgrounds at JLC IR," arXiv:hep-ex/0303015.
- [47] M.Iwasaki, "Full Simulation Studies of the Silicon Tracker for the Linear Collider Detector" [hepex/0303017]

### (学位論文)

- [48] 博士論文, 戸村 友宣: Study of Time Evolution of B Mesons at the KEK B Factory.
- [49] 博士論文,中平武: Study of CP Asymmetry in the Neutral B Meson Decays to Two Charged Pions.
- [50] 修士論文,魚崎 直彦:Construction and Performance of the Upgraded Silicon Vertex Detector for the Belle Experiment.
- [51] 修士論文,山下泰: Data Acquisition System for the Belle Silicon Vertex Detector Upgrade.

### <学術講演>

(国際会議)

### 招待講演

- [52] T. Tomura: Results of Bd oscillation at Belle experiment, International workshop on Heavy Quarks and Leptons, 27 May - 1 June 2002, Vietri sul Mare, Salerno, Italy
- [53] M. Iwasaki: Full-Simulation Studies of the SI Tracker, Santa Cruz Linear Collider Retreat, June 27–29, 2002.

- [54] M. Iwasaki: Study of Top-quark production and decay vertices at LC, *ibid*.
- [55] H. Aihara: Designing Linear Collider Inbteraction Region, The 5th ACFA Workshop on Physics and Detectors at Linear Collider, July 10–12, 2002, Tokyo.
- [56] M. Iwasaki: Full simulation study for the Linear Collider Silicon Tracker, *ibid.*
- [57] H. Aihara: A Study of Backgrounds at JLC-IR, International Workshop on Linear Colliders (LCWS2002), August 26-30, 2002, Jeju Island, Korea.
- [58] M. Iwasaki: Full simulation studies for of the Silicon Tracker, *ibid.*
- [59] T. Tomura: Rare Hadronic B Decays and Direct CPV from Belle and BaBar, XXXVIIth Rencontres de Moriond on Electroweak Interactions and Unified Thories, March 15-22, 2003, Les Arcs, France.
- [60] T. Nakadaira: CP Violation in  $B^0 \to \pi^+\pi^-$  at Belle, *ibid*.

### (国内会議)

## 招待講演

- [61] 岩崎 昌子: Detectors for the Future Linear Collider Experiments, 研究会「リニアーコライダー用最終集 束レンズ」平成14年6月14日, KEK.
- [62] 戸村 友宣: Belle 実験における CKM angle φ<sub>1</sub> の測 定,科研費特定領域研究会「質量起源と超対称性物理 の研究」2003 年 3 月 4 日, 筑波大学.
- [63] 中平武: Belle 実験における CKM angle  $\phi_2$  の測定, *ibid.*

### 一般講演

- [64] 戸村 友宣: KEK B ファクトリー実験における CP 非対称パラメータ sin 2φ1 の測定, 日本物理学会 2002 年秋季大会, 9月 13-16日, 立教大学.
- [65] 横山 将志: Observation of CP Violation in the B Meson System Using  $B^0 \to J/\psi K_L$  Decays, *ibid*.
- [66] 田邊 健治: リニアコライダーにおける Beam Delivery System の Simulation Study, *ibid*.
- [67] 中平武: Measurement of CP asymmetry in  $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$  decays with the Belle detector at KEK asymmetric-energy  $e^+e^-$  collider, 日本物理学会 第58回年次大会, 2003年3月28-31日, 東北学院 大学
- [68] 田邊 健治: GEANT4 を用いた Beamline の Simulation Study, *ibid*.

その他

[69] 岩崎 昌子: Simulation studies for the Future Linear Collider Experimentsm, 名古屋大学物理学科セ ミナー, 4月26日.

- [70] 相原 博昭: 質量起源とBファクトリーの物理,大阪 大学大学院理学研究科集中講義(6月 5-7 日)
- [71] 相原 博昭:物理談話会「B中間子の時間発展」6月 7日,大阪大学理学部.
- [72] M. Iwasaki: Full-Simulation Studies of the SI Tracker, SLAC Linear Collider Detector Seminar, July 2, Stanford, California, USA.
- [73] 横山 将志: Observation of CP violation in  $B \rightarrow J/\psi K_L$  decays at Belle experiment 京都大学物理学 第二教室セミナー、2002 年 11 月 8 日
- [74] 岩崎 昌子: リニアーコライダー実験と最先端測定 器の開発,奈良女子大学大学院特別セミナー(11月 15日)
- [75] H. Aihara, Recent Results from Belle, Lawrence Berkeley National Laboratory Reserach Progress Meeting Seminar, Nov. 19, 2002. Berkeley, CA.
- [76] K. Tanabe: Simulation study of Linear Collider Beam Delivery System, 9th KEK-SLAC International Linear Collider Study Group (ISG9) Meeting, December 12, 2002.
- [77] 横山 将志: Observation of CP Violation in the B Meson System at Belle Experiment, 日本大学素粒 子論研究室コロキウム, 2003 年 1 月 15 日, 日本大学.
- [78] M.Iwasaki: Status report on the Asian Solid State Tracking R&D, Tri-Regional LC Tracker TV meeting Amsterdam-FNAL-SLAC-KEK-Korea, March 31, 2003.

## (受賞)

- [79] 横山 将志:第4回 (2002 年度) 高エネルギー物理学 若手奨励賞 "Observation of Large *CP* Violation in the Neutral *B* Meson System Using  $B^0 \rightarrow J/\psi K_L$ Decay"
- [80] 樋口 岳雄:第 19回 (2002 年度) 井上研究奨励賞 "Observation of CP Violation with  $B^0$  Meson Decaying to the  $J/\psi K_S$  State" 2001 年 7 月

## 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。

これまでの研究では、ソリトン、非線形波動、光 学ソリトン、厳密に解ける模型、結び目理論、幾何 学的模型、1次元量子系、確率的拡散モデル、ラン ダム行列、高分子膜と液晶、ボース・アインシュタ イン凝縮などを考察してきた。以下では、本年度の 研究テーマを大別して説明する。

## 3.1.1 ボース・アインシュタイン凝縮

トラップされたボース・アインシュタイン凝縮にお ける有限サイズ効果

系の統計力学的な性質を議論する際、適当な熱力 学的極限を考えるのが一般的である。一方で現実の 実験のように粒子数が有限な状況では厳密な意味で の相転移は生じず、熱力学量にも熱力学的極限を採 用した無限系からのずれが生じる。トラップされた 中性原子のボース・アインシュタイン凝縮について その有限効果による補正を考察した。

有限系の解析には、状態和を単純に積分で置き換 えずに、数値的に足しあげるか、適当なパラメータ による展開により近似式を得る手法がある。我々は、 指数関数の複素周回積分による表式を用いることで 状態和を計算する際に有用な和公式を導出し、よく 知られた調和型も含めたより一般のベキ型ポテンシャ ルに対して有限効果の補正を計算することに成功し た。有限系での転移温度を凝縮相の割合が消失する 点で定め、無限系で求められた転移温度との比較の 結果以下のことがわかった。(1)有限効果は転移温 度を常に引き下げる。(2)補正は全粒子数に対して 空間次元のみで決まるべキ的な依存性を持つ。(3) トラップの非等方性は有限効果を強める。また、同 様の手法により有限効果を含めた状態密度の表式も 得られており、他の熱力学量もこの状態密度を用い た積分により容易に計算できる。[28]。

アルカリ原子気体を用いたボース・アインシュタ イン凝縮(BE 凝縮)の実現以来、粒子間相互作用を ともなうボース多体系の研究は統計力学・物性物理 学において主要なテーマの一つとなっている。その 中でも興味深い実験として、1)「スピン自由度を伴 うBE 凝縮の実現」と、2)「周期トラップ中に閉じ 込められたボース気体の超流動 - 絶縁体転移」があ る。これら2つの実験には、いずれも光学トラップ を用いて実現されたというところに技術的な共通点 がある。このことから、近い将来にスピン自由度を 伴うボース粒子系による超流動 - 絶縁体転移の実現 が期待され、スピン自由度がこの転移現象にどのよ うな影響を与えるかは興味深い問題だと思われる。

我々はこの系をスピン自由度をともなうハバード 模型に帰着し、平均場近似を用いて超流動 - 絶縁体 転移条件を調べた。その際、外部磁場の存在にとも なう基底状態の変化が転移条件に大きな影響を与え ることから、外部磁場の効果を考慮に入れた上で転 移条件を一般的に導出した [10, 21]。その結果、反 強磁性状態においては filling factor の偶奇の違いに よって転移の起こり易さが異なってくること、超流 動 - 絶縁体転移が外部磁場の変化のみによって生じ うること、強磁性状態においてはスピン自由度のな い場合を再現していること、が示された。

## 3.1.2 量子多体系

## ベーテ仮説積分方程式の解法

Lieb-Liniger は、1次元 $\delta$ 関数気体の基底状態は、 準粒子の運動量分布関数に対する積分方程式 (L-L 積 分方程式) で記述されることを示した。この結果は 非常に有名であるが、どのように解くかについては あまり研究が行われていない。特に、弱い相互作用 の場合は、難問として知られている。この方程式の 解法として、ベキ級数展開法による方法を提唱した [4, 5]。Lieb-Liniger の論文に導出なしに与えられた 解を導くとともに、次のオーダーの厳密な表式を求 めることができた。展開パラメータを再規格化する ことにより、摂動展開における発散を繰り込むとい う興味深い数理構造が明らかになった。これらを有 限温度の場合に拡張することが、1つの目標である。 その初期的解析として、熱的ベーテ仮説法で得られる Yang-Yang(Y-Y)積分方程式を解析した。L-L 積 分方程式と同様に、ベキ級数展開法を用いて、準粒 子エネルギー密度に対する Y-Y 方程式を解くことに 成功した。

### XXX 模型の有限温度解析

量子可積分系と呼ばれる解析が最も進んでいる一 群の系においても、厳密に解析的に熱力学的量を計 算する事は極めて困難であり、現在知られている方 法としては熱力学的ベーテ仮説法(TBA)と量子転 送行列法 (QTM) の 2 つのみしか解析方法はなかっ た。しかし、そのどちらにも、計算できる物理量が 少ない、数学的厳密性に欠ける、等の問題点が存在 していた。特に、その解析途中に現れる、ストリン グ仮説と呼ばれる仮定は広く知られていながら、そ の数学的裏付けはいまだなされていなかった。この 様に、量子可積分系であっても、有限温度解析には 多くの困難が残されているのが現状である。

そこで、我々は、数学的に厳密にできる事、一般 性を持って多くの物理量・量子可積分系に適応できる 事、の2点を目的として新しい方法論を構築してい る。我々はその具体例として、連続系で最も単純な 関数型ボース系の自由エネルギーを導出した [7]。 さらに、束縛状態のある中では最も単純な XXX 模 型における自由エネルギーも出した [6,8]。この解析 は多変数の複素平面上において変数同士が相関を持 つ積分経路における多重積分に帰着してしまう事が 扱う上での困難であった。そこで、Bethe 方程式にパ ラメーターを加える事で自然な積分経路の変形を導 コーシーの積分定理の多変数拡張を用いる事 入し、 で、単純な積分経路における多重積分と同等である 事を示した。これによって、この多重積分の評価が 関数型ボース系と XXX 可能にした。結果として、 模型それぞれの自由エネルギーの表式として、TBA とまったく同じ表式をこの方法で厳密に得た[6,7]。 さらに、それぞれの系において、クラスター展開の 展開係数の任意次数での表式を示した [7,8]。 さら に、ストリング仮説が正しいと思われる結果を導出 する傍証を示した。具体的には、XXX 模型における 展開係数の表式の中に、ストリング仮説において直 観的に導入された関係式が埋め込まれている事を発 見した [8]。注目すべき点は、模型の特異性を必要と せず Bethe 方程式を一般的に扱って解析を行った所 にある。さらに、解析されている物理量においても、 数少ない解析的性質のみしか要求していないため他 の物理量にも適用可能であると考えられる。 このよ うに、我々は、量子可積分系における有限温度解析 として、数学的に厳密で、多くの物理量・量子可積 分系に適応できる方法を確立しつつある。

## XXZ 模型の多点相関

XXZ 模型において、絶対0度におけるN点の隣接 するスピン間の任意の相関が N 重積分で書く事がで きる事は良く知られた事実である。しかし、この表 現には物理的に扱おうとした場合に次のような問題 がる。まず、この被積分関数はそれぞれの積分変数が 互いに非常に強く相関しており、それ以上の代数的 解析は困難である。さらに、数値的解析においても、 N=4 ですでに有効数字が一桁でるかどうかといった 状態で、N > 4 では数値計算では桁さえ保証できな くなる。他方この積分表示の代数的解析は、XXX 模 型の場合には最近若干進んでる。具体的には、この N 重積分はリーマンの 関数の多項式になるという 予想がある。さらに、N=4までは、その 関数の多 項式を具体的に導出されている。しかし、あくまで、 XXX 模型のみでしかこの様なきれいな結果は得られ ていなかった。

我々は、XXZ 模型においても、この積分表示が同 様に変形される事を示した。具体的には、被積分関 数に相関のある多重積分を1重積分(XXX 模型への 極限でリーマンの 関数になるような積分)の多項 式で書ける事が自然に予想される事を見付た。そし て、N=3 までを具体的にそのような多項式を導出し た[9]。近年、多点相関の満たす方程式(qKZ 方程式) の解析の立場から、形式的ではあるが、同様の議論 が出てきており、異なるコミュニティーとの刺激に よる大きな進歩のきざしを見せている。

## 3.1.3 ランダム行列理論とその応用

### 量子細線の輸送現象と局在

不規則系、メゾスコピック系の輸送・局在現象に おいて、系の詳細によらない普遍的な現象が知られ ている。量子細線と呼ばれる擬一次元系では、その ような現象を解析する際用いられる手法の一つに Dorokhov-Mello-Pereyra-Kumer (DMPK) 方程式 を用いる方法がある。DMPK 方程式は系の透過係数 の不純物分布の細線の長さに対する微分方程式であ り、ランダム行列理論と密接に関連している。

我々は左と右に進むチャンネルの数が異なるという特異な量子細線についての研究を行なった。このような系は Quantum Railroad と呼ばれ、これまで数値的に調べられていたものである。まず我々はこのような量子細線は3つのユニバーサリティークラスに分類できることを示した。これまで研究されていたのはそのうちの1つのクラスについて DMPK 方程式を導出し、それを用いて輸送・局在現象を解析した。[29,43] 結果は以下の通りである。

- 通常の量子細線は長さが十分長くなるとコンダ クタンスが0に指数関数的に減衰するが、この 場合チャンネルの数が多い方向へのコンダクタ ンスについては指数関数的に減衰するがある一 定値まで減衰すると減衰が止まる。
- チャンネルの差の効果がコンダクタンスを弱め 局在長を短くする働きがある。

この結果は以前の数値的な研究を支持するものである。

非交差ランダムウォーク、確率モデルとランダム行列

ー次元の多体のランダムウォークで互いに交差し ないという条件がついたものをvicious walk という。 vicious walk は界面のダイナミクスを記述するモデ ルとして、M.E.Fisher によって導入された。最近 Forrester、Guttmann、Baik らにより vicious walk とヤング図との対応を介して、walker とランダム行 列の固有値とが深く関連していることが明らかになっ ている。 このような背景のもとで、我々は vicious walkの モデルをフックヤング図に基づいて拡張しランダム 行列との対応について考察した。[11, 27]

その結果、一番端の walker の動いた距離が適当 なスケーリングのもとで、ランダム行列のガウシア ンユニタリーアンサンブル (GUE)の最大固有値の分 布(Tracy-Widom distribution)と一致することを 示した。またこのモデルの特別な場合と様々な確率 モデルとが数学的に等価であることを示した。

3.1.4 非平衡統計物理

無限系における非平衡現象

温度や化学ポテンシャルの異なる二つの熱浴を接 触させると、熱平衡状態から遠くはなれた非平衡状 態がつくられる。特に、この初期状態から到達する 定常状態は、非平衡定常状態と呼ばれ、近年注目を あつめている。我々は、XX-スピンモデルおよび格 子上の自由フェルミオンモデルにおいて、この設定 の下での非平衡現象の研究を作用素環の手法を用い て行った。まず、非平衡定常状態を特徴付ける試み として、熱力学の変分原理により、非平衡定常状態 は、長距離相互作用を持つ有効ハミルトニアンにつ いての熱平衡状態と見ることが出来ることを示した。 [14] 次に、このモデルにおいて、非平衡定常状態/ と至る過程が、あるスケーリング則に従うことを明 らかにした。[15],[16]. このスケーリング関数は、初 期状態に依存するが、有限温度の場合は必ずしも単 調とは限らないという興味深い結果を得た。さらに、 フェルミオン系について、熱平衡状態は巨視的に安 定であるのに対し、非平衡定常状態は不安定である こと、そして、それは詳細釣り合いの欠如によるも のであることを示した。

## 1次元非平衡モデル

1次元格子上で、相互作用及び左右非対称にラン ダムホッピングする粒子の多体系を考える非対称単 純排他過程(Asymmetric Simple Exclusion Process) は、定常状態に緩和した後も一定の粒子の流れを生 じているという意味で非平衡なモデルである。

このモデルの定常状態は様々な物理量が解析的に 表せることが知られており、特に粒子流や粒子密度 といったバルク量は分配関数に相当する量によって 書き表される。我々は、境界から粒子の出入りを許 す系において、分配関数を積分表示する手法をパラ メータの数を増やした形で拡張し、系のサイズを大 きくする熱力学極限での積分の振舞いから相図を得 た。またこの系で、ホッピングが左右対称になる極 限において様子が大きく変わることが知られていた が、そのつながり方はよく判っていなかった。我々 は、具体的に分配関数を有限にする正しい極限を見 つけ、粒子流に対するスケーリング形を書き下した。 [22, 32] 3.1.5 ソリトン理論・力学系

南部-ハミルトン系

南部-ハミルトン系はハミルトン系の拡張であり、 相空間上の体積を保存するという性質を持つ。その 古典的性質はよく調べられているが、フェルミオン を含む場合は考えられていなかった。そこで、一般 の超多様体上で括弧積が満たすべき性質を調べ、次 数付きの南部括弧積を定義した。またいくつかの超 南部括弧の例を与えた [13]。さらに、超南部-ポアッ ソン代数が、自然に拡張された BV 代数を定めるこ とを示した。

## セルオートマトン

セルオートマトンは生物的な進化・増殖や結晶成 長といったさまざまな分野で用いられるモデルであ る。このうち、ソリトン的な振る舞いをもつ「箱玉 の系」と呼ばれるものがあり、KdV 方程式や戸田方 程式といった可積分方程式と密接な関係がある。わ れわれはこうした箱玉の系に代表される一連の「離 散型ソリトン方程式」の数理構造についての総合報 告を行った [17]。

## 3.1.6 量子計算と量子情報

## 量子多体系のエンタングルメントの性質

エンタングルメントと呼ばれる非局所的量子相関 は、古くはEinstein, Podolsky, Rosen (EPR) によっ て量子論のパラドックスとして提案されたものであっ たが、現在では量子情報処理を行うために必須の資 源と考えられており、同時に量子論の根本に多くの 新しい理解を与えている。それ故、エンタングルメ ントの特徴付け・定量化は大きな関心事である。し かし、量子2体系の場合の性質は研究が進んでいる のに比べ、量子コンピュータ内などで活用され、ま た量子相転移など際だった量子的振舞いをも引き起 こしている量子多体系一般の場合は、多くの困難の ため今後の重要な課題として残っている。

我々は、エンタングルメントを持つ状態とそれを 持たない状態の間にある双対性に着目すると、エン タングルメントを量子2体系・多体系を問わず系統 的に分類できることを発見した[12, 19, 20]。この双 対性に付随した立体行列式(hyperdeterminant)など はエンタングルメントを識別する有効な指標となり、 量子多体系には異なる種類のエンタングルメントを 持つ様々なクラスがあることを示した。特に、2体 系の場合はエンタングルメントは強弱を比較し得て 全順序を構成するのと対照的に、多体系の場合に異 なるエンタングルメントを持つクラスがどのように 半順序を構成するか例解した。さらに、非局所性を 最大限に持つ状態「cat 状態」は、2体系では一般的 な(最大次元の)クラスに含まれたが、多体系では通 常大変稀なクラスに含まれることなど、量子多体系 のエンタングルメントの著しい特質を明らかにしつ つある。

### 量子探索アルゴリズムの幾何構造

量子コンピュータは我々の身近な古典コンピュー タをはるかに凌駕する能力を発揮し得る。全くソートされていないN 個の探索状態からある一つの「当たり」の状態を捜し出すのには、古典コンピュータではO(N)の計算量を要するが、1996年に提案された量子探索アルゴリズムは、量子コンピュータ上で最も効率的な探索をし $O(\sqrt{N})$ で必ず成功する。その代数的演算は良く理解されていたが、どうして効率が良いのか幾何学的描像はなかった。

我々は、量子系の純粋状態の幾何構造を複素射影 空間と捉え、量子探索の幾何学的特性を調べた [20]。 一般に量子探索は、当たりのすべての可能性にうま く対応した初期状態を選び、そこからの最短経路 (測 地線)となるようにアルゴリズムを構成することに よってのみ最適となり、これら全てオリジナルと計 算量が等しい事を示した。さらに、このアルゴリズ ムが活用する多体系エンタングルメントの量の時間 変化を評価し、アルゴリズムの最適性との関連を議 論した。エンタングルメントの量が活用し得る最大 値に達しているかよりも、それが時間と共に(最短経 路のダイナミクスに対応して)前半で作られ後半で 消費されるといった「山登り・山下り」の構造をし ていることが重要であるを示した。

## 3.1.7 結び目理論

### 体積予想

量子群の発見以降、多彩な量子結び目不変量が提 出されてきたが、こうした量子不変量の幾何学的な 理解は全くなされていなかった。この手がかりとさ れるのが「体積予想」、つまり、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、という予想である。我々 は色つき Jones 型多項式と漸近的振る舞いが一致す る結び目不変量を提出し、漸近形を支配する鞍点方 程式と双曲四面体の貼り合わせ方程式とが一致する ことを示し、双曲完全性についても同様に議論した [1]。また、さまざまな結び目について漸近極限を数 値的に調べ、普遍的な対数補正項が存在することを 発見した [18]。これにより保型形式と不変量との関 わりが期待される。[2]

<報文>

(原著論文)

- K. Hikami: Hyperbolic structure arising from a knot invariant II. completeness Int. J. Mod. Phys. B 16, 1963–1970 (2002)
- [2] K. Hikami: Volume conjecture and asymptotic expansion of q-series, to appear in Exp. Math.

- [3] A. D. Lorenzo, L. Amico, K. Hikami, A. Osterloh, and G. Giaquinta: Quasi-classical descendeants of disordered vertex models with boundaries Nucl. Phys. B 644, 409–432 (2002)
- [4] M. Wadati: Solutions of the Lieb-Liniger Integral Equation, J. Phys. Soc. Jpn. 71 (2002) 2657-2662.
- [5] T. Iida and M. Wadati: Solutions of the Yang-Yang Integral Equation, J. Phys. Soc. Jpn. in press.
- [6] G. Kato and M. Wadati: Direct Calculation of Thermodynamic Quantities for Heisenberg Model, J. Math. Phys. 43 (2002) 5060.
- [7] G. Kato and M. Wadati: Bethe ansatz cluster expansion method for a one-dimensional δ-function Bose gas, Chaos, Solitons & Fractals 15 (2002) 849.
- [8] G. Kato and M. Wadati: A direct calculation of the free energy from the Bethe ansatz equation for the Heisenberg model, J. of Math. Phys., in press.
- [9] G. Kato, M. Shiroishi, M. Takahashi, K. Sakai: Next Nearest-Neighbor Correlation Functions of the Spin-1/2 XXZ Chain at Critical Region, J. Phys. A, letter in press.
- [10] N. Uesugi and M. Wadati: Superfluid Mott Insulator Transition of Spinor Bose Gases with External Magnetic Fields, to appear J. Phys. Soc. Jpn. **72**, No. 5 (2003).
- [11] K. Hikami and T. Imamura: Viciou Walkers and Hook Young Tableaux, J. Phys. A: Math. Gen. 36 (2003) 3033.
- [12] A. Miyake: Classification of multipartite entangled states by multidimensional determinants, Phys. Rev. A 67, 012108 (2003).
- [13] M. Sakakibara: Notes on the super Nambu bracket, Prog. Theo. Phys. **109** (2003) 305.
- [14] Y. Ogata: Nonequilibrium properties in transverse XX chain, Phys. Rev. E 66, 016135 (2002)
- [15] Y. Ogata: Diffusion of the magnetization profile in the XX model, Phys. Rev. E 66, 066123 (2002)
- [16] Y. Ogata: Emptiness Formation Probability of XX-chain in Diffusion Process, Chaos, Soliton & Fractals, to appear

### (会議抄録)

- [17] K. Hikami: Quantum discrete soliton equations, in "Kowalevski Property", edited by V. B. Kuznetsov (CRM Proceedings and Lecture Notes, AMS, 2002)
- [18] K. Hikami: Logarithmic correction of Kashaev's invariant, RIMS Kokyuroku 1279, 40–66 (2002)
- [19] A. Miyake and M. Wadati: Multipartite entanglement and hyperdeterminants, Quant. Info. Comp. 2 (special), 540-555 (2002).

### (国内雑誌)

[20] 和達,三宅:量子計算と量子情報の幾何学,数理科学 473(11月号), 21-27 (2002). (学位論文)

- [21] 上杉: A Theoretical Study of Spinor Bose Gases. (修士論文)
- [22] 内山: Analysis of a one-dimensional nonequilibrium model (修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [23] G. Kato: Free energy of the isotropic Heisenberg 1/2 spin-chine (Recent Advances in Theory of Quantum Integrable System International Workshop,LAPTH Annecy-le-Vieux France, 2003 年 3 月)
- [24] A. Miyake and M. Wadati: Classification of multipartite entanglement by the hyperdeterminant (ERATO Workshop on Quantum Information Science 2002 "EQIS02", Tokyo, Japan, 2002 年 9 月).

### (国内会議)

招待講演

- [25] 和達: 量子情報と量子計算, (佐々木シンポジウム、東 京大学物性研究所、2002 年 10 月)
- [26] 三宅: エンタングルメントの分類(第1回 JST 異分野研究者交流領域探索研究会"量子情報科学",木更津 かずさアーク,2003年1月).
- [27] 今村: フックヤング図に基づく Viciou Walk の拡張 (統計力学におけるランダムウォークとその周辺、神 戸大学、2003 年1月)

### 一般講演

- [28] 家田、和達: トラップされたボース・アインシュタイン凝縮における有限サイズ効果(日本物理学会第57回年次大会、中部大学、2002年9月)
- [29] 今村、和達: 乱れた量子細線の輸送現象と局在 II (同 上)
- [30] 樋上、今村: Vicious walkers and hook Young tableaux (日本物理学会 第 58 回年次大会、東北大 学、2003 年 3 月)
- [31] 三宅: 量子多体系エンタングルメントの性質(同上)
- [32] 内山、笹本、和達: 非対称性の弱い1 次元非対称単純 排他過程の定常状態 (同上)
- [33] 三宅, 和達: Multipartite entanglement classified by the hyperdeterminant (6th Quantum Information Technology Symposium "QIT6", 京大会館, 2002 年 5月).
- [34] 三宅, 和達: Multipartite entanglement classified by the hyperdeterminant II (7th Quantum Information Technology Symposium "QIT7", 学習院大学, 2002 年 11 月).

[35] K. Hikami: q-series identity and volume conjecture (South Ural State Univ., August 2002)

- [36] K. Hikami: Hyperbolic structure and quantum knot invariant (Chelyabinsk State Univ., August 2002)
- [37] 加藤: XXX スピン模型の自由エネルギーを導出する 1 つの方法 (東京無限可積分系セミナー、東大数理科 学研究科、2002 年 7 月)
- [38] 三宅: Multipartite entanglement classified by the hyperdeterminant (東京大学総合文化 清水研, 2002 年7月).
- [39] A. Miyake: Classification of multipartite entanglement by the hyperdeterminant (ERATO 量子計算 プロジェクト, 2002 年 8 月).
- [40] A. Miyake: What can the classification of entanglement tell us? (ERATO 量子計算プロジェクト, 2003年2月).
- [41] A. Miyake: Classification of multipartite entanglement by hyperdeterminants (University of Hannover, 2003 年 3 月).
- [42] A. Miyake: Classification of multipartite entanglement by hyperdeterminants (Max-Planck Institute for Quantum Optics, 2003 年 3 月).
- [43] 今村: Transport and Localization Properties in Disordered Quantum Wire (東京工業大学 2002 年 5 月)

(セミナー)

3.2 塚田研究室

密度汎関数法に基づく新しい数値計算手法の開発 を行い、表面・界面における電子励起ダイナミクスや 非接触原子間力顕微鏡におけるナノ力学・画像化機 構の解明を行っている。また、カーボンナノチュー ブ、原子細線、分子架橋系の量子輸送現象の基礎理 論を研究している。これに関連し、電気伝導に付随 して実現されうる新規機能を持つ分子デバイスの探 索、デザインを行っている。

## 3.2.1 ナノ構造の電気伝導の第一原理計算

原子細線や分子架橋の電気伝導特性を解析する手法 として Lippmann-Schwinger 方程式の数値解を用い た第一原理計算法を開発整備している。半無限のジェ リウム電極の間に、ノルム保存型の非局所擬ポテンシ ャルで表された原子を挟むモデルを考え、Lippmann-Schwinger 方程式をグリーン関数を用いて解くことに よって系の電子状態を求める。その状態を、固有チャ ネル分解によって個々の伝導チャネルの成分に分解し て、伝導特性を解析する。この方法を用いて、金属原 子細線のコンダクタンスや電流電圧特性、および伝導 チャネルを解析した。また、単分子の電気伝導度に対 する電極の接合の影響を解析するために、金電極に接 合されたベンゼン分子の、電極の吸着サイトに対する 電気伝導度の変化を解析した。[1, 12, 31, 32, 33, 46]

## 3.2.2 ポルフィリン分子ワイヤーの伝導特 性と磁性の制御

近年、分子デバイスの実現に向け、様々な分子ワ イヤーが合成されてきている。ポルフィリンを構成 単位とする分子ワイヤーもその1種であり、共役の 方向性などの違いにより、HOMO-LUMO ギャップ の異なる数種類の共役ポルフィリンが合成されてい る。田上と塚田は、密度汎関数タイトバインディング モデル及び Keldysh グリーン 関数法に立脚した量子 伝導計算プログラムを開発し、アルミ電極間に架橋 されたこれらの分子の電圧電流特性を予測した。結 果,テープポルフィリンと呼ばれる、ギャップの小さ い分子は金属的な伝導が可能だが、それ以外の共役 ポルフィリンは半導体的になることが分かった。特 に、上記のテープポルフィリンの場合は、隣接する ポルフィリン環は3本の平行なボンドでつながれる が、電流は中央の1本(メソ位)を通り易いことが 示された。これを反映し、電極と同分子をメソ位で 結合すれば、電極ー分子間の接触面積が大きくなく とも、バリスティックな伝導が観測可能なことを予 言した。

さらに、テープポルフィリンの分子骨格を工夫して て 型のものを合成し、これを電極間に架橋させ れば、突出した部分のポルフィリン環の金属イオン サイト周りに渦電流が発生することを発見した。こ の渦電流は、同金属サイト上に観測可能な大きさの 局所的な誘起磁場を発生させる。これは、仮に金属 イオンが局在スピンをもてば、その向きを渦電流によ り制御できることを意味する。また、磁場の向きは バイアスの極性反転によりスイッチ可能であること から、この分子は、渦電流を実験的に確認可能な有 望な系であることが分かった。さらに、テープポル フィリン内で金属イオン間に有効的な磁気相互作用 があり、元々スピンがオーダーしている場合には、 渦電流が特定のスピンの向きを変える、いわば"書き 込み"ができると予想された。実際、後に行った第 一原理計算により、磁性イオン間の強磁性相互作用 を確認しており、磁気デバイスとしての発展が期待 される。[2, 3, 4, 16, 49, 50, 51, 52]

## 3.2.3 カーボンナノチューブ2重接合系に よって誘起されるスピン偏極流

(8,0) ジグザグナノチューブ(半導体的)の両側に 5,7員環欠陥対を介して(9,0) ジグザグナノチュー ブ(金属的)を接続した二重接合系について、ゼロ バイアス極限での電気伝導度を、非制限ハートリー フォック近似、タイトバインディングモデル、グリー ン関数法を用いた数値計算を行った。その結果、以 下の知見を得た。(1) ゲート電圧によってフェルミ準 位をバンドギャップ端付近に設定するとショットキー バリアにより半導体チューブ部に量子井戸が形成さ れる。その共鳴レベルのスピン縮退がクーロン相互 作用によって解ける時、スピン偏極流が流れる。(2) 半導体チューブ部の長さLに2つのしきい値、L1 L2(L2>L1)がある。L>L2の時は、ゲート電 圧を増加させるとまずダウン偏極流が、続いてアッ プ偏極流が流れる。L2>L>L1の時は、ダウン偏 極流しか発生しない。さらにL1>Lの時は、スピ ン偏極は完全に消滅する。[5, 6, 20, 36, 53, 54]

## 3.2.4 DNA の電気伝導特性

DNA の電気伝導特性は、絶縁体から半導体、超伝 導体までの実験報告がなされており、論争が続いて いるが、非常に分子長が短く、かつ homogenous な 塩基対が並んだ DNA では band-resonant な伝導を 示すことが分かってきている。ただし、観測される 電流は極めて微量であり、現段階では1次元電線と しての魅力に欠けている。この原因の一つは、電極 と DNA の接触が弱く、電極からトンネルした電子 のみが塩基対の π スタックを伝導するためである。 また、対応する DNA の伝導計算は、パラメータ化 したモデル計算が多く、基板上で DNA がひしゃげ るという実験的事実を考慮していない。そこで、田 上と塚田は、アルミ電極から直接塩基対に電子が流 入するような架橋構造を設定し、DNA の力学的な 変形が伝導特性に及ぼす影響を、密度汎関数タイト バインディングモデル及び Keldysh グリーン関数 法に基づき研究した。その結果、塩基対が傾斜して いくに従い、有効な塩基対間のホッピングが強まっ て、HOMO の準位が上昇し、やがて電極のフェル ミレベルと交差することが分かった。このとき、塩 基対から 電極へ電子が流出するため、HOMO には ホールが部分的に占有される。これは、フェルミレ ベルでの透過確率、すなわちコンダクタンスを押し 上げるため、DNA のひしゃげは伝導性を改善すると 結論された。[49, 50]

# 3.2.5 非接触 AFM 探針が Si(111)√3× √3-Ag 表面に与えるナノ力学効果の第一原理的研究

近年ナノテクノロジーが脚光を浴び、その理論的 基礎として表面ナノ構造の物性評価法の提示が急務 である。佐々木・渡邉・塚田は走査プローブ探針を表 面加工に用いる場合を想定して、探針-表面間相互作 用の第一原理的研究を進めている。Si(111)√3×√3-Ag 表面の銀原子は有限温度で動的に揺らいでおり、 探針のナノ力学効果を如実に反映する事が期待され る。そこで先ず密度汎関数法に基づき、清浄シリコ ン探針による√3-Ag 表面の非接触原子間力顕微鏡 (NC-AFM)像を計算したところ、阪大グループによ る低温実験を非常に良く再現した。これは低温では 熱揺らぎが抑えられている事を意味している。既に 昨年の成果として、表面銀原子の熱揺らぎを考慮し た室温像の予測に成功しているので、低温・室温両 方の実験の予測・再現に成功した事になる。

次に、水素を吸着させたシリコン探針による NC-AFM 像を計算したところ、探針の表面への接近に伴 い像パターンが IET 構造から HCT 構造的パターン へと著しい変化を起こす事を見出した。本計算もま た、独自に進められている阪大グループの低温実験 結果の予測・再現に成功しており、本計算の信頼性を 更に証明する事となった。このように、走査プローブ 顕微鏡探針による表面構造の力学的センシングを第 一原理的に定量評価することに成功した。[7, 22, 24]

## 3.2.6 非接触原子間顕微鏡の散逸と減衰

大振幅の非接触原子間力顕微鏡の動力学を記述す るモデルについて、非線形性とその実験との関連に ついて注目した詳しい解析を行った。これによりカ ンチレバーの非線形振動におけるフィードバック回 路系の効果を詳細に明らかにした。特に外部から励 起される振動子と自己励起する振動子で同じ運動方 程式を用いる定常状態近似では相互作用に散逸があ るかどうかによらず不安定な解が存在することを見 出した。探針・表面間の距離や相互作用の変化に対す る系の有限な応答時間の効果も含めた定常状態近似 を越える理論の必要性について論じた。表面原子の 質量や表面より下の構造の画像化の可能性について 簡単化したモデルを用いた数値計算シミュレーショ ンによる研究を行った。ここで、表面原子の確率的 運動の探針に対する影響、すなわちブラウン運動の 効果を取り入れた計算方法を用いた。表面原子運動 の乱雑さは探針・表面間距離によらないという仮定 の下で、調和振動子近似の範囲で計算された。その 結果、ブラウン運動による散逸を検出するには、探 針振動を小振幅にし、Q因子と自然周波数を大きく する必要があることがわかった。[17]

## 3.2.7 非接触原子間力顕微鏡における第一 原理シミュレーション解析

非接触原子間力顕微鏡における像や力分光曲線な どには、原子尺度における探針の状態が強く影響す る。これは走査トンネル顕微鏡における像やトンネ ル分光曲線が、特殊な場合を除いてそれほどは探針 の状態に依存しない状況と比べると大きな違いであ る。しかし、これは制御された探針を用いて表面の 原子種や化学的な官能器を同定する可能性を示唆す るものである。いずれにしても、この状況を明らか にするために第一原理からの理論シミュレーション は重要な役割をはたす。小泉、三浦、塚田はシリコ ン、あるいは水素化シリコンの探針模型と清浄ある いは水素終端 Si(100)2x1 表面の場合について、密度 汎関数法による理論シミュレーションを実行し、nc-AFM像や力分光曲線における探針構造あるいは探 針高さ依存性を詳細に明らかにした。まずモノハイ ドライド表面の場合、水素終端 Si 探針による像の 振幅は Si 探針に比べて、1 割程度の強さしかないこ と、また前者の探針ではおり返し点の高さの減少に ともない、像の明暗が反転することがわかった。こ れは表面水素上でもっとも強かった引力が、やがて 斥力に転ずるからである。

## 3.2.8 時間依存 Kohn-Sham 方程式の SCF ループに頼らない数値解法の提案

渡辺と塚田は昨年度に引続き時間依存 Kohn-Sham 方程式の数値解法について取り組んだ。その結果、こ の方程式の形式的な解を Liouville 演算子で表し、さ らに指数積で近似展開することで、SCF ループを用 いない単純で実用的な計算式が得られることを示し た。そして、この計算法を用いて簡単な系の時間変 化のシミュレーションを行い、その計算精度が SCF ループを用いる従来法に比べて同等以上であること、 計算コストが数分の一になることを確かめた。この 計算法を用いることで従来法より効率良くメゾ系、 分子系、結晶系などでの電子の動的特性を解明でき ることが期待される。

## 3.2.9 時間発展する電子状態の第一原理シ ミュレーション法

渡辺と塚田は昨年度までに電子状態の高速な時間 発展を第一原理計算でシミュレートするための数値計 算技法を考案してきた。これは時間依存 Schrödinger 方程式や時間依存 Kohn-Sham 方程式での波動関数
の時間発展を実空間の有限要素法と実時間の指数積 展開法で効率良く精度良く安定に計算するための計 算技術である。本年度前半では、この技術を用いて2 次元系で時間発展する電子状態のシミュレータを開 発した。このソフトは任意の回路を扱うことができ、 電場下や磁場下での電子の流れを計算できる。この 計算法は近年ますます高速化と微小化が進んでいる 半導体素子の解析に有効であろう。

本年度後半では、さらに拡張して、3次元系で時 間発展する電子状態のシミュレータを開発した。こ のソフトは孤立的な分子や周期的な結晶も扱うこと ができ、物質中の電子のさまざまな動的特性を計算 できる。この計算法は基底状態を計算する従来の第 一原理計算の次の段階への発展に有効であろう。渡 辺は本研究成果を博士論文としてまとめた。[18]

<報文>

(原著論文)

- J. Nara, H. Kino, N. Kobayashi, M. Tsukada, M. Aono and T. Ohno : Theoretical Investigation of Contact Effects in Conductance of Single Organic Molecule. Thin Solid Films, in press.
- [2] K. Tagami, M. Tsukada, T. Matsumoto and T. Kawai : Electronic transport properties of free-base tape-porphyrin molecular-wires studied by self-consistent tight-binding calculations, Phys. Rev. B, in presss.
- [3] K. Tagami and M. Tsukada : Current-controlled magnetism in T-shape tape-porphyrin molecular bridges, Curr. Appl. Phys., in press.
- [4] K. Tagami and M. Tsukada : Theoretical Predictions of Electronic Transport Properties of Differently Conjugated Porphyrin Molecular Wires, Jpn. J. Appl. Phys., in press.
- [5] R. Tamura: Resonant spin current in nanotube double junctions, Phyical Review B 67, (2003) R121408-1 -R121408-4.
- [6] Y. Kasahara, R. Tamura and M. Tsukada : Structure and electronic states of capped carbon nanotubes by a tight-binding approach, Phys. Rev. B 67,(2003) 115419-1 -115419-14.
- [7] Y. Motoda, N. Sasaki and S. Watanabe : Theoretical study on atomic and electronic structures of Ag-adsorbed Si NC-AFM tips, Appl. Surf. Sci. 188, pp.331–334 (2002).
- [8] H.Kawai, Y.Yoshimoto, H.Shima, Y.Nakamura and M.Tsukada: Time-Fluctuation of the Dimer Structure on a Ge(001) Surface Studied by a Monte Carlo Simulation and a First-Principles Calculation, J. Phys. Soc. Jpn. 71 (2002) 2192-2199.
- [9] N.Watanabe and M.Tsukada: Efficient method for simulating quantum electron dynamics under the time-dependent Kohn-Sham equation, Phys. Rev. E65 (2002) 036705-1.

- [10] M.Gautier, R.Perez, T.Arai, M.Tomitori and M.Tsukada: Interplay between Nonlinearity,Scan Speed,Dapming and Electronics in Frequency Modulation Atomic-Force Microscopy, Phys. Rev. Lett. 89 (2002) 1461041-1461044
- [11] N.Miura and M.Tsukada: Theoretical Analysis of Tip Effect on Noncontact Atomic Force Microscopy Image of Si(100))2 × 1:H Surface, Jpn. J. Appl. Phys. 41 (2002) 306-308.

### (会議抄録)

[12] N. Kobayashi, S. Abe, M. Brandbyge and M. Tsukada: First-principles study of ballistic electron transport in nanostructures, Proceedings of the 5th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations, in press.

### (国内雑誌)

- [13] 塚田捷:電子放出機構の量子力学的基礎、表面科学 23 (2002) 9-17.
- [14] 佐々木成朗、塚田捷:動的モード原子間力顕微鏡に現 れる非保存的過程、表面科学 23 (2002)111-115.
- [15] 塚田捷、佐々木成朗、田上勝規:非接触原子間力顕 微鏡の理論、固体物理 38 (2003) 257-268.
- [16] 田上勝規、塚田捷:ポルフィリン分子架橋系の量子 輸送の理論予測,表面科学、印刷中.

### (学位論文)

- [17] M. ゴーチエ: Theoretical Study of Noncontact Atomic Force Microscopy:from Operation to Atomic Scale Dissipation (博士論文)
- [18] 渡辺尚貴: Method of first-principles numerical simulation for time-evolving electronic states (博士 論文)

(著書)

- [19] 塚田捷:表面分析技術選書 ナノテクノロジーのた めの走査プローブ顕微鏡、丸善出版 表面科学会編 (2002) 9-28.
- [20] 塚田捷、田村了: 籠型カーボンナノチューブ構造の量 子輸送現象、「新しいクラスターの科学」( 菅野暁 他編)、講談社サイエンティフィック (2002) 17-44.
- [21] M.Gauthier, L.Kantorovich and M.Tsukada: Theory of energy dissipation into surface vibrations Nanoscience and Technology Series of Springer, R.Wiesendanger (Ed.) Scanning Probe Microscopy (2002) 371-394.
- [22] M.Tsukada, N.Sasaki ,M.Gauthier, K. Tagami and S. Watanabe : Theory of Non-contact Atomic Force Microscopy Nanoscience and Technology Series of Springer, S.Morita, R.Wiesendanger, E.Meger (Eds.) Scanning Probe Microscopy (2002) 257-278.
- [23] 河津璋、塚田捷 共編著:ナノテクノロジー最前線、 東京教育情報センター (2002)1-18, 21-28, 55-61.

- [24] 塚田捷、佐々木成朗:「原子・分子のナノ力学」森田 清三編, 丸善2.9 章「非接触原子間力顕微鏡の理論的 な基礎」pp.51-65 10 章「半導体を中心としたナノ 力学理論」pp.170-188 (2003).
- [25] 塚田捷、佐々木成朗:表面分析技術選書「ナノテク ノロジーのための走査プローブ顕微鏡」日本表面科学 会編,丸善2章「理論と測定原理」pp.9–28 (2002).
- [26] 佐々木成朗、塚田捷: 実験物理科学シリーズ 6「走査 プローブ顕微鏡」河津璋 編,共立出版, 2.2.1 章「原 子間力顕微鏡の理論的基礎」,印刷中.
- [27] 塚田捷、佐々木成朗:「走査プローブ顕微鏡」坂田亮・ 河津璋編, 裳華房第2編 原子間力顕微鏡2.2章「理 論・測定法」, 印刷中.

<学術講演>

(国際会議)

### 一般講演

- [28] M.Gauthier, R.Perez, T.Arai, M.Tomitori and M.Tsukada: Interplay between Nonliniarity, Scan Speed, Damping and Electronics in NC-AFM, NC-AFM 2002, 5th International Conference on Noncontact Atomic Force Microscopy, Montreal, Canada, Aug.12, 2002.
- [29] M.Tsukada : Theoretical Challenges to Non-Contact Atomic Force Microscopy, NC-AFM 2002, 5th International Conference on Noncontact Atomic Force Microscopy, Montreal, Canada, Aug.12, 2002.
- [30] M.Tsukada, N.Sasaki and S.Watanabe: First Principles Simulation for NC-AFM Images of Si(111)√3 × √3-Ag Surface, AVS 49th International Symposium, Colorado Convention Center, Denver, Colorado, Nov.4-8, 2002.
- [31] N. Kobayashi, S. Abe and M. Tsukada: Firstprinciples study of ballistic electron transport in atomic/molecular systems, The 10th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy, Hawaii, Nov. 2002.
- [32] J. Nara, H. Kino, N. Kobayashi, M. Tsukada and T. Ohno: Theoretical Investigation of Contact Effects in Conductance of Single Organic Molecule. The 5th International Conference on Nano-Molecular Electronics, Kobe Japan, Dec. 2002.
- [33] J. Nara, H. Kino, N. Kobayashi, M. Tsukada and T. Ohno: Theoretical Investigation of Contact Effects in Conductance of Single Organic Molecule. Annual APS March Meeting 2003, Austin USA, Mar. 2003.
- [34] K. Tagami, T. Matsumoto, and T. Kawai : Theoretical Study of Electronic Transport Through Tape-Porphyrins, 2nd International Conference on Porphyrins and Phthalocyanines (Kyoto, Jun.30-Jul. 5, 2002)

- [35] C. Hamai, Y. Naito, K. Tagami, T. Matsumoto and T. Kawai : Supramolecular Chemisty of Self-Assembled Metallophthalocyanine on Solid Surface
- [36] R. Tamura: "Spin polarized current induced by the carbon nanotube double junction", APS March meeting 2003, Austin convention center, Austin, USA, Mar 3-7, 2003.
- [37] N. Sasaki, S. Watanabe and M. Tsukada, Effect of surface atom relaxation on NC-AFM images in Noncontact AFM Tip height dependence, 5th International Conference on Noncontact Atomic Force Microscopy, nc-AFM 2002, Montreal, Canada, Aug.11-14, 2002.

### 招待講演

- [38] M.Tsukada: Theory of Atomic Force Microscopy, Regional Workshop on Computational Condensed Matter Physics, Isfahan Technical University, Iran, Apr.15-25, 2002.
- [39] M.Tsukada: Theoretical Simulation of Scanning Probe Microscopy, CIMTEC 2002, 10th International Ceramics Congress and 3rd Forum on New Materials, Florence, Italy, Jul.14-18, 2002.
- [40] M.Tsukada: Theory of Non-Contact Atomic Force Microscopy, APSIAC'02, Sanjo-Kaikan, Univ. of Tokyo, Oct.1-4, 2002
- [41] M.Tsukada, N.Kobayashi and S.Nakanishi: Theory of Quantum Transport through Atom and Molecular Bridges, Fourth International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces, ISCSI- •, Karuizawa, Japan, Oct.24, 2002..
- [42] M.Tsukada: Theoretical Bases of Non-contact AFM -from first-principles image simulation to dissipation force microscopy-, The 10th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy, Waikiki, Hawaii, Oct.31-Nov.2, 2002.
- [43] M.Tsukada: Theory of First Principles Simulation for NC-AFM images and Dissipation, IMR-JSPS workshop, Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai, Japan, Nov.12, 2002.
- [44] M.Tsukada: Theoretical Bases for Non-contact Atomic Force Microscopy, MEXT-NSF Joint Symposium "Tool and Standard", Knight Laboratory, CNF-Cornell University, Ithaca, New York, Jan.23, 2003.
- [45] M.Tsukada: Theoretical bases of light emission by scanning tunneling microscopy, ORCS Workshop on Mechanism of STM-Induced Luminescence, National Institute for Materials Science(NIMS), Tsukuba, Feb.24, 2003.
- [46] N. Kobayashi, S. Abe, M. Brandbyge, M. Aono and M. Tsukada: First-principles study of ballistic electron transport in nanostructures, 5th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations.

(国内会議)

一般講演

- [47] 塚田捷:非接触原子間力顕微鏡の理論的基礎とシミュレーション、特定領域研究「原子分子ナノ力学」平成14年度第2回研究会、北海道大学、平成14年9月21日
- [48] 塚田捷、渡邉聡、佐々木成朗:非接触原子間力顕微鏡 の理論的基礎とシミュレーション、特定領域研究「原 子分子ナノ力学」、平成14年度第3回研究会、平成 14年12月17日、京都大学、京大会館
- [49] 田上勝規、松本卓也、川合知二、塚田捷:ポルフィ リン及び DNA の電気伝導の理論的研究日本物理学 会 2002 年秋季大会(中部大学、2002 年 9 月)
- [50] 田上勝規、松本卓也、川合知二、塚田捷: 共役ポル フィリン及びDNAの電気伝導計算第63回 応用物 理学会学術講演会(新潟大学、2002年9月)
- [51] 田上勝規、塚田捷:ポルフィリン分子架橋系の量子 輸送の理論予測、第22回表面科学会講演大会 (早 稲田大学,2002年11月)
- [52] 田上勝規、塚田捷:ポルフィリン分子ワイヤーの伝 導と磁性、日本物理学会 第58回年次大会 (東北 大学,2003年3月)
- [53] 田村了:"金属ナノチューブー半導体ナノチューブー 金属ナノチューブ2重接合のランダウアー公式によ る電気伝導度",日本物理学会秋期大会(2002年9月 中部大学)
- [54] 田村了: "ナノチューブ2 重接合中の共鳴スピン流", 第58回年次大会(2003年3月 東北大学)
- [55] 佐々木成朗、渡邉聡、塚田捷、「水素吸着 Si 探針が Si(111)√3×√3-Ag 表面に与えるナノカ学的効果の 第一原理的研究」、日本物理学会 2002 年秋季大会、 愛知工大、2002 年 9 月 6 日.
- [56] 佐々木成朗、渡邉聡、塚田捷:Si(111)√3×√3-Ag 表面における非接触 AFM の探針効果 – 理論と実験 の比較,日本表面科学会第22会表面科学講演大会、 早稲田大、2002年11月26日.

### 招待講演

- [57] 塚田捷:電界放出の理論的基礎、早稲田大学材料技術 研究所オープンセミナー、「電界放出の物理と次世代 電子ビームの発展」、早稲田大学国際会議場、平成1 4年11月12日
- [58] 渡邊聡、塚田捷、佐々木成朗:「電子・原子構造計算 による力学的原子操作組立技術の解析」平成15年度 分子科学研究所ナノカ学研究会、分子研、2003年3 月19日.
- [59] 渡邉聡、佐々木成朗、塚田捷:「理論計算の最近の状況-第一原理計算を利用した研究を中心に」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13年度公開シンポジウム「原子分子のナノ力学」、阪大、2002年6月19日.
- [60] 佐々木成朗、渡邉聡、塚田捷:「電子・原子構造計算 による力学的原子操作組立技術の解析」科学研究費補 助金「特定領域研究」企画調査研究会、滋賀、2002 年8月31日.

[61] 塚田捷、渡邉聡、佐々木成朗:「非接触原子間力顕微 鏡の理論的な基礎とシミュレーション」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14年度第2回公開研究会「原子分子のナノ 力学」、北大、2002年9月21日.

# 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」に代表される多体効果の理論を主に 行っている。これらの現象では、電子相関(電子間の 斥力相互作用のために生じる量子効果)により、対 称性(特にゲージ対称性)が自発的に破れる。

### 3.3.1 超伝導

有田、黒木(電通大)、木村、大成、青木は、最も 簡単な短距離斥力模型であるハバード(Hubbard)模 型における高温超伝導の基本的一般論を展開した。

「床力からの超伝導── 非連結なフェルミ面

高温超伝導銅酸化物の模型と考えられる正方格子 上の斥力ハバード模型は、O(0.01t)の転移温度を持 つ(t:トランスファー・エネルギー ~ バンド幅)スピ ン揺らぎ媒介超伝導を示す。これは銅酸化物の $T_C$  ~ 100Kと整合するが、tから二桁落ちるという意味で  $T_C$ は「低温」である。斥力からの超伝導では必然的 にクーパー対は異方的になる(ギャップ関数は node をもつ)ためである。最近、黒木と有田は、フェルミ 面が非連結かつ適度にネストした系においては、高 い転移温度が得られる可能性があることを指摘した [17, 18, 19]。これを実現する一つの方法として、木 村は田村、高柳(NTT)、白石(筑波大)、黒木、有 田とともに、量子ドットの列を提案した [1, 20]。

非連結フェルミ面を系統的に実現するアイディア として、黒木、木村、有田は、2原子のユニットを連 結した「ダイマー格子」を提案し、この格子上の斥 カハバード模型において正方格子の場合に比べて数 倍高い転移温度が得られることを示した [5,42]。

木村は銭谷(青山学院大)黒木、有田、青木とと もに、物質合成の観点からも興味もたれる四員環を ユニットとする格子を提案し、やはり正方格子の数倍 の $T_C$ が得られるが、クーパー対が単位胞内の異な る分子軌道にまたがって形成されるという軌道間混 成効果を示した [2, 21, 36, 37, 53]。また木村は黒木、 有田、青木とともに、Shastry-Sutherland 格子とい う、ダイマーがヘリンボン状に並んだ格子も、「スピ ン・ギャップを持つ系にキャリアをドープすると超伝 導が生じるか」という観点から調べ、超伝導の可能 性を解析した [38].

### 3次元斥力模型における超伝導

非連結フェルミ面を実現させる一つの系統的方法 として、蜂の巣格子のような非 Bravais 格子を積層さ せることが考えられる。大成、黒木、有田、青木は、 この格子上での斥力ハバード 模型における超伝導の 可能性を調べ、斥力が弱い場合にはフォノン交換に よる引力からの s 波 (nodeless ギャップ関数) 超伝導 を助け得ることを示した [3, 24]。斥力が強い領域で 支配的になる d 波状態は空間群的に二重縮退してお り、結果 d+id 的状態はフェルミ面上に点状 node と いう珍しいケースとなる。

一方、通常の(単連結フェルミ面をもつ)系での 一般論として、「3次元系より2次元系の方が斥力か らの超伝導には有利、これは位相空間体積効果」と いう有田理論がある。大成等はこの観点から非連結 フェルミ面系は3次元ではどうなるかを調べ、フェ ルミ面が適当にコンパクトなポケットから成れば、3 次元のネスティングに起因するスピン揺らぎ交換を 利用ながら3次元としては高い $T_C$ を実現できるこ とを示した[39]。また、黒木、有田が最初に導入した 二次元模型を積層した場合は、(3次元としては)さら に高い $T_C$ となるが、スピン揺らぎ媒介超伝導には、 スピン感受率のピークが高いだけでなく、適当に広 がっていることも必要なことが分かった。[40, 54]。

### 有機金属における超伝導

有機超伝導もこの数年調べてきたが、本年度は典型的な有機金属 κBEDT-TTFに着目した。この物質では、銅酸化物と同様に反強磁性揺らぎを媒介とした d 波超伝導体である可能性が理論的・実験的に指摘されてきた。この系は、ダイマー化構造をもつので、ダイマーを一つの軌道とみなす有効模型によって理解されてきたが、

しかし、最近熱伝導などの実験において、ギャップ 関数の node の方向が理論の予言とは異なる結果が 得られ、謎が生じた。黒木、木村、有田、田仲(名 古屋大) 松田(物性研)は、この結晶におけるダイ マー化が強い極限という通常行われる操作をしなけ れば実験と合うギャップ関数が得られることを示し た[4]。

磁気トンネリング・スペクトルによる超伝導対称性 のトモグラフィー

斥力からの異方的超伝導において我々は、酸化物、 有機物などに対してスピン・シングレット d 波、ト リプレット p、f 波など多彩な可能性を提案してきた が、これらを実験的に区別できるであろうか。走査 トンネル分光 (STS)を用いると、クーパー対の表面 状態を検出でき、これが対称性に敏感であることは 田仲(名古屋大)等により指摘されていた。田沼(岡 山大)黒木、田仲、有田、柏谷(産総研)青木は、 有機超伝導体(TMTSF)をモデルとして、STS は p 波、d 波、f 波の特徴を反映し [22]、さらに磁場を加 えるとドップラー・シフト効果により曖昧さなくペ アリング対称性が決定できることを提案した [6, 23]。 近年、有機導体  $(TMTSF)_2X$  やルテニウム酸化物 Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> においてスピン・トリプレット超伝導の可 能性が実験的に指摘されて注目を集めているが、理論 的には多バンドの存在等から来る未解決問題がある。 そこで黒木、木村、有田、田仲(名大工)はTMTSF および Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> に対応する格子上の床力八バード 模型に対して、量子モンテカルロ法によりペアリン グ相互作用を計算した。その結果 TMTSF に対して は f 波は p, d 波に対して勝り得ること、Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> 系 ではトリプレット p 波およびシングレット d 波のペ アリング相互作用が引力的に大きいことがわかった [41, 55]。

### 磁場誘起トリプレット超伝導の可能性

一般に強磁性スピン揺らぎ交換はトリプレット超 伝導に有利であるが、シングレット超伝導に比べペ アリング相互作用が小さい等非常に不利である。最 近 Kirkpatrick 等によって、トリプレット超伝導が強 磁性秩序と共存するとより高い $T_C$ が得られる可能性 があることが現象論的に指摘されている。一方、斥 力からの超伝導は3次元よりも2次元の方が有利で あるが、2次元ではキュリー温度が小さくなる。有 田、黒木、青木は、2次元系に磁場をかけて有限の磁 化を立たせるとトリプレット超伝導が有利となるこ とを提案し、具体的に非連結フェルミ面をもつ三角 格子に対してこれを数値的に確かめた [25, 43, 56]。

# 3.3.2 平坦バンド 強磁性— 5 員環高分子に おける可能性

電子間斥力から強磁性が得られるか、というのも 電子相関の基本的な、かつチャレンジングな問題で ある。平坦なバンドをもつ格子の上の斥力ハバード 模型においては、ある条件が満たされた場合、強磁 性が実現し得ることが 1990 年代に Mielke や田崎に よって、厳密に証明された。有田は、この条件を満 たさせ易いのは奇数員環からなる高分子であろうと いう観点から、諏訪(日立基礎研)、黒木、青木と 共に局所スピン密度第一原理計算と、ハバード 模型 計算の二面立てで、五員環高分子 polyaminotriazole が合成できれば平坦バンドが実現し、適当なバンド・ フィリングにおいて強磁性が実現する可能性を指摘 し、*Phys. Rev. Lett.* 誌に発表した [8]。さらに、こ の高分子が結晶化したときにバルク強磁性を持つか、 バンド・フィリング制御のために化学ドーピングを を議論した。[26, 27, 44]。

# 3.3.3 アルカリ金属吸蔵ゼオライトの電子 状態 — supercrystal

ゼオライトは、(ケージと呼ばれる)隙間の多い興 味深い結晶構造をもつが、アルカリ金属等の他の元 素のクラスターをケージ中に吸蔵でき、新奇な物性が期待される。事実、野末(東北大、現大阪大)に より、Kを吸蔵したゼオライトにおいて強磁性が約 10年前に実験的に発見されたが、その発現機構は明 らかにされていない。<br />
理論的なチャレンジは、(i) こ の系は単位胞に数百個の原子を含む複雑な系である が、ナノサイズ・ケージを球形井戸と近似し、そこに 閉じ込められた状態("superatom")の並びと見る ような単純な電子構造と考えて良いか、(ii) 強磁性等 の多体効果が期待できるような強相関電子系である か、という問題である。この観点から、有田は、三 宅 (東工大)、小谷 (大阪大 )、van Schilfgaarde (ア リゾナ大) 岡、黒木(電通大) 青木とともに、こ の系の第一原理計算を初めて行った [45, 57]。その結 果、この系は単純な tight-binding 模型で驚くほどよ くフィットでき、各ケージを一つの superatom とみ なし、系全体を supercrystal とみなす描像を示唆す る。第一原理計算の波動関数から評価したクーロン や交換相互作用は、この系が確かに強磁性等を示す 強相関領域であり、多彩な多体効果を期待できる可 能性があることを示す。

# 3.3.4 ヘテロ界面の物性 — 金属/絶縁体 界面における金属誘起状態

金属/絶縁体界面のようなヘテロ界面において、原 子スケールで何が起きるかをモダンな視点で探るの は興味深い。我々のグループは、斎木(新領域)を代 表とする学術創成「高度界面制御有機・無機複合構 造による量子物性」の理論分担として研究をすすめ ており、本年度はその端緒として、絶縁体/金属界面 における金属誘起ギャップ状態 (MIGS) を調べた。 きれいな絶縁体/金属界面を作ることは困難であり、 ギャップの大きな絶縁体には電子がしみこまず興味 深い状態は生成しないと考えられてきたために殆ど 調べられてこなかったが、最近木口(新領域)、斎木 等により、LiCl/Cu において MIGS が初めて観測さ れた。有田は、谷田(富士通)、青木とともに、絶 縁体/金属系の第一原理計算を行い、界面の原子1層 の薄さの中に界面特有な(金属の詳細には依らない) MIGS バンドの存在を示し、実験を再現することに 成功した。この成果は斎木グループとの共著で Phys. *Rev. Lett.* 誌に出版された [7]。



 $\boxtimes$  3.3 a: Contours of the LDA wave functions for the metal-induced gap states in a typical ionic insulator on a metallic substrate (LiCl/Cu here; left panel).

# 3.3.5 非平衡・非線形な強相関電子系 — 強 電場下のモット 絶縁破壊におけるユ ニバーサルな Landau-Zener 過程

モット絶縁体のような強相関電子系における非平 衡・非線形な現象は開拓の余地の大きい興味深い問題 である。岡、有田、青木は、モット絶縁体に強電場を かけた場合にどの様に絶縁破壊が起きるかを、1次 元ハバード 模型に実際に電場をかけ、時間依存多体 Schrödinger 方程式を積分することにより解析した。 その結果の IV 特性から、Mott 絶縁相が、電場、電 子相関の強さ*U/W*の大きさに応じて破壊され、これ が Landau-Zener による量子準位の間の非断熱トン ネリングを、多体電子系に初めて拡張することによ り、統一的に説明されることを見出した [46, 47, 58]。 また倉本、青木は、電子気体が薄い場合には、圧 縮率が負になる等相互作用の効果が大きく、これが 非平衡・非線形応答(特に非線形光学応答)を生じ るのではないか、という観点から研究を始めた。倉 本はこれを修士論文にまとめた [60]。

# 3.3.6 分数量子ホール効果 — 複合フェル ミオン相互作用と BCS ペアリング

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(複合粒子)理論も展 開されている。通常の電子相関系においては、電子 間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、この系では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「強相関極限」にある。こ のため、電子状態はランダウ準位の詰まり方( $\nu$ )を 変えると多彩な量子相転移を起こす。

小野田(強相関研)は、分数量子ホール液体にお ける有効質量とフェルミ液体論を調べてきたが[28]、 この発展として、水崎(専修大)青木とともに、分 数量子ホール系において粒子間相互作用の形を変え たとき(具体的にはランダウ準位を変えたとき)に提 案されている、BCS 状態(異方的ペアリング(p+ip 波)状態)を調べた。ペアリング状態が期待される高 次ランダウ準位では粒子間の有効相互作用の距離依 存性が非単調であり、電子の動径分布も p+ip 波と コンシステントになることを示した。[29]

# 3.3.7 3次元系における整数量子ホール効果、butterfly、表面電流

量子ホール効果は普通は2次元系に特有と考えら れている。それでは量子ホール効果は3次元では存 在し得ないであろうか。越野、黒木、青木、長田( 物 性研)、鹿児島(総合文化)は、これが存在し、し かも3次元に特有(2次元での名残りではなく )存 在し得ることを示した [9]。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、異方的3 次元系に磁場をかけた場合には、磁場を傾ける角度 の関数としてエネルギー・スペクトルが、2次元周 期系が強磁場下でとる butterfly と呼ばれるフラク タルに似た構造をとる。フェルミ・エネルギーがこ れらのギャップ内にあるときに、3次元では3成分  $(\sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx})$ をもつホール伝導度の各々に対して整 数量子ホール効果が起き、その量子化値も求めた。直 感的には、多重連結フェルミ面(左図)上での磁場 効果と見なせる。3次元量子ホール効果に要する磁 場は、有機金属のような現実の異方的導体を考える と、現実的(数10T)である[9]。

さらに驚くべきことに、普通の等方的3次元格子 でも磁場を一般の(結晶軸からはずれた)方向にか けるとギャップが生じ、これを運動量空間における 半古典軌道間の量子トンネリングとして理解できる [12]。

普通の量子ホール効果においては、試料の端に端 電流が流れる。量子ホール電流は試料の内部を流れ るのか、端を流れるのか、という議論があり、端状 態の担うホール電流の大きさ(トポロジカル不変量) がバルクのホール伝導度と一致するので、どちらで も量子化に変わりはない。越野、Halperin(Harvard 大)、青木は、3次元量子ホール効果においては、端 電流に対応して、表面電流(wrapping current)が流 れ、これについても表面電流の担うホール電流の大 きさ(トポロジカル不変量)がバルクのホール伝導 度と一致することを示した[11,31]。

# 3.3.8 3次元系における磁場誘起スピン密 度波

有機金属において、磁場をかけたときに、多体相 互作用から「磁場誘起スピン密度波」が生じること が知られている。これは、不完全にネストしたフェル ミ面(やはり多重連結)におけるランダウ量子化から きており、普通は2次元系で考えられている。越野 等は、これの3次元版も可能であることを示し、こ こでも上記3次元 butterfly と類似のフラクタル的 スペクトルと量子ホール効果が起き、これに要する 磁場はさらに弱く10Tの程度であることを示した。 [10, 30]



越野は以上の3次元量子ホール効果の研究を博士 論文にまとめた[59]。

⊠ 3.3 b: Energy spectrum for the isotropic simplecubic tight-binding lattice in a tilted magnetic field. Triple integers represent the Hall integers,  $\sigma \equiv (\sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx})$  in units of  $(-e^2/ha)$ , where *a* is the lattice constant. The Hall current,  $\mathbf{j} = -\sigma \times \mathbf{E}$ , is seen to change its direction even for a fixed direction of *B*.

### 量子ホール系における光学応答

浅野は、分数量子ホール系における多体効果を光物性の観点から調べ、 $\nu = 1$ の分数量子ホール系に 一個の正孔を導入した場合に、電子が正孔を遮蔽す る効果と電子のスピン自由度が強く連動し、スカー ミオン効果がゼーマン分裂(g因子)の値に応じて 現れる事を明らかにした[13,14,15]。さらに、多数 の電子と正孔が共存する系でサイクロトロン共鳴を 調べ、電子数と正孔数が等しい時に共鳴が非常に鋭 くなることを見出した。これは励起子相の発現と連 動していると予想される。

### 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ことは、最近の技術で可能に なっているが、ここに強磁場をかけると、電子は磁気 長(10 T の磁場で~100 Å)程度の量子零点振動を 行いながら斥力で避け合い、「電子分子」構造をとり、 「魔法数」角運動量をもつことをMaksym(Leicester 大) 今村(東北大)、青木は提案してきた。本年度 は、このような「Wigner molecule」だけでなく、「分 数量子ホール液滴」領域も含め、樽茶グループの実 験において見えはじめた励起スペクトルとの比較を 続けた。

# 3.3.9 周期的極小曲面上の電子

越野、黒木、青木、森瀬、武田は、C<sub>60</sub> 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 [16]。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、ブロッホ電子のエネルギー・バンド構造を求めた。また、一つの極小周期曲面と別の極小周期曲面とが Bonnet 変換と呼ばれる共形変換で結ばれているときは、それらのバンド構造の間に 関連があることも示した。

### 3.3.10 その他

青木は、日本物理学会主催の科学セミナー「ボース・ アインシュタイン凝縮から高温超伝導へ」における高 温超伝導の機構について一般的解説 [32, 50] を初め、 電子相関におけるフェルミ面形状効果 (fermiology)[17]、 1,2,3 次元における電子相関 [18]、量子ドットにおけ る電子分子、量子液滴状態 [34]、量子ホール効果の 将来展望と強磁場中における強相関電子物性の可能 性 [51, 52]、電子相関(分数量子ホール効果 vs 高温 超伝導)[48] 物性物理における保存則 [35] について の執筆、講演を行った。また、有機金属、有機超伝 導、有機強磁性に関する国際シンポジウム録の編集 に参加した [33]。

<報文>

(原著論文)

- T. Kimura, H. Tamura, K. Kuroki, K. Shiraishi, H. Takayanagi and R. Arita: Superconductivity in quantum dot superlattices composed of quantum wire networks, *Phys. Rev. B* 66, 132508 (2002).
- [2] T. Kimura, Y. Zenitani, K. Kuroki, R. Arita and H. Aoki: Hybridization-induced superconductivity from electron repulsion on a tetramer lattice having a disconnected Fermi surface, *Phys. Rev. B* 66, 212505 (2002).
- [3] S. Onari, K. Kuroki, R. Arita and H. Aoki: Superconductivity induced by interband nesting in the three-dimensional honeycome lattice, *Phys. Rev. B* 65, 184525 (2002).
- [4] K. Kuroki, T. Kimura, R. Arita, Y. Tanaka and Y. Matsuda: d<sub>x<sup>2</sup>-y2<sup>-</sup></sub> vs d<sub>xy</sub>-like pairings in organic superconductors κ-(BEDT-TTF)<sub>2</sub>X, *Phys. Rev. B* 65, 100516(R) (2002).
- [5] K. Kuroki, T. Kimura and R. Arita: Hightemperature superconductivity in dimer array systems, *Phys. Rev. B* 66, 184508 (2002).
- [6] Y. Tanuma, K. Kuroki, Y. Tanaka, R. Arita, S. Kashiwaya and H. Aoki: Determination of pairing symmetry from magnetotunneling spectroscopy —

A case study for quasi-one-dimensional organic superconductors, *Phys. Rev. B.* **66**, 094507 (2002).

- [7] M. Kiguchi, R. Arita, G. Yoshikawa, Y. Tanida, M.Katayama, K. Saiki, A. Koma and H. Aoki: Metal-induced gap states at well defined alkalihalide/metal interfaces, to be published in *Phys. Rev. Lett.*
- [8] R. Arita, Y. Suwa, K. Kuroki and H. Aoki: Gateinduced band ferromagnetism in an organic polymer, *Phys. Rev. Lett.* 88,127202 (2002).
- [9] M. Koshino, H. Aoki, K. Kuroki, S. Kagoshima, and T. Osada: Phase diagram for the Hofstadter butterfly and integer quantum Hall effect in three dimensions, *Phys. Rev. B* 65, 045310 (2002).
- [10] M. Koshino, H. Aoki, T. Osada: Field-induced SDW and butterfly spectrum in three dimensions, *Phys. Rev. B* 65, 205311 (2002).
- [11] Mikito Koshino, Hideo Aoki and Bertrand I. Halperin: Wrapping current versus bulk integer quantum Hall effect in three dimensions, *Phys. Rev. B* 66, 081301(R) (2002).
- [12] M. Koshino and H. Aoki: Integer quantum Hall effect in isotropic 3D crystals, Phys. Rev. B 67 (2003), in press.
- [13] Kenichi Asano and Tsuneya Ando: Photoluminescence in integer quantum Hall systems, *Phys. Rev.* B 65, 115330 (2002).
- [14] Kenichi Asano: Skyrmion effects in integer quantum Hall systems in the presence of a single valence hole, *Microelectronic Eng.* 63, 75 (2002).
- [15] Kenichi Asano: Skyrmion effects on the integer quantum Hall photoluminescence, J. Phys. Soc. Jpn. 72 (2003), in press.
- [16] H. Aoki, M. Koshino, D. Takeda, H. Morise and K. Kuroki: Electronic structure of periodic minimal surfaces — 'topological band structure', *Phys. Rev.* B 65, 035102 (2002).

(Reviews)

- [17] Hideo Aoki: Fermiology in correlated electron systems, in Raymond F. Bishop et al. (ed.): *Recent* progress in many-body theories ('Advances in quantum many-body theory' Vol. 6) (World Scientific, New Jersey, 2002), p.13.
- [18] Hideo Aoki: Superconductivity from the repulsive electron interaction — from 1D to 3D, in Tobias Brandes et al.(ed.): The Anderson Transition and its Ramifications — Localisation, Quantum Interference, and Interactions (in a series 'Lecture notes in physics', Springer), in press.

(国際会議録)

[19] K. Kuroki and R. Arita: Possible high temperature superconductivity in systems with nested Fermi surfaces pockets, to be published in *Physica B* (*Proc.* LT23, Hiroshima, Aug. 2003).

- [20] T. Kimura, H. Tamura, K. Kuroki, K. Shiraishi, H. Takayanagi and R. Arita: Quantum wire networks for superconducting quantum-dot superlattices, to be published in *Physica B (Proc. LT23)*.
- [21] T. Kimura, Y. Zenitani, K. Kuroki, R. Arita and H. Aoki: A possibility of high-T<sub>c</sub> superconductivity on a disconnected Fermi surface in a decorated square lattice, *Physica B* **328**, 20 (2002).
- [22] Y. Tanuma,K. Kuroki, Y. Tanaka, R. Arita, S. Kashiwaya and H. Aoki: Zero-energy peak and pairing symmetry of quasi-one-dimensional organic superconductor (TMTSF)<sub>2</sub>X, J. Phys. Chem. Solids 63, 1273 (2002).
- [23] Y. Tanuma, K. Kuroki, Y. Tanaka, R. Arita, S. Kashiwaya and H. Aoki: How to determine pairing symmetry of quasi-1D organic superconductors through magneto-tunneling spectroscopy, to be published in *Physica B (Proc. LT23)*.
- [24] S. Onari, K. Kuroki, R. Arita and H. Aoki: Effect of inter-band nesting on superconductivity in stacked honeycomb lattices, to be published in *Physica B (Proc. LT23)*.
- [25] R. Arita, K. Kuroki and H. Aoki: Triplet superconductivity in the repulsively interacting electron system on a triangular lattice: a possibility of magnetic-field induced superconductivity, to be published in *Physica B (Proc. LT23)*.
- [26] R. Arita, Y. Suwa, K. Kuroki and H. Aoki: Flatband ferromagnetism in an organic polymer *Proc. Int. Conf. on Physics of Semiconductors*, Edinburgh, 2003.
- [27] R. Arita, Y. Suwa, K. Kuroki and H. Aoki: Possible flat-band ferromagnetism in an organic polymer, to be published in *Polyhedron (Proc. Int. Conf. on Molecule-based Magnets*, Valencia, Oct. 2003).
- [28] Masaru Onoda, Takahiro Mizusaki and Hideo Aoki: How heavy and how strongly interacting are composite fermions?, *Physica E* 12, 101 (2002).
- [29] Masaru Onoda, Takahiro Mizusaki and Hideo Aoki: Interaction and pairing mechanism in evendenominator systems at higher Landau levels, *Proc. 15th Int. Conf. on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics*, Oxford, 2002, to be published.
- [30] M. Koshino, H. Aoki, T. Osada: Fieldinduced SDW and integer quantum Hall effect in anisotropic three-dimensional electron systems, *Physica E* 12, 157 (2002).
- [31] M. Koshino, H. Aoki and T. Osada: Three dimensional integer quantum Hall effect and the wrapping current in three dimensional FISDW, Proc. Int. Conf. on Physics of Semiconductors, Edinburgh, 2003.

(編著書)

- [32] 青木秀夫:「高温超伝導の機構はどこまで解明された か」、日本物理学会(編):「ボース・アインシュタイ ン凝縮から高温超伝導へ」、(日本評論社、2003)第 5章。
- [33] G. Saito, S. Kagoshima, K. Kanoda, H. Aoki, T. Mori, Y. Misaki and H. Yamochi (editors): Proc. 4th Int. Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Ferromagnetism, Hokkaido, 2001, Synthetic Metals 133-134 (2003).

(国内雑誌)

- [34] 青木秀夫:量子ドット 電子分子から量子液滴まで、 物性研究、素粒子論研究出版予定。
- [35] 青木秀夫:物性物理における保存則、 数理科学 2003 年 1 月号、p.41。

<学術発表>

(国際会議)

### 一般講演(国際会議録掲載以外)

[36] T. Kimura, Y. Zenitani, K. Kuroki, R. Arita and H. Aoki, Hybridization-dominated pairing from electron repulsion in a tetramerized lattice (APS meeting, Austin, 2003.3.3-7).

(国内会議)

一般講演

- [37] 木村 敬、銭谷勇磁、黒木和彦、有田亮太郎、青木秀 夫:四員環による正方格子における高温超伝導(日本 物理学会、中部大学、2002.9.6-9).
- [38] 木村敬、黒木和彦、有田亮太郎、青木秀夫:シャスト リー・サザーランド格子上のハバード模型における超伝 導の可能性(日本物理学会、東北大学、2003.3.28-31).
- [39] 大成誠一郎、黒木和彦、有田亮太郎、青木秀夫:3次 元斥力模型における非連結フェルミ面上の超伝導(日本物理学会、中部大学).
- [40] 大成誠一郎、有田亮太郎、黒木和彦、青木秀夫: 非連 結フェルミ面を持つ3次元ハバード模型における超伝 導とスピン揺らぎの関係(日本物理学会、東北大学).
- [41] 黒木和彦、木村敬、有田亮太郎、田仲由喜夫:ハバー ド模型におけるスピン・トリプレット・ペアリング相 互作用の量子モンテカルロ法による評価(日本物理学 会、東北大学).
- [42] 黒木和彦、木村敬、有田亮太郎:ダイマー列格子にお ける高温超伝導(日本物理学会、中部大学)。
- [43] 有田亮太郎、黒木和彦、青木秀夫:磁場誘起 triplet 超伝導の可能性 — 3角格子上 Hubbard 模型 (日本 物理学会、中部大学).
- [44] 有田亮太郎、諏訪雄二、黒木和彦、青木秀夫:5員環 高分子の結晶における平坦バンド強磁性の可能性(日 本物理学会、東北大学).
- [45] 有田亮太郎、三宅隆、小谷岳生、Mark van Schilfgarrde、岡隆史、黒木和彦、野末泰夫、青木秀夫:アル カリ金属吸蔵ゼオライト中の電子状態の第一原理計 算—"superatom"結晶 (日本物理学会、東北大学).

- [46] 岡隆史、有田亮太郎、青木秀夫:一次元強相関電子系 の非平衡現象の解析 (日本物理学会、中部大学).
- [47] 岡隆史、有田亮太郎、青木秀夫: 強電場下の Mott 絶 縁破壊におけるユニバーサルな Landau-Zener 過程 (日本物理学会、東北大学).
- [48] 青木秀夫:電子相関 分数量子ホール効果 vs 高温 超伝導(東京大学物理学教室談話会、2003.1.17)。

招待講演

- [49] 青木秀夫:量子ホール効果 最近の発展(上智大学 物理学教室談話会、2002.5.16)。
- [50] 青木秀夫:高温超伝導の機構はどこまで解明されたか (日本物理学会科学セミナー「ボース・アインシュタ イン凝縮から高温超伝導へ、東京、2002.7.29-30)。
- [51] 青木秀夫: 量子ホール効果(物性研ワークショップ「強磁場物性の現状と将来展望」、2002.5.29)。
- [52] 青木秀夫: 強磁場中における強相関電子物性の可能性 (物性研ワークショップ「強磁場下物性研究の現状と 新展開」、2002.10.8)。
- (セミナー・研究会)
- [53] 木村敬、銭谷勇磁、黒木和彦、有田亮太郎、青木秀 夫:Hybridization-induced pairing in a tetramerized lattice (科研費「遷移金属酸化物における新しい量子 現象」成果報告会、物性研、2003.1.8-10)。
- [54] Superconductivity in Repulsive Electron Systems Having Three-Dimensional Disconnected Fermi Surfaces (「遷移金属酸化物」成果報告会、物性研)。
- [55] 黒木和彦、木村敬、有田亮太郎、田仲由喜夫:Quantum Monte Carlo study of spin-triplet pairing in the Hubbard model (「遷移金属酸化物」成果報告会、物 性研)。
- [56] 青木秀夫:強相関電子系における強磁性と超伝導の共存(「遷移金属酸化物」成果報告会、京都、2002.6.27-28)。
- [57] 有田亮太郎、三宅隆、小谷岳生、Mark van Schilfegaarde、岡隆史、黒木和彦、野末泰夫、青木秀夫: Electronic structure of alkali-metal loaded zeolites — a Mott insulator in host-guest compounds (「遷 移金属酸化物」成果報告会、物性研)。
- [58] 岡隆史、有田亮太郎、青木秀夫: Breakdown of Mott insulator — non-adiabatic tunneling in a correlated system in strong electric fields (「遷移金属 酸化物」成果報告会、物性研)。
- (学位論文)
- [59] 越野幹人: Theory of quantum Hall effect in three dimensions (博士論文、2002 年 12 月)。
- [60] 倉本由香利: A study of nonlinear response in the electron gas with negative compressibility (修士論 文、2003 年 1 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、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て用いている。

# 3.4.1 高温超伝導の理論

### 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、絶対零度における変分法によって調 べた。[1,18,44] 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。このような新しい量子状態が 実現するパラメータ領域を明らかにし、またその原 因を磁性不純物を介したジョセフソン接合の理論か ら議論した。

### 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 との比較を明らかにするために、輸送係数、とくに 電気伝導度、ホール係数の温度依存性を求め、実験 結果をよく説明することを見出した。その際、運動 量保存則の統計力学的表現であるワード恒等式をみ たすために取り入れたバーテックス補正項の重要性 が指摘された。[2, 16, 20, 29, 46]

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。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、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合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。[17]

### 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 更を受けるということがわかる。[12, 45]

### 3.4.2 d 波超伝導体中での電子状態

### 不純物近傍の電子状態

高温超伝導体は d<sub>x2-y2</sub> 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が持た 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。また磁性不純物の 近傍では、不純物の持つスピンが局所的な磁場をあ 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。この現象は実験的に検証 できるものである。[31]

### 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。さらに磁束中 心付近で、正方格子上を staggered に電流が流れる という状態が出現し、これが局所状態密度に大きな 効果を与えることが明らかになった。[9, 24, 38, 50]

# 3.4.3 スピン三重項超伝導体

ルテニウム酸化物におけるスピン三重項超伝導に対 するミクロ理論

ルテニウム酸化物 Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> は、高温超伝導体と 非常に似た構造をしているが、現在までにスピン目 重項超伝導であることが確立している。我々はスピ ン三重項超伝導特有の内部自由度の縮退に注目し、 それがどのようにして解けるのかを調べた。具体的 には、3バンドモデルにスピン軌道相互作用を加え たモデルを用いてペアリング相互作用をミクロに計 算し、基底状態における内部自由度を決定した。そ の結果、一般にスピン-軌道相互作用とフント結合が 内部自由度の縮退を解き、この系の場合では、実験 から予想されているカイラル状態が基底状態となる ことが分かった。さらに、超伝導秩序変数がバンド ごとに大きく異なる状態が実現することが明らかに なった。実験のパラメータ領域では、状態密度の最 も大きい バンド上の超伝導が強いことがわかった。 [8, 15, 25, 39, 47, 48, 60, 62, 64]

# 3.4.4 フラストレーションのある系での電 子状態

マグネタイトの Verwey 転移

今まで電荷整列状態であると考えられて来たマグ ネタイトの Verwey 転移について、新しいメカニズム を考え平均場近似によって調べた。[3, 22, 27, 36, 41] フェルミエネルギー付近には鉄の d 軌道が 3 種類あ るが、そのバンドを平均場近似で取り扱うことによ り、軌道がそろった状態が実現する可能性があるこ とを示した。その結果、電子状態は1次元的になり、 Verwey 転移は格子変位を伴う1次元的なパイエルス 転移であることになる。さらに、A サイトと呼ばれ る位置の鉄イオンとの相互作用を考慮すると、いく つかの競合する3次元格子変位のパターンがあるこ とがわかった。実験との比較を行い、今のところ実 験結果と矛盾しないという結論を得た。

三角格子上の強相関電子系

フラストレーションを持つ系は、近年 LiV<sub>2</sub>O<sub>4</sub> における重い電子的振舞いなどによって注目を集めて

いる。このことを念頭に、三角格子上の*t-J*モデルに ついてエントロピーやスピン相関関数を調べた。そ の結果、正孔を絶縁体に導入したときには RVB 的な 振舞いをすることを見出した。一方、電子を導入し た場合には広いパラメータ領域にわたって強磁性が 出現する。さらにこの場合は、強磁性相関と反強磁 性相関との競合が生じ、重い電子的振舞いをする領 域も存在することが明らかになった。この系は強相 関とフラストレーションを同時に扱わなければなら ないため、これまで信頼できる計算がほとんどなかっ たが、本研究によって初めてフラストレーションに よる様々な可能性が明らかになった。[6, 26, 40, 45]

### フラストレーションによる強磁性

三角格子およびカゴメ格子において、高温展開の 方法・変分法・および厳密対角化の手法を組み合わせ ることによって、非常に広い電子密度領域において 強磁性が出現することを見出した。この強磁性状態 は、1/2充填近傍のいわゆる「長岡の強磁性」から、 低電子密度領域の「金森理論」による強磁性、ある いは平坦バンドによる強磁性までが連続につながっ ているということを示している。[14, 49]

スピンアイス磁性体の基底状態エントロピーの厳密 計算と新しいタイプの相転移

Dy2Ti2O7という物質は、パイロクロアという3次 元のフラストレーションを持つ格子上に、サイトごと に異なる容易化軸を持ったイジングスピンが存在す る物質である。この物質に[111]方向の磁場をかける と、カゴメ格子上のフラストレートしたスピン系の 問題となる。(カゴメアイスと呼ばれている。) このス ピン系は基底状態でマクロな縮退を示し、実験的に も有限の残留エントロピー(基底状態エントロピー) が測定されている。この問題に対し、エントロピーの 値が厳密に計算できることを示し、 $S=0.671({
m J/K})$ Dy1 モル当たり) という値を得た。これは実験結果 をよく再現する。[7,61] さらに、磁場の向きを傾け ることにより、縮退を解く相転移を誘発することが できる。この場合の相転移は通常の2次相転移と比 べて、いろいろな意味で異常な相転移であることが 明らかになった。[42,56,63]

### フラストレーションのある系での超伝導状態

フラストレーションを持たない正方格子からフラ ストレーションを持つ三角格子へ連続変形できるよ うなモデルを用いて、そこで実現する超伝導状態を 平均場近似によって調べた。その結果、正方格子上 で安定化する  $d_{x^2-y^2}$ -波対称性を持つ超伝導状態がし ばらく安定であるが、三角格子に近いパラメータ領 域では  $d_{x^2-y^2}$  に加えて  $id_{xy}$  という対称性を持つ秩 序変数が出現し、結果として時間反転対称性を破っ た状態が実現することが明らかになった。とくに三 角格子のパラメータでは、超伝導秩序変数の位相が 120 度構造を持つという非常に対称性の高い状態に 自然に移行する。この状態と、最近の有機伝導体に おける超伝導、および Na<sub>x</sub>CoO<sub>2</sub> の超伝導との関連 についても議論した。[13, 53]

# 3.4.5 弱い強磁性

### CaB<sub>6</sub>のモデル計算

CaB<sub>6</sub> という物質は、高い転移温度を持ちながら 弱い強磁性モーメントしか示さないのではないかと いうことで近年注目された物質である。この系に対 して現実的な値を持つモデルハミルトニアンを考え、 強磁性の可能性を吟味した。この物質は、Caのd軌 道と B<sub>6</sub>の分子軌道 ( $p\pi$ )からなる立方対称の3次元 系であり、 $p\pi$ -dの軌道混成によって半金属バンド構 造を持つ。この半金属構造の多バンドモデルに、バ ンド内・バンド間 Coulomb 相互作用と、Hund 結合 を考慮し平均場近似を用いて強磁性が出現するかど うかを調べた。その結果、もし系が立方対称性を持つ 場合には強磁性が抑えられ、立方対称性が破れた場 合には弱い強磁性が可能であることが分かった。こ れにより、立方対称性を持つ CaB<sub>6</sub>の場合には、弱 い強磁性は難しいということを指摘した。[5, 19]

# 3.4.6 1次元物質に関する理論

### 1次元電子系でのキャリアの性質

一般に1次元電子系は、朝永・ラッティンジャー 液体状態になっていると考えられている。この状態 では、電子はそれ自体として存在することができず、 電荷の自由度とスピンの自由度との2つに分離して 存在している。電荷の自由度は相互作用の効果によっ て、通常のバンド理論のような振舞いをするとは限 らない。このことを明らかにするために、境界のあ る1次元ハバードモデルやt-Jモデルを厳密解と厳 密対角化の手法を用いて調べ、キャリアの性質を議 論した。電子密度が1/2充填付近で、相互作用の強 い領域では、キャリアはホールとして振る舞い、他 の領域では電子として振る舞うことが明らかになっ た。これはスピン電荷分離という現象の、1つの自 明でない帰結であると解釈できる。[10]

### スピンパイエルス系での不純物効果

1次元のスピンパイエルス系とは、格子変位によ リスピン励起にギャップが生じている系である。こ のような系に不純物があると、その近傍で今まで隠 されていた反強磁性秩序が誘起される可能性が、実 験から指摘されている。この問題について、スピン 系を XY モデルと仮定し相互作用のないスピンレス フェルミオンの問題に焼き直して厳密に調べた。そ の結果、ギャップ内に mid-gap 状態という局在状態 が出現することが分かり、磁性も生じる場合がある ことが明らかになった。[4]

### 有機導体における電荷秩序状態

擬1次元有機導体においてウィグナー結晶型の電 荷秩序状態が実験的に見出されている。この状態で は、電荷の結晶化と帯磁率に見られるようなスピン 自由度とが無関係に振る舞う様子が観測されている。 この現象について、強結合極限の1次元拡張ハバー ドモデルを解析的および厳密対角化などを用いて調 べ、理論的によく理解できることを示した。とくに、 パラメータを変化させて電荷自由度の結晶化が起こ る際、スピン自由度を規定するハミルトニアンがほ とんど変更を受けないことが明らかになった。これ は KT 転移の場合と類似していることを議論した。 [33, 55]

### 電荷秩序状態とスピンパイエルス状態の共存

擬 1 次元有機導体である (TMTTF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub> および (TMTTF)<sub>2</sub>AsF<sub>6</sub>において、ウィグナー結晶型(2) 分子周期)の電荷秩序と、4分子周期のスピンパイ エルス格子ゆがみの共存基底状態が実験的に示唆さ れている。しかし、これらの系のモデルハミルトニ アンに対する数値計算では、これとは異なるスピン パイエルス状態が主張されていた。この実験との矛 盾を解決するために、モデルハミルトニアンをボゾ ン化の方法により解析的に調べ、上記二つのスピン パイエルス状態に対し物理的解釈を与え、両者がと もに存在し、パラメータによって競合することを示 した。さらに、精密な数値的手法である密度行列繰 り込み群 (DMRG) の方法を用いて、実際に強相関 領域では両方の状態が競合していることを示した。 このように、実験で見出されているような電荷秩序 とスピンパイエルスとの共存という状態が、一般に 安定化しうることを初めて理論的に明らかにした。 [11, 28, 37, 43, 51, 52, 59]

### 梯子型スピン系における隠れた秩序変数

梯子型スピン系に隠れた秩序が存在することが知 られているが、これを具体的に双対変換を組み合わせ ることによって明らかに見える形にした。2種類の隠 れた秩序変数がそれぞれ order parameter, disorder parameter に対応することが示された。さらに、得 られたハミルトニアンについて、隠れた秩序を平均 場として扱うことにより、梯子型スピン系のスピン ギャップなどが再現し得るかどうか調べた。とくに 梯子間の交換相互作用が強い領域では、平均場近似 が有効であることが分かった。これらの状態と、不 純物近傍での隠れた秩序の振舞いについて議論した。 [32, 54]

### <報文>

### (原著論文)

- A. Himeda, T. Kato and M. Ogata: Phys. Rev. Lett. 88, 117001 (2002). "Stripe States with Spacially Oscillating d-Wave Superconductivity in the Two-Dimensional t-t'-J Model"
- Y. Yanase: J. Phys. Soc. Jpn. 71, 278-292 (2002).
   "Theory of Electric Transport in the Pseudogap State of High-T<sub>c</sub> Cuprates"
- H. Seo, M. Ogata and H. Fukuyama: Phys. Rev. B 65, 085107-1-085107-9 (2002). "Aspects of the Verwey transition in magnetite"
- M. Saito and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. 71, 721-724 (2002). "Midgap States in Disordered Spin-Peierls Systems"
- [5] C. Hotta, M. Ogata, and H. Fukuyama: Phys. Rev. B 65, 184421-1-184421-7 (2002). "Possible ferromagnetism in divalent borides"
- T. Koretsune and M. Ogata: Phys. Rev. Lett. 89, 116401-1-116401-4 (2002). "Resonating-Valence-Bond States and Ferromagnetic Correlations in the Doped Triangular Mott Insulator"
- [7] M. Udagawa, M. Ogata, and Z. Hiroi: J. Phys. Soc. Jpn. 71, 2365-2368 (2002). "Exact Results of Ground-state Entropy for Ising Pyrochlore Magnets Under a Magnetic Field along [111] Axis"
- [8] Y. Yanase and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. 72, 673-687 (2003). "Microscopic Identification of the D-vector in Triplet Superconductor Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>"
- [9] H. Tsuchiura, M. Ogata, Y. Tanaka and S. Kashiwaya: preprint. "Electronic States around a Vortex Core in High-T<sub>c</sub> Superconductors based on the t-J Model"
- [10] H. Tsuchiura, M. Ogata, Y. Tanaka and S. Kashiwaya: preprint. "Nature of carriers in onedimensional correlated electron systems"
- [11] M. Kuwabara, H. Seo, and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. 72, 225-228 (2003). "Co-Existence of Charge Order and Spin-Peierls Lattice Distortion in One-Dimensional Organic Conductors"
- [12] M. Ogata and A. Himeda: J. Phys. Soc. Jpn. 72, 374-391 (2003). "Superconductivity and Antiferromagnetism in an Extended Gutzwiller Approximation for t-J Model: Effect of Double-Occupancy Exclusion"
- [13] M. Ogata: preprint. "Superconducting States in Frustrating t-J Model: A Model Connecting High- $T_c$  Cuprates, Organic Conductors and Na<sub>x</sub>CoO<sub>2</sub>"
- [14] T. Koretsune and M. Ogata: preprint. "Ferromagnetism on the frustrating lattices"

(会議抄録)

- [15] M. Ogata: ISSP Kashiwa 2001 Correlated Electrons (Kashiwa, October 2-5, 2001) J. Phys. Chem. Solids 63, 1329-1332 (2002). "Spin Triplet Superconductivity in Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>: Anisotropic Antiferromagnetis Spin-Fluctuation"
- [16] Y. Yanase: ISSP Kashiwa 2001 Correlated Electrons (Kashiwa, October 2-5, 2001) J. Phys. Chem. Solids 63, 1413-1417 (2002). "Theory of electrical transport in the pseudogap state: Effects of spin fluctuations and superconducting fluctuations"
- T. Koretsune and M. Ogata: ISSP Kashiwa 2001 Correlated Electrons (Kashiwa, October 2-5, 2001)
   J. Phys. Chem. Solids 63, 1419-1422 (2002). "The ground state energy and entropy of the twodimensional t-J model"
- [18] A. Himeda and M. Ogata: ISSP Kashiwa 2001 Correlated Electrons (Kashiwa, October 2-5, 2001) J. Phys. Chem. Solids **63**, 1423-1426 (2002). "The effect of the negative t' term on the stripe formation in the two-dimensional t-J model"
- [19] C. Hotta, M. Ogata, and H. Fukuyama; ISSP Kashiwa 2001 Correlated Electrons (Kashiwa, October 2-5, 2001) J. Phys. Chem. Solids 63, 1505-1509 (2002). "Ferromagnetism in CaB<sub>6</sub>"
- [20] Y. Yanase and K. Yamada: ISS '2001 Kobe (Kobe, September 25-27, 2001) Physica C 70-78, 378-381 (2002). "Theory of Superconducting Fluctuations and Pseudogap Phenomena in High-T<sub>c</sub> Cuprates"
- [21] H. Tsuchiura, S. Uno, Y. Tanaka, M. Ogata, J. Inoue and S. Kashiwaya: Proceedings of International Symposium on "Superconducting Device Physics (SDP2001)" (Centennial Hall, Tokyo Institute of Technology, Meguro, Tokyo Japan) June 25-27 (2001). Physica C **367**, 20-23 (2002). "Vortex tunneling spectra of high- $T_c$  superconductors based on the t-J model"
- [22] H. Seo, M. Ogata and H. Fukuyama: Proceedings of SCES2001 (Ann Arbor Michigan, August 2001). Physica B **312**, 691-693 (2002). "Orbital Ordering and Bond Dimerization in Magnetite Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>"
- [23] H. Seo and M. Ogata: Proceedings of ISCOM2001 (Rusutsu Hokkaido, November 2001). Synth. Metals 133-134, 299-300 (2003). "Theories on 1/4filled one-dimensional systems — Effects of frustration and electron-lattice coupling —"
- [24] M. Ogata, H. Tsuchiura, Y. Tanaka and S. Kashiwaya: Proceedings of 23rd International Conference on Low Temperature Physics (Hiroshima, August 21-28, 2002). To appear in Physica C. "Local magnetic moments in vortex cores and around nonmagnetic impurities in two-dimensional t-J model"
- [25] Y. Yanase and M. Ogata: Proceedings of 23rd International Conference on Low Temperature Physics (Hiroshima, August 21-28, 2002). To appear in Physica C. "Microscopic Determination of the D-vector in Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>"

- [26] T. Koretsune and M. Ogata: Proceedings of 23rd International Conference on Low Temperature Physics (Hiroshima, August 21-28, 2002). To appear in Physica C. "Effect of a geometrical frustration in the doped Mott Insulator"
- [27] H. Seo, M. Ogata, and H. Fukuyama: Proceedings of 23rd International Conference on Low Temperature Physics (Hiroshima, August 21-28, 2002). To appear in Physica C . "Theory of the Verwey transition in Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>"
- [28] H. Seo, M. Kuwabara, and M. Ogata: Proceedings of International Workshop on Electronic Crystals, ECRYS2002 (St. Flour France, September 2002). J. Phys. IV France **12**, Pr9-205 - Pr9-209 (2002). "Co-Existence of Charge Order and Spin Peierls Lattice Distortion in One-Dimensional Organic Compounds"
- [29] Y. Yanase: Proceedings of New3SC-4 San Diego To appear in Int. J. Mod. Phys. B "Pseudogap Induced by the SC Fluctuation: Higher Order Correction beyond the T-matrix Approximation"

### (国内雑誌)

- [30] 小形正男:超電導応用基盤技術動向調査委員会・第1 小委員会報告「基礎物性」(2002年5月). "最近の理 論の進展"
- [31] 土浦宏紀、小形正男、田仲由喜夫、柏谷聡:日本物理 学会誌 58, 254-257 (2003). "銅酸化物超伝導体にお ける不純物束縛状態"

### (学位論文)

- [32] 安樂臨太郎: "Hidden Order in Two-Leg Spin Ladders" (東京大学大学院理学系研究科・修士論文)
- [33] 田中康寛: "強斥力極限における一次元拡張ハバード モデルの基底状態の性質"(東京大学大学院理学系研 究科・修士論文)

(著書)

[34] 福山秀敏、小形正男: 『物理数学 I』(培風館 2003 年).

<学術講演>

### (国際会議)

### 一般講演

- [35] M. Kuwabara, H. Seo, and M. Ogata: 2002 CERC-ERATO Workshop "Phase Control of Correlated Electron Systems", (Hawaii USA, May 2002). "Coexistence of charge order and spin-Peierls lattice distortion in one-dimensional organic conductors"
- [36] H. Seo, M. Ogata and H. Fukuyama: Sawatzky workshop (Groningen, Netherland, June 9-14, 2002). "Theory of Verwey transition in Magnetite Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>"

- [37] M. Kuwabara, H. Seo, and M. Ogata: International Conference on Science and Technology in Synthetic Metals (ICSM 2002), (Shanghai China, July 2002). "Charge order and bond order in onedimensional charge transfer salts"
- [38] M. Ogata: LT23, 23rd International Conference on Low Temperature Physics (International Conference Center, Hiroshima, August 21-28, 2002).
   "Electronic states around vortex cores in the t-J model"
- [39] Y. Yanase and M. Ogata: LT23, 23rd International Conference on Low Temperature Physics (International Conference Center, Hiroshima, August 21-28, 2002). "Microscopic Determination of the *D*vector in Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>"
- [40] T. Koretsune and M. Ogata: LT23, 23rd International Conference on Low Temperature Physics (International Conference Center, Hiroshima, August 21-28, 2002). "Effect of a geometrical frustration in the doped Mott Insulator"
- [41] H. Seo, M. Ogata, H. Fukuyama: LT23, 23rd International Conference on Low Temperature Physics (International Conference Center, Hiroshima, August 21-28, 2002). "Theory of the Veerwey transition in Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>"

### 招待講演

- [42] M. Ogata: COE Workshop on "Perspective in physics of strongly electron correlation" (Hongo, Tokyo, July 26, 2002). "Spin ice under a magnetic field along [111] axis"
- [43] H. Seo, M. Kuwabara, and M. Ogata: International Workshop on Electronic Crystals ECRYS2002 (St. Flour France, September 2002). "Co-Existence of Charge Order and Spin Peierls Lattice Distortion in One-Dimensional Organic Compounds"
- [44] M. Ogata: 15th International Symposium on Superconductivity (ISS 2002) (Yokoyama, November 11-13, 2002) "Coexistence of Stripes and Superconductivity"
- [45] M. Ogata, A. Himeda and T. Koretsune: New3SC-4, The Third International Conference on New Theories, Discoveries and Applications of Superconductors and Related Materials (San Diego, January 17-22, 2003). "Resonating Valence Bond (RVB) States and Magnetism: Competition or Coexistence"
- [46] Y. Yanase: New3SC-4, The Third International Conference on New Theories, Discoveries and Applications of Superconductors and Related Materials (San Diego, January 17-22, 2003). "Microscopic Study on the Anomalous Properties in High-Tc Cuprates"
- [47] M. Ogata and Y. Yanase: COE workshop (Osaka, February 20-22, 2003). "Microscopic Identification of the d-vector in Triplet Superconductivity: Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>"

(国内会議)

一般講演

- [48] 柳瀬陽一、小形正男:日本物理学会、中部大学 2002, 9.6-9.9 (分科会) "Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> のスピン三重項超伝導に おける D-ベクトルの決定:スピン-軌道相互作用を含 むミクロ理論"
- [49] 是常隆、小形正男:日本物理学会、中部大学2002, 9.6-9.9 (分科会) "幾何学的フラストレーションをも つ遍歴電子系における強磁性"
- [50] 土浦宏紀、田仲由喜夫、小形正男、柏谷 聡:日本物 理学会、中部大学 2002, 9.6-9.9 (分科会) "銅酸化物 超伝導体の磁束芯における電子状態"
- [51] 妹尾仁嗣、桑原真人、小形正男:日本物理学会、中部 大学 2002, 9.6-9.9 (分科会) "電荷秩序とスピンパイ エルス状態の共存 I"
- [52] 桑原真人、妹尾仁嗣、小形正男:日本物理学会、中部 大学 2002, 9.6-9.9 (分科会) "電荷秩序とスピンパイ エルス状態の共存 II"
- [53] 小形正男:日本物理学会、東北大学 2003, 3.28-3.31 (年会) "フラストレーション系での RVB 状態と反強 磁性"
- [54] 安樂臨太郎、小形正男:日本物理学会、東北大学 2003, 3.28-3.31 (年会) "非局所的なユニタリ変換を用いた 2 本足スピン梯子の研究"
- [55] 田中康寛、小形正男:日本物理学会、東北大学 2003, 3.28-3.31 (年会) "強斥力極限における一次元拡張ハ バードモデルの基底状態の性質"
- [56] 宇田川将文、小形正男、広井善二:日本物理学会、東 北大学 2003, 3.28-3.31 (年会) "カゴメアイスの厳密 な自由エネルギーの研究"
- [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」研究計画発表会(京都大学、京大会 館)2002, 6.27-6.29 "銅酸化物および Ru 酸化物に対 する数値計算"
- [58] 小形正男:高温超伝導討論会(名古屋大学理学部)2002, 10.26-10.27 "t-J モデルの最近の進展"
- [59] 妹尾仁嗣、桑原真人、小形正男:物性研短期研究会 「分子性導体の物質探索と新機能開拓」(東京大学物性 研究所) 2002,11 "一次元有機導体における電荷秩序 と電子格子相互作用"
- [60] 柳瀬陽一:軌道自由度を持つ強相関電子系の理論の 進展(京都大学基礎物理学研究所)2002,11.25-26 "Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>のD-ベクトルに対するミクロ理論"
- [61] 小形正男、宇田川将文、広井善二:科研費特定領域研究 (A)「遷移金属酸化物における新しい量子現象」成果報 告会 (東京大学物性研究所) 2003, 1.8-1.10 "Ground State Entropy and Phase Transitions in Kagomé ice"
- [62] 柳瀬陽一:科研費特定領域研究 (A)「遷移金属酸化物 における新しい量子現象」成果報告会 (東京大学物性 研究所) 2003, 1.8-1.10 "Microscopic Theory on the D-Vector in Triplet Superconductor Sr2RuO4"

[63] 小形正男、宇田川将文、広井善二:新プログラム「新しい研究ネットワークによる電子相関系の研究」全体会議(熱海「松風苑」)2003,3.7-3.9 "フラストレートしたスピン・アイス(カゴメ・アイス)系での新しいタイプの相転移"

招待講演

[64] 小形正男:日本物理学会、中部大学 2002,9.6-9.9 (分 科会)シンポジウム『Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>の超伝導はどこまで わかったか。— その意義と今後の課題 — 』7p PA4 "スピンゆらぎによる3重項超伝導、3バンドの効果"

(セミナー)

[65] 小形正男:物性若手夏の学校、サブゼミ講義 2002,8.2 "BCS 理論を超えたもの"

# 3.5 常行研究室

分子動力学法や密度汎関数法に基づく第一原理電 子状態計算などの計算物理学的手法を用いて、でき る限り具体的な物質の物性をミクロな観点から探る ことにより、物性理論研究の新たな展開を目指して いる。とくに実物実験が困難な超高圧下の物性、あ るいは新しいデバイスや触媒反応の研究にもつなが る表面・界面物性を、理論的に予測・予言すること が、我々の主たる研究テーマである。またそのため の新しい手法開発にも力を注いでいる。

# 3.5.1 新しい電子状態計算法の開発:トラ ンスコリレイティッド法

密度汎関数法に基づく第一原理電子状態計算は、 半導体や通常の金属で大きな成功を収めてきたが、 遷移金属酸化物に代表されるいわゆる強相関電子系 では絶縁体となるべき物質が計算上金属になる例が 多く知られており、また固体の凝集エネルギーや固 体表面への分子吸着エネルギーも不正確であること が指摘されている。このことから、真に予言力をもっ た新しい電子状態計算手法の開発が望まれている。

トランスコリレイティッド法は、電子相関を直接 取り入れたジャストロー・スレーター型多体波動関 数を変分関数に用いる波動関数法(密度汎関数法に 対する用語)の一種であり、決定論的な方程式(SCF 方程式)を解くことによってスレーター行列式を構 成する1電子軌道を最適化することができるところ が、変分モンテカルロ法と大きく違う点である。ま た、それ自身が多体問題の精密な解法として使える だけでなく、より厳密に近い拡散量子モンテカルロ 法の初期値を作る方法としても有望である。ただし 現在のところ、SCF 方程式を解くために最低限必要 な3体積分の評価が困難なことと、周期系への拡張 に問題が残っている。

我々はトランスコリレイティッド法に基づく固体 の電子状態計算の実現を目指して、方法論の開発を 進めている。本年度は原子・分子の計算でこの手法 の有効性を確認したほか、ハートリー・フォック法 の Koopmans' Theorem に相当する定理が存在する ことを証明し、励起状態やイオン化エネルギー計算 の可能性を開いた。さらにジェリウム模型に応用し、 量子モンテカルロ法で求められた相関エネルギーが、 きわめて広い密度範囲で精度良く、かつ簡単に計算 できることを明らかにした。またトランスコリレイ ティッド法によるジェリウムの計算に基づき、密度汎 関数法の非局所交換相関ポテンシャルを提案した。

トランスコリレイティッド法の応用として期待されるもう一つの分野は、質量の異なる量子力学的粒子を含んだ多成分系である。たとえば水素やミュオンと電子を含む系では、電子系を密度汎関数法で扱い、陽子やミュオンの量子効果を経路積分で取り入れるという手法(第一原理経路積分分子動力学法)があり、我々もその手法を用いて固体水素などのシミュレーションを行ってきた。ところがこの手法で



図 3.5 a: ウィグナー半径 r<sub>s</sub>の関数として描いた電子ガ スの全エネルギー比較。ウィグナーの表式(Wigner)や ハートリー・フォック法(HF)に比べて、現在開発中のト ランスコリレイティッド法(TC)の結果は量子モンテカル 口法による厳密なシミュレーション結果(GFMC)にきわ めてよく一致する。TC 法は電子系だけでなく、電子と正 孔、陽電子、ミュオン、プロトンなどの多成分系にも拡張 することができる。

は、電子系は常に格子の運動に追随できるという断 熱近似を用いており、さらに電子以外の粒子の量子 統計性が無視されていることも問題であった。

そこで我々はトランスコリレイティッド法の多成分 系への拡張を行い、簡単なモデル系に適用した。そ の結果、2成分の質量比が1から無限大に至るきわ めて広い領域で、トランスコリレイティッド法がき わめて精度の良いエネルギーを与えることが明らか になった。

# 3.5.2 量子常誘電体 SrTiO<sub>3</sub>のドーピング 効果

ペロフスカイト型で量子常誘電体として知られる SrTiO<sub>3</sub>にバンドギャップ以上の光を照射すると、低 温で誘電率が2桁も上昇するという実験結果が、最 近国内の複数のグループから報告されている。その 機構としては、光キャリア(電子、正孔)による試 料の一部の金属化と、光励起を種とした強誘電ゆら ぎの増大という、2つの説があるが、実験的には明 快な答えが得られていない。

我々は光励起状態の第一原理電子状態計算によっ て、その機構の解明を目指しているが、今年度は最 初の試みとして、電子、正孔、もしくはその両方の キャリアが加えられたときにSrTiO<sub>3</sub>の構造不安定 性がどのように変わるかを調べた。その結果、TiO<sub>6</sub> 八面体の回転不安定性については、電子と正孔で逆 向きの効果がある一方、強誘電不安定性については キャリアの種類を問わず不安定性を抑制する傾向が あることがわかった。この結果は、単純な光キャリ ア励起で強誘電ゆらぎが増大するという説に対して は否定的な結果であるが、現在のところキャリアの 局在性が強い場合については計算の対象外となって おり、引き続き検討を続けている。

## 3.5.3 シリコン (100) 表面の環式炭化水素

最近、物性研究所の吉信グループにより Si(001) 上 で不飽和炭化水素(C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>,C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>,C<sub>6</sub>H<sub>10</sub> など)が 2×1 構造を保ちながら規則的に吸着されることが見いだ され、有機化学における 2 次元の反応場を目指した 研究が進められている。我々は吉信グループと連携 し、理論計算の立場から系の構造決定を行い、電子 状態を議論している。今年度は、吸着した炭化水素 の熱的揺らぎによって、吸着構造の見え方が変わる ことを、第一原理分子動力学法シミュレーションに より示した。この結果は現在、吉信グループにより、 低温 STM 実験で追試中である。

# 3.5.4 Pt(111) 表面に吸着した NO 分子 の振動スペクトル

NO/Pt 吸着系は3元触媒との関連で研究されてき たが、Pt(111) 表面の NO 吸着位置といった単純な 問題ですら、長らく未解決であった(もしくは間違っ た理解をされていた)。我々は第一原理分子動力学法 を用いて NO 吸着位置の被服率依存性を調べ、高被 服率で二種類の吸着位置(hollow と on-top)がある という結論を得て、多くの実験結果を説明すること ができたが、唯一、赤外反射吸収分光法で単一吸着 子しか見えないと言う事実が謎として残されていた。

そこで今年度は、新しい吸着位置モデルに対して 動的双極子モーメントを計算し、赤外反射吸収分光 法のピーク強度を見積もった。その結果、通常の強 度移行 (intensity transfer) にくわえて、異なる吸着 位置の併存による電子状態変化のため、非常に極端 なピーク強度の偏りが生じ、実験的には単一吸着子 のように見えることが明らかになった。これによっ て、Pt(111) 表面の NO 分子吸着に関する実験結果 は、すべて説明されたことになった。

# 3.5.5 シリコン表面の酸化機構

シリコン表面の熱酸化機構に際しては、酸化膜/バ ルクSi界面からSiが放出され、この放出Siの酸化 膜中への逆流が酸化膜成速度を支配しているという 界面Si放出モデルが、共同研究者の影島博之(NTT 物性基礎研)らによって提案されている。そこで格 子間Si原子のエネルギーと分布の様子を第一原理分 子動力学法を用いてしらべ、この機構の妥当性を確 認した。

# 3.5.6 高圧下の水素結合: $\delta$ -AlOOHと $\delta$ -Al<sub>1-2x</sub>Mg<sub>x</sub>Si<sub>x</sub>OOH

東北大の大谷グループによって最近高圧合成され た AlOOH の高圧相 ( $\delta$  相) は、高温高温でも安定な ことから、下部マントルに水 ( $H_2O$ ) を運ぶ物質の候 補として注目されている。実験からは、水素を含ま ない類似構造 (rutile 構造) と比較して、弾性率の異 方性が異なり、体積弾性率が非常に大きいという特 徴が明らかになっている。

我々は第一原摯子動力学法を用いて結晶構造とその圧力依存性を調べ、対称化した強い水素結合(O-H-O)の存在によってそのような構造物性が説明できることを明らかにしてきた。今年度はさらにAlを部分的にMgとSiに置換した系についても同様の計算を行い、水素結合の対称化の効果が一般的傾向であることを明らかにした。

<報文>

(原著論文)

- J. Tsuchiya, T. Tsuchiya, S. Tsuneyuki and T. Yamanaka, First principles calculation of a highpressure hydrous phase, δ-AlOOH, Geophys. Res. Lett. (2002) 2002GL015417.
- [2] Y. Yoshimoto and S. Tsuneyuki, First-principles study of inter nitrogen interaction energy of Cu(100)-c(2×2)N surface, Surf. Sci. 514 (2002) 200-205.
- [3] H. Aizawa, Y. Morikawa, S. Tsuneyuki, K. Fukutani and T. Ohno, A density-functional study of the atomic structures and vibrational spectra of NO/Pt(111), Surf. Sci. 514 (2002) 394-403.
- [4] S. Tsuneyuki, Quantum localization of hydrogen atoms in solids, Current Opinion in Solid State and Materials Science, 6 (2002) 147-151.
- [5] N. Umezawa and S. Tsuneyuki, Transcorrelated self-consistent calculation for electronic systems with variational Monte Carlo method, Int. J. Quant. Chem. 91 (2) (2003) 184-190.
- Y. Yoshimoto and S. Tsuneyuki, First principles study of inter-nitrogen interaction energy of Cu(100)-c(2×2)N surface, Int. J. Quant. Chem. 91 (2) (2003) 211-215.
- [7] N. Umezawa and S. Tsuneyuki, Transcorrelated Method for Electronic Systems Coupled with Variational Monte Carlo Calculation, submitted.
- [8] N. Umezawa and S. Tsuneyuki, Nonlocal densityfunctional description constructed from a Jastrow factor, submitted.
- [9] K. Uchida, S. Tsuneyuki and T. Schimizu, Firstprinciples Calculations on the Carrier-Doping Effects in SrTiO<sub>3</sub>, submitted.
- (著書)

- [10] S. Tsuneyuki, Computer Simulations in Carbon Alloys (eds. E. Yasuda et al.) (Elsevier, 2003) pp.145-159.
- [11] 常行真司、「新しい高圧力の科学」第3.1章「高圧力シ ミュレーション」(毛利信男編)(講談社サイエンティ フィク,2003) pp.72-83.

(国内雑誌)

- [12] 常行真司,「高圧物性研究のためのコンピュータ・シ ミュレーション」,高圧力の化学と技術 12 (2002) 323-330.
- [13] 相澤秀昭, 森川良忠, 常行真司, 福谷克之, 大野隆央, 「Pt(111) 表面に吸着した NO 分子の振動スペクトル - 第一原理計算による解析 - 」, 表面科学 24 (2003) 48-54.

(学位論文)

[14] (博士論文)N. Umezawa, Transcorrelated Approach for Electronic State Calculation.

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [15] Jun Tsuchiya, Taku Tsuchiya, Shinji Tsuneyuki, Takamitsu Yamanaka : First principles calculation of high-pressure hydrous phase, -AlOOH, 18th general meeting of the International Mineralogical Association, Edinburgh UK, Sep. 3, 2002.
- [16] N. Umezawa and S. Tsuneyuki: Transcorrelated Electronic Calculation for Solids, 5th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations, Seoul National University, Oct. 23, 2002.
- [17] K. Akagi and S. Tsuneyuki, Unsaturated cyclichydrocarbon molecules chemisorbed on a Si(001) surface: A first-principles molecular dynamics study, Dr. Rohrer's JSPS Award Workshop III and ISSP international workshop — a role of physics for nano science and technology —, ISSP, Kashiwa, Feb. 17-18, 2003.
- [18] K. Kusakabe, M. Maruyama, S. Tsuneyuki, K. Akagi, Y. Yoshimoto and J. Yamauchi: Magnetism in hydrogenated nano-graphite, APS March Meeting, Austin, Texas, March 3-7, 2003.

### 招待講演

[19] S. Tsuneyuki: First-Principles Theory for the Structure of Materials under Extreme Conditions, The 5th Synchrotron Radiation Theory Network (SRRTNet) Workshop, SPring-8, Oct.15, 2002 (Invited).

(国内会議)

一般講演

- [20] 三牧 旬, 土屋 卓久, 常行真司, 山中高光: AlOOH 高圧相の第一原理電子状態計算, 地球惑星関連合同大 会, 東京, 2002 年 5 月 27 日
- [21] 赤木和人,常行真司:「アモルファス氷中の化学反応」, 特定領域研究 B 公開研究会,京都大学大学院理学研 究科2号館第2講議室,2002年7月18日
- [22] 赤木和人,常行真司:「アモルファス氷における CO の化学反応:第一原理計算からのアプローチ」,日本 物理学会 2002 年秋季大会,中部大学,2002 年 9 月 8 日.
- [23] 梅澤直人,常行真司: Transcorrelated 法による固体の電子状態計算,日本物理学会2002年秋季大会,中部大学,2002年9月7日.
- [24] 吉本芳英:折り畳み法による表面・界面での分子ス ケール構造形成日本物理学会 2002 年秋季大会,中部 大学,2002 年 9 月 6 日.
- [25] 三牧 旬, 土屋 卓久, 常行真司, 山中高光: AlOOH 高圧相の第一原理電子状態計算, 高圧討論会, 愛媛, 2002 年 11 月 27 日.
- [26] 三牧 旬, 土屋 卓久, 常行真司, 山中高光: AlOOH 高圧相の第一原理電子状態計算, 鉱物学会, 大阪, 2002 年10月2日.
- [27] 常行真司: 固体中の水素分布と原子核の量子効果, 第 16期 CAMM フォーラム(虎ノ門パストラル)2003 年1月10日.
- [28] 影島博之,秋山亨,赤木和人,白石賢二,植松真司,常 行真司:Si 熱酸化における界面 Si 放出過程の検討,応 用物理学会 薄膜・表面物理分科会・シリコンテクノ ロジー分科会共催特別研究会「極薄シリコン酸化膜 の形成・評価・信頼性」第8回研究会,熱川,2003年 1月 24-25 日.
- [29] 影島博之,秋山亨,赤木和人,白石賢二,植松真司,常 行真司:シリコン酸化膜/シリコン界面における界面 放出 Si の安定性,春季第 50 回応用物理学関係連合 講演会,神奈川大学(横浜キャンパス),2003 年 3 月 27-30 日.
- [30] 赤木和人,常行真司:低速電子を入射された低温氷中での CO の化学反応:第一原理計算からのアプローチ,日本物理学会第58回年次大会,東北大学,2003年3月28-31日
- [31] 吉本芳英,常行真司:前処理による金属等の電子状態 計算の SCF iteration の加速,日本物理学会 第58回 年次大会,東北大学,2003 年3月28-31 日
- [32] 梅澤直人,常行真司: Transcorrelated 法による非局 所密度汎関数の作成,日本物理学会第58回年次大会, 東北大学,2003年3月28-31日
- [33] 内田和之,常行真司:量子常誘電体 SrTiO3 における キャリアドープ効果の第一原理計算,日本物理学会第 58回年次大会,東北大学,2003年3月28-31日
- [34] 佐久間怜,常行真司,梅澤直人:Transcorrelated 法に よる多成分量子系の取り扱い,日本物理学会第58回 年次大会,東北大学,2003年3月28-31日
- [35] 草部浩一,丸山正憲,常行真司,吉本芳英,赤木和人, 山内淳:ジグザグ端改質法による磁気的ナノグラファ イトと高スピン炭化水素の理論予測,日本物理学会第 58回年次大会,東北大学,2003年3月28-31日

### 招待講演

[36] S. Tsuneyuki and N. Umezawa: Transcorrelated method: Another Approach in Wave Function Theory, The 2nd ∑<sub>xc</sub> Meeting, つくば, 2002 年 1 月 31 日-2 月 1 日.

(セミナー)

- [37] S. Tsuneyuki: Hydrogen in Solids, Concurrent Computing Laboratory for Materials Simulations, Louisiana State University, May 11, 2002.
- [38] N. Umezawa: Transcorrelated Self-consistent Caluctation with Variational Monte Carlo Method for Electronic Systems, Louisiana State University, May 9, 2002.
- [39] S. Tsuneyuki: Transcorrelated method: Another Approach in Wave Function Theory, Concurrent Computing Laboratory for Materials Simulations, Louisiana State University, May 8, 2002.
- [40] 梅澤直人: Transcorrelated Self-consistent Caluclation with Variational Monte Carlo Method for Electronic Systems, 筑波大学, 2002 年 5 月 29 日.
- [41] 常行真司: 水素の物質科学 原子核の量子効果は 何をもたらすか,東北大学理学部物理学教室物性コロ キウム,2002 年 7 月 17 日.
- [42] 常行真司: トランスコリレイティッド法による電子 状態計算,大阪大学理学部物性セミナー,2002年10 月17日.
- [43] 常行真司:水素 境界領域の物質科学,東大理・物 理学教室談話会,2002 年 10 月 28 日.
- [44] 常行真司:計算機支援による新物質設計:新物質 BCN ヘテロダイヤモンドの可能性,東京工業大学応用セラ ミックス研究所,2002年12月18日.

# 4 物性実験

# 4.1 長澤研究室

今年度は、定年退職に伴う研究室の最終年度にあ たり、研究室の閉鎖を念頭において、次の二つの課 題に重点的に取り組んだ。

- 半導体のバルク励起子のボース・アインシュタイン凝縮相(BEC)の実現
- 最小半径のカーボン・ナノチューブの発光および電気伝導の光制御

# 4.1.1 亜酸化銅における励起子系の BEC 相の探査

レーザーが発明された直後から、励起子系の BEC 実現の可能性は興味ある研究対象として知られ、こ れまで実験によるさまざまな試みが行われてきた。 しかしながら、今日まだ万人が納得できる証拠を得 るには至っていない。過去に遡れば、波長可変の色 素レーザーが比較的容易に分光学の手段として利用 されるようになった1970年代にその話題が沸騰 した一つの時期がある。我々は当時、塩化第一銅の励 起子分子系において、BEC 実現やその診断において 二光子分光が極めて有効であることを明らかにした が、利用できたレーザー技術の水準や試料の評価方法の不十分さのために、信頼すべき励起子パラメー ターが得られず、定量的な実験条件の制御ができな かった。そのため BEC の確実な証拠を得るにはい たらなかった。次にこの話題が再び脚光を浴びたの は1990年代初頭のことで、亜酸化銅におけるパ ラ励起子の BEC の実現かというニュースに、その 実現性がにわかに高まった。一方、その直後199 5年には、念願の BEC がアルカリ原子系で実現し た。一方、パラ励起子の BEC に関する実験的根拠 には基本的な問題が残されていることがその後認識 され、話題の中心はもっぱら原子系の BEC に移った に見える。そこで、我々は励起子分子における BEC 探査の経験を踏まえ、同様な手法を亜酸化銅の励起 子系の BEC の実現および診断に積極的に活用する ことが意義深いと考えた。以来、不均一歪みの制御 による励起子のトラップの製作と評価、および二光 子励起による低温励起子系の捕獲と集積法の開発を 行ってきた。さて、本年度は励起子系の BEC にか かわる研究が世界的に新しい局面を迎えたやに見え る年である。二重量子井戸における励起子系の BEC に係るという新しい手法による研究が発表され、再 び励起子系のBECへの関心が高まってきた。我々の アプローチは幸いこのような時期に時宜を得て、こ の分野に新しいインパクトを与えようとしている。

不均一歪みによる励起子トラップの二光子分光によ る形状評価 [1, 3, 8, 11, 14]

亜酸化銅の最低励起子は四重極遷移許容のオルソ 励起子とスピン禁制のパラ励起子から成る。不均一 歪みの下では、これらの励起子が空間に依存したエ ネルギーシフトを示すことからポテンシャル井戸が 形成される。我々は、オルソ励起子の鋭い二光子共 鳴を利用して歪みトラップの形状診断を行った。図 4.1 aにその一例を示す。ここでは、二光子励起エネ ルギーは、ポテンシャル井戸の底から 3.5 meV 上に 調整されている。図aにあるように、レーザーパル ス照射中は励起光の二光子エネルギーと励起子のポ テンシャルエネルギーとが一致した場所でのみ第 高調波が発生し、それらが円環状の明線として観測 される。これらの明線は等ポテンシャル面を表して いる。円環が二重になるのは、オルソ励起子の縮退 が歪みの下で解けることに由来している。我々は、二 光子エネルギーを高精度に調整しつつ等ポテンシャ ル面を詳細に記録することによって、オルソ、パラ 励起子に対するポテンシャル井戸が調和型となって いることを定量的に確かめた。



図 4.1 a: 発光の空間分布の時間変化。レーザーの パルス幅は 12 ns、検出器のゲートは a) 0-10 ns, b) 20-30 ns, c) 40-50 ns, d) 60-70 ns, e) 60-160 ns, f) 160-260 ns, g) 260-360 ns, h) 360-460 ns である。ま た各々のブロックの大きさは 0.59×0.78 mm である。

一方、レーザー照射後の励起子流の振る舞いを、 時間分解発光結像法によって初めて詳細に追跡する ことができた。図 b-h はその結果を示す。レーザー 励起によって、上述の第二高調波発生とともに励起 子の実励起が起き、オルソ励起子はポテンシャル井 戸の縁に円環状に生成される。これらが時間と共に 低ポテンシャル側に移動し、最終的にはポテンシャ ルの底に集められている様子が図 b-h において良く 分かる。オルソ励起子はナノ秒のスケールでパラ励 起子に下方転換するため、最終的に井戸底にトラッ プされるのはサブマイクロ秒の寿命を持つパラ励起 子である。 BEC の探査 [6, 7, 12, 15, 17]

図 4.1 bの挿入図は、二光子励起エネルギーがポテ ンシャルの底から 1.0 meV 上に調整された場合の、 図 4.1 aa と同様の時間分解発光パターンである。白 い矢印で示されるように、ポテンシャル井戸の底に 対応する場所に鋭いピークが見い出された。



図 4.1 b: 上: 図 4.1 a と同様の時間分解発光パター ン。二光子励起エネルギーはポテンシャルの底から 1.0 meV 上に調整された。下: A-B 上の発光の強度 分布とポテンシャルエネルギーの計算値。

図下部にはポテンシャルの底を通る A-B 上の空間 分布を影付の線で示した。その基線は、二光子励起 エネルギーを表している。実線は関連するオルソ励 起子の2つのサブ準位とパラ励起子についてのポテ ンシャルエネルギーの計算値である。L,M,L',M'に おいて励起エネルギーとポテンシャルエネルギーが 一致することから、これらのピークはオルソ励起子 の共鳴励起によるものであると分かる。一方、中心 のピーク C に対しては共鳴する準位は存在しないこ とから、オルソ励起子またはパラ励起子の二次的な 生成あるいはポテンシャル底への誘導散乱の可能性 が示唆される。

図 4.1 cには強度分布の時間的変化を示す。中心 のピークは縁のピークに比べて約 2 ns 遅れて立ち上 がり、単なる幾何光学的な散乱が原因とは考えにく い。また、縁のピークに比べて空間幅が狭く、約 8 ミクロンである。生成された励起子がこの領域に全 て閉じ込められていると仮定すると、その位相空間 密度は1以上であると見積もられた。さらに、中心 のピークの強度は入射光強度に対して強い非線型性



図 4.1 c: 発光の強度分布の時間変化。ゲート幅は 5 ns。

を示すことから、我々は縁に作られた励起子がポテ ンシャル井戸の底へ誘導散乱されたものと解釈した。 これがオルソ励起子、パラ励起子いずれの集積によ るものかを明らかにするため、現在分光測定を行っ ている。

# 4.1.2 ゼオライト 結晶中のカーボン・ナノ チューブの光学応答

カーボン・ナノチューブが発見されてすでに12 年になるが、今やこの物質は、次世代の機能素子の 材料としていわゆるナノテクノロジーの主役の一翼 を担うに至っている。我々は、1998年に香港の 湯グループで発見されたカーボン・ナノチューブの 光学特性を彼らと共同で研究してきた。このカーボ ン・ナノチューブはゼオライト結晶中に規則的に配列 して精製される微細なチャンネルの中にできるもの で、その方位やサイズが決まっているというユニー クな構造をしている。我々はこのシステムが可視領 域の発光を示すこと、また、その電気伝導特性が光 照射によって変化する現象に興味を持ち研究を続け てきた。これは、この試料の評価や新しい利用方法 を広げる基礎研究として有意義である。

### 電気伝導の光制御 [4, 5, 10, 16]

物性研究所のレーザー施設を利用し、電気特性の光 照射効果を調べた。図 4.1 d はカーボン・ナノチュー ブを含む微細なゼオライト結晶に電極をつけ、それ にレーザー光を照射するための実験の概念図である。

図 4.1 e は、光を照射する前にはオーミックな I-V 特性を示す試料が、光を照射した結果電流に顕著な 非線形性が見られる様子を示したものである。縦軸 は電流の線形性からのずれを印加電圧に対してプロッ



図 4.1 d: 電気伝導測定のための実験配置。



図 4.1 e: 光照射前後の I-V 特性。挿入図は (b) を微 分したもので約 0.5V のギャップが明瞭に見られる。

トしたものである。(a) は照射前で非線形性は無視で きる。(b) は照射後である。この曲線の微分を印加 電圧に対してプロットしたものが図に挿入されてい る。これを見ると約0.5Vのギャップが明瞭に現れて いる。我々は、金属的なチューブに光が照射される ことによってその部分が半導体的な性質を持ったた めと解釈した。この問題は、今後光を用いたカーボ ン・ナノチューブの電気特性の制御の道を暗示する ものである。

<報文>

### (原著論文)

- N. Naka and N. Nagasawa: Two-photon diagnostics of stress-induced exciton traps and loading of 1s-yellow excitons in Cu<sub>2</sub>O, Phys. Rev. B, 65 (2002) 075209.
- [2] N. Nagasawa, H. Sugiyama, N. Naka, I. Kudryashov, M. Watanabe, T. Hayashi, I. Bozovic, N. Bozovic, G. Li, Z. Li, and Z.K. Tang: Visible

emission of single-wall carbon nanotubes formed in micro-channels of zeolite crystals, J. Lumin., **97** (2002) 161.

- [3] N. Naka and N. Nagasawa: Nonlinear paraexciton kinetics in a potential trap in Cu<sub>2</sub>O under two-photon resonance excitation, Phys. Rev. B, 65 (2002) 245203.
- [4] Y. Kamada, N. Naka, S. Saito, N. Nagasawa, Z.M. Li, and Z.K. Tang: Photo-irradiation effects on electrical conduction of single wall carbon nanotubes in zeolite single crystals, Solid State Commun., **123** (2002) 375.
- [5] Y. Kamada, N. Naka, N. Nagasawa, Z.M. Li, and Z.K. Tang: Photo-induced current-modulation in zeolite crystals containing single wall carbon nanotubes, Physica B, **323** (2002) 239.
- [6] N. Naka and N. Nagasawa: Bosonic stimulation of cold 1s excitons into a harmonic potential minimum in Cu<sub>2</sub>O, Solid State Commun., **126** (2003) 523.
- [7] N. Naka and N. Nagasawa: Optical tracking of high-density cooled excitons in potential traps in Cu<sub>2</sub>O, Physica Status Solidi (b), in press.

### (会議抄録)

[8] N. Naka and N. Nagasawa: Two-photon excitation of paraexcitons in Cu<sub>2</sub>O, 26th International Conference on The Physics of Semiconductors (2002), in press.

### (学位論文)

- [9] 中 暢子: Two-photon spectroscopy on excitons in strain-induced traps in Cu<sub>2</sub>O (博士論文)
- [10] 鎌田洋平: ゼオライト結晶(AFI) 中の単層カーボン ナノチューブの光伝導(修士論文)

### <学術講演>

(国際会議)

### 一般講演

[11] N. Naka and N. Nagasawa: Two-Photon excitation of paraexcitons in Cu<sub>2</sub>O, 26th International Conference on The Physics of Semiconductors (Edinburgh, UK, July 2002).

### 招待講演

[12] N. Naka and N. Nagasawa: Optical tracking of high-density cooled excitons in potential traps in Cu<sub>2</sub>O, 7th International Workshop on Nonlinear Optics and Excitation Kinetics in Semiconductors (Karlsruhe, Germany, February 2003).

### (国内会議)

-般講演

- [13] N. Nagasawa, I. Kudryashov, and N. Naka: Optical nano-tomographic approach to sealing-wax-red Mesopotamian glasses, 日本物理学会 2002 年秋季大 会(中部大、2002 年 9 月)
- [14] 中 暢子、長澤信方: 亜酸化銅励起子の二重井戸トラッ プ、同上
- [15] 中 暢子、長澤信方: 亜酸化銅励起子における高密度 冷却励起子の調和トラップ中の空間分布、同上
- [16] 鎌田洋平、中 暢子、長澤信方、Z.K. Tang: AFI-SWCNT における電気伝導の光変調 II、同上
- [17] 中 暢子、長澤信方: 亜酸化銅励起子の基底状態への 誘導散乱、日本物理学会第 58 回年次大会(東北大、 2003 年 3 月)
- (集中講義他)
- [18] 長澤信方: 励起子気体のボース・アインシュタイン凝 縮(BEC):研究の新展開(岡山大学、2002年12月)
- [19] 長澤信方: 励起子系のボース・アインシュタイン凝縮 (物理学教室最終講義、2003年3月)

# 4.2 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 元電子系の量子輸送、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干渉効果、電子間 の相互作用に起因する相関効果などが、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1、0次元の電子 微細化することによって作られる1、0次元の電子 微細化することによって作られる1、0次元の電子 微細化することによって作られる1、0次元の電子 微細化することによって作られる2000 見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1、0次元の電子 間に着目し、人工原子、分子における多体問題、強 磁場中での強相関現象、電子スピン、核スピンの関 与する伝導現象、1次元朝永ーラッティンジャー相 互作用液体の電子物性、量子ドットで構成される量 子計算機の基礎物性(量子コヒーレンスや量子もつ れ状態)の解明と制御、および表面敏感走査プロー プを利用した状態密度の直接観察法の開発を行って いる。

## 4.2.1 人工原子の電子相関の研究

電子スピン緩和とフォノンボトルネック効果 [7,9,13]

人工原子中の電子系は、外界との様々な相互作用 を介して位相緩和(横緩和)とエネルギー緩和(縦 緩和)を起こす。これらの緩和現象は、物理的には 量子力学的な保存則の本質に関わるだけでなく、人 工原子の電荷やスピンを使った量子計算、スピンメ モリーなどの応用を考える上でも重要である。電子 の緩和現象は、従来、光学的な手法による電子 - 正 孔対の形成と消失の時間分解測定を通して議論され ているが、この場合には、純粋に電子系の問題とし て、あるいは、厳密な軌道やスピンの量子数保存の 問題として調べることができない。

今回、電気的なポンプ・アンド・プローブ法を用 いて、厳密に1電子状態のエネルギー緩和(フォノ ン放出)2電子状態のスピン3重項から1重項への 緩和(フォノン放出とスピン反転)を測定すること に成功した。前者では、励起状態である2p状態から 基底の1s状態への遷移を緩和エネルギーをパラメー タとして測定した。緩和時間は数ナノ秒程度で、緩 和エネルギーが増大するとともに緩和時間が長くな る様子を観測した。これらは、理論的な予測と見事 に対応しており、「フォノンボトルネック」と呼ばれ る量子ドット特有の電子 フォノン散乱の抑圧効果 が存在していることを確認することができた。

後者については、緩和エネルギーは前者と同程度 であるにも関わらず、緩和時間は200µ秒と極めて長 いことが分かった。これは、半導体人工原子には、強 いスピン散乱の要因がないことを反映している。ス ピン散乱要因としては、スピン軌道相互作用や核ス ピンとの超微細結合が予測されている。いずれも、µ 秒より十分長いとされており、今回の実験結果と符 号する。なお、この緩和時間を詳細に調べたところ、 実験値は人工原子を介した高次のトンネルで制限さ れており、内在的なスピン緩和時間はもっと長いこ とが分かった。これらの結果は、人工原子のスピン 自由度が外界と切り離されていることを示すもので、 電子スピンが量子計算への応用に有望であることを 裏付けている。

また、スピン緩和時間が長いことを利用して、緩 和時間より十分短い時間スケールで、様々な励起状 態の関与する非平衡電気伝導を検出することに成功 した。これにより、単一電子トンネルの領域である にも関わらず、2電荷、あるいは3電荷の関与する電 子伝導を観測すると共に、スピンブロケードと呼ば れるスピンの関与する伝導の閉塞現象を観測した。

### スピン3重項近藤効果 [21, 23, 25]

近藤効果はスピン相関に起因する典型的な多体効 果で、通常、人工原子がスピン S=1/2の不対電子を 含むときに、外部電極のフェルミ面の電子スピンと の1重項結合を介して現れる。我々は、これまで、人 工原子の2電子状態がスピン1重項(S=0)-3重項 (S=0)縮退しているとき、著しい近藤効果の増大が 起こることを見出した。今回、この縮退近傍での近 藤効果の振舞いを詳細に調べた結果、1重項単独の 状態では近藤効果は急激に消失するが、3重項単独 の場合には、近藤効果はべき関数的に弱くなること を見出した。この近藤効果は、1重項と3重項のエ ネルギー分離が近藤温度より大きくなっても残存す る。3重項近藤効果は、今回初めての観測であり、理 論予測とも良い一致を示す。

# 近藤量子ドットを埋め込んだ AB リングの位相問題 [15]

量子ドットを含むアハラノフーボーム形のリング (ABリング)は、ドットを透過する電子波の位相変 化を調べるために適した構造として知られている。 我々は、これまで、2次元電子ガスを加工して同様 な構造を作成し、近藤効果を示す量子ドットの位相 問題を調べて来た。今回、ドットを作るトンネル障 壁の反射、透過する電子波が関与する干渉効果(AB 効果)のバイアス電圧依存性を観測した。この結果 に対して適当な散乱模型を導入することにより、非 平衡電子の位相緩和時間を導出できることを見出し、 それに基づいて、高い電圧の領域や高い磁場の領域 では位相緩和時間が非常に短くなることを明らかに した。

近藤チェスボードパターンのモデル [18,66]

横型の近藤量子ドットでは、ク-ロン振動コンダ クタンスが、磁場-ゲート電圧平面で「チェスボード パターン」と呼ばれる独特の特性を示すが、その発 現機構はよく分かっていない。今回、磁場中ででき る最低次とその次のランダウ準位に属する2種類の 電子系に結合量子ドット模型を適用し、さらに3次 元スピン密度関数分析法を用いて解析することによ り、チェスボードパターンを定量的に説明すること ができた。

### 強磁場中の電子相関 [39, 69]

人工原子に磁場を印加すると、ランダウ量子化の ために電子軌道が縮退してゆく。十分に強い磁場の もとでは、すべての電子が最低ランダウ準位に入る ため、クーロン相互作用が系の状態を決定する電子 系、即ち、強相関電子系となる。我々はこれまで、こ のような強磁場下での人工原子のエネルギースペク トルを測定し、その電子状態を調べてきた。今回、 従来の半分程度の電子密度を持つ人工原子を作成し、 相関効果を調べた。電子密度が低いことは閉じ込め エネルギーが小さいことに対応しており、より低磁 場で強相関状態が実現する。同様に、様々な状態遷 移がより低磁場で起こる。これを反映して、今回の 人工原子では、2電子系のスピン1重項(全スピン S=0, 全軌道角運動量 M=0)-3 重項(S=1, M=1) 遷移が従来の半分程度の磁場(B=2.2T)で、さらに 高磁場の B=7.5T で、これまで見られなかった新し い状態遷移が観測された。これは、全軌道角運動量 M=1から2、あるいは3への状態遷移、即ち、強相 関2電子系の出現に対応するものと考えられる。

# 4.2.2 人工分子の電子状態の研究

人工分子の結合・反結合電子状態と緩和時間 [33, 38, 68]

これまで、2個の半導体人工原子からなる人工分 子の電子状態を詳しく調べることにより、比較的強 い結合の人工分子では結合状態の電子占有が優先し、 同時に、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報告してきた。今年度は、理論 グループ(Modena大学のRontani博士)と協力し て人工分子のトンネル結合と並行な縦磁場中での電 子状態の厳密な同定を行った。これにより、比較的弱 い結合の人工分子について、縦磁場中の基底状態に、 反結合状態の電子占有が見られることがわかった。

さらに、同様な人工分子を用いて、バイアス電圧 の印可による量子力学的結合の破れを調べた。実験 では、ソース-ドレイン電圧(バイアス電圧)とゲー ト電圧の関数としてトンネル電流特性(クーロンダ イヤモンド特性)を測定した。これにより、基底状 態・励起状態のバイアス電圧依存性が求められる。そ の結果、いくつかの励起状態について、励起エネル ギーが、バイアス電圧とともに増大、あるいは減少 することを見出した。人工分子では、本来、2つの ドットのポテンシャルが僅かにズレている。バイア ス電圧を正負いずれかの方向に加えると、このズレ を増大(減少)させる方向、即ち、結合軌道と反結合 軌道のエネルギー差を広げる(小さくする)ように 働く。従って、結合軌道にのみ入った基底状態に対し て励起状態が反結合軌道の電子を含む場合には、そ の励起エネルギーはバイアス電圧とともに増大(減 少)する。これは、電子の局在(反局在)の増大に 対応する。この考え方に従って、上記実験結果はよ く説明されることが分かった。なお、これは基底状 態と励起状態における結合・反結合の電子占有数の 差の良い判定法を提供する。

現在、人工分子特有のエネルギー緩和問題の解明 に着手している。人工原子の場合と同様なポンプ&プ ローブ法により、結合状態と反結合状態の間での緩 和時間の測定を進めている。まだ、動作確認を行っ ている段階で定量的な議論は出来ていないが、初期 結果としては、その緩和時間は、単純な軌道緩和に 比べて比較的長いように思われる。

単一電子 2 重量子ドットにおける光介在トンネリン グ [12, 82]

電子が2つの量子ドット間を光子の吸収・放出を ともなって遷移する光介在トンネルは2重ドットの 電子状態を探る有力な手段であるとともに人工2準 位系(2量子ドット+1電子)をコヒーレントに制 御するために必要な技術として注目を集めている。 横型量子ドットを用いた過去の実験では各ドットは 数十個程度の電子を含んでおり、人工2準位系の構 成要素である各ドットの軌道状態はよくわかってい なかった。

我々は縦型2重量子ドットを用いて実験を行い、各 ドットの電子数および軌道状態が同定された光介在 トンネルを初めて観測した。縦型ドット試料は高周 波応答を改善すべく絶縁基板上に成長した3重障壁 構造から形成された。T=0.24K での電流・電圧特性 において、一方のドットの1s軌道から他方のドット の2p軌道への弾性トンネルによる鋭い電流ピークが 観測されるが、ここで29.0GHzのマイクロ波をソー ス・ドレイン間に印可すると、弾性トンネルによる 電流ピークの両側にそれぞれ1光子の吸収・放出を 伴う1s 2pトンネル電流のピークが現れることを 見いだした。

### 自然形成2重量子ドットのトンネル結合[20,44]

自然形成 InAs 量子ドットは、寸法が極めて小さい ために電子がドット中に強く閉じ込められる。これ に関連して、その量子力学的性質の解明が急がれて いる。今回、とくに2重結合ドットに着目して、量 子力学的結合の影響を単一電子スペクトロスコピー の手法により調べた。

試料としては、n-GaAs/AlGaAs/n-GaAsのAlGaAs 障壁中に縦方向に二重結合した自然形成 InAsドット を埋め込んだ構造を、直径  $0.25 \sim 0.3 \mu m$ の円形メサ に加工し、その周囲に一様なゲート電極をつけたも の(縦型の単一電子トンネルトランジスタ構造)を 用いた。InAsドットは、通常、 $10^9 \sim 10^{10}$  個 cm<sup>-2</sup> の高密度で自然形成されるので、単一の結合ドット の性質を検出することが難しい。実際、これまでに 単一の InAs ドットの電子輸送特性を詳細に調べた報 告はない。今回作成した試料でも、数組の結合ドット が伝導に寄与できる。しかし、我々の試料では、ドッ トごとにゲート電極からの距離が違うので、各結合 ドットはそれぞれ異なるゲート特性を示す。これを 利用して、単一の結合ドットの電気伝導を識別でき た。さらに、ドット間の距離が異なる試料を使って、 単一電子トンネルの特徴であるク - ロン振動(線形 伝導)とク - ロンダイアモンド(非線形伝導)の特 性を調べた結果、距離の大小を反映して、量子力学 的な弱結合、強結合の分類をすることができた。

# 4.2.3 一次元電子系の電子間相互作用の研 究

結合量子細線における電気伝導[11,22,35,78]

昨年度は、結合量子細線において負のドラッグ効 果をはじめて観測し、これが、平行に近接して並べ られた量子細線おける電子 ホール間のドラッグによることを提案した。ここでは、負のドラッグ効果は 一方の細線中の電子状態がウィグナー結晶化するこ とによって生じると考えてきたが、詳細なメカニズ ムは不明のままであった。今回その実験、理論の考 察を進め、両方の細線における電子間相互作用効果 (TLL 効果)と不純物による散乱効果(運動量の保 存を補償するため)が、負のドラッグ効果の出現に 重要な役割を果たしていることを見出した。すなわ ち、負のドラッグは、ウィグナー結晶化した一方の細 線(ドライブ細線)に電流を注入したときに、もう −方の細線 ( ド ラッグ細線 ) 内の電子間相互作用に よって、この細線の端にある電子が圧縮率の高い二 次元のリードに押し出されることにより生じる。現 在、この有限長さの効果を確認するため、長さの異 なる量子細線を用いたドラッグ効果の実験を試みて いる。

また、ドライブ細線内の電子の粒子的な性質や相 互作用効果による低い圧縮率が負のドラッグ効果の ような特異な現象を引き起こすことに注目し、一方 の細線の内部に量子ドットを埋め込んだ場合のドラッ グ効果の変化、さらには、二つの細線の内部に量子 ドット列の構造をつくることにより、こうした現象 の極限であるカレントミラー効果などの実験にも取 り組んでいる。

一方、結合量子細線における細線間のトンネル電 流に相互作用の影響が現れると予測されることから、 その実験を開始した。二つの細線中のモード間での 微分トンネルコンダクタンス dI/dV は、サブバンド の底のエネルギーが一致するときにピークをとる。こ のことは、運動量の保存を考慮して導かれる。実験 では、このようなピークの位置を細線間の電圧や細 線の電子密度(ゲート電圧)の関数として測定する ことで、各細線の閉じ込めエネルギーやサブバンド 間隔などを定量的に調べることができた。また、サ ブバンドの底が共鳴的な dI/dV ピークの位置と一致 するあたりでは、ピーク構造が、細線間の電圧また は細線の電子密度に対してジャンプする様子を観察 した。これは細線内の相互作用の効果だと思われる が、詳しいメカニズムは不明のままである。

量子ドットを内包する量子細線 [28, 49, 77]

我々は量子細線中に量子ドットを作り込んだ系を 使って、1-0-1次元系特有の電気伝導現象、朝永-ラッ ティンジャー液体(TLL)効果、TLL-量子ドット結 合系のスピン相関などを解明すべく、実験を進めて いる。昨年度後半より、2次元電子ガスに表面ショッ ト-ゲート電極を付けて量子細線を作り、さらにそ の細線中に近接した一対の微小な線ショットキーゲー トを付けてドットを作ることを試みている。これま で、ドットと細線間の結合度の変調幅が小さく、理論 と対応付けられるような条件が得難いという問題が あったが、今回試料に改良を加え、結合度を大きく変 調できる試料の作成に成功した。この試料のコンダ クタンス特性測定により、ピンチオフ近傍のドット と細線の結合が弱い領域でクーロン振動と考えられ る共鳴ピークが現れること、及び結合が強い領域で は二重障壁による干渉効果や磁場による AB 効果を 反映した干渉が現れることを確認した。 一方、TLL については、共鳴ピークの温度依存性に非フェルミ 液体的特徴が現れことが予測されている。今回観測 した弱結合領域における共鳴ピークについては、高 さの温度依存性が通常の量子ドットの場合と異なる ことを発見したが、TLL の理論と対応付けるには実 験が不十分であった。現在、さらに詳細な実験を進 めている。

# 4.2.4 電子スピン制御と量子計算のハード ウエア実現に向けて

2次元電子系量子ホール状態の電子スピン共鳴 [27, 50, 79]

半導体量子ドット中の電子スピンを用いて量子演 算を行うには個々のドット内のスピンを制御するこ とが重要な技術である。電子スピン共鳴(ESR)は 電子の周りの局所的状態を敏感に反映するため、個々 のドットの電子スピンにアクセスするための手法と なりうる。また、核スピン - 電子スピン相互作用が 電子スピンの位相緩和時間を決定付ける要因とされ ている。ESR は核スピンを偏極させるとともに、そ の共鳴スペクトルは核スピンの偏極状態を反映する ことから、核スピン - 電子スピン相互作用の知見を 得るためにも有用な手法である。

我々は、出発点として空洞共振器をもちいたセットアップを製作し、n-AlGaAs/GaAsの2次元電子系の量子ホール領域におけるESRを磁気縦抵抗率の変化として観測し、併せて電子スピンによる核スピンの動的なポンピングと緩和の振る舞いを測定した。まず、ESRピークの周波数依存性からg因子を求めると磁場の一次関数で書けることがわかった。その、絶対値はGaAsバルクの値より14%程度小さく、こ

れは、2次元電子の波導関数がg因子(絶対値)の小 さいAlGaAsにしみ出していることを反映している。 ESRピークの幅から電子スピンの横緩和時間として 7n秒を得た。この値は下限値を与えるもので、真の 時間はさらに長いと考えられる。また、核スピンの 緩和機構をESR共鳴ピークのずれ(Overhauserシ フト)として観測した。この結果は時間に対して、単 一の時定数をもった指数関数では記述できず、2つあ るいはそれ以上の緩和機構が関与することを示唆し ていた。この起源については、関与する核種(Gaと As)の違いが考えられるが、特定するためには、よ り詳細な検討が必要である。

スピン量子ビットと電子スピンの ESR 制御 [46, 52]

今年度から、量子計算機の基本的な物理の解明と 基礎技術の実現を目指して実験を開始した。まず、量 子ドットのスピンによる量子ビットの実現と結合量 子ドットの2個のスピン間の交換結合制御による量 子もつれの実現のための技術開発に着手した。前者 については、局所的な電子スピン共鳴(ESR)が基 盤技術になることから、それに適した2種類の量子 ドットデバイスを設計、制作した。ひとつは縦型量 子ドットの周りに金属のリングを半周巻きつけた構 造であり、半絶縁性の基板上に作製されている。も うひとつは有機金属気相選択成長法を用いて作製さ れた横型量子ドットに金属ゲートを取りつけた構造 である。同時に、コヒーレントなスピン制御に必要 となる数十 GHz の帯域をもつ高速制御系を希釈冷凍 機に組み込んだ。これらを用いて、現在、予備実験 を進めている。

後者については、まず最適な結合量子ドットを実 現する必要があることから、2個の縦型量子ドット を横方向に結合させた構造を作製し、電気伝導測定 を行った。このデバイスは横型量子ドット構造と縦 型量子ドット構造の両方の利点を併せ持つ。すなわ ち、2つのドット間のトンネル結合をドット間に配 置したゲート電極により制御可能であり(横型の利 点)かつ少数電子系の実現が可能である(縦型の利 点)。初期的な実験では、2つのドットが直列結合し ているような電気伝導度特性を観測している。

### 2 次元電子ガスにおける Rashba 効果

半導体デバイスにおいて、電子のスピンを利用し ようとする試みは、新たなデバイス原理の追求とい う観点から注目されている。半導体ヘテロ界面にで きる電界に起因したスピン軌道相互作用は Rashba スピン軌道相互作用と呼ばれ、これを用いて半導体 伝導電子のスピンを制御することができる。我々は 半導体2次元電子ガスチャネルとして、この Rashba スピン軌道相互作用が強く現れる挟ギャップ半導体 (InGaAs)を用い、その電気伝導特性を測定してい る。測定したシュブニコフ・ド・ハース振動の解析 から、チャネルを流れる電子は Rashba スピン軌道 相互作用によってスピン分極していることを確認し た。現在、このスピン分極した電子を磁性体電極を プローブとして、スピンバルブ効果を用いて検出す るための実験を進めている。

# 4.2.5 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。 今年度も、前年度に引き続いて装置の立ち上げを進 めた。まず、内部除振を考えてSTM ヘッドを冷凍機 に取り付け、装置を組み上げた。そして、長期間の 高温ベークの後、所定の高真空度を達成した。STM 観察に関しては、室温でグラファイトの基本的な原 子像を観察した後、ヘリウム冷却、磁場印加、低温 での STM 動作安定化などの問題を改善しながら実 験中である。現在は、半導体 p-InAs の劈開面の観 察を進めており、室温、超高真空中では、清浄でフ ラットな STM 像が得られることを確認した。

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、科学技術振興事業団・樽茶プロジェ クト、さきがけプロジェクトとの共同研究である。

<受賞>

 博茶清悟:第48回仁科記念賞「人工原子・分子の 実現」

<報文>

(原著論文)

- [2] W.G.van der Wiel, S. De Franceschi, J.M. Elzerman, S. Tarucha, L.P. Kouwenhoven, J. Motohisa, F. Nakajima, and T. Fukui : Two-stage Kondo effect in a quantum dot at high magnetic field, Phys. Rev. Lett. 88, 126803 -126806(2002).
- [3] D.G. Austing, S. Sasaki, K. Muraki, K. Ono, S. Tarucha, M. Barranco, A. Emperador, M. Pi, F. Garciasd : Influence of mismatch on the addition energy spectra of vertical diatomic artificial molecules, Physica E, **12**, 896 -900 (2002).
- [4] P. Matagne, J.P. Leburton, D.G. Austing and S. Tarucha: Shell charging and spin-filling sequences in realistic vertical quantum dots, Phys. Rev. B, 65, 085325 (2002).
- [5] A. Patane, R.J.A. Hill, L. Eaves, P.C. Main, M. Henini, M.L. Zambrano, A. Levin, N. Mori, C. Hamaguchi, Yu. V. Dubrovskii, E.E. Vdovin, D.G. Austing, S. Tarucha and G. Hill: Probing the quantum states of self-assembled InAs dots by magnetotunneling spectroscopy ,Phys. Rev. B, 65, 165308 (2002).

- [6] R.J.A. Hill, A. Patane, P.C. Main, M. Henini, L. Eaves, S. Tarucha and D.G. Austing: Controlling the electron tunneling through InAs self-assembled dots, J. Appl. Phys. **91**, 3474 (2002).
- [7] T. Fujisawa, Y. Tokura, D.G. Austing, Y Hirayama, and S. Tarucha: Non-equilibrium transport through a vertical quantum dot when spinflip energy relaxation, Phys. Rev. Lett. 88, 236802-236805 (2002).
- [8] S.De Franceschi, R. Hanson, W.G. van der Wiel, J.M. Elzerman, J.J. Wijpkema, T. Fujisawa, S. Tarucha, L.P. Kouwenhoven: Out of equilibrium Kondo effect in a mesoscopic device, Phys. Rev. Lett. 89, 156801-156804 (2002).
- [9] T. Fujisawa, Y. Tokura, D.G. Austing, Y. Hirayama, S. Tarucha:Spin-dependent energy relaxation inside a quantum dot, Physica B, **314**, 224-229 (2002).
- [10] K. Ono, D.G. Austing, Y. Tokura, and S. Tarucha: Angular momentum selectivity in tunneling between two quantum dots, Physica B, **314**, 450-454(2002).
- [11] M. Yamamoto, M. Stopa, Y. Hirayama, Y. Tokura, and S. Tarucha: Coulomb drag between quantum wires: negative anomaly and magnetic field effect, Physica E, **12**, 726-729 (2002).
- [12] K. Ono, D.G. Austing, Y. Tokura, and S. Tarucha: Current Rectification by Pauli Exclusion in a Weakly Coupled Double Dot System, Science, 297, 1313-1317(2002).
- [13] T. Fujisawa , D.G. Austing , Y. Tokura , Y. Hirayama , S. Tarucha: Allowed and forbidden transitions in articial hydrogen and helium atoms, Nature, 419, 278-281(2002).
- [14] P. Matagne, J. P. Leburton, D. G. Austing and S. Tarucha:Hund's first rule and addition energy spectra of cylindrical quantum dots, Physica E, 13, 679-682 (2002).
- [15] W.G. van der Wiel, Yu.V. Nazarov, S. De Franceschi, T. Fujisawa, J.M. Elzerman, E.W.G.M. Huizeling, S. Tarucha, and L.P. Kouwenhoven: Electro-magnetic Aharonov-Bohm effect in a 2-D electron gas ring, Phys. Rev B, 67,033307 (2003).
- [16] W.G. van der Wiel, S. De Franceschi, J.M Elzerman, L.P. Kouwenhoven, T. Fujisawa, S. Tarucha and L.P. Kouwenhoven: Electron transport through double quantum dots, Rev. Mod. Phys. **75** No.1, 1-22 (2003).
- [17] K. Ono, D.G. Austing, Y. Tokura, and S. Tarucha: Spin selective tunneling and blockade in twoelectron double quantum dot, accepted for publication in Phys. Stat. Sol.
- [18] M. Stopa, W.G. van der Wiel, S. De Franceschi, S. Tarucha and L.P. Kouwenhoven:Magnetically induced chessboard pattern in the conductance of a

Kondo quantum dot, accepted for publication in Phys. Rev. Lett.

- [19] S Tarucha,D G Austing, S Sasaki, K Muraki, K Ono, M Barranco, A Emperador, M Pi, and F Garcias: A density-functional-theory application to double quantum dots: influence of mismatch on the addition energy spectra of vertical diatomic artificial molecules, Int. J. of Quantum Chemistry 91, 498 (2003).
- [20] T. Ota, T. Hatano, S. Tarucha, H.Z. Song, Y.Nakata,T. Miyazawa, T. Ohshima and N. Yokoyama "Transport properties of a single pair of coupled self-assembled InAs quantum dots", accepted for publication in Physica E.

### (会議抄録)

- [21] W. Izumida, O. Sakai, S. Tarucha: Singlet-triplet Kondo effect in tunneling through a quantum dot, Proceedings of the 26th International Conference on the Physics of Semiconductors (University of Glasgow, UK, Editors J.H. Davies and A.R. Long)
- [22] M. Yamamoto, M. Stopa, Y. Hirayama, Y. Tokura, and S. Tarucha: Negative Drag in Quantum Wires, Proceeding of 26th International Conference on the Physics of Semiconductors (World Scientific, Edinburgh. Editor A.R. Long and J.H. Davies (2003)).
- [23] S. Sasaki, N. Asakawa, S. Amaha, W. Izumida and S. Tarucha: The Kondo effect in a S=1/S=0 Quantum Dot, Proceeding of the International Conference on Quantum Transport and Quantum Coherence (The Physical Society of Japan, Editors Y. Ono, A. Kawabata and S. Komiyama (2003)).
- [24] M. Honda, K. Ono and S. Tarucha: Enhanced TMR Signal in a Spin-Valve Transistor, Proceedings of the International Symposium on Mesoscopic Superconcductivity and Spintronics (World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Editors H. Takayanagi and J. Nitta (2003)).

### (国内雑誌)

[25] 樽茶清悟: ナノテクノロジーと物理,学術の動向, No2002.8, 18-22(2002).

### (修士論文)

- [26] 浅川直輝:量子ドットにおけるスピン三重項状態の関 与する近藤効果
- [27] 沼田愛彦: 2次元電子系量子ホール状態の電子スピン 共鳴
- [28] 横山弘泰: 可変トンネル障壁を有する量子細線の電気 伝導

### (著書)

[29] D G Austing, S Sasaki, K Muraki, Y Tokura, K Ono, S Tarucha, M Barranco, A Emperador, M Pi, and F Garcias, Vertical diatomic artificial quantum dot molecules, pp13-32, "Advanced Luminescent Materials and Quantum Confinement II", Eds. M Cahay, J P Leburton, D J Lockwood, S Bandyopadhyay, N Koshida and M Zacharias, by The Electrochemical Society, Pennington, USA (2002), ISBN 1-56677-330-X.

[30] S. Tarucha, T. Fujisawa, L.P. Kouwenhoven and W.G. van der Wiel:Atomic-like behavior and the Kondo effect in quantum dots, in Electron Transport in Quantum dots, Ed. J.P. Bird scheduled for publication Spring/Summer 2003.

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [31] S. Sasaki, N. Asakawa, S. Amaha, W. Izumida and S. Tarucha: The singlet-triplet Kondo effect in a vertical quantum dot holding two electrons, International conference on physics and application of spin related phenomena in semiconductors, Wurzburg (Germany), July 23-16 (2002).
- [32] M. Honda, T. Sato, T. Manago, H. Akinaga, K. Ono, S.Tarucha: Ballistic hot electron transport in a spin valve transister, International conference on physics and application of spin related phenomena in semiconductors, Wurzburg (Germany), July 23-16 (2002).
- [33] S. Amaha, M. Rontani, F. Manghi, M. Molinari, D.G. Austing, K. Ono, S. Tarucha:Molecular Phases in vertically coupled quantum do ts, ER-ATO Workshop,Mesoscopic Correlations in Nanostructures,Dish Hotel Delft, Delft,(The Netherlands), July 27(2002).
- [34] K.Ono:Transport Detection of NMR in Spinblocked Double Quantum Dot, 26th International Conference on the Physics of Semiconductors, Edinburgh International Conference Centre, Edinburgh Scotland (UK), July 29-Aug.2 (2002).
- [35] M. Yamamoto, M. Stopa, Y. Hirayama, Y. Tokura, S. Tarucha: Negative drag in parallel quantum wires, 26th International Conference on the Physics of Semiconductors, Edinburgh International Conference Centre, Edinburgh Scotland (UK), July.29-Aug.2 (2002).
- [36] W. Izumida, O. Sakai, S. Tarucha: Singlet-triplet Kondo effect in tunneling through a quantum dot,26th International Conference on the Physics of Semiconductors, Edinburgh International Conference Centre, Edinburgh Scotland (UK), July.29-Aug.2 (2002).
- [37] T. Hatano, T. Yamaguchi, T. Ota , and S. Tarucha: Orbital-dependent tunnel coupling in double quantum dot system, 26th International Conference on the physics of Semiconductors, Edinburgh International Conference Centre, Edinburgh Scotland (UK), July.29-Aug.2 (2002).

- [38] S. Amaha, M. Rontani, F. Manghi, M. Molinari, D.G. Austing, K. Ono, S. Tarucha:Molecular Phases in vertically coupled quantum dots, 26th International Conference on the physics of Semiconductors, Edinburgh International Conference Centre, Edinburgh Scotland (UK), July.29-Aug.2 (2002).
- [39] Y.Nishi, S.Amaha, H.Imamura, D.G.Austing, K.Ono, L.P.Kouwenhoven, and S.Tarucha:Magic number states and shell structure of a fewelectron vertical quantum dot under high magnetic field,26th International Conference of the Physics of Semiconductors, Edinburgh International Conference Centre, Edinburgh (UK), July.29-Aug.2 (2002).
- [40] S. Sasaki, N. Asakawa, S. Amaha, W. Izumida and S. Tarucha: The Kondo effect in a S=0/S=1 quantum dot, International conference on quantum transport and quantum coherence, Sophia Univ. (Japan), Aug.16-19 (2002).
- [41] N. Asakawa, S. Sasaki, W. Izumida, S. Amaha, S. Tarucha:Singlet-triplet and Triplet Kondo Effect in a Two-electron Quantum Dot,23rd International Conference on Low Temperature Physics (LT23),Hiroshima (Japan), Aug.26 (2002).
- [42] M. Rontani, S. Amaha, D.G. Austing, K. Ono, D. Bellucci, G. Goldoni, F. Manghi, E. Molinari, S. Tarucha:Molecular Phases in Coupled Quantum Dots, 2nd International Conference on Semiconductor Quantum Dots -QD2002- ,Komaba Campus, University of Tokyo (Japan),Sep 30 - Oct 3 (2002).
- [43] W.G. van der Wiel :Microwave electron spin manipulation in semiconductor artificial atoms and molecules, The 8th Symposium on the Physics and Application of Spin Related Phenomena in Semiconductors (PASPS8), Sendai (Japan), Dec. 19-20 (2002).
- [44] T.Ota, T.Sato, T.Hatano, K.Ono, S.Tarucha, H.Z.Song, T.Ohshima and N.Yokoyama: Fourth International Symposium on Nanostructures and Mesoscopic Systems, Tempe Arizona (USA), Feb.17-23 (2003).
- [45] K. Ono:All-electrical nuclear spin manipulation in quantum dots, Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures(CISN), NTT Atsugi R & D center (Japan), Mar. 11 (2003).
- [46] W.G. van der Wiel :Single-electron spin manipulation in quantum dots (poster), Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures(CISN), NTT Atsugi R & D center (Japan), Mar. 10-12 (2003).
- [47] T. Inoshita and S. Tarucha:Theory of hyperfineinduced current instability in double quantum dots in the spin blockade regime, Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures, NTT Atsugi (Japan), Mar.10-12 (2003).

- [48] M. Stopa, W. van der Wiel, S. De Franceschi, S. Tarucha and L. Kouwenhoven: Magnetically induced chessboard pattern in the conductance of a Kondo quantum dot, Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures(CISN), NTT Atsugi (Japan), Mar.10-12 (2003).
- [49] H. Yokoyama, T. Sato, K. Ono, Y. Hirayama, S. Tarucha : Transport Properties of a Quantum Wire with a Tunable Double Potential Barrier, Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures(CISN), NTT Atsugi (Japan), Mar.10-12 (2003).
- [50] S. Teraoka, A. Numata, S. Amaha, K. Ono, S.Tarucha:Electron spin resonance and nuclear spin pomping in 2DEG Quantum Hall System, Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures(CISN), NTT Atsugi R & D center (Japan), Mar. 11 (2003).
- [51] W.G. van der Wiel :Coherent electron spin phenomena in quantum dots, Stanford University solid state seminar,Stanford University (USA) Mar.20 (2003).
- [52] W.G. van der Wiel : High-frequency singleelectron spin manipulation in semiconductor quantum dots (poster), Gordon Research Conference on Quantum Information Science, Ventura(USA), Mar. 23-28 (2003).

### 招待講演

- [53] S. Tarucha: Interactions and spin effects in coupled quantum dot structures, Spin and Interactions in Mesoscopic Systems, University of Minnesota (USA), May 10-12 (2002).
- [54] S. Tarucha: Interactions and Spins in Quantum Dot Atoms and Molecules, Chaos and Interactions: from Nuclei to Quantum Dots, Seattle (USA), Jul.29-Aug.2 (2002).
- [55] S. Tarucha: Control of Spin Effects in Artificial Semiconductor Molecules and the Ability for Making Quantum Bits and Entanglement, The Second Asia Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics (APFB02), Shanghai Convention Centor (Chaina), Aug.27-30 (2002).
- [56] S. Tarucha (plenary): Spins and Interactions in Semiconductor Double Dot Systems, The 23rd International Conference on Low Temperature Physics, Hiroshima (Japan), Aug. 21-27 (2002).
- [57] S. Tarucha: "Spin effects in quantum dots and technical approach for implementing spin qubits" 3rd European QIPC Workshop, Dubrin (Ireland) Sep.15-18 (2002).
- [58] S. Tarucha: "Spin effects in quantum dot atoms and molecules" COST P5 Workshop- Mesoscopic Electronics-, Catania (Italy) Oct.17-19 (2002).

- [59] S. Tarucha: Interactions and spins in Quantum dot molecules, The 6th Symposium on Spin-Charge-Photon (SCP) Coupled Systems, Tokyo (Japan), Nov. 18- 20 (2002).
- [60] S. Tarucha: Spin effects in quantum dots with the ability for making spintronic devices, 29th International Symposium on Compound Semiconductors 2002,Lausanne(Switzerland), Oct 7-10(2002).
- [61] S. Tarucha(representive K.Ono): Spin Effects In Hydrgen-Molecure Like Quantum Dot Systems,MRS2002 Fall Meeting, Boston (U.S.A), Dec.1-6 (2002)
- [62] S. Tarucha: Spins and Kond effect in quantum dots, The 4th International Symposium on Nanostructure and Mesoscopic System, Arizona (U.S.A), Feb.17-22 (2003)
- [63] S. Tarucha: Spins and Exchange Coupling in Quantum Dot Structures,2003 GRC on Quantum Information Science, Ventura (U.S.A), Mar.23-28 (2003)
- [64] K.Ono: Energy and spin relaxation in tunneling between quantum dot, ERATO Workshop,Mesoscopic Correlations in Nanostructures, Dish Hotel Delft, Delft (The Netherlands), July 26 (2002).
- [65] K.Ono:Electron and nuclear spin dependent transport in double quantum dot, 2nd International Conference on Semiconductor Quantum Dots -QD2002-, Komaba Campus, University of Tokyo (Japan), Sep. 30 - Oct. 3(2002).
- [66] W.G. van der Wiel, S. De Franceschi, J. Motohisa , F. Nakajima , J.M. Elzerman, R. Hanson, T. Fujisawa , T. Fukui, S. Tarucha , L.P. Kouwenhoven: Novel aspects of the Kondo effect probed by quantum dots, 2nd International Conference on Semiconductor Quantum Dots -QD2002- , Komaba Campus, University of Tokyo (Japan), Sep. 30 -Oct. 3 (2002).

### (国内会議)

一般講演

- [67] 大野圭司、小寺哲夫、W.G. van der Wiel、藤澤利 正、樽茶清悟:単一電子2重量子ドットにおける光 介在トンネリング、日本物理学会2002年秋季大会 (中部大学、2002年9月7日)
- [68] 天羽真一、D.G.Austing、佐々木智、西義史、都倉康 弘、大野圭司、樽茶清悟:人工分子のドット間オフ セットと結合反結合電子状態、日本物理学会2002 年秋季大会(中部大学、2002年9月7日)
- [69] 西義史, 天羽真一, 大野圭司, 羽田野剛司, 樽茶清悟: 電子密度の低い人工原子の電子相関、日本物理学会 2002 年秋季大会(中部大学、2002 年 9 月 7 日)
- [70] 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負のドラッグ効 果とその磁場依存性、第57回日本物理学会(中央大 学、2002年9月)

- [71] W.G. van der Wiel: The Kondo effect out of equilibriumin a quantum dot and the ability for implementing quantum Computation"NTT BRL Summer camp, Hakone (Japan) Aug. 28- Sep.4 (2002).
- [72] 佐々木智、天羽真一、浅川直輝、樽茶清悟:人工原子 における高スピン状態の近藤効果、第58回日本物理 学会(東北大学、2003年3月)
- [73] 山田和正、泉田渉、山口智弘、羽田野剛司、樽茶清 悟:2次元電子ガスと横に結合した縦型ドットの輸送特 性、第58回日本物理学会(東北大学、2003年3月)
- [74] 井下猛、大野圭司、樽茶清悟:2 重量子ドットにおける電子-核相互作用とトンネル電流不安定性、第58回日本物理学会(東北大学、2003年3月)
- [75] 佐藤俊彦、樽茶清悟、宋海智、宮澤俊之、中田義昭、 大島利雄、横山直樹:単独の自己形成 InAs 量子ドットによる単電子トンネルスペクトル測定、第58回日本物理学会(東北大学、2003年3月)
- [76] 太田剛、佐藤俊彦、羽田野剛司、大野圭司、樽茶清 悟、宋海智、中田義昭、宮澤俊之、大島利雄、横山直 樹:一組の自己形成 InAs 二重結合量子ドットにおけ る殻構造の観測、第58回日本物理学会(東北大学、 2003年3月)
- [77] 横山弘泰、都倉康弘、平山祥郎、樽茶清悟:可変トン ネル障壁を有する量子細線の電気伝導、第58回日本 物理学会(東北大学、2003年3月)
- [78] 山本倫久、大野圭司、都倉康弘、平山祥郎、M. Stopa、 樽茶清悟: 結合量子細線における細線間のトンネル電 流、第58回日本物理学会(東北大学、2003年3月)
- [79] 寺岡総一郎、沼田愛彦、天羽真一、大野圭司、樽茶清 悟:2次元電子量子ホール系における電子スピン共鳴 と核スピンポンピング、第58回日本物理学会(東北 大学、2003年3月)

### 招待講演

- [80] 樽茶清悟:人工分子の相互作用、スピンの物理と量子 計算への応用、第40回茅コンファレンス「ナノ構 造炭素の科学とその応用」(八幡平ロイヤルホテル、 2002年8月21日-24日)
- [81] 大野圭司: Photon and Phonon Assisted Tunneling in Double Quantum Dot、「電子・光子等の機能制 御」第3回シンポジウム(品川・コクヨホール、2002 年10月25日)
- [82] 大野圭司:2重量子ドットにおけるスピン依存伝導、 第15回佐々木シンポジウム電子物性 最近の 成果と将来展望 (東京大学物性研究所、2002年 11月29日)
- [83] 大野圭司:2重量子ドットにおけるスピン依存伝導、 電子情報通信学会・北海道大学量子集積エレクトロ ニクス研究センター共催研究会(北海道大学学術振 興会館、2003年2月11日)
- (セミナー)
- [84] S. Tarucha (colloquium): "QD-Spin"Harverd monday colloquia, Boston (U.S.A), Dec.2 (2002).

- [85] W. Izumida, O. Sakai, S. Tarucha: Singlet-triplet Kondo effect in tunneling through a quantum dot, FOM meeting, Veldhoven (The Netherlands), Dec.17-18 (2002).
- [86] S. Tarucha:Technology Build up for Implementing Quantum dot Spin Qubits, Workshop on Quantum Computing, Joint meeting of the DARPA and NCCR, Lenzerheide (Switzerland), Feb.12-16 (2003).

# 4.3 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。複雑 物質・強相関電子系の示す特異な物性の発現機構の 解明を目指す。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)、低次元電子系 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)、高温超伝導、巨大磁気抵抗、 巨大熱電能、近藤効果などの機構解明をめざす。

実験室光源を用いた測定の他に、高エネルギー加 速器研究機構フォトン・ファクトリー、スタンフォー ド放射光研究所、SPring-8 で放射光を用いた実験を 行っている。また、新領域創成科学研究科・溝川研 究室と共同で、極紫外・軟 X 線高輝度放射光源計画 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。

### 4.3.1 高温超伝導

希薄ドープ領域  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ のフェルミ・アーク

 $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ の低ドープ側から希薄ドープ領域 の非超伝導相にかけて( $0.03 \le x \le 0.1$ )の電子状 態を、角度分解光電子分光により詳細に調べた。プ リルアン域の対角線方向でのみバンドがフェルミ準 位を横切る"フェルミ・アーク"が観測された。反強 磁性試料( $x \le 0.02$ )では、そのフェルミ・アーク にもギャップが開き、フェルミ面全面でギャップが開 いた。

希薄ドープ (Bi,Pb)<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>1-x</sub>RCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub>( *R* = 希土 類 )のバンド 構造

ホール濃度数%の希薄ドープ領域にある Bi 系銅酸化物の電子構造を、角度分解光電子分光により調べた。同じホール濃度をもつ  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$  に比べ、母体絶縁体のバンド分散が大きいこと、運動量 $\mathbf{k} = (\pi, 0)$ 付近の"フラット・バンド"の位置が深いことを見出し、次近接 Cu 間の移動積分 t'が大きいとして説明した。

希薄ドープ YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>の化学ポテンシャル・シフ トとバンド構造

ホール濃度数%の絶縁体領域にあるY系銅酸化物 の電子構造を、内殻光電子分光および角度積分光電 子分光により調べた。La系銅酸化物とは異なり、Bi 系銅酸化物と同様に、ホールドーピングによって化学 ポテンシャルが大きくシフトした。また、La系に見 られた"2成分電子構造"は見られなかったが、フェ ルミ・アークは観測された。これらの情報を整理す れば、La系、Bi系、Y系を含めた高温超伝導体の電 子構造の統一的な描像を得られると考えられる。

# 4.3.2 遷移金酸化物おける金属-絶縁体転 移

3次元フェルミ液体系  $La_{1-x}Sr_xTiO_3$  における質量 繰り込み

バンドフィリングを制御したLa1-xSrxTiO3のモット転移近傍における電子構造の変化を、高分解能光 電子分光と化学ポテンシャル・シフトの測定により 調べた。常磁性相のスペクトルをフェルミ液体論で 解析し、モット転移に向かってフェルミ準位におけ る状態密度と電荷感受率が増大するとして説明した。

### Ti<sub>4</sub>O<sub>7</sub>における金属-絶縁体転移

混合原子価系である Ti<sub>4</sub>O<sub>7</sub> は、温度の関数として 2 段階の相転移を示し、低温相が整列したバイポー ラロン、中間相が動き回るバイポーラロン、高温相 は動き回るシングル・ポーラロンによると考えられ てきた。この物質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、それぞれの相で特 徴的なスペクトル形状を見出した。低温相では絶縁 体ギャップが開き、高温相では金属的なフェルミ端 が見られ、中間相ではクーロン・ギャップが観測さ れた。

ペロブスカイト型 Fe 酸化物における酸素ホール

強磁性と巨大磁気抵抗を示す  $\operatorname{SrFe}_{1-x}\operatorname{Co}_x\operatorname{O}_3$ の電 子状態を、内殻吸収分光により調べた。 $\operatorname{Fe}$ 、 $\operatorname{Co}_3d$  軌 道と酸素 p 軌道の混成が非常に強いこと、基底状態 でホールが酸素サイトに多く分布していることを明 らかにし、巨大磁気抵抗の原因であると考えた。ま た、レーザー MBE で作成した  $\operatorname{La}_{1-x}\operatorname{Sr}_x\operatorname{FeO}_3$  試料 の in situ 光電子分光を行い、ドーピングに伴う電子 構造の変化を高精度で調べた。

### VO<sub>2</sub>単結晶および薄膜の金属-絶縁体転移

約 320 K で一次の金属-絶縁体を示す VO2 の電子 状態の温度変化を詳しく調べた。パルス・レーザー蒸 着法で作製した薄膜試料を用いることによって、従 来にない詳細な温度変化の測定を可能にした。絶縁 相で大きなの温度変化を、強い電子-格子相互作用の モデルで説明することができた。金属相のスペクト ル形状からは、自己エネルギーの運動量依存性が重 要であることを見出した。

 $Sm_xNd_{1-x}NiO_3$ の金属相における新しい相境界

金属-絶縁体を示す  $RNiO_3$  (R = 希土類)について、標記物質の光電子分光を温度と組成の関数として詳細に調べた。その結果、 $x \sim 0.4$ を境に金属相のスペクトルが大きく変化することを見いだし、電子の局在の程度とそれに伴う磁性が $x \sim 0.4$ を境に大きく変化するためであると考えた。

### 高圧下で超伝導を示す $Na_{0.33}V_2O_5$

1次元バイポーラロン伝導系と考えられていた Na<sub>0.33</sub>V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>において最近、金属-絶縁体転移が見つ かり、さらに高圧下での超伝導が発見された。この 物質の角度分解光電子分光をおこなった。フェルミ 準位に向かって強度が減少するバンドが見られ、こ れをポーラロン効果として解釈された。また、スペ クトルの運動量分布から、ドープされた電子は結晶 中のジグザグ鎖と梯子の両方に入っていることが示 唆された。

### 4.3.3 磁性半導体

ZnOをベースにした希薄磁性半導体  $Zn_{1-x}T_xO(T = 3d$  遷移金属)

新しい希釈磁性半導体として最近注目されている Zn<sub>1-x</sub> $T_x$ Oの電子状態を軟 X 線吸収分光により調べ た。クラスター・モデルによる解析から、p-d交換相 互作用定数を見積もり、 $Zn_{1-x}Co_xO$ にホールをドー プできれば高いキューリー点を持つ強磁性体が得ら れることを予言した。

### 室温強磁性体 ZnGeP<sub>2</sub>:Mnの形成過程

3元系半導体 CdGeP<sub>2</sub> に Mn を蒸着し熱拡散させ た試料が室温で強磁性を示し、話題を呼んでいる。こ れに類似の、ZnGeP<sub>2</sub> に Mn を蒸着した系の光電子 スペクトルをその場観察し、室温での強磁性も確認 した。強磁性を示す物質が、他の磁性半導体と類似 の Zn<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>GeP<sub>2</sub> であることが示された。キャリ アーの起源としては、Mn の一部が P を置換するこ とによると提唱した。 GaN に Mn をドープした系

室温で強磁性を示すという報告がある  $Ga_{1-x}Mn_xN$ の電子状態を、MBE 作製試料の共鳴光電子分光、内 殻光電子分光測定により調べた。母体 GaNの強い イオン性を反映して、 $Zn_{1-x}Mn_xO$  に似た Mn 3dス ペクトルが得られ、Mn to 2+ 価で Ga を置換してい ることが示された。しかし、試料は絶縁体のままで、 ドープされたホールは補償されていると思われる。

# 4.3.4 1次元電子系

1次元 Cu-O 鎖を持つ PrBa<sub>2</sub>Cu<sub>4</sub>O<sub>8</sub>

高温超伝導体 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>4</sub>O<sub>8</sub> の Y サイトを Pr に置 換すると、CuO<sub>2</sub> 面は絶縁体となり Cu-O 鎖は 1 次 元金属となる。PrBa<sub>2</sub>Cu<sub>4</sub>O<sub>8</sub> 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 こない、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見出した。

巨大非線型光学効果を示すハロゲン架橋M - X鎖 化合物 $[Ni(chxn)_2Br]Br_2$ 

標記物質の電子構造を角度分解光電子分光で調べた。1次元特有のホロン、スピノンに対応するスペクトルの構造が見られなかったが、*p-d*モデルの計算により、これをハロゲン*p*軌道とNi*d*軌道のイオン化断面積の差として説明した。非常に強い*p-d*混成が、巨大非線型感受率の原因であることを見出した。

# 4.3.5 遷移金属化合物

### 遍歴磁性体 MnSi

スパイラル型磁気秩序を示す遍歴磁性体非磁性 MnSiの電子状態を、光電子分光で調べた。スペク トルとバンド計算の差を、電子相関に起因する自己 エネルギーの効果で説明した。

### スクッテルダイト型 CoSb3 の電子構造

高い熱起電力をもつスクッテルダイト型化合物 CoSb3 の電子構造を光電子分光により調べた。結果は、バ ンド計算とよい一致を示した。p型、n型試料間で フェルミ準位のシフトが観測され、その大きさがバ ンドギャップの大きさと有効質量で説明された。

### <受賞>

[1] 岡林潤:第12回応用物理学会講演奨励賞「光電子分 光による GaMnAs, InMnAsの相違点、類似点」

<報文>

### (原著論文)

- [2] M. Abbate, G. Zampieri, J. Okamoto, A. Fujimori, Y. Takeda, R. Kanno, S. Kawasaki, and M. Takano: Electronic Structure of the Negative Charge Transfer CMR Material SrFe<sub>1-x</sub>Co<sub>x</sub>O<sub>3</sub>, Phys. Rev. B **65** (2002) 165120.
- [3] T. Mizokawa, C. Kim, Z.-X. Shen, T. Yoshida, A.Fujimori, S.Horii, Yuh Yamada, K. Nakada, H. Ikuta and U. Mizutani: Observation of Single Particle Spectral Function of a Tomonaga-Luttinger Liquid: Angle-Resolved Photoemission Study of Zn-Doped PrBa<sub>2</sub>Cu<sub>4</sub>O<sub>8</sub>, Phys. Rev. B **65** (2002) 193101.
- [4] S.-i. Fujimori, A. Ino, T. Okane, A. Fujimori, K. Okada, T. Manabe, M. Yamashita, H. Kishida, H. Okamoto: Angle-Resolved Photoemission Study of Halogen-Bridged *MX*-Chain Compound [Ni(chxn)<sub>2</sub>Br]Br<sub>2</sub>: Spin-Charge Separation in Hybridized *d-p* Chains, Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 247601; cond-mat/0112154.
- [5] T. Yoshida, A. Ino, T. Mizokawa, A. Fujimori, Y. Taguchi, T. Katsufuji and Y. Tokura: Photoemission Spectral Weight Transfer and Mass Renormalization in the Fermi-Liquid System La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>TiO<sub>3+y/2</sub>, Europhys. Lett. **58** (2002) 258; cond-mat/9911446.
- [6] J.-Y. Son, K. Okazaki, T. Mizokawa and A. Fujimori, T. Kanomata and R. Note: Photoemission Study of the Itinerant Helimagnetic MnSi, J. Phys. Soc. Jpn. **71** (2002) 1728.
- [7] J. Matsuno, A. Fujimori, Y. Takeda and M. Takano: Chemical Potential Shift in  $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ : Photoemission Test of the Phase Separation Scenario, Europhys. Lett. **59** (2002) 252; cond-mat/0204452.
- [8] H. Ishii, K. Okazaki, A. Fujimori, Y. Nagamoto, T. Koyanagi, J. O. Sofo: Photoemission Study of the Skutterudite Compounds CoSb<sub>3</sub> and RhSb<sub>3</sub>, J. Phys. Soc. Jpn. **71** (2002) 2271; condmat/0103342.
- [9] K. Kobayashi, T. Susaki, A. Fujimori, T. Tonogai and H. Takagi: Disorder Effects in the Bipolaron System Ti<sub>4</sub>O<sub>7</sub> Studied by Photoemission Spectroscopy, Europhys. Lett. **56** (2002) 868; condmat/9909189
- [10] J. D. Lee and A. Fujimori: On the AREPS Intensities in a System with the Bilayer Coupling: Beyound the Transition-Matrix Elelemts Effects, Phys. Rev. B 66 (2002) 144509.
- [11] J. Matsuno, T. Mizokawa, A. Fujimori, Y. Takeda, S. Kawasaki and M. Takano: Different Routes to Charge Disproportionation in Perovskites-Type Fe Oxides, Phys. Rev. B 66 (2002) 193103; condmat/0207250.
- [12] A. Lanzara, P.V. Bogdanov, X.J. Zhou, H. Eisaki, T. Yoshida, A. Fujimori, Z. Hussain and Z.-X.

Shen: Coupling of Quasiparticles to Phonons in High Temperature Superconductors, J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **127** (2002) 37.

- [13] M. Yamada, K. Ono, J. Okabayashi, M. Mizuguchi, T. Mano, A. Fujimori, M. Oshima and H. Akinaga: Semiconductor to Metal Transition in GaAs with High Cr-Doping; Electronic Structures and Magnetic Properties, Appl. Phys. Lett. **91**, 7908 (2002).
- [14] K. Okazaki, T. Mizokawa, A. Fujimori, E.V. Sampathkumaran, M.J. Martinez-Lope and J.A. Alonso: Crossover in the Nature of the Metallic Phases in the Perovskite-Type *RNiO<sub>3</sub>*, Phys. Rev. B **67** (2003) 073101; cond-mat/0203465.
- [15] S.-i. Fujimori, T. Okane, J. Okamoto, K. Mamiya, Y. Muramatsu, A. Fujimori, H. Harima, D. Aoki, S. Ikeda, H. Shishido, Y. Tokiwa, Y. Haga and Y. Onuki: Nearly-Localized Nature of *f* Electrons in Ce*M*In<sub>5</sub> (*M* = Rh, Ir), Phys. Rev. B **67** (2003) 144507.
- [16] D. D. Sarma, S. R. Krishnakumar, E. Weschke, C. Schüsler-Langeheine, C. Mazumdar, L. Kilian, G. Kaindl, K. Mamiya, S.-i. Fujimori, A. Fujimori1 and T. Miyadai: Metal-Insulator Cross-Over at the Surface of NiS<sub>2</sub>, Phys. Rev. B, in press.
- [17] N. Harima, A. Fujimori, T. Sugaya and I. Terasaki: Chemical Potential Shift in  $Bi_2Sr_2Ca_{1-x}R_xCu_2O_{8+y}$  (R = Pr, Er), Phys. Rev. B, in press; cond-mat/0203154.

### (会議抄録)

- [18] K. Okazaki, T. Mizokawa, A. Fujimori, E. V. Sampathkumaran, M.J. Martinez-Lope and J. A. Alonso: Temperature-Dependent Electronic Structure of Nd<sub>1-x</sub>Sm<sub>x</sub>NiO<sub>3</sub>, in *Proceedings* of Todai International Symposium ISSP 2001, Correlated Electrons; J. Phys. Chem. Solids 63 (2002) 975.
- [19] K. Ono, J. Okabayashi, M. Mizuguchi, M. Oshima, A. Fujimori, H. Akinaga: Fabrication, Magnetic Properties, and Electronic Structures of Nanoscale Zinc-Blende MnAs Dots, J. Appl. Phys. **91** (2002), 8088.
- [20] S.-i. Fujimori, A. Ino, T. Okane, A. Fujimori, H. Harima, D. Aoki, S. Ikeda, H. Shishido, Y. Haga, Y. Tokiwa and Y. Onuki: Angle-Resolved Photoemission Study of the Quasi-Two-Dimensional Heavy-Fermion Compounds CeRhIn<sub>5</sub> and CeIrIn<sub>5</sub>, *ibid*, Physica B **312-133** (2002) 132.
- [21] T. Okane, S.-i. Fujimori, K. Mamiya, J. Okamoto, A. Fujimori, N. Tsujii and K. Yoshimura: Systematic Evolution of the Kondo Peak in YbCu<sub>5-x</sub>Ag<sub>x</sub>, *Proceedings of Strongly Correlated Electron Systems 2002 (SCES '02)*; Acta Phys. Polonica B **34** (2003) 1019.

- [22] J. Okamoto, S.-i. Fujimori, T. Okane, A. Fujimori, M. Abbate, S. Yoshii, and M. Sato: Electronic Structure of the Pyrochlore-Type Ru Oxides through the Metal-Insulator Transition, *ibid*, Acta Phys. Polonica B **34** (2003) 783.
- [23] M. Oshima, K. Ono, M. Mizuguchi, M. Yamada, J. Okabayashi, A. Fujimori, H. Akinaga and M. Shirai: *In-situ* Photoelectron Spectroscopy of Magnetic Dots and Magnetic Semiconductor Nanostructures, *Proceedings of International Symposium* on Artificial and Natural Nanostructures (ANN01) Int. J. Mod, Phys. B **16** (2002) 1681.
- [24] 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, Trans. Mater. Res. Soc. Japan, in press.
- [25] S.-i. Fujimori, J. Okamoto, K. Mamiya, T. Okane, Y. Muramatsu, A. Fujimori, T. Narimura, K. Kobayashi, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, H. Harimad, D. Aoki, S. Ikeda, H. Shishido, Y. Tokiwa, Y.Haga, and Y. Onuki: Photoemission Study of  $CeMIn_5$  (M = Rh, Ir) : Nearly Localized Nature of f Electrons, Proceedings of the 23rd International Conference on Low Temperature Physics; Physica C, in press.
- [26] T. Yoshida, X. J. Zhou, T. Sasagawa, W. L. Yang, P. V. Bogdanov, A. Lanzara, Z. Hussain, T. Mizokawa, A. Fujimori, H. Eisaki, Z.-X. Shen, T. Kakeshita, and S. Uchida: ARPES study of lightlydoped La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>, *ibid*; Physica C, in press.
- [27] T. Okane, S.-i. Fujimori, K. Mamiya, J. Okamoto, Y. Muramatsu, A. Fujimori, Y. Nagamoto and T. Koyanagi: Photoemission Spectroscopy of the Filled-Skutterdite Compound YbFe<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub>, in *Proceedings of 3rd International Symposium on Advanced Science Research (ASR-2002)*; J. Phys. Cond. Mat., in press
- [28] K. Sato, G. A. Medvedkin, T. Ishibashi, S. Mitani, K. Takanashi, Y. Ishida, D. D. Sarma, J. Okabayashi, A. Fujimori, T. Kamatani and H. Akai: Novel Mn-Doped Chalcopyrites, J. Phys. Chem. Solids, in press.
- [29] 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, Trans. Mater. Res. Soc. Japan, in press.
- (編著書)
- [30] 藤森淳:超光分解能光電子分光によるフェルミオロジー、「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)、 p. 91-212。
- [31] A. Fujimori and J. Osterwalder, Eds.: Special Issue: Frontiers in Photoemission Spectroscopy of Solids and Surfaces, J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 124 (2002).

[32] 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, 2001), in press.

### (綜説、解説、その他)

[33] A. Fujimori, A. Ino, J. Matsuno, T. Yoshida, K. Tanaka, and T. Mizokawa: Core-Level Photoemission Measurements of the Chemical Potential Shift as a Probe of Correlated Electron Systems, J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **124** (2002) 127.

### (学位論文)

- [34] 岡崎浩三、Photoemission Studies of Temperature-Induced Metal-Insulator Transitions in Transition-Metal Oxides (博士論文)
- [35] 石田行章、Photoemission Study of Room-Temperature Ferromagnetism in Diluted Magnetic Semiconductor ZnGeP<sub>2</sub>:Mn(修士論文)
- [36] 八木 創、Photoemission Study of the High-T<sub>c</sub> Superconductor YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (修士論文)
- <学術講演>

### (国際会議)

一般講演

- [37] A. Fujimori, T. Yoshida, K. Tanaka, T. Mizokawa, X.-J. Zhou, P. V. Bogdanov, W. L. Yang, A. Lanzara, Z. Hussain, Z.-X. Shen, H. Eisaki3, T. Kakeshita and S. Uchida: Nodal "Metallic" Behavior of Lightly-Doped La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>: Mott Insulator to d-Wave Superconductor, Frontiers in Condensed Matter Physics: Electronic Structure and Properties (Groningen, The Netherlands, June 2002).
- [38] T. Okane, S.-i. Fujimori, K. Mamiya, J. Okamoto, A.Fujimori, N.Tsujii, K.Yoshimura: Systematic Evolution of the Kondo Peak in YbCu<sub>5-x</sub>Ag<sub>x</sub>, *Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2002)* (Krakow, Poland, July 2002)
- [39] J. Okamoto, S.-i. Fujimori, T. Okane, A. Fujimori, M. Abbate, S. Yoshii, M. Sato: Electronic Structure of the Pyrochlore-Type Ru Oxides through the Metal-Semiconductor Transition, *ibid*.
- [40] S.-i. Fujimori, J. Okamoto, K. Mamiya, T. Okane, A. Fujimori, T. Narimura, K. Kobayashi, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, H. Harima, D. Aoki, Y. Tokiwa, S. Ikeda, H. Shishido, Y.Haga, Y. Onuki: Photoemission Study of CeMIn<sub>5</sub> (M = Rh, Ir), *ibid*.
- [41] J. Okabayashi, T. Mizokawa, D. D. Sarma, A. Fujimori, T. Slupinski, A. Oiwa, and H. Munekata: Electronic Structure of In<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>As Studied by Photoemission Spectroscopy: Comparison with Ga<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>As, 26-th International Conference on Physics of Semiconducors (Edinburgh, Scotland, July 2002)

- [42] J. Okabayashi, K. Ono, M. Mizuguchi, A. Fujimori, M. Oshima, H. Akinaga: In Situ Photoemission Study of Localized Mn 3d States in (Ga,Mn)As and Zinc-Blende Type MnAs Nanoscale Dots, 2nd International Conference on Physics and Application of Spin Related Phenomena in Semiconductors (PASPS) (Würzburg, Germany, July 2002)
- [43] S.-i. Fujimori, J. Okamoto, K. Mamiya, T. Okane, Y. Muramatsu, A. Fujimori, T. Narimura, K. Kobayashi, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, H. Harima, D. Aoki, S. Ikeda, H. Shishido, Y. Tokiwa, Y.Haga, Y. Onuki: Photoemission Study of CeMIn<sub>5</sub> (M = Rh, Ir) : Nearly Localized Nature of f Electrons, 23rd International Conference on Low Temperature Physics (Hiroshima, August 2002).
- [44] S.-i. Fujimori, J. Okamoto, K. Mamiya, T. Okane, A. Fujimori, T. Narimura, K. Kobayashi, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, H. Harima, D. Aoki, Y. Tokiwa, S. Ikeda, H. Shishido, Y.Haga, Y. Onuki: Photoemission Study of CeMIn<sub>5</sub> (M = Rh, Ir), CREST International Workshop on Novel Quantum Phenomena in Transition Metal Compounds (Sendai, August 2002)
- [45] Y. Ishida, D. D. Sarma, K. Okazaki, J. Okabayashi, A. Fujimori, G. A. Medvedkin, T. Ishibashi and K.Sato: In-situ Photoemission Study of the Room-Temperature Ferromagnetic Semiconductor ZnGeP<sub>2</sub>:Mn, 13-th International Conference on Ternary and Mutinary Compounds (ICTMC13) (Paris, October 2002)
- [46] T. Okane, S.-i. Fujimori, K. Mamiya, J. Okamoto, A. Fujimori1, Y, Nagamoto and T. Koyanagi: Photoemission Spectroscopy of the Filled Skutterdite Compound YbFe<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub>, 3rd International Symposium on Advanced Science Research (ASR-2002) (JAERI Tokai, November 2002)
- [47] S.-i. Fujimori, T. Okane, J. Okamoto, K. Mamiya, Y. Muramatsu, A. Fujimori, H. Yamagami, A. Thamizhavel, T. Ebihara, and Y. Onuki: Photoemission Study of CeAgSb<sub>2</sub> ibid
- [48] M. Oshima, K. Ono, M. Mizuguchi, J. Okabayashi, A. Fujimori, M. Shirai, and H. Akinaga: Properties and Electronic Structures of Magnetic Nanostructures Formed by Strain-controlled Molecular Beam Epitaxy, International Symposium on Innovative Materials Processing by Controlling Chemical Reaction Field (IMP2002), (Miyagi, November 2002)
- [49] J.I. Hwang, H. Yagi, Y. Ishida, H. Ott, A. Fujimori, H. Owa, T. Kondo and H. Munekata: Photoemission Study of Room-Temperature Ferromagnetic Semiconductor ZnGeP<sub>2</sub>:Mn, *Third Korea-Japan Symposium on Strongly Correlated Electron Systems* (Jeju Island, Korea, November 2002).
- [50] K. Ishida, D.D. Sarma, K. Okazaki, J.I. Hwang, H. Ott, A. Fujimori1, G.A. Medvedkin, T. Ishibashi, and K. Sato: Photoemission Study of

Room-Temperature Ferromagnetic Semiconductor  $ZnGeP_2:Mn, \ ibid.$ 

[51] X. J. Zhou, T. Yoshida, A. Lanzara, P.V. Bogdanov, S.A. Kellar, K.M. Shen, W.L. Yang, F. Ronnig, T. Sasagawa, T. Kakeshita, T. Noda, H. Eisaki, S. Uchida, C.T. Lin, F. Zhou, J.W. Xiong, W.X. Ti, Z.X. Zhao, A. Fujimori, Z. Hussain, and Z.-X. Shen; Universal Nodal Fermi Velocity in High Temperature Superconductors, *APS March Meeting* (Austin, U.S.A., March 2003)

### 招待講演

- [52] H. Akinaga, M. Mizuguchi, H. Oki, T. Manago, H. Ofuchi, J. Okabayashi, A. Fujimori, K. Ono, M. Oshima and M. Shirai: Material Designe and Synthesis of New Zinc-Blende Half-Metallic Ferromagnets, *Moscow International Symposium on Magnetism (MISM)* (Moscow, June 2002).
- [53] A. Fujimori: Novel Electronic Etructure in the Vicinity of Metal-Insulator Transition in the High-T<sub>c</sub> Cuprates, Strongly Correlated Electron Systems 2002 (SCES '02) (Krakow, Poland, July 2002).
- [54] A. Fujimori: ARPES Study of Lightly-Doped Cuprates, 23rd International Conference on Low Temperature Physics (Hiroshima, August 2002)
- [55] A. Fujimori: Photoemission Spectroscopy of Ferromagnetic Semiconductors: Thin films, Interfaces and Nano-Structures, International Workshop of Synchrotron Radiation Based Experimental Techniques and their Applications in Complex Materials, (Fudan University, Shanghai, September 2002).
- [56] A. Fujimori: Evolution from the Mott Insulators to High-T<sub>c</sub> Supercondutors Studied by Photoemission, NATO Advanced Research Workshop on Concepts in Electron Correlation (Hvar, Croatia, September 2002).
- [57] A. Fujimori: Angle-Resolved Photoemission and Soft X-Ray Spectroscopic Studies of Strongly Correlated Systems, 5-th Synchrotron Radiation Theory Network (SRRTNet) Workshop (SPring-8, October 2002).
- [58] K. Sato, G. A. Medvedkin, T. Ishibashi, S. Mitani, K. Takanashi, Y. Ishida, D. D. Sarma, J. Okabayashi, A. Fujimori, T. Kamatani and H. Akai: Novel Mn-Doped Chalcopyrites, 13-th International Conference on Ternary and Mutinary Compounds (ICTMC13) (Paris, October 2002)
- [59] A. Fujimori: Superconductivity in Underdoped LSCO: Implications of the Fermi "Arc", 15th International Symposium on Superconductivity (ISS 2002) (Yokohama, November 2002)
- [60] A. Fujimori: Material Dependence of the Electronic Structure of Cuprates: Possible Relation to T<sub>c</sub>, Realistic Theories of Correlated Electron Materials (Santa Barbara, November 2002).
- [61] A. Fujimori: Photoemission Study of Diluted Ferromagnetic Semiconductors, *Third Korea-Japan Symposium on Strongly Correlated Electron Systems* (Jeju Island, Korea, November 2002).
- [62] A. Fujimori: Present Statsu and Future Prospect of High-Resolution Photoemission Spectrsocopy in Condensed-Matter Physics, 7th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation (Hiroshima University, March 2003)
- [63] Y. Ishida and A. Fujimori: Preparation and Photoelectron Spectroscopy of ZnGeP<sub>2</sub>:Mn, COE Symposium of TUAT on Chalcopyrite-Based Magnetic Semiconductors (Tokyo University of Agriculture and Technology, March 2003)
- [64] A. Fujimori: Photoemission Spectroscopy of Novel Ferromagnetic Semiconductors in Thin Films and Interfaces First JSPS-DST Symposium on Surfaces and Interfaces for Nanostructured Materials (Tokyo, March 2003)

(国内会議)

一般講演

- [65] 藤森淳:高温強磁性半導体:薄膜、界面、ドット構造の光電子分光、ナノテクノロジー推進のための学融 合ワークショップ(物性研、2002年5月)
- [66] 藤森淳: La<sub>1/3</sub>Sr<sub>2/3</sub>FeO<sub>3</sub> と CaFeO<sub>3</sub> の相違点、基盤 研究 A「酸素ホールの物理と化学」研究会(SPring-8、 2002 年 6 月)
- [67] 溝川貴司、藤森淳:層状 Ru 酸化物の金属絶縁体転 移と酸素ホール、同上
- [68] 藤森淳:微量ドープ銅酸化物の光電子分光、特定領域 研究 A「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(京都大学、2002年6月)
- [69] 岡崎浩三、藤森淳、山内徹、上田寛: β-バナジウムブ ロンズ Na<sub>0.33</sub>V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>の光電子分光、物理学会秋の分 科会(中部大学、2002 年 9 月)
- [70] 岡崎浩三、和達大樹、林直顕、寺嶋孝仁、高野幹夫: ペロブスカイト型 Fe 酸化物 La<sub>1/3</sub>Sr<sub>2/3</sub>FeO<sub>3</sub> 薄膜の 光電子分光、同上
- [71] 田中清尚、吉田鉄平、八木創、藤森淳、Z.-X.Shen、 菅谷剛洋、寺崎一郎:希薄ドープ Bi2212 の光電子分 光、同上
- [72] 石田行章、D. D. Sarma、岡崎浩三、岡林潤、黄鐘日、 H. Ott、田中清尚、八木創、藤森淳、G. A. Medvedkin、石橋隆幸、佐藤勝昭:室温強磁性体 ZnGeP<sub>2</sub>:Mn の光電子分光、同上
- [73] 八木創、田中清尚、藤森淳、吉田鉄平、Z-X.Shen、瀬 川耕司、安藤陽一:希薄ドープ YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>の角 度分解光電子分光、同上
- [74] 吉田鉄平、X.-J. Zhou、P. Bogdanov、Z.-X. Shen、 W. Yang、A. Lanzara、Z. Husain、田中清尚、八木 創、溝川貴司、藤森淳、永崎洋、掛下照久、内田慎 一:La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>の金属絶縁体転移近傍の電子構 造、同上

- [75] 吉田鉄平、井野明洋、永崎洋、田中清尚、八木創、藤森 淳、Z.-X.Shen: SrVO<sub>3</sub>の角度分解光電子分光、同上
- [76] 藤森伸一、岡根哲夫、岡本淳、間宮一敏、村松康司、 藤森淳、山上浩志、A. Thamizhavel、海老原孝雄、大 貫惇睦: CeAgSb<sub>2</sub>の光電子分光、同上
- [77] 藤森伸一、岡根哲夫、岡本淳、間宮一敏、村松康司、 藤森淳、成村孝正、小林賢一、島田賢也、生天目博 文、谷口雅樹、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: CeMIn<sub>5</sub> (M = In, Rh)の光電子分光、同上
- [78] 岡本淳、藤森伸一、岡根哲夫、藤森淳、深澤英人、前 野悦輝:金属-絶縁体転移を示すパイロクロア型 Ir 酸 化物の電子状態、同上
- [79] 岡本淳、藤森伸一、岡根哲夫、藤森淳、M. Abbate、 吉居俊輔、佐藤正俊:金属-絶縁体転移を示すパイロ クロア型 Ru 酸化物の電子状態、同上
- [80] 間宮一敏、岡本淳、藤森伸一、岡根哲夫、村松康司、 藤森淳、宮台朝直: CoS<sub>x</sub>Se<sub>2-x</sub>の軟 X 線吸収磁気円 二色性、同上
- [81] 井野明洋、成村孝正、島田賢也、生天目博文、谷口雅 樹、吉田鉄平、藤森淳、Z.-X. Shen、掛下照久、内田 慎一、安達成司、田島節子: T\* 相銅酸化物超伝導体 SmLa<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub> の角度分解光電子分光 II、同上
- [82] 斎藤祐児、小林啓介、藤森淳、山村泰久、辻利秀、小 矢野幹夫、片山信一: Fe<sub>x</sub>NbS<sub>2</sub> の光電子分光、同上
- [83] 岡林潤、小野寛太、水口将輝、山田素久、尾嶋正治、 溝川貴司、藤森淳、由利正忠、C. T. Chen、福村知 昭、川崎雅司:X 線吸収分光による希薄磁性半導体 ZnO:TM(TM = Ti, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu)の 電子構造、同上
- [84] 岡根哲夫、藤森伸一、間宮一敏、岡本淳、藤森淳、長本泰征、小柳剛: RFe<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> (R = La, Ce, Yb)の光 電子分光、スクッテルダイト化合物研究の現状と展望 (都立大、2002 年 8 月)
- [85] 石田行章、D.D. Sarma、岡崎浩三、黄鐘日、H. Ott、 岡林潤、藤森淳、G.A. Medvedkin、石橋隆幸、佐 藤勝昭: *in-situ* photoemission study of the roomtemperature ferromagnetism in ZnGeP<sub>2</sub>:Mn、第 8 回「半導体スピン工学の基礎と応用」研究会(仙台、 2002 年 12 月)
- [86] 石田行章、D.D. Sarma、岡崎浩三、黄鐘日、H. Ott、 岡林潤、藤森淳、G.A. Medvedkin、石橋隆幸、佐藤 勝昭:室温強磁性体 ZnGeP<sub>2</sub>:Mn の光電子分光によ る研究、日本放射光学会(姫路、2003年1月)
- [87] 岡根哲夫、藤森伸一、間宮一敏、岡本淳、村松康司、 藤森淳、長本泰征、小柳剛:スクッテルダイト化合物 RFe4Sb12(R = La, Ce, Yb)の光電子分光、同上
- [88] 藤森伸一、岡根哲夫、岡本淳、間宮一敏、村松康司、 藤森淳: SPring-8 BL23SU における強相関 f 電子系 に対する光電子分光実験、同上
- [89] 岡本淳、間宮一敏、藤森伸一、岡根哲夫、斉藤祐児、 村松康司、藤森淳、M. Abbate、小出常晴、石渡晋太 郎、川崎修嗣、高野幹夫:反強磁性-強磁性転移を示 す SrFe<sub>1-x</sub>Co<sub>x</sub>O<sub>3</sub>の軟 x 線吸収磁気円二色性、同上

- [90] 斎藤祐児、小林啓介、藤森淳、山村泰久、辻利秀、小 矢野幹夫、片山信一: Fe<sub>x</sub>NbS<sub>2</sub>の軟 X 線分光、同上
- [91] 岡根哲夫、藤森伸一、間宮一敏、岡本淳、村松康司、 藤森淳: SPring-8 軟 X 線ビームライン BL23SU の 電子分光実験ステーション、同上。
- [92] 間宮一敏、岡本淳、藤森伸一、岡根哲夫、斎藤祐児、 村松康司、藤森淳、宮台朝直: CoS<sub>2-x</sub>Se<sub>x</sub> の Co L<sub>2,3</sub> 吸収端における X 線吸収 MCD、同上
- [93] 岡林潤,小野寛太,水口将輝,山田素久,尾嶋正治, 溝川貴司,藤森淳,由利正忠,C.T. Chen,福村知 昭,川崎雅司:X線吸収分光による希薄磁性半導体 ZnO:TM (TM=Ti, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu)の電子 構造、同上
- [94] 岡崎浩三、和達大樹、藤森淳: Photoemission Studies of Metal-Insulator Transitions in Transition-Metal Oxide Thin Films、科研費特定領域研究 (A)「遷移 金属酸化物における新しい量子現象」研究成果報告 会(物性研、2003年1月)
- [95] 八木創、田中清尚、吉田鉄平、藤森淳: Photoemission Studies of Heavily Uderdoped High-T<sub>c</sub> Cuprates: YBCO, BSCCO and LSCO、同上
- [96] 岡崎浩三、櫃田幸央、溝川貴司、藤森淳、小野田雅 重、村岡祐治、広井善二: VO2 薄膜の光電子分光 II、 物理学会第58回年会(東北大学、2003年3月)
- [97] 和達大樹、岡崎浩三、溝川貴司、藤森淳、小林大介、堀 場弘司、谷内敏之、組頭広志、尾嶋正治、Mikk Lippmaa、川崎雅司、鯉沼秀臣:La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>FeO<sub>3</sub> 薄膜の *in-situ* 光電子分光、同上
- [98] 石田行章、黄鐘日、溝川貴司、藤森淳、佐伯洋昌、田 畑仁、河合知二: V をドープした ZnO の光電子分光 による研究、同上
- [99] 八木創、田中清尚、藤森淳、吉田鉄平、X.-J. Zhou、 Z.-X. Shen、A. N. Lavrov、瀬川耕司、安藤陽一: 希薄ドープ YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>の角度分解光電子分光、 同上
- [100] 黄鐘日、石田行章、八木創、H. Ott、溝川貴司、藤 森淳、大輪宙、近藤剛、宗片比呂夫: III-V 族希薄磁 性半導体 Ga1-x MnxN の光電子分光、同上
- [101] Tran Thanh Trung、黒川三奈子、八木創、溝川貴司、 藤森淳、中辻知、深澤英人、前野悦輝:(Ca,Sr)<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> のX線光電子分光、同上
- [102] 岡根哲夫、藤森伸一、間宮一敏、岡本淳、村松康司、 藤森淳、鈴木博之、松本武彦、古林孝夫、永田正一: CuIr<sub>2</sub>S<sub>4</sub> の軟 X 線吸収分光及び光電子分光、同上
- [103] 岡本淳、間宮一敏、藤森伸一、岡根哲夫、斉藤祐児、 村松康司、藤森淳、M. Abbate、小出常晴、石渡晋太 郎、川崎修嗣、高野幹夫:SrFe<sub>1-x</sub>Co<sub>x</sub>O<sub>3</sub>の軟X線 吸収磁気円二色性
- [104] 藤森伸一、岡根哲夫、岡本淳、間宮一敏、村松康司、 藤森淳、山上浩志、常盤欣文、池田修悟、松田琢磨、 芳賀芳範、山本悦嗣、大貫惇睦:UTGa<sub>5</sub> (T = Fe, Pt)の光電子分光、同上
- [105] 斎藤祐児、小林啓介、藤森淳、山村泰久、辻利秀、小 矢野幹夫、片山信一: Fe<sub>x</sub>NbS<sub>2</sub>の軟 X 線分光、同上

[106] 小出常晴、戸叶洋之、真中浩貴、設楽哲夫、藤森 淳、木村剛、十倉好紀:層状 Mn ペロブスカイト La<sub>2-2x</sub>Sr<sub>1+2x</sub>Mn<sub>2</sub>O<sub>7</sub>の角度分解光内殻磁気円二色 性 IV:直交配置 Mn L<sub>2,3</sub>内殻 MCXD、同上

### 招待講演

- [107] 佐藤勝昭、石橋隆幸、G. A. Medvedkin、D. D. Sarma、石田行章、岡林潤、藤森淳:光電子スペク トルによる ZnGeP<sub>2</sub>:Mn の DMS 層の確認、応用物 理学会三元機能性材料研究会・平成 14 年度研究会(宮 崎、2002 年 11 月)
- [108] J. Okabayashi, T. Mizokawa, and A. Fujimori: Interpretation of Photoemission Spectra in Ga<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>As and In<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>As, 第8回「半導体ス ピン工学の基礎と応用」研究会(仙台、2002年12月)
- [109] 藤森淳:室温で強磁性を示す半導体、ポスト菅野シ ンポジウム(東京、2003年3月)

セミナー

- [110] 藤森淳:半導体中の *d* 準位(東京工業大学宗片研究 室、2002 年 5 月)
- [111] A. Fujimori: Lectures on Strongly Correlated Systems using Synchrotron Radiation (Synchrotron Radiation Research Center, Taiwan, July 2002)

# 4.4 内田研究室

高温超伝導 Cu 酸化物を代表とする低次元強相関 電子系においては、電子の「分裂」や「自己組織化」 による新しい秩序形成が起こり、それが高温超伝導 のような目覚しい現象を引き起こすと考えられるよ うになってきた。我々は、高温超伝導体を主体に、1, 2次元構造 Cu 酸化物を対象とし、電子のもつ電荷・ スピンの自由度が織りなす現象と秩序形成の探求を 行っている。Cu 酸化物のドーピング、構造制御、そ して電子輸送現象、遠赤外分光という物性測定を両 輪として研究を遂行し、電荷・スピン自由度のダイナ ミックスや集団励起モードと高温超伝導発現との関係 を調べている。特に µSR、中性子散乱、光電子分光、 そして STM での国際共同研究を推進しており、世 界的な研究ネットワークから数多くの epoch-making かつ新たな研究の流れを形成する成果を生産し続け ている。最近の、代表的な研究テーマと成果は、

1) 1 次元における電子のスピン・電荷分離の観測 (Phys. Rev. Lett. (1996) (1998))。

 正孔ドーピング可能な梯子型 Cu酸化物における超 伝導相を含む電子相図の全貌を明らかにした (Phys. Rev. Lett. (1997)(1998)(1999), Science (2002))。

3) 高温超伝導秩序と競合するストライプ秩序を発見 (Nature (1995), Science (1999), Phys, Rev. Lett. (2000)(2002) )

4) 高温超伝導体のナノスケール不均一性と超伝導準 粒子の量子力学干渉により生ずるナノスケール現象 の観測 (Nature (2000)(2001)(2002)(2003), Science (2002))。

5) 磁場と結晶構造制御による高温超伝導体のテラへ ルツ光学スペクトル操作(Phys. Rev. Lett. (2001), (2002))。

研究の最終目標は、高温超伝導機構の解明と室 温超伝導の可能性を明らかにすることである。発見 後17年経った現在でもメカニズムが未解明なのは、 電子相関が支配的な系、特にナノメートルスケール の電子系、での電子の運動、秩序形成を決める「原 理」/「法則」がわかっていないためであると考えら れる。それを明らかにする為、高温超伝導と競合す る秩序の同定、そして競合を制御するパラメーター の追及を行う。これらは、室温超伝導実現への1つ の道でもある。

# 4.4.1 梯子型 Cu酸化物の電子相図

様々な形態の結晶構造を示す Cu酸化物の中でもユ ニークなのは梯子型構造である (図 4.4 a)。基本的に 1次元系であるが、2次元の高温超伝導体と、いくつ かの点で共通の電子的性質をもつため、高温超伝導 発現にとって本質的な要素を含むかもしれない系と して、理論、実験の両面で注目されている。我々は、  $Sr_{14-x}Ca_xCu_{24}O_{41}$ という2本脚梯子化合物に注目 し、その結晶成長、ドーピング制御、そして、この 系での超伝導実現の条件を様々な物性測定で調べた。



図 4.4 a:  $Sr_{14-x}Ca_xCu_{24}O_{41}$ の結晶構造。この物質 は, $CuO_2$ 鎖層と, $Cu_2O_3$ 梯子層が交互に積層した 層状構造物質である。

# 圧力下の電子相図

この系の超伝導は3GPa以上の高圧下で実現する。 正孔ドーピング量や圧力変化に伴い、梯子上の正孔 が整列したり(電荷秩序)クーパー対形成により超 伝導になるという詳細な電子相図を完成した。

#### 電荷整列状態での集団励起モード

超伝導は高ドープ(x>10)、高圧下(>3GPa)での み実現する事を明らかにしたが、それ以外の状況下 では常に絶縁体となる。絶縁体の起源が梯子上の正 孔あるいは正孔対の電荷整列(CDW)であり、秩序 形成に伴う集団励起モードが存在することを、ラマ ン散乱やマイクロ波超伝導の実験で明らかにした。

# 4.4.2 磁場と構造制御による高温超伝導体 のテラヘルツ光学スペクトル操作

高温超伝導体は超伝導 CuO2 面が多数積層したジョ セフソン接合超格子となっている。それを特徴づける のはジョセフソン・プラズマと呼ばれる、テラヘルツ 周波数領域に固有振動をもつ集団励起モードである。 ところが、このモードは光とは直接結合しない縦励 起である。光と結合する光学型(横型)プラズマモードをつくるには、ジョセフソン結合の変調を(1)元 素置換による構造制御、T\*型 SmLa<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>の 単結晶作製(2)YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-y</sub>結晶の CuO<sub>2</sub>面に 平行に磁場をかけることにより行い、光学型ジョセ フソン・プラズマの生成に成功した (図 4.4 b)。



図 4.4 b: (a) 平行磁場中の YBCO 高温超伝導体と (b) T\*型高温超伝導体の光学型ジョセフソンプラズ マ。Tc 以下で光学伝導度 ()に有限周波数のピー クが現れる。

# 4.4.3 高温超伝導体における超伝導 スト ライプ秩序競合の圧力による制御

高温超伝導の超伝導秩序と競合関係にある秩序の 1つは「ストライプ」秩序である。ドープされた正 孔が直線状に偏析し、周期的に並ぶとともに、その 間に反強磁性のスピンドメインが形成されるとい うものである (図 4.4 c 左図)。Nd を部分置換した  $La_{2-x-y}Nd_ySr_xCuO_4$ では、ストライプ秩序が静的 に安定化し、超伝導秩序を抑制する。特に、x=0.12(~1/8)の正孔濃度のときストライプ 就最も安定に なり、超伝導がほぼ消滅する。我々は、比較的小さ な0.1GPa 程度の圧力を x=0.12 の物質にかけること により、ストライプ秩序が不安定になり、超伝導が 復活することを示した (図 4.4 c 右図)。超伝導秩序 とストライプ秩序がエネルギー的に拮抗しているこ とを意味している。

# 4.4.4 高温超伝導体のナノスケール不均一 性と量子現象

通常の超伝導体では、多数のクーパー対の波動関数が空間的に重なり合い、均一に分布する事により、 その位相を揃えて超伝導状態が実現する。クーパー 対の半径が極端に短く (~2nm)、その数も少ない高



図 4.4 c: 高温超伝導体中のストライプ形成と圧力に よる超伝導性の復活。

温超伝導体中でクーパー対がどのような分布をし、 どのように位相をそろえるかを卓越した分解能、安 定性をもつ STM プローブで探っている。

## ミクロ相分離した高温超伝導状態

Bi 系超伝導体に対して、その超伝導ギャップの大きさの空間分布を測定したところ、クーパー対の位相が揃って超伝導秩序が形成されているのは2-3nmの大きさの領域内で、その様な超伝導ドメインが非超伝導のドメインとモザイク状に混在、相分離していることがわかった(図4.4 d下図)。従って、高温超伝導状態は超伝導ドメイン間のジョセフソン結合(近接効果)により実現しているものと推定される。また、非超伝導領域で、どのような秩序が発達しているかを探ることが高温超伝導メカニズムを解明する上で重要である事を示している。

#### 量子化磁束近傍の電子状態

磁場は高温超伝導体中に量子化磁束として侵入す る。その磁束芯付近では超伝導秩序が抑制され、何 らかの「非超伝導相」が実現していると考えられて いる。STM 観察により、量子化磁束に散乱された超 伝導準粒子が作る規則的な干渉パターンが見出され た(図 4.4 d 上図)。ストライプのような非超伝導秩 序が形成されていることを示唆している。 準粒子干渉によるナノスケール現象

準粒子の干渉パターン(干渉稿)は磁場がゼロの ときにも観測される。この干渉パターンは準粒子の エネルギー(STMバイアス電圧)を変えると劇的に 変化することを発見した。このパターンをフーリエ 変換することにより、運動量空間における準粒子の 分散、その出発点のフェルミ面、そしてd波対称性 をもつ超伝導ギャップの存在を示すことができた。

Vortex-induced LDOS (5 Tesla) 2 pA 560 Å Aq 0 Spatial evolution of dI/dV-spectra 65 mV Ć  $30 \,\mathrm{mV}$ Δ α-like 1.3 nS < boundary 0.7 nS β-like  $G(\Delta)$ -100 -50 Ó 50 100 E(mV) 0Å 140 Å

図 4.4 d: 高温超伝導体中のナノスケール不均一性。 上図: CuO<sub>2</sub> 面に垂直にかけた磁場で作られた磁束 近傍に,チェッカーボード状の局所状態密度のパター ンを観測した。下図:磁場がない状態でも,超伝導 ギャップ-擬ギャップに空間分布が現れ、ナノメータ スケールのパターンが形成されている。

## <報文>

### (原著論文)

- [1] J. E. Hoffman, E. W. Hudson, K. M. Lang, V. Madhavan, H. Eisaki, S. Uchida, and J. C. Davis: Four Unit Cell Periodic Pattern of Quasi-Particle States Surrounding Vortex Cores in  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ , Science **295**, 466-469 (2002).
- [2] K. M. Lang, V. Madhavan, J. E. Hoffman, E. W. Hudson, H. Eisaki, S. Uchida, and J. C. Davis:

Imaging the granular structure of high-T<sub>c</sub> superconductivity in underdoped  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ , Nature **415**, 412-416 (2002).

- [3] B. Nachumi, C. Kendziora, N. Ichikawa, Y.Nakamura, and S. Uchida: Raman scattering in striped La<sub>1.475</sub>Nd<sub>0.4</sub>Sr<sub>0.125</sub>CuO<sub>4</sub>, Phys. Rev. B65, 092504-1-4 (2002).
- [4] A. Ino, C.Kim, M. Nakamura, T. Yoshida, T. Mizokawa, A. Fujimori, Z. -X. Shen, T. Kakeshita, H. Eisaki, and S. Uchida: Doping-dependent evolution of the electronic structure of La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub> in the superconducting and metallic phases, Phys. Rev. B65, 094504-1-11 (2002).
- [5] C. Kim, F. Ronning, A. Damascelli, D. L. Feng, Z. -X. Shen, B. O. Wells, Y. J. Kim, R. J. Birgeneau, M. A. Kastner, L. L. Miller, H. Eisaki, and S. Uchida: Anomalous temperature dependence in the photoemission spectral function of cuprates, Phys. Rev. B65, 174516-1-7. (2002).
- [6] M. Z. Hasan, P. A. Montans, E. D. Isuacs, Z. -X. Shen, H. Eisaki, S. K. Sinha, Z. Islam, N. Motoyama, and S. Uchida:Momentum-Resolved Charge Excitations in a Prototype One-Dimentional Mott Insulator, Phys. Rev. Lett. 88, 177403-1-4 (2002).
- [7] S. Arumugam, N. Môri, N. Takeshita, H. Takashima, N. Noda, H. Eisaki, and S. Uchida: Competition of Static Stripe and Superconducting Phases in La<sub>1.48</sub>Nd<sub>0.4</sub>Sr<sub>0.12</sub>CuO<sub>4</sub> Controlled by Pressure, Phys. Rev. Lett. 88, 247001-1-4 (2002).
- [8] Yayu Wang, N. P. Ong, Z. A. Xu, T. Kakeshita, S. Uchida, D. A. Bonn, R. Liang, and W. N. Hardy: High Field Phase Diagram of Cuprate Derived from the Nernst Effect, Phys. Rev. Lett. 88, 257003-1-4 (2002).
- [9] N. Motoyama, H. Eisaki, S. Uchida, N. Takeshita, N. Môri, T. Nakanishi, and H. Takahashi: Electronic phase diagram of a hole-doped two-leg ladder system, Sr<sub>14-x</sub>Ca<sub>x</sub>Cu<sub>24</sub>O<sub>41</sub>, Europhys. Lett. 58, 758-763 (2002).
- [10] G. Blumberg, D. Littlewood, A. Gozar, B. S. Dennis, N. Motoama, H. Eisaki, and S. Uchida: Sliding Density Wave in Sr<sub>14</sub>Cu<sub>24</sub>O<sub>41</sub> Ladder Compounds, Science **297**, 504-587 (2002).
- [11] J. E. Hoffman, K. McElroy, D. -H. Lee, K. M. Lang, H. Eisaki, S. Uchida, and J. C. Davis: Imaging Quasiparticle Interference in  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ , Science **297**, 1148-1151 (2002).
- [12] K. M. Kojima, S. Uchida, Y. Fudamoto, and S. Tajima: New Josephson Plasma Modes in Underdoped YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>6.6</sub>3 Induced by a Parallel Magnetic Field, Phys. Rev. Lett.89, 247001-1-4 (2002).

#### (国内雑誌)

[13] 内田慎一,永長直人:高温超伝導と電子 格子の相互 作用,日本物理学会誌 58(2003)182. (学位論文)

- [14] 後藤昌宏:高温超伝導体の不純物効果(博士論文)
- [15] 春日隆:高温超伝導体のストライプ秩序と電子輸送現 象(修士論文)
- [16] 山野辺淳: Y 系高温超伝導体の磁場特性(修士論文)<学術講演>

招待講演

- [17] S. Uchida: Real and Momentum Space Inhomogeneity of the Cuprate Electronic State, High- $T_c$  Workshop in  $\mu$ SR International Conference (Williamsburg, USA, June 2002).
- [18] S. Uchida: Charge Dynamics in High-T<sub>c</sub> Cuprates, Frontiers in Condensed Matter Physics (FESTP) (Groningen, The Netherolands, June 2002).
- [19] S. Uchida: Critical Points in the Cuprate Phase Diagram (2002 International Conference on Physics and Chemistry of Molecular and Oxide Superconductors (MOS2002)) (Hsinchu, Taiwan, August 2002).
- [20] S. Uchida: Charge Transport in the Static Stripe Phase of Cuprates, CREST International Conference of Low Temperature Physics (LT23) (Hiroshima, August 2002).
- [21] S. Uchida: Spectral Weight and Superfluid Density in High-T<sub>c</sub> Cuprates, International Workshop on Transition Metal Compounds (Sendai, August 2002).
- [22] S. Uchida: Spin and Charge in the Ladder Cuprate, The 6<sup>th</sup> Butsukou Symposium. (Tokyo, October 2002).
- [23] S. Uchida: Inhomogeneity in High-T<sub>c</sub> Cuprates-Optical Response in the Superconducting State, The  $8^{th}$  International Workshop on Chemistry of High-T<sub>c</sub> Superconductors (Nagatsuda, November 2002).

## (国内会議)

# 一般講演

- [24] 吉田鉄平, X.-J.Zhou, P.Bogdanov, Z.-X.Shen,
   W.Yang, A.Lanzara, Z.Husain, 田中清尚, 八木創,
   溝川貴司,藤森淳,永崎洋,掛下照久,内田慎一:
   La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub> の金属絶縁体転移近傍の電子構造日
   本物理学会 2002 年秋季大会(中部大会、2002 年9月)
- [25] 井野明洋,成村孝正,島田賢也,生天目博文,谷口雅 樹,吉田鉄平,藤森淳,Z.-X.Shen,掛下照久,内田 慎一,安達成司,田島節子: T\*相銅酸化物超伝導体 SmLa<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>の角度分解光電子分光 日本物理 学会 2002 年秋季大会(中部大会、2002 年 9 月)
- [26] 門野良典, 髭本亘, 幸田章宏, G.M.Luke, M.I.Larkin, A.T.Savici, 植村康朋,小嶋健児,掛下照久,岡村 友博,内田慎一,伊藤利充,岡邦彦: µSR で見た La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>の磁束コア半径 -Sr 濃度依存性日本 物理学会 2002 年秋季大会(中部大会、2002 年9月)

- [27] 小嶋健児,内田慎一,札本安識,田島節子:遠赤外分光 によるYBCOのジョセフソンプラズマ応答:面内磁 場下の新しいモードの組成依存性と磁場方向依存性 日本物理学会2002年秋季大会(中部大会、2002年 9月)
- [28] 掛下照久,小嶋健児,内田慎一,安達成司,田島節子: T\*型銅酸化物超伝導体の面内電荷応答
   日本物理学会 2002 年秋季大会(中部大会、2002 年 9月)
- [29] 春日隆,小嶋健児,内田慎一: La<sub>2-x-y</sub>Nd<sub>y</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub> 系の光学 Hall 係数測定日本物理学会 2002 年秋季大 会(中部大会、2002 年 9 月)
- [30] 藤巻洋介,小嶋健児,内田慎一: S = 1/2 スピン梯子 系の赤外吸収とマグノン励起日本物理学会第58回年 次大会(東北大学、2003年3月)
- [31] 掛下照久,小嶋健児,内田慎一,安達成司,水貝俊治:
   T\*型銅酸化物高温超伝導体の面内電荷応答()
   日本物理学会第58回年次大会(東北大学、2003年3月)
- [32] 石角元志,小嶋健児,内田慎一: B i2212 高温超伝導 体の光学応答日本物理学会第58回年次大会(東北大 学、2003年3月)
- [33] 春日隆, 二河久子, 掛下照久, 小嶋健児, 内田慎一, 札 元安識, 田島節子: LNSCOの面内光学応答日本物理 学会第58回年次大会(東北大学、2003年3月)
- [34] 藤田和博,小嶋健児,内田慎一,永崎洋: Bi2212の輸送 特性日本物理学会第 58 回年次大会(東北大学、2003 年 3 月)

## 招待講演

- [35] 内田慎一:超伝導の夢 室温超伝導は出現するのか?,
   未踏科学技術協会超伝導科学技術研究所(東京,2002 年6月).
- [36] 内田慎一:高温超伝導 ナノスケールの物理,東大新 領域ナノテクノロジー研究推進のための学融合ワー クショップ(柏,2002年5月).
- [37] 内田慎一:高温超伝導体の起源 フォノン or 磁気励 起?,日本物理学会第58回年会(東北大学川内キャ ンパス,2003年3月).
- (セミナー)
- [38] 内田慎一:高温超伝導体における相分離と不均一性,超 伝導基盤技術動向調査委員会(ISTEC)(東京,2002 年12月).

<sup>(</sup>国際会議)

# 4.5 長谷川研究室

4月から修士課程1年生として上野将司、沖野泰 之、小西満の3君が、2月より学振特別研究員のKwonjae Yoo が新しくメンバーに加わった。3月には、谷 川雄洋が博士課程を、金川泰三が修士課程をそれぞ れ修了して巣立っていった。劉燦華が修士課程を修 了して博士課程に進学した。

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 象を見出し、機能特性として利用することをめざし 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、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

温度可変マイクロ4端子プローブ法による表面状態 での金属・絶縁体相転移の観測

超高真空中で表面超構造を制御しながら、マイク ロ4端子プローブ (プローブ間隔;4~30µm)を用い て、表面電気伝導度を400K~10Kの温度範囲で、電 子回折パターンと同時に測定できる装置を昨年度製 作したが、今年度は、これを用いて Si(111)-4×1-In 表面を測定した。この表面超構造は、擬一次元金属 的な表面電子状態を持つこと、かつ低温に於いてパ イエルス転移を起こすことが知られている。測定の 結果、図 4.5 a に示すように、転移温度(~130 K)以 上では伝導度が金属的な温度依存性を示すが、8×'2' に相転移するとともに急激に伝導度が減少すること がわかり、明らかな金属・絶縁体転移を見出すこと ができた。低温相での伝導度の温度依存性からエネ ルギーギャップが約 300meV と見積もられた。また、 相転移近傍のみで、電流・電圧(IV)特性に著し い非線形性が見出された。さらに、欠陥を故意に導 入すると、高温相での伝導度が激減し、転移温度で の伝導度の変化がボケ、さらに非線形IV特性が消 えた。このように表面電子状態での金属絶縁体転移 を電気伝導度の変化として直接的に検出した報告は 他に例が無い。

4 探針 STM の探針接触の制御と電位分布の測定

表面電子輸送を研究するために、本研究室では独 立駆動型4探針STM(走査トンネル顕微鏡)を開 発してきた。昨年度までに、試料と探針の接触を制 御し、自動でアプローチを行う制御系、ソフトウェ アを開発し、接触点ではショットキーバリアができ ていることを確認した。今年度は接触点の制御が可 能となったことを生かし、Si(111)-7×7やSi(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面の探針近辺の電位分布を測定した。 その結果、表面近傍のみを電流が流れる2次元伝導 であることを確認し、探針制御できなかった以前の 測定結果が正しいことが再確認された。



図 4.5 a: Si(111)-4 × 1-In 表面超構造の伝導度を温 度の逆数に対してプロットした。影の領域は、表面 空間電荷層での伝導度( $\sigma_{SC}$ )を示す。

4 探針 STM によるカーボンナノチューブ(CNT) の電気伝導測定

4 探針STM装置を用いてCNTのハンドリング や電気伝導度の研究を行った。走査電子顕微鏡で観 察しながら、探針を用いて任意の多層CNTを一本 取り出し、真空中で2端子電気伝導測定が可能であ ることを示した。また、大阪大学工学部の尾浦研究 室と共同で、Tiパッド間に成長させたCNTおよび 分散させたCNTの電気伝導特性の測定をおこなっ た。実験結果から接触抵抗が大きいが、CNTの伝導 度は十分低いと考えられる。

一方、CNT は優れた STM 用探針として期待され ている。探針形状、探針寿命が測定に大きな影響を あたえる4探針 STM で CNT 探針が使えるならば、 その利点は非常に大きい。今後は、CNT をW探針の 先端に強固に接着する方法を探し、CNT 探針を実現 したい。これにより、探針どうしの間隔を nm オー ダーまで近づけることができ、また、極微構造物の 測定も可能となる。(大阪大学との共同研究) 4 探針 STM による Si(111)-4×1-In 表面の異方的 電気伝導度の測定

上述の Si(111)-4 × 1-In 表面は、擬一次元金属的 な表面電子バンドを持つので、著しい伝導度の異方 性が期待できる。しかし、室温における線形4端子 プローブ法(4つのプローブを一直線上に並べる方 法)の測定では、金属鎖に沿う方向とそれと垂直方 向で伝導度の差が見出されなかった。簡単な計算に よると、異方的伝導度を持つ2次元導体では、電流 プローブを結ぶ線上の電位分布は異方性やプローブ の設置方向に依らず同一であることがわかった。そ こで、4本のプローブを正方形に並べて、電流プロー ブと電圧降下測定プローブを入れ替えながら測定す れば、電位分布の異方性から伝導度の異方性を検出 できるので、4探針STMを用いた測定を行った。さ らに、測定精度を向上させるため、その正方形を試 料表面上で回転させる「回転正方4端子プローブ法」 を考案した。それによる測定の結果、Si(111)-4×1-In 表面では、金属鎖に沿う方向には $7 \times 10^{-4}$ S/Square の伝導度( $\sigma_{II}$ )を持ち、それと直角方向にはその約 1/70の伝導度( $\sigma_{\perp}$ )しかないことがわかった。この 異方性は、実測されている表面電子バンドを利用し て Boltzman 方程式から計算された異方性とほぼ同 じ程度であること、また、 $\sigma_{\perp}$ は表面空間電荷層の伝 導度でほぼ説明できることがわかった。このように 伝導度の異方性の実測により、表面電子バンドによ る伝導を確かにとらえていると言える。(電気通信大 学との共同研究)

微傾斜 Si(001) 上の In のエレクトロマイグレーション

< 100 > 方向に 4°傾いた Si(001) 基板表面上に、 In を幅  $10\mu m$ のスリット状に蒸着し、直流電流を基板に流した時の In の表面上での熱拡散およびエレクトロマイグレーション現象を超高真空走査電子顕微鏡でその場観察した。電流(電場)の増大にしたがい、表面熱拡散(陽極側と陰極側ともに等方的に In 領域が拡がる)が優勢な状況、表面熱拡散と表面エレクトロマイグレーションが同程度の状況、および表面エレクトロマイグレーション(陰極側に優先的に拡がる)が優勢な状況が実現した。In 領域の陰極側での端では3次元的な島が観察されたが、以前の報告にある(310)ファセットは形成されなかった。 表面ステップの影響も観察されなかった。(電気通信大学との共同研究)

# 4.5.2 表面超構造と相転移

微傾斜 Si(111) 上の Au 誘起表面構造

結晶を切り出すときに低指数面からわずかに傾け て切り出すと、低指数面のテラスとステップからなる 階段構造をとることが知られており、この表面は一 次元系作成の良いテンプレートとなる。今回は [112] 方向と [112] 方向に 9.45°傾いた 2 つの Si(111) ウェ ハーを用いた。これらの表面に Auを蒸着すると自己 組織化によって、テラスと single ステップが周期的 に並ぶ一次元構造を示すことがすでに報告されてい る。また、蒸着量を変えることでテラス幅を 1.5nm から 3.5nm まで不連続に変えることができる。この 表面を走査トンネル顕微鏡(STM)で観察し、低速 電子回折(LEED)による phase diagram を局所構造 の面から確認した。今後はこの一次元構造の電気伝 導特性と局所構造の相関を調べていく予定である。

## Si(111)-4×1-In 表面での欠陥の影響の STM 観察

|室温において 4×1-In 表面上に 0.1 原子層程度の In を追加蒸着すると、表面には欠陥が導入され、4×'2' 構造に変化することが知られているが、その欠陥誘 |起構造を、室温および 65K において STM 観察を行っ た。この表面は 65K においてもやはり 4×'2' 周期を 持つが、この低温相は室温における4×'2'構造とは 明らかに異なることがわかった。室温における4×'2' 構造は欠陥の周りに広がるフリーデル振動によるも のである。一方、低温における 4 ×' 2' 構造は表面全 体に広がり、STM 像は明らかに室温 4 ×' 2' 構造と は異なる。更に、STM 占有状態像と非占有状態像の 比較から、この低温4×'2'構造は、欠陥導入前の清 浄な In/Si(111) 表面で見られた低温 8×'2'-CDW(電 荷密度波)相とも著しく異なることがわかった。つま り、欠陥の少ない4×1表面は、冷却によってCD W転移を起こす一方、欠陥を多量に導入すると、低 温で室温と異なる4×'2'構造に相転移するが、この 2つの相転移の機構は全く異なるといえる。

作成条件の異なる Si(111)- √3×√3-Ag 表面の STM 観察

Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag は様々な実験や理論的な計算 に用いられている非常に典型的な表面である。この 表面は作成条件を変えると、単位胞内の原子配列構 造には違いは生じないが、Si 2p 内殻光電子分光ス ペクトルに違いが生ずることが示唆されていた。こ れは内殻光電子分光実験において、スペクトルに影 響する未知の因子がある可能性を意味している。そ こで、この原因を解明するために、STM を使って、 異なる作成条件で作った表面を系統的に直接観測し た。その結果、作成条件によって表面の巨視的な形 態に大きな違いが生じることを発見した。このこと から、 $\sqrt{3}$  ×  $\sqrt{3}$ -Ag テラス上に存在しているにもか かわらず室温 STM では見えない余剰 Ag 原子の2 次元気体が、内殻光電子スペクトルに影響している ことを提案した。これより、余剰原子の無い理想的  $\sqrt{3}$  imes  $\sqrt{3}$ -Ag の作成条件を確立した。

Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面の電子構造

Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面の最安定構造として、 STM と第一原理計算などの研究により Inequivalent Triangle(IET)構造が提案され、広く受け入れられ ている。しかしながら、これまでの表面電子状態に ついての研究では、この IET に対応したパンド構造 は報告されていない。本研究では、放射光実験施設 Elletra(イタリア)と PF(日本)において放射光光電 子分光測定を行った。その結果、IET に対応したエ ネルギーギャップと波動関数の対称性を確認するな ど、そのバンド構造を詳細に決定し、電子構造に関 わるこれまでの議論に決着を付けた。また、表面は 冷却に伴い 150K 付近で相転移することが知られて いるが、その相転移の起源の確固たる証拠を掴んだ。

Si(111)- $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ -(Ag+Na) 表面の光電子分光

Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面に一価金属原子を吸着さ せると高い電気伝導を示す  $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 相が形成され ることが当研究室で明らかにされている。これまで Ag, Au, Cu, K, Rb, Cs を吸着させた系について電 気伝導、原子配列構造、電子状態に関する報告があっ たが、より単純な電子系である Na 吸着系はまだな い。そこで、本研究では $\sqrt{3}$ × $\sqrt{3}$ -Ag 表面上の Na 吸 着系の構造及び電子状態を調べた。電子回折により  $\sim 0.15 \mathrm{ML}$  Na の低温蒸着で  $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 相の形成を発 見した。さらにこの Si(111)- $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ -(Ag+Na) 表 面と Si(111)- $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ -(Ag+Ag) 表面について Si 2p, Na 2p, Ag 4d 準位の内殻光電子分光 (CL-PES) 測定、および表面価電子バンド分散構造を角度分解 光電子分光法によって調べた。その結果、この表面 電子状態は金属的で、 $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ -(Ag+Ag)表面の 電子構造と類似していることが分かった。CL-PES からも両表面の構造に高い類似性が見られた。また  $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ -(Ag+Na) 表面には 2 種類以上の Na 吸 着サイトがあり、さらに下地  $\sqrt{3} imes \sqrt{3}$ -Ag 基板表面 が IET 構造から変化していることが示唆された。ま た、 $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ -(Ag+Ag) で見出された大きな電子 ポケットとなる放物線的なバンドは、実は小さな電 子ポケットであることが明らかとなった。

Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面上の Cs 吸着

室温で Cs 吸着によって形成される Si(111)- $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ -(Ag+Cs) 構造の電子状態を光電子分光法によって調べた。その結果、貴金属による  $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$  表面と全く異なり、下地の  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面の表面バンドが全く残っていないことがわかった。前年度の低温STM の実験結果とあわせて、 $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ -(Ag+Cs)表面は、貴金属による  $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 表面と著しく異なる原子配列及び電子構造を持っているといえる。また、仕事関数の Cs 吸着量依存性から、 $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ -(Ag+Cs) 表面の Cs 蒸着量は約 0.45ML であると見積もった。また、Cs 蒸着量を増やしていくと、表面

状態が非金属  $\rightarrow$  金属  $\rightarrow$  非金属  $\rightarrow$  金属と変化して いくことが分かった。これは、室温で  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag の表面上に Cs 蒸着しながら測定した表面電気伝導 度の変化とよく対応しているので、この電気伝導度 の変化は表面バンドの変化が支配していると考えら れる。

また、0.45ML よりはるかに少ない量の Cs 原子を  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面上に室温で蒸着して、その後 70K に冷却する、あるいは、120K 程度の低温で  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ の表面に Cs 原子を直接蒸着すると、 $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 構造 が試料表面全面的に形成されることを発見した。こ の低温で且つ低蒸着量で形成される  $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$  表面 を低温 STM で観察した。一つの  $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$  表面 を低温 STM で観察した。一つの  $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$  ユニッ ト中に三つの輝点が存在し、この輝点のサイズと高 さを調べた結果、一つの輝点が一つの Cs 原子に対 応していることが分かった。この輝点の数および Cs の蒸着時間から、この低蒸着量の  $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 表面の Cs 被覆量は 0.15ML であると考えられる。この低蒸 着量の  $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 表面の電子構造を光電子分光法で 調べたが、現在データ分析中である。

# 4.5.3 新しい装置の立ち上げ

高分解能角度分解光電子分光・マイクロ4端子電気 伝導測定複合装置の立ち上げ

この装置では、半導体表面上での金属吸着で形成 されるナノ構造のフェルミ面を、超高分解能光電子 分光法で決定し、その量子物性や輸送現象との関連 を調べる。本年度は、(1)高エネルギー分解能・高角 度分解能の電子分光、(2)サンプルの2軸回転の自 動制御、(3)幅広いサンプル温度領域での測定、な どの機能を兼ね揃えた実験装置の立ち上げを行った。 Gammadata Scienta 社製電子分析器 SES-100の導 入やマニピュレーター改造により、現在、2.1meVの エネルギー分解能、~0.2°の角度分解能、2軸回転 のコンピューター制御、90~300Kでの測定が可能と なり、当初の目的を達成した。また、本装置にはマ イクロ4端子プローブによる電気伝導測定もデザイ ンしてあるので今後はその拡張とパルス加熱による 室温以上での測定も実現させる。

自動フェルミ面マッピング角度分解光電子分光用モー ターコント ロールシステムの作成

Vacuum Generators(VG) 社の ADES400 アナラ イザーを真空中で固定し、大気側から試料マニピュ レーターをステッピングモーターで動かす。このと き、アナライザーが検出する光電子の運動エネルギー を固定すれば、そのエネルギーにおける光電子カウ ント数を様々な電子出射角度において測定すること になり、等エネルギーにおける光電子強度分布を得る ことができる。これをフェルミエネルギーで行えば、 フェルミ面マッピングを行える。試料マニピュレー ター及びステッピングモーターはそれぞれ VG 社、神 津精機社によるものであり、ステッピングモーターは PCから GPIB 接続で制御される。アナライザーの発 するパルスのカウンターには National Instrumants 社の PCI-6601 を用いて PC に取り込まれる。これら を制御する PC 上のプログラムは Microsoft Visual Basic 6.0 によって作成した。テスト運転の結果、所 期動作を確認でき、来年から実際の試料での測定に 利用する予定である。

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 A「超高真空中走査型マイクロ4 端子プローブによる局所表面電気伝導の研究」(代表 者 長谷川修司)

・科研費 若手研究 A「 半導体表面上ナノ構造のフェ ルミオロジー」(代表者 松田巌)

・奨学寄付金 (株)日立製作所「半導体特性計測 マイクロプロービング技術の研究」(代表者 長谷川 修司)

・科学技術振興事業団戦略的創造研究推進事業「超高密度・超微細ナノドット形成とナノ物性評価技術」 (代表者市川昌和)

<報文>

(原著論文)

- H. Morikawa, I. Matsuda, S. Hasegawa: STM Observation of Si(111)-α-√3 × √3-Sn at low temperature, Physical Review B 65, 201308(R) (2002).
- [2] S. Hasegawa, I. Shiraki, T. Tanikawa, C. L. Petersen, T. M. Hansen, P. Goggild, and F. Grey: Direct measurement of surface-state conductance by microscopic four-point probe method, Journal of Physics: Condensed Matter 14, 8379 (2002).
- [3] G. LeLay, A. Cricenti, C. Ottaviani, P. Perfetti, T. Tanikawa, I. Matsuda, S. Hasegawa: Evidence of asymmetric dimers down to 40 K at the clean Si(100) surface, Physical Review B 66, 153317 (2002).
- [4] S. Hasegawa, I. Shiraki, F. Tanabe, and R. Hobara: Transport at surface nanostructures measured by four-tip STM, Current Applied Physics 2, 465 (2002).
- [5] T. Inaoka, T. Nagao, S. Hasegawa, T. Hildebrandt, M. Henzler: Two-dimensional plasmon in a metallic monolayer on a semiconductor surface; exchange-correlation effects, Physical Review B 66, 245320 (2002).
- [6] I. Matsuda, T. Ohta, and H. W. Yeom: In-plane dispersion of the quantum-well states of the epitaxial silver films on silicon, Physical Review B 65, 085327 (2002).
- [7] I. Matsuda and H. W. Yeom: The study of the quantum-well states in the ultra-thin silver film on

the Si surface, Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena **126**, 101 (2002)

- [8] M. Ueno, I. Matsuda, C. Liu, and S. Hasegawa, Step edges as reservoirs of adatom gas on a surface, Japanese Journal of Applied Physics, in press (2003).
- [9] C. Liu, I. Matsuda, H. Morikawa, H. Okino, T. Okuda, T. Kinoshita, and S. Hasegawa, Si(111)-√21 × √21-(Ag+Cs) surface studied by scanning tunneling microscopy and angle-resolved photoemission spectroscopy, Japanese Journal of Applied Physics, in press (2003).
- [10] H. W. Yeom, J. W. Kim, K. Tono, I. Matsuda, and T. Ohta: Electronic structure of the monolayer and double-layer Ge on Si(001), Physical Review B, in press (2003).

(総説)

[11] S. Hasegawa, I. Shiraki, F. Tanabe, R. Hobara, T. Kanagawa, T. Tanikawa, I. Matsuda, C. L. Petersen, T. M. Hansen, P. Boggild, F. Grey: Electrical conduction through surface superstructures measured by microscopic four-point probes, Surface Review and Letters, in press (2003).

### (国内雑誌)

- [12] 長谷川修司、白木一郎、田邊輔仁、保原麗、金川泰三、 谷川雄洋、松田巌、Christian L. Petersen、Torben M. Hanssen、Peter Boggild、Francois Grey: ミク ロな4端子プローブによる表面電気伝導の測定、表 面科学 23, 740 (2002).
- [13] 松田巌、Han Woong Yeom、谷川雄洋、登野健介、 長谷川修司、太田利明:半導体表面上金属超薄膜の量 子井戸状態の研究、表面科学 23, 43 (2002).
- [14] 長谷川修司、白木一郎、田邊輔仁、保原麗、金川泰 三、松田巌:4探針STMの開発と表面電子輸送の測 定、電子顕微鏡 38, 36 (2003).

(著書)

- [15] 長谷川修司(分担執筆):物理学大事典(第11.8節 表面)(鈴木増雄、荒船次郎、和達三樹編集、朝倉書 店),印刷中.
- [16] 長谷川修司(分担執筆):表面科学の基礎と応用(日本表面科学会編集、NTS),印刷中.

(学位論文)

- [17] 谷川雄洋:マイクロ4端子プローブ法による表面相転 移での電子輸送の研究(博士論文).
- [18] 金川泰三:正方4端子プローブ法による表面電気伝導の異方性の測定(修士論文).
- [19] 劉燦華:セシウムと銀が共吸着したシリコン表面の原 子配列と電子構造(修士論文).

<学術講演>

(国際会議)

# 一般講演

- [20] C.Liu, I. Matsuda, S. Hasegawa: Low temperature STM observation of Cesium adsorption on the  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  surface, Asian SPM4 and Taipei Symposium on Nanotechnology, 2002年8月12日 (Taipei, Taiwan)
- [21] T. Tanikawa, I. Matsuda, and S. Hasegawa: Microfour-point probe measurements of surface-state conductance at a Peierls transition on Si(111)-4×1-In, 2nd Vacuum and Surface Science Conference of Asia and Australia (VASSCAA-2), 2002 年 8 月 28 日 (Hong Kong, China).
- [22] S. Hasegawa, I. Shiraki, F. Tanabe, T. Tanikawa, R. Hobara, T. Kanagawa, and I. Matsuda: Direct measurements of surface conductivity by microscopic four-point probes, 5th Russia-Japan Seminar on Semiconductor Surfaces, 2002年9月17日 (Vladivostok, Russia).
- [23] C. Liu, I. Matsuda, H. Morikawa, T. Okuda, T. Kinoshita, S. Hasegawa: Electronic Structure of Csinduced  $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$  superstructure on the Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface, Asia-Pacific Surface and Interface Analysis Conference (APSIAC02), 2002 年 10月1日 (東京大学)
- [24] I. Matsuda, H. Morikawa, G. LeLay, C. Liu, S. Ohuchi, T. Okuda, T. Kinoshita, and S. Hasegawa: Electronic Evidence of the Inequivalent Triangle Structure on Si(111) 3x 3-Ag, Asia-Pacific Surface and Interface Analysis Conference (AP-SIAC02), 2002年10月3日(東京大).
- [25] T. Nagao, J. T. Sadowski, S. Yaginuma, T. Kogure, T. Sekiguchi, S. Hasegawa, and T. Sakurai, Carrier dynamics and self-organization of semimetal Bi on Si(111), Asia-Pacific Surface and Interface Analysis Conference (APSIAC02), 2002年10月3日(東 京大).
- [26] T. Tanikawa, H. Okino, I. Matsuda, and S. Hasegawa, Micro-four-point probe measurements during a phase transition on Si(111)-4×1-In surface at low temperature, Asia-Pacific Surface and Interface Analysis Conference (APSIAC02), 2002 年10月3日(東京大).
- [27] T. Kanagawa, R. Hobara, I. Matsuda, and S. Hasegawa, Anisotropic surface conducitvity measurements by microscopic squarely arranged foiur-probe method, Asia-Pacific Surface and Interface Analysis Conference (APSIAC02), 2002 年 10 月 3 日 (東京大).
- [28] R. Hobara, T. Kanagawa, T. Tanikawa, I. Matsuda, and S. Hasegawa, Electrical probe contact influence using micro four probe, Asia-Pacific Surface and Interface Analysis Conference (AP-SIAC02), 2002年10月3日(東京大).
- [29] H. Morikawa, I. Matsuda, C. Liu, H. Okino, T. Okuda, T. Kinoshita and S. Hasegawa: Electronic study of Sn,Pb/Si(111) surfaces Asia-Pacific

Surface and Interface Analysis Conference (AP-SIAC02), 2002年10月3日(東京大).

- [30] T. Kanagawa, R. Hobara, I. Matsuda, and S. Hasegawa, Anisotropy in surface-state electrical conduction measured by microscopic square-four-point probe method, The 10th International Collo-quium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM10), 2002年11月1日 (Waikiki, Hawaii).
- [31] M. Ueno, Liu Canhua, I. Matsuda, and S. Hasegawa, Difference in morphology of Si(111)-√3 × √3-Ag surface with various preparations, The 10th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM10), 2002 年 11 月 2 日 (Waikiki, Hawaii).
- [32] T. Nagao, S. Yaginuma, T. Kogure, J. T. Sadowski, T. Sekiguchi, H. Seki, S. Hasegawa, T. Sakurai: Epitaxial growth of bismuth ultrathin film on Si(111); Perfect heteroepitaxy with two-stage growth mechanism, Dr. Rohrer's JSPS Award Workshop II at IMR, 2002 年 11 月 11 日 (東北大).

## 招待講演

- [33] S. Hasegawa: Transport at surface nanostructures measured by four-tips STM, Multilateral Symposium between the Korean Academy of Science and Technology and the Foreign Academies, 2002 年 5 月 9 日 (Seoul, Korea).
- [34] S. Hasegawa: Surface electrical conduction measured by microscopic four-point probes, 2nd Vacuum and Surface Science Conference of Asia and Australia (VASSCAA-2), 2002 年 8 月 26 日 (Hong Kong, China).
- [35] S. Hasegawa, I. Shiraki, F. Tanabe, T. Tanikawa, R. Hobara, T. Kanagawa, and I. Matsuda: Surface-state electronic transport measured by microscopic four-point probes, Asia-Pacific Surface and Interface Analysis Conference (APSIAC'02), 2002年10月3日(東京大学).
- [36] S. Hasegawa: Surface-state electronic transport measured by microscopic four-point probes, Dr. Rohrer's JSPS Award Workshop II at IMR, 2002 年11月12日 (東北大学).
- [37] S. Hasegawa: Surface-state transport measured by four-tips STM, 30th Conference on The Physics and Chemistry of Semiconductor Interfaces (PCSI), 2003 年 1 月 21 日 (Salt Lake City, USA).
- [38] S. Hasegawa: Multi-Probe Study of Transport Through Metallic Quantum Wires, March 2003 Meeting of the American Physical Society, 2003年 3月5日 (Austin, Texas, USA).
- [39] S. Hasegawa: Surface phase transitions and electronic transport, The Symposium on Surface Physics 2003 (SSP03), 2003 月 3 日 12 日 (雫石, 岩 手).

(国内会議)

一般講演

- [40] 松田巌、守川春雲、劉燦華、大内暁、Guy LeLay、 Carlo Ottaviani、奥田太一、木下豊彦、長谷川修司: Si(111) 3 × 3-Agにおける表面状態対称性の破れ、日本物理学会第57回年次大会,2002年9月6日 (中部大学).
- [41] 劉燦華、松田巌、守川春雲、奥田太一、木下豊彦、長谷川修司: Si(111)-√21×√21-(Ag+Cs) 表面の電子構造,日本物理学会第57回年次大会,2002年9月6日 (中部大学).
- [42] 金川泰三、保原麗、松田巌、長谷川修司: 正方4端子 法による表面電気伝導の測定,日本物理学会 第57 回年次大会,2002年9月7日 (中部大学).
- [43] 谷川雄洋、沖野泰之、松田巌、長谷川修司:マイクロ 4端子法を用いた単原子層電荷密度波の電子輸送特 性,日本物理学会 第57回年次大会,2002年9月 7日 (中部大学).
- [44] 守川春雲、松田巌、劉燦華、長谷川修司: Si(111)-√3×√3-Sn, Pb 表面欠陥に関する研究,日本物理学 会第57回年次大会,2002年9月8日 (中部大 学).
- [45] 劉燦華、松田巌、守川春雲、長谷川修司: Research on the surface of Si(111)- 21 × 21-(Ag+Cs)、 日本表面科学会第22回講演大会、2002年11月27 日、早稲田大学.
- [46] 上野将司、劉燦華、松田巌、長谷川修司:Si(111)-3× 3-Ag 表面構造の処理温度依存性、日本表面 科学会第22回講演大会、2002年11月27日、早稲 田大学.
- [47] 松田巌、守川春雲、劉燦華、大内暁、長谷川修司、奥田太一、木下豊彦、Guy Le Lay: Si(111)-3×
   3-Ag における表面状態対称性の破れ、日本表面科学会第22回講演大会、2002年11月27日、早稲田大学.
- [48] 守川春雲、松田巌、劉燦華、堀越孝太郎、長谷川修 司:Si(111)-√3×√3-Sn,Pb 系の相転移と表面欠 陥の関係日本表面科学会第22回講演大会、2002年 11月27日、早稲田大学.
- [49] 谷川雄洋、松田巌、長谷川修司:マイクロ4端子法 を用いた表面パイエルス転移に伴う表面電気伝導度 の温度依存性測、日本表面科学会第22回講演大会、 2002年11月28日、早稲田大学.
- [50] 保原麗、松田巌、長谷川修司:4端子STMを用いた CNT電気伝導測定、日本表面科学会第22回講演 大会、2002年11月28日、早稲田大学.
- [51] 金川泰三、保原麗、、松田巌、長谷川修司:正方4端
   子法による表面電気伝導度測定、日本表面科学会第22回講演大会、2002年11月28日、早稲田大学.
- [52] 稲岡毅、長尾忠昭、長谷川修司、T. Hildebrandt、M. Henzler、:半導体表面金属単原子層に生ずる2次元 プラズモン、第43回真空に関する連合講演会,2002 年10月17日(大阪千里ライフセンター).
- [53] 長谷川修司、表面擬1次元金属系の電子輸送特性、平 成14年度東北大学電気通信研究所プロジェクト研究 会「半導体表面におけるナノプロセスの量子化学」, 2002年10月19日 (松島、宮城)

- [54] 長谷川修司: ミクロな4端子プローブ法による表面電気伝導の研究、第57回山田コンファレンス・ポストシンポジウム「固体表面の原子尺度設計・物性・反応性と表面構造相転移」、2002年5月17日(九州大学筑紫キャンパス).
- [55] 沖野泰之、松田巌、長谷川修司: 微傾斜した Si(111)-Au 表面のSTM観察、日本物理学会第58回年次大 会、2003年3月28日 (東北大学).
- [56] 坂本克好、名取晃子、河野勝泰、長谷川修司: UHV-SEM を用いた Vicinal Si(001) 表面エレクトロマイ グレーションのその場観察、日本物理学会第58回年 次大会、2003年3月28日 (東北大学).
- [57] 上野将司、松田巌、劉燦華、長谷川修司:Si(111)-√3× √3-Ag 表面の作成法によるモルフォロジ - の違い、 日本物理学会第58回年次大会、2003年3月29日、 東北大学.
- [58] 松田巌、小西満、守川春雲、奥田太一、木下豊彦、長谷 川修司:内殻光電子分光による Si(111)- √21 × √21-(Ag,Na) 表面の研究、日本物理学会第58回年次大 会、2003年3月31日(東北大学).
- [59] 小西満、松田巌、守川春雲、奥田太一、木下豊彦、長谷川修司:Si(111)-√21×√21-(Ag+Na)の表面電子構造、日本物理学会第59回年次大会、2003年3月31日(東北大学、仙台).
- [60] 谷川雄洋、金川泰三、沖野泰之、松田巌、長谷川修司: マイクロ4端子プローブ法による表面相転移での電子 輸送の研究、日本物理学会第59回年次大会、2003 年3月31日(東北大学、仙台).

招待講演

- [61] 松田巌: 半導体表面上金属ナノ構造の新量子状態、日本物理学会2002年秋季大会、領域9シンポジウム「表面光電子分光法の技術革新:表面量子準位からナノ構造まで」、2002年9月7日 (中部大学).
- [62] 長谷川修司: ミクロな4探針プローブ法による表面電 子輸送の研究、日本物理学会第58回年次大会、2003 年3月28日(東北大学).

(講義等)

- [63] 長谷川修司:半導体表面物性、横浜市立大学大学院総 合理学研究科集中講義「総合理学序説」2002年10 月22日(横浜).
- [64] 長谷川修司、桑島邦博:物理実験学(2年生)(分担 担当)2002年度冬学期(駒場).
- [65] 長谷川修司、松田巌、守川春雲 (TA):物理学実験 II (3年生)電子回折、2002年度冬学期(本郷).

# 4.6 福山研究室

福山研究室では  $\mu$ K 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)、スピン3重項超伝導を示 す新奇な超伝導体などを対象に研究している。2002 年度は、これまで科研費特別推進研究の助成のもと に開発を進めてきた2つの大型実験装置、「核断熱消 磁冷凍機」と「超低温走査トンネル顕微鏡」に種々 の改良と調整を加えることで、両装置ともに世界有 数の性能を発揮するようになった。続いて、これら の装置を使った本格的な実験が開始し、2次元<sup>3</sup>He を中心に興味深い結果が出始めている。

# 4.6.1 2次元のフェルミ量子流体 · 固体の 研究

グラファイト表面に物理吸着した単原子層の<sup>3</sup>He は、数K以下の低温で理想的な2次元フェルミ粒子 系を形成する。中でも吸着第2層目の単原子層<sup>3</sup>He は、図4.6 aに示すように低密度では2次元フェルミ 流体、高密度域では2次元量子固体となるなど、温 度と面密度の関数としてさまざまな量子構造をとり、 超低温で興味深い2次元の量子多体現象を示す。



図 4.6 a: グラファイト表面に吸着した第2層目の2 次元<sup>3</sup>Heの状態相図。面密度の関数として多様な量 子物性を示す。黒い逆三角形のデータ点は、我々が 測定した準粒子有効質量。

# 2次元固体<sup>3</sup>Heの核磁性の研究

Heの多体系は固体であっても隣接原子間のトンネ ル交換という形で強い量子性を示す。核スピン 1/2 をもつフェルミ粒子である<sup>3</sup>Heの固体の場合、この 原子トンネル交換はスピン間の交換相互作用、すな わち磁性を通じて調べることができる。グラファイト上の吸着第 2 層目の 2 次元  $^{3}$ He では、面密度を増してゆくと、ある臨界密度でフェルミ流体相から 1 層目に対して  $\sqrt{7} \times \sqrt{7}$  の整合性をもつ三角格子の局在相 (4/7 相) に量子相転移する。この局在相では少なくとも 4 体までの多体の交換相互作用 (偶数個の 交換は反強磁性的、奇数個の交換は強磁性的) が強く競合しており、三角格子構造も相まってフラストレーションが非常に強い 2 次元量子スピン系を形成している。

以前、我々のグループが行ったゼロ磁場下の核磁 気比熱測定では特異なダブルピーク構造が観測され、 4/7相の磁気基底状態がギャップレスの"量子スピン 液体"状態であることを強く示唆している(図4.6 b の一点鎖線)。2次元系でギャップレスの量子スピン 液体状態が実現している例はこれまで実験的には知 られておらず、理論的にも非常に興味深い系である。

今年度はこの現象をさらに詳しく調べるため、比 熱測定を 1.2 T までの磁場中に拡張する実験を開始 した。実験には 51 μK の超低温まで到達可能な完成 したばかりの核断熱消磁冷凍機(後述)を用いている。 図 4.6 b に予備的な測定結果を示す。ゼロ磁場ではや はり低温で大きな状態密度をもつダブルピーク構造 が観測された。ただし、今回は吸着第1層目を<sup>3</sup>He から<sup>4</sup>Heに変えたため、細かな温度依存性は異なる ようである。これは多体交換相互作用の大きさや競 合度が密度変化するためと解釈できる (1 層目が <sup>4</sup>He の方が2層目の<sup>3</sup>He 4/7相の密度は高い)。スピンの 短距離相関の成長に対応する高温側 (T ~ 1.5 mK) のピークは、少なくとも 0.6 T までの磁場を加える ことでは、大きく変化しないことも分かった。現在、 測定精度の向上を計りつつ、低温側のピークがどう 磁場変化するかをより高磁場まで調べている。外部 磁場によってスピンの "液体" 状態 (量子スピン液体) から"固体"状態 (反強磁性長距離秩序相) へ量子相 転移する現象、すなわちスピンの"固化"の観測を目 指している。

## 2 次元<sup>3</sup>Heの Mott 転移の研究と超流動探索

グラファイト上の 2 次元<sup>3</sup>He は、4/7 相に対応す る臨界密度以下のとき、理想的な 2 次元フェルミ流 体として振る舞う。この系の最大の特色は、表面積 が分かっている基盤表面にモル数を計量した <sup>3</sup>He 試 料を layer by layer で吸着させるので、面密度がゼ ロから 6 nm<sup>-2</sup> 前後まで大きく、しかも自在にコン トロールできる点である。つまり、粒子間相互作用 (この場合は Lennard-Jones 型)の無視できる 2 次元 フェルミ気体の領域から、粒子相関が非常に強いフェ ルミ流体の領域まで、disorder を一切導入すること なくキャリア濃度を広範囲に変えられるわけである。 その意味で、銅酸化物高温超伝導体の物理とも、興 味深い類似点と相違点がある。

局在転移直前の高密度な  $2 次 \pi^{3}$ He 流体の比熱を 測定してみると、 $1 \text{ mK} \le T \le 30 \text{ mK}$ の範囲で温度 によく比例する振る舞いが観測された。これはフェ ルミ流体の縮退領域特有の温度依存性である。その



図 4.6 b: 2次元固体  ${}^{3}\text{He}($ 吸着第 2 層目  $\sqrt{7} \times \sqrt{7}$  整合相)の磁場中熱容量の予備的な測定結果 (1 層目は  ${}^{4}\text{He}$ )。一点鎖線は 1 層目が  ${}^{3}\text{He}$  のときのゼロ磁場中における以前の測定結果。

データから準粒子有効質量 (m\*) を見積もると、図 4.6 a のように裸の<sup>3</sup>He 質量の 20 倍にも達すること が分かった。これは臨界密度に向かって m\* が発散 的に増加することを示すものと考えられ、4/7相で の量子局在が Mott-Hubbard 転移であることを強く 示唆している。今後は、発散の様子を詳しく調べる ため m\*の密度依存性を精密に測定する予定である。 また、核磁気共鳴 (NMR) 法による超流動 (BCS 転 移)探索実験のための予備実験を行った。秩序変数が 1つの複素数で表現できる2次元<sup>4</sup>Heの超流動転移 は Kosterlitz-Thouless 型であった。しかし、3 次元 超流動<sup>3</sup>Heのクーパー対が内部自由度をもつ p 波ス ピン3重項であったことを考えると、未発見の2次 元超流動では新奇な相転移が観測される可能性が高 い。これらを帯磁率変化や NMR 共鳴周波数シフト として観測するのが実験の狙いである。図 4.6 c はテ スト実験として吸着第1層目の高密度固体<sup>3</sup>He(常磁 性体)の帯磁率を連続波 NMR 法で測定した結果であ る。この実験では、従来の吸着基盤に比べて2次元 性を格段に向上させたグラファイト基盤(後述)を使 用しているのが他グループにない特徴である。デー タを見ると問題なく  ${}^{3}\text{He}$  試料が  $\mu\text{K}$  域まで冷却され ていることが分かる。さらに、従来の1/4以下の低 温 (50 µK) まで到達できる高性能な核断熱消磁冷凍 機(後述)を使用していることも、我々の利点である。

# 4.6.2 超低温実験技術の開発

# 核断熱消磁冷凍機の開発

100 µK 以下の最低到達温度と大きな冷却力をもつ小型で高性能な核断熱消磁冷凍機を開発してきた



図 4.6 c: ZYX exfoliated graphite(本文参照) 上に吸 着した、高密度な 2 次元固体 <sup>3</sup>He(常磁性) の帯磁率 の測定結果。実線は Curie 則を表す。帯磁率は NMR 吸収曲線 (挿入図) を積分して求めた。

が、昨年度終了した初期建設に続いて、今年度種々 の改良を行った結果、最低到達温度 51  $\mu$ K を発生す ることに成功した (図 4.6 d)。また、外界からの熱流 入量は 2 nW と小さく、1 週間以上にわたって試料温 度を 200  $\mu$ K 以下に保持できる冷却力をもつことも 確認された。これらは世界の 4 指に入るトップレベ ルの数字であるが、我々の装置はその中でも特にコ ンパクトに作られていることと、複数の試料セルを 搭載できる十分な大きさの実験空間が確保されてい るなどの点で、非常に使い易くできている。さらな る改良を施すことで、30 - 40  $\mu$ K に到達することも 十分可能である。この冷凍機は現在、2 次元 <sup>3</sup>He の 比熱測定と NMR 測定に活躍している。

#### 超低温走査トンネル顕微鏡の開発

超低温 (T < 50 mK)、高磁場 (B < 6 T)、超高真 空  $(P \le 10^{-8} \text{ Pa})$ の多重極限環境下で原子分解能を もって作動する世界最高性能の走査トンネル顕微鏡 (STM)を開発してきた。昨年度は初期建設を終え、 続いて、超高真空と極低温環境を破ることなく試料 を STM 観測室に搬送し、その後3時間で最低温度 まで冷却できる機能を確認した。今年度は、建設後 のテスト運転で明らかになった除振性能の不備に関 する徹底した調査と問題解決を図った。また、高温 部からの熱輻射を低減することで試料の最低到達温 度を改善することにも取り組んだ。その結果、図 4.6 e に示すように mK 温度域でも良好な原子分解能が 得られるようになり、試料温度も 30 mK まで冷却で きるようになった。また、Si(111) 表面の7×7構造 をテスト試料として、アルゴンイオンスパッタ、抵 抗加熱、低速電子線回折 (LEED) などによる超高真 空中での清浄試料表面の作成と評価ができる機能を



図 4.6 d: 51 μK の超低温度を発生したときの冷却曲 線。温度は白金の核帯磁率が Curie 則に従うことを 利用した磁気温度計で測定した。

確認した。以上のように、設計性能をすべて満たした超低温 STM がここに完成した。現在この装置を使って、吸着 2 次元固体の構造観察、グラファイトの端状態とナノ構造の研究が進行している。装置上一つだけ残った問題として、トンネル分光時のエネルギー分解能が 1 meV にとどまっている点がある。30 mK という試料温度の低さを十分活かすには 10  $\mu$ eV 程度のエネルギー分解能が欲しいところである。これについては現在さまざまな角度から問題解決にあたっており、解決され次第、 $Sr_2RuO_4$  や  $UPt_3$  などスピン 3 重項超伝導体の候補物質の本格的なトンネル分光実験を開始する。



図 4.6 e: 2*H*-NbSe<sub>2</sub>の STM 像 (*T*=126 mK, *V*=-80 mV, *I*=40 pA; (a) 2.7 nm × 4.1 nm, (b) 9.0 nm × 13.6 nm)。Se 原子がつくる三角格子像の上に電荷密度波による 3 × 3 の超格子構造が重なっている。

# 4.6.3 Exfoliated graphiteの物性評価と 表面の STM 観測

これまで mK 温度域で行われた 2 次元 <sup>3</sup>He の核 磁性やフェルミ流体効果に関するすべての実験では、 グラフォイルとよばれる単結晶子の大きさが 10 nm 程度の exfoliated graphite が吸着基盤として使われ てきた。しかし、10 nm という大きさは予想される 超流動のコヒーレンス長 (~ 100 nm) よりかなり短 いこと、結晶粒界付近に吸着したアモルファス状の <sup>3</sup>Heが不純物として振る舞うこと、などの問題点が あった。これは、2次元<sup>3</sup>Heの諸性質の正確な密度依 存性を知りたいときや、超流動探索には不都合であ る (対破壊やサイズ効果のため)。そこで我々は、単 結晶子サイズがグラフォイルより 20 倍近く大きく、 それに伴って不純物効果もずっと小さいことが予想 される ZYX exfoliated graphite(以下、ZYX)を超低 温度の実験として初めて使用する計画を立てた。ま ず、ZYX の表面積と電気抵抗を密度や温度の関数と して測定して物性評価を行い、次に吸着表面を STM 観測して単結晶子サイズの分布を実空間で調べるこ とで (図 4.6 f(a))、ZYX が 2 次元 <sup>3</sup>He の吸着基盤と して超低温域でも十分使用可能であることを突き止 めた。この結論は、図 4.6 c の μK 域での帯磁率測定 からも実証され、現在2次元<sup>3</sup>Heの超流動探索実験 に用いられている。

ZYX exfoliated graphite は、高配向性熱分解グラ ファイト (HOPG) に対して graphite intercalation (GIC) の手法を応用して作成するが、その際、グラ ファイト単結晶表面にある程度の密度で step edge や その他の表面欠陥が形成される。図 4.6 f(b) は Zigzag 型と呼ばれる step edge 近傍の原子配列を STM で初 めて観察した例である。このように、ZYX はグラ ファイト表面の step edge 近傍の端状態と呼ばれる 特別な電子状態や、表面に孤立したナノグラファイ トの電子状態を観察する上で、非常に適した物質で あることが判明した。今後は、それらの局所状態密 度を超低温 STM で観察する予定である。



図 4.6 f: ZYX exfoliated graphite 表面の室温大気 中での STM 像。(a) 広い範囲で見た像 (V=0.5 V, *I*=1.0 nA, 400 nm × 400 nm)。(b) Zigzag 型原子 配列をもつ step edge 近傍の STM 像 (5.3 nm × 5.3 nm)。 <報文>

(原著論文)

- T. Matsui, H. Kambara, I. Ueda, T. Shishido, Y. Miyatake and Hiroshi Fukuyama: Construction of an ultra-low temperature STM with a bottom loading mechanism, Physica B 329-333, 1653-1655 (2003).
- [2] H. Kambara, K. Yokota, T. Matsui, I. Ueda, T. Shishido, M. Wada, N. Kikugawa, Y. Maeno and H. Fukuyama: Preliminary scanning tunneling spectroscopy studies of Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>, Physica C 388-389, 503-504 (2003).
- [3] Y. Matsumoto, S. Murakawa, K. Honkura, C. Bäuerle, H. Kambara and Hiroshi Fukuyama: Experimental apparatus for heat capacity measurements of 2D <sup>3</sup>He in magnetic fields, Physica B 329-333, 146-147 (2003).
- [4] S. Murakawa, Y. Niimi, Y. Matsumoto, C. Bäuerle and Hiroshi Fukuyama: Characterization of ZYX graphite for studies of two-dimensional <sup>3</sup>He at ultra-low temperatures, Physica B 329-333, 144-145 (2003).
- [5] Hiroshi Fukuyama, K. Yawata, D. Ito, H. Ikegami and H. Ishimoto: A millikelvin temperature scale in high magnetic fields based on <sup>3</sup>He melting pressure, Physica B 329-333, 1560-1561 (2003).
- [6] R. Toda, T. Yamada, J. Taniguchi, T. Matsushita and N. Wada: Specific heat of <sup>4</sup>He film adsorbed on three-dimensional pores, Physica B 329-333, 282-283 (2003).
- [7] J. Taniguchi, H. Ikegami and N. Wada: Phonon velocity of <sup>4</sup>He bose fluid formed in one-dimensional 18 Å pores, Physica B 329-333, in press (2003).
- [8] Y. Yamato, H. Ikegami, T. Okuno, J. Taniguchi and N. Wada: Superfluidity of <sup>4</sup>He film adsorbed on 47 Å pores, Physica B 329-333, in press (2003).
- [9] F. Schopfer, C. Bäuerle, W. Rabaud and L. Saminadayar: Anomalous Temperature Dependence of the Dephasing Time in Mesoscopic Kondo Wires, Phys. Rev. Lett. **90**, 056801-1-4 (2003).
- (学位論文)
- [10] 宍戸大哲: 超低温走査トンネル顕微鏡の改良および その評価(修士論文)
- [11] 本蔵耕平:2次元固体ヘリウム3の磁場中比熱(修 土論文)

(著書)

[12] W. Rabaud, L. Saminadayar, D. Mailly, C. Bäuerle, K. Hasselbach, A. Benoît and B. Etienne: Persistent Currents in a network of connected mesoscopic rings, in "Toward The Controllable Quantum States", edited by Hideaki Takayanagi and Junsaku Nitta, World Scientific Publisher, p. 308, (2003). <学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [13] Hiroshi Fukuyama, H. Kambara, T. Matsui, T. Shishido and M. Takahashi: Development of a Scanning Tunneling Microscope for Low Temperature Experiments below 200 mK in Magnetic Fields, *ERATO Workshop "Mesoscopic Correlations in Nanostructures"* (Delft, Netherlands, July 26-27, 2002).
- [14] F. Schopfer, C. Bäuerle, W. Rabaud and L. Saminadayar: Phase coherence in mesoscopic Kondo wires, International Conference on Quantum Transport and Quantum Coherence (Sophia University, Tokyo, Japan, August 16-19, 2002).
- [15] T. Matsui, H. Kambara, I. Ueda, T. Shishido, Y. Miyatake and Hiroshi Fukuyama: Construction of an ultra-low temperature STM with a bottom loading mechanism, *The 23rd International Conference* on Low Temperature Physics (Hiroshima, Japan, August 20-27, 2002).
- [16] H. Kambara, K. Yokota, T. Matsui, I. Ueda, T. Shishido, M. Wada, N. Kikugawa, Y. Maeno and H. Fukuyama: Preliminary scanning tunneling spectroscopy studies of Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>, *The 23rd International Conference on Low Temperature Physics* (Hiroshima, Japan, August 20-27, 2002).
- [17] Y. Matsumoto, S. Murakawa, K. Honkura, C. Bäuerle, H. Kambara and Hiroshi Fukuyama: Experimental apparatus for heat capacity measurements of 2D <sup>3</sup>He in magnetic fields, *The 23rd International Conference on Low Temperature Physics* (Hiroshima, Japan, August 20-27, 2002).
- [18] S. Murakawa, Y. Niimi, Y. Matsumoto, K. Honkura, C. Bäuerle, H. Kambara and Hiroshi Fukuyama: NMR measurements of monolayer <sup>3</sup>He adsorbed on ZYX graphite, *The 23rd International Conference on Low Temperature Physics* (Hiroshima, Japan, August 20-27, 2002).
- [19] E. Collin, R. Harakaly, C. Bäuerle, Yu. M. Bunkov and H. Godfrin: 2D <sup>3</sup>He: From a pure spin-liquid phase to ferromagnetic clusters, *The 23rd International Conference on Low Temperature Physics* (Hiroshima, Japan, August 20-27, 2002).
- [20] J. Taniguchi, H. Ikegami and N. Wada: Phonon velocity of <sup>4</sup>He bose fluids formed in one-dimensional 18 Å-pores, *The 23rd International Conference on Low Temperature Physics* (Hiroshima, Japan, August 20-27, 2002).
- [21] R. Toda, T. Yamada, J. Taniguchi, T. Matsushita and N. Wada: Specific heat of <sup>4</sup>He film adsorbed on three-dimensional pores, *The 23rd International Conference on Low Temperature Physics* (Hiroshima, Japan, August 20-27, 2002).

- [22] Y. Yamato, H. Ikegami, T. Okuno, J. Taniguchi and N. Wada: Superfluidity of <sup>4</sup>He film adsorbed on 47 Å pores, *The 23rd International Conference* on Low Temperature Physics (Hiroshima, Japan, August 20-27, 2002).
- [23] Y. Niimi, S. Murakawa and Hiroshi Fukuyama: Characterization of ZYX grade exfoliated graphite for studies of two-dimensional <sup>3</sup>He at ultra-low temperatures, *International Symposium on Ultra Low Temperature Physics* (Kanazawa, Japan, August 28-31, 2002).
- [24] R. Toda, T. Yamada, J. Taniguchi, T. Matsushita and N. Wada: <sup>4</sup>He bose fluids adsorbed on threedimensional network of 27 Å pores, *International* Symposium on Ultra Low Temperature Physics (Kanazawa, Japan, August 28-31, 2002).
- [25] N. Wada, J. Taniguchi and H. Ikegami: True one-dimensional helium 4 fluids realized in FSM mesopores, *International Symposium on Ultra Low Temperature Physics* (Kanazawa, Japan, August 28-31, 2002).
- [26] J. Taniguchi, A. Yamaguchi, H. Ishimoto, H. Ikegami and N. Wada: Heat capacity of <sup>3</sup>He adsorbed on 18 Å and 28 Å pores, *International Symposium on Ultra Low Temperature Physics* (Kanazawa, Japan, August 28-31, 2002).

### 招待講演

- [27] Hiroshi Fukuyama: Frustrated Nuclear Magnetism and Competing Interactions in Solid <sup>3</sup>He, *Physics* of Frustration: From Protein to Pyrochlores, (Santa Fe, New Mexico, USA, June 19-22, 2002).
- [28] Hiroshi Fukuyama, K. Yawata, D. Ito, H. Ikegami and H. Ishimoto: A millikelvin temperature scale in high magnetic fields based on <sup>3</sup>He melting pressure, *The 23rd International Conference on Low Temperature Physics* (Hiroshima, Japan, August 20-27, 2002).
- [29] Hiroshi Fukuyama: Frustrated Nuclear Magnetism and Competing Interactions in Solid <sup>3</sup>He, International Symposium on Ultra Low Temperature Physics (Kanazawa, Japan, August 28-31, 2002).
- [30] T. Matsui, H. Kambara, I. Ueda, T. Shishido, M. Takahashi and Hiroshi Fukuyama: Construction of a new ultra-low temperature scanning tunneling microscope, *International Symposium on Ultra Low Temperature Physics* (Kanazawa, Japan, August 28-31, 2002).
- [31] M. Morishita, T. Takagi and Hiroshi Fukuyama: Nuclear spin heat capacities and adsorbed structures of submonolayer solid <sup>3</sup>He on graphite, *International Symposium on Ultra Low Temperature Physics* (Kanazawa, Japan, August 28-31, 2002).

(国内会議)

- [32] 神原 浩、松井朋裕、宍戸大哲、高橋祐丞、福山 寛: 超低温走査トンネル顕微鏡の開発研究 III、日本物理 学会 2002 年秋季大会(中部大学、2002 年 9 月)
- [33] 新見康洋、村川 智、神原 浩、福山 寛: 超低温 における 2 次元<sup>3</sup>He 研究のための新しい exfoliated graphite 吸着基盤の特性評価、日本物理学会 2002 年 秋季大会(中部大学、2002 年 9 月)
- [34] 谷口淳子、和田信雄、池上弘樹、山口 明、石本英彦: 孔径 28 Å 中<sup>3</sup>Heの比熱、日本物理学会 2002 年秋季 大会(中部大学、2002 年 9 月)
- [35] 戸田 亮、山田智也、谷口淳子、松下 琢、和田信 雄: 3次元的なつながりをもつメゾ多孔体中の<sup>4</sup>Heの 比熱 II、日本物理学会 2002 年秋季大会 (中部大学、 2002 年 9 月)
- [36] 村川 智、松本洋介、本蔵耕平、辻 太輔、新見康 洋、神原 浩、福山 寛: ZYX exfoliated graphite に吸着した 2 次元<sup>3</sup>He 流体の NMR 測定、日本物理 学会第 58 回年次大会 (東北大学、2003 年 3 月)
- [37] 松本洋介、村川 智、本蔵耕平、辻 太輔、神原 浩、福山 寛: グラファイト上に吸着した2次元固体 ヘリウム3の磁場中比熱II、日本物理学会第58回年 次大会(東北大学、2003年3月)
- [38] 松井朋裕、神原 浩、宍戸大哲、高橋祐丞、新見康 洋、福山 寛: 超低温走査トンネル顕微鏡の開発研究 IV、日本物理学会第 58 回年次大会 (東北大学、2003 年 3 月)
- [39] 新見康洋、松井朋裕、福山 寛: Exfoliated graphite 表面の STM 観測、日本物理学会第 58 回年次大会 (東 北大学、2003 年 3 月)
- [40] 谷口淳子、和田信雄、池上弘樹、山口 明、石本英 彦: 孔径 28 Å 中 <sup>4</sup>He 薄膜上に吸着させた <sup>3</sup>He の比 熱、日本物理学会第 58 回年次大会 (東北大学、2003 年 3 月)
- [41] 戸田 亮、山田智也、谷口淳子、松下 琢、和田信 雄: 3 次元的なつながりをもつメゾ多孔体中の<sup>4</sup>Heの 比熱 III、日本物理学会第 58 回年次大会 (東北大学、 2003 年 3 月)

(セミナー)

- [42] 福山 寛: 2 次元固体<sup>3</sup>Heの核磁性研究の現状、青山 学院大学理工学部物理学科コロキウム(青山学院大 学、2002 年 5 月 24 日)
- [43] 福山 寛: 超流動ヘリウムの相転移と位相欠陥、東京 大学理学部物理学教室「佐藤勝彦教授紫綬褒章受賞 記念」拡大談話会(東京大学、2002年6月14日)
- [44] C. Bäuerle: Persistent currents in a network of connected mesoscopic rings、理化学研究所低温物理研究室セミナー(理化学研究所、埼玉県和光市、2002年8月9日)

一般講演

# 4.7 岡本 研究室

本研究室では、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んでいる. 本年度は、3人の修士が誕生した.彼らは、本研究 室初めての修士である.研究室の立ち上げから苦労 をかけたが、今後の成長の糧となる貴重な体験をし てもらうことができたことと思う.

# 4.7.1 強相関 2 次元電子系

#### 量子固体相の磁性

2次元電子系において、クーロンエネルギーを最 低にするのは、ウィグナー結晶と呼ばれる電子の固 体状態である.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、 融解点近傍においては量子固体として興味深い振る 舞いが期待される.すなわち、格子点近傍に局在し た電子が量子効果によって大きく振動し、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.このような量子交換は、局在ス ピン間に相互作用をもたらすが、半導体2次元系の 量子固体状態においては、局在スピン間の距離が大きい(~10nm)ために、アハラノフ・ボーム効果に よってスピン間の交換相互作用を制御することが可 能になる.電子同士の交換経路に適当な磁束を導入 させることによって、スカラーカイラリティを持つ エキゾティックなスピン構造などの全く新しい磁性相 の発見が期待される.これまの研究は、Si-MOSFET に対して行われてきたが、シリコン2次元電子系で は、谷の自由度がスピン系の相転移をみづらくして いた.現在、我々は、谷縮重がない半導体2次元系 の量子固体相に対する研究に着手している.

2002年度は、<sup>3</sup>He-<sup>4</sup>He 希釈冷凍機を設置して、そこ に試料回転システムを組み込んだ.これにより100mK 以下までの極低温と強磁場、磁場方位を系統的に制 御した測定をすることが可能となった.また、年度 末より、GaAsの2次元正孔系の電界効果型トラン ジスター試料を用いた実験を開始した.まだ予備実 験の段階ではあるが、(1)絶縁体相での電気伝導の 温度特性はSi-MOS2次元系と同様に活性化型であ ること、(2)垂直磁場に対する抵抗の増減の振る舞 いはSi-MOS2次元系の場合とは異なっており、ス ピン相転移を観測した可能性があること、などの知 見が得られた.

# 金属相

電子移動度が高い Si-MOSFET 2次元電子系など において、温度の低下とともに電気抵抗率が急速に 減少する現象が観測されている.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リング理論から導 かれる従来の常識とは矛盾する現象であることなど



図 4.7 a: 走査型テラヘルツ光顕微鏡の概念図

### から、近年、大きく注目されている.

Detector

我々は、これまでスピン自由度に着目した研究を 行い、Si-MOSFET や Si/SiGe ヘテロ接合 2 次元系 試料を用いて、スピン偏極率と磁気抵抗効果の関係 を詳細に調べ、この異常金属相におけるスピン自由 度の重要性を明らかにしてきた.

2002 年度は、強相関系でありながら非常に移動度 の高い2次元系が得られる Si/SiGe ヘテロ接合試料 を用いて研究を行った.この型の試料では電子濃度 を減少させていくと電極抵抗が増大してしまう問題 があったため、オークミックコンタクトの改善に時 間を要した.年度末より、低温強磁場中での伝導測 定を開始することができたが、スピン偏極状態でも 金属的伝導が見られるなど、他の系とは異なる結果 が得られた.

# 4.7.2 走査型プローブ顕微鏡を用いた量子 ホール系電子輸送現象の研究

昨年度に引き続き、強磁場下2次元電子系におい て発現する量子ホール効果を対象に、従来とは異な る種の走査型プローブ顕微鏡を用いて、伝導体の局 所的な性質を探求する研究を行っている。具体的な 進展状況を以下に記す。

走査型テラヘルツ光顕微鏡による量子ホール効果破 綻領域の直接観測

我々は、以前に、独自に開発したテラヘルツ光の 高感度狭帯域検出器とソリッドイマージョンレンズ を組み合わせることで、低温下でも動作する走査型 テラヘルツ光顕微鏡を構築した(測定の概念図:図 4.7 a)。さらに、このシステムを量子ホール系に適 用することで、量子ホール効果が破綻した領域を直 接的に観測することに成功した。この以前の研究で は、試料として、図4.7 b(a)に描いたような標準的 なホールバーを用いていた。この試料を用いた測定



図 4.7 b: 図 4.7 a の測定で使用される試料。(a)標準的なホールバー (b) 電極の影響を排除したホールバー

では、電極と2次元電子系との接合部における電子 注入・抽出のメカニズムなど、伝導現象における重 要な知見を得ることができたが、空間的に不均一で 強度の強い分極電場の影響を受けるため、考察が複 雑になる嫌いがあった。そこで、均一なホール電場 下における電子の励起/緩和過程を解明するために、 図 4.7 b(b)に描いたような、電極の影響を排除した 試料を用いた研究を開始した。今年度は、クライオ スタットの製作に大半の時間を取られたが、年度末 には、システムが正常に作動することを確認できた。 来年度からは、本格的な測定を行い、励起電子の緩 和時間や散乱過程に関する情報を得ていきたいと考 えている。

ナノプローブによるゲート効果を利用した走査型電 位計の開発

前年度において、量子ホール系における静電ポテ ンシャル分布を観測するためのユニークな測定法を 開発した。前節の測定では、異なるランダウ準位間 の電子励起/緩和に関する情報しか得られない。しか し、ポテンシャル分布測定では、発生している全ての 電気抵抗の分布が分かるため、2つの測定結果を照 らし合わせることで、電子状態に関するより包括的 な情報を得ることが可能となる。図 4.7 c(a) に描い た測定の概念図から分かるように、ここでは、2次 元電子層間の静電結合を利用している。このシステ ムでは、これまでに約10μmの空間分解能が得ら れていた。ところが、この分解能はセンサー側の2次 元電子層の大きさで限定されてしまうため、これ以 上の大幅な向上が困難であった。そこで、今年度は、 この限界を突破するために、金属(タングステン)製 のナノプローブを組み込んだ、新たなシステムの構 築に取り組んだ(測定の概念図:図4.7 c(b))。この 方法では、2次元電子層ではなく、プローブの先で 真下の局所的なポテンシャルを検出するため、分解 能はプローブの先端径(0.5 µm)で決まる。そのた め、分解能の格段の向上が期待できる。図3(b)の セットアップによる測定で、実際にポテンシャルの



図 4.7 c: 走査型電位計の概念図。(a)前回の測定方法 (b) 今回新たに開発された測定方法。

検出信号が得られたことを示したが図4である。図 4上段は、信号の印加磁場依存性の実験結果である が、平行板コンデンサーのモデルに基づいた計算結 果(図4下段)とよく一致していることが分かる。こ の結果から、確かに、静電結合によりプローブの先 が局所的な静電ポテンシャルを感知し、その結果帯 電したプローブによるセンサーへのゲート効果を通 じて、最終的な信号がもたらされていると結論づけ られる。



図 4.7 d: 図 4.7 c(b)のシステムで測定された、センサーから検出された信号電圧の磁場依存性の実験 結果(上)とモデル計算(下)との比較。

# 4.7.3 InAs 表面反転層における電気伝導

InAsにおいては電子の有効質量が非常に小さいことから、多サブバンド状態の2次元系を比較的容易に形成することができる.多サブバンド状態の2次元系では、プラズモン機構による超伝導が期待される.

2002 年度は、基礎的な物性をおさえるため、MIS 型ホールバー試料を作成して、電子密度とサブバン ド状態および電子移動度との関連を明らかにした.第 ーサブバンドの有効質量が第二サブバンドの有効師 雨量と比べて3倍程度も大きいことなどが明らかに なった.また、磁気抵抗効果およびその角度依存性の 測定を行い、スピン軌道相互作用との関連を調べた.

<報文>

#### (原著論文)

- M. Ooya and T. Okamoto: Anomalous metallic phase and magnetism in a high-mobility and strongly correlated 2D electron system, to be published in Physica E.
- [2] Y. Kawano and S. Komiyama, Spatial distribution of non-equilibrium electrons in quantum Hall devices: Imaging via cyclotron emission, to be published in Physical Review B.
- [3] Y. Kawano and S. Komiyama: Cyclotron Radiation Imaging of Nonequilibrium Electrons in Quantum Hall Devices, Recent Research Developments in Physics 3 (2002) 129-153.

#### (会議抄録)

[4] Y. Kawano and T. Okamoto: Local electrometer using magnetoresistance oscillation of a twodimensional electron gas, Proceedings of the 15th international conference on High Magnetic Fields.

### (学位論文)

- [5] 宇都宮裕一:「希釈冷凍機中試料回転機構の製作と GaAs 2次元正孔系の電気伝導測定」(修士論文)
- [6] 大屋満明:「Si/SiGe ヘテロ接合試料における2次元 金属相の研究」(修士論文)
- [7] 辻幸秀:「InAs-半導体の二次元電子物性」(修士論文)
- <学術講演>

#### (国際会議)

## 一般講演

- [8] Y. Kawano and T. Okamoto: Local electrometer using magnetoresistance oscillation of a twodimensional electron gas, The 15th international conference on High Magnetic Fields, Oxford, UK, August 5 - 9, 2002.
- [9] M. Ooya and T. Okamoto: Anomalous metallic phase and magnetism in a high-mobility and strongly correlated 2D electron system, The 23rd International Conference on Low Temperature Physics, Hiroshima, Japan, August 20 - 27, 2002.

(国内会議)

一般講演

- [10] 河野行雄、岡本徹:量子ホール素子の磁気抵抗振動を 利用した静電ポテンシャル分布測定、日本物理学会 2002 年秋季大会、(中部大学、2002年9月)
- [11] 大屋満明、岡本徹: Si/SiGe ヘテロ構造試料における 2次元金属相とスピン自由度、日本物理学会第58 会年次大会、(東北大学、2003年3月)
- [12] 辻幸秀、粥川直人、岡本徹: InAs-MIS 反転層におけるサブバンド構造、日本物理学会第58会年次大会、(東北大学、2003年3月)

(セミナー)

[13] 岡本徹: 2次元系における金属・絶縁体転移、京都大 学物理学教室談話会(2002年11月)

(講義等)

 [14] 岡本徹:半導体2次元系の物理(京都大学大学院集中 講義)(2002年11月)

# 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、樽家 助手、長滝助手、および二十数名の大学院学生、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」、「超新星・高密度天体」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かに始まったかという 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 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生像を明かにする 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 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。現在そして近い将来において大量に 提供される宇宙論的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、宇宙論的光円錐効果などがあげら れる。更に最近は、太陽系外惑星探査の研究も開始 しつつある。

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 がいかに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。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。また近年、超新星爆発との関連が示唆さ れているガンマ線バーストや、ガンマ線バーストが つの候補天体となっている超高エネルギー宇宙線 についての研究も進めている。

# 5.1.1 初期宇宙·相対論

ブレーンワールド

近年、素粒子物理学の発展により、我々が高次元時 空中の四次元膜(ブレーンワールド)に存在する可 能性が盛んに議論されている。ブレーンワールドで は、余剰次元が現実に観測される可能性がある。相 対論・宇宙論の立場から、ブレーンワールドの検証 可能性について議論を行った。このモデルでは重力 だけが高次元時空中を伝播することができる。その ため、ブレイン上の重力場の振る舞いが、いかに標 準的な四次元相対性理論からずれるかを定量化する ことが重要になる。ブレイン上の重力場の振る舞い を知るためには、ブレインが存在する高次元時空全 体の解を構成しなくてはならない。しかし一般に高 次元時空の解を求めることは非常に困難である。ス トリング理論ではコンパクトな時空の境界にブレイ ンが存在するモデルが、標準模型をブレイン上で実 現するモデルとして注目されている。そこで、この モデルにおいて、近似的にバルクの重力場を解く方 法を提唱した [4, 6, 140]。バルクの曲率半径に比べ

て、ブレイン上の曲率半径が十分に長い場合や、ブレ イン間の距離が短い場合に、ブレイン上の有効的な アインシュタイン方程式を導き出すことに成功した。 この結果をもちいて、バルクのスカラー場や radion と呼ばれるブレイン間の距離がブレイン上の重力場 に及ぼす影響を調べた [2, 3, 39, 41, 168]。宇宙論 的にブレーンワールドを検証し、モデルに制限を与 える有力な手段に、密度揺らぎの性質を調べる方法 がある。宇宙背景輻射の温度揺らぎの観測に代表さ れる急速な観測の精密化は、宇宙論的な観測からブ レーンワールドモデルに強い制限を与える可能性を もたらしている。我々はブレーンワールドにおいて 初期密度揺らぎを生成するインフレーションモデル を構成し、初期揺らぎに与える余剰次元の影響を調 べた [5, 105, 141, 114]。また、この初期揺らぎの進 化を解析するのに不可欠な定式化を行い、近似的に バルクの重力場を解く手法を用いて、バルクの重力 場が宇宙背景輻射に及ぼす影響を定量化することを 試みた [40, 80, 113, 153, 167]。

# 5.1.2 観測的宇宙論

### 暗黒物質ハローに対する3軸不等楕円体モデル

宇宙のありとあらゆる天体形成の種となる暗黒物 質ハローに対して、数年前から普遍的密度プロファ イルという概念が提唱され、銀河の回転曲線、銀河 団の光度・温度関数、重力レンズ統計、銀河の2点・3 点相関など宇宙論の幅広い分野に大きなインパクト を与えている。しかしながら、従来のモデルは球対 称を仮定しており、さらに精度の高い研究をする上 での障害となっていた。我々は、国立天文台のスー パーコンピュータシステムを利用した系統的な数値 シミュレーションによって、暗黒物質ハローの非球 対称性の効果を検証した。それの結果、軸比を一定 とした3軸不等楕円体が極めて良い近似を与えるこ とを発見した。さらに、このモデルのもとで、密度 プロファイルや軸比の宇宙論的確率密度関数などの 重要な物理量に対して解析的な近似公式を与え、暗 黒物質ハローの非球対称性の効果をとりこむ方法論 を初めて開発した [7,96]。

## 3軸不等楕円体ハローにおけるガスの静水圧平衡解

上述の3軸不等楕円体ハローはあくまで暗黒物質 の分布に関するものである。したがって、それを観測 的に検証するためには、その中のガスの分布を理解 する必要がある。この目的のために、3軸不等楕円体 暗黒物質ハローのつくる重力ポテンシャルのもとで 静水圧平衡にあるガスの密度分布を摂動論によって 導いた[8,42]。現在、さらにこれを発展させて、非球 対称性の度合いが強い場合にも応用できるような解 析的近似公式を求めつつある。これらを用いること で、銀河団のX線・電波観測からその銀河団を支配 する暗黒物質ハローの非球対称性、さらには、それが 我々観測者に対してどのような角度をなしているか を推定することが出来ることが期待される。これは、 銀河団を用いてハップル定数等の宇宙論パラメータ を決定する際の精度を向上させるにとどまらず、宇 宙マイクロ波背景輻射とは独立に冷たい暗黒物質モ デル自身を検証する方法論ともなりうる [97, 98]。

## すばる望遠鏡を用いた太陽系外惑星探査

1995年に主星の速度変動の観測を通じて、初めて 主系列星の回りの惑星が発見されて以来、太陽系外 惑星は間接的に続々と検出され、現在 2003 年 4 月 には合計 107 個の太陽系外惑星が発見されている。 我々も、国立天文台、東京工業大学、宇宙科学研究所 のグループと共同で、日本における太陽系外惑星探 査の本格的な研究を立ち上げつつある。特に、我々 は、国立天文台およびプリンストン大学の研究者と 共同で、惑星食を起こしていることが知られている 系外惑星 HD209458bの主星からの光の反射光を検 出するプロジェクトを立案し、2002 年 10 月にすば る望遠鏡での観測を行った。そのデータは現在解析 中で結果は出ていないが、これを端緒として、わが 国独自の太陽系外惑星に関する観測的研究を立ち上 げて行くとともに、関連した観測的・理論的研究を 推進していく予定である [68, 169, 170, 171]。

#### 非加法的熱統計に基づく自己重力多体系の熱的性質

近年、熱統計物理の分野では、ボルツマンエント ロピーを用いた従来の理論形式を非加法的に拡張し、 熱平衡状態から離れた準平衡系の記述を試みようと する動きがある。こうした拡張の最大の狙いは、長 距離相互作用系のような通常の熱統計物理が適用で きない物理系へ、適用範囲を広げることにある。理 論の拡張が果たして無矛盾にできるのか、またそれ がどの程度意味があるものなのかについては、現在 活発に研究が行われており、非加法的エントロピー の一意性や起源について、形式的な議論から様々な ことがわかりつつある。しかし、問題の具体性に乏 しく、肝心の長距離系に対する考察は十分になされ ていない。そこで我々は、長距離相互作用系の典型である、自己重力多体系に着目し、非加法的熱統計の フレームワークで (準) 平衡状態の性質とその熱的安 定性について調べた。その結果、ポリトロープ指数 n という1-パラメータによって特徴づけられた「恒星 ポリトロープ」が、非加法的エントロピーの極値状 態として表され、熱的安定性も理論のフレームワー クの中で無矛盾に記述できることが明らかになった。 [9, 10, 144]

2体緩和のタイムスケールに現れる自己重力系の準 平衡状態

非加法的熱統計のフレームワークに基づくと、ポ リトロープ指数 n という 1-パラメータを持った「恒 星ポリトロープ」が、自己重力系の準平衡状態とし

て無矛盾に記述できる。ただし、こうした帰結は、静 的平衡性の仮定の下に導き出された結論であり、非 加法熱統計が現実の系を記述しうるかどうかについ ては、動力学的な考察が必要である。自己重力系の 準平衡状態の性質を探るため、我々は、断熱壁に閉 じ込めた有限孤立系のN体シミュレーションを行い、 2体緩和のタイムスケールで推移する状態変化について調べた。その結果、恒星ポリトロープは静的な 平衡状態ではなく、2体緩和のタイムスケールで徐々 に変化することがわかった。しかるに、その遷移過 程を調べると、恒星ポリトロープの系列に沿って状 態変化することがわかり、動的な意味での準平衡状 態になっていることが明らかになった。さらに、恒 星ポリトロープとは異なる一部の初期分布でも、2体 緩和のタイムスケールで恒星ポリトロープに落ち着 き、以後、その系列に沿って進化することがわかり、 恒星ポリトロープは準アトラクター的な状態である ことが示唆された。[11, 106, 115, 145]

質量密度ゆらぎの1点分布関数に現れる非ガウス性

ガウス的初期条件に基づく宇宙論的N体シミュレ-ションによると、非線形重力進化のせいで質量分布の 統計性はしだいに非ガウス的になり、高密度側に分 布の裾が広がっていく。こうした分布は初期スペクト ルに依らず、対数正規分布を用いて定量的に特徴づ けられることが、我々の近年の研究で明らかになった が、対数正規分布の現れる理由についてはっきりとし た説明がなかった。今回、我々は、Press-Schechter 理論を基に、自己重力ハローの密度プロファイルの 普遍性を仮定し、質量密度ゆらぎの1点分布関数に 現れる非ガウス性の簡単な解析的モデルを構築した。 解析的モデルの考察から、1点分布関数の対数正規性 は、初期スペクトルにほぼ依らず、ハローの密度プ ロファイルに起因して現れることがわかった。こう した帰結は、見えないダークマター分布に対するも のだが、いくつかの観測事実を組み合わせると、銀 河分布も対数正規分布に従うことが、この解析から 説明できる。[12,81,82,146]

酸素の輝線を用いた宇宙の暗黒バリオン検出可能性

我々の宇宙で現在までに観測できるバリオンの質 量密度は、ビッグバン元素合成理論や宇宙背景放射 の観測が予言する値のおよそ20-30%ほどしかない. 残りの未だに観測されていないバリオン(暗黒バリオ ン)の大部分は、銀河団の周縁部や大規模構造のフィ ラメント部分に存在する温度が10<sup>5</sup>Kから10<sup>7</sup>Kの Warm-Hot Intergalactic Medium(WHIM)と呼ばれ るガスであると考えられている、WHIM 自身が出す 放射は極めて小さいため遠方のクェーサーのスペク トル中に吸収線として観測される以外には観測方法 がなかったが、我々は宇宙論的流体シミュレーショ ンを用いてこれらを酸素の輝線を用いて直接観測す る可能性について研究を行った.その結果、数年後 に実現される数 eVのエネルギー分解能を持つX線 分光器と 4 回反射の X 線望遠鏡を用いれば,温度が 10<sup>6</sup>K から 10<sup>7</sup>K の間にある WHIM については直接 観測可能であることを示した.

## 銀河の速度統計に於ける空間的・力学的バイアス

銀河の速度場は宇宙のダークマターの分布を知る ための重要な情報として長く使われてきたが,これ らの研究では銀河の速度が背後にあるダークマター の運動を正確に反映しているという仮定がなされて いた.我々は宇宙論的な銀河形成シミュレーション を用いて,これまで行われてきた銀河の速度を用い た解析が,銀河の空間的・力学的バイアスからどの ような影響を受けるかを調べた.

銀河の様々な速度統計の中で Pairwise Velocity Dispersion (PVD) と POTENT 解析を考える.観 測される銀河の PVD は CDM から予想されるダー クマターの PVD よりもかなり小さいことが知られ ている.数値計算で得られた銀河の PVD もダーク マターの PVD よりも小さくこれまでの観測を確認 した.更に,銀河とダークマターの PVD の違いは 銀河とダークマターの空間分布の違いに起因するも のであることが分かった.また,銀河の中でも最近 形成された晩期型銀河の PVD は,銀河間距離が小 さい領域で銀河全体の PVD の半分程度であること が分かった.この傾向は,PSCz銀河カタログから 求めた PVD でも確かめられていたものである.詳 しい解析から晩期型銀河の PVD には力学摩擦によ る影響が大きく作用していることが分かった.

一方,POTENT 解析は近傍宇宙のダークマター分 布を調べるのに使われてきた手法である.数値計算 で得られた銀河の速度場からダークマターの分布が 正しく再現できるかを調べたところ,8h<sup>-1</sup>Mpc以下 のスケールでは,銀河の空間的なバイアスの影響が 無視できない上に晩期型銀河だけを用いたPOTENT 解析では力学的なバイアスの影響が大きいことが分 かった.[14]

準解析的銀河形成モデルにおけるダークハロー形成 史モデルの影響

Kauffmann et al. (1993) などによって考案され た準解析的銀河形成モデルは,様々なスケールでの 銀河形成の諸問題へのアプローチを可能にした.し かし,このモデルは,ダークハローの形成史モデル に大きく依存する.そこで,Somerville and Kolatt (1999)のダークハロー形成史モデルを用い,様々な 条件(特に様々な時間間隔)の下で,ダークハロー形 成史を構築し,その平均的振舞いを理論予言と比較 した.その結果,理論予言を実現するためには,従 来用いられてきた時間間隔の10分の1程度の値を用 いる必要があることが分かった.また,この値を用 いて,ガスの冷却量を調べると,銀河団スケールで は従来より2倍ほど大きくなることが分かった[16]. 銀河団の質量・温度関係と非重力的加熱機構

銀河団から放射されている X 線はダークハロー 中に閉じ込められている高温ガスに由来すると考え られている.我々は,ダークハローは Navarro et al. (1996) で示されたようなユニバーサルな密度分布を持 つこと,および,高温ガスは等温で,ダークハローに よる重力と静水圧平衡にあるという仮定の下で,高温 ガスからのX線光度をダークハローの質量の関数とし て求めた.そして,銀河団のX線光度・温度関係,およ び,X線温度関数のそれぞれについて,観測結果を再 現するような質量・温度関係を求めた.その結果,(1)  $T_{\rm gas} = (1.5 \sim 2.0) \text{ keV} (M_{\rm vir}/10^{14} h_{70}^{-1} M_{\odot})^{0.50 \sim 0.55}$ 程度の関係が満たされれば , 両方の観測を同時に説 明できること,および,(2)自己相似モデルで予言 される質量・温度関係  $(T_{
m gas} \propto M_{
m vir}^{2/3})$  は観測を再現しないことが分かった.これらの結果は,銀河団内 の高温ガスは,ダークハロー形成に由来する重力的 な加熱のみでなく,星形成などに由来する非重力的 な加熱の影響が重要であることを示唆している.ま た,観測を再現する質量・温度関係は,ACDM モデ  $\boldsymbol{\mathcal{W}}\left(\Omega_{0}=0.3\text{ ,}\lambda_{0}=0.7\text{ ,}h_{70}=1
ight)$ の下で,密度ゆら ぎの振幅 σ<sub>8</sub> が 0.7-0.8 程度であることを示唆してい ることが分かった[17,129].

SDSS 銀河 2 点相関関数の形態・光度依存性とバイ アスパラメータの推定

銀河は多様な個性を持っている。これらの個性が どうやって形成されたのかを知るには、銀河の性質 毎の空間分布の傾向を知ることが一つの手がかりと なるであろう。我々は SDSS による世界最大の銀河 カタログを用いて、様々な銀河の性質毎の2点相関 解析を行った。特に形態と絶対光度依存性に注目し、 得られた 2 点相関関数を宇宙論的 N 体シミュレー ションと比較してバイアスパラメータの推定を行っ た。その結果、早期型銀河の方が晩期型銀河よりも 大きなバイアスパラメータ持つものの、両者ともに  $0.4 \sim 5 Mpc/h$ にわたって各々ほぼ定数であること が見つけ出された。また、絶対光度が大きいと形態 依存性が消滅したり、早期型の絶対光度依存性は晩 期型に比べて弱いことがわかったりするなど、形態 と銀河進化の過程を垣間見ることが可能になりつつ ある。

# SDSS 銀河 3 点相関関数

大規模構造を作る最大の要因-重力-は、非線型性、 非局所性を大きな特徴とする。これらの性質により、 たとえ初期密度ゆらぎがガウシアンランダム統計に 従うとしても、時間が経つにつれ非ガウス性が顕著 になってくる。つまり非ガウス性には重力による構 造進化の本質的情報が含まれているのであって、そ れを検出するには本質的に3点以上の統計量が必要 となるのである。そこで SDSS 銀河カタログを用い て3点相関解析を行った。これまでの3点相関解析 から、3 点相関関数が2 点相関関数の簡単な比になっ ているではないかという仮説が提唱されていたが、 SDSS のデータにおいてもこれが成り立っているこ とを確認した。しかも驚くべきことにこの比が銀河 の形態や絶対光度、3 角形の形状などにあまり依存 しないことも新たに見出された [84, 130]。一方理論 モデル予言やシミュレーションではこの仮説が成り 立たないことが指摘されており、この食い違いの意 味するところをさらに探求している。

### 暗黒物質ハローの速度分散

暗黒物質ハローの速度分散をモデル化するには、 大域的な密度を表す密度パラメータΩ<sub>0</sub>よりも、そ のハローの位置での局所的な密度パラーメータを用 いたほうが的確であることを具体的に示した。

### ハローモデルに基づく暗黒物質の速度分布関数の導出

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り、相対特 異速度分布関数は宇宙の大構造における重要な統計 量である。過去にアインシュタイン-ドジッター宇宙 の仮定と暗黒ハローの密度プロファイルが等温球で あるという仮定をする簡単な場合について解析がな されていた。我々はいろいろな宇宙モデルにおいて、 ハローの密度プロファイルにはシミュレーションな どから示されている現実的なパラメータを用い、ハ ローモデルという仮定のみに基づいて暗黒物質の準 指数関数型速度分布関数を導出し、宇宙モデル依存 性やスケール依存性を調べた。また、適当な密度バ イアスを仮定することで銀河の速度分散を導出し、 観測との比較を行うことで未知の速度バイアスの存 在の可能性を示した。[18]

野辺山 45m 電波望遠鏡を用いた銀河団スニャーエ フ・ゼルドビッチ効果のマッピング観測

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) は銀河団を通過 すると、銀河団中の高温プラズマにより逆コンプト ン散乱を受け、スペクトル変形が起こる。この現象 をスニャーエフ・ゼルドビッチ (SZ) 効果と言い、結 果として CMB はミリ波領域では暗く、サブミリ波 領域では明るくなる。SZ 効果から、銀河団や宇宙論 に関する重要な帰結を引き出すことが出来るが、SZ 効果の信号は微弱であるため、今までの観測は SZ 効 果自体の有無を確認するに留まっていた。しかし近 年のミリ波観測技術の進歩により、銀河団を SZ 効果 でマッピング観測出来る段階になり、電波は光学・X 線に続く、銀河団を見る第三の目として確立しつつ ある。我々は銀河団・宇宙論の理論予言を最新の観 測結果と比較する為、野辺山 45m 電波望遠鏡の長期 共同利用を用いてミリ波帯における銀河団のマッピング観測を行った。[47]

SDSS 銀河データを用いた宇宙大構造のトポロジー 解析

現在進行中の世界最大規模の赤方偏移サーベイ計 画である、スローンデジタルスカイサーベイ (SDSS) の初期データを使って、銀河3次元分布のトポロジ カルな性質を、ジーナス統計を用いて定量的に評価 した。解析的に考慮することが困難ないくつかの観 測的影響、すなわち、データ領域の形状、銀河の固有 速度、我々からの距離が遠くなるほど明るい銀河だ けが選択的に観測される効果、を、N体シミュレ-ションを使って詳細に解析した上で、観測結果と比較 した。その結果、現段階で最も支持されている宇宙 モデルが、10~30 光年のスケールにわたって、ジー ナス統計の観測結果を矛盾なく説明できることを示 した。また、SDSS 観測が進展するにつれ、構造形 成の過程で生じるランダムガウス統計的性質からの ずれを、他の統計量とは独立に制限できる可能性を 示した。[19]

暗黒ハロー内の銀河形成とその重力レンズ統計への 示唆

暗黒ハロー内の物質分布は銀河形成によってより 中心集中すると期待されるので、重力レンズ統計に も多大な影響を与える。そこで我々は銀河形成の簡 単な模型を用いて、銀河光度関数と重力レンズの分 離角分布から模型変数に制限を与えた。その結果、模 型変数間に強い縮退が残ったが、暗黒ハローレンズ と銀河レンズの比を新たに考えることで、この縮退 が解けうることを示した。また、逆に銀河形成模型 を固定することで暗黒ハローの質量中心集中度を決 定できることも分かった [22, 49, 85, 123]。

#### 遠方超新星の重力レンズ効果

遠方超新星の重力レンズは、突発現象であること と、Ia型の場合標準光源であることの二点に於いて 従来の準星レンズと大きく異なる。我々はこの特徴 を考慮した解析、特に時間の遅れによる重力レンズ 確率の減少の定式化や像の出現時刻の予言を行った [23,147]。さらに、標準光源の特性を利用して、時 間の遅れからハップル定数を求める際のレンズ天体 の質量分布との縮退を破る方法を提唱した [24,86, 147,131,176]。

2dF サーヴェイの大分離角重力レンズ統計

最近 2dF サーヴェイの約二万個の準星の中に、30 秒以上の大分離角の重力レンズらしきものが 6 個発 見されたと報告された。我々は現在の構造形成理論 の標準模型である CDM 模型に基づいて予想される 重力レンズの数を理論的に計算した。その結果、理 論予言は標準的な模型変数を仮定する限りに於いて 観測された数を説明するには少なすぎることを示し た [25, 116]。

局所近似モデルに基づく質量密度ゆらぎの1点分布 関数の重力進化

大規模構造の統計的性質を考える上で、1 点確率 分布関数 (Probability Distribution Function, PDF) は最も基本的な量である。この PDF を理論的に予言 する方法の一つに、球対称モデルを用いた計算方法 があり、初期ゆらぎが CDM の場合 N 体シミュレ ションと良く一致することが知られている。この方 法では、密度ゆらぎの進化は1変数のみで記述され、 初期ゆらぎと発展後の密度は一対一対応する。しか るに近年の我々の研究で、初期ゆらぎと進化後の密 度の対応を、N体シミュレーションで調べると、実 際は一対一対応からはほど遠いことがわかってきた。 物理的状況をよりよく説明するモデルとして、我々 は、球対称モデルを拡張、密度ゆらぎの進化が多変 数の力学的自由度で記述される場合に PDF の理論 的構築を試み、さらに様々な初期スペクトルにおい て、 N 体シミュレーションと理論モデルとの比較を 行なった。その結果、変数が1つの球対称モデルだ と、初期スペクトルに依ってはシミュレーションと の一致が悪くても、変数を3つに拡張した楕円体モ デルを用いると、非線形領域の PDF をよく再現で きることがわかった。[26, 124, 76]

## 5.1.3 超新星·高密度天体

ガンマ線バースト天体に於ける爆発的元素合成

謎の天体といわれるガンマ線バーストは、近年の観 測によりブラックホール形成を伴う超新星爆発に付随 して引き起こされる現象と推測されだしている。しか も fireball を形成するためにその爆発はジェット的で なくてはならないとの指摘もされている。そこで我々 は上記のシナリオにもとづきながら爆発的元素合成の 計算を行ない、通常の超新星爆発とガンマ線バースト を生ずる超新星爆発に於いて、爆発的元素合成に違い があるのかを定量的に評価した。結果として、元素合 成の生成物質の化学組成はガンマ線バーストを引き起 こす中心天体の爆発のタイムスケールに非常に敏感で あることが明らかとなり、通常の超新星爆発とは生成 物に大きな違いが出ると結論された。特に<sup>56</sup>Niなどの 放射性不安定原子核の量が爆発のタイムスケールに敏 感なことから、逆にガンマ線バーストの持続時間と超 新星の光度には相関があるであろうとの理論的予言も 与えられた。[52, 53, 54, 156, 149, 150, 132, 157, 183]

ガンマ線バースト背景ニュートリノ

ガンマ線バーストは、fire ball モデルを仮定すれ ば観測される多くの現象をうまく説明することが知 られているが、その爆発エネルギーがどの程度であ るかということについては未だにオーダーの不定性 がある。特に、fire ballのエネルギーについては光 学的な観測から推定が出来るとしても、fire ball と なる部分以外の爆発エネルギー、例えば barvon に どの程度のエネルギーが分配されているのかという ことについては観測的な手掛かりがなく、それが候 補天体ならびに爆発メカニズムをあいまいなままに している一因となっている。今回、ガンマ線バース トに付随して放出されるニュートリノに着目し、そ れが現在の宇宙をどの程度満たしているのかという ことを観測することによって、ガンマ線バーストの 平均的な爆発エネルギーが推定出来ることを示し、 Super-Kamiokande などでの観測可能性について議 論を行った。[27, 28, 52, 88, 156, 158, 157]

高速回転している中性子星と伴星からくる TeV ニ ュートリノ

高速回転している中性子星は高エネルギー宇宙線 の起源の一つの候補として考えられている。そのよ うな高速回転する中性子星が伴星を伴っている場合、 伴星がターゲットとなって宇宙線陽子の衝突を通し て高エネルギーニュートリノが多量に生成される可 能性があると今回指摘し、そのような系からのニュー トリノフラックスを評価した。結果として、IceCube のようなキロメートル規模の高エネルギーニュート リノ検出器が完成すれば、シグナルを検出出来る可 能性があると結論された。[107, 125]

量子分子動力学法による「パスタ相」の微視的研究

中性子星は、様々な天体現象のサイトとして極めて 重要な天体であるが、それと同時に、内部は地上の実 験室よりも遥かに高密度かつ中性子過剰な状況にあ るため、地球上の物質とは全く異なった相を示す可能 性がある。特に興味深いことに、標準核密度以下の高 密度天体内部物質においては、非常にエキゾチックな 構造を持った核(パスタ相)の存在が静的かつ巨視的 なモデル等から予言されている。我々は、量子分子動 力学法(QMD)という核の形状を仮定しない動的か つ核子レベルのミクロスコピックなモデルを用いた 研究により、実際に動的なプロセスを通してパスタ相 が形成され得るかを調べた結果、静的かつマクロス コピックなモデルが予言するところの、板状や棒状等 の核から成る物質を再現することに成功すると共に、 温度ゼロにおける相図を得た。我々の結果は、以前か ら知られていた単純な対称性を持った相のみならず それらの相が現れる密度の間では、複雑な構造をし た中間的な相の存在も示唆しており、この様な相は 負のオイラー数を持った構造として特徴づけられる ことを指摘した。現在は、中性子過剰及び有限温度の 状況についての研究に着手しており、標準核密度以 下での物質の構造について密度、温度依存性をも含 めた統一的な描像を提示することを目標としている。 [29, 56, 58, 59, 73, 74, 89, 90, 108, 159, 185, 184]

#### 「パスタ相」における電子遮蔽効果

我々は、QMD という核子レベルかつ動的な手法 を用いて、核の形状を全く仮定することなくパスタ 相が発現することを示したが、これを含めたかつて のパスタ相についての研究の多くが、相対論的縮態 電子ガスを一様な背景として扱っており、また、電 子密度分布を考慮したものでも、電子遮蔽効果その ものが相図にどのような影響を及ぼすかを議論した ものはなかった。このような状況を受けて本研究で は、電子遮蔽効果を取り入れた場合とそうでない場 合の結果を比較し、遮蔽効果が標準核密度近傍の相 図に及ぼす影響を議論した。その結果、電子遮蔽の 効果は中性子星物質、超新星物質いずれの場合でも 小さく、我々が QMD の研究によって得た結果の大 筋は電子遮蔽の効果によって変更を受けないことが 分かった。また、完全遮蔽の極限から予想される傾 向とは逆に、パスタ相の領域は広がることを示した。 [74, 118]

#### 超新星コアに於ける非球対称なニュートリノ放射

重力崩壊型超新星爆発の dynamics を明らかにす るため、回転を考慮にいれた超新星爆発の数値計算 を行った。その結果、 neutino sphere が遠心力の効 果で偏平になり、従って、neutino sphere の温度は回 転軸方向に近付くにつれて高くなり、極方向の物質を 良く温めることが分かった (Kotake et al. submitted to ApJ)。これらの結果は、爆発が jet 状になること を示唆している (Shimizu et al.01)。この jet 状爆 発は観測とも一致する。従って、回転を考慮に入れ ることが爆発の決め手になるばかりでなく、観測を 説明する必要上、不可欠なことが分かる。今後の課 題は、現状の簡単化された neutrino 輸送を多次元に して、更に詳しく回転の爆発に及ぼす効果に就いて 調べることである (Kotake et al. in preparation)。 [91, 109, 151, 160]

超新星ニュートリノにおけるニュートリノ振動

われわれはニュートリノ振動が超新星ニュートリ ノに与える影響の系統的な研究を行なってきた。研 究の枠組みとしては、現実的な数値モデルに基づい た初期条件(ニュートリノスペクトル・星の構造)を 用いた、3世代ニュートリノ振動の数値的解析であ る。地球の物質効果を考慮し、これを詳細に解析し てそのスペクトルを理論モデルと比較することによ り、ニュートリノの質量2乗差をよい精度で決定で きる可能性を指摘した。[30, 92, 93, 110] さらにこれ までその影響が無視されてきた衝撃波伝搬の効果が 一般には無視できず、これにより観測されるニュート リノの平均エネルギーが 10%ほど下がることわかっ た。[133]

ニュートリノによる超新星方向の決定精度

超新星爆発が起こった場合、ニュートリノは光よ りも数時間早く地球に到達する。このため、ニュー トリノの情報だけから超新星爆発の方向を決定する ことは、光による初期相の観測を可能にするため、 大変重要である。超新星爆発が、我々の銀河内で起 こった場合、Super-Kamiokandeによる観測からど の程度の精度で方向を決定できるかを Monte Carlo simulationを用いて見積もった。その結果、9度程度 で決定できることを示した。[31, 60]

超新星背景ニュートリノ

過去の全ての超新星爆発から放出されたニュート リノは、diffuse なバックグラウンドを形成している と考えられている。この超新星背景ニュートリノの 検出可能性を、現実的なニュートリノ振動モデル、超 新星モデルを適用して考察した。更に過去の超新星 の形成率としては、HST などの観測に基づいたモデ ルを用い、検出のバックグラウンドとなるイベントに ついても充分な考察を行なった。その結果、現在の検 出器では、10年程度の時間をかければ検出が可能で あることを示した。[32, 61, 75, 94, 95, 161, 111, 126] また、最近 Super-Kamiokande グループが、超新 ニュートリノのフラックスに対して非常に厳 星背景: しい上限値を発表した。我々はそれにともない、よ り精密な計算を inverted mass hierarchy も含んださ まざまなニュートリノ振動モデルに適用し、それぞ れのモデルに対するフラックスの上限値の再評価を 行なった。[34, 75, 95, 161, 134]

超新星ニュートリノの Resonant Spin-Flavor Conversion とニュートリノの磁気モーメント

ニュートリノが有限の磁気モーメントを持った場合 に、磁場との相互作用で起こるResonant Spin-Flavor (RSF) Conversion の調査を3世代超新星ニュートリ ノの場合について初めて行なった。RSF 効果は従来 良く調べられてきた通常の物質振動(MSW 効果)と は異なり、ニュートリノと反ニュートリノの間の遷移 を引き起こすという特徴がある。我々はまず、RSF 効果を定性的に理解するために新たな level crossing diagramを提唱し、RSFと MSW の二つの効果が複雑 に絡み合うという描像を示した。更に3世代6要素を 持つ Schrödinger 方程式を数値的に解くことにより、 ニュートリノの遷移確率を求め、Super-Kamiokande や SNO での期待されるスペクトルを求めた。その 結果、もしニュートリノが現在観測で得られている 上限値に近いくらいの大きな磁気モーメントを持ち、 なおかつ超新星中の磁場が充分に大きな場合には、 統計的に有意な信号が得られることを定量的に示し た。[33, 35, 75, 152, 120]

SDSS 銀河データを用いた超高エネルギー宇宙線ソース個数密度の正確な見積り

我々は,宇宙における物質分布を反映するものとして,オプティカルレッドシフトサーベイ(ORS) 銀河データを超高エネルギー宇宙線のソースモデル として採用している.[37,38]しかし,宇宙線のエ ネルギースペクトルや到来方向を計算するには,フ ラックスリミットによる遠方銀河の欠落の補正を正 確に行なう必要がある.そこで,ORSと,それより 遠くを見渡すことのできるスローンデジタルスカイ サーベイ(SDSS)とで,銀河数の比較を距離の関数と して行い,両者の違いを調べた.結果として,ORS は我々から100Mpc程度の距離で,SDSSより二倍程 度銀河数を過大評価していることがわかり,このず れを埋め合わせるように,ORSのセレクションファ ンクションを補正した.[36]

#### 超高エネルギー宇宙線の伝搬

超高エネルギー宇宙線の起源を探る上で,その到来 方向分布が重要なてがかりとなり得る.我々は,宇宙 線起源の一つのシナリオであるボトムアップシナリオ に基づいて, 宇宙線伝搬の Monte Carlo 計算による 数値データをもとに,超高エネルギー宇宙線の到来方 向を計算し観測との比較を行なった。まず, AGASA 観測で得られているイベントのクラスターを説明す るには,銀河系外の磁場が通常仮定されている値より 小さい(B < 1 nG)状況が良いことがわかった.また もう一つの観測事実である到来方向の等方性と合わ , ソースの個数密度は  $10^{-6} \mathrm{Mpc}^{-3}$  程度であると せ 初めて制限をつけた.[37,77,112,127,121,162,186] さらに,上記の AGASA 観測を説明できるソース 分布を用い, Auger 計画などの将来観測で予想され る宇宙線到来方向の予言を行ない,データ数の向上 により宇宙線の起源により深く迫れる可能性を示し た.[38]

## 5.1.4 その他

長滝 重博が9月1日付で助手に着任した。

<受賞>

[1] 佐藤勝彦 紫綬褒章 2002 年 4 月受章

<報文>

## (原著論文)

[2] Kazuya Koyama: Radion and Large Scale Anisotropy on the Brane; Physical Review D66 (2002) 084003.

- [3] Shinpei Kobayashi and Kazuya Koyama: Cosmology with Radion and Bulk Scalar Field in Two Branes Model; Journal of High Energy Physics 012 (2002) 056.
- [4] Testuya Shiromizu and Kazuya Koyama: Low energy effective theory for a two branes system: Covariant curvature formulation; Physical Review D67 (2003) 084022.
- [5] Kazuya Koyama and Keitaro Takahashi: Primordial fluctuations in bulk inflaton model; Physical Review D (2003), in press.
- [6] Tetsuya Shiromizu, Kazuya Koyama and Keitaro Takahashi: Effective theory for close limit of two branes; Physical Review D (2003), in press.
- [7] Y.P. Jing & Yasushi Suto: Triaxial Modeling of Halo Density Profiles with High-resolution N-body Simulations; The Astrophysical Journal 574(2002)538-553 (astro-ph/0202064).
- [8] Jounghun Lee & Yasushi Suto: Modeling Intra-Cluster Gas in Triaxial Dark Halos: An Analytic Approach; The Astrophysical Journal 585(2003)151-160 (astro-ph/0211007).
- [9] Atsushi Taruya, and Masa-aki Sakagami: Gravothermal Catastrophe and Tsallis' Generalized Entropy of Self-Gravitating Systems II. Thermodynamic Properties of Stellar Polytrope; Physica A **318** (2003) 387-413 (cond-mat/0204315).
- [10] Atsushi Taruya, and Masa-aki Sakagami: Gravothermal Catastrophe and Tsallis' Generalized Entropy of Self-Gravitating Systems III. Quasi-Equilibrium Structure using Normalized q-values; Physica A **322** (2003) 285-312 (cond-mat/0211305).
- [11] Atsushi Taruya, and Masa-aki Sakagami: Longterm Evolution of Stellar Self-Gravitating System away from the Thermal Equilibrium: Connection with Non-Extensive Statistics; Physical Review Letters (2003), in press (astro-ph/0303415).
- [12] Atsushi Taruya, Takashi Hamana, and Issha Kayo: Non-Gaussian tails of cosmological density distribution function from dark halo approach; Monthly Notice of the Royal Astronomical Society **339** (2003) 495-504 (astro-ph/0210507).
- [13] Tsutomu, T. Takeuchi, Kohji Yoshikawa, Takako, T. Ishii: The Luminosity Function of IRAS Point Source Catalog Redshift Survey Galaxies; The Astrophysical Journal 587(2003)L89
- [14] Kohji Yoshikawa, Y.P. Jing & Gerhard Börner: Spatial and Dynamical Biases in Velocity Statistics of Galaxies; The Astrophysical Journal (2003) in press
- [15] Tamon Suwa, Asao Habe, Kohji Yoshikawa, Takashi Okamoto:Cluster Morphologies as a Test of Different Cosmological Models;The Astrophysical Journal (2003) in press

- [16] Mamoru Shimizu, Tetsu Kitayama, Shin Sasaki, and Yasushi Suto: Reliability of merger tree realizations of dark halos in the Monte-Carlo modeling of galaxy formation; Publications of the Astronomical Society of Japan, 54 (2002) 645 (astro-ph/0207230).
- [17] Mamoru Shimizu, Tetsu Kitayama, Shin Sasaki, and Yasushi Suto: Mass-temperature relation of galaxy clusters: implications from the observed luminosity-temperature relation and X-ray temperature function; The Astrophysical Journal 590 (2003) June 10 issue, in press (astro-ph/0212284).
- [18] T. Kuwabara, A. Taruya, & Y. Suto: Modeling a Pairwise Peculiar Velocity Distribution Fucntion of Dark Matter from Halo Density Profiles; Publications of the Astronomical Society of Japan 54(2002) 503-513
- [19] Chiaki Hikage, Yasushi Suto, Issha Kayo, Atsushi Taruya, Takahiko Matsubara, Michael S. Vogeley, Fiona Hoyle, J.Richard Gott III, Jon Brinkmann, & the SDSS collaboration: Three-Dimensional Genus Statistics of Galaxies in the SDSS Early Data Release; Publ. Astron. Soc. Japan 54 (2002) 707-717
- [20] Chiaki Hikage, Atsushi Taruya, & Yasushi Suto: Biasing and Genus Statistics of Dark Matter Halos in the Hubble Volume Simulations; Publ. Astron. Soc. Japan 55 (2003) 335-344
- [21] Masamune Oguri: Systematic Effects on Tangential and Radial Arc Statistics: The Finite Source Size and Ellipticities of the Lens and Source; The Astrophysical Journal, **573** (2002) 51-59 (astro-ph/0203142).
- [22] Masamune Oguri: Constraints on the Baryonic Compression and Implications for the Fraction of Dark Halo Lenses; The Astrophysical Journal 580 (2002) 2-11 (astro-ph/0207520).
- [23] Masamune Oguri, Yasushi Suto, & Edwin L. Turner: Gravitational Lensing Magnification and Time Delay Statistics for Distant Supernovae; The Astrophysical Journal 583 (2003) 584-593 (astro-ph/0210107).
- [24] Masamune Oguri & Yozo Kawano: Gravitational Lens Time Delays for Distant Supernovae: Breaking the Degeneracy between Radial Mass Profiles and the Hubble Constant; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **338** (2003) L25-L29 (astro-ph/0211499).
- [25] Masamune Oguri: How Many Arcminute-Separation Lenses Are Expected in the 2dF QSO Survey?; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **339** (2003) L23-L27 (astroph/0211196).
- [26] Yasuhiro Ohta, Issha Kayo, and Atsushi Taruya: Evolution of Cosmological Density Distribution Function From the Local Collapse Model; The Astrophysical Journal 589 May 20 issue, in press.

- [27] Shigehiro Nagataki and Kazunori Kohri: Features of Neutrino Signals from Collapsars; Progress of Theoretical Physics, **108** (2002) 789.
- [28] Shigehiro Nagataki, Kazunori Kohri, Shin'ichiro Ando, and Katsuhiko Sato: Gamma-ray burst neutrino background and star formation history in the universe; Astroparticle Physics, 18 (2003) 551.
- [29] Gentaro Watanabe, Katsuhiko Sato, Kenji Yasuoka and Toshikazu Ebisuzaki: Microscopic study of slablike and rodlike nuclei: Quantum molecular dynamics approach, Phys. Rev. C 66, 012801(R) (2002).
- [30] Keitaro Takahashi, Katsuhiko Sato: Earth effects on supernova neutrinos and their implications for neutrino parameters; Phys. Rev. D, 66 (2002) 033006.
- [31] Shin'ichiro Ando and Katsuhiko Sato: Determining the Supernova Direction by Its Neutrinos, Prog. Theor. Phys. **107** (2002) 957.
- [32] Shin'ichiro Ando, Katsuhiko Sato and Tomonori Totani: Detectability of the supernova relic neutrinos and neutrino oscillation, Astropart. Phys. 18 (2003) 307.
- [33] Shin'ichiro Ando and Katsuhiko Sato: Threegeneration study of neutrino spin-flavor conversion in supernovae and implication for the neutrino magnetic moment, Phys. Rev. D 67 (2003) 023004.
- [34] Shin'ichiro Ando and Katsuhiko Sato: Supernova relic neutrinos and observational implications for neutrino oscillation, Phys. Lett. B 559 (2003) 113.
- [35] Shin'ichiro Ando and Katsuhiko Sato: Resonant spin-flavor conversion of supernova neutrinos: Dependence on presupernova models and future prospects, Phys. Rev. D (2003), in press.
- [36] H.Yoshiguchi, S.Nagataki, K.Sato, N.Ohama, S.Okamura: Revision of the Selection Function of the ORS using the SDSS EDR: Toward an Accurate Estimate of the Source Number Density of UHECRs, PASJ, 55, 121, (2003)
- [37] H.Yoshiguchi, S.Nagataki, S.Tsubaki, K.Sato: Small Scale Clustering in the Isotropic Arrival Distribution of UHECRs and Implications for Their Source Candidate, ApJ, 586, 1211, (2003)
- [38] H.Yoshiguchi, S.Nagataki, K.Sato: Arrival Distribution of UHECRs: Prospects for the Future, astro-ph/0302508, to be published in ApJ

# (会議抄録)

[39] Kazuya Koyama: Radion and large scale anisotropy on the brane; Progress of theoretical physics supplement 148 (2002) 259.

- [40] Jiro Soda and Kazuya Koyama: Cosmological perturbations in the brane world -Brane View vs Bulk View-; Progress of theoretical physics supplement 148 (2002) 136.
- [41] Shinpei Kobayashi and Kazuya Koyama: Cosmology based on Horava-Witten theory; Progress of theoretical physics supplement 148 (2002) 245.
- [42] Jounghun Lee & Yasushi Suto: Modeling intracluster gas in triaxial dark halos; Proceedings of the Japan - Germany workshop: "Galaxies and Clusters of Galaxies", eds. T.Ohashi and N.Y.Yamasaki, pp.137-140.
- [43] Kohji Yoshikawa, Noriko Y. Yamasaki, Yasushi Suto, Takaya Ohashi, K. Mitsuda, Yuzuru Tawara & Akihiro Furuzawa: Detectability of Warm/Hot Intergalactic Medium Through Emission Lines of OVII and OVIII; Proceedings of the Japan - Germany workshop: "Galaxies and Clusters of Galaxies", eds. T.Ohashi and N.Y.Yamasaki, pp.167-170.
- [44] Yasushi Suto, Mamoru Shimizu, Tetsu Kitayama & Shin Sasaki: Reliability of galaxy clusters as cosmological probes; Proceedings of the Japan
  Germany workshop: "Galaxies and Clusters of Galaxies", eds. T.Ohashi and N.Y.Yamasaki, pp.137-140.
- [45] Yasushi Suto: Density profiles and clustering of dark halos and clusters of galaxies;Proceedings of "Matter and Energy in Clusters of Galaxies", eds.
  S. Bowyer and C.-Y. Hwang (ASP,San Francisco), in press (astro-ph/0207202).
- [46] Kohji Yoshikawa, Noriko Y. Yamasaki, Yasushi Suto, Takaya Ohashi, K. Mitsuda, Yuzuru Tawara & Akihiro Furuzawa: Detectability of Warm/Hot Intergalactic Medium Through Emission Lines of OVII and OVIII; Proceedings of the Japan - Germany workshop: "Galaxies and Clusters of Galaxies", eds. T.Ohashi and N.Y.Yamasaki, pp.167-170.
- [47] 桑原健,他SZチーム: "45m 鏡マルチビーム受信機の連続波データ解析手法の開発"野辺山宇宙電波観測所ユーザーズミーティング(2002年7月19日)
- [48] Masamune Oguri, Atsushi Taruya, Yasushi Suto, & Edwin L. Turner: Time Delay Statistics of Strong Gravitational Lensing and the Density Profile of Dark Halos; Proceedings of the 5th RESCEU symposium "New Trends in theoretical and observational cosmology", eds. K. Sato and T. Shiromizu, pp. 333-334
- [49] Masamune Oguri: Strong Gravitational Lensing Statistics: Galaxies versus Dark Halos; Proceedings of IAU 8th Asian Pacific Regional Meeting, eds. S. Ikeuchi, J. Hearnshaw and T. Hanawa, pp. 483-484
- [50] K. Sato, K. Takahashi and S. Ando: Neutrino Burst from Supernovae and Neutrino Oscillation, YKIS Physics of Unstable Nuclei, Prog.

Theor. Phys. Supplement No.146, (2002), Ed. by K. Hagino, H. Horiuchi, M. Matsuo and I. Tanihata, 212-226.

- [51] K. Sato, K. Takahashi and S. Ando: The Neutrino Burst from Supernovae and Neutrino Oscillation, ESO Astrophysics Symposia, From Twilight to Highlight: The physics of Supernovae, ed. W. Hillebrandt and B. Leibundgut, Springer, 2003, 81-86.
- [52] 長滝 重博: Neutrino Emission and Explosive Nucleosynthesis Accompanied with Formation of a GRB in a Massive Star, 研究会「ガンマ線バース ト 2002」集録中村編集 (2002), p.156.
- [53] 長滝 重博: Explosive Nucleosynthesis Associated with Formation of a GRBs in Massive Stars, 第三 回高エネルギー宇宙物理連絡会研究会・理研シンポ ジウム「宇宙における電子の加速と陽子の加速」牧 島編集 (2002), p.91.
- [54] 長滝 重博: Explosive Nucleosynthesis Associated with Formation of Jet-induced GRBs in Massive Stars, 研究会「高エネルギー宇宙物理学の理論的研 究」高原編集 (2002), p.97.
- [55] Gentaro Watanabe, Kei Iida and Katsuhiko Sato: Thermodynamic properties of nuclear "pasta" in neutron star crusts; Proceedings of "The Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2000", eds. T. Kajino et al., 381-384 (2003).
- [56] Gentaro Watanabe, Katsuhiko Sato, Kenji Yasuoka and Toshikazu Ebisuzaki: Microscopic Study of Nuclear "Pasta" by Quantum Molecular Dynamics; Proceedings of YKIS01 "Physics of Unstable Nuclei", Prog. Theor. Phys. Suppl. 146, 638-639 (2002).
- [57] Kei Iida, Gentaro Watanabe and Katsuhiko Sato: Formation of Nuclear "Pasta" in Cold Neutron Star Matter; Proceedings of YKIS01 "Physics of Unstable Nuclei", Prog. Theor. Phys. Suppl. 146, 514-519 (2002).
- [58] Gentaro Watanabe, Katsuhiko Sato, Kenji Yasuoka and Toshikazu Ebisuzaki: Microscopic Study of Nuclear "Pasta" by Quantum Molecular Dynamics; Proceedings of the 5th RESCEU International Symposium on "New Trends in Theoretical and Observational Cosmology", eds. K. Sato and T. Shiromizu, 373-374 (2002).
- [59] Gentaro Watanabe, Katsuhiko Sato, Kenji Yasuoka and Toshikazu Ebisuzaki: Microscopic Study of Nuclear "Pasta": Quantum Molecular Dynamics Approach; to appear in Proceedings of the Seventh International Symposium on Nuclei in the Cosmos, in press.
- [60] Shin'ichiro Ando and Katsuhiko Sato: Determining the Supernova Direction by its Neutrinos, Proceedings of the 5th RESCEU International Symposium on "New Trends in Theoretical and Observational Cosmology", eds. K. Sato and T.

Shiromizu, Universal Academy Press, 2002, p261-262

- [61] Shin'ichiro Ando, Katsuhiko Sato and Tomonori Totani: Detectability of the Supernova Relic Neutrinos, Proceedings of the First Sendai International Conference on Neutrino Science, 2002
- [62] H.Yoshiguchi: Propagation of Ultra-High Energy Cosmic Rays from Sources in the Super-Galactic Plane, New trends in theoretical and observational cosmology 385-386

### (国内雑誌)

- [63] 佐藤勝彦:宇宙論 時間はどのようにして始まった のか、日経サイエンス 12月号 (2002), 26-29
- [64] 佐藤勝彦:宇宙論の新展開、数理科学 2月号 (2003), 5-12
- [65] 佐藤勝彦: タイムマシン、宇宙の創生、 ミーサイ マガジン(日本科学未来館) 3巻 (2003)14-15.
- [66] Katsuhiko Sato: Begnning of the Universe -Modern genesis described by physics-, TANSEI, The University of Tokyo Magagine, Vol.3. March (2003) 24
- [67] 須藤 靖: アンパンマンに学べ、岩波 科学 72(2002)4
   月号, pp.439-440.
- [68] 須藤 靖: 不惑の宇宙論?、日本惑星科学会 会誌 遊・ 星・人 11(2002)pp.94-106.
- [69] 佐藤勝彦:ニュートリノ天文学の誕生と新展開、日 経サイエンス 1月号 (2003), 22-27
- [70] 小柴昌俊、佐藤勝彦:記念対談 実験物理学への挑 戦、科学 1月号 (2003), 64-
- [71] 佐藤勝彦:小柴先生のノーベル賞受賞となった超新星 ニュートリノの検出と超新星ニュートリノ理論の進 展、高エネルギーニュース 2003 年、Vol. 21 No. 4, 158-163.
- [72] 佐藤勝彦:となりから見た超新星ニュートリノ検出 の現場、日本物理学会誌、2003 年1月号
- [73] 渡辺元太郎、佐藤 勝彦、泰岡 顕治、戎崎 俊一: Microscopic Study of Nuclear "Pasta" by Quantum Molecular Dynamics; Proceedings of the fourth symposium on science of hadrons under extreme conditions, eds. S. Chiba and T. Maruyama, 29-35 (2002).

## (学位論文)

- [74] Gentaro Watanabe: Nuclear "pasta" in dense stars and its properties (博士論文).
- [75] 安藤真一郎: "Supernova Neutrinos: Their Relic Background and Resonant Spin-Flavor Conversion"(修士論文)
- [76] 太田 泰弘:局所近似モデルに基づく宇宙大規模構造 の非線形重力進化 (修士論文)
- [77] 吉口 寛之: Arrival Distribution of Ultra-High Energy Cosmic Rays and Implications for Their Source Candidates (修士論文)

(著書)

- [78] 佐藤勝彦:宇宙の誕生、 第16回「大学と科学」公 開シンポジウム講演収録集 「宇宙を探る新しい目 - 重力波-」 (2002),(分担執筆)、 112-122
- [79] 佐藤勝彦: 超ミクロと超マクロの物理、「21世紀、物 理はどう変わるか」、日本物理学会編、裳華房、2002 年11月、分担執筆、36-60.

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [80] Kazuya Koyama: Evolution of cosmological perturbations in the brane worlds; The XXI Symposium on Relativistic Astrophysics 2002, Florence (2002 年 12 月 9-13 日).
- [81] Atsushi Taruya: Lognormal Behavior of the Cosmological Density Distribution Function, The IAU 8th Asian-Pacific Regional Meeting 2002, Tokyo (2002年7月2-5日).
- [82] Atsushi Taruya: Lognormal Properties of Dark Matter Density and Weak Lensing Fields, The XXI Symposium on Relativistic Astrophysics 2002, Florence (2002年12月9-13日).
- [83] Kohji Yoshikawa:Detectability of Warm/Hot Intergalactic Medium Through Emission Lines of OVII and OVIII, Japan-Germany galaxy-cluter workshop, "Galaxies and Clusters of Galaxies", 修善寺 (2002 年 10 月 31 日)
- [84] Issha Kayo: "3pt in SDSS" (SDSS collaboration meeting 2002 summer; Princeton 大, 2002 年7月)
- [85] Masamune Oguri: Strong Gravitational Lensing Statistics: Galaxies versus Dark Halos; IAU 8th Asian Pacific Regional Meeting, Tokyo (2002年7 月)
- [86] Masamune Oguri & Yozo Kawano: Accurate Determination of the Hubble Constant from Supernova Lensing; The 12th Workshop of General Relativity and Gravitation, Tokyo (2002 年 11 月)
- [87] Katsuhiko Sato, Keitaro Takahashi and Shin'ichiro Ando, Neutrino Burst ¿From Supernova and Neutrino OSC, ESO Workshop on Supernovae, Garching, July, 2002
- [88] S. Nagataki, Gamma-ray burst neutrino background and star formation history in the universe, The 7th International Symposium on Nuclei in the Cosmos, Hotel Highland Resort, Fuji-Yoshida, Japan (2002年7月9日)
- [89] Gentaro Watanabe, Katsuhiko Sato, Kenji Yasuoka and Toshikazu Ebisuzaki: Microscopic Study of Nuclear "Pasta": Quantum Molecular Dynamics Approach, the Seventh International Symposium on Nuclei in the Cosmos, (Yamanashi, July 2002).

- [90] Gentaro Watanabe, Katsuhiko Sato, Kenji Yasuoka and Toshikazu Ebisuzaki: Microscopic Study of Nuclear "Pasta": Quantum Molecular Dynamics Approach, the XVI International Conference on Particles and Nuclei, (Osaka, Sept. -Oct. 2002).
- [91] K.Kotake, S.Yamada and K. Sato; Gravitational Collapse of Rotating Massive Stars, The Seventh International Symposium on "Nuclei in the Cosmos" (Fuji-Yoshida, Japan, July, 2002)
- [92] Keitaro Takahashi, Katsuhiko Sato: Earth effects on supernova neutrinos and their implications for neutrino parameters, Nuclei in Cosmos VII, Fuji-Yoshida, July, 2002.
- [93] Keitaro Takahashi, Katsuhiko Sato: Earth effects on supernova neutrinos and their implications for neutrino parameters, PANIC02, Osaka, October, 2002.
- [94] Shin'ichiro Ando, Katsuhiko Sato and Tomonori Totani: Detectability of the Supernova Relic Neutrinos, XVI Particles and Nuclei International Conference (PANIC02; Osaka, October 2002)
- [95] Shin'ichiro Ando, Katsuhiko Sato and Tomonori Totani: Supernova Relic Neutrinos and Neutrino Oscillation, The 4th Workshop on "Neutrino Oscillations and their Origin" (NOON2003; Kanazawa, March 2003)

# 招待講演

- [96] Yasushi Suto: Density profiles and clustering of dark halos and clusters of galaxies, the international conference, "Matter and Energy in Clusters of Galaxies", 台湾中央大学 (2002年4月23-27日)
- [97] Yasushi Suto: Reliablity of galaxy clusters as cosmological probes, Japan-Germany galaxy-cluster workshop, "Galaxies and Clusters of Galaxies", 修善寺 (2002 年 10 月 31 日)
- [98] Yasushi Suto: Reliablity of galaxy clusters as cosmological probes, Ringberg workshop "Testing cosmological models with galaxy clusters", Ringberg, Germany (2003年1月14日)
- [99] Katsuhiko Sato: Neutrino Burst from Supernovae and Neutrino Oscillation Parameters, International Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics, Taipei, May, 2002.
- [100] Katsuhiko Sato: Explosion Mechanism of Supernova and neutrino Burst, The 50th Anniversary Symposium of Korean Physical Society, Seoul, Sept. 2002.
- [101] Katsuhiko Sato: Ultra-High Energy Cosmic Rays and Local Super Clusters, The 50th Anniversary Symposium of Korean Physical Society, Seoul, Sept. 2002
- [102] Katsuhiko Sato: Supernova Explosion and Neutrino Oscillation, 5th Sino-Germany workshop on cosmology and formation of galaxies, Beijing, 17-21, 2002.

- [103] Katsuhiko Sato: Neutrino Burst from Supernovae and the Implications for Neutrino Oscillation Parameters, Tokyo-Adelaide Joint workshop on Quarks, Astrophysics and Space Physics, Tokyo, 6-10 Jan. 2003.
- [104] Katsuhiko Sato: Supernova Explosion and neutrino Burst from Supernovae, VHEPA-3 workshop, Kashiwa, 20-22, March 2003.

(国内会議)

一般講演

- ・日本物理学会 2002 年秋期大会(立教大学、2002 年 9
   月)
- [105] 小山 和哉: "ブレイン宇宙におけるバルクスカラー 場の運動"
- [106] 樽家 篤史, 阪上 雅昭: Numerical Simulation of Gravothermal Catastrophe From a View of Nonextensive Thermostatistics
- [107] 長滝重博:高速回転する中性子星の伴星からやってく る TeV ニュートリノ
- [108] 渡辺 元太郎、佐藤 勝彦、泰岡 顕治、戎崎 俊一:量 子分子動力学法によるパスタ相の微視的研究
- [109] 固武 慶、山田章一、佐藤勝彦; Gravitational Collapse of Rotating Massive Stars
- [110] 高橋慶太郎、佐藤勝彦: 超新星ニュートリノとニュー トリノ振動
- [111] 安藤真一郎、佐藤勝彦、戸谷友則: "超新星背景ニュー トリノの検出可能性"
- [112] 吉口 寛之,長滝 重博,椿 信也,佐藤 勝彦: 非一様 ソースモデルにおける超高エネルギー宇宙線の伝搬
  - ・日本物理学会第 58 回年次大会(東北学院大学、2003 年 3 月)
- [113] 小山 和哉: "Behavior of Weyl anistropic stress in the brane worlds"
- [114] 高橋 慶太郎、小山 和哉: "Primordial fluctuations in bulk inflaton model"
- [115] 樽家 篤史, 阪上 雅昭: 重力多体系の非加法的統計力学(II)
- [116] 大栗真宗: "Implications of possible arcminuteseparation lensed quasars in the 2dF quasar survey"
- [117] 椿信也,北山哲,佐藤勝彦:銀河団の進化と宇宙線 の閉じ込め
- [118] 渡辺 元太郎、飯田 圭: 中性子星クラスト中のパス タ相における電子遮蔽効果
- [119] 高橋慶太郎、佐藤勝彦: "超新星ニュートリノとニュー トリノ振動:親星の質量依存性"
- [120] 安藤真一郎、佐藤勝彦: "Resonant Spin-Flavor Conversion of Supernova Neutrinos"
- [121] 吉口 寛之,長滝 重博,椿 信也,佐藤 勝彦: 超高エ ネルギー宇宙線到来方向分布とソース候補への示唆

- ・日本天文学会 2002 年秋期大会(宮崎シーガイア、 2002 年 10 月)
- [122] 吉川 耕司: "Spatial and dynamical biases in velocity statistics of galaxies"
- [123] 大栗真宗: "重力レンズ統計のレンズ天体"
- [124] 太田 泰弘: Local collapse model に基づく密度ゆら ぎ確率分布関数の時間発展
- [125] 長滝重博: TeV Neutrinos from Companion Stars of Rapid-Rotating Neutron Stars
- [126] 安藤真一郎、佐藤勝彦、戸谷友則: "超新星背景ニュー トリノの検出可能性"
- [127] 吉口 寛之,長滝 重博,椿 信也,佐藤 勝彦:非一様 ソースモデルにおける超高エネルギー宇宙線の伝搬
  - ・日本天文学会 2003 年春期年会(東北大学、2003 年 3 月)
- [128] 吉川 耕司: "Detectability of Warm-Hot Intergalactic Medium through OVII and OVIII emission lines"
- [129] 清水 守, 北山 哲, 佐々木 伸, 須藤 靖: 銀河団の質 量・温度関係
- [130] 加用 一者、須藤 靖、Robert Nichol "SDSS 銀河三 点相関関数"
- [131] 大栗真宗、川野 羊三: "遠方超新星の重力レンズを 用いたハッブル定数の精密測定"
- [132] 長滝重博: Explosive Nucleosynthesis Associated with Formation of GRBs in Massive Stars
- [133] 高橋慶太郎、佐藤勝彦:超新星における衝撃波伝搬 とニュートリノ振動
- [134] 安藤真一郎、佐藤勝彦: "超新星背景ニュートリノと その観測からの示唆"

・その他

- [135] 佐藤勝彦: 美しきかなこの世界-科学研究の楽しさ と意義、東大理学理学部公開講演会"基礎科学が拓 く未来社会-東大理学部からの メッセージ"、安田 講堂、2002 年 4 月 19 日
- [136] 佐藤勝彦:宇宙の創世に挑む、東邦大学理学部公開 講座"21世紀の宇宙像 - 今、宇宙物理学の最前線 は - "東邦大学、2002年6月22日
- [137] 佐藤勝彦:宇宙はいかに始まったか-物理学の描く現代の創世記-第3回東京大学公開学術講演会"分子から宇宙へ-神秘を科学する-"安田講堂、2002年7月24日
- [138] 佐藤勝彦:宇宙の創成と未来-宇宙論の新展開、東京 大学素粒子物理国際研究センター一般公開講演会"素 粒子と宇宙-素粒子物理の最前線と新しい宇宙像-"、 安田講堂、2002 年 10 月 19 日
- [139] 佐藤勝彦:宇宙の誕生、宇宙の未来、東京大学宇宙線
   研究所一般公開講演、東京大学宇宙線研究所、2002
   年11月2日
- [140] 小山 和哉、白水徹也: "Effective theory for two branes system", 第 12 回 「一般相対論と重力」研 究会 (東京大学, 2002 年 11 月 25-28 日)

- [141] 高橋 慶太郎、小山 和哉: "Primordial fluctuations in bulk inflaton model", 京都大学基礎物理学 研究所研究会「Extra dimensions と Braneworld -素粒子理論、現象論、宇宙論 - 」
- [142] 須藤 靖: "Correlation functions and genus for SDSS galaxies"国立天文台理論解析計算機センター ユーザーズミーティング (2002 年 12 月 25 日)
- [143] 樽家 篤史, 阪上 雅昭: Numerical Similation of Gravothermal Catastrophe From a Viewpoint of Non-extensive Thermodynamics, 第 12 回 「一般 相対論と重力」研究会 (東京大学, 2002 年 11 月 25-28 日)
- [144] 樽家 篤史: Gravothermal Catastrophe and Generalized Entropy of Self-Gravitating Systems, 第15回理論天文学懇談会シンポジウム/国立天文台データ解析センターユーザーズミーティング(国立天文台, 2002年12月24-26日)
- [145] 樽家 篤史: Long-term Evolution of Stellar Selfgravitating System away from the Thermal Equilibrium: connection with non-extensive statistics, 伊豆長岡天体力学 N 体力学研究会 (伊豆長岡, 2003 年 3 月 6-8 日)
- [146] 加用 一者、樽家 篤史、浜名 崇:"非線形質量密度 ゆらぎ確率分布関数のハローモデルによる物理的理 解"第15回 理論天文学懇談会シンポジウム(国立 天文台,2002年12月)
- [147] 大栗真宗: "遠方超新星の重力レンズ"第15回理論 天文学懇談会シンポジウム(国立天文台、2002年 12月)
- [148] 佐藤勝彦:小柴先生のノーベル賞受賞となった超新 星ニュートリノの検出 -理論とその後の進展-、東 京大学理学部第2回公開講演会、駒場、2002年12 月20日
- [149] 長滝重博: Hypernova に於ける Jet 状爆発と元素合成、研究会「高エネルギー宇宙物理学の理論的研究」 (東京大学 2002 年 11 月 1 日)
- [150] 長滝重博: Explosive Nucleosynthesis Associated with Formation of GRBs in Massive Stars、第三 回高エネルギー宇宙物理連絡会研究会・理研シンポ ジウム「宇宙における電子の加速と陽子の加速」(理 化学研究所 2002 年 11 月 26 日)
- [151] 固武 慶、山田章一、佐藤勝彦、; Rotational Core-Collapse in Neutrino Leakage Scheme. 第15回 理 論天文学懇談会シンポジウム (国立天文台三鷹キャ ンパス, 2002 年12月)
- [152] 安藤真一郎、佐藤勝彦: "Resonant Spin-Flavor Conversion of Supernova Neutrinos" 第 15 回理論天文 学懇親会シンポジウム(国立天文台、2002 年 12 月)

### 招待講演

- [153] 小山 和哉: "ブレイン宇宙摂動論",京都大学 基礎物理学研究所研究会「Extra dimensions と Braneworld - 素粒子理論、現象論、宇宙論 - 」
- [154] 須藤 靖: "Warm-Hot Intergalactic Medium" 銀河
   間物質探索ミッション検討会、東京都立大学 (2002 年6月5日)

- [155] 須藤 靖: "WMAP と 21 世紀の宇宙論" KEK 理論 研究会 2003-超弦理論のダイナミクス-、KEK (2003 年 3 月 19 日)
- [156] 長滝重博: Neutrino Emission and Explosive Nucleosynthesis Accompanied with Formation of a GRB in a Massive Star、研究会「ガンマ線バース ト 2002」 (京都大学 2002 年 8 月 29 日)
- [157] 長滝重博:ブラックホール形成シナリオにもとづくガンマ線バーストの起源、研究会「ブラックホール天文学の新展開」(京大基研 2003 年 2 月 18 日)
- [158] 長滝重博: ガンマ線バースト背景ニュートリノと宇 宙の星形成史、研究会「ニュートリノと超新星爆発」 (東京大学 2003 年 2 月 21 日)
- [159] 渡辺 元太郎: 量子分子動力学法によるパスタ相の 微視的研究、研究会「ニュートリノと超新星爆発」 (東京大学、2003年2月)
- [160] 固武 慶、山田章一、佐藤勝彦; Anisotropic Neutrino Radiation from Rotating Protoneutron Stars, 研 究会「ニュートリノと超新星爆発」(東京大学、2003 年、2月)
- [161] 安藤真一郎、佐藤勝彦、戸谷友則: "超新星背景ニュートリノ:検出可能性と観測からの示唆"研究会「ニュートリノと超新星爆発」(東京大学、2003年2月)
- [162] 吉口 寛之: 超高エネルギー宇宙線到来方向分布と ソース候補への示唆、研究会「ニュートリノと超新 星爆発」(東京大学、2003年2月)

(集中講義)

- [163] 須藤 靖: 東京工業大学物理学教室「銀河団の多波長 観測と宇宙論」(2002 年 6 月 18-20 日)
- [164] 須藤 靖: 埼玉大学物理学教室「宇宙定数」(2002 年 9月 2,3 日)
- [165] 須藤 靖: 東北大学物理学教室「観測的宇宙論」(2002 年 12 月 2,3 日)
- [166] 佐藤勝彦: 慶応大学理工学部「天体物理学」、2002 年 11-12 月

(セミナー)

- [167] 小山 和哉: "Cosmological Perturbations in the brane worlds",国立天文台理論天文学系 宇宙論セミナー (2003 年 5 月 10 日)
- [168] 小山 和哉: "Radion and Large Scale Anisotropy on the Brane", 早稲田大学 宇宙物理 学研究室セミナー (2003 年 5 月 31 日)
- [169] 須藤 靖: "不惑の観測的宇宙論"、東京工業大学 基礎物理学談話会 (2002 年 6 月 20 日)
- [170] 須藤 靖: "Beyond Precision Cosmology"、埼玉大学物理学教室セミナー (2002 年 9 月 3 日)
- [171] 須藤 靖: "Searching for scattered light from a transiting planet HD209458b", 第6回系外惑星系 セミナー(2002年10月18日)
- [172] 樽家 篤史: "自己重力多体系と非加法的熱・統計力 学",東京工業大学 細谷・白水研究室コロキウム (2002 年4月16日)

- [173] Atsushi Taruya: "Theoretical Aspects of Cosmological Density Distribution Functions from the Gaussian Initial Conditions", University of Pennsylvania, Astrophysics Group Journal Club (2002 年7月29日)
- [174] 樽家 篤史: "自己重力多体系の長時間進化と準平衡 状態:非加法的熱統計との関連",早稲田大学 宇宙物 理学研究室セミナー (2003 年 2 月 14 日)
- [175] 吉川 耕司: "Nonlinear Stochastic Biasing of Galaxies and Dark Halos in Cosmological Hydrodynamic Simulations"東京大学 天文学教室セ ミナー
- [176] 大栗真宗: "The Hubble Constant Problem?"、東京 工業大学宇宙物理学理論グループ コロキウム(2003 年2月)
- [177] 佐藤勝彦: Neutrino Burst from Supernovae and Neutrino Oscillation, Shanghai Observatory, Chinese Academy of Sciences, May, 2002.
- [178] 佐藤勝彦:Explosion mechanism of Supernovae and Neutrino Burst from Supernovae, Tsinghua University, Oct.2002.
- [179] 佐藤勝彦: Explosion mechanism of Supernovae and Neutrino Burst from Supernovae, Institute of High Energy Physcis, Chinese Academy of Sciences, Oct.2002.
- [180] 佐藤勝彦: Neutrino Burst from Supernovae and Neutrino Oscillation Parameters、Rome Univ., Feb., 2003.
- [181] 佐藤勝彦: Neutrino Burst from Supernovae and Neutrino Oscillation Parameters, INF, Gran Sasso, Feb., 2003.
- [182] 佐藤勝彦: Neutrino Burst from Supernovae and Neutrino Oscillation Parameters, Niels Bohr Institute/Nordita, Feb., 2003.
- [183] 長滝重博: Explosive Nucleosynthesis Accompanied with Formation of Jet-induced GRBs in Massive Stars、(早稲田大学 2002 年 10 月 18 日)
- [184] 渡辺 元太郎: Nuclear "Pasta": 高密度天体内部物 質が織り成す物質相の世界、早稲田大学 前田研究室 セミナー(2002 年 6 月)
- [185] 渡辺 元太郎: Nuclear "Pasta": 高密度天体内部物 質が織り成す物質相の世界、日本原子力研究所 極限 ハドロン科学研究グループセミナー(2002年9月)
- [186] 吉口 寛之: 超高エネルギー宇宙線到来方向分布と ソース候補への示唆,宇宙線研究所, ASHRA グ ループセミナー(2002年12月19日)

# 5.2 村尾研究室

2001年10月1日に村尾が着任して発足した当研 究室は、物理学の中でも最も新しい分野の一つであ る量子情報の理論的研究を行っている。量子情報と は、0と1からなる2進数の「ビット」を基本単位 とするような古典力学的な状態で表される従来の情 報(古典的情報)に対して、0と1のみならず0と 1の任意の重ね合わせ状態を取ることができるよう な量子力学的な状態で表される情報を指し、量子2 準位系の状態で記述される「量子ビット (qubit)」を 基本単位とする。量子情報を用いると古典情報とは クラスの違う情報処理が可能となるため、古典情報 処理の限界を超えるブレークスルーの候補として注 目を集めている。この分野の研究は主に1990年代に 入って発達したもので、これまでに多量子ビットの 重ね合わせ状態を利用した量子コンピューティング (因数分解アルゴリズム・データベースサーチアルゴ リズム)未知量子ビット状態の測定における不確定 性を利用した量子暗号、2量子ビットの重ね合わせ 状態に現われる非局所的量子相関である「エンタン グルメント (entanglement)」を利用した量子テレポ テーション等の量子情報処理システムが提案されて いる。量子情報処理自体は新しい概念であるが、こ の新しい概念の基に様々な既存分野における研究が 結びつくことで、数学・計算機科学から物理・化学、 また電子工学や情報工学等多岐にわたる学際的な研 究分野として拡大しつつ理論・実験の両面から発展 を続けている。

我々は、情報と情報処理という新しい観点から自然 の基本法則である量子力学への理解を深め、また量 子力学の性質を応用した新たな情報処理システムの 提案を行うことを目的として、有限準位(離散変数) 系および無限準位(連続変数)系における多粒子間エ ンタングルメントに注目して研究を進めている。エン タングルメントとは、複数の部分系からなる量子系に おいて個々の部分系状態の積では表されないような 「 分離不能な状態」(例えばスピン1/2系のような量 子 2 準位系における singlet 状態  $(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle)/\sqrt{2}$ に現れる非局所的相関である。エンタングルメント (のドイツ名)がシュレディンガーによって命名され たことからわかるように、エンタングルメントの存 在は量子力学の創生期から量子系特有の性質として 知られており、その非局所性に関してはアインシュ タインらが EPR パラドックスに関する論文を提出 し、量子力学を「攻撃」する材料ともなったという 歴史的いきさつがある。このようにアインシュタイ ンをも悩ませたエンタングルメントであるが、量子 情報の観点から見ると古典的情報処理にはない量子 情報処理独自のリソース(資源)として非常に重要 であり、量子情報処理が古典情報処理より優位であ る鍵であると考えられている。

# 5.2.1 有限準位系におけるエンタングルメ ントと量子情報処理

過去10年間(特にここ5年間)集中して行われた研究の成果によって、2準位系2粒子間のエンタングルメントの性質はかなり明らかになってきたが、3粒子間以上の多粒子間エンタングルメントに関しては未だ研究は発展途上であり、特に雑音の影響下にあるような混合状態の場合も含めて解明されていない点もまだ多い。一方、3準位以上の多準位系では、2粒子間にも「束縛されたエンタングルメント」という2準位系にはない新たな性質が発見され、注目を集めている。このように、多粒子系・有限多準位系のエンタングルメントの特性を生かした新たな量子情報通信・処理システムの提案を目指した研究を行い、次のような研究成果を挙げた。

### 量子情報の符号化・復号化と量子一方向関数

有限準位系量子情報の遠隔分配と遠隔集約に関し て必要となる多粒子間エンタングルメントの非対称 性を解析し、遠隔分配に際してはエンタングルメン トが必要不可欠であるが、遠隔集約に関してはエン タングルメントが不要であるような量子情報の符号 化を見出した。そして、このエンタングルメントに 関して非対称な符号化を用いて、エンタングルメントに 関して非対称な符号化を用いて、エンタングルメントに 関して非対称な符号化を用いて、エンタングルメン トに関しての量子一方向関数の可能性を示した。古 典情報理論において、一方向関数は様々な暗号プロ トコルの本質であり、量子一方向的関数を用いた量 子暗号プロトコルの研究が現在進められている。こ の研究の一部は英国インペリアルカレッジの Vlatko Vedral 博士, Elham Kashefi 氏との共同研究の成果 である。

# 5.2.2 無限準位系におけるエンタングルメ ントと量子通信

スピン系等の有限準位系に対して、ボゾン系等の 無限準位系を用いた量子情報処理を考えることもで きる。特に、ボソンである光子の連続変数状態では、 共役変数のスクイズド状態から作られる無限準位系 のエンタングルメントを用いた量子テレポテーショ ンの実験にも既に成功しており、実験操作性の良さ から量子情報通信の鍵となる系である。無限準位系 はある意味で有限多準位系の一般化とも考えること ができ、量子情報の基盤理論の構築には、無限準位系 をもふくめたエンタングルメントの考察が必要不 可欠となる。そこで、我々は、現実的な状況下での 無限準位系を用いた量子通信システムを提案するた めに、次のような研究を進めた。 現実的状況下における光子系を用いた量子情報処理

実際の物理系では理想的状況下における量子情報 処理には表れない様々な問題が生じる。光子系の場 合には、光子数測定器の精度が不完全であること、有 限のスクイズド状態しか実現できないこと、環境と の相互作用により雑音が生じること等の問題である。 実験装置(ハードウェア)を発達させることによっ てより理想的状況下に近づける努力も重要であるが、 一方で、現実的状況下においてでも古典的情報処理 より優位な量子情報処理を行うことができるように 量子情報処理プロトコル(ソフトウェア的な部分)を 発展させるという解決方法もある。我々は古典的情 報処理より優位な量子情報処理を行うための鍵はエ ンタングルメントであると考え、現実的状況下にお けるエンタングルメントの分析をすることによって、 どのような現実的状況下においてどのような量子情 報処理が原理的に可能であるか、そして、そのような 量子情報処理を実行する際にはプロトコルをどのよ うに改良していくべきか、ということを明らかにし ようとしている。この研究の一部は、(財)光科学技 術研究振興財団からの研究助成を受けて英国ウェー ルズ大学の SamBraunstein 教授と Kae Nemoto 博 土との共同研究として進められている。

無限準位系を用いた有限準位量子情報通信

有限エネルギーの無限準位系を用いて有限準位の 量子情報を符号化し、有限準位の量子情報通信を効 率行うための研究を行っている。特に有限のスクイズ ド状態から生成されたのエンタングルメントと2準 位系の最大エンタングル状態の間での局所的変換可 能性を解析することにより、量子情報の最適符号化 の方法を考察している。この研究は、(財)住友在団 の基礎科学研究助成を受けて英国ウェールズ大学の Kae Nemoto博士および英国ヒューレットパッカー ド研究所のWilliam Munro博士との共同研究で進め られている。

ビームスプリッターと混合状態のエンタングルメント生成

ビームスプリッターは、量子光学の実験において 最も基本的な装置であると共に、理論的には、無限準 位系においてガウス型の演算を行う最も基本的な量 子情報演算要素である。非古典的な光をビームスプ リッターに入力すると、出力された光の間にエンタ ングルメントが生成される。我々は、雑音を受け混合 状態にある非古典的な光をビームスプリッターに入 力することによって生成されるエンタングルメント を解析することによって、混合状態における無限準位 系のエンタングルメントの性質を分析した。この研 究は、英国インペリアルカレッジの Vlatko Vedral 博 士, Damian Markham 氏との共同研究の成果である。 (会議抄録)

 Mio Murao and Vlatko Vedral, Encoding and decoding quantum information via entanglement, to be published in the proceeding of The Sixth International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC 02), Rinton Press (2003)

#### (国内雑誌)

[2] 村尾美緒、エンタングルメントを利用した量子情報処 理、別冊・数理科学 量子情報科学とその展開、サイ エンス社(2003年 出版予定)

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [3] Mio Murao and Vlatko Vedral, Encoding and decoding quantum information via entanglement, The Sixth International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC'02), 米国 Cambridge, MA (2002年7 月 22日-26日).
- [4] Mio Murao and Vlatko Vedral, Encoding and decoding quantum information via entanglement, The Sixth International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (EQIS'02), 東京 (2002年9月5日-8日).

#### (国内会議)

一般講演

 [5] 村尾美緒 Remote extraction of quantum information, 日本物理学会 2002 年秋季大会(愛知県春日 井市)

### 招待講演

[6] 村尾美緒, Entanglement and quantum information processing, 佐々木シンポジウム 2002 年 11 月 30 日

(集中講義・セミナー)

- [7] 統計力学特論 (Entanglement and Quantum Information Processing) お茶の水女子大学 2002 年 9月17日-19日
- [8] エンタングルメントと遠隔量子情報処理 京都大学 基礎物理学研究所 2002 年 5 月 30 日

<報文>
## 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型光学、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、光生物物理学から量子光学・量子 情報にわたる幅広い研究を行っている。特に、世界最 短可視光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<sup>-9</sup> 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型光 学効果や動的光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)による超高速非線型光学過程を解明 している。また、量子情報の基礎となる量子光学の 基本的問題 (光子相関や量子テレポーテーション、量 子エンタングル状態等)に関する研究も行っている。

## 6.1.1 超短光パルスレーザー

世界最短サブ 4 fs 可視光パルスレーザーの開発

チタンサファイア系フェムト秒パルスレーザーの 登場から 10 年以上を経過し、超短パルス発振器と 光アンプシステムの進歩は著しい。大出力化、安定 化、そしてさらなる短パルス化に多くの努力が払わ れ、それにともなって、様々な分野で超短光パルス の応用技術が続々と生まれている。代表的なものと しては、レーザー微細加工技術や X 線レーザー発生 などが挙げられよう。基礎研究の面でも、超高速緩 和現象や化学反応機構の解明とその制御にフェムト 秒レーザーは極めて有効な光源であることがわかっ てきた。

レーザーのパルス幅は、短いほどより高速な現象 をより高い時間分解能で観測することでき、同時に パルスの尖頭出力が高いことから、容易に非線型現 象を引き起こす。一方で、極限的短パルス光源は同 時に、局限的広帯域コヒーレント光源でもある。超 短パルス光源の開発は、時間極限を目指すことと同 時に広帯域スペクトルの一括測定という、計測にとっ てより重要な成果をもたらすだろう。

本研究室では、6年前にから新しい非共直線配置 の光パラメトリック増幅 (non-collinear parametric amplifier; NOPA) によって、極限的光短パルスの発 生法を開発してきた。1999 年度には世界記録である 4.7 fs のパルスを発生させることに成功し、2001 年 度にはその装置を改良することによって、さらに短 い 3.9 fs パルスを発生させることに成功した。

NOPA により得られた超短パルス光は、他の光源、 たとえば 1997 年ごろから行われている中空ファイ パーを用いたパルス発生法に比べ、スペクトルが極 めて平滑で分光に応用しやすいという利点を持って いる。中空ファイバーでは自己位相変調によってス ペクトルに強い振動構造が現れるが、NOPA におい ては、同じく自己位相変調を利用はしているものの、 パラメトリック増幅過程において平均化され、振動 構造はほとんど消失してしまう。このため、NOPA は4fs 以下の超短パルス光源としては、理想的な特 性をもっている。

本研究室では、世界最短可視光パルス光源の開発 に加えて、この超短パルスを光源とした実時間分光 法を確立し、様々な物質に対して先端的測定と新し い現象の発見的研究を精力的に行っている。

#### 新規非線型結晶を用いた超広帯域 NOPA

本研究室で開発してきた,NOPA による超短パル ス発生装置では,スペクトルの連続性と操作の簡便 性が,数fs 領域の時間分解分光などへの応用上非常 に大きな利点となっている。この装置をさらに広帯 域、高時間分解能化するためには、より広い帯域で 位相整合条件を満たす非線型結晶を探索する必要が ある。

最近あらたに合成成長された K<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>7</sub>(KABO) と CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub>(CLBO) について、タイプ I 位相整合・ 非平行入射条件下でのパラメトリック増幅の位相整 合帯域を決定した。これらの材料は、これまで用い られている典型的な非線型結晶である BBO 結晶にく らべて、ウォークオフ角度が小さいとう長所がある。 この両者の位相整合帯域幅は、それぞれ 152 THz, 164 THz であり、特に後者は、BBO の 157 THz に 比べて広帯域であり、光損失閾値が高いこととあい まって、NOPA 装置での利用に非常に有望な材料で あることがわかった。また、前者についても、機械 的強度が強いことや、潮解性を示さないなどの長所 をもつ。

#### 溶融石英ガラス中フィラメントの超広帯域化

溶融石英ガラス中にフェムト秒光パルスを導入す ると、フィラメントを形成しスペクトルの超広帯域化 (super-continuum generation: SCG)が起こる.この 超広帯域化は、その物理的興味とともに、超短パル ス発生などの応用上も非常に重要な現象である.こ の SCG を実験と数値計算の両面から研究し、両者の 良い一致をみた.

50 fs の時間幅のパルスをバルク石英ガラス中に導入すると、光パルスは、最初自己位相変調効果と誘 導ラマン散乱効果によって、スペクトルがゆっくり と広帯域化する.その後フィラメントを形成した後、 プラズマが急激に成長し、これによる非対称な広帯 域化のためにスペクトル中心がブルーシフトし、高 エネルギー端が400 nm に達するというメカニズム が実験と数値計算を比較することで理解できた.さ らに、SCG を二重ポンプ法を用いて時間分解計測し たところ,最初のパルスの誘導放出ラマン過程で放 出される振動モードが,フィラメントを形成する自 己収束効果に寄与していることを示唆するデータが 得られた.

#### 広帯域 THz 光発生

レーザーパルスを励起源として THz 電磁波パルス を発生させ、それを時間分解分光等に用いるという ことは、近年の超短パルス発生技術の目覚しい発展 と共に広く行われるようになった。この THz 光発生 過程において、高周波側の広帯域化を制限する最も 大きな要因は励起パルスの時間幅である。これまで は 15fs の共振器出力による励起で 40THz 以上まで 発生させた例がある。本研究室で開発したパルス幅 3.9 fs の非同軸光パラメトリック増幅器 (NOPA) シ ステムを利用し、超広帯域 THz 光発生を行った。

広帯域に渡って位相整合条件を満たす必要性から、 THz 光発生には非常に薄い 10 μm 厚 ZnTeを用いた。 この薄い材料を支えるため石英基盤が一般によく用 いられるが、物質中の分散によりパルスがチャープ するため超短パルスによる励起には適当でない。そ こで Si 基盤に ZnTe を張り合わせた試料を用意し、 Si 基盤が励起光の入射方向から見て裏側になるよう に配置することによりこの問題を解決した。

NOPA の励起レーザーである再生増幅器からの 50 fs 幅の出力パルスを用いて Si 基盤貼り合わせ ZnTe から発生した THz パルスを観測することに成功した。 現在のところ石英基盤貼り合わせ ZnTe からの信号 と同程度の S/N で検出されている。励起光が Si 基 盤で完全に吸収されることによる熱ノイズの影響が 懸念されたが、再生増幅器の出力と比較して 3 桁低 い NOPA 出力では、影響はないと考えられる。

#### 超短光パルスの絶対位相制御

光パルスは、電波と同じく、搬送波とそれに対する 変調としての包絡波に分解することができる。包絡 線のピークを時間の基準とした搬送波の位相を搬送 波包絡波位相と言い、しばしば絶対位相と呼ばれる。 この量は、これまでの短パルス研究ではあまり意 識されてこなかった。その理由は、長いパルスでは この位相を精確に決めることはできないか、あるい は決めること自体に意味がないからである。パルス 幅が電場の周期に達するほど狭くなって始めて重要 な意味を持つ。例えば、超短パルスを用いた高次高 調波発生(あるいは軟X線発生)においては、発生 する高調波強度は、この絶対位相に非常に敏感であ る。安定した光源として利用するためには、絶対位 相を固定する技術が不可欠になる。この絶対位相は、 レーザー共振器長の数十 nm 程度のゆらぎによって も大きくゆらぐので、絶対位相を固定することは極 めて難しい。

本研究室では、光パラメトリック増幅過程を用いた、絶対位相を固定した超短光パルス発生を提案した。光パラメトリック増幅過程では、励起光と信号光の二つの入力の差周波発生のプロセスを用いているので、励起光と信号光の絶対位相のゆらぎが同一であれば、その差分周波成分 (アイドラー光と呼ばれる) は、各々の絶対位相のゆらぎが相殺され、絶

対位相が固定されるはずである。干渉法を用いた実験により、アイドラー光の位相のゆらぎを1パルス毎に計測し、絶対位相固定を実証した。これまでに、 $\pi/10$ 以下でゆらぎを安定化することが可能となっている。

現在この絶対位相固定光を発生する、実用的なフェムト秒光源の開発と、THz光発生への応用を行っている。

#### 6.1.2 分子振動の実時間分光

マルチチャンネル・ダブルロックインアンプとその 分光システムの開発

前年度からの継続で、マルチチャンネル(128ch) ダブルロックインアンプとその分光システムの開発 を行い、ほぼ完成した(理科大との共同研究)。これ により、大きな背景光に埋もれた微弱な信号の波長 依存性を検出するとき、従来はロックインアンプと 掃引分光器で波長の1点1点を測定していたものが、 128 点の波長で同時に検出できるので、同じ測定時間 では 10 倍以上の S/N 向上、同じ S/N ではパラメー タを連続的に変化して2次元分光が可能になる。特 に、時間分解分光では広帯域光を試料に照射するこ とが(帯域幅の逆数に比例する)時間分解能を得る ために本質的なので、試料通過後の光を分光して各 波長ごとに測定するのに比べ、その優位性は明らか である。システムの構成は以下の通りである。透過プ ローブ光スペクトルを 128 個の APD で検出し(分光 器と検出器はバンドルファイバーアレイで接続) そ の出力を 128 台の 2 段に接続された DSP ロックイン アンプでダブルロックイン検出する。初段で 5kHz -200Hz (ポンプ光) 2 段目で 100 Hz-0.001 Hz (プ ローブ光)の変調成分を測定できる。科学技術振興 事業団の ERATO 単一量子点プロジェクトに次いで 2件目であるが、以下のように大幅に性能が向上して いる。入力換算雑音を 150 fA/ Hz から 50 fA/ Hz に低減、信号分解能が 10 fA から 1 fA、バンドル ファイバーアレイの受光面の縦サイズが 1.7 倍、デッ ドエリアの割合が 20-30 % 減って、集光効率がほ ぼ倍増、APD 回路の雑音が 1/2 以下となっている。 今年度はパルスレ - ザーの時間遅延掃引システムと 結合し、フェムト秒実時間振動分光と電場変調分光 に応用して成果を挙げている。来年度は走査型近接 場顕微鏡 (SNOM) や単一量子点分光のような微弱光 領域の計測にも応用する予定である。

#### J 会合体

pseudoisocyanine(PIC)分子は高濃度溶液中で、J 会合体と呼ばれる1次元鎖状分子集合体を形成する ことが知られる。本研究では前述の超短光パルスと マルチチャネル・ダブルロックインアンプ検出装置 を用い、ポンププローブ分光法によって、短い時間 スケールでの会合体のダイナミクスを研究した。

会合体を形成した PIC 分子では、モノマーの最低 励起状態より低エネルギー側に新たなバンド(Jバ ンド)があわれる。このバンドは、Frenkel 励起子モ デルによって理解され、Jバンドは基底状態からこの励起子バンドの底への遷移によるものであると考えられている。PICは自然発光のStokesシフトが小さいことから、電子格子相互作用の小さい系として知られるが、フェムト秒パルスを利用し、実時間計測という面から振動のダイナミクスの解明を試みた。実験結果から、このような電子格子相互作用の小さな系に対しても、実時間分子振動分光が可能であることがわかった。観測された振動は、J-会合体の形成に関与していると考えられる、分子の面外振動モードであった。マルチチャネル・ダブルロックインアンプによる、高S/N比測定は、振動の位相決定に際して特に強力な威力を発揮している。

#### ポリジアセチレン

 $\pi$  共役系高分子の一種であるポリジアセチレン誘 導体 (PDA-3BCMU(青相))を、前述の 5 fs 超短光パ ルスによるポンププローブ法によって研究した。

ポリジアセチレン誘導体の励起状態において、観 測される分子振動については論争があった。フランス のグループは、基底状態でアセチレン型である PDA は、励起状態 (1<sup>1</sup>B<sub>u</sub> 励起子) においては、分子振動 に炭素・炭素間二重結合のみの振動が現れ他の振動 モードは存在しないため、励起状態は完全にブタト リエン型になっているとした。また炭素・炭素間二 重結合の分子振動は、100 fs 程度の短い時間で緩和 するとしていた。

本研究では、高時間分解能の超短光パルス光源を 用いることにより、これまで確定していなかった、 PDA-3BCMU の各緩和過程における時間スケール を決定することができた。励起状態(1<sup>1</sup>B<sub>u</sub> 励起子) は 60 fs 程度で対称性の異なる励起状態(2<sup>1</sup>A<sub>g</sub>) 励起 子に緩和してしまい、2<sup>1</sup>Ag 状態においては炭素・炭 素間二重結合だけでなく、炭素・炭素三重結合の分子 振動が観測され、その緩和の時間は 1ps 程度であっ た。フランスのグループの実験結果は、時間分解能 が十分でないため、誤った解釈に到ったことが明ら かになった。

#### 緑色蛍光タンパク質

生命科学分野でマーカー等に広範く用いられている緑色蛍光タンパク質(GFP)は、蛍光性発色団(p-hydroxybenzylidene-imidazolidinone)を有する。野生型GFPを400nm光で励起すると、励起状態において約1psの時定数でproton移動が起こり、約500nmの緑色蛍光を発する。GFPの励起状態のプロトン移動に関わるの分子振動動力学を解明するために、中心波長400nmのフェムト秒レーザーを用いたpump-probe分光の準備を行った。なお、この研究は能勢研・桑島研との共同研究である。

#### フタロシアニン錫錯体

フタロシアニン錫 (SnPc) を、前述の 5 fs 超短パル スレーザーにより超高速分光を行った。SnPc は、フ タロシアニンの一連の分子群と同じく、可視領域に Pc 環の  $\pi$ - $\pi$ \* 遷移に起源をもつ吸収帯 Soret 帯と Q 帯をもつ。フタロシアニンは、非常に安定で退色に 強いため青、緑系の有機顔料として非常に広範に用 いられる物質である。また近年では、電子写真感光 体や有機電解発光デバイスとしての応用が進められ ている。

この SnPc の Q 帯 (620 - 820 nm) に対してポン プ=プローブ法により、時間分解分光を行った。Pc 環の全対称振動に対応する明瞭な透過率の振動 (670 cm<sup>-1</sup>) が観測され、同時にそのおよそ 2 倍の周波数 (1330cm<sup>-1</sup>) に、500 fs 程度で減衰する振動成分が観 測された。振動の周波数依存性から、670 cm<sup>-1</sup> 振 動の第二高調波成分と考えられる。この振動の減衰 速度と、フタロシアニンの Q 帯の励起密度の減衰と の比較解析の結果、透過率のに現れる振動は、励起 状態 S<sub>1</sub> が関与する分子振動により変調を受けたもの であると結論された。

## 6.1.3 マルチチャンネル・ダブルロックイン アンプによる電場変調分光法の開発

東京理科大との共同研究として、さまざまな対称 性・会合形態を持つ分子・イオンについて、新たに 導入した 128 チャンネルのマルチチャンネル・ダブ ルロックインアンプを用いて電場変調分光を行った。 生体中の色素蛋白複合体の構造や支持蛋白質との相 互作用の解明に電場変調分光を応用するための基礎 実験として、ポリマー中にドープしたポルフィリン J会合体、レーザー色素、ペリレン、遷移金属錯体、 及びそれらの水溶液を試料とした。従来の電場変調 分光と比べての特長は、測定時間が飛躍的に短縮さ れるため、変調周波数・電場強度・ホストポリマーの 種類などのパラメータを系統的に変化させて実験を 行えることである。シアニン色素」会合体について 以前に電場変調分光による分極率変化(電場の2次 に比例する信号)から会合数を評価したが、ランダ ムに配向していれば持ち得ないはずの巨視的な永久 双極子モーメント(電場の1次に比例)も持つこと を報告した。ポルフィリン」会合体においても1次 の信号が検出されたが、会合状態による差が見られ た。一方他の試料では試料の対称性から予想される 通り、1次の信号は検出されなかった。また、マルチ チャンネル・ダブルロックインを使用することによ る感度の向上で、遷移金属イオンのd-d遷移(コバ ルトの四面体配位錯体イオン)について初めて電場 変調信号の検出に成功した。

#### 6.1.4 近接場分光

本研究室では、前述のJ会合体などの、ミクロな 内部構造をもつ物質の物性を分光学的手法をもちい て研究している。従来の巨視的な分光法では、試料 内部の微細な構造を区別して分光できない。J会合体 であれば、多くの会合体を同時に観測するため、平 均化された情報を検出するに留まっていた。

近接場顕微分光法は、光の波長より小さい空間分 解能をもつため、巨視的な分光法に比べ著しく少数 のJ会合体の光学的特性を調べることができる。本 研究室では、吸収スペクトルの空間分布を測定でき るような低温(4K)近接場光学顕微鏡(SNOM)を作 製した。4Kにおいて、吸収・発光スペクトルの空間 依存性を、空間分解能50nmの精度で観測可能であ る。この高い分解能は、試料中の会合体のサイズ分 布決定や、会合体形成ダイナミクスの解明に威力を 発揮する。

## 6.1.5 量子光学·量子情報

量子情報処理に必要とされる量子相関をもつ光源 を、非線型光学的手法により生成することを目的と し実験研究を行っている。この目的のため、相関を 持つ2 ~ 多光子状態の発生とその物理的性質につい て実験的検証を行った。また、さらに実際の実験に 際して問題となる損失や、検出器の理想的な特性か らのズレが、どのように量子信号処理に影響をおよ ぼすかを理論的に解明した。

光ファイバーを用いた光子数スクイーズド 状態の発生

光ファイバー中にレーザー光を伝搬させると、 ファイバーが持つ非線型性により特定の条件下では、 ファイバーからの出力光が光子数スクイーズ状態に なることが知られている。これについての詳細な計 算器実験を行い,実験室で実現できるパラメータで 良好なスクイーズが達成できることを示した.現在、 この光子数スクイーズ光発生の実験的検証を行って いる。

従来、スクイーズド状態の発生は非常に難しいと されているが、このファイバーを用いたスクイーズ ド光発生は、他の方法に比べて簡便であり将来の応 用という面で考えても非常に有望な手法である。現 在はスクイーズド状態を測定するための検出器の作 成を完了した段階である。光子数スクイーズド状態 の発生に成功したのちは、それを用いた応用的実験 を行う予定である。

#### 非局所性を持った光子対の発生とその観測

光パラメトリック発信器(optical parametric oscillator: OPO)をしきい値より十分に小さいポンプ 光で励起すると、2光子状態を発生させられること が知られている。本実験では波長860nm チタンサ ファイアレーザーの二倍波を用い、共振器内に置か れたニオブ酸カリウム結晶(KNbO3)を励起した。 この2光子対は共振器のバンド幅に制限され大きな コヒーレンス長をもつという特徴がある。

我々は、以下の条件;(1). 共振器のスペクトル幅 が共振器の自由スペクトル間隔より大きい、(2). 自 由スペクトル間隔の逆数(光子が OPO 内を1 周する 時間)が光子計数器の分解時間より大きい、(3). 光 子計数器の分解時間内の同時計数値は1より小さい、 の3つが満たされた場合、2光子状態の相関関数に 周期的構造が観測できることを理論的に予測した。

本実験では比較的大きい OPO(周回時間  $\sim 2ns$ ) と高性能光子計数器(分解時間  $\sim 0.3ns$ )を用いて、 この条件を達成し周期的構造の測定に初めて成功し た(図 6.1 a(a, b))。この実験結果は、我々が以前に 提出した理論的予測と極めて良い一致を示した。開 発した OPO を使って初めて得られた2光子対は、こ れまで報告されたものと異なる特徴をもつ。



図 6.1 a: 2 光子状態の相関関数に現れる周期的構造

#### 周波数領域において相関を持つ光子対の実験的検証

self parametric down conversion (SPDC) で発生 する光子対はさまざまなパラメータが絡み合ってい る。通常エンタングル状態を発生させる場合、偏光 や波数ベクトルのエンタングルを用いることが多い が、特に周波数の相関に着目してそれを用いた応用 を考える。タイプ II の BBO 結晶をチタンサファイ アレーザの二倍波でポンプすることにより、860nm 近傍の波長を持った光子対を発生させることを達成 した。この光子対は周波数が非縮退で発生するが、光 子対を構成する光子同士の周波数の和は常にポンプ 光の周波数に等しく、その点でお互いに周波数の相 関を持っているといえる。さらにこの光子対を偏光 ビームスプリッタで分割することにより非局所性を 持たせている。現在、光子対が持つ周波数の相関に ついての基礎的な測定に成功している。同時に、今 後さらに改良すべき点がいくつか見出され、実験系 の改良による精度を高めた実験を予定している。

#### 量子テレポーテーションの理論的研究

ハンガリー科学院の Janszky 等と共同して、これ まで開発してきた伝達演算子法を用いて、単一光子 状態や偏光状態のエンタングルした状態のテレポー テーション解析を行った。コヒーレント状態を基底 とする解析法を用いた量子テレポーテーションにお いて、実際の実験系では理想的ではない要素が多く あるが、それらの影響を取り入れた解析を行った。具 体的には、検出器の検出効率が1でないこと、非線 型結晶が不完全であり完全にエンタングルした純粋 状態の光を得ることが出来ない等を考察した。

#### 光共振器を用いた原子間エンタングルメント増強

イオン、原子間エンタングルメントは量子コンピ ューティングへの応用へ向けとりわけ注目度が高い。 本研究では、遷移エネルギーの異なる二原子間エン タングルメントを扱った。生成エンタングルメント を用いてエンタングルメントの計量を行い、一次元 多モード光共振器と原子系との相互作用を記述する 定式化を通じて、そのダイナミクスに対する数値計 算を行った。一方の原子が励起状態にある場合を初 期状態とし、遷移エネルギー比が1:20場合について解析した結果、単一モードよりも多モード共振 器場の場合によりエンタングルメントが増大することがあることを示した。原子位置をパラメータとして、有効にエンタングルメントの増大効果を得る条件を求めた。

<報文>

#### (原著論文)

- T. Saito and T. Kobayashi. Real-time spectroscopy of excited states in azobenzene. *Opt. Materials*, Vol. 21, No. 1-3, pp. 301–305, 2002.
- [2] H. Hashimoto, T. Yoda, T Kobayashi, and A. J. Young. Molecular structures of carotenoid molecules as predicted by MNDO-AM1 molecular orbital calculations. *J. Mol. Struct.*, Vol. 604, No. 2-3, pp. 125–146, 2002.
- [3] H. Kano and T. Kobayashi. Time-resolved fluorescence and absorption spectroscopies of porphyrin J-aggregates. J. Chem. Phys., Vol. 116, No. 1, pp. 184–195, 2002.
- [4] T. Ide, H. F. Hofmann, T. Kobayashi, and A. Furusawa. Continuous-variable teleportation of single photon states. *Phys. Rev. A*, Vol. 65, No. 1, 012313, 2002.
- [5] X. Chen and T. Kobayashi. The effect of the electron-electron interactions on localization in one-dimensional disordered mode with long-range correlation. *Solid State Commun.*, Vol. 122, No. 9, pp. 479–483, 2002.
- [6] H. Kano, T. Saito, and T. Kobayashi. Observation of Herzberg-Teller-type wave-packet motion in porphyrin J-aggregates studied by sub-5-fs spectroscopy. J. Phys. Chem. A, Vol. 106, No. 14, pp. 3445–3453, 2002.
- [7] T.Saito and T.Kobayashi. Conformational change in azobenzene in photoisomerization process studied with chirp-controlled sub-10-fs pulses. J. Phys. Chem.A, Vol. 106, No. 41, pp. 9436–9441, 2002.
- [8] N. Fukutake, S.Takasaka, and T. Kobayashi. Energy transfer between two kinds of J-aggregates studied by near-field absorption-fluorescence spectroscopy. *Chem. Phys. Lett.*, Vol. 361, No. 1, pp. 42–49, 2002.
- [9] H. F. Hofmann, T. Fuji, and T. Kobayashi. Photon echo signature of vibrational superposition states created by femtosecond excitation of molecules. J. Opt. B-Quantum Semiclass. Opt., Vol. 4, No. 2, pp. 99–102, 2002.
- [10] N. Fukutake and T. Kobayashi. Size distribution of pseudoisocyanine(PIC) J-aggregates studied by near-field absorption spectroscopy. *Chem. Phys. Lett.*, Vol. 356, No. 3-4, pp. 368–374, 2002.
- [11] N. Fukutake, S. Takasaka, and T. Kobayashi. Lowtemperature scanning near-field optical microscope

for rapid measurement of thousands of absorption spectra. J. Appl. Phys., Vol. 91, No. 2, pp. 849–855, 2002.

- [12] T. Ide, H. F. Hofmann, A. Furusawa, and T. Kobayashi. Gain tuning and fidelity in continuous-variable quantum teleportation. *Phys. Rev. A*, Vol. 65, No. 6, 062303, 2002.
- [13] A. Baltuška, T. Fuji, and T. Kobayashi. Selfreferencing of the carrier-envelope slip in a 6-fs visible parametric amplifier. *Opt. Lett.*, Vol. 27, No. 14, pp. 1241–1243, 2002.
- [14] X. Chen and T. Kobayashi. The effect of twoexciton states on the linear absorption of the third molecular level in linear molecular aggreagtes. J. Chem. Phys., Vol. 117, No. 24, pp. 11347–11351, 2002.
- [15] K. Yanagi, T. Nakashima, T. Yamada, T. Kobayashi, and H. Hashimoto. Nonlinear optical properties of hydrazones derived from biological polyenes. *Carotenoid Science*, Vol. 5, pp. 41–42, 2002.
- [16] Y. Kameoka, K. Yanagi, T. Yamada, T. Kobayashi, R. J. Cogdell, and H. Hashimoto. Nonlinear optical properties of carotenoides bound to chromatophore membranes. *Carotenoid Science*, Vol. 5, pp. 37–38, 2002.
- [17] A. Sugita, T. Furuhi, M. Yamashita, and T. Kobayashi. Visible to near-infrared ultrafast spectroscopy of a quasi-one-dimensional halogen-bridged mixed-valence metal-complex [Pt(en)<sub>2</sub>][Pt(en)<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>](ClO<sub>4</sub>)<sub>4</sub>. J. Phys. Chem. A, Vol. 106, No. 4, pp. 581–588, 2002.
- [18] H. Kano and T. Kobayashi. Real-time spectroscopy of Frenkel exciton system. J. Lumin., Vol. 100, No. 1-4, pp. 269–282, 2002.
- [19] A. Baltuška, T. Fuji, and T. Kobayashi. Controlling the carrier-envelope phase of ultrashort light pulses with optical parametric amplifiers. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 88, No. 13, 133901, 2002.
- [20] S. Adachi, V. M. Kobryanskii, and T. Kobayashi. Excitation of a breather mode of bound soliton pairs in *trans*-polyacetylene by sub-5-fs optical pulses. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 89, No. 2, 27401, 2002.
- [21] A. Baltuška, T. Fuji, and T. Kobayashi. Visible pulse compression to 4 fs by optical prametric amplification and programmable dispersion control. *Opt. Lett.*, Vol. 27, No. 5, pp. 306–308, 2002.
- [22] A. Vukics, J. Janszky, and T. Kobayashi. Nonideal teleportation in coherent state basis. *Phys. Rev. A*, Vol. 68, No. 2, 023809, 2002.
- [23] H. Kano and T. Kobayashi. Real-time spectroscopy of the excited-state excitons in porphyrin J-aggregates. *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, Vol. 75, No. 5, pp. 1071–1074, 2002.

- [24] A. Baltuška and T. Kobayashi. Adaptive shaping of two-cycle visible pulses using a flexible mirror. *Appl. Phys. B*, Vol. 75, No. 42, pp. 427–443, 2002.
- [25] S. Adachi, V. M. Kobryanskii, and T. Kobayashi. Excitation of a breather mode of bound soliton pairs in *trans*-polyacetylene by sub-5-fs optical pulses. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 89, No. 2, 27401, 2002.
- [26] K. Yanagi, T. Kobayashi, and H. Hashimoto. Origin of trasition dipole-moment polarizability and hyperpolarizability in hydrazoneds. *Phys. Rev. B*, Vol. 67, No. 11, 115122, 2003.
- [27] J. Janszky, J. Asboth, A. Gabris, A. Vukics, M. Koniorczyk, and T. Kobayashi. Two-mode schroedinger cats, entanglement and teleportation. *Fortschr. Phys.*, Vol. 51, No. 2-3, pp. 156–170, 2003.
- [28] X. Fang and T. Kobayashi. Evolution of superbroadened spectrum in a filament generated by an ultrashort intense laser pulse in jused. *Appl. Phys. B*, 2003 in press.
- [29] T. Kobayashi, T. Saito, and S. Adachi. Sub-5fs real-time spectroscopy of several molecular systems. J. Lumin., Vol. 102-103, pp. 722–726, 2003.
- [30] P. Kumbhakar and T. Kobayashi. Ultra-broadband phase-matching in two new crystals for generation of tunable ultrafast laser radiation by Type-I noncollinear optical parametric amplification. J. Appl. Phys., 2003 in press.

#### (会議抄録)

- [31] T. Kobayashi. Spectroscopic study of several electroluminescent polymers. In Science and Technology of Luminescent Materials-2002, 2002.
- [32] T. Kobayashi, T. Saito, and H. Ohtani. Transition states in bacteriorhodopsin during retinal isomerization observed by sub-5-fs pulses. In *Technical Digest for The 13th International Conference on Ultrafast Phenomena*, pp. 306–307, 2002.
- [33] T. Kobayashi, S. Adachi, and V. M. Kobryanskii. Real-time dynamics of a breather in transpolyacetylene revealed by 4.7-fs visible pulses. In Technical Digest for The 13th International Conference on Ultrafast Phenomena, pp. 91–92, 2002.
- [34] A. Baltuška, N. Ishii, and T. Kobayashi. Alloptical self-stabilization of carrier-envelope offset in few-cycle pulses by optical parametric amplifiers. In *Technical Digest for The 13th International Conference on Ultrafast Phenomena*, pp. 10– 13, 2002.
- [35] T. Kobayashi and H. F. Hofmann. Displacement operator representation of quantum transportation. 2nd Winter Institute of FQTQO (Foundations Quantum Theory and Quantum Optics) (India), 2002.

- [36] A. Baltuška, T. Fuji, and T. Kobayashi. Measurement and self-stabilization of carrier-envelope phase drift by use of an optical parametric amplifier. In *Technical Digest for 2002 CLEO(Conference on Lasers and Electro-Optics)*, pp. 382–383, 2002.
- [37] T. Kobayashi and T. Saito. Real-time spectroscopy of isomerization process in azobenzene. In *Techni*cal Digest for 2002 CLEO(Conference on Lasers and Electro-Optics), pp. 305–306, 2002.
- [38] T. Fuji and T. Kobayashi. Vibrational dynamics probed by femtosecond pathlength-modulation spectroscopy. In *Tecnhical Digest for 2002 QELS(Quantum Electronic and Laser Science Conference)*, pp. 243–244, 2002.
- [39] T. Kobayashi. Sub-5-fs pulse generation from a noncollinear optical parametric amplifier. In *The* 3rd APLS (Asian Pacific Laser Symposium) 2002, 2002.
- [40] T. Kobayashi, A. Baltuška, and N. Ishii. Alloptical carrier-envelope-phase stabilization of ultrashort laser pulses by a parametric process. In *Technical Digest for Nonlinear Optics 2002*, pp. 157–158, 2002.
- [41] T. Kobayashi and T. Saito. Mechanism of photoisomerization in azobenzene. In *Technical Digest* for Nonlinear Optics 2002, pp. 254–255, 2002.
- [42] T. Kobayashi, S. Adachi, and V. M. Kobryanskii. Ultrashort-lived nonlinear excitation in transpolyacetylene studied with sub-five-femtosecond laser. In Technical Digest for Nonlinear Optics 2002, pp. 357–358, 2002.
- [43] M. Hirasawa and T. Kobayashi. Sub-5-fs pulse generation from a noncollinear optical parametric amplifier and its application to real-time spectroscopy. In *Technical Digest for Ultrafast Electronics and Optoelectronics*, pp. 30–33, 2003.
- [44] T. Kobayashi. Ultrafast nonlinear optical processes in organic photonic materials studied by sub-5-fs spectroscopy. In *Technical Summary Digest Photonic West*, p. 368, 2003.
- [45] T. Kobayashi. Sub-5-fs spectroscopuy of conjugated polymers. In Final program & Abstracts book for Optical Probes 2003 (Synthetic Metals), p. 77, 2003.
- [46] 小林孝嘉. フェムト秒の世界. 臨床モニター, 第13巻,
   p. 19, 2002.

(学位論文)

- [47] 井手俊毅. 測定依存トランスファー演算子法による光の場の連続量量子テレポーテションの解析. (博士論文), 2003.
- [48] 石井順久. ポリジアセジレンの超高速分光. (修士論 文), 2003.
- [49] 後藤隼人. 非古典光の生成と解析. (修士論文), 2003.

[50] 西村久美子.フェムト秒レーザーを用いた有機分子の 時間分解分光.(修士論文),2003.

#### (英文総説)

- [51] T. Kobayashi, A. Shirakawa, and T. Fuji. Realtime spectroscopy of molecular vibration using sub-5-fs pulses. Laser control and manipulation of molecules, ACS Symposium Series, ed. by A. D. Bandrauk and Y. Fujimura, and R. J. Gordon, American Chemical Society, Vol. 821, pp. 171–187, 2002.
- [52] T. Kobayashi. Sub-5-fs spectroscopy of several molecular systems. Femtochemistry and Femtobiology, Ultrafast Dynamics in Molecular Science, World Scientific, pp. 642–644, 2002.
- [53] T. Kobayashi, A. Shirakawa, and T. Fuji. Sub-5-fs transform-limited visible pulse source and its appliation to real-time spectroscopy. *IEEE Journal* of Selected Topics in Quantum Electronics, *IEEE*, Vol. 7, No. 4, pp. 525–538, 2001.
- [54] T. Kobayashi. Ultrafast geometrical relaxation in polydiacetylene induced by sub-5-fs pulses. *Femto*chemistry, ed. by F. C. De Schryver, S. De Feyter, and G. Schweitzer, Wiley-VCH, pp. 155–167, 2001.
- [55] T. Kobayashi and T. Saito. Chapter II Ultrafast dynamics in the excited states of azo compounds. *Photoreactive Organic Thin Films, Part A, ed. by* Z. Sekkat and W. Knoll, Academic Press, pp. 49– 62, 2002.
- [56] T. Kobayashi. Sub-5 fs spectroscopy of several molecular systems. Femtochemistry and Femtobiology: Ultrafast dynamics in molecular science, ed. by A. Douhal and J. Santamaria, World Scientific, pp. 624–644, 2002.
- [57] A. Baltuška and T. Kobayashi. Adaptive shaping of two-cycle visible pulses using a flexible mirror Appl. Phys. B, Springer, Vol. 75, pp. 427–443, 2002.
- [58] A. Baltuška and T. Kobayashi. Sub-5-fs pulse generation from a noncollinear optical parametric amplifier. *Measurement Science and Technology, Institute of Physics*, Vol. 13, pp. 1671–1682, 2002.
- [59] T. Kobayashi. Sub-5-fs nonlinear optical processes in a polydiacetylene film. Opt. Materials, Elsevier, Vol. 21, pp. 11–18, 2003.

#### (和文総説)

- [60] 小林孝嘉, 柳原康生. 量子テレポーテーション―空極の暗号化を実現する不思議な技術―. 図解ナノテクノロジーのすべて, 編集 河合 知二, 工業調査会, pp. 122–125, 2001.
- [61] 小林孝嘉. サブ 5 fs パルスの発生と超高速分光法. 応 用物理, 丸善, Vol. 71, No. 2, pp. 156–166, 2002.
- [62] 小林孝嘉. 項目:光波混合、ホンププローブ法、光変 調素子. 物理学辞典, 培風館, 2002.

- [63] 小林孝嘉. 超短パルスレーザーによる光生物初期過程の分子機構解説―視覚を例として. 光技術コンタクト「ライフサイエンスフォトニクス」, コーディネーター 天神林孝二, 日本オプトメカトロニクス協会, Vol. 40, No. 12, pp. 27–37, 2002.
- [64] 小林孝嘉. 超短光パルスレーザーの絶対位相制御. レー ザー加工学会誌, レーザー加工学会, Vol. 9, No. 3, pp. 295-298, 2002.
- [65] 小林孝嘉. 第1章 概説(1-3). 超高速光エレクトロニ クス技術ハンドブック, サイペック社, 2003 in press.
- [66] 小林孝嘉,藤貴夫.第2章 超短光パルスの発生、計 測、制御(1-7).超高速光エレクトロニクス技術ハ ンドブック,サイペック社,2003 in press.
- [67] 小林孝嘉,藤貴夫. 第9章 超高速光エレクトロニクス (1-5). 高速光エレクトロニクス技術ハンドブック, サイペック社, 2003 in press.
- [68] 小林孝嘉. 第11章 超高速エレクトロニクスのための 線型、非線型光学材料(1). 超高速光エレクトロニ クス技術ハンドブック,サイペック社, 2003 in press.
- [69] 小林孝嘉. 超短パルスレーザーで解明する視覚初期 過程の分子機構. 固体物理, アグネス技術センター, Vol. 38, No. 3, pp. 229–238, 2003.
- [70] 小林孝嘉. 分光学における極限を探る II 極限的時間 分解分光. 分光研究, 日本分光学会, Vol. 52, No. 2, pp. 103–115, 2003.
- [71] 井手俊毅,小林孝嘉,古沢明.量子テレポーテーション.量子情報科学とその展開(別冊数理科学),サイエンス社, pp. 168–173, 2003.

#### (著作)

- [72] T. Kobayashi. Chapter 15: Ultrafast relaxation in conjugated polymers. Primary photoexcitations in conjugated polymers: molecular exciton versus semiconductor band model, ed. by N. S. Sariciftci, World Scientific, pp. 430–495, 1997.
- [73] 小林孝嘉. 超高速エレクトロニクス技術ハンドブック. サイペック社, 2003.

#### (新聞記事等)

- [74] 小林孝嘉. 新・時間感覚 測定精度を高めていくと…
   量子論の不可思議な領域—生きたまま死んでいる—、
   ふたつの力学を結ぶ物—パラドクスを見る—. SONY CX.Pal, Vol. 45, 2002.
- <学術講演>

(国際会議)

一般講演

[75] K. Yanagi, T. Nakashima, T. Yamada, T. Kobayashi, and H. Hashimoto. Nonlinear optical properties of hydrazones derived from biological polyenes. In 13th International Symposium on Carotenoids, Hawai, U.S.A., Jan. 6-11 2002.

- [76] T. Kobayashi, T. Saito, and H. Ohtani. Transition state in bacteriorhodopsin during retinal isomerization observed by sub-5-fs pulses. In *The 13th International Conference on Ultrafast Phenomena*, Vancouver, British Columbia, Canada, May 12-17 2002.
- [77] A. Baltuška, T. Fuji, and T. Kobayashi. Measurement and self-stabilization of carrier-envelope phase drift by use of an optical parametric amplifier. In 2002 CLEO(Conference on Lasers and Electro-Optics), pp. 382–383, Long Beach, California, U.S.A., May 19-24 2002.
- [78] T. Kobayashi and T. Saito. Real-time spectroscopy of isomerization process in azobenzene. In 2002 CLEO(Conference on Lasers and Electro-Optics), Long Beach, California, U.S.A., May 19-24 2002.
- [79] T. Fuji and T. Kobayashi. Vibrational dynamics probed by femtosecond pathlength-modulation spectroscopy. In 2002 CLEO(Conference on Lasers and Electro-Optics), Long Beach, California, U.S.A., May 19-24 2002.
- [80] J. Janszky, J. Asbóth, A. Gábris, A. Vukics, M. Koniorczyk, and T. Kobayashi. Two-mode schrödinger cats: entanglement and teleportation. In Wigner Centennial Conference, Pécs, Hungary, July 8-12 2002.
- [81] A. Vukics, J. Janszky, and T. Kobayashi. Nonideal teleportation in coherent-state basis. In Wigner Centennial Conference, Pécs, Hungary, July 8-12 2002.
- [82] T. Kobayashi, S. Adachi, and V. M. Kobryanskii. Formation of breather in polyacetylene. In 2002 Gordon Research Conference on Electronic Processes in Organic Materials, Newport, Rhode Island, U.S.A., July 21-26 2002.
- [83] T. Kobayashi and N. Fukutake. Energy transfer between aggregates by non-Förster mechanism. In 2002 Gordon Research Conference on Electronic Processes in Organic Materials, Newport, Rhode Island, U.S.A., July 21-26 2002.
- [84] T. Kobayashi and A. Baltuška. Visible pulse compression to 4 fs by optical parametric amplification and programmable dispersion control. In *The 9th International Workshop on Femtosecond Technol*ogy, Tsukuba, Japan, July 27-28 2002.
- [85] T. Kobayashi, S. Adachi, and V. M. Kobryanskii. Ultrashort-lived nonlinear excitation in transpolyacetylene studied with sub-five-femtosecond laser. In 2002 Topical Meeting of Nonlinear Optics, Wailea, Maui, Hawaii, U.S.A., July 29-August 2 2002. ThC.
- [86] T. Kobayashi, A. Baltuška, and N. Ishii. Alloptical carrier-envelope-phase stabilization of ultrashort laser pulses by a parametric process. In 2002 Topical Meeting of Nonlinear Optics, Wailea, Maui, Hawaii, U.S.A., July 29-August 2 2002. WB.

- [87] T. Kobayashi and T. Saito. Mechanism of photoisomerization in azobenzene. In 2002 Topical Meeting of Nonlinear Optics, Wailea, Maui, Hawaii, U.S.A., July 29-August 2 2002. WE.
- [88] T. Kobayashi. Applications in technology and related new materials. In International Conference on Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Matter (ICL '02), Budapest, Hungary, August 24-29 2002.
- [89] T. Kobayashi, T. Saito, and S. Adachi. Sub-5-fs real time spectroscopy of several molecular systems. In International Conference on Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Matter (ICL '02), Budapest, Hungary, August 24-29 2002.
- [90] A. Baltuška, T. Fuji, and T. Kobayashi. Parametric amplification: the route toward shortest optical pulses, self-stabilization and drift measurement of carrier-envelope phase. In OSA Annual Meeting 2002, Olanda, Florida, U.S.A., Sep. 29-Oct. 3 2002.
- [91] M. I. Stockman, D. J. Bergman, and T. Kobayashi. Coherent control of linear and nonlinear ultrafast optical excitation of nanosystems. In *Texas meeting of the APS (American Physical Society,* Austin, Texas, U.S.A., Mar. 3-7 2003.

#### 招待講演

- [92] H. Hashimoto, K. Yanagi, T. Yamada, M. Yoshizawa, and T. Kobayashi. Nonliniar optical spectroscopy of carotenoids and their analogues. In 13th International Symposium on Carotenoids, Hawai, U.S.A., Jan. 6-11 2002.
- [93] T. Kobayashi and H. F. Hofmann. Displacement operator representation of quantum transportation. In 2nd Winter Institute of FQTQO (Foundations of Quantum Theory and Quantum Optics), Calcutta, India, Jan. 2-11 2002.
- [94] T. Kobayashi. Spectroscopic study of several electroluminescent polymers. In *Science and Technol*ogy of Luminescent Materials 2002, La Jolla, California, U.S.A., Jan. 28-30 2002.
- [95] T. Kobayashi. Femtosecond world. In *The 13th General Meeting of Japan Clinics Society*, Yoko-hama, Japan, Mar. 8-9 2002.
- [96] T. Kobayashi. Sub 5-fs spectroscopy of several organic systems. In International Symposium on Modern Optics and Its Application, Bandung, Indonesia, July 3-5 2002.
- [97] T. Ide, T. Kobayashi, and H. F. Hogmann. Gain tuning and fidelity in continuous variable quantum teleportation. In *Wigner Centennial Conference*, Pécs, Hungary, July 8-12 2002.
- [98] T. Kobayashi. Sub-5 fs spectroscopy of several molecular systems. In 2002 Gordon Research Conference on Electronic Processes in Organic Materials, Newport, Rhode Island, U.S.A., July 21-26 2002.

- [99] T. Kobayashi. Real-time spectroscopy of molecular vibration using sub-5-fs pulses. In *Femto-Science Seminar*, National Council of Canada, Ottawa, Canada, July 27 2002.
- [100] T. Kobayashi. Dynamics of coherence in organic molecular systems studied by sub-5-fs spectroscopy. In *The 14th Symposium of the Materials Research Society of Japan*, Tokyo, Japan, Dec. 20-21 2002.
- [101] M. Hirasawa and T. Kobayashi. Ultrafast spctroscopy of materials using ultrashort visible light pulses. In UEO(Ultrafast Electronics & Optoelectronics) Topical Meeting and Tabletop Exhibit, Washington DC, U.S.A., Jan. 15-17 2003.
- [102] T. Kobayashi. Ultrafast nonlinear optical processes in organic photonic materials studied by sub-5-fs spectroscopy. In *Integrated Optoelectronics Devices*, San Jose, California, U.S.A., Jan. 25-31 2003.
- [103] T. Kobayashi. Sub-5-fs spectroscopy of conjugated polymers. In *Optical Probes 2003*, Venice, Italy, Feb. 9-14 2003.
- [104] T. Kobayashi. Carier-envelope phase controll of opa output. In APS DAMOP (Division of Atomic, Molecular and Optical Physics) 2003, Boulder, U.S.A., May 21-24 2003.
- [105] T. Kobayashi. Real-time observation of molecular vibration with sub-5-fs pulses. In TRVS2003 (XI International Conference on Time Resolved Vibrational Spectroscopy), Castiglione della Pescaia, Italy, May 24-29 2003.

#### (国内会議)

#### 一般講演

- [106] A. Vukics, J. Janszky, and T. Kobayashi. Nonideal teleportation in coherent-state basis. In *CREST Nakamura Team Meeting 2002*, Tamagawa Univ., Tokyo, Sep. 25–27 2002.
- [107] T. Ide. Quantum teleportation using transfer operator. In *CREST Nakamura Team Meeting 2002*, Tamagawa Univ., Tokyo, Sep. 25–27 2002.
- [108] H. Wang. Experiment of doubly resonant opo. In *CREST Nakamura Team Meeting 2002*, Tamagawa Univ., Tokyo, Sep. 25–27 2002.
- [109] Y. Yanagihara. Towards the generation of einstein-podolsky-rosen state via optical parametric amplifier. In *CREST Nakamura Team Meeting* 2002, Tamagawa Univ., Tokyo, Sep. 25–27 2002.
- [110] P. Kumbakhar and T. Kobayashi. Noncollinear optical parametric amplification for generation of tunable vis-nir ultrafast laser radiation in cslib<sub>6</sub>o<sub>10</sub>. UP2004 にむけた日本の超高速光科学の新展開, 岡崎 (分子科学研究所), Mar. 19-20 2003.

- [111] P. Rizo and T. Kobayashi. Analysis of molecular vibration induced by intense pulses. UP2004 にむ けた日本の超高速光科学の新展開, 岡崎 (分子科学研 究所), Mar. 19-20 2003.
- [112] A. Vukics, J. Janszky, 小林孝嘉. 量子テレポーテー ションのコヒーレント基底による解析, 29pya-7. 日 本物理学会, 仙台 (東北大学), Mar. 28–31 2003.
- [113] 平澤正勝, 板崎雄三, 羽根広記, 石井順久, 足立俊輔, 小林孝嘉. フタロシアニン錫のポンプ=プローブ法に よる超高速分光, 28ayf-5. 日本物理学会, 仙台 (東北 大学), Mar. 28-31 2003.
- [114] 足立俊輔,谷正彦,小林孝嘉. サブ 4 フェムト秒超短 パルスを用いた超広帯域テラヘルツ光発生, 28ayf-6. 日本物理学会,仙台(東北大学), Mar. 28-31 2003.
- [115] 石井順久,徳永英司,足立俊輔,木村龍実,松田宏雄, 小林孝嘉.ポリジアセチレン誘導体のフェムト秒振動 ダイナミクス,28ayf-7.日本物理学会,仙台(東北大 学), Mar. 28–31 2003.
- [116] 西村久美子,小林孝嘉. J 会合体のフェムト秒時間 分解分光, 28ayf-8. 日本物理学会,仙台 (東北大学), Mar. 28-31 2003.
- [117] 後藤隼人, 王海波, 柳原康生, 堀切智之, 小林孝嘉. 多 モード2光子対の時間相関関数, 29aya-13. 日本物理 学会, 仙台(東北大学), Mar. 28–31 2003.
- [118] 佐々木秀貴、小林孝嘉. Kerr 媒質中の伝搬による schrödinger-cat-like state 発生の解析, 29aya-9. 日 本物理学会, 仙台 (東北大学), Mar. 28-31 2003.

#### 招待講演

- [119] 小林孝嘉. 極限短時間レーザーで視覚に迫る. 応物 学会第 29 回光波センシング技術研究会講演会,東京, Jun. 4-5 2002.
- [120] 小林孝嘉. ポリアセチレンのサブ 5 フェムト秒分光. 第 5 回超高速光エレクトロニクス研究会,東京 (上智 大学), Jun. 4 2002.
- [121] 小林孝嘉. 絶対位相安定化パルスの発生. 第6回超高 速光エレクトロニクス研究会,山形, Sep. 19-20 2002.
- [122] 小林孝嘉. サブ5フェムト秒パルスを用いた超高速 化学反応の研究. 浜松 (アクトシティ浜松コングレス センター), Jan.30–31 2003.
- [123] 小林孝嘉. サブ5フェムト分光の新展開. UP2004 にむけた日本の超高速光科学の新展開, 岡崎 (分子科 学研究所), Mar. 19-20 2003.
- [124] 小林孝嘉, A. Vukics, J. Janszky. コヒーレント状態 を基底としたテレポーテーションの解析. In CREST Team Meeting on Quantum Entanglement, 東京 (通 信総合研究所), Apr. 22-24 2003.
- [125] H. Wang, 後藤隼人, 柳原康生, 堀切智之, 小林孝 嘉. 二光子相関実験. In CREST Team Meeting on Quantum Entanglement, 東京 (通信総合研究所), Apr. 22-24 2003.
- [126] 小林孝嘉. サブ 5 フェムト秒分光によるパクテリオ ロドプシンの研究. 分子科学研究所研究会「ロドプシ ンの分子科学」、岡崎 (分子科学研究所), May 30-31 2003.

## 6.2 牧島研究室

牧島は昨年に引き続き、理化学研・宇宙放射線研究 室(http://cosmic.riken.go.jp/indexj.html/)の主任 研究員を兼務し、ビッグバン宇宙国際研究センター (www.resceu.s.u-tokyo.ac.jp)のセンター長を併任し た。今年度は宇宙ニュートリノ研究の小柴名誉教授 らと並び、宇宙X線研究の開拓者の一人である、R. Giacconi (アメリカ)がノーベル賞を受賞した [93]。

## 6.2.1 太陽と星のフレアの研究

#### ○ 太陽フレアにおける粒子加速

「ようこう」衛星(1991年8月30日~2001年12 月)の太陽硬X線望遠鏡(HXT)は、独創的なフーリ エ合成[19][53]により、太陽フレアの硬X線画像を 高い解像度で撮像した。昨年度の松本(三菱電気)の 成果を受け、フレアのさい、コロナ上空で磁気リコ ネクションにより発生したプラズマ流が、磁気ルー プに衝突して粒子が加速されるという描像を発展さ せた[40]。加速された電子は、光球に突入し制動放 射により、硬X線・ガンマ線の連続成分を作る。陽 子は原子核と衝突して中性子を叩き出し、それが陽 子に捕獲されると2.2 MeVのラインが発生する。そ こで連続成分とラインを比較すると、電子と陽子の 加速を定量的に比較できる。古徳らは、制動放射の 連続成分が発生する過程をモンテカルロで定量化し、 電子スペクトルを逆算する作業を進めた[88][95]。

#### ○ 原始星からの X 線放射

分子雲の奥深くで生まれる大質量星は、形成途上 で強いX線を放射し、それは厚いガスや塵を貫く貴 重な情報源となる。しかし放射機構は未知な部分が 多い。江副らは「あすか」衛星(1993年2月20日~ 2001年3月2日)による星形成領域 Cep A や S140 などの観測データを解析し、X線放射が原始星の双 極分子流に相関する可能性を示した[57]。江副らはま た、角分解能に優れたアメリカの Chandra 衛星に、 星形成領域 NGC 6334 の観測時間を獲得した。その 結果、「あすか」で過去に検出された、5つの分子雲 コアからのX線が、それぞれ数十個の点源に分解さ れ、双極分子流の根元に一致したX線源など、多数 の大質量原始星の候補を発見した[67]。

#### ○ 新しいアルゴル型連星の候補

柳田らは、*Chandra* で観測された星形成領域 M78 (NGC 2068)の公開データを解析したところ、最も 明るいX線の点源(光度 10<sup>31.6</sup> erg s<sup>-1</sup>)は、B4型の 主系列星 HD38563S に一致することを突き止めた。 X線光度が異常に大きいことから、これはアルゴル 型の連星である可能性が高く、観測された大小一対 のX線フレアは、連星を結ぶ巨大ループで発生した 1つのフレアが、蝕で分断されたものと解釈できる [58][75]。江副、柳田らは、国立天文台岡山の 1.8 m 望遠鏡を用い、連星周期の探査や前項 NGC 6334 の 観測を試みたが、天候に恵まれずに終わった。



 $\boxtimes$  6.2 a: Luminosity-temperature diagram of accretion disks around black holes. Data points refer to ULXs observed with various satellites [23].

## 6.2.2 ブラックホール天体の観測的研究

#### ○ 特定領域「ブラックホール天文学の新展開」

2002 年度より牧島が領域代表者となり、5 年計画 で科研費特定領域「ブラックホール天文学の新展開」 (www-utheal.phys.s.u-tokyo.ac.jp/tokuteiBH) が立 ち上がった [98]。故・小田稔博士が、はくちょう座 X-1 を世界で最初にブラックホール候補として指摘 したこと (1971) を受け [89]、実験、観測、理論、シ ミュレーションを結集し、ブラックホールに関する 宇宙物理学を大幅に進展させることを目指す。

#### ○ ブラックホールへの質量降着

昨年度は久保田(宇宙研 PD)らと協力し、ブラッ クホール周りの降着円盤が降着率の増加につれ、《標 準降着円盤》、《逆コンプトン状態》、そして《アド ベクション優勢円盤》へと進むことを明らかにした。 今年度はこの説を強化し[4]、後述の ULX や狭線 1 型セイファート銀河までを含む統一描像を構築した [10][22][27][54]。図 6.2 a はその鍵である。

#### ・超大光度コンパクト X 線源 (ULX)

我々は「あすか」の観測にもとづき、渦巻銀河の腕 に見られる一群の異常に強いX線の点源ULX (Ultra-Luminous Compact X-ray Source) が、~100  $M_{\odot}$ の質量をもつブラックホール連星であるという独創 的な説を提唱し、世界の注目を集めている。杉保ら は *Chardra* や *XMM-Newton* 衛星の大量の公開デー タを解析し、ULX のほぼ半数が、温度がかなり高め の多温度黒体放射スペクトルを示し(図 6.2 a)、残 リ半数は、べき乗型スペクトルを示すこと、また 2 つの型の間を遷移する ULX が稀ではないことを示 した [36] [23] [55] [66] [102]。これは「あすか」の先 駆的な成果を強化するもので、多温度黒体放射型の ULX は前項で述べた《アドベクション優勢円盤》の 状態、べき乗型スペクトルの ULX は《逆コンプトン 状態》にあると解釈できる [10] [22] [35]。 ○ 狭線1型セイファート銀河

狭線1型セイファート銀河は、銀河中心の巨大ブ ラックホールの中では、質量が小さく降着率が高い と考えられ、成長途上の巨大ブラックホールの候補 として注目される。その代表の1つ Ton S180 は、 「あすか」で長期にわたり観測された。村島らはその データを解析し、このタイプの天体に特有な軟X線 の超過が、上に述べた逆コンプトン状態に対応する という新しい解釈に到達した [39] [37] [63] [100]。こ れは近年の謎だった狭線1型セイファート銀河の性 質を解明し、質量降着するブラックホールを統一的 に理解する上で、意義が大きい。

#### 6.2.3 星間・銀河間での高エネルギー現象

◦ 銀河系と M31 の熱い星間ガス

銀河面に沿って広がる、正体不明のディフューズX 線・ガンマ線放射(銀河リッジ放射)は、《低温( $kT \sim$ 0.6 keV)熱的成分》、《高温( $kT \sim 3 \text{ keV}$ )熱的成 分》、《非熱的成分》の3成分から成る。それと同様 な3成分のディフューズ放射が、銀河系のバルジに も附随する[32]。バルジ領域では超新星は稀なので、 こうした放射の起源を超新星に求めることは難しく、 エネルギー収支も未知である。我々は、星の運動エ ネルギーが磁気乱流などを通じて解放され、プラズ マ加熱と粒子加速に費やされると考える[29]。— 岡 田らは XMM-Newton 衛星の公開データを用い、銀 河バルジに関する国分らの結果[32]を追認した。

高橋 (弘) らは昨年に引き続き、「あすか」、*Chandra、XMM-Newton*による M31 (アンドロメダ星雲) 中心部のデータを解析し、3種類 (温度 0.6 keV、0.3 keV、0.1 keV) の熱的なディフューズ X線放射の証拠を強めた [43] [59]。0.1 keV は星のコロナの集合体、0.3 keV は局所的な熱い泡、0.6 keV は銀河系で見られる《低温成分》に対応すると考えられる。さらに鉄輝線の探査から、M31 にも《高温成分》が存在する徴候を得た。よってディフューズ X線・ガンマ線放射は、渦巻き銀河に共通な性質かもしれず、宇宙線の起源との関連に興味がもたれる。

#### ○ 電波銀河ローブからの逆コンプトン X 線

電波銀河のローブには、数 GeV ~ 数百 GeV の電 子が充満し、シンクロトロン電波を放射するととも に、宇宙マイクロ波背景放射を逆コンプトン散乱す ることで、X線を作り出す。この2つの放射を比較 すると、磁場強度が推定できる。我々は埼玉大学や 宇宙開発事業団などと協力して、この逆コンプトン X線の探査で世界をリードして来た。昨年度の電波 銀河 3C 452 に続き [9][41]、今年度は Chandra では Pictor-A から [62]、また XMM-Newton では 3C 98 や [76]、「あすか」で先鞭をつけた Centaurus B か ら [68]、逆コンプトン放射を検出した。これらの結 果は、昨年度に磯部 (NASDA PD) が得た、「ロー ブの相対論的電子のエネルギー密度は、磁気エネル ギー密度を大きく上回る」という結果を強化するも のである [42] [61]。

## 6.2.4 銀河団の構造と進化

#### ◦ 銀河の合体仮説と暗黒銀河群

川原田らは昨年度「あすか」のデータを用い、巨大 楕円銀河 NGC 1550 は、X線を放射する大量の高温 プラズマを擁し、かつ銀河群なみの巨大な暗黒物質 ハローをもつことを発見した [6]。今年度、川原田や 高橋 (勲) らは、XMM-Newton に観測時間を獲得し てより詳細に NGC 1550 X線の分光を進めた結果、 プラズマ中の鉄の分布は、NGC 1550 よりはるかに 大きく広がっていることを発見した。よってこの天体 は過去には銀河群だったが、重元素を撒き散らした銀 河が、ハッブル時間かけて銀河群ポテンシャルの中央 に落下し、合体して1個の巨大楕円銀河 NGC 1550 になったことを示唆する [6] [33]。

#### ○ 銀河団プラズマの熱的進化

これまで銀河団プラズマは宇宙年令の間にはX線 の放射冷却で冷え、そこに大規模な冷却流 (ccoling flow)が発生すると信じられてきた。我々は「あすか」 の観測により、この定説の誤りを指摘し、世界の新し い潮流を起こした [28] [11] [8]。我々は、磁気プラズ マ効果による加熱の重要性を追求している [77] [29]。

高橋 (勲) らは池辺ら (NASA/GSFC) と協力し、 XMM-Newton 衛星によるケンタウルス銀河団の高 品質データを解析している [31] [44] [64] [69]。「あす か」により存在が示された温度 1.5 keV と 4 keV の 成分のほか、中心の数 kpc には、0.7 keV の成分も 確認された。しかし冷却流が予言するような大量の 低温プラズマが存在しないことは、ほぼ確実である。



 $\boxtimes$  6.2 b: A typical spectrum of the HXD-II Well detector unit, in response to the 662 keV gamma-rays from <sup>137</sup>Cs [24]. The three peaks represent 662 keV photo-peaks by GSO, BGO-bottom, and BGO-top, from higher to lower pulse heights.

## 6.2.5 Astro-E2 衛星に向けた硬 X 線検出 器 (HXD-II)の開発製作

#### ○ Astro-E2 衛星と硬 X 線検出器 HXD-II

2005年の打上げを目指し、宇宙X線衛星 *Astro-E2* 計画が進んでいる (www.astro.isas.ac.jp/astroe/indexj.html)。これは 2000 年 2 月にロケットの不具合のた め打上げ失敗した *Astro-E*の再挑戦機である [15]。搭 載される 4 つの観測装置のうち 1 つが硬 X 線検出器 (HXD-II) で、東大、宇宙研、広島大、埼玉大、理研、 阪大核セ、Stanford 大などの協力により開発・製作 される。HXD-II は 10-600 keV のエネルギー域で、 きわめて低いバックグラウンドをもち、硬 X 線領域 での宇宙観測を刷新する威力をもつ [78]。

#### ○ 検出器部 (HXD-S)の製作

HXD-II 装置の検出器部 (HXD-S) は重量 200 kg をもつ。GSO 結晶と BGO 結晶からなる井戸型フォ スイッチ検出器 (Well 検出器) を 16 本、複眼構造で 配置し、主検出器とする。GSO の前面には 2 mm 厚シリコン PIN ダイオードを置き、低エネルギー側 の感度を増強する。Well 検出器の周囲は、20 本の BGO アンチ検出器で堅くシールドする。

今年度は昨年度に引き続き、国分を中心に研究室 一丸となって、Well 検出器ユニットの製作を進めた [24] [50]。作業は、BGOやGSOの受け入れ試験、結 晶部材どうしの接着、光反射材の塗布・装着、防振 材や補強構造の接着、アラインメント、抜き取り振 動試験、全数の熱サイクル試験、要所ごとの特性測 定などからなる。途中、温度ストレスでBGO 結晶 が破損したため、接着剤を変更する手戻りがあった が、16本のWell 検出器の大部分を製作完了した。図 6.2 b に、その応答の例を示す。

並行してフォトチューブ、ブリーダ、プリアンプの 評価試験、ファインコリメータの準備、ハウジング の強度評価などを行った。古徳は理研で、アンチ検 出器ユニットの製作に参加した [48] [49] [73]。阪大 および理研でのビーム試験については、後述する。

Well および Anti ユニットは明星電気に納入され、 結晶とフォトチューブの光学接着、PIN ダイオード の挿入、プリアンプの配線などが進んでいる。間も なく HXD-S 全体の組み上げが始まる。

#### ○ アナログ電子回路部 (HXD-AE) の開発

HXD-Sからの100 チャンネルを越す信号出力は、 アナログ電子回路部(HXD-AE)で、わずか32Wの 消費電力を用いて高速に処理される。我々は宇宙研、 広島大、理研、明星電気(株)、クリアパルス(株)な どと共同し、HXD-AEを開発している。今年度は、 1号機からの性能アップ、回路の要所の試作とシミュ レーション、大信号に対する応答の評価などを行い [24] [50]、フライト用回路の設計を最終的に確定し た。この間に、放射線耐性を十分に考えたFPGAな どの部品選定、重要部品のアイソトープ照射試験な ども行なった。フライト用基板はほぼ製造が完了し、 間もなく組立・配線が行われる。 ○デジタル電子回路部 (HXD-DE)の開発

我々はまた HXD-II のデジタル電子回路部 (HXD-DE) を、埼玉大、理研、宇宙研、三菱重工 (株) など と共同で開発中である。高橋 (弘) らは、田代 (埼玉 大)、寺田 (理研) などと協力し、HXD-DEの搭載ソ フトウェアを整備するとともに [51]、地上ソフトウェ アの開発も進めた。HXD-DE フライト品はすでに製 作され、現在その試験が行われている。

## 6.2.6 将来に向けての技術開発

#### ○ 加速器ビーム実験

昨年度に続き理研、宇宙研、広島大などと協力し、 3回の加速器ビーム実験を行った。目的は、(1) HXD-II の検出器が宇宙空間で放射化される様子を定量化 すること、(2) 重イオンによる巨大なエネルギーデ ポジットに対する HXD-II の応答を調べること、(3) 宇宙研で高橋らが中心となって開発中のテルル化カ ドミウム (CdTe) 半導体 [18] [12] [13] の、衛星環境 での放射化特性を調べ [47]、この有望なデバイスが 宇宙用に使えることを実証することである。

実験はまず7月30日に阪大核物理センターで行われ、150 MeVの陽子ビームが供試体に照射された。 次いで理研リングサイクロトロンでは9月29日に 135 MeV/nucleonの $H_2^+$ ビーム、同じく11月24日 に90 MeV/nucleonのFe<sup>+24</sup>ビームが照射された [20]。その結果、(1) については、HXD-IIの検出器 の放射化特性はこれまで素材レベルで測定された結 果と矛盾がなく[26][86] [20]、(2) については十分に 速い信号の回復が確認できた [24][85]。(3) について は、村島らは図 6.2 c に示すように、昨年の実験デー タと合わせ、陽子の照射でCdTe に生じた約 100種 の同位体を同定し、軌道上で予想される CdTe の放 射化特性をほぼ確立した [17] [34] [26]。



 $\boxtimes$  6.2 c: The activation spectrum of CdTe irradiated by 150 MeV protons, measured externally by a Germanium detector [26][20].

Swift 衛星 BAT 検出器の開発

Swift 衛星 (http://swift.gsfc.nasa.gov) は、*HETE-*2 衛星 (理研などが運用中、http://hete.riken.go.jp) の後継機として、ガンマ線バーストの即時位置決め と、可視光・X線での追跡観測を目的とする。アメリ カを中心に開発され、2003 年 12 月に打ち上げられる。 バースト監視の主役は BAT (Burst Alert Telescope) で、コ - デッドマスクの下に、4mm 角の CdZnTe 検 出器を 32,768 個も並べ、広視野で硬 X線の撮像を行 う。日本からは、宇宙研、埼玉大、および東大が、少 数精鋭で BAT 装置の開発に参加している。岡田、高 橋 (弘) は、宇宙研や埼玉大の大学院生とともに、数 カ月交代でアメリカ NASA ゴダード研究所に滞在 し、BAT 検出器の較正データ解析に大きく貢献した [65] [71] [72] [80] [81]。

○フーリエ合成型の硬 X 線望遠鏡・顕微鏡の開発

我々は理研と協力し、「ようこう」HXT 装置で実 証された、「すだれコリメータ」を用いたフーリエ合 成法を改良し、宇宙用の硬X線望遠鏡および医療用 の硬X線顕微鏡を開発している[19][53]。古徳、岡田 らは昨年度に引き続き、理研の寺田や根来と協力し、 3次元イメージングのシミュレーションを通じ原理 を検証し、すだれ素子をタングステンの微細加工で 試作した[70][83]。岡田や宮脇は宇宙研グループと 緊密に協力し、100 μm ピッチの CdTe ストリップ素 子を開発し、その性能評価を行った[16][83][87]。

我々は、これら CdTe ストリップとすだれコリメー タを結合した 50-300 keV レンジの撮像検出器を、Si ストリップや CdTe ピクセルを用いたコンプトン望 遠鏡と組み合わせ [18] [14] [96]、軟ガンマ線検出器 (SGD) として、NeXT 衛星 (2010 の打ち上げ目標) に向け提案している [101]。

○ キャピラリープレートを用いた X 線光学系の開発

多数のガラス毛細管を束ねたキャピラリープレートは、その内面でのX線の全反射を用いて、軽く簡便なX線光学系として利用できる。江副は昨年度に引き続き、光線追跡シミュレーションにより、多段キャピラリープレートを利用した全天X線カメラの概念を発展させた[52][90][92][94][97]。

#### ○ 多結晶シンチレータの開発

無機シンチレータは単結晶として製造されるため、 単結晶を育成しにくい物質や、活性化物質のドープ により結晶成長が阻害される物質は、利用が難しかっ た。単結晶が製造できても、寸法とともに価格が急 騰することが多い。こうした問題を解決するため、単 結晶の微粒子を焼結した「多結晶シンチレータ」が 開発されている。笠間、国分、柳田らは、バイコウス キ・ジャパン(株)や神島化学(株)と協力し、いくつ かの多結晶シンチレータの特性を実測した結果、Ce を 0.5 - 0.8 mol% ド・プした YAG (Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>)の 多結晶は、単結晶と遜色ない優れたシンチレーショ ン特性を示すことを確認した[25] [84]。 <受賞>

 松下恭子(東理大),大橋隆哉(都立大),牧島一夫:日本 天文学会欧文報告論文賞, Publ. Astr. Soc. Japan 52, 658 (2000), "Metal Abandances in the Hot Interstellar Medium in Early Type Galaxies Observed with ASCA"に対し(2003年3月)。

<報文>

#### (原著論文)

- [2] Osone, S., Makishima, K., Matsuzaki, K., Ishisaki, Y. & Fukazawa, Y.: Search for Hot Gas in the Local Group with ASCA, *Publ. Astr. Soc. Japan* 54, 387 (2002)
- [3] Ezoe, Y., Iyomoto, N., Makishima, K. & Hasinger, G.: Long-Term X-Ray Variability of Quasars in the Lockman Hole Field Observed with ROSAT, *Publ. Astr. Soc. Japan* 54, 981 (2002)
- [4] Kobayashi, Y., Kubota, A., Nakazawa, K., Takahashi, T. & Makishima, K.: Publ. Astr. Soc. Japan 55, 273 (2003)
- [5] Namiki, M., Kawai, N., Kotani, T. & Makishima, K.: Evidence for Jet Collimation in SS 433 with the Chandra HETGS, *Publ. Astr. Soc. Japan* 55, 281 (2003)
- [6] Kawaharada, M., Makishima, K., Takahashi, I., Nakazawa, K., Matsushita, K., Shimasaku, K., Fukazawa, Y. & Xu, H: A New Candidate for a Dark Group of Galaxies, RXJ 0419+0225: *Publ. Astr. Soc. Japan* 55, in press (2003)
- [7] Uno, S., Mitsuda, K., Inoue, H., Takahashi, T., Makino, F., Makishima, K., Ishisaki, Y., Kohmura, Y. et al.: X-Ray Spectrum of Supernova 1993J Observed with ASCA and Its Evolution 8–572 Days after the Explosion, Astrophys. J. 565, 419 (2002)
- [8] Xu, H., Kahn, S., Peterson, J., Behar, E., Paerels, F, Mushotzky, R., Jernigan, J., Brinkman, A. & Makishima, K. Astrophys. J. 579, 600 (2002)
- [9] Isobe, N., Tashiro, M., Makishima, K., Iyomoto, N., Suzuki, M., Murakami, M. M. et al.: A Chandra Detection of Diffuse Hard X-Ray Emission Associated with the Lobes of the Radio Galaxy 3C 452, Astrophys. J. Lett. 580, L111 (2003)
- [10] Kubota, A., Done, C. & Makishima, K.: Another Interpretation of the Power-Law-Type Spectrum of an Ultraluminous Compact X-Ray Source in IC 342, Mon. Not. Roy. Astr. Soc. 337, L11 (2003)
- [11] Tamura, T., Kaastra, J. S., Makishima, K. & Takahashi, I.: High Resolution Soft X-ray Spectroscopy of the Elliptical Galaxy NGC 5044, Astron. Astrophys 399, 497 (2003)
- [12] Sato, G., Takahashi, T., Sugiho, M., Kouda, M., Mitani, T., Nakazawa, K., Okada, Y. & Watanabe, S.: Characterization of CdTe/CdZnTe detectors, *IEEE Trans. Nuclear Sci.* 49, 1258 (2002)

- [13] Watanabe, S., Takahashi, T., Okada, Y., Sato, G., Kouda, M., Mitani, T. *et al.*: CdTe Stacked Detectors for Gamma-Ray Detection, *IEEE Trans. Nuc. Sci.* 49, 1292 (2002)
- [14] Takahashi, T., Mitani, T., Kobayashi, Y., Kouda, M., Sato, G., Watanabe, S., Nakazawa, K., Okada, Y.*et al.*: High-Resolution Schottky CdTe Diode Detector, *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **49**, 1297 (2002)
- [15] Tashiro, M., Makishima, K., Kokubun, M., Ezoe, Y., Isobe, N., Kotoku, J., Matsumoto, Y., Okada, Y., Sugiho, M., Takahashi, I., Takahashi, H., Tamura, T., Terada, Y. *et al.*: Performance of the ASTRO-E Hard X-Ray Detector, *IEEE Trans. Nuc. Sci.*, **49**, 1893 (2002)
- [16] Okada, Y., Takahashi, T., Sato, G., Watanabe, S., Nakazawa, K., Mori, K. & Makishima, K.: CdTe and CdZnTe Detectors for Timing Measurements, *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **49**, 1986 (2002)
- [17] Murakami, M.M., Kobayashi, Y., Kokubun, M., Takahashi, I., Okada, Y., Kawaharada, M., Nakazawa, K. *et al.*: Activation Properties of Schottky CdTe Diodes Irradiated by 150 MeV Protons, *IEEE Trans. Nuc. Sci.*, **50**, in press (2003)
- [18] Takahashi, T., Nakazawa, K., Kamae, T., Tajima, H., Fukazawa, Y., Nomachi, M. & Kokubun, M.: High resolution CdTe Detectors for the Next-Generation Multi-Compton Gamma-Ray Telescope, SPIE 4851, 1228 (2003)
- [19] Kotoku, J., Makishima, K., Okada, Y., Negoro, H., Terada, Y., Kaneda, H. & Oda, M.: Fourier Synthesis Image Reconstruction using One-Dimensional Position Sensitive Detectors, *Applied Optics*, in press (2003)
- [20] Okada, Y., Kawaharada, M., Murakami, M., M., Kotoku, J., Kokubun, M., Makishima, K., Hong, S., Mori, M., Terada, Y. *et al.*: Response of the *ASTRO-E2* Hard X-ray Detector for Accelerated Ions, RIKEN Accel. Prog. Rep. **35**, 2002
- (Proceedings)
- [21] Terada, Y., Makishima, K., Ishida, M., Fujimoto, R., Matsuzaki, K. & Kaneda, H.: X-Ray Beaming due to Resonance Scattering in the Accretion Column of Polars, in *The Physics of Cataclysmic Variables and Related Objects*, ASP Conf. Ser. 261, 175 (2002).
- [22] Makishima, K., Murakami, M.M., Sugiho, M., Takahashi, H., Kubota, A. & Kobayashi, Y.: Intermediate Mass Black Holes and their Relation with AGN, in *Active Galactic Nuclei*, ASP Conf. Ser. **290**, 383 (2003).
- (学位論文)
- [23] Sugiho, M.: "X-ray Spectral Study of a Large Sample of Luminous Compact X-ray Sources in Nearby Galaxies", 博士論文

- [24] 川原田 円, "Response of the Cosmic Hard X-ray Detector HXD-II under Various Radiation Environments",修士論文
- [25] 笠間太介,「宇宙ガンマ線用多結晶シンチレータの基礎特性」,修士論文
- [26] 村上未生「宇宙硬 X 線・ガンマ線検出器の放射化バッ クグラウンド 特性」,修士論文(天文学専攻)
- <学術講演>
- (国際会議)

#### 招待講演

- [27] Makishima, K., Murakami, M. M., Sugiho, M., Takahashi, H., Kubota, A. & Kobayashi, Y.: Intermediate mass Black Holes and their Relation with AGN, Active Galactic Nuclei: from Central Engine to Host Galaxy (July 23-27, Meudon, France)
- [28] Makishima, K.: Thermal Structure of the Gas near the Cluster Center, Japan-Germany WS on Galaxies and Clusters of Galaxies (Oct. 29-31, Shuzenji)
- [29] Makishima, K.: X-ray Astronomy, International Workshop on Extremely High Energy Cosmic Rays (Nov. 5-6, RIKEN)
- [30] Makishima, K.: Measuring Magnetic Fields of Neutron Stars, Tokyo-Adelaide WS on Quarks, Astrophys. & Space Phys. (Jan. 6–8, U. Tokyo)
  - 一般講演
- [31] Takahashi, I.: XMM observation of the Central Region of the Centaurus Cluster, Japan-Germany WS on Galaxies and Clusters of Galaxies (Oct. 29-31, Shuzenji)
- [32] Kokubun, M.: Diffuse X-ray Emission from the Galactic Bulge, *ibid.*
- [33] Kawaharada, M.: The Dark Group Candidate, RXJ 0419+0225, *ibid.*
- [34] Murakami, M.M., Kobayashi, Y., Kokubun, M., Takahashi, I., Okada, Y., Kawaharada, M. et al.: Activation Properties of Schottky CdTe Diodes Irradiated by 150 MeV Protons, *IEEE Nuc. Sci.* Symp. & Med. Imaging Conf. (Nov. 7–19, Norfolk)
- [35] Makishima, K: Four states of Accreting Black Holes, it Black Hole Mini-Workshop with Dr.Chris Done (Sept. 19, ISAS)
- [36] Sugiho, M.: X-ray Spectral Study of ULXs observed by Chandra and Newton, *ibid.*
- [37] Murakami, M.M.: X-ray Spectral Property of a Massive Black Hole at Extremely High Accretion Rate, *ibid.*

#### (国内会議)

日本物理学会·秋の分科会(9月13~16日,立教大学)

[38] 山岡和貴,上田佳宏,井上一,久保田あや,牧島一 夫:銀河系内ジェット天体からのX線放射,15aRA5

- [39] 村上未生, 久保田あや, 牧島一夫ほか: 臨界降着率に 近い巨大ブラックホールの観測的研究, 15aRA6
- [40] 牧島一夫,松本縁,古徳純一,吉森正人,須賀一治ほか:太陽フレアにおける粒子加速の現場,15aRA7
- [41] 森正統,磯部直樹,田代信,鈴木雅也,阿部圭一,牧 島一夫,深沢泰司,伊予本直子:宇宙X線観測衛星 Chandra による電波銀河 3C452の観測,15aRA8
- [42] 磯部直樹,牧島一夫,田代信ほか:電波銀河のロープ における Energetics の X 線による診断, 15aRA9
- [43] 高橋弘充,国分紀秀,牧島一夫:「あすか」,XMM-Newton および Chandra 衛星による M31 中心領域 の観測,15aRA11
- [44] 高橋 勲,池辺 靖,川原田 円,牧島一夫:XMM-Newton 衛星による Centaurus 銀河団の観測, 15aRA12
- [45] 浦田裕次,小杉城治,小宮山裕,小林尚人,吉田篤 正,河合誠之,玉川徹,鳥居研一,関口和寛,小笠原 隆亮,高田唯史,能丸淳一,大山陽一,水本好彦家 正則,青木和光,渡部潤一,山田亨,戸谷友則,本原 顕太郎,牧島一夫:すばる望遠鏡による X-ray rich GRB(=GRB011019)の追観測,15pRA2
- [46] 三原建弘,根来均,小浜光洋,桜井郁也,中島基樹, 牧島一夫,松岡勝ほか:宇宙ステーション搭載「全天 X線監視装置 (MAXI)」の現状,15pRA4
- [47] 国分紀秀,古徳純一,牧島一夫:低高度衛星軌道での 高エネルギー束縛陽子の見積もり,15pRA0
- [48] 川添哲志,深沢泰司,大野雅功,山岡和貴,寺田幸 功,洪秀徴,牧島一夫,国分紀秀,古徳純一,高橋忠 幸:Astro-E2 衛星硬 X 線検出器 (HXD-II)の全天モ ニタ機能の開発(1),15pRA11
- [49] 洪秀徴,山岡和貴,寺田幸功,古徳純一,森正統,田代 信,深沢泰司,川添哲史,大野雅功,高橋忠幸,国分紀 秀,牧島一夫:Astro-E2 衛星硬X線検出器(HXD-II) の全天モニタ機能の開発(2),15pRA12
- [50] 川原田 円, 江副祐一郎, 岡田 祐, 笠間太介, 国分紀 秀, 古徳純一, 杉保昌彦, 高橋 勲, 高橋弘充, 牧島 一夫, 宮脇良平, 村上未生, 柳田健之ほか: Astro-E2 衛星硬 X 線検出器 (HXD-II) の WELL 検出部の開 発と性能評価, 15pRA13
- [51] 寺田幸功,田代信,江副祐一郎,高橋 弘充,鈴木雅也, 三谷烈史,国分紀秀,中澤知洋,山岡和貴,高橋忠幸, 牧島一夫:Astro-E2 衛星硬 X 線検出器 (HXD-II)の CPU 処理部の開発と現状,15pRA14
- [52] 江副祐一郎,牧島一夫, A. N. Brunton, G.W. Fraser:
   キャピラリプレート内面反射を用いた X 線集光系の
   開発(3), 16aRA2
- [53] 古徳純一,根来均,牧島一夫:フーリエ合成を用いた 3次元脳内顕微鏡の開発,16aRA13

天文学会・秋の年会(10月6~9日,宮崎シーガイア)

[54] 久保田あや,牧島一夫, Chris Done: 近傍渦巻銀河
 IC342 中の強X線源におけるスペクトル状態遷移の
 新解釈, N11a

- [55] 杉保昌彦,古徳純一,牧島一夫,久保田あや,水野恒 史:Chandra 衛星による近傍渦巻銀河中の大光度 X 線源の観測,N12a
- [56] 寺田幸功,牧島一夫,石田学:強磁場激変星の降着円 筒における共鳴線の異方的伝搬,N16a
- [57] 江副祐一郎, 松崎恵一, 関本裕太郎, 国分紀秀, 牧島 ー夫:「あすか」衛星による大質量星形成領域 Cepheus A と S140の観測, P21b
- [58] 柳田健之、江副祐一郎、国分紀秀、牧島一夫: Chandra 衛星による NGC2068 の観測、P50a
- [59] 高橋弘充,国分紀秀,牧島一夫:XMM-Newton お よび Chandra 衛星による M31の観測(2), R48a
- [60] 宮脇良平,杉保昌彦,牧島一夫:近傍の矮小不規則銀河 NGC4449の Chandra 衛星による X 線観測, R49a
- [61] 磯部直樹,牧島一夫,村上未生,田代信,鈴木雅也ほか:電波銀河のローブにおける Energetics の逆コン プトン X 線による診断, S02a
- [62] 阿部圭一,磯部直樹,田代信,鈴木雅也,森正統,牧 島一夫,村上未生ほか:電波銀河 Pictor A のローブ からの逆コンプトン X 線の検出, S01a
- [63] 村上未生,久保田あや,牧島一夫,洪秀徴,根来均:
   1型狭輝線セイファート銀河 Ton S180 の「あすか」
   による長期観測,S15a
- [64] 高橋 勲,池辺 靖,川原田 円,牧島 一夫: XMM-Newton 衛星による Centaurus 銀河団の観測, T06a
- [65] 岡田祐,佐藤 悟郎,渡辺伸,高橋忠幸,田代信,鈴 木雅也,古宇田学,杉保昌彦,牧島 一夫ほか:ガン マ線バースト観測衛星「Swift」搭載 BAT 検出器の 地上キャリプレーションの現状,W30a

日本天文学会・春の年会(3月24~26日,東北大学)

- [66] 牧島一夫,杉保昌彦,久保田あや,水野恒史: Chandra および XMM-Newton による近傍銀河の大光度X線 天体の観測,N44a
- [67] 江副祐一郎, 松崎恵一, 関本裕太郎, 国分紀秀, 牧島 ー夫: Chandra 衛星による大質量星形成領域 NGC 6334 の観測, P21a
- [68] 田代信,鈴木雅也,阿部圭一,森正統,磯部直樹,牧 島一夫,深沢泰司:電波銀河 Centaurus B からの X 線放射とエネルギー輸送,S08a
- [69] 高橋 勲,池辺 靖,田村隆幸,川原田 円,牧島 一夫: XMM-Newton 衛星による Centaurus 銀河団の観測 II,T12a
- [70] 岡田祐,宮脇良平,古徳純一,国分紀秀,牧島一夫 ほか:一次元半導体検出器とフーリエ光学系を用いた 高空間分解能ガンマ線イメージャーの開発,W17b
- [71] 佐藤悟朗,高橋忠幸,中澤知洋,渡辺伸,鈴木雅也, 田代信,岡田祐,高橋弘充ほか:ガンマ線バースト観 測用 Swift 衛星-Burst Alert Telescope-, W18a
- [72] 鈴木雅也,田代信,高橋忠幸,中澤知洋,渡辺伸,佐 藤悟朗,古宇田学,牧島一夫,国分紀秀,岡田祐,高 橋弘充ほか:ガンマ線バースト観測衛星 Swift 搭載 BAT 検出器の較正実験の評価,W19a

[73] 川添哲志,深沢泰司,大野雅功,村上未生,国分紀 秀,洪 秀徴,山岡和貴,高橋忠幸,牧島一夫ほか: Astro-E2 衛星搭載硬X線検出器(HXD-II)の全天モ 二夕機能の開発,W43a

物理学会・春の年会(3月28~31日,東北学院大学)

- [74] 寺田幸功,牧島一夫:強磁場の白色矮星における粒子 加速,28aSJ7
- [75] 柳田健之,江副裕一郎,牧島一夫:M78の Chandra 衛星による観測,28aSL2
- [76] XMM-Newton 衛星による電波銀河 3C 98 の観測: 磯部直樹,牧島一夫,村上未生,田代信,鈴木雅也, 阿部圭一,森正統,伊予本直子,金田英宏,28aSL9
- [77] 高橋 勲,川原田 円,牧島一夫,深沢泰司,中澤知洋: 銀河団プラズマ粒子の新しい加熱・加速機構,28aSL10
- [78] 牧島一夫,国分紀秀,高橋忠幸A,中澤知洋,深沢 泰司,田代信,山岡和貴,寺田幸功,村上敏夫ほか: Astro-E2 衛星で狙う硬 X 線物理学,28pSL2
- [79] 井上北斗,高橋忠幸,中澤知洋,三谷烈史,田中孝明, 牧島一夫,国分紀秀,川原田円,深沢泰司ほか:ア ナログ処理回路の改良によるAstroE2 衛星搭載シリ コン PIN 検出器の性能向上,28pSL3
- [80] 高橋弘充,岡田祐,国分紀秀,牧島一夫,佐藤悟朗, 渡辺伸,中澤知洋,高橋忠幸,鈴木雅也,田代信,S. Barthelmy ほか:ガンマ線バースト観測衛星 Swift 搭 載 BAT 検出器の較正実験の評価(1),28pSL8
- [81] 鈴木雅也,田代信,佐藤悟朗,渡辺伸,中澤知洋,高 橋忠幸,岡田祐,高橋弘充,国分紀秀,牧島一夫,S. Barthelmy ほか:ガンマ線バースト観測衛星 Swift 搭 載 BAT 検出器の較正実験の評価(2),28pSL9
- [82] 玉川徹,牧島一夫,宮坂浩正,桜井郁也ほか: CMOS イメージセンサーとガス電子増幅フォイルを用いた 宇宙 X 線偏光計の開発研究, 29aSL2
- [83] 岡田祐,宮脇良平,古徳純一,国分紀秀,牧島一夫ほか:CdTeストリップ検出器とフーリエ光学系による 宇宙硬X線イメージャーの開発,29aSL4
- [84] 笠間太介,国分紀秀,柳田健之,牧島一夫,柳谷高 公,八木秀喜,繁田岳志,伊東孝之:多結晶シンチ レータの特性評価,29pSC2
- [85] 川原田 円,国分紀秀,牧島一夫,洪秀 徴,寺田幸功, 宮坂浩正ほか:Astro-E2 衛星搭載 HXD-II 検出器の 宇宙線粒子に対する応答,29pSC3
- [86] 村上未生,川添哲志,川原田円,洪秀徴,小林謙仁, 三谷烈史,井上北斗,大野雅功,森正統,岡田祐,古 徳純一,寺田幸功,国分紀秀,ほか:陽子ビームを用 いた Astro-E2 衛星硬 X 線検出器 (HXD-II)の放射 化バックグラウンドの評価,29pSC4
- [87] 宮脇良平,岡田祐,国分紀秀,牧島一夫,中澤知洋, 高橋忠幸:テルル化カドミウム半導体による1次元 ストリップ検出器の特性評価,29pSP4
- [88] 古徳純一,牧島一夫,松本縁,小杉健郎ほか:太陽フ レアに伴う加速粒子スペクトルの推定,31pSK2

- [89] 牧島一夫:小田先生とブラックホール,小田先生を偲 ぶ会(6月27日,一橋講堂)
- [90] 江副祐一郎:キャピラリープレートを用いた次世代X 線光学系の開発,宇宙開発事業団談話会(7月18日)。
- [91] 牧島一夫: ブラックホールの最新像,電力館科学ゼミ ナール (渋谷電力館,9月21日)
- [92] 江副祐一郎: キャピラリープレートを用いた次世代X 線光学系の開発,理化学研究所談話会(10月3日)。
- [93] 牧島一夫:ジャコーニとX線天文学,ノーベル賞記念 緊急討論会(北の丸・科学技術館,10月12日)
- [94] 江副祐一郎: キャピラリープレートを用いた次世代X 線光学系の開発と応用,大阪大学宇宙地球科学 談話 会(11月20日)。
- [95] 古徳純一,松本縁,牧島一夫,小杉健郎,吉森正人: 「ようこう」衛星ガンマ線スペクトル計GRSと硬X 線望遠鏡HXTを用いた,太陽フレアに伴う粒子加速 の検証,高宇連/理研シンポジウム「宇宙における電 子と陽子の加速」(11月25~26日,理研)
- [96] 高橋忠幸,中澤知洋(宇宙研),釜江常好,田島宏泰, 能町正治,深沢泰司,国分紀秀:100kg衛星と次世代 検出器を用いて行う新しいガンマ線天文学,宇宙科 学シンポジウム(1月9~10日,宇宙研)
- [97] 江副祐一郎, 牧島一夫, 三原建弘, 常深 博, 松岡 勝; キャピラリープレートを用いた広視野かつ軽量 X 線 光学系の開発, 同上 (ポスター)。
- [98] 牧島一夫:高感度の硬 X 線観測で探るブラックホー ルへの物質流入,科研費・基研研究会「プラックホー ル天文学の新展開」(2月17~19日,京大基研)
- [99] 宮脇良平: Chandra 衛星による近傍の不規則銀河 NGC4449 中の大光度 X 線源の観測,同上。
- [100] 村上未生: 降着率が高い大質量ブラックホール, Narrow-Line Seyfert 1,同上。
- [101] 牧島一夫および NeXT SGD チーム: NeXT 衛星搭 載用ソフトガンマ線検出器 (SGD), 宇宙放射線シン ポジウム (3月 18~19日, 宇宙研)
- [102] 杉保昌彦: "X-ray Spectral Study of a Large Sample of Luminous Compact X-ray Sources in Nearby Galaxies", 高宇連 D 論発表会 (3 月 20 日, 宇宙研)

その他

## 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。核融合研究は既にトカマク方式 を用いて、「燃焼プラズマ」(核融合反応による自己 加熱が支配的となるプラズマ)の実現を狙える段階 にあるが、われわれの研究室ではトカマクの効率を 改良した球状トカマク(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の 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。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。さらに、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 れらの間で遷移を起こす。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 もなる。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(大半径 0.38 m、小半径 0.25 m、トロイ ダル磁場 0.3 T、プラズマ電流 0.2 MA)を新設した。 この装置は電子密度 $2 \times 10^{19} \,\mathrm{m}^{-3}$ 、電子温度 $200 \,\mathrm{eV}$ 、  $\beta = 5-10\%$ のプラズマを生成できるよう設計されて おり、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、波動を用いたブラ ズマ加熱等の研究を行っている。また、プラズマ加 熱あるいはプラズマ計測の手法においても 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。更に、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も活用して 幅広い研究を行っている。平成15年度には、TST-2 を本郷より九州大学に移設し(図 6.3 a)、8.2 GHz の高周波を使ってプラズマ電流を駆動する実験を行 う。年度末には柏新キャンパスの実験棟に再度移設 し、本格的な ST 研究を展開する予定である。

## 6.3.1 TST-2 球状トカマク実験

#### 磁気リコネクション

内部磁気リコネクション(IRE)はSTに特有の MHD 不安定性であり、プラズマ電流に正のスパイ クが現れ、プラズマのエネルギー損失を引き起こす。 この不安定性により、電流分布が変化することがわ かっており、逆磁場ピンチ配位で見られる安定配位へ の緩和との類似性が指摘されている。TST-2でIRE の特徴について調べたところ、IREの強さには様々 なレベルがあり、プラズマのエネルギー・粒子損失 等は、プラズマ電流の変化の大きさに比例すること や、IRE 発生時に不純物イオンの温度が上昇するこ



 $\boxtimes$  6.3 a: TST-2 spherical tokamak being transported out of the Hongo Campus.

とがわかった。明瞭な IRE はプラズマ電流が最大 100 kA 程度の放電の後半にしばしば観測され、IRE に共通する特徴は下記のとおりである。(i) 磁気揺動 振幅が増加し、プラズマ電流のスパイクのピークと ほぼ同時に最大となる。(ii) 水素や低イオン化エネ ルギースペクトル線が IRE からやや遅れて最大とな る。(iii)100 keV 程度の硬 X 線が IRE 前から現れ始 め、IRE の直前に発生が止まる。(iv) このときに、電 子密度・軟 X 線・高イオン化エネルギーのスペクト ル線 ( $C^{4+}$ ,  $O^{4+}$  等) 強度の急激な減少が起きる。同 時にこれらのスペクトル線で測定した不純物イオン の温度が上昇し,数百  $\mu$ s の時定数でもとのレベルに 戻る。

図 6.3 bは、IRE 前後のイオン温度の変化、及び スペクトル線の強度変化を示したもので、プラズマ 電流の変化の似ている4つの放電を用いた。これら の温度の波形と同様の波形が逆磁場ピンチプラズマ でも観測されており,磁気リコネクションに起因す る加熱が起きている可能性が示唆される。加熱エネ ルギーの源は、プラズマ中の磁気エネルギーと考え て矛盾しない。TST-2 で観測されているのは、不純 物イオンであることと、低エネルギー成分(熱速度 成分)の加熱が見られたことから,遁走イオンとは 異なる機構である可能性が高い。

静電プローブアレイを用いて周辺プラズマにおけ る分布の時間発展を計測し、IRE 前後の周辺プラズ マ構造の変化を調べた。IRE の直後は密度や電子圧 力の勾配が平坦化し、周辺部のパラメータが上昇す る。これは IRE によって熱や粒子が周辺部に吐き出 された結果と思われる。同時にプラズマ電位と流れ の分布を計測し、IRE 直前には存在した電場のシア 及び流れのシアが、直後には消滅しており、IRE に 伴い周辺部の流れ構造が大きく変化することが判明 した。



 $\boxtimes$  6.3 b: Changes at an IRE of (a) the plasma current, (b) intensities of various line spectra, and (c) ion temperatures derived from these line spectra.

#### プラズマ波動実験

ST の特徴の一つは、従来のトカマクに比べて小さ い磁場で高い密度のプラズマを閉じ込められる点で あるが、このような高 $\beta$ プラズマにおいて高次高調 速波(HHFW)は加熱・電流駆動の方法として期待 されている。14年度に行った予備実験では、プラズ マの有無によるアンテナ放射抵抗の変化に対応して 整合をとることに成功した。最高200kWの電力をア ンテナに供給したが、明確な加熱は観測されていな い。加熱実験を評価するためには電子温度測定が不 可欠なので、現在電子バーンシュタイン波(EBW) 軟 X 線、トムソン散乱による電子温度計測の開発を 進めている。

コムラインアンテナを用いた HHFW 波動実験の 際示唆された周波数スペクトルの拡がりを、数 ms という高時間分解能で詳しく計測した。トロイダル 方向におよそ 60°離れたプローブで測定されたスペ クトルでは、ピークから 10dB 下がった点でおよそ 30 kHz 程度の周波数拡がりが見られた。周波数拡散 の原因としてはプラズマ周辺部での密度揺動による 散乱が有力な候補として考えられる。実際、放電中 にガスを注入して密度を上げると、スペクトルの変 化が観測された。現在シミュレーション計算との比 較を行っている。

#### 測定器の開発

## EBW を用いた電子温度計測と加熱の研究

STでは、電子のプラズマ周波数 ( $\omega_{pe}$ ) はサイクロ トロン周波数( $\omega_{ce}$ )より高いため、高い誘電率をも つ。このようなプラズマでは通常プラズマ計測や加 熱に使われる電子サイクロトロン波(ECW)は伝播 できないため、EBW を用いることが提案されてい る。ECW は電磁波(横波)であり、プラズマ外の 真空領域でも伝播できるが、EBW はプラズマ中で のみ存在できる。プラズマ中で黒体輻射によって生 じる EBW をプラズマ外で検出するためには、ECW にモード変換する必要がある。モード変換効率は密 度勾配に依存するので、密度分布も同時に測る必要 がある。図 6.3 c に示すように、モード変換がおきる 領域の密度勾配は高々数 cm である。測定された密 度勾配を用いてモード変換効率を一次元全波コード で計算し、電子温度分布を求めた。電子温度はプラ ズマ中心部で約 300 eV であることがわかった。

この逆過程を用いると、プラズマ外部から強力な 電磁波を入射し、EBWにモード変換させてプラズマ に吸収させることで、プラズマの加熱や電流駆動が できる。プラズマ中でEBWが伝播する様子は光線 追跡計算により求めることができる。1)赤道面付 近から入射した波動はプラズマ中で伝播方向が変化 する、2)赤道面よりわずかに離れたところから入射 した波動は伝播方向が変化する前に吸収される、3) 赤道面より大きく外れたところから入射した EBW はプラズマ中心に到達する前に吸収される、という ことがわかった。15年度には 200 kW 程度の高周波 電力を用いて、100 kA 程度の電流を流す実験を九州 大学と共同で行うことを計画している。



☑ 6.3 c: Density profile and density gradient (left). Measured radiation temperature and deduced electron temperature (right).

#### トムソン散乱による電子温度計測

電子温度・電子密度を同時に測定できるトムソン 散乱計測装置を開発している。電子温度は散乱され たレーザ光のドップラー拡がりから、電子密度は散 乱光の光量から求まる。TST-2では、YAGレーザの 倍波(波長532 nm, 230 mJ/pulse, 10 Hz)を用いる。 倍波での測定は基本波(1064 nm)に比べて光子の数 は約1/4になるが、安価で高検出効率の光検出器が 使えるため、多チャンネル化に有利である。プラズ マ中に入射したレーザの散乱光は、球面ミラーを用 いて光ファイバーに集光し、伝送された散乱光は検 出器へ導かれる。分光器は、多段の干渉フィルター と APD (Avalanche Photo Diode)により構成され るポリクロメーターである。干渉フィルターを光軸 に対して9°傾けて使用するが、この際波長のシフト と約11%の光量損失がある。 実効電荷数の測定

プラズマからの制動放射強度を測定することによっ て実効電荷数の計測を行った。実効電荷数は、プラ ズマ中の不純物量の目安を与える重要な指標である。 制動放射強度測定に用いる525±2nmの波長領域に は線スペクトルがないことを可視分光器を用いて確 認し、この領域に透過域をもつ干渉フィルターと光 電子増倍管検出器を用いた計測器を製作した。電子 温度が十分高くプラズマ電流がピークに達した後の 比較的定常的な時間帯では制動放射光計測が可能で あるが、電子温度の低い、プラズマ電流の立上がり・ 立下り時や、IRE 直後には、制動放射光以外の放射 を検出するため、実効電荷数測定が不可能となるこ とがわかった。

測定された制動放射強度、線積分密度、電子温度、 プラズマの最外殻磁気面位置を用いて TST-2 プラズ マにおける実効電荷数を導出した。プラズマ電流が 100 kA 付近の電子温度を 300-400 eV として実効電 荷数を求めると、1-3 の間で推移する事がわかった。 電子温度の絶対値計測の精度が向上し、かつ電子温 度分布、電子密度分布が決定されると実効電荷数計 測の精度向上が可能となる。IRE 直後の計測不可能 な時間帯を放射強度のスパイクの時間幅と仮定する と、それ以後の計測可能な時間帯で、電子温度一定 と仮定した場合、実効電荷数は上昇していることが わかった。これは全放射強度の上昇と同期し、壁か らの不純物の侵入の結果と考えられる。

#### X 線波高分析

軟X線波高分析測定は、プラズマから放射される 軟X線のエネルギースペクトルを測定し、電子温度 や不純物量を求めるものである。検出器はシリコン にリチウムをドープしたSi(Li)型検出器で、これに 軟X線が入射するとそのエネルギーに比例した高さ のパルスを発生する。このパルスの高さのヒストグ ラム(エネルギースペクトル)を作成し、その傾き から電子温度を求めることができる。較正は<sup>55</sup>Feの 密封線源を用いて行った。50 MHz サンプリングの高 速 ADC を用いたパルス波形の直接処理という手法 を新たに導入し、1 ms という高時間分解能での解析 を行った。

X線スペクトル解析により求まった TST-2 プラズ マの電子温度は、計数率が最も多く信頼度の高い時 間で 340 eV の値を取る。この結果は EBW 計測に よって求めた電子温度と一致している。絶対値の不 確定要素があることから、スペクトルの形を優先し てフィッティングさせた場合、電子温度は 470 eV の 値をとる。従って TST-2 球状トカマクプラズマの電 子温度はデータ解析の不確定性を考慮に入れて 300-500 eV の範囲である。放電後半では TST-2 プラズ マの電子の速度分布は単純な Maxwell 分布をしてお らず、高エネルギーの高速電子が存在することが示 唆される。これはプラズマ中にかかっている誘導電 場により加速され続ける逃走電子の生成によると考 えられる。

## 6.3.2 トカマクプラズマ中の径電場構造に おける電極バイアスの効果

トカマクプラズマの閉じ込め改善において、径電 場の急峻な構造形成が重要な役割を果たしている。 トカマクにおいて、プラズマ中に挿入した電極を用いて電圧を印加する(電極バイアス)と、自発的H モード遷移と同様に改善閉じ込め状態が得られる。 このとき局所的にピークを持つ径電場構造の形成が 観測されている。本理論研究は電極バイアスという 外部駆動力が存在する場合の径電場構造形成機構の 理解を目的とする。電場を決定するモデルは径方向 電流(ここではシア粘性による電流、新古典輸送過 程から生じる局所電流、リミターへの直接損失によ る軌道損失電流、電極電流を考慮)のつりあいが基 本となる。それぞれの電流項の径電場に関する依存 性が重要となる。本モデルは複数の駆動力項を含み、 自発遷移と電極バイアス遷移両者を包括している。 同一の境界条件から、空間的に一様な径電場分布と ともに、局所的なピークを持つ孤立波解が複数個得 られる。定常解には安定な領域と不安定な領域があ り、その境界点が1つの状態から他の状態へ遷移す る臨界点を与える。臨界点でのモードの安定性解析 から、ピークを1つ有する構造への遷移が選択的に 起こることがわかる。新古典輸送と軌道損失という ふたつの機構の競合から、圧力勾配をパラメータと した自発遷移への電極バイアスの効果がわかる。正 バイアス時には新古典輸送項がもたらす特徴が強く 現れ、多くの孤立波解が存在し得るのに対して、負 バイアス時には電場に関する径電流の複雑な非線形 応答の影響が現れる。また、圧力勾配が大きくなる と負バイアス時には遷移が起こらない。複数要素の 競合からもたらされる複雑な非線形応答は、さらに 多くの解への分岐をもたらす。径電場構造は対称性 を破る要素に敏感に反応し、プラズマパラメータの 空間分布を考慮した場合、ピーク位置は正(負)バ イアス時では勾配の強い(弱い)領域に引き寄せら れる (Fig. 6.3 d)。 X および x は、規格化した径 電場および位置である(電極とリミターの位置はそ れぞれ x = -20 および x = 20 )。ピークの移動量 はパラメータの曲率に対数的な依存性を示す。そし て、ひとつ山構造のピーク位置が、空間非対称項に より多数山構造の一番外側のピーク位置に現れるの で、径電場空間構造の測定からシア粘性係数を推定 することができる。

#### 6.3.3 学外機関との共同研究

JT-60Uおよび JFT-2Mトカマクにおける共同研究

トカマク型核融合炉においては、通常トーラス中 心部に設置されるトロイダル電場誘起用のセンター ソレノイド(CS)を用いてプラズマを生成し、プラ ズマ閉じ込めに必要なプラズマ電流を立ち上げるが、 CSを使わずにプラズマ電流を立ち上げることがで きれば核融合炉の設計は飛躍的に改善される。これ は、当研究室で研究しているST核融合炉では特に



 $\boxtimes$  6.3 d: Effect of a non-uniform background density profile *n* (dashed line). Radial electric field structures with single (A) and triple peaks (C) are shown.

深刻な課題である。そこで、CSを使わないプラズマ 電流立ち上げ法を開発するため、電流駆動・加熱設備 の整っている日本原子力研究所のJT-60Uトカマク で共同実験を行っている。平成14年度には、図6.3 eに示すように高周波(ECW およびLHW)、中性 粒子ビーム入射(NBI) ならびに垂直磁場コイルと 形状制御コイルのみを使った、CSなしプラズマ立ち 上げの実証に成功した。生成されたプラズマはプラ ズマ境界部および内部に輸送障壁をもつため閉じ込 め性能が優れており、かつ自発電流が90%以上とい う核融合炉実現のために有利な条件を満たしていた。 これは画期的な成果であり、多くの新聞に報道され たほか、IAEA 主催の国際会議でもポストデッドラ インの口頭発表(世界中で3件のみ)に選ばれるな ど、世界的に高い評価を得ている。



⊠ 6.3 e: Plasma current rampup by RF and NB heating and current drive, combined with induction by vertical field and shaping coils, in JT-60U.

JFT-2Mにおいて、高閉じ込めモード時のプラズ マ周辺部領域でMHD 揺動が観測されている。高速 駆動プローブを用いて磁気揺動に同期する浮遊電位 揺動を計測した結果、高閉じ込めモード時特有の磁気 揺動と極めて相関が強い浮遊電位揺動(約 290 kHz) が検出され、セパラトリックスから遠ざかるにつれ て浮遊電位揺動の振幅が指数関数的に減少する様子 が観測された。また、周波数が異なる(約 80 kHz)が 磁気揺動と発生のタイミングが近い揺動が反射計に も検出された。

#### LHD ヘリカル装置における共同研究

LHD ヘリカル装置において、プラズマの安定性や 閉じ込め性能を改善するため、磁力線のピッチ角を 表す回転変換の制御が重要であると理論的に予測さ れる。これを達成する一つの方法として、プラズマ 中に電流を流すことが考えられる。このためには、 プラズマ中に一方向に伝播する波を励起する必要が ある。このような実験を可能にするため、新型の進 行波励起アンテナの開発を行っており、14 年度には その製作を完了させた。今後これを LHD に設置し、 東大主導の実験を行っていく予定である。

プラズマを効率良く閉じ込めて核融合反応を達成 するために、プラズマ中の不純物粒子輸送やプラズ マ中心への粒子供給は重要である。これらを調べる ために、LHD プラズマに様々な不純物 (C, Al, Ti, Mo, etc.) ペレットを入射した。粒子の振る舞いを調 べるために干渉フィルター (中心波長 536 nm、半値 幅 6.2 nm、透過率 66%) と光電子増倍管を用いて、 0.1 msの時間サンプリングで可視域制動放射計測を 行った。その波長付近は強い不純物ラインがない領 域として知られている。プラズマから放射される制 動放射強度を測定することでプラズマの平均イオン 価数である実効電荷数 (Z<sub>eff</sub>)を求めることができる。 炭素ペレットの場合は速い時間変化で Zeff 分布は平 坦になり、電子密度は中心の密度が上昇して周辺が 減少することから粒子拡散が起こっていることがわ かる。チタンペレットの場合は Zeff 分布からプラズ マの外側で溶融して、ある価数まで達した後、徐々 にプラズマ内部への輸送・イオン化が進んでいること を示唆する結果を得た。電子密度分布は周辺の密度 が減少せずに、中心での密度が徐々に増加している。

#### NSTX 球状トカマクにおける共同研究

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。当 研究室はこれらの研究グループと緊密な協力関係を もっており、特に NSTX の実験には直接参加してい る。14 年度にはプラズマ電流立ち上げシナリオの開 発および 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った。15 年度には東大主導の プラズマ電流立ち上げ実験を行う予定である。

#### <報文>

(原著論文)

- N. Kasuya, K. Itoh, Y. Takase: Multiple Bifurcation of the Radial Electric Field Structure Induced by Electrodes in Tokamaks, Plasma Phys. Control. Fusion 44, A287–A292 (2002).
- [2] Y. Takase, T. Fukuda, X. Gao, M. Gryaznevich, S. Ide, S. Itoh, Y. Kamada, T. Maekawa, O. Mitarai, Y. Miura, Y. Sakamoto, S. Shiraiwa, T. Suzuki, S. Tanaka, T. Taniguchi, K. Ushigusa, JT-60 Team: Plasma Current Start-up, Ramp-up, and Achievement of Advanced Tokamak Plasmas without the Use of Ohmic Heating Solenoid in JT-60U, J. Plasma Fusion Res. **78**, 719–721 (2002).
- [3] N. Takeuchi, R. Kumazawa, K. Saito, T. Watari, T. Seki, Y. Torii, T. Mutoh, Y. Takase, T. Yamamoto: The Radio Frequency Characteristics of the Combline Antenna, J. Plasma Fusion Res. SE-RIES 5, 314–317 (2002).
- [4] H. Nozato, S. Morita, M. Goto, A. Ejiri, Y. Takase: Measurement of bremsstrahlung profile with a high-spatial resolution on LHD, J. Plasma Fusion Res. SERIES 5, 442–445 (2002).
- [5] O. Mitarai, Y. Takase: Plasma Current Rampup by the Outer Vertical Field Coils in a Spherical Tokamak Reactor, Fusion Sci. Technol. 43, 67–90 (2003).
- [6] B. Jones, P.C. Efthimion, G. Taylor, T. Munsat, J. R.Wilson, J.C. Hosea, R. Kaita, R. Majeski, R. Maingi, S. Shiraiwa, J. Spaleta, and A. K. Ram: Controlled Optimization of Mode Conversion from Electron Bernstein Waves to Extra-ordinary Mode in Magnetized Plasma, Phys. Rev. Lett. **90**, 165001 (2003).
- [7] N. Kasuya, K. Itoh, Y. Takase: Analysis of the Radial Electric Field Structure Bifurcation Induced by Electrodes in Tokamaks, in "Bifurcation Phenomena in Plasma" (ed. S.-I. Itoh and Y. Kawai, Kyushu Univ. Press, Fukuoka, 2002) pp. 341–354.
- [8] N. Kasuya, K. Itoh, Y. Takase: Asymmetrical Bifurcation of the Radial Electric Field Structure Induced by Electrode Biasing in Tokamaks, Plasma Phys. Control. Fusion 45, 183–198 (2003).
- [9] H. Nozato, S. Morita, M. Goto, A. Ejiri, Y. Takase: Acceleration characteristics of spherical and nonspherical pellets by the LHD impurity pellet injector, Rev. Sci. Instr. 74, 2032–2035 (2003).
- [10] T. Tokuzawa., K. Kawahata, K. Tanaka, Y. Nagayama, T. Kaneba, A.Ejiri: X-mode pulsed radar reflectometer for density fluctuation measurements on LHD, Rev. Sci. Instr. 74, 1506–1509 (2003).
- [11] M.Gilmore, W.A.Peebles., S.Kubota, X.V.Nguyen, and A.Ejiri: Progress toward a practical magnetic field diagnostic for low-field fusion plasmas based on dual mode correlation reflectometry, Rev. Sci. Instr. 74, 1469–1472 (2003).

[12] S.Shiraiwa, Y.Nagashima, M.Ushigome, T.Yamada, T.Taniguchi, S.Ohara, K.Yamagishi, H.Kasahara D.Iijima, Y.Kobori, T.Nishi, M.Aramasu, A.Ejiri, and Y.Takase: Electron Bernstein wave emission diagnostic assisted by reflectometry on TST-2 spherical tokamak, Rev. Sci. Instr. 74, 1453–1456 (2003).

## (会議抄録)

- [13] A. Ejiri, S. Shiraiwa, H. Kasahara, D. Iijima, Y. Kobori, T. Nishi and Y. Takase: Visible Fluctuation Measurements on the TST-2 Spherical Tokamak, in High Temperature Plasma Diagnostics (Proc. 14th Top. Conf., Madison, WI, USA, 2002).
- [14] Y. Takase, C.P. Moeller, T. Seki, N. Takeuchi, T. Watari, R. Callis, A. Ejiri, H. Ikezi, H. Kasahara, N. Kasuya, R. Kumazawa, T. Mutoh, K. Ohkubo, R.A. Olstad, M. Saigusa, K. Saito, S. Shiraiwa, T. Taniguchi, H. Torii, H. Wada, K. Yamagishi and T. Yamamoto: Development of a Fishbone Travelling Wave Antenna for LHD, in Fusion Energy 2002 (Proc. 19th Int. Conf., Lyon, France, 2002) paper IAEA-CN-94/FT/P2-05.
- [15] Y. Takase, S. Ide, S. Itoh, O. Mitarai, O. Naito, T. Ozeki, Y. Sakamoto, S. Shiraiwa, T. Suzuki, S. Tanaka, T. Taniguchi, M. Aramasu, T. Fujita, T. Fukuda, X. Gao, M. Gryaznevich, K. Hanada, E. Jotaki, Y. Kamada, T. Maekawa, Y. Miura, K. Nakamura, T. Nishi, H. Tanaka, K. Ushigusa, and the JT-60 Team: Formation of an Advanced Tokamak Plasma without the Use of Ohmic Heating Solenoid in JT-60U, in Fusion Energy 2002 (Proc. 19th Int. Conf., Lyon, France, 2002) paper IAEA-CN-94/PD/T-2.
- [16] A. Ejiri, S. Shiraiwa, Y. Takase, H. Kasahara, D. Iijima, Y. Kobori, T. Nishi, T. Yamada, M. Ushigome, Y. Nagashima, T. Taniguchi, K. Yamagishi: Ion Temperature Increase During MHD Events on the TST-2 Spherical Tokamak, in Fusion Energy 2002 (Proc. 19th Int. Conf., Lyon, France, 2002) paper IAEA-CN-94/EX/P4-10.
- [17] N. Kasuya, K. Itoh, Y. Takase: Effect of Electrode Biasing on the Radial Electric Field Structure Bifurcation in Tokamak Plasmas, in Fusion Energy 2002 (Proc. 19th Int. Conf., Lyon, France, 2002) paper IAEA-CN-94/TH/P3-05.
- (国内雑誌)
- [18] 高瀬雄一:「急速に進展する球状トカマク炉の研究」 文部科学時報 平成15年2月 特集 核融合研究 開発について(ぎょうせい 2003)pp.38-39.
- [19] 江尻晶:「ローマクラブとクレタ文明と核融合」 文部科学時報 平成15年2月 特集 核融合研究開発 について(ぎょうせい 2003)pp.24-25.
- [20] 高瀬雄一: 「ST 研究の最近の進展 -MAST と NSTX-」(解説)プラズマ・核融合学会誌 **79**, 336-344 (2003).

(学位論文)

- [21] 糟谷直宏: "Bifurcation of the Radial Electric Field Structure Induced by an Externally Imposed Potential in Tokamak Plasmas (トカマクプラズマにお ける外部印加ポテンシャルによる径電場構造分岐)" (博士論文)
- [22] 谷口智利: "Frequency Broadening of the High Harmonic Fast Wave in Plasmas (プラズマ中における 高次高調速波の周波数拡散)"(修士論文)
- [23] 飯島大介:「TST-2 球状トカマクプラズマの軟 X 線 スペクトル解析」(修士論文)
- [24] 小堀陽佑:「TST-2 球状トカマクプラズマにおける実 効電荷数測定に基づく不純物挙動の研究」(修士論文)
- [25] 西友一郎:「トムソン散乱装置の製作とプラズマ測定」 (修士論文)

(著書)

[26] 『第三世代の大学 東京大学新領域創成の挑戦』(U田 貝香門編(東京大学出版会 2002) pp. 74-75.

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [27] Y. Takase: "Plasma Start-up and Current Rampup with Minimal Use of OH Solenoid Flux", ITPA Topical Group Meeting on Steady State Operation and Energetic Particles, Cadarache, France, Oct. 21–23, 2002.
- [28] Y. Takase, S. Shiraiwa, T. Taniguchi, O. Mitarai, S. Ide, T. Fukuda, Y. Sakamoto, T. Suzuki, X. Gao, Y. Kamada, Y. Miura, K. Ushigusa, S. Itoh, S. Tanaka, T. Maekawa, M. Gryaznevich, JT-60 Team: "Formation of an advanced tokamak plasma without the use of OH solenoid in JT-60U", 44th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, Orlando, FL, USA, Nov. 11–15, 2002.
- [29] S. Shiraiwa, H. Kasahara, D. Iijima, T. Nishi, Y. Kobori, A. Ejiri, Y. Takase, Y. Nagashima, T. Yamada, T. Taniguchi, K. Yamagishi: "Electron Bernstein wave diagnostic development on the TST-2 spherical tokamak", 44th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, Orlando, FL, USA, Nov. 11–15, 2002.
- [30] Y. Takase: "Plasma Current Startup without the Ohmic Solenoid in JT-60U and Implications for ST Reactors", Joint Spherical Torus Workshop and US-Japan Exchange Meetings, Princeton, NJ, USA, Nov. 18–21, 2002.
- [31] S. Shiraiwa, H. Kasahara, D. Iijima, Y. Kobori, T. Nishi, M. Aramasu, A. Ejiri and Y. Takase, Y. Nagashima, M. Ushigome, T. Yamada, T. Taniguchi, S. Ohara and K. Yamagishi: "Electron Bernstein wave diagnostic development on TST-2 spherical tokamak", Joint Spherical Torus Workshop and US-Japan Exchange Meetings, Princeton, NJ, USA, Nov. 18–21, 2002.

#### 招待講演

[32] Y. Takase: "Recent Progress on the TST-2 Spherical Tokamak", IAEA Research Co-ordination Meeting on Comparison of Compact Toroid Configurations, Vienna, Oct. 28–Nov. 1, 2002.

(国内会議)

一般講演

- [33] 高瀬雄一:「核融合研究の新しいあり方検討小委員会 活動状況報告」 核融合ネットワーク委員会 核融合 研 4/30/2002
- [34] 高瀬雄一:「球状トカマク新規プロジェクト」 第2 回新規プロジェクト部会 文部科学省 5/31/2002
- [35] 高瀬雄一:「球状トカマク新規プロジェクト」 第3 回新規プロジェクト部会 文部科学省 6/11/2002
- [36] 高瀬雄一:「JT-60 改修計画における物理検討の概要」第4回核融合エネルギー連合講演会 阪大コンベンションセンター 6/13-14/2002
- [37] 糟谷直宏、伊藤公孝、高瀬雄一:「トカマクプラズマ中の径電場構造における電極バイアスの効果」第4回核融合エネルギー連合講演会 阪大コンベンションセンター 6/13-14/2002
- [38] 谷口智利、高瀬雄一、江尻晶、白岩俊一、牛込雅裕、 永島芳彦、笠原浩史寛史、山田琢磨、飯島大介、小堀 陽佑、西友一朗、荒益将、大原伸也、山岸健一:「球 状トカマクにおける高次高調速波の周波数拡がり」 第4回核融合エネルギー連合講演会 阪大コンベン ションセンター 6/13-14/2002
- [39] 糟谷直宏、伊藤公孝、高瀬雄一:「トカマクプラズマ 中の径電場構造における電極バイアスの効果」 理 論共同研究研究会「プラズマ理論の諸問題と展開」 核融合研 7/2002
- [40] 高瀬雄一:「先進的 RF 手法及び合体を用いた超高 ベータ球状トカマクの開発」 特定領域「核融合燃焼 科学の新展開」ヒアリング 核融合研 8/8/2002
- [41] 高瀬雄一:「JT-60Uにおける CS なし電流立ち上げ 実験」第3回プラズマ・核融合学会「球状トーラ ス」研究調査専門委員会 核融合研 8/22-23/2002
- [42] 白岩俊一、高瀬雄一:「TST-2 における球状トカマ ク研究 –HHFW, EBW を用いた加熱と計測の最近 の実験結果–」第3回プラズマ・核融合学会「球状 トーラス」研究調査専門委員会 核融合研 8/22– 23/2002
- [43] 高瀬雄一:「センターソレノイドコイルを用いないプ ラズマ立ち上げ(1)」第1回トーラス実験専門部 会 原研那珂研 8/27/2002
- [44] 高瀬雄一: 「ITER 政府間交渉報告」 第1回 ITPA 物理クラスター会合 中部大学 9/7/2002
- [45] 高瀬雄一:「Steady State Operation and Energetic Particles TG 報告」 第1回 ITPA 物理クラスター 会合 中部大学 9/7/2002
- [46] 高瀬雄一:「JT-60Uにおけるセンターソレノイドを 用いないプラズマ電流立ち上げ実験」 日本物理学 会 2002 年秋季大会 中部大学 9/6-9/2002

- [47] 糟谷直宏、伊藤公孝、高瀬雄一:「トカマクプラズマ 中の電極バイアス下で形成される径電場構造の空間 非対称性についての考察」 日本物理学会 2002 年秋 季大会 中部大学 9/6-9/2002
- [48] 山田琢磨,江尻晶,白岩俊一,牛込雅裕,糟谷直宏, 永島芳彦,野里英明,笠原寛史,飯島大介,小堀陽佑, 谷口智利,西友一朗,荒益将,大原伸也,山岸健一, 高瀬雄一:「TST-2における AM 干渉計を利用した 密度計測」 日本物理学会 2002 年秋季大会 中部大 学 9/6-9/2002
- [49] 高瀬雄一:「球状トカマク (ST)研究の現状」 第13
   回核融合エネルギ 総合システム研究専門委員会
   日本教育会館 9/17/2002
- [50] 高瀬雄一:「ITER での研究計画の進め方及び共同研 究のあり方に関する作業会(仮称)の提案」 ネット ワーク全体会合 核融合研 9/25/2002
- [51] 高瀬雄一:「代替案の提案」 第1回トカマク国内重 点化装置検討会 航空会館 10/10/2002
- [52] 高瀬雄一:「低アスペクト比案の利点」 第3回ト カマク国内重点化装置検討会 虎の門パストラル 11/7/2002
- [53] 江尻晶,白岩俊一,永島芳彦,笠原寛史,山田琢磨, 牛込雅裕,飯島大介,小堀陽佑,西友一朗,谷口智利, 荒益将,大原伸也,山岸健一,高瀬雄一:「TST-2球 状トカマクにおける MHD イベント」 プラズマ核 融合学会第19回年会、犬山 11/26-29/2002
- [54] 白岩俊一,永島芳彦,牛込雅裕,笠原寛史,山田琢磨, 飯島大介,小堀陽佑,谷口智利,西友一朗,荒益将, 大原伸也,山岸健一,江尻晶,高瀬雄一:「TST-2球 状トカマクにおける電子バーンシュタイン波を用い た電子温度計測」 プラズマ核融合学会第 19 回年会 犬山 11/26-29/2002
- [55] 永島芳彦、高瀬雄一、江尻晶、白岩俊一、山岸健一、 牛込雅裕、糟谷直宏、野里英明、笠原寛史、山田琢 磨、飯島大介、小堀陽佑、谷口智利、西友一朗、荒益 将、大原伸也:「静電プローブを用いた TST-2 周辺 プラズマの分布計測」 プラズマ核融合学会第 19 回 年会 犬山 11/26-29/2002
- [56] 笠原寛史、高瀬雄一、白岩俊一、谷口智利、江尻晶、 牛込雅祐、永島芳彦、糟谷直弘、野里英明、山田琢磨、 飯島大輔、小堀陽佑、西友一郎、荒益将、大原伸也: 「球状トカマクにおける HHFW 加熱実験」 プラズ マ核融合学会第 19 回年会 犬山 11/26-29/2002
- [57] 江尻晶:「マイクロ波を用いたプラズマ診断」 電気 学会「プラズマを知る・操る」技術調査専門委員会 東京九段 11/1/2002
- [58] 高瀬雄一: 「速波電流駆動アンテナの開発研究」 LHD 計画共同研究報告会 核融合研 12/19/2002
- [59] 高瀬雄一:「ICRF 高次高調速波 (HHFW) を使った 高ベータプラズマ生成法の開発」 LHD 計画共同研 究報告会 核融合研 12/19/2002
- [60] 江尻晶:「超短パルスマイクロ波によるプラズマ診断」 LHD計画共同研究報告会 核融合研 12/19/2002
- [61] 高瀬雄一:「ITER における研究者参加について」 ネットワーク全体会合 核融合研 1/23/2003

- [62] 江尻晶:「マイクロ波技術の利用」「超短パルス マイクロ波によるプラズマ診断」研究会核融合研 1/27/2003
- [63] 白岩俊一:「球状トカマクの定常化方策2:EBW(電 子バーンシュタイン波)」 第16回トライアム研究 会「定常プラズマ源とプラズマ・壁相互作用に関する 研究会」 九大 3/3/2003
- [64] 高瀬雄一:「球状トーラスにおける安定性と閉じ込め」 日米科学技術協力事業核融合分野事業報告会 東京ガーデンパレス 3/6-7/2003
- [65] 江尻晶:「マイクロ波計測における共同研究」「JT-60 プラズマの定常化診断研究」研究会 原研那珂研 3/10-11/2003
- [66] 糟谷直宏、谷口智利、伊藤公孝、高瀬雄一:「トカマク における電極バイアスによる径電場構造形成」 若手 科学者によるプラズマ研究会 原研那珂研 3/2003
- [67] 江尻晶,白岩俊一,永島芳彦,笠原寛史,山田琢磨, 牛込雅裕,飯島大介,小堀陽佑,西友一朗,谷口智利, 荒益将,大原伸也,山岸健一,高瀬雄一:「TST-2球 状トカマクにおける高速電子の振る舞い」 日本物 理学会第58回年次大会 仙台 3/28-31/2003
- [68] 野里英明,森田繁,後藤基志,高瀬雄一,江尻晶:
   「LHD プラズマにおける不純物ペレットを用いた粒 子輸送に関する初期結果」 日本物理学会第58回年 次大会 仙台 3/28-31/2003
- [69] 永島芳彦、高瀬雄一、江尻晶、白岩俊一、山岸健一、 笠原寛史、山田琢磨、牛込雅裕、飯島大介、小堀陽佑、 西友一朗、谷口智利、荒益将、大原伸也:「TST-2球 状トカマクにおける分布と揺動」 日本物理学会第 58 回年次大会 仙台 3/28-31/2003

#### 招待講演

- [70] 高瀬雄一: 「中心ソレノイドコイルを用いないトカマク運転」 プラズマ核融合学会第19回年会 シンポジウム II: トロイダルシステムにおける電流駆動・ 電流分布制御の新展開 犬山 11/26-29/2002
- [71] 高瀬雄一:「共同研究のあり方(利用者の立場から)」 プラズマ核融合学会第19回年会 特別討論会 大 学におけるプラズマ・核融合研究のあり方 犬山 11/26-29/2002
- [72] 高瀬雄一:「東京大学における研究の現状 TST-2 球状トカマク」第16回トライアム研究会「定常プ ラズマ源とプラズマ・壁相互作用に関する研究会」 九大 3/3/2003

(セミナー)

[73] "Solenoidless Start-up Scenarios for NSTX", NSTX Physics Meeting, Princeton Plasma Physics Laboratory, March 24, 2003.

#### 新聞記事

[74] 日本工業新聞 平成14年7月22日 朝刊2面 「原 研が実証 中心ソレノイドコイル使わず 発生電流 70万アンペアトカマク型核融合炉運転手法 臨界プ ラズマ装置で」

- [75] 日刊工業新聞 平成 14 年 7 月 22 日 朝刊 7 面 「JT-60 核融合プラズマ閉じ込め 中心ソレノイド コイル使わず 原研などが成功」
- [76] 原子力産業新聞 「高性能プラズマを発生 JT-60 ソレノイドコイル使わずに コスト削減に見通し 得る」
- [77] 新いばらき新聞 平成14年7月24日 朝刊 「高 性能先進プラズマで原研JT60 炉心大型コイル用い ず達成 トカマク型核融合炉 大幅簡素化に道」
- [78] 日経産業新聞 平成14年8月5日 朝刊11面 「原 研や東大 核融合炉建設費安く プラズマ発生コイ ル不要」
- [79] 化学工業日報 平成14年8月9日 朝刊7面 「大型コイル使わず高温プラズマ生成 原研、東大など 核融合炉小型化に期待」

## 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。現在は、高感度な レーザー干渉計を用いた重力波検出に力を注いでい 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。重力波を 使って宇宙を見ることは、人類の新たな知の創成で ある。[8,14]

2001 年度より科学研究費特定領域研究(A)「重力 波研究の新しい展開」(領域代表:坪野公夫)が5ヵ 年の計画で始まっている。この研究では、三鷹に設 置された TAMA300 を用いた重力波探査と、次世代 レーザー干渉計の開発が2つの主軸となっている。こ の研究を発展させて、将来計画である3kmレーザー 干渉計の建設につなげることが本領域の主目的であ る。[21, 51]

# 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,日本国内の関係機関が 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,1999年度より本格的な観測を開始した。 現在までに TAMA では,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感度と安定度を達成している。 2003 年 2 月より 2ヵ月間にわたる LIGO との同時観 測運転が行われ,1000時間以上のデータが取得され た。取得されたデータは現在,連星中性子星の合体か らのチャープ重力波,超新星爆発からのバースト重力 波,パルサーからの連続重力波等を求めて解析が進 められている。[1, 3, 5, 6, 15, 30, 31, 32, 52, 47, 48]

#### TAMA300 重力波検出器のバースト 波解析

TAMAでは,超新星爆発などで発生すると考えられているバースト的な重力波を観測対象の1つとしている。これらは,数値シミュレーションなどから, 100 msec 以下の持続時間しか持たない短い波形を持つことが知られている。しかし,その波形は,中性 子星のパラメータや爆発のメカニズムに強く依存し, 正確には予測しきれない。従って,予想波形を用いたマッチト・フィルタリングの手法を用いて重力波 信号を探す事はできない。そこで,バースト重力波 解析では,検出器出力に含まれる非定常成分を取り 出すという手法が用いられる。

ただ,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く,その出力に は非定常な雑音成分も多く含まれる。その場合,バー スト的な重力波は,これらの非定常雑音に埋もれて しまい,検出する事が困難になる。そこで,当研究室 では,非定常成分の時間スケールなどの特徴を用い て,重力波信号と雑音成分を区別する手法を開発し, バースト重力波探査に用いている。現在までに,重 力波信号を逃すことなく,非定常雑音成分を1/1000 以下に抑える,という結果を得ている。[16, 20, 28]

#### SN1987A からの重力波探査

2000 年 8 月から 9 月にかけて TAMA300 による 観測が行われ、167 時間の観測データが取られた。 このデータをもとに、SN1987A の跡に発見された パルサーから放射されていると思われる連続重力波 (935Hz) をターゲットにして解析した。

最適な解析方法はマッチドフィルターである。こ れはデータと予想重力波波形をかけあわせて積分す ることによって SN 比を最大にするという方法であ る。この方法を実行するためには、予想重力波波形 を考える必要があるが、その波形は単色光にいくつ かの効果が加わったものとなっている。その効果は ドップラー効果、感度変化の効果、スピンダウン効 果の3つである。また長期観測ではノイズレベルは 常に一定ではない。SN 比を最適化するためにはこ のノイズレベルの変化に応じてデータに重み付けを 行う必要がある。原理的にはこれらの効果を考えて マッチドフィルターを実行すればよいが、実際の解 析では計算時間の短縮のため FFT を利用した。解析 の結果、今回の解析では重力波の信号は見つからな かった。これによって今回の解析における重力波の Upper limit が求まる。またノイズのパワースペクト ル分布は、Rayleigh分布と合致し、重力波の信号が 存在しないこと、雑音が白色であるという仮定が妥 当であることが確かめられた。求まった Upper limit は $h \leq 5.5 \times 10^{-23}$ である。ただしこの時、第一種 の誤りを犯す確率は1%である。[12, 17, 29, 49]

#### 懸架点干渉計の開発

レーザー干渉計型重力波検出器の感度を低周波で 制限するのは地面振動である。懸架点干渉計とは、 鏡の懸架点に構成される補助レーザー干渉計をセン サーとして用いた能動防振装置の一種である。これ は非常に低雑音であることと、振子などの受動防振 系では難しい低周波で高い防振性能を持つという特 徴がある。特に低雑音性は、LCGTのような低温干 渉計におけるヒートリンクの防振に応用できると期 待されている。 昨年度までは水平方向の補助干渉計を開発してき たが、その性能は鉛直振動からのカップリングによっ て制限されていた。[54] そこで今年度は垂直方向の 干渉計を用いた鉛直振動の能動防振実験を行った。そ の結果、10Hzで約 40dB の防振比を達成することが できた。[40] この垂直干渉計と、水平方向の補助干 渉計を組み合わせれば、非常に高性能な能動防振装 置を作ることができると期待される。

#### 次世代レーザー干渉計をめざして

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 必要である。このためには数 km 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(LCGT)の開発が続けられている。本研 究室では、科学研究費特定領域研究(A)「重力波研究 の新しい展開」の中の計画研究「高性能防振システ ムの開発」(代表:坪野公夫)において、次世代干渉 計のための防振機構を研究開発している。[2, 34, 45]

#### 宇宙空間レーザー干渉計 DECIGO

日本でも、スペース重力波アンテナ DECIGO(Decihertz Interferometer Gravitational-Wave Observatory)の検討を開始した。DECIGOとは衛星間の距 離が LISA よりも 10 分の 1 から 100 分の 1 程度に短 い宇宙干渉計であり、このため狙う重力波の周波数 が、10mHz から数 Hz となり、ちょうど地上干渉計 と LISA がそれぞれ狙う周波数帯の狭間をカバーす るものである。DECIGO 計画の目的は、(1)LISA の 帯域から出て行った、連星からの重力波検出、(2)地 上干渉計の帯域に入る前の、連星からの重力波の検 出、(3) 宇宙初期からの重力波の検出、(4) 遠くの中性 子星連星からの重力波の観測による宇宙膨張加速度 の測定、(5)全く新しい重力波源の発見などである。 DECIGOの利点は、0.1Hz 以上では、白色矮星連星 からの重力波雑音が存在しないため、超高感度が実 現できる可能性があることである。この超高感度の 実現には、ドラッグフリー衛星、位相ロック増幅反 射、ドップラーシフトによるヘテロダイン計測などの 技術が不可欠である。これらの技術の R&D として、 衛星測位システムのシミュレータの製作、及びドラッ グフリーシステムに必要とされる超微小力計測シス テムの開発が始まりつつある。[25, 26, 27, 33, 46]

#### 6.4.2 熱雑音の研究

#### 熱雑音の直接測定

干渉計型重力波検出器の観測帯域の感度を制限す るのは、鏡や懸架系の熱雑音である。それらの熱雑 音は、その振幅の小ささゆえ、これまでに幅広い周 波数帯域で直接測定された例はない。また、それゆ え、熱雑音の振幅は推定に頼ることが多く、実験的に 熱雑音を研究することは重要となってきている。こ のような背景の下、実際の検出器に近い系における 熱雑音を直接測定するための、短基線長光共振器を 用いた実験を行っている。[10, 37, 44]

基本的な構成は、固定光共振器に対して周波数安 定化されたレーザ光を、二つの短基線長光共振器に 入射し、その変位雑音を測定するものである。光共 振器におけるレーザのスポットサイズを非常に小さ くなるようにデザインし、鏡の熱振動の効果を大き くした。鏡は地面振動の影響を避けるために、サス ペンションとスタックによって防振が行われている。 装置を構成し、地面振動、散射雑音、周波数雑音、強 度雑音、電気雑音などの各種雑音を抑圧した。それに よって、鏡基材による熱雑音、およびコーティングに よる熱雑音を、約 100Hz から 100kHz の 3 桁に渡っ て測定することができた。ここで測定したのは BK7 基材の Brownian noise, CaF<sub>2</sub> 基材の Thermoelastic noise, 及び SiO<sub>2</sub> 基材に施したコーティングの熱雑音 である。図 6.4 a に BK7, SiO2 における測定結果に ついて示す。おのおの、BK7 基材、コーティングの 内部損失から計算した理論値に一致していることが 確認できる。[22,53,4]



図 6.4 a: BK7 基材、SiO<sub>2</sub> 基材を用いた鏡の熱雑音の測 定結果。点線はおのおのの理論値を示す。低周波の変位雑 音は地面振動により制限されている。

#### 熱雑音の数値的な計算法の開発

これまで、熱雑音の推定には解析的な手法が多く 用いられてきた。しかし、解析的な手法には、1) 一 般の形状、重み付けでの熱雑音の計算が困難である、 2)損失の分布や周波数依存性を変化させるのが困難 である、3)周波数ゼロの極限でしか容易に計算でき ない、4)3次元、異方性材料といった複雑な系を扱う のが困難である、という問題があった。そこで、こ れらを克服する、数値的な熱雑音の計算手法を開発 した。[23]

具体的には有限要素法を用いた。まず、有限要素

法により、力学系の運動方程式を数値的に、任意の 周波数において解く。要素に蓄えられる歪みエネル ギーとその場所での散逸、及び揺動散逸定理 (FDT) から、Brownian noise を計算した。また、要素の体 積変化の勾配と FDT により Thermoelastic noise を 計算した。単純な系の場合には、解析的に求められ る解を含むことが確認できた。また、さらに複雑な 系に応用することも容易である。この方法で計算し た熱雑音と、実際に測定した鏡の熱雑音は、共振付 近も含めて一致しており、計算の妥当性も示されて いる。

#### Al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いて、熱雑音は主要な 雑音源の一つであり、重力波検出の障害となる。熱 雑音の振幅は機械損失に比例するので、熱雑音の問 題を考えるために、機械損失の研究は重要なことで ある。機械損失の測定法の一つに、試料を支持し、振 動を励起し、その減衰を測定する方法がある。その 際、支持による損失が生じる。最近、試料の節を支 持して機械損失を測定する不動点支持法が開発され た。この方法を用いると、支持による損失が生じな いので、従来と比べてより精度良く、試料の内部損失 を測定できる。機械損失のいくつかのモデルは、機 械損失の周波数依存性を予測する。従って、不動点 支持法で試料の機械損失を広い周波数帯域で測定す ることで、試料の内部損失のモデルを検証し、損失 の機構をより精密に明らかにすることができる。ア ルミニウム合金 A15056 は極低温で低い機械損失を 示し、共鳴型重力波検出器で広く使われている重要 な物質であるが、その機械損失を広い周波数帯域で 測定した例はない。よって、A15056の機械損失を広 い周波数帯域で測定することは意義のあることであ る。不動点支持法で複数の A15056 の試料の機械損 失を広い周波数帯域で測定した。その結果、A15056 の機械損失には周波数依存性があり、それが微結晶 間の熱流によって生じる熱弾性効果と、巨視的な熱 流によって生じる熱弾性効果によるものであること がわかった。[11, 50]

#### 6.4.3 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、重力波検出器用低周波防振装置 TAMA SAS(Seismic Attenuation System)の開発・ 評価を行った。昨年度までに、TAMA SASの構成要 素の開発・個別の性能評価は完了したので、今年度 はこれらを組み合わせて2台のプロトタイプ TAMA SASを完成させた。それらから吊られた鏡によって 構成される3mのFabry-Perot光共振器を実際に動 作させる実験を行い、SASに吊られた鏡に制御を加 えることによって光共振器を安定に動作させること が可能であることを実証した。また、Fabry-Perot 共 振器の制御信号から、SASに吊られた鏡の変動量を 取得し、評価した。得られた結果と設計から予想され る変動量とを比較したのが図 6.4 b である。この結果 から、1 Hz ~ 10 Hz の帯域では、従来の TAMA300 の感度を 100 倍から 1000 倍程度改善することが可能 であることを実証することに成功した。3 Hz 以上の 信号は、実験に用いた電気回路やレーザーの周波数 安定度などにより制限を受けているものであり、SAS の性能を反映していないことを確認した。

Fabry-Perot 共振器を共振させた状態で、TAMA SAS の能動ダンピング機構を動作させ、0.1 Hz 以 上での鏡の変動量の積分値が  $0.2\mu$ m(レーザー波長の 1/5 程度) まで抑制されることを示すことができた。 これは、従来の 1~数  $\mu$ m という値に比べて大きな 改善である。このような改善は、倒立振り子による 受動的な防振特性の向上と、能動ダンピングによっ て機械系の共振を抑制することによって可能となっ た。また、同様に能動ダンピングを用いることによっ て鏡の平均速度は  $0.3\mu$ m /s まで抑制された(非制御 時には  $1.2\mu$ m/s)。これらの結果から、SASを用いる ことによって干渉計の安定性、制御性を改善するこ とが可能であることが実証された。

本研究の成果をうけて、TAMA SASを TAMA300 に組み込む計画が進展している。[9, 38, 41, 18, 19]



図 6.4 b: 3m Fabry-Perot 共振器の変位雑音 (赤), TAMA300の変位雑音 (青), 3m Fabry-Perot 共振器 の電気系雑音 (緑), 期待される 3m Fabry-Perot 共振 器の変位雑音 (黄)。

磁気浮上を利用した防振システム

重力波検出などの精密計測においては,地面振動 が計測の妨げとなる。そのため,現在世界各国で研 究されている干渉計型重力波検出器では干渉計を構 成する光学系をワイヤーなどで振り子状に懸架する ことによって,地面振動から光学系を防振している。 しかし,このように機械的に懸架するとその構成要 素での内部共振や静摩擦が問題となりうる。内部共振においては,観測帯域(数100Hz)での防振比が悪化する。さらに,静摩擦においては,防振能力自体が失われる恐れがある。このような欠点を克服しうるものとして,磁気浮上を利用した非接触懸架防振システムを研究している。[35,42]

基本的な考えとして,懸架する物の荷重を支える ために永久磁石間の反発力を利用し,力アクチュエー タを用いて制御することで安定浮上を実現する。こ のように,永久磁石で荷重を支えることによって,ア クチュエータノイズの影響を小さくすることができ る。これまでにプロトタイプ実験で約1kgのものを 浮上させることに成功している。

永久磁石を用いた受動的ダンピングの研究

TAMA SAS に永久磁石を用いた受動的ダンピン グシステムを導入する可能性について、検証を行っ た。TAMA SAS の能動的なダンピングシステムを 受動的ダンピングシステムに置き換えることが可能 ならば、信頼性の高さなど受動的ダンピングシステ ムの利点を生かすことができるので、この検証は重 要な意味をもつ。

検証に際し、本研究では以下の2種類の解析を行っ た。まず、半質点モデルによる TAMA SAS の運動解 析を行い、実際に TAMA SAS に受動的ダンピング システムを導入した場合の防振性能を評価した。解 析より、鏡の R.M.S. 振幅は数  $\mu$ m、R.M.S. 速度は 1 µm/s程度になるという結果を得た。これらの値は、 制御系からの要求値を満たしている。次に、有限要素 法による渦電流ダンピングの解析を行い、必要なダン ピング効率を満たす永久磁石の構成を評価した。解析 では汎用有限要素解析プログラム ANSYS を使用し、 ダンピング効率の見積もりを解析的に行う手法を確 立することに成功した。解析より、必要なダンピング 効率は市販レベルの磁石で満たすことが可能である という結果を得た。以上の結果から、受動的ダンピン グシステムの導入により TAMA SAS の必要な防振 性能は得られるという結論を得た。[13, 36, 43, 7, 24]

<受賞>

 [1] 安東正樹, 宇宙線物理学奨励賞, 宇宙線研究者会議, 2003 年 3 月 29 日.

<報文>

#### (原著論文)

[2] T. Tomaru, S. Miyoki, M. Ohashi, K. Kuroda, T. Uchiyama, T. Suzuki, A. Yamamoto, T. Shintomi, A. Ueda, D. Tatsumi, S. Sato, K. Arai, M. Ando, K. Watanabe, K. Nakamura, M. Watanabe, K. Ito, I. Kataoka, H. Yamamoto, B. Bochner, and Y. Hefetz, Evaluation of the performance of polished mirror surfaces for the TAMA gravitational wave detector by use of a wave-front tracing simulation, Applied Optics **41** (2002) 5913.

- [3] R. Takahashi, F. Kuwahara, E. Majorana, M.A. Barton, T. Uchiyama, K. Kuroda, A. Araya, K. Arai, A. Takamori, M. Ando, K. Tsubono, M. Fukushima, Y. Saito, Vacuum-compatible vibration isolation stack for an interferometric gravitational wave detector TAMA300, Review of Scientific Instruments **73** (2002) 2428.
- [4] K. Yamamoto, M. Ando, K. Kawabe, and K. Tsubono, Thermal noise caused by an inhomogeneous loss in the mirrors used in the gravitational wave detector Physics Letters A 305 (2002) 18.
- [5] R. Takahashi, Y. Saito, M. Fukushima, M. Ando, K. Arai, D. Tatsumi, G. Heinzel, S. Kawamura, T. Yamazaki, S. Moriwaki, Direct measurement of residual gas effect on the sensitivity in TAMA300, Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum, Surfaces and Films **20** (2002) 1237.
- [6] V. N. Rudenko, A. V. Serdobolski and K. Tsubono, Atmospheric gravity perturbations measured by a ground-based interferometer with suspended mirrors, Class. Quantum Grav. 20 (2003) 317.
- [7] K. Tsubono, Application of material damping for gravitational wave detectors, Journal of Alloys and Compounds (2003) (in press).
- [8] K. Tsubono, Search for Gravitational Waves, Prog. Theor. Phys. (2003) (in press).

#### (学位論文)

- [9] 高森昭光: Low Frequency Seismic Isolation for Gravitational Wave Detectors、博士論文、2003年2 月.
- [10] **沼田健司**:Direct measurement of the mirror thermal noise、博士論文、2003 年 1 月.
- [11] 関秀嗣:金属物質の機械損失の研究、修士論文、2003 年1月.
- [12] 副田憲志: TAMA300 データを用いた連続重力波解 析、修士論文、2003 年1月.
- [13] 西雄彦:永久磁石を用いた受動防振装置の研究、修士 論文、2003 年 1 月.
- (会議抄録)
- [14] 宇宙を探る新しい目 重力波,第16回「大学と科学」 公開シンポジウム講演収録集 (2002, クバプロ).
- <学術講演>

(国際会議)

一般講演

[15] M. Ando and the TAMA collaboration, Observation run of TAMA GW detector, Astronomical Telescopes and Instrumentation, (Aug. 25, 2002, Hawaii, U.S.A.).

- [16] M. Ando, K. Arai, R. Takahashi, D. Tatsumi, P. Beyersdorf, S. Kawamura, S. Miyoki, N. Mio, S. Moriwaki, K. Numata, N. Kanda, Y. Aso, M-K. Fujimoto, K. Tsubono, K. Kuroda, and the TAMA collaboration, Detector characterization of the TAMA interferometer, Gravitational Wave Data Analysis Workshop 2002 (Dec. 17-19, 2002, Kyoto, Japan).
- [17] K. Soida, The continuous gravitational analysis using the TAMA300 data, Gravitational Wave Data Analysis Workshop 2002 (Dec. 17-19, 2002, Kyoto, Japan).
- [18] A. Takamori *et. al*, Seismic Attenuation System for Advanced GW Detectors, 2002 Gravitational Wave Advanced Detection Workshop (GWADW) (Isola d 'Elba, Italy, May 2002).
- [19] A. Takamori *et. al*, Seismic Attenuation / Suspension Experiment, 2003 Aspen Winter Conference (Aspen Physics Center, United States, Feb. 2003).
- [20] M. Ando, K. Arai, R. Takahashi, D. Tatsumi, P. Beyersdorf, S. Kawamura, S. Miyoki, N. Mio, S. Moriwaki, K. Numata, N. Kanda, Y. Aso, M-K. Fujimoto, K. Tsubono, K. Kuroda, and the TAMA collaboration, Burst Event Analysis of TAMA, 3rd TAMA symposium (Feb. 3, 2003, ICRR, Kashiwa, Japan).
- [21] K. Tsubono, Search for gravitational waves, Tokyo-Adelaide Joint Workshop (Jan. 7, 2003, Sanjo Hall, Tokyo).
- [22] K. Numata, Direct Measurement of Mirror Thermal Noise (2003 Aspen Conference, February 7, 2003).
- [23] K. Numata, Numerical Calculation of Thermal Noise (2003 Aspen Conference, February 7, 2003).

#### 招待講演

[24] K. Tsubono, Application of Material Damping for Gravitational Wave Detectors, International Symposium on High Damping Materials 2002 (HDM2002) (Aug. 22, 2002, Sanjo Hall, Tokyo).

#### (国内会議)

#### 一般講演

- [25] 坪野公夫、スペース実験の FEASIBILITY-研究室での基礎実験、第1回スペース重力波アンテナWG ミーティング (2002年5月9日国立天文台・三鷹キャンパス).
- [26] 坪野公夫、スペース重力波アンテナ DECIGO の feasibility、国立天文台将来計画シンポジウム (2002 年 6 月 4 日 国立天文台・三鷹キャンパス).
- [27] 安東正樹, DECIGO におけるレーザー測距技術,第1 回 スペース重力波アンテナ WG ミーティング (2002 年5月9日 国立天文台・三鷹キャンパス).

- [28] 安東正樹, 新井宏二,高橋竜太郎,辰巳大輔, Peter Beyersdorf,川村静児,三代木伸二,三尾典克,森脇 成典,沼田健司,神田展行,藤本眞克,坪野公夫,黒 田和明,the TAMA Collaboration,レーザー干渉計 重力波検出器 TAMA300の観測状態解析 II,日本物 理学会 2002 年秋季大会(2002 年9月、立教大学).
- [29] 副田憲志,坪野公夫,安東正樹,神田展行,辰巳大 輔 The TAMA collaboration、TAMA300 データを 用いた連続重力波解析、日本物理学会 2002 年秋季大 会(2002 年 9 月、立教大学).
- [30] 新井宏二,佐藤修一,長野重夫,高橋竜太郎,神田伸行, 辰巳大輔,常定芳基,安東正樹,三尾典克,森脇成典, 武者満,川村静児,福嶋美津広,山崎利孝,藤本眞克, 坪野公夫,大橋正健,黒田和明,他 TAMA Collaboration、レーザー干渉計型重力波検出器 TAMA300 のパワーリサイクリング III、c日本物理学会 2002 年 秋季大会(2002 年 9 月、立教大学).
- [31] 高橋竜太郎,新井宏二,佐藤修一,長野重夫,神田伸行, 辰巳大輔,常定芳基,安東正樹,三尾典克,森脇成典, 武者満,川村静児,福嶋美津広,山崎利孝,藤本眞克, 坪野公夫,大橋正健,黒田和明,他 TAMA Collaboration、レーザー干渉計型重力波検出器 TAMA300 のパワーリサイクリング IV、日本物理学会 2002 年 秋季大会(2002 年 9 月、立教大学).
- [32] 佐藤修一,新井宏二,長野重夫,高橋竜太郎,神田伸行, 辰巳大輔,常定芳基,安東正樹,三尾典克,森脇成典, 武者満,川村静児,福嶋美津広,山崎利孝,藤本眞克, 坪野公夫,大橋正健,黒田和明,他 TAMA Collaboration、レーザー干渉計型重力波検出器 TAMA300 のパワーリサイクリング V、日本物理学会 2002 年秋 季大会(2002 年 9 月、立教大学).
- [33] 川村静児,中村卓史,坪野公夫,瀬戸直樹,安東正樹, 井岡邦仁,植田憲一,神田展行,阪上雅昭,佐々木節, 柴田大,高野忠,田中貴浩,千葉剛,中尾憲一,細川 瑞彦,横山順一,他DECIGOワーキンググループ、 スペース重力波アンテナDECIGO計画 I、日本物理 学会 2002 年秋季大会(2002 年 9 月、立教大学).
- [34] 黒田和明,大橋正健,三代木伸二,石塚秀喜,山元 一広,藤本眞克,川村静児,高橋竜太郎,山崎利孝, 辰巳大輔,新井宏二,上田暁俊,福島美津広,佐藤 修一,長野重夫,常定芳基,朱宗宏,新冨孝和,山本 明,鈴木敏一,斉藤芳男,春山富義,佐藤伸明,東 保男,内山隆,都丸隆行,坪野公夫,安東正樹,高 森昭光,沼田健司,植田憲一,米田仁紀,中川賢一, 武者満,三尾典克,森脇成典,宗宮健太郎,新谷昌 人,神田展行,寺田聡一,佐々木節,田越秀行,中村 卓史,田中貴浩,大原謙一,高橋弘毅,前田恵一,宮 川治,M.E.Tobar、大型低温重力波望遠鏡(LCGT) 計画 IV、日本物理学会 2002 年秋季大会(2002 年 9 月、立教大学).
- [35] 飯田幸美,安東正樹,A.Bertolini,G.Cella, R.DeSalvo,福嶋美津広,F.Jacquier,川村静 児,G.Losurdo,Sz.Marka,西雄彦,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,依田達夫、Seismic Attenuation System (SAS) for gravitational wave detectors

XIII, 日本物理学会 2002 年秋の分科会 (2002 年 9 月、立教大学).

- [36] 西雄彦,安東正樹, A. Bertolini, G. Cella, R. De-Salvo, 福嶋美津広, 飯田幸美, F. Jacquier, 大塚茂巳, 川村静児, G. Losurdo, 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, 依田 達夫、Seismic Attenuation System (SAS) for Gravitational Wave Detectors XIV, 日本物理学会 2002 年秋季大会(2002年9月、立教大学).
- [37] 沼田健司,高森昭光, R. DeSalvo,安東正樹,坪野公 夫、干渉計型重力波検出器における熱雑音の検証実 験 III,日本物理学会 2002 年秋季大会(2002 年 9 月、 立教大学).
- [38] 高森昭光,安東正樹, A. Bertolini, G. Cella, R. De-Salvo, 福嶋美津広, 飯田幸美, F. Jacquier, 川村 静 児, G. Losurdo, Sz. Marka,西雄彦, 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 XII, 日本物理学会 2002 年秋 季大会 (2002 年 9 月、立教大学).
- [39] 安東正樹, 新井宏二,高橋竜太郎,辰巳大輔, Peter Beyersdorf,川村静児,三代木伸二,三尾典克,森脇 成典,沼田健司,神田展行,藤本眞克,坪野公夫,黒 田和明,the TAMA Collaboration,レーザー干渉計 重力波検出器 TAMA300の観測状態解析 III,日本物 理学会第 58 回年次大会 (2003 年 3 月、東北学院大 学).
- [40] 麻生洋一,安東正樹,大塚茂巳,南城 良勝,河邊径太, 坪野公夫、Suspension Point Interferometer による 低周波防振,日本物理学会第 58 回年次大会 (2003 年 3 月、東北学院大学).
- [41] 高森昭光, 安東正樹, A. Bertolini, G. Cella, R. De-Salvo, 福嶋美津広, 飯田幸美, F. Jacquier, 川村 静 児, G. Losurdo, Sz. Marka, 西雄彦, 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 XV, 日本物理学会第 58 回 年次大会 (2003 年 3 月、東北学院大学).
- [42] 飯田幸美,高森昭光,安東正樹,坪野公夫、磁気浮上 を利用した防振システム,日本物理学会第58回年次 大会(2003年3月、東北学院大学).
- [43] 西雄彦,飯田幸美,高森昭光,大塚茂巳,南城良勝, 安東正樹,坪野公夫、永久磁石を用いた受動的ダン ピングの研究、日本物理学会第58回年次大会(2003 年3月、東北学院大学).
- [44] 沼田健司,高森昭光, R. DeSalvo,安東正樹,坪野公夫、干渉計型重力波検出器における熱雑音の検証実験 IV,日本物理学会第58回年次大会(2003年3月、東北学院大学).
- [45] 黒田和明,大橋正健,三代木伸二,石塚秀喜,山元 一広,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,上田暁俊,福嶋美津広,佐藤 修一,長野重夫,常定芳基,朱宗宏,新冨孝和,山本

明, 鈴木敏一, 斎藤芳男, 春山富義, 佐藤伸明, 東保 男, 内山 隆, 都丸隆行, 坪野公夫, 安東正樹, 高森昭 光, 沼田健司, 植田憲一, 米田仁紀, 中川賢一, 武者 満, 三尾典克, 森脇成典, 宗宮健太郎, 新谷昌人, 神 田展行, 寺田聡一, 佐々木節, 田越秀行, 中村卓史, 田中貴浩, 大原謙一, 高橋弘毅, 前田恵一, 宮川 治, M.E. Tobar、大型低温重力波望遠鏡 (LCGT) 計画 V 、日本物理学会第 58 回年次大会 (2003 年 3 月、東北 学院大学).

- [46] 川村静児,中村卓史,坪野公夫,瀬戸直樹,高野忠, 安東正樹,井岡邦仁,植田憲一,神田展行,阪上雅昭, 佐々木節,佐藤孝,柴田大,田中貴浩,千葉剛,中尾 憲一,長野重夫,沼田健司,細川瑞彦,横山順一,吉 野泰造,他 DECIGO ワーキンググループ、スペース 重力波アンテナ DECIGO 計画 II、日本物理学会第 58 回年次大会 (2003 年 3 月、東北学院大学).
- [47] 長野重夫,新井宏二,佐藤修一,高橋竜太郎,神田展 行,辰巳大輔,常定芳基,安東正樹,三尾典克,森脇 成典,武者満,川村静児,福嶋美津広,山崎利孝,藤 本眞克,坪野公夫,大橋正健,黒田和明、レーザー干 渉計型重力波検出器 TAMA300のパワーリサイクリ ング VI、日本物理学会第58回年次大会(2003年3 月、東北学院大学).
- [48] 高橋竜太郎,新井宏二,佐藤修一,長野重夫,神田展 行,辰巳大輔,常定芳基,安東正樹,三尾典克,森脇 成典,武者満,川村静児,福嶋美津広,山崎利孝,藤 本眞克,坪野公夫,大橋正健,黒田和明、レーザー干 渉計型重力波検出器 TAMA300のパワーリサイクリ ング VII、日本物理学会第58回年次大会(2003年3 月、東北学院大学).
- [49] 副田憲志, 坪野公夫, 安東正樹, 沼田健司, 神田展行, 辰巳大輔, 新井宏二, 高橋竜太郎, 川村静児, Peter Beyersdorf, 三代木伸二, 三尾典克他 The TAMA Collaboration、TAMA300 データを用いた連続重力 波解析、日本物理学会第58回年次大会 (2003 年 3 月、 東北学院大学).
- [50] 関秀嗣,沼田健司,鈴木敏一,安東正樹,坪野公夫, 大塚茂巳、金属物質の機械損失の研究 III、日本物理 学会第 58 回年次大会 (2003 年 3 月、東北学院大学).

招待講演

- [51] 坪野公夫、重力波検出実験の現状、第 31 回電子情報 通信学会電磁界理論シンポジウム (2002 年 10 月 24 日、 伊東).
- [52] 安東正樹, 干渉計型重力波検出器の開発, 日本物理学 会第 58 回年次大会 (2003 年 3 月 30 日 東北学院大 学).

(セミナー)

- [53] K. Numata: Direct Measurement of Mirror Thermal Noise (CaJAGWR seminar, California Institute of Technology, February 11, 2003).
- [54] Y. Aso: Stabilization of a Fabry-Perot Interferometer using a Suspension Point Interferometer, LIGO seminor (California Institute of Technology, June 2002).

## 6.5 佐野研究室

佐野研究室では、熱平衡から遠く離れた系に起こ る自発的な秩序形成や乱れの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、新たな方法論の構築も目指し 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 力学系が持つ一般的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 現象の動力学は共通した面を持っており、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、普遍性だけではくくりきれ 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は、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 を詳細に観測すると言ったアプローチを取っている。 また、実験結果と理論と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している。

#### 6.5.1 散逸系の研究

#### 熱乱流の究極状態

発達した乱流状態を調べるのに、熱乱流系は様々 の点で優れた実験系である。本研究では、Rayleigh-Benard 対流系を用いて制御パラメータであるレー リー数が極めて高い状態を実現し、究極の熱乱流状 態の存在を探求している。従来、極めて高いレーリー 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 レーリー数の 1/2 乗に比例する究極状態が存在する ことが予想されていた。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、レーリー数 105 から $10^{11}$ 、レイノルズ数 $5 \ge 10^5$ (低プラントル数に おける世界記録)を作りだし、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。その後、オレゴン大学のグルー プが低温ヘリウムガス(高プラントル数: $Pr \sim 1$ ) を用いて、レーリー数  $10^{17}$  までの観測を行ったが熱 流の転移は観測されず、我々の予想を支持した結果 となっている。ごく最近になって、広いレーリー数 とプラントル数の範囲にわたる全てのスケーリング

指数を統一的に説明しようとする Universal Theory が発表され、この分野で話題を呼んでいる。この理 論は、従来の実験結果の大半を純粋なスケーリング 状態ではなく、クロスオーバー現象として説明する ため問題とすべき点が多く、その真偽を実験で確認 することが急務となっている。そのため、さらに詳 細なスケーリング指数の測定や、境界層の空間構造、 各種統計量を測定し、理論との整合性を検証する必 要性が生じている。

理論と実験の(不)整合性をはっきりさせるため には、境界層が乱流化しているかどうかが決め手と なるため、境界層内での流速分布の直接測定が不可 欠である。そのために2002年度は超音波エコーによ る乱流速度ゆらぎの測定系を立ち上げ、水銀対流内 の速度分布の時間発展を測定することに初めて成功 した。散乱体として比重の同じ金 - パラジウム合金 を作成し、200 ミクロン程度の粒子にして混入させ ることでエコーの検出に成功した。また、熱境界層 近傍では温度差による急激な密度勾配が存在するた め、散乱粒子なしでも超音波の散乱が発生し、流体 の速度が計測できることを確認した。中心軸に沿っ て垂直方向の速度分布の時間発展を可視化したもの が図 6.5 a である。この結果から、乱流中に巨視的 流れが存在し、上半分では上昇流、下半分では下降 流が主流となっており、その境界が時間的に変動し ているため、一点での速度ゆらぎの確率密度分布は 2ピーク型の分布となることがわかった。



図 6.5 a: 乱流速度ゆらぎの時空間発展

また、上側の境界層付近では低温で下降する励起 構造と上昇してきた巨視的流れが衝突して、速度の 向きが反転する位置が存在することがわかった。(下 側境界では逆のことが起こっている。)この特徴的長 さのスケールと速度境界層との関連については理論 的・実験的に引き続き解析を行っている。乱流の統 計的性質に関しては、空間速度分布から直接エネル ギースペクトラム *E*(*k*)を決定した。*E*(*k*)の計算に Taylor 仮説を用いず直接測定を行った実験は我々の 知る限りではこれが始めてである。その結果を図6.5bに示す。理論的にはObukov等により予測された  $E(k) \sim k^{-11/5}$ の関係に極めて近い結果が得られた。 境界層の構造とスケーリングの詳細な解析は今後の 課題である。



図 6.5 b: 直接計算された熱乱流のエネルギースペク トラム

流体と柔らかい境界の相互作用

境界条件は流体の運動を考える場合不可欠である。 境界が柔らかく、流体運動によって変形を受け、同時 に境界条件の変形が流体運動に影響を与えるような 状況では、相互作用により複雑な運動が発生しうる ため、標記の問題は重要な課題となっている。ここで はそのような運動の例として、流体を含むチューフ の安定性と運動に関する研究を行った。チューブ内 を流れる流体の速度が増すとチューブの運動は、静 止状態、振動状態、カオス的運動へと次々と遷移し ていく。チューブの端点が固定されている場合と回 転可能な場合の2つの端点境界条件について運動を 記録し、画像解析やフーリエ解析から相図を作成し 比較を行った。その結果、端点が回転可能な場合は、 系の回転対称性のため運動の分岐が一変し、相図の 全体構造も大きく変わることが明らかになった。こ れは回転のゴールドストーンモードと新しく生成す る分岐が結合するためと解釈される。理論的には2 次元までは実験結果と定性的に一致する結果が得ら れているが3次元の問題は未解決である。

振動場中の異方性粒子の非線形動力学

粉体などエネルギーの散逸を伴う粒子系の挙動の 理解が、近年の統計力学の一つの課題となっている。 粉体系を記述する方法論や基礎方程式の導出は、基 礎的にも応用的にも重要な意味を持つためである。 実験と計算機の進歩により、振動層や偏析、斜面状 の流動現象などの理解は進んできたが、その一方で、 個々の粒子の異方性や衝突の非弾性衝突の動力学な どが系全体の振る舞いに与える効果はよく理解され ていない。この研究では、振動層中に異方性を持っ た粒子を置き、振動加速度をパラメータとして変化 させていった時に見られる新奇な現象の動力学にス ポットを当て、その機構の解明を行った。



図 6.5 c: 異方性粒子の速度分布の加振振幅依存性

振動層の振動加速度と周波数を変化させると、異 方性粒子の運動に静止状態、ランダムな前後運動、一 方向性の運動などの状態が観測される。運動の詳細 な測定を行った結果、粒子の前後運動の継続時間の 分布は指数分布をなし、一方向性運動に遷移する際、 その継続時間が急に長くなり、相関時間も増大する ことが分かった。また、速度の確率密度分布は、運 動形態により図 6.5 cに示すように大きく変化する。 相図の境界を理論的に予測するため、系に特徴的な 3つのタイムスケールを考え、共鳴条件を考慮する と実験をよく説明できることがわかった。異方性粒 子の運動の理解は、マイクロマシンの制御や粉体の 振る舞いの理解にとって重要である。

## 6.5.2 非線形系としての生命システム

DNAの凝縮転移における一分子力学測定

溶液中の生体分子を一分子レベルで測定すること は、生体分子間相互作用を定量的に理解し、少数分 子による生体内化学反応機構を明らかにする上で重 要となる。生命の基本分子であるDNAは、細胞内 では小さく折れ畳まれているが、必要に応じて解き ほぐされその情報が読み取られる。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現 象が関わっていると考えられている。本研究では、溶 液環境の変化によって引き起こされるDNAの凝縮 転移現象に着目し、1分子計測の手法を用いて、凝 縮転移下におけるDNA分子の力学応答を調べた。

ラムダファージDNAの一部 (15.7kbp) に対し、 各々の端に2 - 3 µm のビーズを結合させ、各ビー ズを2ビームレーザーピンセット(波長1064nm)で 捕捉し、DNAの末端間距離とそのときの張力を測 定した。試料セル内のスペルミジン(3価ポリアミ ン)濃度 N を変化させることでDNAの凝縮転移 を引き起こし、転移後の力学応答の凝縮剤濃度依存 性について調べた。その結果、凝縮DNAはスペル ミジン濃度に依存して2つの特異的な力学応答を示 すことが分かった (図 6.5 d)。一つは伸びに対し張 力が一定となるプラトー特性であり、転移濃度近傍  $(N=500\mu\mathrm{M})$ では伸張 - 緩和両過程で現れる。も う一方は、深い凝縮状態 ( $1 \text{mM} \le N \le 100 \text{mM}$ )の 伸張過程で現れる鋸型の張力応答(stick-release パ ターン)である。このときの張力ピーク間距離は約 300nmの特徴的な長さを持ち、DNAの伸張による 非凝縮化が単位構造ごとに生じていることを示唆し ている。さらに、高濃度条件下 (N = 200mM) で再 び非凝縮状態へ転移する現象を1分子レベルの力学 応答として初めて測定した。測定結果の解析から、こ れらの力学応答がDNAの正味の電荷量に関与した 凝縮度合いの違いにより現れることが示された。



図 6.5 d: 伸び - 張力曲線に現れるプラトー特性と stick-release パターン (実験)

#### 凝縮したDNAの一分子力学応答の理論

また我々は、これらの力学応答を再現する現象論 的モデルを構築した。非凝縮状態にあるDNA鎖は、 ウォームライク鎖(WLC)の力学応答を示すことが 知られている。凝縮したDNA鎖を引き伸ばすと内 部には凝縮、非凝縮相が共存することから、凝縮の 程度に応じて実効的な鎖長Laが定義でき、DNA 鎖は鎖長  $L_a$  の WLC とみなすことができる。 $L_a$  は 鎖の内部状態を表すオーダーパラメータ  $\rho$  から計算 され、 $\rho$  の有効ポテンシャルは凝縮、非凝縮状態を 示す双安定な構造を持つものとする。ここで2 状態 の相対的な安定性はDNA鎖に働く張力の大きさで 決まるとし、 $\rho$  の時間発展と WLC の弾性の式を動 的に結合させた方程式系を構築した。

モデルの数値シミュレーションにより、凝縮時の プラトー特性及び伸張 - 緩和過程で現れる履歴応答 を再現することができた(図6.5 e (a))。この履歴は 伸張速度が有限であることで生じていることが明ら かとなり、実験における伸張 - 緩和過程が非平衡過 程であることを示している。さらに凝縮形態が特徴 的な長さを持つモジュール化された構造となること で、stick-release パターンが現れることが示唆され た(図 6.5 e (b))。



図 6.5 e: 数値シミュレーション (a) プラトー特性 (b)stick-release パターン

培養神経系におけるカルシウム波伝達機構の解析

カルシウム波あるいはカルシウム振動は、細胞レ ベルから組織レベルまで生命現象の多くの場面で重 要な役割を果たしている。カルシウム変動は発生現 象と深く関わっており、例えばカルシウム振動の周 波数の違いによって遺伝子発現の量が制御されてい るという報告もなされている。カルシウム変動の時 定数は1秒から数分までと幅広く、伝搬の範囲も大 きく変化する。これらの幅広い時定数や伝搬範囲の 違いが何によって決定され、周波数によるコーディ ングがどのような機構により実現されているかを明 らかにすることは重要である。この研究では、培養 神経系を用いて、レーザーフォトリシスにより局所 的に神経に伝達物質や他の化学物質を与え、高速イ メージングの手法でカルシウム応答の詳細を測定す る研究を行っている。グリア細胞におけるカルシウム 伝搬のモデルに関しては、従来からのギャップジャン クションを介した IP<sub>3</sub>の拡散と IP<sub>3</sub> レセプター、さ らにはリアノジンレセプターによる小胞体からの自 己増殖的なカルシウム放出というモデルが提案され ているが、最近、ATP などが細胞外を通して拡散す ることによりカルシウム波が伝搬するという可能性 が指摘されている。我々は、caged-ATPをレーザー フォトリシスにより解離させ細胞に与えることで、こ れによる変動が通常のカルシウム波の変動に比べて 極めて小さく伝搬を生じさせるには不十分であるこ とを明らかにした。今後は IP3 レセプターの分子機 構にまで踏み込んでさらに制御された実験を行うべ く準備を行っている。

<報文>

#### (原著論文)

- H. Wada, Y. Murayama, and M. Sano: Model of Elastic Responses of Single DNA Molecules in Collapsing Transition, Phys. Rev. E 66, 061912 (2002)
- [2] Y. Murayama, Y. Sakamaki, and M. Sano: Elastic Response of Single DNA Molecules Exhibits a Reentrant Collapsing Transition, Phys. Rev. Lett. 90, 018102 (2003)
- [3] D. Yamada, T. Hondou, and M. Sano: Coherent Dynamics of an Asymmetric Particle in a Vertically Vibrating Bed: Phys. Rev. E 67, 040301(R) (2003)
- (学位論文)

#### [4] 中村秀樹: レーザーフォトリシスによる培養神経系の カルシウムシグナルの機構解析(修士論文)

#### (編著書)

[5] Koji Nakajima, Masaki Sano, and Yoshinori Hayakawa, ed.: IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications, and Computer Sciences, Special Section on Nonlinear Theory and Its Applications, Vol. E85-A, No.9 (2002) 1987-2184.

#### <学術講演>

#### (国際会議)

#### 一般講演

[6] Y. Murayama, H. Wada, Y. Sakamaki, and M. Sano: Elastic Response of Single DNA Molecules in a Reentrant Collapsing Transition, Annual APS March Meeting 2003 (Austin, 2003 Mar 3-7). (国内会議)

一般講演

- [7] 和田浩史、村山能宏、佐野雅己:「凝縮転移したDN A鎖の張力応答に関するモデル」 2002年度基 研研究会「ソフトマターの物理学」(京都大学基礎物 理学研究所)2002年7月15-17日
- [8] 村山能宏、佐野雅己:「1分子DNAの凝縮転移:張 力応答の凝縮剤濃度依存性」 2002年度基研研 究会「ソフトマターの物理学」(京都大学基礎物理学 研究所)2002年7月15-17日
- [9] 和田浩史、村山能宏、佐野雅己:「凝縮転移下における一分子DNA鎖の粘弾性モデル」
   日本物理学会2002年秋季大会(中部大学)2002年9月6-9日
- [10] 村山能宏、佐野雅己:「凝縮剤濃度に依存した1分子 DNAの力学応答」 日本物理学会2002年秋季 大会(中部大学)2002年9月6-9日
- [11] 中村秀樹、佐野雅己:「ニューロングリア共培養系の カルシウムシグナル伝達系の観測」 日本生物物理学 会第40回年会(名古屋大学)2002年11月2-4日
- [12] 鳥谷部祥一、佐野雅己:「Conformation Network に よる Protein Folding Kinetics の特徴付け」 日本 生物物理学会第40回年会(名古屋大学)2002年11 月 2-4日
- [13] 中村秀樹、佐野雅己:「レーザーフォトリシスを用いた培養神経系のカルシウムシグナル機構解析」 日本物理学会第58回年次大会(東北大学)2003年3月28-31日
- [14] 小林康明、鳥谷部祥一、佐野雅己:「周期外力下のB Z反応系におけるパルスの分裂現象」
   日本物理学会 第58回年次大会(東北大学)2003年3月28-31日
- [15] 和田浩史、佐々真一:「せん断流の誘起する流体の圧力異常」
   日本物理学会第58回年次大会(東北大学)2003年3月28-31日
- [16] 村山能宏、佐野雅己:「1分子DNAの凝縮転移と電荷逆転現象」 日本物理学会第58回年次大会(東北 大学)2003年3月28-31日

#### 招待講演

- [17] 佐野雅己、「生命非平衡系の現代的視点 ゆらぎ・ 非線形性・構成的方法 - 」、生物物理若手夏の学校、 2002 年 7 月 28 日
- [18] 佐野雅己、「非線形物理と生命科学の接点」、日本大学 量子科学フロンティア特別講義、2003 年1月17日
- (セミナー)
- [19] 佐野雅己、「DNA の物理から生命システムへ」、東北 大学電気通信研究所、2003 年 11 月 13 日

#### (講義等)

- [20] 佐野雅己:流体力学(3年生),2002 年度冬学期
- [21] 佐野雅己:「非平衡系の科学ー現状と課題ー」、現代 物理学入門(4年生、分担担当)2002 年度夏学期
- [22] 佐野雅己:物理実験 II(3年生)、 相転移、 2002 年度冬学期
- [23] 佐野雅己:統計力学特論 C(大学院集中講義)(早稲 田大学大学院理工学研究科) 2003 年1月 21-23 日

## 6.6 山本研究室

## 6.6.1 はじめに

星と星との間にはガスと塵からなる希薄な雲(星 間雲)が漂っている。星間雲の中でも比較的密度が高 い星間分子雲は、恒星が形成される場所として銀河 系における物質循環の主要経路にあたっている。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 験室における分子分光実験を行なっている。これら を通して、星間分子雲の構造、形成、進化を物質的 視点から研究している。

サブミリ波、テラヘルツ領域(波長1mmから0.1mm)は、天文学における未開拓の波長域である。本研究室では、わが国ではじめてのサブミリ波望遠鏡(口径1.2m)を富士山頂に設置して観測を行なっている。中性炭素原子の放つ ${}^{3}P_{1} - {}^{3}P_{0}$ (周波数492 GHz;波長0.6mm)と ${}^{3}P_{2} - {}^{3}P_{1}$ (周波数809 GHz;波長0.4mm)の微細構造スペクトル線について、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、星間分子雲の形成過程を解明しつつある。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18 cm 可搬型サブミリ波望遠鏡を開発し、チリでの運用を始めている。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。

一方、テラヘルツ帯での観測を実行するために、本 年度より超伝導ホットエレクトロン・ボロメータ・ミ クサ素子の開発を国立天文台野辺山観測所のグルー プと共同してスタートした。1.47 THz の窒素イオン のスペクトル線の広域観測を実現することで、銀河 系における星間プラズマの分布と運動を明らかにし、 プラズマ相から原子相、分子相に至る星間雲の「相 変化」を解明する。この研究を通して、テラヘルツ 天文学を創生したい。

#### 6.6.2 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、わが 国で初めてのサブミリ波望遠鏡である。富士山頂は 冬季の気温が低く、また非常に乾燥する。そのため、 サブミリ波天体観測を妨げる水蒸気が少なく、絶好の 観測サイトである。その優れた観測条件を生かして、 中性炭素原子の微細構造スペクトル線、 ${}^{3}P_{1}-{}^{3}P_{0}(492)$ GHz) および  ${}^{3}P_{2}-{}^{3}P_{1}(809 \text{ GHz})$ 、の観測を行い、星 間分子雲の構造、形成、およびそこでの星形成を研 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 開始し、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 運用を行っている。これまでに5回の観測シーズン で、492 GHz のスペクトル線については40平方度 を超える領域のサーベイを行うことができた。これ は、他のグループによる中性炭素原子スペクトル線 の観測と比べて、1桁以上も上回るものであり、近 傍星間分子雲における分子雲スケールでの分布を描き出しつつある。また、809 GHz のスペクトル線についても、代表的星間分子雲でのマッピング観測を世界ではじめて実現した。2002 年から 2003 年の観測シーズンにおいては、後で個々の報告で述べるように、主に 492GHz のスペクトル線の広域観測、詳細観測を推進した。また、共同観測を広く全国の研究者から公募し、4件を実施した。

本研究はビッグバン宇宙研究センターの研究プロ ジェクトの1つとして推進しており、国立天文台の 立松健一氏、関本裕太郎氏、野口卓氏、前澤裕之氏、 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、理化学研究所の池田 正史氏らとの共同研究である。

チョッピング副鏡によるアンテナ指向精度の向上 チ ョッピング副鏡は、高速のビームスイッチングを行う ことによって、観測条件の時間変動に由来するノイ ズに影響されない高感度の電波検出を行う装置であ る。富士山頂サブミリ波望遠鏡には、'01 年度に搭載 され、動作試験が行われている。'02 年度には、副鏡 のチョッピング動作の安定性向上、および IF 系出力 の安定化による連続波検出の感度向上を実現し、こ れによって、惑星の連続波観測によるポインティン グ観測の定常的な運用が可能になった。従来の太陽 および満月を用いたポインティング観測により実現 されていたアンテナ指向精度が15″であったのに対 し、点源である惑星を用いた手法にシフトしたこと で、5″を切る望遠鏡のアンテナ指向精度を達成した。

観測プログラムの改良 富士山頂サブミリ波望遠鏡 の計算機制御システムの改良を行った。従来は富士 山頂に設置された一台の計算機によって全ての処理 を行い、観測者はリモートログインによって山頂の 計算機を操作していたが、この方式では、富士山頂 と本郷の端末の間に低速度(64 kbps)の衛星通信を 介するために、ホスト間のデータ転送に要する時間 が、観測効率を大きく低下させていた。新方式では、 山頂の計算機は機器制御のみを行い、観測者とのイ ンターフェイス部は本郷に置かれたもう一台の計算 機が担当する設計に変更した。これによって、デー タ転送の効率化、GUI化による観測操作の簡略化を 実現し、観測時間のオーバーヘッドを大幅に低減し た。同方式は'01年度より試験的に導入され、'02年 度より本格的に運用を開始している。

富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いた 2002-2003 年の 観測シーズンの観測成果について以下にまとめる。

Barnard 68 Barnard 68 は太陽系から約 80 パー セクの距離にある星の生まれていない孤立したグロ ビュール(質量 0.7 M<sup> $\odot$ </sup>)であり、その密度プロファ イルは Bonner-Ebert 球(外圧下で静水圧平衡にある 等温ガス球)でよく表されることが知られている。今 シーズン我々は富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いて、 この B68 方向の CI 492GHz 輝線観測を行った。中心 方向を集中的に積分し、最終的に  $\Delta T_4^* = 0.07 \text{K}(\text{rms})$  のスペクトルを得たが、CI 492GHz 輝線の検出には 至らなかった。この事から、B68 中心方向の  $C^0$  柱密 度の上限は  $7 \times 10^{15}$  cm<sup>-2</sup> と求められる。 $C^0$ /CO 柱密 度比は 0.028 以下であり、中間赤外暗黒星雲 (infrared dark clouds) として知られる種族のそれに近いか、も しくはそれ以下の値となった。このことは、B68 は 化学的に極めて進んだ進化段階にある事を示してお り、その重力平衡に近い形状や CO 分子の depletion 等の観測事実と矛盾しない結果である。

IC1396 領域 光解離領域 (PDR) モデルが、実際に |観測されている星間分子雲中の C<sup>0</sup>の二次元分布を説 明できないことは良く知られている。この問題に対す る観測的アプローチの一つとして、HII 領域 IC1396 の観測を行った。同領域内部には、紫外光によって電 離された表面をもつ bright rimmed cloud(BRC) と 呼ばれるグロビュールが点在している。'02-'03シー ズンに行った観測により、領域内の 13 の BRC の  $[CI]^{3}P_{1}-^{3}P_{0}$ 輝線の空間分布を明らかにした。bright rimは、edge-onで観測されるPDRの典型例である と考えられるため、モデルに従うなら、電離領域の 背後には [CI] の層状の構造が観測されなければなら ない。しかし、図 6.6 a に示した例からも見られるよ うに、[CI] の積分強度分布は<sup>13</sup>CO によってトレー スされる分子雲内部の構造に近い構造を示し、可視 光で観測される bright rim の背後には、予測された ような [CI] 層は確認されなかった。BRC のような単 純な構造の分子雲においても [CI] 層が検出されない という事実からは、観測されている C<sup>0</sup>の大部分は 定常的な PDR に起源を持たない成分に属すること が示唆される。

 $\rho$  **Oph** 領域 へびつかい座領域 ( $\rho$  Oph) のフィラ メント状暗黒星雲 L1709 に対して中性炭素原子 [CI]  ${}^{3}P_{1} - {}^{3}P_{0}$ 輝線の広域マッピング観測を行なった。これ と昨年度までに観測した中小質量星形成領域(L1688、 L1689) を合わせると、観測範囲は ρ Oph 領域の主 要な暗黒星雲を含む約5平方度に及ぶ。L1709にお ける [CI] は、<sup>13</sup>CO で見られるフィラメント状の分 子雲とほぼ同様な広がりを示す。一方で C<sup>18</sup>O と比 較すると個々のピーク位置は合致せず、[CI]と $C^{18}O$ の積分強度に相関関係は見られない。これは、おう し座領域のフィラメント状分子雲 B213 でも見られる 傾向である。L1709の[CI] 強度のピーク位置におけ る  $C^0$ の柱密度  $N(C^0)$ を局所熱力学的平衡 (LTE)の下で求めたところ、 $N(C^0)$ =1.2×10<sup>17</sup> cm<sup>-2</sup> となっ た。また、柱密度比  $N(C^0)/N(CO)$  について L1688 及び L1689 との比較を行ったところ、L1709 での値 はこれら2領域よりも小さい側に偏ることを見出し た。この結果は、L1709の方が分子雲内部の密度構 造 (クランプ構造) が顕著ではない、あるいは L1709 の方が C→CO の反応がより進んだ進化段階にある ことを示している可能性がある。

おうし座L1495 領域 昨シーズンに引き続き、L1495 領域において [CI] のマッピング観測を行ない、この 領域のほぼ全体(約4.5平方度)をカバーした。観 測の結果、[CI] は領域全体にわたって広く分布して



図 6.6 a: IC1396 領域の bright rim 周辺の [CI]  ${}^{3}P_{1} - {}^{3}P_{0}$  輝線 の強度分布のコントアマップ。最低コントアレベルは 3  $\sigma$ 、以上は 1.5  $\sigma$  間隔 ( $\sigma = 1.2$  K·km s<sup>-1</sup>)。グレイスケールは、(上) 光学写 真 (Digitized Sky Survey) (下)<sup>13</sup>CO(J=1-0) 輝線 (NRO45m 望遠鏡による)の積分強度。

いることが明らかになった。領域内で 14 個の CIcloud が同定されたが、各 CI-cloud において [CI] は <sup>13</sup>CO(J = 1 - 0) と弱い相関を、C<sup>18</sup>O(J = 1 - 0) とは相関を持たないことがわかった。また、柱密度  $N(C^0)$  ピーク値とそこでの  $N(C^0)/N(CO)$  比は [CI] が卓越した領域である HCL2(化学進化段階において" 若い"と考えられている) での値と似ていること、お よび、各 CI-cloud での  $M_{\rm VIR}/M_{\rm LTE}$  が 1 よりも大 きいことから、L1495 領域は進化段階において平衡 状態に達していない"若い"段階にある可能性がある。 このことは、[CI] の分布と YSOs の分布に反相関の 関係があることと矛盾しない。これらの結果を、時 間依存を考慮した PDR モデルとの比較によって検 討した。

W3/W4/W5 領域 W3/W4/W5 領域は、距離  $\sim 2.3$ kpc にある活発な大質量星形成領域である。昨年度に 引き続き、この領域に対して [CI] 輝線の観測を行い、 W3/W4/W5 領域の分子雲ほぼ全域のマッピング観 測を完了した。その結果、W3/W4/W5 領域の [CI] 分布は CO の分布と大局的に一致し、分子雲中心部 における典型的な C<sup>0</sup>/CO 存在量比は、 $\sim 0.1$ 程度と Orion 巨大分子雲など、ほかの巨大分子雲と同程度の 値であることがわかった。さらに、CO J=3-2 輝線が 比較的弱いにもかかわらず、[CI] 輝線のピーク強度
が、W3/W4/W5領域中で最も強かった、AFGL 333 領域に対して野辺山 45 m 望遠鏡を用い、CO J=1-0輝線の詳細観測を行った。その結果、AFGL 333 で は、C<sup>18</sup>O 輝線の強度が W3 巨大分子雲の中で最も 強く、AFGL 333 領域には大質量の低温分子ガスが 存在することがわかった。このことは、C<sup>0</sup> は分子雲 内部に存在する成分が支配的であるということを示 している。さらに、AFGL 333 領域の CO、[CI] 線の速度構造に注目すると、[CI] は、星形成のまだ 起こっていない領域で強いことがわかった。このこ とは、C<sup>0</sup> の存在量が分子雲の進化と関係している可 能性を示唆しており、分子雲が進化するにつれ [CI] 輝線の存在量が少なくなるという化学進化モデルの 結果と矛盾しない。

Draco Nebula Draco Nebula は、通常の銀河回 転に沿わない視線速度を持ち、銀河面から少なくとも 200 pc 以上離れているガス雲である。そのため銀河 面とハローとの中間の物理状態を研究するのに非常 に適した天体といわれている。今年度、富士山頂サブ ミリ波望遠鏡を用いて、この天体の南側7割程度の範 囲において [CI] 輝線のマッピング観測を行なった。観 測の結果、全体として強度は弱く、最大強度でも $T_{
m mb}$ = 0.9 K であった。南西部では<sup>12</sup>CO(J=1-0) 輝線 や IRAS100 μm の輻射の分布と良い相関が見られ、 また、柱密度比 [N(C)/N(CO)] は1を超える高い値 を示し、炭素の元素組成比が銀河円盤上のガスとほ ぼ同じであったことから、銀河円盤上の translucent cloud と似たような性質を示すことが分かった。その 一方北西部では、[CI] 輝線は線幅が太く、<sup>12</sup>CO 輝線 や IRAS100 µm の輻射に対して、比較的 [CI] 輝線の 輻射が強いことが見出された。

 $\zeta$ -**Oph** へびつかい座領域内にある  $\zeta$ -Oph(O9.5V 型星)の近傍(5pc)に位置するフィラメント状の暗 黒星雲 L204 は、強い紫外線にさらされた暗黒星雲と して特徴的な研究対象である。そこで、この領域に対 し、富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いて CI  ${}^{3}P_{1}{}^{3}P_{0}$ 輝線の3分角グリッドによる観測を行った。その結 果、約300点のスペクトルデータを取得した。この 観測で見出された CI 柱密度は LTE、T<sub>ex</sub> の仮定の もと、~ $1.4 \times 10^{17}$  cm<sup>-2</sup> と、同じへびつかい座領域 である  $\rho$ -Oph 領域における柱密度と比べ低い値を示 した。

Barnard 335 B335 は約 250pc の距離に位置する 孤立した暗黒星雲であり、低質量星の形成領域とし て詳しい研究が行われている。しかし、この領域で CI 輝線はこれまで未検出であった。そこで本年度、 B335 領域における CI 輝線(492GHz)のマッピング 観測を行い、その分布を調べた。その結果、弱い CI 輝線を分子雲全体にわたって有意に検出した。CI 輝 線のピーク位置は Frerking ら (1987)によって報告 されている  $^{13}$ CO(J = 1 - 0) 輝線のピーク位置であ り、また、両者の分布は同程度の広がりをもつこと がわかった。ピーク位置での CI 輝線強度( $T_{mb}$ )は 0.54K、積分強度 は 0.83K km s<sup>-1</sup> であり、これま で観測された暗黒星雲の中では極端に弱い。

#### 6.6.3 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(POST18)を開発している。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<sup>3</sup> $P_1$ -<sup>3</sup> $P_0$ :492GHz,<sup>3</sup> $P_2$ -<sup>3</sup> $P_1$ :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大局的分布・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出来、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。

2002年9月、この望遠鏡を南米チリのパンパラボ ラ ALMA-J サイトに設置し、南天の代表的な10天 体についてテスト観測を行った。その結果、 $\rho$ -Oph, NGC6334, NGC2024, M17の4つの天体から CI 492GHz 輝線を検出することに成功した。そのうち 以下に記述する NGC6334と M17の結果は、可搬型 18cm サブミリ波望遠鏡の特質をよく示したものと言 える。

NGC 6334 NGC6334 は太陽から約 1.7kpc の距離にある活発な大質量星形成領域である。この領域では少なくとも7つの OB 星団が独立に形成されており、それぞれ異なる進化段階にあると考えられている。今回我々は POST18を用いて、10'で50'×50'(25pc×25pc)の領域について CI 492GHz 輝線によるマッピング観測を行った。その結果、CI 輝線放射は CO 輝線放射とほぼ同様の空間的・速度的分布を示すことが見い出された。CI/CO 積分強度比は典型的に 0.1–0.2 であり、これは Orion 等の巨大分子雲に典型的な値である。

M17 M17 は太陽から約 1.6kpc の距離にある活発 な大質量星形成領域である。今回 POST18 により、 M17 中心方向の CI 492GHz 輝線スペクトルを取得 した。その結果、 $T_A^* \sim 1 \text{ K}$ 程度の輝線プロファイ ルの両側に、 $\Delta V \simeq 40 \text{ km s}^{-1}$ もの線幅を持ち、全 積分強度の 1/3 もの割合を占める wing 成分が検出 された。今期、富士山頂サブミリ波望遠鏡を使用し たフォローアップ観測を行い、この高速度 wing 成分 の空間的広がりを調べた。その結果、青方偏移 wing 成分については、原始星の集中する M17 コア方向に 集中することが明らかになった。これは、原始星か らの双極分子流を引き起こす高速中性風を検出した 可能性がある。一方で赤方偏移成分は、青方偏移成 分とは対照的に 40 pc × 40 pc 程度の広がった分布 を示す事が明らかになった。これは原始星からの中 性風起源とは考えられず、星間中性ガスのこれまで 認識されていない形態に属する成分である可能性が ある。



図 6.6 b: 可搬型 18 cm サブミリ波望遠鏡で取得された M17 方向の  $C^{0}$   $^{3}P_{1}$ -  $^{3}P_{0}$  輝線スペクトル。観測はポジションスイッチ法で行い、総積分時間は 208 秒。 $V_{\text{LSR}}$ = 20 km s<sup>-1</sup> を中心とする主成分の両側に、全積分強度の 1/3 を占める高速度 wing 成分が見える。

# 6.6.4 Atacama Submillimeter Telescope が確認された。 Experiment (ASTE)

ASTE は、国立天文台、東京大学、名古屋大学、 大阪府立大学などが共同で、南米チリ共和国のパン パラボラ(標高 4800 m)に口径 10m の電波望遠鏡 (ASTE)を設置する計画である。本研究室では、国 立天文台と共同で ASTE に搭載する 350 GHz の受 信機の開発を行い、本年度、その受信機を、チリにお いて実際に望遠鏡に搭載し観測を行った。観測は主 に $^{12}$ C<sup>16</sup>O J=3-2 輝線 (345 GHz)の観測を行った。 その結果、 $T_{sys} = 250-500$  K と比較的良いシステム 雑音温度で観測することができ、本受信機を用いて、 短期間に効率よく CO J=3-2 輝線のマッピング観測 を行うことができることを実証した。

ふたご座領域 S254-257 領域の CO J=3-2 輝線マッ ピング観測 S254-257 は、Gem OB1 分子雲複合体 に付随する HII 領域であり、HII 領域の周りに分子雲 がシェル状に分布していることが知られている。その 領域に対して ASTE を用いて、 $^{12}C^{16}O J=3-2$  輝線 のマッピング観測を行った。観測総点数は、940 点で あった。観測結果を富士山頂サブミリ波望遠鏡による [CI] 輝線の観測結果と比較したところ、CO J=3-2輝線は HII 領域に近い所で比較的強いが、[CI] 輝線 はそのような領域ではあまり強くなく、むしろ HII 領域から離れた所の方が強いことがわかった。この ことは、CO J=3-2 輝線は励起星によって暖められ たガスをトレースするが、[CI] 輝線は、そのような 領域をよくトレースしないことを示しており、分子 雲内の  $C^0$ の起源は、光解離以外のプロセスが支配 的である可能性を示唆している。

# 6.6.5 Hot-Electron Bolometer(HEB) 素子の開発

18cm 可搬型サブミリ波望遠鏡などのサブミリ波望 遠鏡を用いてテラヘルツ波帯域にある窒素イオンの スペクトル線 (NII: 1.47 THz)の観測を行う目的で、 国立天文台のグループと共同で Nb を用いた拡散型 Hot-Electron Bolometer(HEB) ミクサの開発を進め ている。

本年度はそのプロトタイプとして、850 GHz 帯用 ミクサ素子の開発を行った。このミクサは可能な範 囲で富士山頂サブミリ波望遠鏡で用いている同周波 数帯用の SIS ミクサと同一の設計を採用した。Nb、 Au、SiO<sub>2</sub> 薄膜の成膜条件、電子ビーム描画装置を 用いた微細構造の描画条件などについて検討を重ね た結果、これまでに電極接合部の細線長 0.2  $\mu$ m、細 線幅 0.5  $\mu$ m 程度までの設計による HEB ミクサを 50 % 以上の歩留まり率で製作することが可能になっ た。ジュール・トムソン型冷凍機による冷却試験お よびサブミリ波局部発振器を用いた入射試験を行っ た結果、この HEB ミクサは冷却によって Nb 細線 の超伝導特性による非線形電気回路としての性質を 示し、サブミリ波の入射に対して応答性を持つこと が確認された。



図 6.6 c: 電子ビーム描画装置で製作した、HEB ミクサ素子の 電極部分。超伝導金属 Nb 細線の上に Au 電極を重ねてある。

#### 6.6.6 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 が短いフリーラジカルなどの「短寿命分子」が半数 近くを占める。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ので、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 波数がわからないために、探査できていないものが 少なくない。また、フリーラジカルの構造と分子内 運動の理解は、分子科学の観点からも重要な課題で ある。そこで、本研究室では「短寿命分子」の回転 スペクトルを、フーリエ変換ミリ波分光を用いて調 べている。本研究室のフーリエ変換分光器は、この 種の分光器としては世界で唯一、85 GHz までの周 波数で「短寿命分子」のスペクトルを測定できる感度を持っており、それを生かして基本的な炭化水素 ラジカルの回転スペクトルを研究している。これま でに、エチルラジカル、ビニルラジカル、シクロプ ロピルラジカルなどのスペクトルをはじめて明らか にしている。

シクロプロピルラジカルのフーリエ変換ミリ波分光 以前基本的な炭化水素分子であるビニルラジカルの 回転遷移を測定し、回転定数および微細、超微細構造 作用定数を決定した。得られた超微細構造作用定数 に基づき、 $CC-D_{\alpha}$  変角振動によるトンネル分裂エネ ルギー幅を推定した。本研究はそれに引続き、CC-H 変角振動によるトンネル効果に興味が持たれるシク ロプロピルラジカルの回転スペクトルを調べた。シ クロプロピルラジカルは、その分光学的な重要性に も関わらず、気相における分光学的研究はまったく報 告されていなかった。今回、我々は ab initio 計算で 得られたシクロプロピルラジカルの分子構造に基づ き、フーリエ変換ミリ波分光計を用いて回転遷移の 検出を試みた。その結果、 $1_{11} - 0_{00}$ 、そして $1_{10} - 1_{01}$ |純回転遷移をそれぞれ 37.4 GHz、10.6 GHz 領域で はじめて検出できた。得られたスペクトルは微細や 超微細構造分裂により複雑なパターンを示している。 現在のところ、得られた微細、超微細構造を調べる ため、シクロプロピルラジカルの ESR の結果や類 (CHF<sub>2</sub>)の研究結果に基づき、スペクトルパ ターンを調べながら解析を進めている。

<報文>

#### (原著論文)

- H. Habara, S. Yamamoto & T. Amano, "Submillimeter-wave Spectra of HCS and DCS", Journal of Chemical Physics, 116, 9232 (2002)
- M. Ikeda, T. Hirota & S. Yamamoto, "The H<sup>13</sup>CN/HC<sup>15</sup>N Abundance Ratio in Dense Cores: Possible Source to Source Variation of Isotopic Abundances?", The Astrophysical Journal, 575, 250 (2002).
- [3] H. Habara & S. Yamaoto, "The <sup>13</sup>C Hyperfine Constants of HCS and HSC Studied by Microwave Spectroscopy", Journal of Molecular Spectroscopy, in press
- [4] T. Oka, M. Iwata, H. Maezawa, M. Ikeda, T. Ito, K. Kamegai, T. Sakai, & S. Yamamoto, "CI Submillimeter-wave Line Emission from the NGC 1333 Region", The Astrophysical Journal, submitted
- [5] E. Kim & S. Yamamoto, "Fourier transform millimeter-wave spectroscopy of the deuterated vinyl radical, C<sub>2</sub>D<sub>3</sub>", J. Chem. Phys. **116**, 10713(2002).
- [6] E. Kim & S. Yamamoto, "Fourier transform millimeter-wave spectroscopy of CS(X<sup>1</sup>Σ<sup>+</sup>) and SO(b<sup>1</sup>Σ<sup>+</sup>) in highly excited vibrational states", J. Mol. Spectrosc., in press.

[7] K. Kamegai, M. Ikeda, H. Maezawa, T. Ito, M. Iwata, T. Sakai, T. Oka, S. Yamamoto, Y. Sekimoto, K. Tatematsu, T. Noguchi, S. Saito, H. Fujiwara, H. Ozeki, J. Inatani, and M. Ohishi, "Distribution of the [CI] emission in the  $\rho$  Ophiuchi Dark Cloud", The Astrophysical Journal, 2003, in press

#### (学位論文)

- [8] 新保謙、「テラヘルツ帯 HEB 受信機の開発とおうし 座暗黒星雲の [CI] 輝線広域観測」、修士論文、2003 年1月
- [9] 林田将明、「中性炭素原子輝線による銀河系内分子雲 の広域観測」、修士論文、2003年1月

# <学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [10] S. Yamamoto, "Large Scale Distribution of [CI] and Its Astrophysical Implications", "Formation and Evolution of Molecular Clouds: Recent Results from Single-Dish Millimeter and Submillimeter Astronomy and Prospects", Seoul National University, Korea (May, 2002)
- [11] T. Oka, S. Yamamoto, & Mt. Fuji Submillimeterwave Telescope Group, "Observational Approach to Molecular Cloud Evolution with the Submillimeter-wave [CI] Lines", "Chemistry as a Diagnostic of Star Formation", Univ. of Waterloo, Ontario, Canada (August 21–23, 2002)
- [12] T. Oka, S. Yamamoto, & Mt. Fuji Submillimeterwave Telescope Group, "Observational Approach to Molecular Cloud Evolution with the Submillimeter-wave [CI] Lines", The 34th Scientific Assembly of COSPAR/WSC 2002, E1.5. "Astronomy at IR/Submm and the Microwave Background", Houston, TX, U.S.A., (October 10–11, 2002)
- [13] T. Oka, M. Ikeda, M. Iwata, K. Kamegai, K. Matsuo, N. Kuboi, M. Hayashida, & S. Yamamoto, "Portable 18cm Submillimeter-wave Telescope (POST18)", "Millimeter, Submillimeter-wave Receiver Workshop, Mitaka, NAO, Japan (December 5–6, 2002)
- [14] K. Kamegai, T. Oka, & S. Yamamoto, "Distribution of the [CI] emission in the ρ Ophiuchi Dark Cloud", The 8th IAU Asian-Pacific Regional Meeting, Tokyo, Japan (July 2–5, 2002)
- [15] E. Kim & S. Yamamoto, "Fourier transform millimeter-wave spectroscopy of the deuterated vinyl radical, C<sub>2</sub>D<sub>3</sub>", "57th Ohio State University in International Symposium on Molecular Spectroscopy", Columbus, Ohio, USA (June 17-21, 2002)

#### 招待講演

- [16] S. Yamamoto, "Atomic Carbon in Molecular Cloud", "Star Formation Workshop 2002", Taroko, Taiwan (June, 2002)
- [17] T. Oka, "Gravitational Stability of Molecular Clouds in the Galactic Center", "Galactic Center Workshop 2002", Kailua-Kona, Hawaii, U.S.A. (November 4–8, 2002)

(国内会議)

一般講演

- [18] 江澤元、川辺良平、山本智、ASTE チーム: ASTE 計画の進捗と今後、日本天文学会 2003 年春季年会 V43a(東北大学、2003 年 3 月)
- [19] 前澤裕之、野口卓、新保 謙、岡 朋治、山本 智: HEB 受信機の開発、日本天文学会 2003 年春季年会 V62a (東北大学、2003 年 3 月)
- [20] 岡 朋治、山本 智、亀谷和久、林田将明、久保井信之、 池田正史: 可搬型 18cm サブミリ波望遠鏡 (POST18)
   による NGC6334 領域および M17 の CI<sup>3</sup>P<sub>1</sub>-<sup>3</sup>P<sub>0</sub> 輝 線観測、日本天文学会 (東北大学、2002 年 3 月)
- [21] 田中邦彦、岡 朋治、山本 智: DR21 領域の中性炭素 原子、日本天文学会 (東北大学、2003 年 3 月)
- [22] 林田将明、岡 朋治、山本 智:Draco Nebula におけ る中性炭素原子輝線のマッピング観測、日本天文学会 (東北大学、2003 年 3 月)
- [23] 久保井信行、岡 朋治、山本 智、相川祐理: CI<sup>3</sup>P<sub>1</sub>-<sup>3</sup>P<sub>0</sub> 輝線によるおうし座 L1495 領域の広域観測、日 本天文学会(東北大学、2003 年 3 月)
- [24] 亀谷和久、岡 朋治、山本 智:へびつかい座暗黒星雲 における中性炭素原子輝線の広域観測、日本天文学 会(東北大学、2003年3月)
- [25] 酒井 剛、岡 朋治、山本 智:W3 領域の [CI]、CO 詳 細観測、日本天文学会 (東北大学、2002 年 3 月)

招待講演

[26] 山本智:新しい観測装置が開く星間化学、日本化学会 イプニングセッション「スペースケミストリー」(早 稲田大学、2003 年 3 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と分子内の 非共鳴誘起双極子との相互作用に基づく中性分子の マニピュレーションとその応用、(2) 整形された超短 光パルスによる原子分子中の量子過程制御、(3) 高次 非線形過程(多光子イオン化や高次高調波発生など) に代表される高強度レーザー物理や原子分子中の超 高速現象、(4) 高次高調波を用いたアト秒パルス発 生とその測定、(5) レーザー誘起クーロン爆裂を用 いた分子の構造とダイナミクスに関する研究を中心 に活発な研究活動を展開している。本年度の主要な 研究内容は以下のとおりである。

# 6.7.1 楕円偏光したレーザー電場と静電場の併用による分子の3次元配列制御

中性分子の回転運動の制御法として、誘起双極子 モーメントとレーザー電場との相互作用を利用した 配向制御や、さらに永久双極子モーメントと静電場 との相互作用を併用した配列制御が理論的に提案さ れ、実験的な検証が進められている。非共鳴レーザー 電場を利用するこれらの方法は、分子のエネルギー 準位構造によらず多くの分子に適用できる非常に有 効な方法である。分子配向に関しては、直線偏光し たレーザー電場を用いた配向制御に続いて、楕円偏 光したレーザー電場を用いた非対称コマ分子の三次 元的な配向制御が実現している。本研究室では昨年 度、直線偏光したレーザー電場と静電場を併用するこ とによって直線分子 (OCS) の配列制御に成功した。 分子の三次元的な配列制御が実現すれば、化学反応 ダイナミクスの配置効果の研究や、表面衝突実験等 に全く新しい実験技術を提供することができる。本 年度は、楕円偏光したレーザー電場と静電場を併用 することにより、非対称コマ分子の三つのオイラー 角を全て規定する三次元的な配列制御の原理実証を 行った。

飛行時間型 (TOF) イオン分析器の電極部に試料 分子 (3,4-dibromothiophene) を導入し、楕円偏光し たレーザー光 (Nd:YAG 1064 nm, 12 ns,  $3 \times 10^{12}$ W/cm<sup>2</sup>) を照射した。ここで、TOF 分析器の加速電 場を、分子配列用の静電場としても利用した。YAG レーザー光のピーク強度付近でプローブ光 (Ti:sapphire  $\sim 800 \text{ nm}, \sim 50 \text{ fs}, 6 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2)$ を照射し、 $\bar{\rho}$ -ロン爆裂によって生成されたフラグメントイオンを 観測した。三次元配列が起きていることを確認する ために、以下の二種類の観測を行った。まず、楕円偏 光の長軸を検出器と平行にした状態でイオンイメー ジを観測し (図 6.7 a)、フラグメントイオンの角度分 布から三次元配向度を調べた。次に、長軸を検出器 と垂直にして TOF スペクトルを測定し (図 6.7 b)、 フラグメントイオンの初速度分布の変化から配列度 を調べた。

イオンイメージからは、分子の三次元配向を示す 結果が得られた。例えば、Br<sup>+</sup>のイオンイメージ(図 6.7 a)からフラグメントイオンの角度分布を調べる と、YAG レーザー光を照射したときには、照射しな



図 6.7 a: 分子が 3 次元的に配向している様子を観測 するための観測系の様子 (右) と Br<sup>+</sup> イオンのイメー ジの例。YAG レーザー光を照射しない時、等方的に 分布していたもの (a) が楕円偏光 (楕円率  $\epsilon = 0.7$ ) した YAG レーザー光を照射すると楕円偏光の長軸 方向に沿ってイオンの分布密度が高くなっているこ とが分かる (b)。この時、 $\ll \cos^2 \theta_{2d} \gg = 0.73$  が得 られた。

いときに比べて楕円偏光の長軸方向に分布密度がよ り高くなった。これは、分子面が楕円偏光面を中心 として揃っていることを示している。三次元配向度 を評価するために、 $\ll\cos^2 heta_{
m 2d}$ 》という量を用いた。 ここで、 $\theta_{2d}$ は、検出器面に射影したフラグメント イオンの初速度ベクトルと、楕円偏光の長軸方向とのなす角を表す(図 6.7 a)。楕円率を 0.7 程度にした ときに  $\ll \cos^2 \theta_{2d} \gg = 0.73$ となり、三次元配向度が 最も大きくなることが分かった。一方、TOFスペクトルからは、分子が配列していることを示唆する結 果が得られた。YAG レーザー光を照射しないときに は、"forward"方向(初速度の向きが検出器方向)の フラグメントイオンと "backward" 方向 (初速度の向 きが検出器と反対方向)のフラグメントイオンがほ ぼ同量観測された。一方、YAG レーザー光を照射す ると、例えば  $S^+$ 、 $CS^+$  などの S 原子を含むフラグ メントイオンの TOF スペクトルの強度は "forward" 方向で増加した (図 6.7 b)。逆に、Br<sup>+</sup> など Br 原子 を含むフラグメントイオンの TOF スペクトル強度 は "backward" 方向で増加した。これらの結果は、図 6.7 b に示すように S 原子が検出器の方を向くよう に分子が配列していると考えることで説明できる。 配列の度合いを評価するために、 $F = I_f/(I_f + I_b)$ で定義される量を用いた。ここで、 $I_f$ 、 $I_b$ はそれぞれ、"forward"方向および "backward"方向のフラグ メントイオンの信号強度(積分値)である。配列に寄 与するパラメータのうち、YAG レーザー電場のピー ク強度と試料の回転温度に対する Fの依存性を調べ た。YAG レーザー電場のピーク強度を上げていく と、 $S^+$ についてはFが増加し、また、 $Br^+$ につい ては減少する傾向が見られた。一方、回転温度につ いては、YAG レーザー電場を照射しない場合には回 転温度の変化による F の変化は見られなかったのに 対し、YAGレーザー電場の存在下で試料の回転温度 を下げていくと、S<sup>+</sup> については F が増加し、Br<sup>+</sup> については減少した。

以上二種類の観測結果は、分子の全てのオイラー



図 6.7 b: 分子が配列している様子を観測するための 実験系の様子(右上)とS<sup>+</sup> イオンのTOFスペクトル。 YAGレーザーを照射しない時、forwardとbackward の信号強度はほぼ等しいが、YAGレーザーを照射す ると forward の信号強度が増大する。これは、試料 分子 3,4-dibromothiophene がSを検出器方向に向け て配列したためと解釈できる。

角を規定した、三次元的な配列が実現していること を示している。

# 6.7.2 フィードバック型パルス整形システムによる分子内の量子過程制御

昨年度より、原子分子内の過程が未知の系に対し て、実験者の望む結果を実現するようにパルス整形 器に最適化アルゴリズムを用いてフィードバックを かけ、原子分子内過程を最適化制御(量子制御)する 研究を進めている。この手法は、ハミルトニアンが未 知の系に対する時間に依存するシュレーディンガー 方程式を測定値と最適化アルゴリズムを用いて実験 的に解くことに対応する。このような研究の意義は 以下のようにまとめることができる。(1)最適化の 結果得られたパルスを解析し、相互作用の物理を解 明する。(2)仮説の検証に利用する。(3)特定のパラ メータの最適化により新現象の探索を行う。(4)実験 条件の最適化を行う。また、(1)~(4)は互いに相補 的である。本年度の研究内容は以下のとおりである。

#### ヨウ素分子の多光子イオン化過程の最適制御

フィードバックを利用してフェムト秒レーザーパル スの時間波形を最適化し、多光子イオン化によって生 成されるヨウ素分子イオンの価数を制御した。TOF イオン分析器から得られるイオン信号をフィードバッ クし、遺伝的アルゴリズムを用いることによって、特 定の価数のイオンの生成効率を最適化できる。ここで はナノ秒 Nd:YAG レーザー光の基本波で配向させた I<sub>2</sub> 分子を試料とし、I<sup>+</sup><sub>2</sub> と I<sup>2+</sup>の生成効率を 3 価以上 のイオンの生成効率に比べて高くなるように最適化



図 6.7 c: 無変調のパルス (TL pulse) と最適化パルス (Optimized pulse)、それぞれを用いた場合の TOF スペクトル。灰色に塗りつぶした部分は I<sup>+</sup><sub>2</sub>、I<sup>2+</sup><sub>2</sub> に 由来する信号である。最適化パルスでは灰色部分が 著しく増加している。



図 6.7 d: SHG-FROG で解析した無変調パルスおよ び最適化パルスの時間波形。最適化パルスではピー ク強度が  $8 \times 10^{13}$  W/cm<sup>2</sup> 程度に抑えられている。

した。位相変調をしていないパルス (ほぼ Transform Limited (TL) pulse) で  $2 \times 10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>(パルス幅 50 fs) であったピーク強度が最適化後のパルスでは  $8 \times 10^{13}$  W/cm<sup>2</sup> (パルス幅 90 fs) となっていた (図 6.7 c)。2 価以下のイオン信号の3 価以上のイオン信 号に対する割合は、最適化前の 1.1 に対し、最適化 後では 3.4 と 3 倍以上高い値を得ることができた (図 6.7 d)。

# フェムト 秒パルスの偏光状態の時間変化の制御とその評価法の確立

空間光変調器を用いた 4-f 配置のパルス整形器の 出射側の偏光板を取り除くことにより、偏光状態が 時間と共に変化するパルスの生成に成功した。さら に、このような時間に依存する偏光パルスの特性を 精密に評価するために、POLLIWOG (POLarization Labeled by Interference versus Wavelength of Only a Glint) と呼ばれる測定系を構築した。フィードバッ クシステムと組み合わせることにより、偏光状態の 時間変化の最適化が可能となった。

多光子イオン化過程とレーザーパルスの偏光状態の 相関に関する研究

次に、生成される分子イオンの価数の偶奇性と時 間に依存した偏光パルスとの相関について調べた。 高強度レーザー電場による多光子イオン化過程には、 段階的イオン化と非段階的イオン化の2種類が存在 する。段階的イオン化は電子が一つずつ順に剥ぎ取ら れることにより、多価イオンが生成する過程である。 ·方非段階的イオン化とは、トンネルイオン化した 電子がレーザー電場により加速されて、レーザーの1 周期内に(正確には約2/3周期で)親イオンまで戻り 親イオン内の電子を叩き出すことにより2個の電子 が一緒に剥ぎ取られる過程である。非段階的イオン 化からの自然な推論として、I2+のような偶数価のイ オンの生成には、 $(I_2^+ や) I_2^{3+}$ のような奇数価のイオ ンの生成よりも非段階的イオン化の寄与が大きいと 予測できる。また、2つのイオン化過程とレーザーの 偏光状態には密接な関係がある。段階的イオン化は レーザー電場の偏光状態に依存せずに起こるが、非 段階的イオン化は電子が直線状に加速されて親イオ ンまで戻る必要があるため、直線偏光あるいは楕円 率の小さな楕円偏光が必要である。したがって、上記 の推論は「分子イオンの価数の偶奇性とフェムト秒 レーザー光の偏光状態との間には相関がある」と言 い換えることができる。本研究では配向したヨウ素分 子を試料とし、多光子イオン化過程で生成される 🗓 の  $I_2^+$  および  $I_2^{3+}$  に対する生成量の比とレーザー光の 偏光状態との相関を調べた。実験では、適応度 F を 多光子イオン化過程で生成される  $I_2^{2+}$  イオン化チャ ネル (1,1)] と  $I_2^+$  [イオン化チャネル (1,0)] +  $I_2^{3+}$ [イ オン化チャネル (1,2) および (2,1)] の生成量の比、す なわち、F = (I(1,0) + I(1,2) + I(2,1))/I(1,1)と 定義し、適応度Fと偏光状態との相関を調べた。

まず、波長板を用いてレーザー光の楕円率を変化 させた時の適応度 F の変化を調べた。直線偏光に近 いほど Fの値は小さくなった。これは、直線偏光の 時ほど  $I_2^{2+}$  の生成効率が相対的に高くなっているこ とを示しており、上記の推論と矛盾しない。次に、パ ルス整形器を用いて偏光状態の時間変化まで含めて Fの増加(減少)を最適化した。その結果、偏光状態 が時間的に一定なパルスを用いた場合と比較して、 より大きい (小さい)F の値を得ることができた (図 6.7 e)。これは偏光状態の時間変化が多光子イオン化 のメカニズムに重要な寄与を与えていることを示し ている。Fを最大化(最小化)するパルスの偏光状態 を POLLIWOG により解析した結果 (図 6.7 f)、ピー ク強度付近では楕円偏光 (直線偏光)を持つことが分 かった。これも当初の推論と定性的には矛盾しない 結果である。定量的な解析は今後の課題であるが、多 原子 (N ≥ 2) 分子系については楕円率が一定の場合 でさえ理論的な解析は十分なされていない。このた



図 6.7 e: 遺伝的アルゴリズムを用いて適応度 F を 最大化および最小化した時の進化の様子。初期世代 には、各周波数成分の偏光状態がランダムな"ラン ダム偏光パルス"を用いた。30 世代後には F のコン トラストが 2.5 に達した。



図 6.7 f: 最適化パルスの POLLIWOG による解析結 果。F を最小化した場合 (a) には、レーザーパルス のピーク強度付近で直線偏光となっていた。逆に F を最大化した場合 (b) には、ピーク強度付近で 0.2 程 度の楕円率を持つ楕円偏光であった。

め、楕円偏光した高強度レーザー電場中での多原子 分子のイオン化メカニズムの詳細を明らかにするた めに、解析的分析や計算コードの開発に着手した。

# 6.7.3 高強度レーザー電場による van der Waals二量体の配向制御と分極率の 評価

希ガス原子で構成される二原子分子 Rg2 は van der Waals 結合を持つ最も単純なシステムである。しか し、生成が困難であり、さらに、大量合成が不可能で あるため、分極率や磁化率などの基本的な物理量さえ 測定されていないのが現状である。今回、本研究室で 精力的に研究を進めている分子配向の技術を応用す ることによって、分極率の非等方性  $\Delta \alpha (= \alpha_{\parallel} - \alpha_{\perp})$  という極めて基本的な物理量を定量的に求めること に成功した。

例えば、Xe<sub>2</sub> にピーク強度  $2.6 \times 10^{12}$  W/cm<sup>2</sup> の ナノ秒 YAG レーザー光を照射した時、配向の度合 を表すパラメータ  $\ll \cos^2 \theta \gg (\theta \iota G)$ はGのなす角) は 0.44 であった。また、同じピーク強度 のレーザー光を Kr<sub>2</sub>、Ar<sub>2</sub> に照射すると、 $\ll \cos^2 \theta \gg$ はそれぞれ 0.39、0.37 であった。配向の度合は分極 率の非等方性  $\Delta \alpha$  の大きさによって決まることを考 えると、 $\Delta \alpha$  は Ar<sub>2</sub>、Kr<sub>2</sub>、Xe<sub>2</sub> の順に大きくなるこ とが分かる。

また、 $\Delta \alpha$  の具体的な大きさを評価するため、 $I_2$ を参照分子として用い、 $\ll \cos^2 \theta \gg$ を測定した。図 6.7 g にその YAG レーザーのピーク強度依存性を示 す (黒丸)。実線は回転温度 T<sub>rot</sub> = 5 K の時のシミュ レーション結果であり、実験結果をよく再現してい る。一方、 $Xe_2$ の回転温度は $I_2$ 分子の $T_{rot} = 10$  K に相当する。ここで、回転温度が等しい時、配向度  $\ll \cos^2 \theta \gg$  は回転運動に対する実効的なポテンシャル の深さ $V_{\alpha} = \Delta \alpha I / B (I$ はレーザー光のピーク強度、 Bは回転定数)によって決まる。図 6.7 gの点線で示 すように、 $Xe_2$ と同じ  $\ll \cos^2 \theta \gg$  を与えるピーク強 度は $T_{\rm rot} = 10 \text{ K} \mathcal{O} \text{ I}_2$ 分子では $1 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$  で ある。このことから、Xe<sub>2</sub>の分極率の非等方性  $\Delta \alpha$ は  $I_2$  の 19%、 すなわち、1.3  $Å^3$  であることが分かっ た。同様に、 $Ar_2 \ge Kr_2$ についても  $\Delta \alpha$  を調べたと ころ、それぞれ0.5、0.7 Å<sup>3</sup> と評価できた。

高強度レーザー電場と分子の相互作用に由来する 現象は、上記の配向制御以外にもさまざまな応用が 考えられる。例えば、分子偏向の技術を利用するこ とによって、分極率の平均 $\alpha_{ave}$ を評価できる。また、 6.7.1節で紹介した分子配列の技術を用いると、永久 双極子モーメント $\mu$ が分かる。これらの技術を駆使 して、二量体やクラスターなどのこれまでほとんど 解明されていない新奇な物性を解明していく予定で ある。



図 6.7 g: YAG レーザー光のピーク強度に対する I<sub>2</sub> 分子 の配向度  $\ll \cos^2 \theta \gg$  の依存性。実験値()とシミュレー ションの結果 (実線)を示している。点線はピーク強度 2.6 × 10<sup>12</sup> W/cm<sup>2</sup> における Xe<sub>2</sub> の配向度 (0.44)を示す。

# 6.7.4 高次高調波発生を用いたアト 秒パル スの発生とその計測

可視–近赤外領域で対象としているパルス幅はい わゆるフーリエ変換限界に近く、チタンサファイア レーザーの中心波長領域においては、これ以上の大 幅な短パルス化は原理的に困難である。中心波長を 短波長化し、真空紫外領域(極端紫外線および軟X線 を含む)とすれば、周波数帯域の拡大に伴い、アト 秒(as = 10<sup>-18</sup> s)パルスの発生を期待することがで きる。ここでは、高強度超短パルスレーザー光を気 体原子分子に集光することにより発生する高次高調 波の新しい制御手法を探究しつつ、(1)アト秒パルス を発生する技術を開発するとともに、発生と表裏一 体である(2)アト秒パルスの信頼できる計測法の開 発とその応用を主目的としてその研究に着手した。

本年度は、超音速ジェットバルブ、斜入射真空紫外 分光器、真空排気装置および電子増倍管などを用い て、高次高調波発生システムを新たに設計・試作し た。既に、フェムト秒チタンサファイアレーザー増幅 システムの出力を希ガス原子に集光照射し、高次高 調波の発生条件の最適化を進めている。高次高調波 発生の物理過程を量子力学的に詳細に理解するため の数値計算コードの開発にも着手した。高次高調波 は基本波が直線偏光の時に発生する。従って、基本波 として  $15 \sim 20$  fs のパルスを使用してもそのピーク 強度付近でのみ直線偏光にすることができれば、ア ト秒台のパルスを発生できる可能性がある。フェム ト秒パルス内の偏光状態の制御によるアト秒パルス 発生の具体的な手法 (複屈折結晶と波長板を使用し た方法並びに空間光変調器を用いる方法) について も検討を加えた。

#### 6.7.5 その他

本年度は大学院生2名が加入する一方、修士1名 が誕生した。ここで報告した研究成果は、研究室の メンバー全員と学部4年生の特別実験で本研究室に 配属された紺谷健一朗君、當山清彦君(以上夏学期)、 井上徹君、武多昭道君(以上冬学期)の活躍によるも のである。

なお、本年度の研究活動は、以下の補助金によっ て行われた。ここに記して謝意を表する。

- 1. 科学研究費補助金、基盤研究 (S)、「未到時間領 域の超短パルス光発生とその計測」(研究代表者: 酒井広文)。
- 2. 科学研究費補助金、特定領域研究、計画研究、 「強光子場とパルス整形技術による分子操作と量 子過程制御」(研究代表者:酒井広文)。
- 松尾学術研究助成金、「フィードバック型パルス 整形技術を用いた原子分子内の量子過程の最適 制御」(代表研究者:酒井広文)。
- 4. 科学研究費補助金、奨励研究 (A)(2)、「配向した 分子クラスターの時間分解二次元イメージング 分光」(研究代表者:峯本紳一郎)。

#### <報文>

#### (原著論文)

- (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 linearlypolarized laser field," Laser control and manipulation of molecules, ACS Symposium Series 821, Ed. by A. Bandrauk, R. J. Gordon, and Y. Fujimura pp. 320–335 (2002).
- [2] Hirofumi Sakai, Shinichirou Minemoto, Hiroshi Nanjo, Haruka Tanji, and Takayuki Suzuki, "Controlling the orientation of polar molecules with combined electrostatic and pulsed, nonresonant laser fields," Phys. Rev. Lett. **90**, 083001-1– 083001-4 (2003).
- [3] Hirofumi Sakai, Jakob Juul Larsen, Ida Wendt-Larsen, Johannes Olesen, Paul B. Corkum, and Henrik Stapelfeldt, "Nonsequential double ionization of D<sub>2</sub> molecules with intense 20-fs pulses," to appear in Phys. Rev. A 67 (2003).
- [4] Hirofumi Sakai, Shinichirou Minemoto, Hiroshi Nanjo, Haruka Tanji, and Takayuki Suzuki, "Orientation of polar molecules with combined electrostatic and pulsed, nonresonant laser fields," to appear in Eur. Phys. J. D.
- [5] Shinichirou Minemoto, Hiroshi Nanjo, Haruka Tanji, Takayuki Suzuki, and Hirofumi Sakai, "Observation of molecular orientation by the combination of electrostatic and nonresonant, pulsed laser fields," J. Chem. Phys. **118**, 4052–4059 (2003).
- [6] Shinichirou Minemoto, Haruka Tanji, and Hirofumi Sakai, "Polarizability anisotropies of rare gas van der Waals dimers studied by laser-induced molecular alignment," to appear in J. Chem. Phys.
- [7] Akira Terasaki, Shinichirou Minemoto, and Tamotsu Kondow, "Energetics of the manganese trimer and tetramer ions," J. Chem. Phys. 117, 7520–7524 (2002).
- [8] Akira Terasaki, Tina M. Brier, Maria Kulawik, Shinichirou Minemoto, Kensuke Tono, Akira Matsushita, and Tamotsu Kondow, "Ferromagnetic spin coupling in the manganese trimer ion evidenced by photodissociation spectroscopy," J. Chem. Phys. **118**, 2180–2185 (2003).

#### (会議抄録)

[9] Hirofumi Sakai, Shinichirou Minemoto, Hiroshi Nanjo, Haruka Tanji, and Takayuki Suzuki, "Preparation of oriented molecules for ultrafast spectroscopic studies," Ultrafast Phenomena XIII, Springer, R. D. Miller, M. M. Murnane, N. F. Scherer, and A. M. Weiner (Eds.), pp. 99–101 (2003).

- [10] 鈴木隆行、「フィードバック型パルス整形器を用いた ヨウ素分子の多光子イオン化過程の制御」、修士論文、 2003年1月.
- <学術講演>

(国際会議)

#### 招待講演

- [11] Hirofumi Sakai, Shinichirou Minemoto, Hiroshi Nanjo, Haruka Tanji, and Takayuki Suzuki, "Controlling the orientation of polar molecules with combined electrostatic and pulsed, nonresonant laser fields," The 2002 Multiphoton Processes Gordon Conference, New Hampshire, U.S.A., June 2002.
- [12] Hirofumi Sakai, Shinichirou Minemoto, Hiroshi Nanjo, Haruka Tanji, and Takayuki Suzuki, "Orientation of polar molecules with combined electrostatic and pulsed, nonresonant laser fields," The International Conference on Multiphoton Processes (ICOMP) IX, Crete, Greece, October 2002.
- [13] Hirofumi Sakai, "Applications of ion imaging technique to the study of molecular alignment and orientation," The First Canadian Workshop on Ultrafast Dynamic Imaging, Orford, Quebec, October 2003.

#### 一般講演

- [14] Hirofumi Sakai, Shinichirou Minemoto, Hiroshi Nanjo, Haruka Tanji, and Takayuki Suzuki, "Preparation of oriented molecules for ultrafast spectroscopic studies," The Thirteenth International Conference on Ultrafast Phenomena, Vancouver, Canada, May 2002.
- [15] Shinichirou Minemoto, Hiroshi Nanjo, Haruka Tanji, Takayuki Suzuki, and Hirofumi Sakai, "Orientation of neutral molecules by combined electrostatic and laser fields," International Quantum Electronics Conference, Moscow, Russia, June 2002.
- [16] Shinichirou Minemoto, Haruka Tanji, and Hirofumi Sakai, "Experimental determination of polarizability anisotropies of van der Waals dimers by molecular alignment technique with an intense laser field," The XX International Symposium on Molecular Beams, Lisbon, Portugal, June 2003.
- [17] Shinichirou Minemoto, Haruka Tanji, and Hirofumi Sakai, "Alignment of rare gas dimers with an intense nonresonant laser field," The XXIII International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (ICPEAC), Stockholm, Sweden, July 2003.
- [18] Takayuki Suzuki, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Correlation between a femtosecond time-dependent polarization pulse and the production efficiency of evenly- or oddly-charged molecular ions," The XXIII International Conference on

(学位論文)

Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (IC-PEAC), Stockholm, Sweden, July 2003.

- [19] Takayuki Suzuki, Shinichirou Minemoto, and Hirofumi Sakai, "Active control of multiphoton ionization processes in molecules with femtosecond time-dependent polarization pulses," The 10th International Workshop on Femtosecond Technology, Chiba, Japan, July 2003.
- [20] Haruka Tanji, Shinichirou Minemoto, Yutaka Nomura, Takayuki Suzuki, and Hirofumi Sakai, "Three-dimensional orientation of molecules with combined electrostatic and elliptically polarized laser fields," The XX International Symposium on Molecular Beams, Lisbon, Portugal, June 2003.
- [21] Haruka Tanji, Shinichirou Minemoto, Yutaka Nomura, Takayuki Suzuki, and Hirofumi Sakai, "Three-dimensional orientation of asymmetric top molecules using electrostatic and elliptically polarized laser fields," The XXIII International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (ICPEAC), Stockholm, Sweden, July 2003.
- [22] K. Fukuda, A. Hasegawa, T. Kobayashi, Y. Yoshino, T. Suzuki, M. Hosokawa, and M. Tachikawa, "Temporal variation of local density of Cs atoms in MOT," The 16 European Frequency and Time Forum, St. Petersburg, Russia, June 2002.
- [23] Atsushi Hasegawa, Kyoya Fukuda, Takayuki Suzuki, Takeo Kobayashi, Maki Tachikawa, and Mizuhiko Hosokawa, "Population relaxation of Cs atoms in MOT," Conference on Precision Electromagnetic Measurement, Ottawa, Canada, July 2002.

#### (国内会議)

#### 招待講演

- [24] 酒井広文、「光子場による分子配向と反応制御」、特定領域研究「強レーザー光子場における分子制御」第 1回全体会議、東京大学理学部、2002年10月.
- [25] 酒井広文、「静電場とレーザー電場の併用による分子 操作」、特定領域研究「強レーザー光子場における分 子制御」領域会議「光子場デザインと分子制御」、東 京大学物性研究所、2003年1月.
- [26] 酒井広文、「高強度レーザー電場を用いた分子操作」、 「UP2004 にむけた日本の超高速光科学の新展開」、分 子科学研究所、2003 年 3 月.

#### 一般講演

- [27] 酒井広文、峰本紳一郎、南條浩史、「H2 分子の多光子 イオン化における2 波長効果」、日本物理学会2002 年秋季大会、中部大学、2002 年9月.
- [28] 鈴木隆行、野村雄高、粥川直人、丹治はるか、峰本紳 一郎、酒井広文、「フィードバック型パルス整形器の 開発とヨウ素分子の多光子イオン化過程の制御」、日 本物理学会 2002 年秋季大会、中部大学、2002 年 9 月.

- [29] 峰本紳一郎、南條浩史、酒井広文、「高強度ナノ秒レー ザー光を用いた希ガス二量体の配向制御」、日本物理 学会 2002 年秋季大会、中部大学、2002 年 9 月.
- [30] 丹治はるか、峰本紳一郎、野村雄高、鈴木隆行、酒井 広文、「楕円偏光したレーザー光と静電場の併用によ る分子の3次元配列制御」、日本物理学会2002年秋 季大会、中部大学、2002年9月.
- [31] 酒井広文、峰本紳一郎、南條浩史、「直線偏光した 2 波長レーザー場中での H<sub>2</sub> 分子の解離性イオン化」、 2002 年分子構造総合討論会、神戸国際会議場、2002 年 10 月.
- [32] 鈴木隆行、野村雄高、粥川直人、丹治はるか、峰本紳 一郎、酒井広文、「遺伝的アルゴリズムを利用した I<sub>2</sub> 分子の多光子イオン化過程の最適化制御」、2002年分 子構造総合討論会、神戸国際会議場、2002年10月.
- [33] 峰本紳一郎、南條浩史、酒井広文、「非共鳴高強度レー ザー電場による van der Waals 二量体の配向制御」、 2002 年分子構造総合討論会、神戸国際会議場、2002 年 10 月.
- [34] 丹治はるか、峰本紳一郎、野村雄高、鈴木隆行、酒井 広文、「楕円偏光した高強度レーザー電場と静電場の 組み合わせによる中性分子の立体配列制御」、2002年 分子構造総合討論会、神戸国際会議場、2002年10月.
- [35] 酒井広文、峰本紳一郎、野村雄高、南條浩史、「2波 長レーザー光による水素分子の多光子イオン化」、宇 宙科学研究所 2002 年度宇宙空間原子分子過程研究会 「強い場における原子分子過程―強光子場と強クーロ ン場―」、宇宙科学研究所、2003 年1月.
- [36] 鈴木隆行、野村雄高、粥川直人、丹治はるか、峰本紳 一郎、酒井広文、「時間に依存した偏光パルスを用い たヨウ素分子の多光子イオン化過程の制御」、宇宙科 学研究所 2002 年度宇宙空間原子分子過程研究会「強 い場における原子分子過程―強光子場と強クーロン 場―」、宇宙科学研究所、2003 年1月.
- [37] 峰本紳一郎、南條浩史、酒井広文、「高強度レーザー 電場を用いた希ガス二量体の配向制御とその分極率 の評価」、宇宙科学研究所 2002 年度宇宙空間原子分 子過程研究会「強い場における原子分子過程—強光 子場と強クーロン場—」、宇宙科学研究所、2003 年 1 月.
- [38] 丹治はるか、峰本紳一郎、野村雄高、鈴木隆行、酒井 広文、「高強度レーザー電場と静電場の併用による分 子の立体配列制御」、宇宙科学研究所 2002 年度宇宙 空間原子分子過程研究会「強い場における原子分子過 程―強光子場と強クーロン場―」、宇宙科学研究所、 2003 年1月.
- [39] 酒井広文、峰本紳一郎、野村雄高、南條浩史、「2 波長 レーザー光による H<sub>2</sub> 分子の多光子イオン化」、レー ザー学会学術講演会第 23 回年次大会、アクトシティ 浜松コングレスセンター、2003 年 1 月.
- [40] 鈴木隆行、野村雄高、粥川直人、丹治はるか、峰本紳 一郎、酒井広文、「時間に依存した偏光パルスによる ヨウ素分子の多光子イオン化過程の制御」、レーザー 学会学術講演会第23回年次大会、アクトシティ浜松 コングレスセンター、2003年1月.

- [41] 峰本紳一郎、南條浩史、酒井広文、「非共鳴高強度レー ザー電場を用いた希ガス二量体の配向制御とその分 極率の評価」、レーザー学会学術講演会第23回年次 大会、アクトシティ浜松コングレスセンター、2003 年1月.
- [42] 丹治はるか、峰本紳一郎、野村雄高、鈴木隆行、酒井 広文、「静電場と楕円偏光したレーザー電場の併用に よる中性分子の立体配列制御」、レーザー学会学術講 演会第23回年次大会、アクトシティ浜松コングレス センター、2003年1月.
- [43] 酒井広文、峰本紳一郎、野村雄高、南條浩史、「2 波 長レーザー光による H<sub>2</sub> および D<sub>2</sub> 分子の多光子イオ ン化」、2003 年春季第 50 回応用物理学関係連合講演 会、神奈川大学、2003 年 3 月.
- [44] 鈴木隆行、峰本紳一郎、酒井広文、「偏光状態の制御を 含めたフィードバック型パルス整形器の開発」、2003 年春季第50回応用物理学関係連合講演会、神奈川大 学、2003年3月.
- [45] 鈴木隆行、峰本紳一郎、野村雄高、丹治はるか、酒井 広文、「フェムト秒パルスの偏光状態と分子の多光子 イオン化過程の相関」、2003 年春季第50 回応用物理 学関係連合講演会、神奈川大学、2003 年3月.
- [46] 峰本紳一郎、南條浩史、酒井広文、「高強度レーザー 電場による希ガス二量体の配向制御と分極率の評価」、 2003 年春季第 50 回応用物理学関係連合講演会、神 奈川大学、2003 年 3 月.
- [47] 丹治はるか、峰本紳一郎、野村雄高、鈴木隆行、酒井 広文、「高強度レーザー電場と静電場の併用による分 子の三次元配列制御」、2003 年春季第50 回応用物理 学関係連合講演会、神奈川大学、2003 年3月.

<その他>

- [48] Shinichirou Minemoto, Hiroshi Nanjo, Haruka Tanji, Takayuki Suzuki, and Hirofumi Sakai, "Observation of molecular orientation by the combination of electrostatic and nonresonant, pulsed laser fields," Virtual Journal of Ultrafast Science, 2, No. 3 (2003).
- [49] 酒井広文、「強光子場とパルス整形技術による分子操 作と量子過程制御 (Molecular manipulation with an intense laser field and quantum control with pulse shaping techniques)」、科学研究費補助金特定領域研 究「強レーザー光子場における分子制御」平成14年 度報告書.

# 7 生物物理

## 7.1 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 なっている。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)新しい測定技術と計算機シミュレーション 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。

# 7.1.1 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。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-ラクトアルブミン変異体の安定性とフォール ディング反応

(佐伯、新井博士(産総研) 桑島)

昨年度までの研究により、 $\alpha$ -ラクトアルブミン( $\alpha$ -LA)の巻き戻りの遷移状態はモルテン・グロビュー ル中間体と天然状態の間に存在することがわかって いる。また、遷移状態では $\alpha$ ドメインにある C へ リックスの一部と $\alpha$ ドメイン- $\beta$ ドメインの境界にお いて天然相互作用が形成されつつあることが期待さ れる。

そこで、α-LA のこの構造領域に着目して、その フォールディングの機構を調べるために変異体を6 種類(I55V、W60A、I89V、I89A、K93A、L96A) 作製した。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)スペクトルで測定したところ、 いずれの変異体蛋白質も野生型蛋白質より不安定化 していた。フォールディング反応とアンフォールディ ング反応の速度過程をストップトフロー CD 法で測 定した。I55V、I89V、I89A では野生型と比べてア ンフォールディング速度が速く、フォールディング速 度が遅くなり、φ 値は 0.5 くらいになった。W60A、 K93A、L96A は野生型よりもアンフォールディング 速度は速くなったが、フォールディング速度は野生 型と差が見られなかった。したがって、 $\phi$ 値は 0 付 近である。これらのことからトリプトファン 60 とり シン 93 およびロイシン 96 の周りは遷移状態で側鎖 の密なパッキングが形成されていないが、イソロイ シン 55 とイソロイシン 89 の周りでは遷移状態で部 分的に側鎖のパッキングが形成されていることがわ かった。

イヌミルクリゾチームのフォールディング機構の研究

(中尾、桑島:新井博士(産総研)、小柴博士(カ リフォルニア工科大)、新田教授(北大)との共同 研究)

昨年から引き続いて、カルシウム結合型リゾチームの一種であるイス・ミルクリゾチーム(CLZ)の大 腸菌による発現、精製、測定の実験を行った。CLZ の精製過程については、昨年度、従来の方法と比べ より簡便であるが同等以上の効率で活性 CLZ が得ら れる、「尿素、塩化リチウム、グルタチオン存在下に おける CLZ の巻き戻し系」を用いて、より大量に精 製処理を行うことが出来るようになった。

また、ストップトフロー装置を用いて、CD、および蛍光をプローブとした CLZ の巻き戻り反応を測定した。その結果、巻き戻り反応中に少なくとも二つの中間体が形成される様子を確認することができた。一つは測定装置の不感時間内に形成されるバースト相中間体で、天然状態類似の遠紫外 CD 値とある程度の疎水コアを持つ。その後、遠紫外 CD 値のオーバーシュートが生じて、別の中間体が形成される。このオーバーシュート相における蛍光変化が非常に小さいので、二つ目の中間体は、パースト相中間体の後の二次構造再構成によって形成されると考えられる。

プロリンのないスタフィロコッカル・ヌクレア - ゼ 変異体の巻戻り経路の研究

(鎌形、澤野博士(東大・農)田之倉教授(東大・ 農) 桑島)

蛋白質が複雑なフォールディング反応を示す時、多 くの場合、プロリン・ペプチド結合のシス・トラン ス異性化反応のような、変性状態の遅い異性化反応 によって複雑な反応がもたらされていると考えられ てきた。したがって、もし、この遅い異性化反応を すべてなくしてしまえば、蛋白質は単純なフォール ディング反応を示すことが期待されるが、はたして そうだろうか?この疑問に答えるために、昨年度に 引き続き、プロリンのないスタフィロコッカル・ヌ クレア - ゼ変異体 (SNase (pro-))のフォールディン グ反応を詳細に調べた。

蛍光ストップト・フロー装置を用いて、酸変性状 態からのフォールディング反応を測定したところ、 少なくとも4つのフォールディング相がある複雑な 反応であることがわかった。ダブル・ジャンプ測定 1 (Interrupted refolding) を行った結果、1番速い 相は中間体の蓄積にともなう遅延相であり、2番目 と3番目の相は、いずれも、天然状態の蓄積を表して いることが明らかになった。つまり、SNase (pro-) は少なくとも2つの並行経路を通り、天然状態に巻 き戻ることを示している。ダブル・ジャンプ測定2 (Interrupted unfolding)から、変性状態間に遅い異 性化反応は存在しないことが分かった。このことは、 SNase (pro-)の複数のフォールディング経路がプロ リン以外のペプチド結合の異性化のような遅い異性 化反応によるものではないことを表している。最後 に、精製した蛋白質のN末端分析と質量分析を行っ た結果、精製した蛋白質は均一であることが分かっ た。つまり、サンプルの不均一さによって、複数の 経路が生じたわけではなかった。

以上のことをまとめると、SNase (pro-) は複数の 経路を通って、天然状態に折り畳まる。それぞれの 経路上には中間体が存在し、この中間体が存在する ために複数のフォールディング経路が観測可能になっ たと考えられる。

スタフィロコッカル・ヌクレアーゼのフォールディ ング開始部位の研究

(吉田、鎌形、廉岡、佐伯、桑島)

スタフィロコッカル・ヌクレアーゼ (SNase) はフ オールディングの良いモデルとして長らく研究がされ てきた蛋白質である。上記の鎌形らの研究からこの 蛋白質は、一つの変性状態アンサンプルから複数の経 路を並行に巻き戻るということが分かっているが、実 際の巻き戻りの機構は理解されていない。以前の研究 では、野生型に存在する6個のプロリン残基による異 性化の効果を避けるため、プロリンを他の残基に置換 した変異体を作成した (P11A/P31A/P42A/P47T/ P56A/P117G)。

この擬野生型とこれを元にして作成した5個の変 異体(V66L,G88V,V66L/G88V,A69T,A90S)の 巻き戻り過程を、pHによるシングルジャンプとダ ブルジャンプでのストップトフロー法を用い、詳し く調べた。巻き戻りが複雑なので、実験データは従 来の方法をとらず,最大エントロピー法を用いたイ ンバージョンにより行った。その結果、変異体も擬 野生型と同様のスキームに従って巻き戻ること、ま た、変異は経路の選択における優先順位を変化させ ることによってフォールディングに影響を与えるこ とが分かった。これまでの研究と照らし合わせてみ ると、これは SNase のフォールディングが複数の開 始部位から始まるということを示していると考えら れる。構造的見地からは、巻き戻り時の遷移状態で は beta サブドメインほぼ全体にわたって天然構造が 出来ている可能性が高いということも分かった。

緑色蛍光蛋白質変異体 (Cycle3) の酸変性と巻き戻り

(榎、桑島)

発光オワンクラゲ由来の緑色蛍光蛋白質 (GFP) は、 etaバレル型の構造の内側に、天然状態で緑色の蛍光を 発する発色団を持ち、その特有の蛍光は細胞内など の複雑な環境下でも天然状態形成の良い指標となる。 GFP の発色団の形成については、多くの研究がなさ れているが、その天然状態への巻き戻りの機構はまだ よくわかっていない。野生型の GFP は凝集しやすい ため、変異体である Cycle3 (F99S.M153T,V163A) (野生型のGFPと比較してその性質は大きく違わな いが、凝集しにくく、天然状態への巻き戻り効率が 高い。)を使って pH 依存的な安定性、可逆性、酸変 性状態からの巻き戻りの速度過程を特徴付けた。発 色団の蛍光と、二次構造含量を測定できる遠紫外円 L色性(CD)をプローブとして、酸変性状態からの 巻き戻りの速度過程をストップトフロー装置を用い て測定したところ、少なくとも4つの速度相が見え た。そのうち、一番速い相は経路上中間体であり、二 次構造の形成を伴っていた。また NDN(天然状態-変性状態-天然状態)ダブルジャンプ実験により、プ ロリンの異性化による影響を見積り、プロリンの異 性化反応が GFP の巻き戻りを遅く、複雑にしている ことがわかった。

アクチンのド メインの発現

(石橋(4年生特別実験)佐伯、桑島)

アクチンは大腸菌で発現するが活性のあるものは 得られていない。アクチン全体のフォールディング が大腸菌内で難しいと思われるため、アクチンのド メインの大腸菌での発現を行った。PCR によりア クチンのインナードメインおよびアウタードメイ ンを増やして、発現ベクターに挿入した。大腸菌株 BL21(DE3)pLysS に形質転換して誘導すると、イン ナードメインは大腸菌で大量発現した。アクチンの インナードメインは対入体として得られた。尿素で 可溶化して陰イオン交換カラムにより変性剤存在下 で精製した。今後は精製したアクチンのインナード メインを天然条件下で精製して、正しくフォールドし たものが得られるかどうかを調べていく予定である。

# 7.1.2 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

細胞内での蛋白質の構造形成はさまざまの分子シャ 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関係す 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関 与しており、分子シャペロンの概念は、生物物理学、 や、分子生物学、細胞生物学、医学、バイオテク 生化学 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 関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やシャペロ ニンの機能発現にとって必要な ATP によるアロステ リックな構造転移を in vitro のモデル系を用いて調 べている。

フッ化金属 - ADP 複合体による GroEL のアロス テリック転移

(伊野部、菊島(4年生特別実験) 槇尾、新井、 桑島)

標的蛋白質の効率的な巻き戻りはヌクレオチドに よる GroEL のアロステリック転移により促進され る。しかしながら、アロステリック転移を引き起こ すのは ATP だけで、ATP γS や AMP-PNP の結合は アロステリック転移を引き起こさない。このことは、 GroEL はアロステリック転移する際に、高いヌクレ オチド選択性を持つことを示している。そこでわれ われは何故 GroEL はアロステリック転移に関して、 高いヌクレオチド選択性を持つのか研究を行った。

われわれは大きさと配位ジオメトリーの異なる種々 のリン酸アナログと ADP の複合体よりなる ATP ア ナログを用いて、GroEL のアロステリック転移を調 べた。フッ化アルミニウム (AlF<sub>x</sub>)及びフッ化ベリリ ウム (BeF<sub>x</sub>)、フッ化ガリウム (GaF<sub>x</sub>) と ADP の複 合体は、蛍光ラベルした GroEL に速度論的に観測で きる蛍光強度の上昇をもたらしたが、フッ化スカン ジウム (ScF<sub>x</sub>)及びバナジン酸 (VO<sub>4</sub>) と ADP の複 合体は速度論的な蛍光上昇をもたらさなかった。

蛍光強度変化のバースト相と第一相のフッ化金属-ADP 複合体濃度依存性を調べた結果、バースト相の 蛍光変化は非協同的なヌクレオチド結合をあらわし ていることが分かった。第一相の蛍光の変化は速度 論的 MWC モデルでよく説明することができるアロ ステリック転移の過程であることが分かった。また、 SAXS の結果も、AIF<sub>x</sub>、BeF<sub>x</sub> 及び GaF<sub>x</sub> と ADP の 複合体は、ATP と同じアロステリックな構造変化を GroEL にもたらすことを支持した。

以上の結果はリン酸及びリン酸アナログが正四面 体ジオメトリーをもつこと、フッ素-金属イオン及び リン-酸素原子間の距離が 1.6 Å 前後であることが、 GroELのアロステリック転移には重要であることを 示している。 $ATP\gammaS$ や AMP-PNP が GroELのア ロステリック転移を引き起こさない理由も、 $\gamma$ -リン 酸基部位のサイズとジオメトリーが ATP との異なっ ていることに起因すると考えられる。

GroELのアロステリック転移のX線小角散乱及び 蛍光スペクトルによる研究

(伊野部、新井、中尾、鎌形、槇尾、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)

GroEL に介助された蛋白質の効率的な立体構造形 成には、GroEL への ATP の結合と加水分解が必須 である。ATP による GroEL の大きな構造変化が、 標的蛋白質の効率的な巻き戻りを促進しているもの と考えられている。ATP 存在下の GroEL の構造を 明らかにすることは GroEL のシャペロン機能発現機 構を知る上で大きな意味をもつ。今回われわれは X 線小角散乱法(SAXS)とストップトフロー蛍光法を 用いて ATP による GroEL の構造変化について詳細 な測定を行った。

SAXS により GroEL の3つのアロステリック状態 を明確に区別することができ、またストップトフロー SAXS により、ATP により引き起こされた GroEL の アロステリック転移の速度過程をはじめて直接観測 することができた。そのアロステリック転移の速度定 数は $3 \sim 5 s^{-1}$ であり、ストップトフロー蛍光スペク トル法で観測したトリプトファン挿入変異体 GroEL の ATP による蛍光強度変化の第二相に対応するこ とが明らかとなった。

速度論的蛍光変化の第二相がアロステリック転移 の過程であるという SAXS の結果をもとに、蛍光変 化の ATP 濃度依存性を調べた結果、蛍光変化の第 一相は ATP が GroEL へ非協同的 2 分子反応で結合 する過程であると結論された。アロステリック転移 に対応する第二相の ATP 濃度依存性は、遷移状態 理論と Monod-Wyman-Changeux (MWC)アロス テリックモデルを組み合わせた、速度論的 MWC モ デルでよく説明できた。このモデルに基づいた解析 により、遷移状態の GroEL への ATP 結合定数を含 め、アロステリック転移の平衡論的及び速度論的パ ラメーターを見積もることができた。

シャペロニン GroEL がスタフィロコッカル・ヌク レアーゼの巻き戻りのエネルギー地形に及ぼす影響

#### (廉岡、鎌形、伊野部、佐伯、桑島)

シャペロニン GroEL は標的蛋白質との結合によ り、その巻き戻りに影響を及ぼす。以前のわれわれ の研究によって、GroEL 存在下において、スタフィ ロコッカル・ヌクレアーゼ(SNase)は GroEL に結 合したままで巻き戻ることが示された。しかし、プ ロリンペプチド 結合の異性化のため、その巻き戻り 過程は複雑であり、反応のスキームは明らかになら



図 7.1 a: (a)SAXSで観測された ATP による GroEL の構造変化の速度過程。(b)10 ms ~ 310 ms の平均 SAXS パターン (実線) と 1.5 s ~ 3 s の平均 SAXS パターン (破線)。

なかった。そこで、プロリンをすべて他のアミノ酸 に置換し、さらに A69T という不安定化の変異を導 入した SNase 変異体 (Pro<sup>-</sup>+A69T)を用いて、系の 単純化を試みた。

Pro<sup>-+</sup>A69T について、トリプトファンの蛍光を プローブとして、ストップトフロー法で pH 2.5 か ら pH 7.5 にジャンプさせ、蛍光変化と天然状態形 成それぞれの速度過程を測定した。その結果から、 GroEL 非存在下では速度定数 0.75 s<sup>-1</sup> と 0.23 s<sup>-1</sup> の 2 つのパラレルな経路で巻き戻り、GroEL 存在下 では GroEL に結合したまま、速度定数 0.15 s<sup>-1</sup> と  $0.031 s^{-1}$  の 2 つのパラレルな経路で巻き戻ることが 示された。このことは、GroEL が SNase の巻き戻り の自由エネルギー地形を変化させていることを意味 している。 7.1.3 新しい測定技術と計算機シミュレー ション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、ストップト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ト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トフロー混合装 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 明らかとなっており、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。さらに、現在では, 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フォール ディング研究には有効なアプローチである。われわ れは、このような観点から新しい測定技術と計算機 シミュレーション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。

高圧下温度ジャンプ装置による蛋白質の巻き戻り・ 変性過程の観測

(鎌形、桑島)

前年度に引き続き、高圧下温度ジャンプ装置の立 ち上げを行った。この装置を用いれば、高圧条件下 (e.g. 1000-2000 気圧) で蛋白質の巻き戻り・変性反 応を測定することが可能となる。まず、温度の上昇 により pH が変化しやすいトリス緩衝液と蛍光及び 吸収 pH 指示薬(それぞれ、BCECF と phenol red ) を用いて、装置の性能を調べた。その結果、観測時 間域は 80-200 µs から 250-500 ms であり、温度ジャ ンプ幅は 4-7°C であった。さらに、高圧下でもその 性質はほとんど変わらなかった。われわれは、この 装置を用いて、さまざまな圧力下でプロリンのない スタフィロコッカル・ヌクレアーゼ変異体の熱変性 反応を測定した。圧力が高くなればなるほど、この モデル蛋白質の変性反応は遅くなることがわかった。 現在、高圧下で低温変性状態からの巻き戻り反応に ついても測定を試みている。

分子動力学法を用いた、N 末近傍の構造のみに違い がある α-ラクトアルブミンの野生型と組み換え体の 安定性差異の解析

(苙口、桑島:池口助教授(横浜市立大学)木寺 教授(横浜市立大学)らとの共同研究) α-ラクトアルブミン(αLA)は野生型と組み換え 体では大きく安定性に差があり、組み換え体は野生 型よりも 5.7 倍も速くアンフォールディングする。組 み換え体の化学構造は野生型に比べて N 末にメチオ ニンが付加されているだけで、結晶構造(野生型: 1HFY、組み換え体:1HMK)がほとんど同じであ るにも関わらず、安定性に違いが出る理由は明確に なっていない。そこで今回、われわれは分子動力学 法を用いて、398Kと498Kの二つの温度における アンフォールディング・シミュレーションを野生型 と組み換え体それぞれについて5nsを10回行い、組 み換え体がより速くほどけるかを計算の妥当性の指 標とした上で、計算結果から原子レベルの解析を行 うことにした。398Kの計算では、組み換え体は昇 温後すぐに N 末近傍の構造が壊れると同時に疎水核 に水が浸入し、疎水核及び疎水核に接する箇所の構 造が緩くなるというイベントが観察されたのに対し、 野生型で N 末近傍の構造が壊れたものは少なく実験 結果と一致する。またカルシウム結合部位周辺の構 造は野生型と組み換え体共に安定であり、この事は 遷移状態においてカルシウム結合部位周辺の構造は 保持されているが、疎水核周辺の特異的三次構造は 失われているという φ 値解析 (佐伯、新井)の結果 にも一致する。逆に 498 K では野生型、組み換え体 共にすぐ N 末近傍の構造がすぐ壊れ、明確な差を観 察することができなかった。

#### <報文>

(原著論文)

- [1] M. Arai, K. Ito, T. Inobe, M. Nakao, K. Maki, K. Kamagata, H. Kihara, Y. Amemiya, and K. Kuwajima: Fast compaction of α-lactalbumin during folding studied by stopped-flow X-ray scattering. J. Mol. Biol. **321** (2002) 121-132.
- [2] K. Kuwajima: The Role of the molten globule state in protein folding: The search for a universal view of folding. Proc. Indian Nat. Sci. Acad. 68 (2002) 333-340.
- [3] T. Inobe, M. Arai, M. Nakao, K. Ito, K. Kamagata, T. Makio, Y. Amemiya, H. Kihara, and K. Kuwajima: Equilibrium and kinetics of the allosteric transition of GroEL studied by solution X-ray scattering and fluorescence spectroscopy. J. Mol. Biol. **327** (2003) 183-191.
- [4] M. Arai, T. Inobe, K. Maki, T. Ikura, H. Kihara, Y. Amemiya, and K. Kuwajima: Denaturation and reassembly of chaperonin GroEL studied by solution X-ray scattering. Protein Sci. **12** (2003) 672-680.
- [5] T. Inobe, K. Kikushima, T. Makio, M. Arai, and K. Kuwajima: The Allosteric transition of GroEL induced by metal fluoride-ADP complexes. J. Mol. Biol. **329** (2003) 121-134.
- [6] M. Arai, M. Kataoka, K. Kuwajima, C.R. Matthews, and M. Iwakura: Effects of the difference in the unfolded-state ensemble on the folding of *Escherichia coli* dihydrofolate reductase. J. Mol. Biol. (2003) in press.

#### (会議抄録)

- [7] K. Kuwajima, T. Makio, and T. Inobe: Chaperone-affected folding of globular proteins. J. Biol. Phys. 28 (2002) 77-93 (*Proceedings* of the 4th International Conference on Biological Physics, ICBP2001).
- [8] K. Kuwajima, M. Arai, T. Inobe, K. Ito, M. Nakao, K. Maki, K. Kamagata, H. Kihara, and Y. Amemiya: The use of the time-resolved X-ray solution scattering for studies of globular proteins. Spectroscopy–Int. J. 16 (2002) 127-138.
- [9] M. Nakao, M. Arai, T. Koshiba, K. Nitta, and K. Kuwajima: Folding mechanism of canine milk lysozyme studied by circular dichroism and fluorescence spectroscopy. Spectroscopy–Int. J. 17 (2003) 183-193.
- [10] K. Kamagata, and K. Kuwajima: Parallel folding pathway of proline-free staphylococcal nuclease studied by the stopped-flow double-jump method. Spectroscopy-Int. J. 17 (2003) 203-212.
- (学位論文)
- [11] 伊野部智由: Equilibrium and kinetics of the allosteric transition of GroEL induced by adenine nucleotide. (博士論文)
- [12] 榎佐和子: Acid denaturation and refolding of a mutant (Cycle3) of green fluorescent protein (修士 論文)
- [13] 廉岡昭雄:シャペロニン GroEL がスタフィロカッカ ル・ヌクレアーゼの巻き戻りのエネルギー地形に及ぼ す影響(修士論文)
- [14] 吉田龍平: Effects of mutations on the folding landscape of staphylococcal nuclease (修士論文)

#### (著書)

- [15] R.H. Pain 編、崎山文夫 監訳 / 河田康志・桑島邦 博 訳:タンパク質のフォールディング [第2版]
  (Mechanisms of Protein Folding (Second Edition) ed. R. H. Pain (Oxford University Press, New York, 2000; 翻訳)(シュプリンガー・フェアラーク東京、 2002)
- [16] A.R. Fersht 著、桑島邦博、有坂文雄、熊谷泉、倉 光成紀 訳:タンパク質の構造と機能(A.R. Fersht: Structure and Mechanism in Protein Science, W.H. Freeman, 1999; 翻訳)(医学出版)印刷中。

#### <学術講演>

(国際会議)

一般講演

[17] K. Murakami, K. Saeki, T. Inobe, M. Arai, K. Kuwajima, and T. Wakabayashi : Ca<sup>2+</sup>-induced change in the secondary structure of troponin and its mutants. *Gordon Research Conference* (U.S.A., April, 2002) (Poster).

- [18] T. Inobe, M. Arai, K. Ito, M. Nakao, K. Kamagata, Y. Amemiya, H. Kihara, and K. Kuwajima: Nucleotide-induced structural change of GroEL studied by X-ray scattering. *Molecular Chaperone* and the Heat Shock Response (Cold Spring Harbor Laboratory, New York, USA, May 1-5, 2002) (Poster).
- [19] M. Nakao, M. Arai, T. Koshiba, K. Nitta, and K. Kuwajima: Folding mechanism of canine milk lysozyme studied by circular dichroism and fluorescence spectroscopy. *The 1st International Conference on Biomedical Spectroscopy: From Molecule* to Men (Cardiff, UK, July 7-10, 2002).
- [20] K. Kamagata, and K. Kuwajima: Parallel folding pathway of proline-free staphylococcal nuclease studied by the stopped-flow double-jump method. *The 1st International Conference on Biomedical Spectroscopy: From Molecule to Men* (Cardiff, UK, July 7-10, 2002) (Poster).

#### 招待講演

- [21] K. Kuwajima: Chaperonin-affected folding of globular proteins. XIV International Congress of Biophysics (Buenos Aires, Argentina, April 27-May 1, 2002).
- [22] K. Kuwajima, M. Arai, T. Inobe, K. Ito, M. Nakao, K. Maki, K. Kamagata, H. Kihara, and Y. Amemiya: The use of the time-resolved X-ray solution scattering for studies of globular proteins. *The 1st International Conference on Biomedical Spectroscopy: From Molecule to Men* (Cardiff, UK, July 7-10, 2002).
- [23] K. Kuwajima: Equilibrium and kinetics of the allosteric transition of GroEL studied by solution X-ray scattering and fluorescence spectroscopy. Second KIAS Conference on Protein Structure and Function: Structure and Mechanism in Protein Science (Korea Institute for Advanced Study, Seoul, Korea, September 26-28, 2002).
- [24] K. Kuwajima: Nucleotide-induced allosteric transitions of the chaperonin GroEL studied by solution X-ray scattering. *International Symposium on* "Biology in the New Millennium" (Hyderabad, India, November 26-29, 2002).

(国内会議)

一般講演

- [25] 伊野部智由、新井宗仁、中尾正治、伊藤和輝、鎌形 清人、雨宮慶幸、木原裕、桑島邦博:シャペロニン GroELの構造変化のX線小角散乱法による研究、日 本蛋白質科学会第2回年会(名古屋国際会議場、2002 年6月13日-15日)
- [26] 廉岡昭雄、鎌形清人、伊野部智由、桑島邦博:シャペロニン GroEL がスタフィロカッカル・ヌクレアーゼの巻き戻りに与える影響、第2回蛋白質科学会年会(名古屋国際会議場、2002年6月13日-15日)

- [27] 鎌形清人、桑島邦博:ストップトフロー・ダブルジャン プ法によるスタフィロコッカル・ヌクレアーゼ (pro-) 変異体の並行フォールディング経路の研究、日本蛋 白質科学会第2回年会(名古屋国際会議場、6月13 日 - 6月15日)
- [28] 佐伯喜美子、新井宗仁、桑島邦博:ヤギ α-ラクトアル ブミン変異体の安定性とフォールディング反応、日本 蛋白質科学会第2回年会(名古屋国際会議場、2002 年6月13日-15日)
- [29] 中尾正治、新井宗仁、小柴琢己、新田勝利、桑島邦博: 分光学的測定によるイヌミルクリゾチームのフォー ルディング機構の解析、第2回日本蛋白質科学会年 会(名古屋国際会議場、2002年6月13日-15日)
- [30] 伊野部智由、新井宗仁、中尾正治、伊藤和輝、鎌形清 人、雨宮慶幸、木原裕、桑島邦博:GroELのアロス テリック転移のX線小角散乱及び蛍光スペクトルに よる研究、日本生物物理学会第40回年会(名古屋大 学、2002年11月2日-4日)
- [31] 榎佐和子、佐伯喜美子、桑島邦博:緑色蛍光蛋白質 (GFP)変異体の酸変性と巻き戻り、第40回生物物理 学会第40回年会(名古屋大学、11月2日-11月4 日)
- [32] 廉岡昭雄、鎌形清人、伊野部智由、佐伯喜美子、桑島 邦博:シャペロニン GroEL がスタフィロカッカル・ヌ クレアーゼの巻き戻りに与える影響、日本生物物理学 会第40回年会(名古屋大学、2002年11月2日-4 日)
- [33] 鎌形清人、桑島邦博:高圧下温度ジャンプ装置による スタフィロコッカル・ヌクレアーゼ変異体のフォール ディング過程の研究、日本生物物理学会第40会年会 (名古屋大学、11月2日-11月4日)
- [34] 佐伯喜美子、新井宗仁、桑島邦博:ヤギ α-ラクトア ルブミンCヘリックス変異体の巻き戻りとフォール ディング、日本生物物理学会第40回年会(名古屋大 学、2002年11月2日-4日)
- [35] 中尾正治、新井宗仁、小柴琢己、新田勝利、桑島邦 博: CD および蛍光を用いたイヌミルクリゾチームの フォールディング機構の解析、日本生物物理学会第 40 回年会(名古屋大学、2002年11月2日-4日)
- [36] 吉田龍平、鎌形清人、廉岡昭雄、佐伯喜美子、桑島 邦博:スタフィロコッカル・ヌクレアーゼのフォール ディングにおける中間体の役割、日本生物物理学会第 40回年会(名古屋大学、2002年11月2日-4日)
- [37] 佐伯喜美子、新井宗仁、桑島邦博: 変異蛋白質の安定
   性とフォールディング反応、東京大学総合技術研究会
   (東京大学、2003年3月6日-7日)

招待講演

- [38] 桑島邦博:蛋白質フォールディングの速度論的解析、 学術シンポジウム「新しい蛋白質研究の展望」(油谷先 生退官記念)(大阪、千里ライフサイエンスセンター、 2002年5月11日)
- [39] 桑島邦博:時間分解X線溶液散乱による蛋白質フォー ルディングの速度論的解析、分子研研究会「水と生体 分子が織り成す生命現象の化学」(岡崎国立共同研究 機構、計算科学センター、2002年5月14日 - 16日)

(セミナー)

- [40] 桑島邦博: 蛋白質のフォールディング、(昭和大学・薬 学部、2002 年 11 月 20 日)
- [41] K. Kuwajima: Search for a Universal View of Protein Folding: Is the Classic View in Conflict with the New View? (Korea Institute for Advanced Study, Seoul, Korea, December, 2002).

# 7.2 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 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 経発生の基本的な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多くの成果を上げてきた。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だすことが可能である。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。

#### 7.2.1 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。特 に、神経細胞が正しい標的細胞を識別する過程に着 目している。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。またさらに新規の標的認識分子を同定 するための試みとして DNA チップを用いた網羅的 探索を開始した。

特異的シナプス形成過程におけるカプリシャス分子のlive-imaging(高坂洋史、能瀬聡直)

カプリシャスは leucine-rich repeat と呼ばれる繰 り返し構造を細胞外にもつ膜貫通タンパク質で、ショ ウジョウバエの神経筋結合系において、特定の運動 神経細胞とその標的筋肉細胞の表面に発現している。 これまでに我々は、カプリシャスが運動神経細胞と筋 肉間の認識に関与していることを示した。以前より、 神経細胞が標的細胞を認識する際、標的細胞側のカ プリシャスの挙動を in vivo で可視化をすることを試 みてきたが、今回それに成功した。まず、以前作成し た、カプリシャスのC末端に蛍光蛋白質GFPを結合 させた融合蛋白質(Caps-GFP)が、遺伝学的にその 発現量を増やすことで本来のカプリシャスの持つ機 能を再現できるため、カプリシャスのプローブとし て有効であることを示した。以前の我々の研究から、 カプリシャスはショウジョウバエ胚の12番筋肉細胞 に発現し、標的認識に関与していることが知られて いる。そこで、この筋肉細胞が運動神経細胞に選択さ れシナプス形成する際、標的認識分子カプリシャス が標的細胞においてどのように挙動するかを調べる ために、Gal4-UAS システムを用いて Caps-GFP を 12番筋肉細胞に発現させ、共焦点レーザー顕微鏡を 用いてその挙動を追った。その結果、Caps-GFPは、 標的認識時に筋肉細胞から出る突起(Myopodia)の 先端に凝集しているのが観察された。カプリシャス のような標的認識分子が、標的細胞由来の突起の先 端に局在するという本研究の観察事実は、特異的シ ナプス形成過程における新しいメカニズムを示唆す る。すなわち、従来特異的シナプス形成過程は、主に シナプス前細胞が積極的にシナプス後細胞を探索し、 標的細胞は選択されるのを待っているという描像が 支配的であった。しかし、我々の研究結果は、標的 細胞が、標的認識分子を突起の先端に提示すること により、前シナプス側の成長円錐を迎えに行くとい う新しい標的認識過程の見方を示唆するものである。

シナプス形成過程における各種蛋白質の In vivo 可 視化(高坂洋史、高須悦子、能瀬聡直)

情報を伝達する接点であるシナプスでは、その機能を実現するために様々な蛋白質分子が配置されている。シナプス後細胞においては、神経伝達物質からの情報を受け取る受容体蛋白質、シナプス前後膜

が剥離しないように結合を安定化させる接着分子、 それらの機能分子を集合させる膜蛋白質結合蛋白質 などが局在する。これらの分子が、正常なシナプス 形成に不可欠であることが知られているが、実際に シナプスができる際にこれらの分子がどのような挙 動を示すかを in vivo で追える系は少なく、その研 究から重要な知見が期待される。また、これら分子 の挙動とカプリシャスのような標的認識分子の挙動 との相関については、まったく未知である。そこで 我々は、シナプス後細胞に存在する接着分子ファシク リン II および神経伝達物質グルタミン酸の受容体に 蛍光蛋白質GFP(およびその変異体)を融合した DNA を設計した。このうち、ファシクリン II につ いては、本来の接着能を保持した融合蛋白質のデザ インに成功した。シナプス形成時に筋肉細胞に発現 させるとシナプス形成の早い段階に局在した。今後 この系統を用いて、詳細な解析する予定である。ま た、現在グルタミン酸の受容体について、様々な部 位に蛍光蛋白質を挿入した系統の作成を進めている。 さらに、これら膜蛋白質及びカプリシャスについて、 それぞれに2種類の異なる励起・蛍光波長を持つG F P 変異体を挿入したものを作成し、複数の蛋白質 局在の時空間的な相関を in vivo で観察することを計 画している。

視神経の標的認識過程におけるカプリシャスの役割 (亀田(新座)麻記子、能瀬聡直)

ショウジョウバエの視神経投射系は神経-筋結合と ともに標的認識研究のモデル系として最近注目され ている。神経-筋結合系が神経細胞と筋肉の結合を扱 うのに対し、視神経系では神経神経間の特異的シ ナプス結合を扱える。ショウジョウバエの視神経は約 800 個の個眼とよばれるユニットから成り、さらに 個々の個眼は8個の神経細胞で構成されている。個 眼に含まれる8個の視神経細胞R1~R8はそれぞれ 異なる投射先を持っており、R1~R6 は脳の lamina 領域に、R7、R8は medulla 領域の内層部と外層部 にそれぞれ投射する。視覚系におけるカプリシャス の発現を調べたところ、個眼ユニットのうち視神経 細胞 R8 ただ1種と、その投射先である medulla 細 胞において発現していることが分かった。また、カ プリシャスタンパク質は成虫脳において R8 の投射層 領域に局在しているのが観察された。カプリシャス 機能欠失体では、medulla内の視神経終末のパター ンに乱れが生じており、R1~R6の投射には変化は 見られなかったことから、カプリシャスは R8 とそ の投射先である medulla 特異的に標的認識に関わっ ていることが示唆された。また、R8以外の視神経に カプリシャスを強制発現させると、medulla への重 複した投射が起こっていた。これは、カプリシャス を発現する視神経は同じくカプリシャスを発現する medulla へ投射する、というメカニズムの存在を示 唆している。これらのことから、Caps は1種の視神 経とその投射先において発現し、標的特異性決定に はたらいていると考えられる。

また、視神経細胞 R7 はカプリシャスを発現してお

らず、medulla内のR7投射層においても発生を通じ てカプリシャスは局在しないことが、観察から明ら かになった。medulla領域内にカプリシャスを強制発 現させると、R7神経終末の形状が変化し、medulla のより内層に達したことから、視神経R7において はカプリシャスを認識して忌避し、medulla内のカ プリシャス非局在層を探して投射する、という機構 が存在することが示唆された。

神経標的認識分子の DNA チップを用いた網羅的探 索 (稲木美紀子、能瀬聡直)

ショウジョウバエの神経-筋結合系における神経の 標的認識には、カプリシャス分子などの解析結果か ら、機能的に重複した分子が複数働いていると考え られている。すなわち、個々の筋肉は複数の標的認識 分子を発現しており、その総合的な働きにより確実 に正確な神経配線が実現されているようである。し たがって、標的認識の分子機構を理解するためには、 遺伝子の網羅的な解析が必要不可欠である。ショウ ジョウバエでは約1万4千個の遺伝子のcDNAがス ポットされていて、ゲノム上の全遺伝子について発 現量の違いを解析することが可能な DNA チップが利 用可能である。標的認識に働く分子は個々の標的細 胞間で発現様式が異なると考えられるため、異なる 運動神経細胞 RP1 及び RP5 によりそれぞれ支配さ れている二つの筋肉、筋肉 13 及び筋肉 12 で発現様 式が異なる遺伝子を網羅的に同定することを試みた。 まず、予備実験として、筋肉 12 及び筋肉 13 を 100 個ずつ解剖により単離し RNA を調製した。そのまま では RNA 量が DNA チップ解析には足りないので、 T7 RNA ポリメラーゼを用いた RNA 増幅を 2 回行 い、DNA チップに用いるのに十分量の RNA が得ら れることを確認した。また、実験の指標として用い るため、筋肉 12 及び筋肉 13 のうち片方でのみ発現 している遺伝子を、既存のエンハンサートラップ系 統を利用して2つ単離し、その発現差異をRT-PCR により確認した。これらの結果を踏まえ、現在、筋 肉 12 及び筋肉 13 を 200 個ずつ単離し、DNA チッ プ解析に用いる試料の調製を行っている。

細胞骨格制御に関連した formin3 遺伝子の解析(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、ショウジョウバ エ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。 G6 遺伝子 (formin3 と名づけた)は残基数 1644 の新 規フォーミンホモロジータンパク質をコードしてお り胚発生過程において、気管系で発現している。ま た、formin3 突然変異体は気管系においてドーサル トランクのルーメンが途切れるという異常が見られ ることを昨年までの研究で明らかにしてきた。この 気管発生における異常をさらに詳しく解析するため に、本年度、我々は Gal4-UAS システムと GFP イ メージング手法を用いて気管系のライブ観察を行っ た。その結果、formin3突然変異体においては、発生 初期に気管細胞の移動が遅れたり、発生後期に気管 細胞がネットワークから脱落したりなどの異常が見 られた。これらの事実からこの遺伝子は細胞接着に 関わっている可能性が考えられた。しかし、ドーサル トランクのルーメンが途切れた体節において経時的 に観察していると、細胞自体は長い間接着を保った 状態にあることが観察された。これらのことからこ の遺伝子の役割は細胞接着というよりも細胞骨格制 御に関連したものであることが示唆された。ショウ ジョウバエおよび他生物における類似分子が細胞骨 格制御に関わることが知られていることからも、こ の分子が気管発生においても同様の役割を果たして いることが強く示唆された。

#### 7.2.2 シナプス形成の分子機構

シナプスは神経細胞が他の神経細胞や筋肉細胞と 接合、連絡する部位で、神経伝達の中心的位置を占 める。にもかかわらず、秩序だった分子装置の集積 であ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として、シナプス形成の分子機 構を探っている。このため生物物理学的、光学的、電 気生理学的諸技術を用い、シナプスの形成過程を容 易に解析できる方法を開発し、機能的側面と、形態 的側面の両方向からシナプス形成の分子機構を解明 することを目的として以下の研究を進めている。

シナプス形成機構の解析:シナプス形成初期過程に 於ける CaMKII の役割 (風間 北斗、谷藤(森 本)高子、能瀬聡直)

シナプスの形成には神経細胞とその標的細胞間の 綿密な相互作用が重要である。我々は、標的細胞に端 を発して逆行的に働くシナプス形成調節の分子機構 を解明するため、細胞に流れ込む微小電流が測定で きるパッチクランプ法と、免疫組織学的手法を用い て研究を進めた。はじめに、標的細胞である筋肉細 胞内に解析したい分子を発現させた時の、シナプス 伝達に対する影響を特異的に検出できる系を確立し た。具体的には、同じ神経細胞がシナプスを形成して いる隣り合う2つの筋肉細胞において、GAL4-UAS システムを用い、目的分子を片方の筋肉細胞にのみ 発現させた実験系である。この系において、同一個 体、同体節内の2つの筋肉細胞間でシナプス応答を 比較すると、個体差や発生段階のばらつきを除外で き、神経細胞側に関しては同一条件の下で、筋肉細 胞に発現させた分子の特異的な影響が解析できる。 我々は標的細胞内のシグナル伝達系を変化させたと きのシナプス形成に対する影響について調べること にした。種々のシグナル伝達機構に関与する分子の うち、カルシウム/カルモジュリン依存性キナーゼ II (CaMKII) に着目した。CaMKII はシナプス構造の 後細胞側に豊富に含まれ、シナプス可塑性や、学習・

記憶において重要な働きをすると考えられている酵 素である。先に述べた実験系を用い特定の筋肉細胞 に活性化型 CaMKII、もしくは阻害ペプチドを発現 させ、そのシナプス伝達に与える影響について検討 した。その結果、後シナプス細胞内の CaMKII は、 前シナプスの逆行的な調節、及び前シナプスと後シ ナプスの協調的成熟の促進という二つの機能を持つ ことが示唆された。さらに本年度は、CaMKII の下 流に位置する逆行性因子の探索に着手した逆行的調 節の範囲が限局していたことから、NCAMのホモロ グである接着分子 Fasciclin II などの膜局在分子の可 能性が高いと考えられるが、予備的な形態的解析の 結果はそれと矛盾しないものであった Fasciclin II の 機能喪失バックグラウンドで活性化型 CaMKII を発 現する系統を樹立し、現在電気生理学的アプローチ も試みている

シナプス形成過程における CaMKII の発生段階依 存的な役割(谷藤(森本)高子、風間 北斗、能瀬 聡直)

我々は、先に述べた実験系を用い、特定の筋肉細 胞に CaMKII を発現させシナプス伝達に対する影響 を調べた結果、孵化直後の幼虫では CaMKII の活性 を上昇させた筋肉上のシナプスの活動が増大してい ることを前述のように報告した。しかし、さらに、成 長が進んだ孵化後7時間の幼虫において調べてみる と、CaMKII の活性を上昇させた筋肉上のシナプス の活動には更なる増大は認められず、その筋肉細胞 にシナプスを形成している神経細胞が同様に支配す る別の筋肉細胞上のシナプスの活動が上昇している ことが見出された。このことは、CaMKIIの作用の 仕方が発生段階依存的に変化することを示している。 同様な知見はすべての筋肉細胞の CaMKII の活性を 上昇させたときにも得られた。さらに、CaMKIIの 活性を変化させていない筋肉細胞のシナプス応答が 変化していたことから、孵化後のさまざまな刺激や 神経活動により、シナプス形成を調節する機構の働 き方が変化し、ある筋肉細胞上のシナプスに起こっ た可塑的な変化が神経細胞を介して、別の筋肉細胞 上のシナプスに伝えられた可能性があることを示し ている。さらに、この興味深い現象の分子機構を調 べるための研究を続けている。

シナプス形成過程からシナプス成熟機構へのスイッ チング:神経活動依存的な過程の解明(中山 浩明、 谷藤(森本)高子、能瀬 聡直)

ショウジョウバエの幼虫は孵化後も著しい体の成 長を続け、幼虫期には筋肉細胞の大きさは 100 倍以 上にもなり、それに対応して筋肉上のシナプスの数 も増大する。筋肉細胞の大きさに合わせてシナプス を成長させる機構には筋肉細胞からの何らかの働き (因子)が関与していることが推測されているが、そ の分子機構については不明な点が多い。我々はこれ

までの CaMKII の役割を調べる実験から得られた知 見から、この機構は孵化後の神経活動によりスイッ チオンされるという仮説を立てた。この仮説をさら に検証し、メカニズムを明らかにするための研究を 開始した。これまで扱ってきた実験系である、同-の神経細胞がシナプスを形成する、二つの筋肉細胞 (6番、7番筋肉(M6、M7))に注目した。これら つの筋肉細胞は大きさが異なりM6の方が大きい。 これらの筋肉の大きさとシナプスの大きさの機能的、 形態的関連と、外部からの刺激に対する依存性につ いて、電気生理学的、免疫組織学的手法を用いて研 究を行った。正常な孵化直後の幼虫では、M6の方 が大きいにもかかわらず、M6、M7におけるシナプ スの応答は同程度であった。孵化後7時間以上経過 した幼虫では、筋肉細胞の大きさに応じて M6 にお けるシナプスの応答が、M7のものより大きくなる。 -方、GAL4-UASシステムを用い、感覚神経の活動 を阻害した個体においては、孵化後7時間以上経過 しても M6、M7 におけるシナプスの応答は同程度で あった。シナプスの形態及びシナプス小胞の総量に 関しても、同様の変化が見られた。以上の結果は、孵 化直後から7時間の間に、何らかの分子機構によっ て、筋肉の大きさに応じて適切な大きさのシナプス が形成されること、また、そのような機構が外部か らの刺激に依存したものであることを示唆している。 今後さらに、この系について詳しく解析を行い、そ の分子機構の解明を試みている。

シナプス形成過程におけるカルシウムシグナルの可 視化(風間 北斗、谷藤(森本) 高子、能瀬 聡直)

種々の組織が機能するとき、細胞内ではカルシウ ム濃度の変動が見られる。すなわち、定常状態では 細胞内カルシウム濃度は nM のオーダーに低く保た れているが、細胞内カルシウム濃度が $\mu$ M レベルへ と上昇することが引き金となって、様々な生体の反 応が引き起こされる。シナプス形成過程においても 例外ではなく、神経細胞が標的細胞の方に伸長して いく際に自発的な一過性のカルシウム濃度変動が見 られること、また、神経細胞が標的細胞に接触した ときにカルシウム濃度上昇が見られることが報告さ れている。しかし、特に後者は培養細胞系における 結果であり、生体内では果たしてどうなのか、神経 細胞が接触する標的細胞の方にはカルシウム濃度変 化があるのかなど、その詳細なメカニズムは明らか になっていない。我々はシナプス形成が起こるときの カルシウム濃度変化を可視化することにより、シナ プス形成に関わるシグナル機構を明らかにしたいと 考え研究を進めている。具体的には、カルシウムイ オンとの結合により蛍光強度が変化する指示薬を用 いた、一励起一蛍光もしくは二蛍光波長型イメージ ングを行っている。高感度冷却 CCD カメラ、Ar-Kr レーザー、ニポウ式共焦点ユニットを組み合わせ、全 画素読み出しでありながらも高速な画像取得が可能 な、4次元解像度の高い測定系を構築した。指示薬 は、数百 Hz の短パルスの印加で一時的に開く細胞 膜の穴を通して導入することで(エレクトロポレ

ション法)、同定された単一細胞内のカルシウム濃度 変動を追跡できるようにした。現在は、シナプス形 成期において、標的である筋肉細胞内で特徴的濃度 変化があるかどうかに焦点を当て、解析を重ねてい るまた、昨年度作成した、蛍光を発するたんぱく質 GFPを用いたカルシウムプローブ(G-CAMP)を ショウジョウバエ組織において発現できる系統を掛 け合わせて、さらに発現量を増大させることができ る個体を作成し、その応用を検討している

緑色蛍光タンパク質 GFP(Green Fluorescent Protein)の光物理学的性質の研究(加藤明彦、桑島邦 博、小林孝嘉、能瀬聡直)

生命科学分野でマーカー等の用途で広範に用いられ ているGFPは、蛍光性発色団 (p-hydroxybenzylideneimidazolidinone)を持つ。野生型GFPを400nm光 で励起すると、励起状態において数psの時定数で proton移動が起こり、約500nmの緑色蛍光を発す る。GFPの励起状態における、proton移動に至るま での分子の電子励起状態殻の発光ダイナミクスの決 定要因である振動ダイナミクスを解明する為に、小 林研で開発した中心波長400nmのフェムト秒パルス レーザーを用いたpump-probe分光を行う事を計画 し、現在実験系を立ち上げ中である。なおこの研究 は、小林研・桑島研との共同研究である。

#### <報文>

(原著論文)

- Umemiya, T., Takasu, E., Takeichi, M., Aigaki, T. and Nose, A.: Forked end: a novel transmembrane protein involved in neuromuscular specificity in Drosophila identified by gain-of-function screening. J. Neurobiol. 51, 205-214 (2002).
- [2] Kazama, H., Morimoto-Tanifuji, T. and Nose, A.: Postsynaptic activation of calcium/calmodulindependent protein kinase II promotes coordinated pre- and postsynaptic maturation of Drosophila neuromuscular junction. Neuroscience 117, 615-625 (2003).

#### (国内雑誌)

- [3] 能瀬聡直:ショウジョウバエ運動神経細胞による標的 選択機構 実験医学 20,777-780 (2002).
- [4] 能瀬聡直:ショウジョウバエの神経発生、シリーズ・バイオサイエンスの新世紀 第11巻 脳の発生・分化・可塑性、p21-29 (2002).

#### (学位論文)

- [5] 亀田(新座)麻記子:ショウジョウバエ視神経の層特 異的投射における Capricious の役割(生物化学専攻、 博士論文)
- [6] 風間北斗:シナプス形成初期過程における CaMKII
   の機能解析 (修士論文)

<学術講演>

(国際会議)

#### 一般講演

- [7] Kohsaka, H. and Nose, A.: The target recognition molecule CAPRICIOUS clusters at the tip of myopodia. 2002 meeting on "Axon guidance and neural plasticity" (Cold Spring Harbor, U.S.A., September, 2002).
- [8] Shinza-Kameda, M. and Nose, A.: Drosophila Capricious regulates R8 photoreceptor axon target specificity in the visual system. 2002 meeting on "Axon guidance and neural plasticity" (Cold Spring Harbor, U.S.A., September, 2002).
- [9] Morimoto-Tanifuji, T.: Retrograde signaling in the development of synapses: involvement of CaMKII in the maturation of presynaptic function. Fifth Annual Symposium Japanese-American Beckman Frontiers of Science (Irvine, U.S.A., December, 2002)
- [10] Tanaka, H., Takasu, H., Umemiya, T., Aigaki, T., and Nose, A.: A novel formin homology protein implicated in tracheal formation in Drosophila, The 44th Annual Drosophila Research Conference (Chicago, U.S.A., March 2003)

#### (国内会議)

一般講演

- [11] 亀田(新座)麻記子、能瀬聡直:神経細胞による標的 認識の分子機構 ショウジョウバエ視神経投射におけ る Capricious の役割、日本発生生物学会第 35 回大 会 (横浜、2002 年 5 月)
- [12] 風間北斗、森本高子、能瀬聡直:シナプス後細胞内 CaMKII 活性化によるシナプス形成過程の調節、
   第 25 回日本神経科学大会 (東京、2002 年 7 月)
- [13] 亀田(新座)麻記子、能瀬聡直: Capricious は視神 経投射の標的特異性を決定する、第 25 回日本神経科 学大会 (東京、2002 年 7 月)
- [14] 森本高子:ショウジョウバエ神経・筋接合部における シナプス後細胞内 CaMKII 活性化による協調的シナ プス成熟機構、第2回 WPJ(日本生理学女性研究者 の会)ワークショップ (愛知、2002年7月)
- [15] 風間 北斗、森本 谷藤 高子、能瀬 聡直:シナプ ス後細胞内 CaMKII 活性化によるシナプス形成過程 の調節、文部科学省科学研究費特定領域研究「先端 脳」第一回ワークショップ(慶応義塾大学、2002 年 8 月)
- [16] 森本高子、風間北斗、能瀬聡直:ショウジョウバエ神経・筋接合部を用いたシナプス形成過程におけるシナプス後細胞の役割を明らかにする実験系の確立とその応用第40回日本生物物理学会年会(名古屋、2002年11月)
- [17] 高坂洋史、能瀬聡直:シナプス形成初期における標的
   認識分子カプリシャスの可視化、日本生物物理学会第40回年会(名古屋大学、2002年11月)

- [18] 高坂洋史、能瀬聡直:標的選択過程におけるシナプス
   後細胞の標的認識分子 Capricious の挙動の解析、第
   25回分子生物学会年会(横浜、2002年12月)
- [19] 田中宏昌、高須悦子、梅宮猛、相垣敏朗、能瀬聡直: 気管形成に関連したショウジョウバエ新規フォーミン ホモロジー蛋白質の解析、第 25 回分子生物学会年会 (横浜、2002 年 12 月)
- [20] 森本高子:ショウジョウバエ神経筋接合部を用いたシ ナプスの電気生理学的解析:適切な大きさのシナプス を形成する仕組み JST 異分野研究者交流フォーラ ム "昆虫科学 - 小さな生物の持つ大きな可能性 - " (香川、2003年1月)
- [21] 能瀬聡直:神経結合の特異性を決める分子機構、特定 領域研究「神経回路の成熟と特異的機能発現のメカ ニズム」 冬のシンポジウム、神経回路の形成と働き の分子メカニズム (東京、一ツ橋記念講堂、2003 年1月)

(セミナー)

 [22] 能瀬聡直:神経標的認識の分子機構、理化学研究所・ 発生・再生科学総合研究センター (神戸、2003年2 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

2002 年 4 月から 2003 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
   104 件
- 2. 設計及び部品等の問い合わせ 80件
- 3. 外注発注 20件
- 4. 他教室の問い合わせ 3件 (地質学、鉱物学、動物学)

#### 工作実習

当教室所属の大学院1年生を対象として、6月3日 から6月21日まで下記の内容で工作講習会を行な つた.

- 参加人員: 38 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、タツプ、ダイス、の使い方
  - 4. 材質別による刃物の選定及び使用方法
  - 5. 旋盤、フライス盤、ボール盤、シャーリン グ(切断機)の使用方法

 $\mathbf{II}$ 

# Summary of group activities in 2002

# 1 Theoretical Nuclear Physics Group

Subjects: Structure and reactions of unstable nuclei, Monte Carlo Shell Model, Molecular Orbit Method, Stochastic Configuration Method, Relativistic Mean Field Calculation

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) Structure and reaction of unstable nuclei, (2) Monte Carlo Shell Model, (3) various new approaches to the nuclear many-body problems.

(1) 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. 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. Significant influences of the spin-isospin interaction are also for magnetic moments and Gamov-Teller transitions.

(2) 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*. 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.

(3) The molecular structure of unstable nuclei is studied extensively also. A new method treating loosely bound particles, called Stochastic Configuration Method, is developed also. The relativistic mean field approaches are studied from some new perspectives as well.

#### 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 choromodynamics (QCD).

Main research interests are the quark-gluon structure of hadrons, lattice gauge theories and simulations, matter under extreme conditions, quark-gluon plasma in relativistic heavy-ion collisions, high density matter, neutron stars and quark stars, chiral symmetry in nuclei, and color superconductivity.

Highlights in research activities of this year are listed below.

- 1. Physics of high density matter
  - 1.1 Chiral symmetry in dense matter [1, 2]
  - 1.2 Critical end point in hot and dense matter [3]
- 2. Quark-gluon plasma and its signature [4, 5, 6, 7]
- 3. Fundamental aspects of confimenment and chiral symmetry in QCD [8, 57, 9]
- 4. QCD structure of hadrons

3.1 Lattice QCD simulations for excited baryons, and chiral symmetry in baryon spectrum [10] 3.2 High energy QCD processes and structure functions [11]

# References

- [1] K. Yokokawa, T. Hatsuda, A. Hayashigaki and T. Kunihiro, Simultaneous Softening of  $\sigma$  and  $\rho$  Mesons associated with Chiral Restoration. Phys. Rev. C66, 022201 (2002).
- [2] S. Hirenzaki, H. Nagahiro, T. Hatsuda, and T. Kunihiro, Formation of Sigma mesic Nuclei in (d, t) and  $(d, He^3)$ Reactions. Nucl. Phys. A710, 131-144 (2002).
- [3] K. Fukushima, Spectral functions in the  $\sigma$  channel near the critical end point, Physical Review C67, 025203 (2003).
- [4] T. Hirano, K. Morita, S. Muroya and C. Nonaka: Hydrodynamical analysis of hadronic spectra in the  $\sqrt{s_{NN}} = 130 \text{ GeV/nucleon Au+Au}$  collisions, Phys. Rev. C65, 061902 (2002).
- [5] T. Hirano and Y. Nara: Energy loss in high energy heavy ion collisions from the hydrodynamic and jet model, Phys. Rev. C66, 041901 (2002).
- [6] K. Morita, S. Muroya, C. Nonaka and T. Hirano: Comparison of space-time evolutions of hot, dense matter in  $\sqrt{s_{NN}} = 17$  and 130 GeV relativistic heavy ion collisions based on a hydrodynamical model, Phys. Rev. C66, 054904 (2002).
- [7] T. Hirano and K. Tsuda: Collective flow and two-pion correlations from a relativistic hydrodynamic model with early chemical freeze out, Phys. Rev. C66, 054905 (2002).
- [8] K. Fukushima, Thermodynamic limit of the canonical partition function with respect to the quark number in QCD, Annals of Physics 304, 72 (2003).
- K. Fukushima, Effects of chiral restoration on the behaviour of the Polyakov loop at strong coupling, Physics Letters B553, 38 (2003).
- [10] S. Sasaki, K. Sasaki, T. Hatsuda and M. Asakawa, Bayesian approach to the first excited nucleon state in lattice QCD, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) (2003).
- [11] A. Hayashigaki, K. Suzuki, K. Tanaka : Diffractive  $\eta_c$  and  $\eta_b$  productions by neutrinos via neutral currents, To appear in Phys.Rev.D, (2003).

# 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, Teruhiko Kawano, Yuji Sugawara, Yosuke Imamura.

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. String Theory
  - 1.1 Supersymmetric Gauge Theories and Superstrings [1]
  - 1.2 Strings and D-branes on Curved Backgrounds [2, 16, 17, 40, 48, 49]
  - 1.3 String Field Theory [23, 24, 31, 32, 33, 34, 36, 37]
  - 1.4 String Theories on PP-waves and Holographic Dualities [18, 19, 20, 21, 22, 38, 39, 41, 42, 43]
  - 1.5 Noncommutative Geometry and Mathematical Physics [14, 35]
- 2. High Energy Phenomenology
  - 2.1 Particle Cosmology and Supersymmetric Unification Models [3, 4, 5, 6, 7, 44, 50, 51]
  - 2.2 Models in Higher-dimensional Space-time and Brane World [13, 15, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 45, 46, 47]
- 3. Quantum Field Theory
  - 3.1 Lattice Gauge Theory [8, 9, 10, 11, 12]
  - 3.2 Fundamental Problems in Field Theory

# References

- [1] T. Eguchi and K. Sakai, "Seiberg–Witten Curve for the E-String Theory," JHEP 0205 (2002) 058.
- [2] T. Eguchi, Y. Sugawara and S. Yamaguchi, "Supercoset CFT's for String Theories on Non-compact Special Holonomy Manifolds," Nucl. Phys. B657 (2003) 3-52.
- [3] M. Fujii, K. Hamaguchi and T. Yanagida, "Predictions on the neutrinoless double beta decay from the leptogenesis via the LH(u) flat direction," Phys. Lett. B 538, 107 (2002).
- M. Fujii and K. Hamaguchi, "Non-thermal dark matter via Affleck-Dine baryogenesis and its detection possibility," Phys. Rev. D 66, 083501 (2002).
- [5] M. Fujii and T. Yanagida, "A solution to the coincidence puzzle of Omega(B) and Omega(DM)," Phys. Lett. B 542, 80 (2002).
- [6] M. Fujii and T. Yanagida, "Baryogenesis and gravitino dark matter in gauge-mediated supersymmetry breaking models," Phys. Rev. D 66, 123515 (2002).
- [7] M. Fujii and T. Yanagida, "Natural gravitino dark matter and thermal leptogenesis in gauge-mediated supersymmetry-breaking models," Phys. Lett. B 549, 273 (2002).
- [8] K. Fujikawa, M. Ishibashi and H. Suzuki: "Ginsparg-Wilson operators and a no-go theorem", Phys. Lett., B538 (2002) 197.
- [9] K. Fujikawa, M. Ishibashi and H. Suzuki: "CP breaking in lattice chiral gauge theories", JHEP04(2002)046.
- [10] K. Fujikawa: "Supersymmetry on the lattice and the Leibniz rule", Nucl. Phys. B636(2002) 80.

- [11] K. Fujikawa: "N=2 Wess-Zumino model on the d=2 Euclidean lattice", Phys. Rev. D66 (2002) 074510.
- [12] K. Fujikawa and H. Suzuki: "Domain wall fermion and CP symmetry breaking ", Phys, Rev.  $\mathbf{D}$  (2003).
- [13] A. Fukunaga and K.-I. Izawa: "Warped QCD without the Strong CP Problem", Phys. Lett. B (2003), in press.
- [14] M. Hamanaka and H. Kajiura, "Gauge Fields on Tori and T-duality," Phys. Lett. B 551 (2003) 360-368.
- [15] S. Hayakawa, D. Ida, T. Shiromizu and T. Tanaka, "Gravitation In The Codimension Two Brane World," Prog. Theor. Phys. Suppl. 148, 128 (2002).
- [16] Y. Hikida, "Orientifolds of SU(2)/U(1) WZW models", JHEP 0211, 035 (2002).
- [17] Y. Hikida, "Crosscap states for orientifolds of euclidean AdS<sub>3</sub>", JHEP **0205**, 021 (2002).
- [18] Y. Hikida and Y. Sugawara, "Superstrings on PP-wave backgrounds and symmetric orbifolds", JHEP 0206, 037 (2002).
- [19] Y. Hikida and Y. Sugawara, "Superstring vacua of 4-dimensional pp-waves with enhanced supersymmetry", JHEP 0210, 067 (2002).
- [20] Y. Hikida and S. Yamaguchi, "D-branes in pp-waves and massive theories on worldsheet with boundary," JHEP 0301 (2003) 072.
- [21] Y. Imamura: "Large angular momentum closed strings colliding with D-branes' ', JHEP 0206 (2002) 005.
- [22] Y. Imamura: "Open string BMN operator correspondence in the weak coupling regime", Prog. Theor. Phys. 108 (2003) 1077.
- [23] I. Kishimoto and T. Takahashi, "Open string field theory around universal solutions," Prog. Theor. Phys. 108, 591 (2002)
- [24] I. Kishimoto and K. Ohmori, "CFT Description of Identity String Field: Toward Derivation of the VSFT Action," JHEP 0205 (2002) 036.
- [25] T. Kobayashi, N. Maru and K. Yoshioka, "4D construction of bulk supersymmetry breaking," arXiv:hepph/0110117, Euro. Phys. Jour. C, in press.
- [26] N. Haba and N. Maru, "Decoupling solution to SUSY flavor problem via extra dimensions," Mod. Phys. Lett. A 17, 2341 (2002)
- [27] N. Haba and N. Maru, "(S)fermion masses in fat brane scenario," Phys. Rev. D 66, 055005 (2002)
- [28] H. Abe, T. Kobayashi, N. Maru and K. Yoshioka, "Field localization in warped gauge theories," Phys. Rev. D 67, 045019 (2003)
- [29] M. Eto, N. Maru, N. Sakai and T. Sakata, "Exactly solved BPS wall and winding number in N = 1 supergravity," Phys. Lett. B 553, 87 (2003)
- [30] N. Haba, N. Maru and N. Nakamura, "Decoupling and lepton flavor violation in extra dimensional theory," Phys. Lett. B 557, 240 (2003)
- [31] I. Bars and Y. Matsuo, "Associativity anomaly in string field theory," Phys. Rev. D 65 (2002) 126006
- [32] I. Bars and Y. Matsuo, "Computing in string field theory using the Moyal star product," Phys. Rev. D 66 (2002) 066003
- [33] I. Bars, I. Kishimoto and Y. Matsuo, "String amplitudes from Moyal string field theory," Phys. Rev. D 67 (2003) 066002
- [34] I. Bars, I. Kishimoto and Y. Matsuo, "Analytic study of nonperturbative solutions in open string field theory," arXiv:hep-th/0302151, accepted for publication by Phys. Rev. D.
- [35] E. Ogasa, "The intersection of spheres in a sphere and a new geometric meaning of the Arf invariants," Journal of knot theory and its ramifications, 11(2002) 1211-1231.
- [36] K. Ohmori, "Comments on Solutions of Vacuum Superstring Field Theory," JHEP 0204 (2002) 059.
- [37] K. Ohmori, "On Ghost Structure of Vacuum Superstring Field Theory," Nucl. Phys. B648 (2003) 94-130.
- [38] Y. Sugawara, "Thermal amplitudes in DLCQ superstrings on pp-waves," Nucl. Phys. B650 (2003) 75-113
- [39] Y. Sugawara, "Thermal partition function of superstring on compactified pp-wave," arXiv:hep-th/0301035. Nucl. Phys. B, in press.
- [40] H. Takayanagi and T. Takayanagi, "Open strings in exactly solvable model of curved space-time and pp-wave limit," JHEP 0205 (2002) 012.
- [41] H. Takayanagi and T. Takayanagi, "Notes on giant gravitons on pp-waves," JHEP 0212 (2002) 018.

- [42] T. Takayanagi and S. Terashima, "Strings on orbifolded pp-waves," JHEP 0206 (2002) 036.
- [43] T. Takayanagi, "Modular invariance of strings on pp-waves with RR-flux," JHEP 0212 (2002) 022.
- [44] Y. Uehara, "Neutrinoless double beta decay with R-parity violation," Phys. Lett. B 537, 256 (2002)
- [45] Y. Uehara, "A mini-review of constraints on extra dimensions," Mod. Phys. Lett. A 17, 1551 (2002)
- [46] E. Asakawa, K. Odagiri and Y. Uehara, "Measuring the spin of invisible massive graviton excitations at future linear colliders," JHEP 0301, 062 (2003)
- [47] T. Watari and T. Yanagida, "Geometric origin of large lepton mixing in a higher dimensional spacetime," Phys. Lett. B 544 (2002) 167
- [48] K. Sugiyama and S. Yamaguchi, "Coset construction of noncompact Spin(7) and G<sub>2</sub> CFTs," Phys. Lett. B 538 (2002) 173.
- [49] S. Yamaguchi, "Holographic RG flow on the defect and g-theorem," JHEP 0210 (2002) 002.
- [50] J.R. Ellis, M. Raidal and T. Yanagida, "Observable Consequences of Partially Degenerate Leptogenesis", Phys. Lett. B 546 (2002) 228.
- [51] P. Frampton, S. L. Glashow and T. Yanagida, "Cosmological Sign of Neutrino CP Violation", Phys. Lett. B 548 (2002) 119.

# 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  $(\vec{p}, \vec{n} \text{ and } \vec{d})$ , polarized targets  $(\vec{p} \text{ and } {}^3\vec{\text{He}})$ , and polarization analysis of reaction products  $(\vec{p}, \vec{n} \text{ and } \vec{d})$ .

Major activities during the year are summarized below.

- 1. Measurement of the  ${}^{90}\text{Zr}(n,p)$  reaction at  $E_n=300$  MeV has been carried out by employing the newly constructed (n,p) facility. The reduced matrix element of the Gamow-Teller transition,  $B(\text{GT}^+)$ , has been extracted. By combining the  $\beta^+$  Gamow-Teller strength  $(\Sigma B(\text{GT}^+))$  with the  $\beta^-$  one, which was formerly obtained by the  ${}^{90}\text{Zr}(p,n)$  measurement, the GT quenching factor has been found to be  $Q=0.89\pm0.06$ . From this Q value the Landau-Migdal parameter can be derived as  $g'_{N\Delta} = 0.24\pm0.10$ . The  $g'_{N\Delta}$  value allows us, for the first time, to estimate quantitatively the critical density of pion condensation which may be realized in neutron stars.
- 2. How the effect of three nucleon force (3NF) appears in nuclear reactions is one of interesting subjects in nuclear physics. Up to now, the 3NF effects in the intermediate energy region have been discussed by comparing the experimental data of *p*-*d* scattering and Faddeev calculations of *n*-*d* scattering since it is very difficult to incorporate the Coulomb force into the calculation. In order to make clear how the Coulomb force affects the *p*-*d* scattering process, we have measured the *n*-*d* elastic scattering at an intermediate energy of  $E_n = 250$  MeV. This year we have succeeded in measuring the *n*-*d* elastic scattering at forward angles by employing a deuterated liquid scintillator as an active target. Preliminary result shows that some characteristic difference between the *n*-*d* and *p*-*d* data. The effects of the Coulomb force will be quantitatively extracted as well as the 3NF and other contributions such as relativistic effects.
- 3. One of the interesting predictions of the quantum chromodynamics is the existence of six-quark states, i.e. dibaryons. No decisive conclusion has been drawn on the existence of the dibaryons after more than twenty years of experimental efforts. Recently Fil'kov *et al.* have found narrow resonances in the *p-d* scattering data at the Institute for Nuclear Research. Since the observed widths were as small as 3 MeV and were equivalent to the experimental mass resolution, the resonances were claimed as candidates of super-narrow dibaryons whose decay by the strong force was forbidden by the Pauli principle and the energy conservation law. We have performed an experiment to study the resonances with an order higher statistical accuracy under very low background condition by employing a liquid deuterium target and two magnetic spectrometers. The existence of the resonances is not confirmed up to now. Detailed analysis is in progress.
- 4. We have been constructing two new experimental apparatuses. One is a focal plane polarimeter, EPOL, for measuring polarization of two protons simultaneously (see the Figure). The EPOL will be used for studying a longstanding question on the quantum mechanics, called EPR paradox, by measuring spin correlations in a hadronic system. The other is a polarized solid proton target system for studying structures of unstable nuclei. The first nucleus to be measured is <sup>6</sup>He, which is considered to have neutron skin structure. Both experiments are scheduled in this year.



Schematic view of the spin-correlation polarimeter EPOL.

## 4 Hayano Group

#### **Research Subjects:**

(1) ATHENA project (Production and spectroscopy of cold antihydrogen) at CERN.

(2) ASACUSA project (Atomic Spectroscopy and Collisions Using Slow Antiprotons) at CERN.

(3) Study of deeply bound pionic atoms in <sup>207</sup>Pb, <sup>205</sup>Pb and <sup>115,119,123</sup>Sn nuclei at GSI.

## Member: Ryugo S. Hayano, Takashi Ishikawa, Eberhard Widmann and Makoto C. Fuji-

wara

#### Production of cold antihydrogen

We have succeeded to produce a large number of antihydrogen atoms, by mixing antiprotons and positrons under cryogenic conditions in a so-called nested Penning trap. Clear signatures of antihydrogen annihilations were obtained by detecting antiproton annihilations (using Si detectors) and positron annihilations (using CsI detectors), occurring at the same place at the same time. This work was done in the ATHENA international collaboration at CERN AD.

#### Antiprotonic helium

Within the framework of the ASACUSA collaboration we are performing precision spectroscopy of antiprotonic helium (an exotic three-body system consisting of a helium nucleus, an antiproton, and an electron:  $He^{++}-\bar{p}-e^{-}$  ( $\bar{p}He^{+}$ ) at the Antiproton Decelerator (AD) of CERN. The antiproton occupies highly excited metastable states with lifetimes of the order of microseconds, thus enabling their study with laser and microwave spectroscopy.

In 2002 we extended the precision laser spectroscopy of antiprotonic helium by studying various states in  $\overline{p}^4$ He<sup>+</sup> and  $\overline{p}^3$ He<sup>+</sup> at ultra-low densities by using a Radio Frequency Qadrupole Decelerator (RFQD) to further reduce the energy of antiprotons. At these low densities the collision-induced shift of the transition energies becomes negligible compared to other systematic errors. We have thus improved the constraint on the equality of proton and antiproton charge and mass by a factor 5 over our previous value to ~ 10 ppb  $(1 \times 10^{-8})$ .

#### Deeply-bound pionic atoms reveal the origin of proton mass

A proton, which consists of massless gluons and nearly massless  $u^-, d^-$  quarks, dynamically acquires its large mass. Here, the quark condensate  $|\langle \bar{q}q \rangle|$  is considered to play a role similar to the Higgs particle, and hence experimental detection of the effect of the condensate is of particular importance.

We have recently succeeded to precisely measure the binding energies of deeply-bound pionic-Sn states (1s states of pionic <sup>115,119,123</sup>Sn atoms), and determined the in-medium isovector scattering length  $b_1$ , which turned out to be significantly different from the vacuum value. We then used theoretical relations to deduce the ratio of in-medium vacuum condensate to the vacuum value to be,  $|\langle \bar{q}q \rangle|_{\rho}/|\langle \bar{q}q \rangle|_{0} = 0.66 \pm 0.06$ , which agree fairly well with theoretical expectations. This is one of the first clear indications of the importance of quark condensate in hadron physics.

# 5 Sakurai Group

**Research Subjects:** Structures and Reactions of Extremely Neutron-rich Nuclei, and Nuclear Reactions Related with Astrophysical Phenomena

Member: Hiroyoshi Sakurai, Hironori Iwasaki

Research activities of our laboratory have covered 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, and 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.

- Particle stability and  $\beta$ -decay properties of very neutron-rich nuclei near the drip line
  - 1. Production and identification of new neutron-rich isotopes, <sup>34</sup>Ne, <sup>36</sup>Na, and <sup>43</sup>Si, and particle instability of <sup>33</sup>Ne, <sup>36</sup>Na, and <sup>39</sup>Mg.
  - 2.  $\beta$ -decay lifetime and  $\beta$ -delayed neutron multiplicities of the neutron drip-line nuclei <sup>19</sup>B, <sup>22</sup>C, and <sup>23</sup>N.
- In-beam gamma spectroscopy for the exotic structure of very neutron-rich nuclei.
  - 1. Doppler-shift attenuation method and in-beam  $\gamma$  attenuation method for life time measurements of excited states in light neutron-rich nuclei <sup>12</sup>Be and <sup>16</sup>C.
  - 2. Proton inelastic scattering to investigate neutron-matter deformation of <sup>16</sup>C and <sup>34</sup>Mg and to determine low-lying level schemes in very neutron-rich nuclei <sup>27</sup>F and <sup>30</sup>Ne.
  - 3. Coulomb excitation of <sup>46</sup>Cr, <sup>50</sup>Fe, and <sup>54</sup>Ni and investigation of  $M_n/M_p$  ratios in T=1 nuclei.
  - 4. One-nucleon transfer reactions  ${}^{12}\text{Be}(\alpha,t){}^{13}\text{B}$  and  ${}^{22}\text{O}(\alpha,t){}^{23}\text{F}$  to investigate single-particle states in neutron-rich nuclei
  - 5. Development of Germanium telescope for in-beam gamma ray spectroscopy in inverse reactions.
- Coulomb and nuclear breakup reactions of <sup>11</sup>Li, <sup>14</sup>Be, and <sup>17</sup>B for soft collective modes in neutron-rich nuclei.
- $\beta$  spectroscopy of <sup>46</sup>Cr.
- Key reactions of nuclear synthesis in astrophysical phenomena.
  - 1. Coulomb dissociation of  $^{23}\text{Al}$  and  $^{27}\text{P}$  to study key reactions of the rp-process path,  $^{22}\text{Mg}(p,\gamma)^{23}\text{Al}$  and  $^{26}\text{Si}(p,\gamma)^{27}\text{P}$ .
  - 2. Coulomb dissociation of <sup>15</sup>C to study a key reaction of the CNO neutron cycle in low-mass AGB stars, <sup>14</sup>C( $n,\gamma$ )<sup>15</sup>C.
  - 3. Application of transfer reactions to radiative capture reactions in stellar evolutions  ${}^{7}\text{Be}(p,\gamma){}^{8}\text{B}$ ,  ${}^{7}\text{Be}(p,\gamma){}^{9}\text{C}$ , and  ${}^{12}\text{C}(n,\gamma){}^{13}\text{C}$  by means of the ANC method.

# 6 Komamiya group

**Research Subjects:** (1) Preparation for experiment at the linear  $e^+e^-$  collider GLC;(2) OPAL experiment at LEP  $e^+e^-$  collider;(3) preparation for data analysis for the ATLAS experiment at LHC (4)research on astroparticle physics with balloonborne high resolution spectrometer (BESS experiment);(5) Detector researches and developments for future particle physics experiments.

Member: Sachio Komamiya, Tomoyuki Sanuki

1) Preparation for the  $e^+e^-$  linear collider GLC: GLC is the energy frontier machine for  $e^+e^-$  collisions in the near future. We started various GLC accelerator simulations and plan to help hardware tests at KEK. We have been studying possible physics and experiments at GLC. In the FY2002 the ACFA Linear Collider Project Report was completed. The whole picture of the Linear Collider Project is described in this report (http://:lcdev.kek.jp/RMdraft/). The report includes expected physics, detector design, accelerator design and R&D, civil engineering, site studies, cost evaluation, international organization, benefit of the project, and a roadmap to realize the project. As for the accelerator simulation studies for the design we are involved in the following two projects; (a) An accelerator energy upgrade scheme would use C-band technology up to about 400 GeV, with X-band accelerating structures filling the remaining space in the tunnel for the future upgrade. The C-band technology for the main linac is the realistic backup option of the X-band, since the fabrication and operation tolerance of C-band is looser than those for the X-band but the acceleration gradient for X-band is higher. The simulation study demonstrated that main linac using both C-band and X-band technologies in series should work without major problems. (b)The estimation of the beam scattering by residual gas or by thermal photons in the Linear Collider main linac was performed. The estimation of emittance increase due to the beam scattering will be studied using these results.

2) OPAL experiment: The elementary particle physics experiment of a large international collaboration using the highest energy  $e^+e^-$  collider LEP is running at CERN. The data taking with the OPAL detector was completed in the end of 2000. Important physics subjects at LEP are (a) Higgs boson searches, (b) Supersymmetric particle searches and (c) W-boson physics. We have extensively searched for the Higgs boson at LEP. The lower limit of the Higgs Boson of the Standard Model was set to be 114 GeV (95% C.L.). ¿From the precise measurement of the electro-weak interaction at LEP and other accelerators, the upper mass limit of the Higgs boson was obtained to be about 200 GeV. Therefore the Higgs boson should exist within the narrow mass range of 114-200 GeV. 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 36.3 GeV. This limit is quite independent of the models. The W boson mass was determined to be 80.490  $\pm$  0.065 GeV by the OPAL experiment alone. The combined W boson mass for the four LEP experiments is 80.412  $\pm$  0.042 GeV (statistical and systematic errors combined). Anomalous interactions of the W boson was searched for, and strict limits were set for these interactions.

3) BESS experiment: The spectrum of cosmic muon, proton and Helium were measured at various hight. These information is important for the calculation of the neutrino flux at Superkamiokande, hence it is valuable for the atmospheric neutrino oscillation analyses. The data was taken at the heights starting from 37 km ( $4.5 \text{ g/cm}^2$ ) to 27 km ( $30 \text{ g/cm}^2$ ) for the duration of about 11 hours in the 2001 BESS flight. The kinetic energy spectrum was measured from 0.5 GeV to 10 GeV with an accuracy of 8% for proton, 10% for Helium, and 20% for muon. This information is used for optimizing the simulation program for atmospheric muons and neutrinos. In order to measure momentum of primary cosmic ray particles in the range of 100 GeV to 1 TeV, the tracking detector system was upgraded by installing a new Jet-chamber and a outer precision tracking detector. In the October 2002 flight in Canada, the primary high momentum cosmic ray flux was measured up to about 1 TeV.

4) Detector R&D: We are starting research and development for possible detectors in the future experiments. The group has considered the BES-III experiment at the Beijing  $e^+e^-$  collider BEPC-II as the candidate for the middle term project before JLC. We have studied the possibility of the search for a rare decay  $\tau^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm}\gamma$  at BES-III. Development of photon detector for the CsI calorimeter system is considered.
## 7 Minowa-Group

#### **Research Subjects:** Experimental Particle Physics without Accelerators

#### Member: MINOWA, Makoto and INOUE, Yoshizumi

A direct experimental search for supersymmetric particle dark matter is running in an underground cell in the Kamioka Observatory.

Formerly, the detector consisted of 8 pieces of 20-gram lithium fluoride bolometers. The fluorine is estimated to be one of the best nuclides for the detection of spin-dependently interacting neutralinos. The fluorine for the dark matter search is complementary to the widely used sodium(of NaI) when their sensitivity is represented in the parameter plane of the neutralino-proton spin-dependent coupling $(a_p)$  and neutralino-neutron spin-dependent coupling $(a_n)$ .

In 2002, we use NaF crystals as bolometers instead of LiF crystals. <sup>23</sup>Na (natural abundance 100%) has a large expectation value of the neutron spins than <sup>7</sup>Li (natural abundance 92.5%). If <sup>23</sup>Na is used in combination with <sup>19</sup>F, better sensitivities in the  $a_p-a_n$  plane can be reached with a single detector. In addition, the background below 20 keV from <sup>3</sup>H produced by the neutron capture of <sup>6</sup>Li (natural abundance 7.5%) during the development in the surface laboratory can be avoided.

On the basis of the measurement in Kamioka we obtained more stringent limits in the  $a_p-a_n$  plane for certain mass of neutralinos than those of the first results with LiF bolometer at Kamioka Observatory, and this result as well as the first result with LiF bolometer excluded a part of the parameter space which is not excluded by UK Dark Matter Collaboration.

A still more sensitive new detector for the dark matter search is under development by us. Anthracene and stilbene scintillators have directional anisotropies in the scintillation efficiency for heavy charged particles. This feature of the scintillators could be used to detect the motion of the dark matter particles relative to the earth improving the sensitivity to the dark matter detection.

The scintillation efficiency of carbon recoils in stilbene scintillator was mesured down to 45 keV using neutrons from  ${}^{7}\text{Li}(p,n){}^{8}\text{Be}$  and  ${}^{252}\text{Cf}$ . Anisotropy responce was confirmed in low energy regions. The variation of the quenching factor is about 10%, that could produce the possible "dark matter signal".

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. 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.

In 2002, the AXION HELIOSCOPE is directed toward the soft gamma ray repeater SGR 1900+14 to search for axions produced in it with its very strong magnetic field. Although no gamma ray burst was reported during the run on the SGR 1900+14, we put a limit of  $d\Phi_a/dE_a < 4.8 \times 10^{13} \text{keV}^{-1} \text{s}^{-1} \text{cm}^{-2}$  (95% CL) on the axion flux coming from it for the first time.

## 8 Aihara Group

## **Research Subjects:** Study of CP-Violation in the *B* Meson System, Search for Physics Beyond the Standard Model in the *B* Meson, JHFnu Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment, and R&D for Linear Collider

#### Members: H. Aihara, M. Iwasaki

The main research activity of our group has been a study of CP-violation in the *B* meson system and precision measurements of CKM matrix elements using the KEK *B*-factory (KEKB). This past year we presented an improved measurement of the Standard Model *CP* violation parameter  $\sin 2\phi_1$  based on 85 million *B*-anti*B* pairs collected at the  $\Upsilon(4S)$  resonance. One neutral *B* meson was fully reconstructed as a  $J/\psi K_S$ ,  $\psi(2S)K_S$ ,  $\chi_{c1}K_S$ ,  $\eta_c K_S$ ,  $J/\psi K_L$  or  $J/\psi K^{*0}$  decay and the flavor of the accompanying *B* meson was identified from its decay products. From the asymmetry in the distribution of the time intervals between the two *B* meson decay points, we determined  $\sin 2\phi_1 = 0.719 \pm 0.074(\text{stat}) \pm 0.035(\text{syst})$ . With this direct measurement and other indirect constraints based on the Standard Model, we conclude that Kobayashi-Maskawa model has been established[1,3].

We have also presented an improved measurement of CP-violating asymmetries in  $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$  decays based on a 78 fb<sup>-1</sup> data sample. We reconstruct one neutral B meson as  $aB^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$  CP eigenstate. We apply an unbinned maximum likelihood fit to the distribution of the time intervals between the two B meson decay points. The fit yields the CP-violating asymmetry amplitudes Apipi = +0.77+/-0.27(stat)+/-0.08(syst) and Spipi = -1.23+/-0.41(stat)+0.08/-0.07(syst). We obtain confidence intervals for CP-violating asymmetry parameters Apipi and Spipi based on a frequentist approach. We rule out the CP-conserving case, Apipi=Spipi=0, at the 99.93% confidence level[2,4].

We have also measured  $B_d^0$  and  $B^{\pm}$  lifetimes and  $B_d^0 - \overline{B_d}^0$  mixing [3] and, for the first time, have measured the electroweak penguin Process  $B \to X_s \ell^+ \ell^-$ . We have determined the branching fraction of the process to be  $Br(B \to X_s \ell^+ \ell^- = (6.1 \pm 1.4^{+1.4}_{-1.2}) \times 10^{-6}$ [5].

We are involved in the next generation long-baseline neutrino oscillation experiment, JHFnu, which shoot off-axis neutrino beam from Tokai 50 GeV proton synchrotron to Super Kamiokande detector. Our R&D work also includes the design of Linear Collider beam delivery system, the interaction region and the central tracker based on the silicon strip detectors.

- 1. K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], "Improved measurement of mixing-induced CP violation in the neutral B meson system," Phys. Rev. D **66**, 071102(R) (2002) [arXiv:hep-ex/0208025].
- 2. K. Abe *et al.* [Belle Collaboration], "Evidence for CP-violating asymmetries  $B^0 \to \pi^+\pi^-$  decays and constraints on the CKM angle  $\phi_2$ ," arXiv:hep-ex/0301032.
- 3. Tomonobu Tomura "Study of Time Evolution of B Mesons at the KEK B Factory." (Ph.D. Thesis)
- 4. Takeshi Nakadaira "Study of CP Asymmetry in the Neutral B Meson Decays to Two Charged Pions." (Ph.D. Thesis)
- 5. J. Kaneko *et al.* [Belle Collaboration], "Measurement of the electroweak penguin process  $B \rightarrow X_S \ell^+ \ell^-$ ," Phys. Rev. Lett. **90**, 021801 (2003) [arXiv:hep-ex/0208029].

## 9 Wadati Group

#### Research Subjects: Statistical Mechanics, Nonlinear Physics, 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 2002 are listed in the followings.

- 1. Bose–Einstein Condensation (BEC)
  - Ground State Properties of a Toroidally Trapped BEC
- (2) Free Expansion of a Bose-Einstein Condensate
- (3) Dynamics of a Wavefunction for the Attractive Nonlinear Schrödinger Equation under Isotropic Harmonic Confinement Potential
- (4) Statistical Mechanics of Bose–Einstein Condensation in Trap Potentials
- 2. Nonlinear Waves
  - (1) Noncommutative Soliton
  - (2) Cellular Automaton and Crystal Base
  - (3) Lattice W Algebra and Integrable Systems
- (4) 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) Quantum Gravity
- 6. Quantum Many-Body Problem
- (1)  $\delta$ -function Bose gas
- (2) Calogero–Sutherland Model
- (3) Exclusion Statistics and Chiral Partition Function
- 7. Quantum Computing and Quantum Information
- (1) Geometric Aspects of Quantum Search
- (2) Multipartite entanglement and embeddings in algebraic geometry
- (3) Quantum Cloning
- 8. Random Matrix
- (1) Mesoscopic Fluctuation

## 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

New methods for theoretical calculations of electronic structure and atomic/electronic processes of surface and nano-structures under finite field and current have been developed. These methods include the first-principles molecular dynamics method, first-principles recursion transfer matrix method(FP-RTM), numerical Lipman-Schwinger method, real space finite element method, computational method for the time-dependent Kohn-Sham equation, as well as density functional tight-binding method combined with the non-equilibrium Green's function (DFTB-NEGF). The first-principles molecular dynamics method with ultrasoft pseudopotential developed in our group is called TAPP package and kept extending its users community and ever increasing its applicability. The method is applied to various problems in materials science, in particular surface and nanostructure science. So far studied problems include the substitutional penetration of Ge on Si(001), quantum dynamics of dimers of Si (001) surface and a new symmetry broken structure of Si(111)  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  -Ag, and the proton relay dissociation of water molecules on solid surfaces. We also developed first-principles theoretical simulation method for the noncontact atomic force microscopy (ncAFM) images. This method can reproduce excellently the experimentally observed ncAFM images of Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface including even its temperature dependence. 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 irreversible atomic processes is clarified. On the othe hand, the FP-RTM method is the extension of the density functional theory for the non-equilibrium open systems. The mechanism of atom extraction by the tip and nano-scale point contact formation were clarified by this method. The concept of eigen-channels for the quantum transport through nano-structures have been also developed. This method as well as simpler DFTB-NEGF has been applied to various problems related nano-structure and surface science. The problems we studied include transport properties of carbon nanotubes and atom or molecular bridge structures connecting nano-electrodes. Quantum transport through atomic wires,  $C_{60}$ , and molecular bridges like tape-porphyrin have been theoretically analysed. Electron transmission through a  $C_{60}$  molecular bridge shows a large loop current, when the electron energy is near the degenerate molecular levels. The transport property of the semiconductor metal carbon nano-tube junction is investigated with the effects of the atomic structures. The junction is found to be a backward diode. Development of the new numerical algorithm for the integration of the time-dependent Kohn-Sham equation has been also achieved. We developed an efficient method for solving the time dependent Kohn-Sham equation in real space and real time. Applying this method to Benzine, CNT, or diamond crystal, we confirmed the efficiency and accuracy of the method.

N.Miura and M.Tsukada: Theoretical Analysis of Tip Effect on Noncontact Atomic Force Microscopy Image of Si(100))2  $\times$  1:H Surface, Jpn. J. Appl. Phys. 41 (2002) 306-308.

N.Sasaki, S.Watanabe and M.Tsukada: Visualization of Thermally Fluctuating Surface Structure in Noncontact Atomic-Force Microscopy and Tip Effects on Fluctuation: Theoretical Study of Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag Surface, Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 0461061-0461064.

N.Watanabe and M.Tsukada: Efficient method for simulating quantum electron dynamics under the time-dependent Kohn-Sham equation, Phys. Rev. E65 (2002) 036705-1.

M.Gautier, R.Perez, T.Arai, M.Tomitori and M.Tsukada: Interplay between Nonlinearity, Scan Speed, Damping and Electronics in Frequency Modulation Atomic-Force Microscopy, Phys. Rev. Lett. 89 (2002) 1461041-1461044.

Y.Kasahara, R.Tamura, M.Tsukada: Structure and electronic states of capped carbon nanotubes by a tight-binding approach, Phys. Rev. B67 (2002) 1154191-11541914.

K. Tagami and M. Tsukada: Current-controlled magnetism in T-shape tape-porphyrin molecular bridges Curr. App. Phys., in press.

K. Tagami and M. Tsukada: Theoretical Predictions of Electronic Transport Properties of Differently Conjugated Porphyrin Molecular Wires, Jpn. J. Appl. Phys., in press.

## 11 Aoki Group

**Subject:** Theoretical condensed-matter physics

Members: Hideo Aoki, Ryotaro Arita

Our main interests are in many-body effects in electron systems, i.e., **superconductivity, magnetism** and **fractional quantum Hall effect**, for which we envisage a "materials design for correlated electron systems" is possible:

• Superconductivity in repulsively interacting electron systems incl. models for high- $T_C$  cuprates [1,2]

- How to optimize  $T_C$  through the "fermiology" [3-5]
- Spin-triplet superconductivity [6]
- Organic superconductors [7]
- Magneto-tunnelling tomography of the pairing symmetry [8]

• Magnetism in repulsively interacting electron systems

- Flat-band ferromagnetism in an organic polymer [9]
- Electronic structure of alkali-metal-loaded zeolites Supercrystal [10]
- Electronic structure of hetero-interfaces
  - Metal-induced gap states at metal/insulator interfaces [11]
- Nonequilibrium and nonlinear phenomena in strongly correlated electron systems
  - Universal Landau-Zener tunnelling in the breakdown of Mott insulator [12]
- Quantum Hall systems
  - Interaction and BCS states in the fractional quantum Hall liquid [13],
  - Optical properties [14],
  - Integer quantum Hall effect and Hofstadter butterfly in three dimensions [15-17]
  - Field-induced SDW in three dimensions [18]
- Electrons on periodic curved surfaces [19]

[1] Hideo Aoki in Raymond F. Bishop et al. (ed.): *Recent progress in many-body theories* (World Scientific, 2002), p.13.

- [2] Hideo Aoki, in Tobias Brandes et al.(ed.): The Anderson Transition and its Ramifications
- Localisation, Quantum Interference, and Interactions,
- [3] K. Kuroki, T. Kimura and R. Arita, Phys. Rev. B 66, 184508 (2002).
- [4] S. Onari, K. Kuroki, R. Arita and H. Aoki, Phys. Rev. B 65, 184525 (2002); cond-mat/0303124.
- [5] T. Kimura, Y. Zenitani, K. Kuroki, R. Arita and H. Aoki, Phys. Rev. B 66, 212505 (2002).
- [6] R. Arita, K. Kuroki, and H. Aoki, submitted (cond-mat/0206358).
- [7] K. Kuroki, T. Kimura, R. Arita, Y. Tanaka and Y. Matsuda, Phys. Rev. B 65, 100516(R) (2002).
- [8] Y. Tanuma, K. Kuroki, Y. Tanaka, R. Arita, S. Kashiwaya and H. Aoki, PRB 66, 094507 (2002).
- [9] R. Arita, Y. Suwa, K. Kuroki and H. Aoki, Phys. Rev. Lett. 88, 127202 (2002).

[10] R. Arita, T. Miyake, T. Kotani, M. van Schilfgaarde, T. Oka, K. Kuroki, Y. Nozue and H. Aoki, submitted (cond-mat/0304322).

[11] M. Kiguchi, R. Arita, G. Yoshikawa, Y. Tanida, M.Katayama, K. Saiki, A. Koma and H. Aoki, to be published in *Phys. Rev. Lett.* 

- [12] T. Oka, R. Arita and H. Aoki, submitted (cond-mat/0304036).
- [13] M. Onoda, T. Mizusaki and H. Aoki, *Physica E* 12, 101 (2002).
- [14] K. Asano, J. Phys. Soc. Jpn. 72, in press.
- [15] M. Koshino, H. Aoki, K. Kuroki, S. Kagoshima, and T. Osada, Phys. Rev. B 65, 045310 (2002).
- [16] M. Koshino, H. Aoki and B.I. Halperin, Phys. Rev. B 66, 081301(R) (2002).
- [17] M. Koshino and H. Aoki, *Phys. Rev. B* 67 (2003), in press.
- [18] M. Koshino, H. Aoki, T. Osada, Phys. Rev. B 65, 205311 (2002).
- [19] H. Aoki, M. Koshino, D. Takeda, H. Morise and K. Kuroki, Phys. Rev. B 65, 035102 (2002).

## 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, unconventional superconductivity, and Tomonaga-Luttinger liquid theory. The followings are the current topics in our group.

- High- $T_c$  superconductivity Numerical studies of Stripe states in the two-dimensional t-J model.[1] Pseudo-gap phenomena in high- $T_c$  superconductors.[2] Low temperature specific heat and entropy in the t-J model and its spin-charge separation.
- Electronic states in  $d_{x^2-y^2}$ -wave superconductivity Quasiparticle states and magnetism around nonmagnetic and magnetic impurities. Electronic states around the vortex core.[9]
- Triplet superconductivity in  $Sr_2RuO_4[8]$
- Electronic states in frustrated systems[14] Verwey transition in magnetite.[3] Strongly correlated electron system on a triangular lattice.[6,13] Exact calculation of the ground-state entropy in a kagomé ice.[7]
- One-dimensional systems

Nature of carries in one-dimensional Hubbard model.[10]

Coexistence between charge order and spin Peierls state.[11]

Hidden order parameter in a ladder spin system.

[1] A. Himeda, T. Kato and M. Ogata: Phys. Rev. Lett. 88, 117001 (2002). "Stripe states with spatially oscillating d-wave superconductivity in the two-dimensional t-t'-J model"

[2] Y. Yanase: J. Phys. Soc. Jpn. 71, 278 (2002). "Theory of electric transport in the pseudogap state of high- $T_c$  cuprates"

[3] H. Seo, M. Ogata and H. Fukuyama: Phys. Rev. B **65**, 085107 (2002). "Aspects of the Verwey transition in magnetite"

[4] M. Saito and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **71**, 721 (2002). "Midgap states in disordered spin-Peierls systems"

[5] C. Hotta, M. Ogata, and H. Fukuyama: Phys. Rev. B 65, 184421 (2002). "Possible ferromagnetism in divalent borides"

[6] T. Koretsune and M. Ogata: Phys. Rev. Lett. 89, 116401 (2002). "Resonating-valence-bond states and ferromagnetic correlations in the doped triangular Mott insulator"

[7] M. Udagawa, M. Ogata, and Z. Hiroi: J. Phys. Soc. Jpn. **71**, 2365 (2002). "Exact results of ground-state entropy for Ising pyrochlore magnets under a magnetic field along [111] axis"

[8] Y. Yanase and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **72**, 673 (2003). "Microscopic identification of the d-vector in triplet superconductor Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>"

[9] H. Tsuchiura, M. Ogata, Y. Tanaka and S. Kashiwaya: preprint. "Electronic states around a vortex core in high- $T_c$  superconductors based on the t-J model"

[10] H. Tsuchiura, M. Ogata, Y. Tanaka and S. Kashiwaya: preprint. "Nature of carriers in one-dimensional correlated electron systems"

[11] M. Kuwabara, H. Seo, and M. Ogata: J. Phys. Soc. Jpn. **72**, 225 (2003). "Co-existence of charge order and spin-Peierls lattice distortion in one-dimensional organic conductors"

[12] M. Ogata and A. Himeda: J. Phys. Soc. Jpn. **72**, 374 (2003). "Superconductivity and antiferromagnetism in an extended Gutzwiller approximation for t-J model: effect of double-occupancy exclusion"

[13] T. Koretsune and M. Ogata: preprint. "Ferromagnetism on the frustrating lattices"

[14] M. Ogata: preprint. "Superconducting states in frustrating t-J model: A model connecting high- $T_c$  cuprates, organic conductors and Na<sub>x</sub>CoO<sub>2</sub>"

## 13 Tsuneyuki Group

#### **Research Subjects:** Theoretical condensed-patter physics

#### Member: Shinji Tsuneyuki and Kazuto Akagi

Computer simulations, such as the first-principles molecular dynamics method, enable us to investigate properties and behavior of materials beyond the limitation of experiments, or rather to predict them before experiments. Our main subject is to develop and apply such techniques of computational physics to investigate basic problems in condensed matter physics, especially focusing on prediction of material properties under ultra-high pressure or at surfaces.

#### New method of electronic-structure calculation: the transcorrelated method

We are trying to develop a new method of treating many-fermion systems within the wave function theory. The method was originally proposed by S. F. Boys and N. C. Handy about 30 years ago and named the transcorrelated method. In this method, total wave function is written by a product of a Slater determinant and the Jastrow factor, the latter of which is a function of electron-electron distance and so represents the electron correlation effect. In spite of the many-body character of the trial wave function, we can optimize the one-electron wave function in the Slater determinant by solving a self-consitent equation with at most three-body integral.

We have demonstrated the efficiency of the method by calculating total energy of small atoms, a hydrogen molecule with various bond length and several sizes of one-dimensional ionic Hubbard models. We have also shown that the Koopmans' theorem holds for the transcorrelated method.

Application of the transcorrelated method to crystals in continuum space is quite difficult because of the three-body numerical integration appearing in the SCF equation. Thus we first applied the method for the jellium mode. We found that the total energy calculated by QMC is reproduced surprisingly well by the transcorrelated method for a wide range of electron density. Based on this calculation, we have proposed new non-local exchange-correlation energy functional for the density functional theory.

#### Carrier doping effects in SrTiO<sub>3</sub>

We investigated carrier-doping effects on the structural phase transitions in  $SrTiO_3$  first-principles calculations. We found that the instabilities of the cubic phase to both the  $TiO_6$ -octahedron rotated phase and the ferroelectric phase are modulated characteristically by the electron-doping and the hole-doping. The results of the calculations are consistent with a previous experiment in which carrier electrons were introduced by impurity-doping or photo-irradiation. We are now trying to explain the huge photo-enhancement of dielectric constant in quantum paraelectric materials like  $SrTiO_3$ .

#### Atomic structures and vibrational spectra of NO/Pt(111)

The chemisorption structure of NO molecules on Pt(111) surface has not been clarified, or rather it has been misunderstood for long, although it is an important system for a catalytic reaction. We have specified the coverage dependence of the structure by first-principles total energy calculations. Especially at high coverage, NO molecules was found to have two chemisorption sites, the hollow site and the a-top site. We have also shown that the high-coverage structure shows large intensity transfer between two peaks in infrared absorption/reflection spectra, which is in harmony with experimental results showing a single absorption/reflection peak.

#### A hydrogen bond under high pressure: $\delta$ -AlOOH and $\delta$ -Al<sub>1-2x</sub>Mg<sub>x</sub>Si<sub>x</sub>OOH

AlOOH is an important substance in subducting sedimentary rocks, and could possibly serve as a water reservoir in the Earth's lower mantle. Its high-pressure phase shows specific features like anomalously large bulk modulus and strange anisotropy of the elastic constant. By first-principles molecular dynamics simulations, we have found that symmetric hydrogen bonds will explain such features. We have also shown that the same effect of hydrogen bonds appears in contaminated phase,  $\delta$ -Al<sub>1-2x</sub>Mg<sub>x</sub>Si<sub>x</sub>OOH.

J. Tsuchiya, T. Tsuchiya, S. Tsuneyuki and T. Yamanaka, First principles calculation of a high-pressure hydrous phase,  $\delta$ -AlOOH, Geophys. Res. Lett. (2002) 2002GL015417.

H. Aizawa, Y. Morikawa, S. Tsuneyuki, K. Fukutani and T. Ohno, A density-functional study of the atomic structures and vibrational spectra of NO/Pt(111), Surf. Sci. 514 (2002) 394-403.

N. Umezawa and S. Tsuneyuki, Transcorrelated self-consistent calculation for electronic systems with variational Monte Carlo method, Int. J. Quant. Chem. 91 (2) (2003) 184-190.

## 14 Nagasawa Group

#### **Research Subjects:** Optical Spectroscopy on Semiconductors and Carbon Nanotubes

Member: Nobukata Nagasawa and Nobuko Naka

Current studies are devoted to following subjects.

• Search for excitonic Bose condensate in semiconductor Cu<sub>2</sub>O

Excitons in  $Cu_2O$  are one of the most favorable candidate to realize the Bose-Einstein condensation (BEC) of quasiparticles. We established a new approach to create a cold and dense exciton system by employing exciton traps and two-photon loading. New optical phenomena suggesting the bosonic stimulation into the lowest energy state of the stress-induced exciton trap were observed, where the phase space density of the exciton system was estimated to be over 1. Temporal properties of the phenomena are consistent with the characteristic feature of the excitonic Bose-Einstein Condensate.

- Two-photon temporal and spatial diagnostics of stress-induced exciton traps [1, 3, 6]
- Bosonic stimulation of excitons to the BEC state [7]
- Optical spectroscopy of carbon nanotubes formed in Zeolite single crystals

Z.K. Tang et al. have developed a method to grow mono-sized, aligned and single-walled carbon nanotubes of about 0.4 nm diameter inside micro-channels of a Zeolite single crystal. Interesting features related to the superconductivity have been recently reported on this material. Following works are performed as collaboration with Tokyo Instruments, Inc. and Prof. Z. K. Tang of Hong Kong University of Science and Technology.

- Nano-scale microscope spectroscopy on emission [2]
- Electrical transport and photo-induced current-modulation measurements [4, 5]
- N. Naka and N. Nagasawa: Two-photon diagnostics of stress-induced exciton traps and loading of 1s-yellow excitons in Cu<sub>2</sub>O, Phys. Rev. B, 65 (2002) 075209.
- [2] N. Nagasawa, H. Sugiyama, N. Naka, I. Kudryashov, M. Watanabe, T. Hayashi, I. Bozovic, N. Bozovic, G. Li, Z. Li, and Z.K. Tang: Visible emission of single-wall carbon nanotubes formed in micro-channels of zeolite crystals, J. Lumin., 97 (2002) 161.
- [3] N. Naka and N. Nagasawa: Nonlinear paraexciton kinetics in a potential trap in Cu<sub>2</sub>O under two-photon resonance excitation, Phys. Rev. B, **65** (2002) 245203.
- [4] Y. Kamada, N. Naka, S. Saito, N. Nagasawa, Z.M. Li, and Z.K. Tang: Photo-irradiation effects on electrical conduction of single wall carbon nanotubes in zeolite single crystals, Solid State Commun., 123 (2002) 375.
- [5] Y. Kamada, N. Naka, N. Nagasawa, Z.M. Li, and Z.K. Tang: Photo-induced current-modulation in zeolite crystals containing single wall carbon nanotubes, Physica B, **323** (2002) 239.
- [6] N. Naka and N. Nagasawa: Bosonic stimulation of cold 1s excitons into a harmonic potential minimum in Cu<sub>2</sub>O, Solid State Commun., **126** (2003) 523.
- [7] N. Naka and N. Nagasawa: Optical tracking of high-density cooled excitons in potential traps in Cu<sub>2</sub>O, Physica Status Solidi (b), in press.

## 15 Tarucha Group

**Research Subjects:** Electronic properties of artificial atoms and molecules, Spin effects and correlations in semiconductor nanostructures

#### Member: Seigo Tarucha, Keiji Ono

#### 1. Electronic Properties of Artificial Atoms

**Dynamics of a few-electron states**: We use an electrical pump and probe technique to investigate energy relaxation in a quantum dot. The relaxation for the one-electron state occurs from a 2p state (excited) to a 1s state (ground) with phonon emission, whereas for the two-electron state, it occurs from a spin triplet (excited) to a spin singlet (ground) with spin-flip as well as phonon emission. The observed relaxation time is a few nsec for the one-electron case, and longer for the larger relaxation energy. The enhanced relaxation time is assigned to "phonon bottleneck effect". The two-electron relaxation time is as long as  $200\mu$ sec, indicating that the degree of spin freedom is well isolated from the surrounding. This can be a good news for possible applications to spintronics

The Kondo physics: We observe the Kondo effect only associated with the spin triplet state, and the evaluated Kondo temperature is consistent with the theoretical prediction. We also develop a theoretical model of a coupled quantum dot to understand "Kondo chessboard", which only appears for a planar quantum dot in a weak magnetic field.

**Strong correlation effects**: We fabricate a quantum dot having a low-electron density to study the correlation effects in a high magnetic field, and find that the two-electron ground state undergoes a transition from a spin singlet state to a triplet state, then to a novel state. This state is associated with a state having a larger angular momentum, which is only favored by strong correlations.

#### 2. Electronic Properties of Artificial Two-dot Molecules

**Filling of molecular phase**: For fairly strongly coupled artificial molecules we find molecular phases which include electrons in both of the bonding and antibonding orbital states under a perpendicular magnetic field. This arises from certain antibonding states being favored by magnetic field.

**Nuclear spin effects**: We find evidence of nuclear spin effects for lifting Pauli blockade in a double dot system. This is associated with spin flip-flop hyperfine interactions, whose strength can be manipulated as a function of magnetic field and bias voltage by adjusting the energy mismatch between the electron spins and nuclear spins. We use this to demonstrate nuclear spin memory operation.

#### 3. Transport Properties of Quantum Wires

**Negative Coulomb drag**: We propose a Wigner crystallization model to account for the negative Coulomb drag previously observed for a coupled quantum wire system. The numerical simulation reproduces the experiment qualitatively.

**Coupled quantum wire-dot**: We fabricate a quantum wire incorporating a quantum dot with tunable coupling to the quantum wire to study the 1D-0D-1D transport physics. We observe clear Coulomb oscillations in the weak coupling region, and interference effect for the 1D propagating wave in the strong coupling region. These are both associated with the two potential barriers forming the dot.

#### 4. Spin Control for Implementing Quantum Computing

**ESR technology build-up**: We fabricate an ESR cavity to study a g-factor and dephasing time of electron spin. We first apply the technique to a 2D electron gas to derive the g-factor (=-0.38) and a lower bound (7ns) of dephasing time. We also find significant contribution from hyperfine coupling to nuclear spins.

T. Fujisawa et al: Allowed and forbidden transitions in artificial hydrogen and helium atoms, Nature, **419**, 278 (2002).

K. Ono et al: Current rectification by Pauli exclusion in a weakly coupled dot System, Science, **297**, 1313 (2002).

S. Amaha et al: Magnetic field induced transitions in the few-electron ground states of artificial molecules, Solid State Comm. **119** (2001) 183.

M. Stopa et al :Magnetically induced chessboard pattern in the conductance of a Kondo quantum dot, to be published in Phys. Rev. Lett. (2003).

## 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 and complex materials are studied using electron spectroscopic techniques such as photoemission, inverse-photoemission and x-ray absorption spectroscopies. We investigate high-temperature superconductivity, metal-insulator transitions, giant magnetoresistance, spin and charge ordering, pseudogap formation, 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. Low-energy electronic structures near the Fermi level are studied using high-resolution photoemission and angle-resolved photoemission.

T. Mizokawa, C. Kim, Z.-X. Shen, T. Yoshida, A.Fujimori, S.Horii, Yuh Yamada, K. Nakada, H. Ikuta and U. Mizutani: Observation of Single Particle Spectral Function of a Tomonaga-Luttinger Liquid: Angle-Resolved Photoemission Study of Zn-Doped PrBa<sub>2</sub>Cu<sub>4</sub>O<sub>8</sub>, Phys. Rev. B **65** (2002) 193101.

J. Matsuno, T. Mizokawa, A. Fujimori, Y. Takeda, S. Kawasaki and M. Takano: Different Routes to Charge Disproportionation in Perovskites-Type Fe Oxides, Phys. Rev. B 66 (2002) 193103.

K. Okazaki, T. Mizokawa, A. Fujimori, E.V. Sampathkumaran, M.J. Martinez-Lope and J.A. Alonso: Crossover in the Nature of the Metallic Phases in the Perovskite-Type  $RNiO_3$ , Phys. Rev. B 67 (2003) 073101.

## 17 Uchida Group

#### Research Subjects: High- $T_c$ superconductivity

#### Member: Uchida Shin-ichi (professor), Kojima Kenji M. (research associate)

#### 1. Project and Research Goal

The striking features of low-dimensional electronic systems with strong correlations are the "fractionalization" of an electron and the "self-organization" of electrons to form nanoscale orders. In one dimension (1D), an electron is fractionalized into two separate quantum-mechanical particles, one containing its charge (holon) and the other its spin (spinon). In two dimensions (2D) strongly correlated electrons tend to form spin/charge stripe order.

Our study focuses on 1D and 2D copper oxides with various configurations of the corner-sharing CuO<sub>4</sub> squares. The common characteristics of such configurations are the quenching of the orbital degree of freedom due to degraded crystal symmetry and the extremely large exchange interaction (J) between neighboring Cu spins due to large d - p overlap (arising from 180 °Cu-O-Cu bonds) as well as to the small charge-transfer energy. The quenching of orbitals tends to make the holon and spinon to be well-defined excitations in 1D with quantum-mechanical character, and the extremely large J is one of the factors that give rise to superconductivity with unprecedentedly high Tc as well as the charge/spin stripe order in 2D cuprates. The experimental researches of our laboratory are based upon successful synthesis of high quality single crystals of cuprate materials with well-controlled doping concentrations which surpasses any laboratory/institute in the world. This enables us to make systematic and quantitative study of the charge/spin dynamics by the transport and optical measurements on the strongly anisotropic systems. We also perform quite effective and highly productive collaboration with world-leading research groups in the synchrotron-radiation,  $\mu$ SR and neutron facilities, and STM/STS to reveal electronic structure/phenomena of cuprates in real- and momentum-space.

#### 2. Accomplishment

#### (1) Ladder Cuprate

Significant progress has been made in the experimental study of a hole-doped two-leg ladder system  $Sr_{14-x}Ca_xCu_{24}O_{41}$  and undoped  $La_6Ca_8Cu_{24}O_{41}$ :

1) From the high pressure (P) study we constructed and x-P phase diagram (in collaboration with Prof. N. Môri's group). We find that the superconductivity appears only under pressures higher than 3GPa and that the superconducting phase is restricted in the range of x larger than 10. In lower P and smaller x regions the system is insulating.

2) The pairing wave function in the superconducting phase has a dominant s-wave component which has been revealed by the first successful NMR measurement under high pressure (with N. Fujiwara and N. Môri, ISSP, U. of Tokyo).

3) The origin of the insulating phase dominating the whole x - P phase diagram is most likely the charge order of doped holes or hole pairs as suggested by the presence of a collective charge mode in the x=0,  $Sr_{14}Cu_{24}O_{41}$ , compound in the inelastic light scattering (with G. Blumberg, Bell Lab.), microwave and nonlinear conductivity (with A. Maeda and H. Kitano, U. of Tokyo).

4) In the undoped compound  $La_6Ca_8Cu_{24}O_{41}$  spin thermal conductivity is remarkable enhanced along the ladder-leg direction due to the presence of a spin gap and to a ballistic-like heat transport characteristic of 1D.

#### (2) Manipulation of THz Optical Spectrum in High- $T_c$ Cuprates

The high- $T_c$  cuprate superconductors can be regarded as a superlattice of Josephson coupled superconducting layers along the *c*-axis. As a consequence, a collective excitation mode, Josephson plasma mode, is observed in the THz region for polarization parallel to the *c*-axis. However, the Josephson plasma is a longitudinal mode which does not directly couple with the THz radiation. We have demonstrated that, upon application of a magnetic field parallel to the layers, a new transverse Josephson plasma mode appears in the *c*-axis optical conductivity spectrum of underdoped YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>6.6</sub>. This mode originates from the periodic modulation of Josephson coupling strength between layers with and without Josephson vortices. The mode frequency is shown to be variable with changing the field intensity and oxygen content (doping concentration).

#### (3) Control of Competition between Static Stripe and Superconductivity Phase by Pressure

The Pressure effect on  $T_c$  and the Hall coefficient has been investigated in the static stripe-ordered phase of La<sub>1.48</sub>Nd<sub>0.4</sub>Sr<sub>0.12</sub>CuO<sub>4</sub>. We have demonstrated that hydrostatic pressure quite effectively controls the competition between the static stripe and high- $T_c$  SC phases. In this compound the static stripe is most stable and in turn  $T_c$  is much reduced. We showed that hydrostatic pressure of only 0.1GPa is enough to suppress the stripe order and to enhance  $T_c$  dramatically. The uniaxial pressure experiment indicates that the pressure effect is caused primarily by the in-plane compression (in collaboration with S. Arumugam and N. Môri ).

#### (4) Nanoscale Electronic Phenomena in the High- $T_c$ Superconducting State

The STM/STS collaboration with J. C. Davis' group in UC Berkeley is discovering numerous unexpected nanoscale phenomena, spatial modulation of the electronic state (local density of states, LDOS), in the superconducting CuO<sub>2</sub> planes using STM with sub-Å resolution and unprecedentedly high stability. These include (a) "+" or "×" shaped quasiparticle (QP) clouds around an individual Zn (Ni) impurity atom, (b) spatial variation (distribution) of the SC gap magnitude, (c) a "checkerboard" pattern of QP states with four unit cell periodicity around vortex cores, and (d) quantum interference of the QP. This year's highlight are as follows:

#### 1) Granular structure of high-Tc superconductivity

The STM observation of "gap map" has been extended to underdoped  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ . The result reveals an apparent segregation of the electronic structure into SC domains of ~3mm size with local energy gap smaller than 50meV, located in an electronically distinct background ("pseudogap" phase) with local gap larger than 50meV but without phase coherence of pairs.

#### 2) Modulation of LDOS induced by vortex cores

The SC order parameter is suppressed inside a vortex core with a radius of  $\sim 10$ Å where the electronic excitations show a pseudogap and antiferromagnetic correlation is enhanced. We find that the additional QP states are generated by quantized vortices which show up as a four unit cell 4×4 "checkerboard" pattern.

#### 3) Quasiparticle interference

Modulation of LDOS is observed even without vortices, at zero magnetic field. In this case, the modulation is weak and incommensurate with lattice period, showing energy (bias voltage) dependence. The dispersion is explained by quasiparticle interference due to elastic scattering between characteristic regions of momentum-space, consistent with the Fermi surface and the d-wave SC gap determined by ARPES (angleresolved-photoemission). The result indicates the special relationship between real-space and momentumspace electronic structure.

## 18 Hasegawa Group

#### **Research Subject:** Experimental Surface/Nano Physics

#### Members: Shuji HASEGAWA and Iwao MATSUDA

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 and nano-scale phases. The surfaces we are interested in are a variety of surface superstructures of semiconductors 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: a metal-insulator transition and anisotropic surface-state conductivity, measurements with micro-4-point probes at variable temperatures, and with a four-tip STM for nano-scale 4-point probe measurements.

(2) Surface phases and phase transitions: quenching and modifying of the Peierls transition at Si(111)- $4 \times 1$ -In surface superstructure. Formation of one-dimensional metallic systems on vicinal Si(111) surfaces. Two-dimensional metals on Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag and its derivatives,  $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$  phases.

(3) Construction of new apparatuses: Ultra-high-energy/momentum-resolution photoemission spectroscopy (PES) apparatus. Fermi-surface mapping PES apparatus.

- [1] H. Morikawa, I. Matsuda, S. Hasegawa: STM Observation of Si(111)- $\alpha$ - $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Sn at low temperature, Physical Review **B 65**, 201308(R) (2002).
- [2] S. Hasegawa, I. Shiraki, T. Tanikawa, C. L. Petersen, T. M. Hansen, P. Goggild, and F. Grey: Direct measurement of surface-state conductance by microscopic four-point probe method, Journal of Physics: Condensed Matter 14, 8379 (2002).
- [3] G. LeLay, A. Cricenti, C. Ottaviani, P. Perfetti, T. Tanikawa, I. Matsuda, S. Hasegawa: Evidence of asymmetric dimers down to 40 K at the clean Si(100) surface, Physical Review B 66, 153317 (2002).
- [4] S. Hasegawa, I. Shiraki, F. Tanabe, and R. Hobara: Transport at surface nanostructures measured by four-tip STM, Current Applied Physics 2, 465 (2002).
- [5] T. Inaoka, T. Nagao, S. Hasegawa, T. Hildebrandt, M. Henzler: Two-dimensional plasmon in a metallic monolayer on a semiconductor surface; exchange-correlation effects, Physical Review B 66, 245320 (2002).
- [6] I. Matsuda, T. Ohta, and H. W. Yeom: In-plane dispersion of the quantum-well states of the epitaxial silver films on silicon, Physical Review B 65, 085327 (2002).
- [7] I. Matsuda and H. W. Yeom: The study of the quantum-well states in the ultra-thin silver film on the Si surface, Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena 126, 101 (2002)
- [8] M. Ueno, I. Matsuda, C. Liu, and S. Hasegawa, Step edges as reservoirs of adatom gas on a surface, Japanese Journal of Applied Physics, in press (2003).
- [9] C. Liu, I. Matsuda, H. Morikawa, H. Okino, T. Okuda, T. Kinoshita, and S. Hasegawa, Si(111)-√21 × √21-(Ag+Cs) surface studied by scanning tunneling microscopy and angle-resolved photoemission spectroscopy, Japanese Journal of Applied Physics, in press (2003).
- [10] H. W. Yeom, J. W. Kim, K. Tono, I. Matsuda, and T. Ohta: Electronic structure of the monolayer and double-layer Ge on Si(001), Physical Review B, in press (2003).
- [11] S. Hasegawa, I. Shiraki, F. Tanabe, R. Hobara, T. Kanagawa, T. Tanikawa, I. Matsuda, C. L. Petersen, T. M. Hansen, P. Boggild, F. Grey: Electrical conduction through surface superstructures measured by microscopic four-point probes, Surface Review and Letters, in press (2003).

## 19 Fukuyama Group

#### **Research Subjects:** Low Temperature Physics:

Frustrated magnetism and superfluidity in solid and fluid <sup>3</sup>He, Ultra-low temperature scanning tunneling microscopy, Two-dimensional rare-gas solids, Exotic superconductors.

#### Member: Hiroshi Fukuyama, Hiroshi Kambara and Christopher Bäuerle

Our current research interests are (i) quantum many body phenomena such as nuclear magnetic orderings and superfluidity in solid and fluid <sup>3</sup>He especially in two dimensions (2D), (ii) structural phase transitions in 2D rare-gas solids, (iii) exotic superconductors in low dimensional conductors and *etc.* We are investigating these topics experimentally at very low temperatures down to several tens micro kelvin.

- 1. Nuclear magnetism of 2D solid <sup>3</sup>He: Solid monolayers of <sup>3</sup>He adsorbed on graphite are ideal 2D quantum spin systems with nuclear spin 1/2. The gapless "quantum spin liquid" ground state has been strongly suggested in our previous heat capacity measurement for the low density second-layer commensurate phase (4/7 phase) in zero magnetic field. We obtained preliminary heat capacity data for the 4/7 phase adsorbed on graphite preplated with <sup>4</sup>He monolayer in magnetic fields up to 0.65 T down to 200  $\mu$ K. The different first layer seems to result in a slightly different temperature dependence of heat capacity but again a double peak structure similar to that observed previously.
- 2. Mott-Hubbard transition in 2D <sup>3</sup>He: Fluid monolayers of <sup>3</sup>He absorbed on graphite are ideal 2D Fermi fluids where one can vary interactions between the <sup>3</sup>He quasiparticles from the Fermi gas regime to a strongly correlated one by increasing areal density over a wide range. Very large mass enhancement of the quasiparticles, *i.e.*  $m^*/m \approx 20$ , was observed in our preliminary heat-capacity measurements for high density 2D fluid <sup>3</sup>He near the critical density for the 4/7 phase. It suggests the Mott-Hubbard transition between the 2D <sup>3</sup>He fluid and the 4/7 commensurate phase.
- 3. Search for possible superfluidity (BCS transition) in 2D <sup>3</sup>He: In order to search for possible superfluidity in 2D <sup>3</sup>He well below 1 mK, we are testing a new ZYX exfoliated graphite substrate which has a larger single crystalline size than the expected superfluid coherence length ( $\gtrsim 100$  nm). We have confirmed that monolayer solid <sup>3</sup>He adsorbed on ZYX can be cooled successfully down to 200  $\mu$ K through NMR measurements of the nuclear magnetic susceptibility.
- 4. Characterization and STM study of ZYX exfoliated graphite: We characterized ZYX exfoliated graphite (ZYX) by measuring the surface area and electrical resistivity as a function of density. It was observed with STM that ZYX has much larger single crystalline size ( $\approx 200$  nm) than that of Grafoil ( $\approx 10$  nm) which is a commonly used adsorption substrate at ultra low temperatures. Our results show that ZYX has reasonably large surface area and good thermal conductance to be used in heat capacity or NMR experiments of 2D <sup>3</sup>He samples at temperatures below 1 mK.
- 5. Construction of a high performance nuclear demagnetization refrigerator (NDR): We could greatly improve the performance of our newly constructed NDR. The lowest temperature we can reach is now 51  $\mu$ K. This is one of the four most powerful NDRs in the world.
- 6. Construction of a new ultra-low temperature scanning tunneling microscope (ULT-STM): We have finally succeeded in obtaining expected performances of a new versatile dilution refrigerator based ULT-STM which has been under construction in the last several years. It works at temperatures down to 30 mK, in magnetic fields up to 6 T and under ultra high vacuum (UHV) with an atomic resolution. It has wide applicability since one can transfer new samples, after surface preparation and characterization in UHV, keeping low temperature and UHV environments and can cool them to the lowest temperatures within 3 hrs.

## 20 Okamoto Group

**Research Subjects:** Experimental Condensed Matter Physics,

Low temperature electronic properties of two-dimensional systems.

Member: Tohru Okamoto and Yukio Kawano

We study low temperature electronic properties of two-dimensional systems formed in the semiconductor interfaces.

The current topics are following:

1. Magnetism in 2D electron solids and the Aharonov-Bohm effect:

We study 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. Experimental results on the magnetic field dependence of the thermal activation energy in Si-MOSFET's had been explained by a model based on this effect. In this year, we have extended our research to p-type GaAs 2D systems.

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 study magnetotransport in silicon two dimensional electron systems formed in Si-MOSFET's and Si/SiGe quantum wells at low temperatures.

3. Dynamics of nonequilibrium electrons in quantum Hall conductors:

Our studies aim at revealing local transport and optical properties of quantum Hall conductors by means of scanning probe techniques. The two following techniques have been applied: (i) Scanning near-field THz microscope Imaging of cyclotron radiation emitted from quantum Hall devices has made it possible to specify locations where the QHE breaks down. With this technique, we proceed research on electronic process relating to the QHE breakdown. (ii)Scanning electrometer We have developed a novel technique for obtaining high-resolution images of electrostatic potential distribution. This exploits gate effect for a quantum Hall device by a charged nano-probe.

4. Multi-subband electronic state of InAs surface inversion layers

We have investigated basic properties of multi-subband electronic state of InAs surface inversion layers. We found the in-plane effective mass in the first subband is larger than that in the second subband by a factor of 3.

## 21 Theoretical Astrophysics Group

**Research Subjects:** Particle Astrophysics, Relativistic Astrophysics, Physics of Supernovae and High Density Matter, Observational Cosmology

Member: Katsuhiko Sato, Yasushi Suto, Atsushi Taruya & Shigehiro Nagataki

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; Nuclear "pasta" in dense stars and its properties (2002)

Supernova Neutrinos: Their Relic Background and Resonant Spin-Flavor Conversion (2002)

Arrival Distribution of Ultra-High Energy Cosmic Rays and Implications for Their Source Candidates (2002)

Non-linear evolution of the cosmological large scale structure from the local collapse model (2002)

The Universe with Extra Dimensions — From Kaluza-Klein Perspective to Brane World (2001)

Gravitational Collapse of Rotating Massive Stars (2001)

Effects of Neutrino Oscillation on Supernova Neutrino (2001)

Resolving the Central Density Profile of Dark Matter Halos with Gravitational Lensing Statistics (2001) The Stability of Higher Dimensional Spacetime (2001)

Double inflation in supergravity and its observational implications (2000)

Propagation of UHECRs 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 Gravitationg 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)

Quantum creation of the universe with the inner space (1998)

## 22 Murao Group

#### **Research Subjects:** Quantum Information Theory

#### Member: Mio Murao

In our group, we are investigating new properties of multi-particle and multi-level entanglement and the use of these properties as resources for quantum information processing. M. Murao started working at University of Tokyo in October, 2001.

**Quantum information processing and entanglement:** Quantum information processing seeks to perform tasks which are impossible or not efficient with the use of conventional "classical" information, by using "quantum" information described by quantum mechanical states. Quantum computation, quantum cryptography, and quantum communication have been proposed and this new field of quantum information processing has developed rapidly especially over the last 10 years. Entanglement is nonlocal correlation appearing in certain types of quantum states (non-separable states) consisting of several subsystems. A non-separable state cannot be represented by a product state of constituent subsystems. Entanglement is sometimes called "quantum correlation", since it is genuine correlation of quantum systems and does not exist in classical systems. It has been considered as the fundamental resource for quantum information processing to be more effective than classical information processing. As the result of intensive study of entanglement (especially in the last 5 years), entanglement of bipartite two-level systems (two qubit systems) is now understood quite well. However, there are still many open questions regarding the entanglement of multiparticle and multi-level systems.

#### The current projects:

• The properties and applications of entanglement in discrete systems: We had proposed two quantum information processing schemes using multiparticle entanglement, remote quantum information distribution protocol [1] and remote quantum information concentration protocol [2]. We have analyzed the multiparticle entangled states used for these protocols and found new properties. In particular, the multiparticle entangled state used in [2] is a bound entangled state, which had previously been considered "useless" for quantum information processing as a single state. This is the first example of the effective use of a single bound entangled state for quantum information processing. Recently, we have shown that several different types of entangled states, including a single bound entangled state, can be used for remote quantum information concentration. This is in contrast to remote information distribution, which requires a certain type of entanglement. We have analyzed the asymmetry of quantum information distribution and concentration from the viewpoint of required entanglement. In the extreme case, encoding requires entanglement and global operations but decoding can be performed using only local operations and classical communications without any entanglement. This strong asymmetry may suggest the possibility of quantum "one-way function" in terms of entanglement. We are investigating a new quantum protocols using this quantum one-way function. A part of this work has been done in collaboration with Dr. V. Vedral of Imperial College, London.

[1] Mio Murao, Martin B. Plenio and Vlatko Vedral, Quantum-information distribution via entanglement, Phys. Rev. A 60, 032311 (2000).

[2] Mio Murao and Vlatko Vedral, Remote information concentration using a bound entangled state, Phys. Rev. Lett. 86, 352-355 (2001).

• The properties and applications of entanglement in photonic continuous variable systems: Photonic states are promising candidates for the realization of quantum information processing, especially for quantum communications. Teleportation experiments have been already demonstrated using two different types of entangled photonic states, a discrete variable (or finite dimensional) type like spin systems and a continuous variable (or infinite dimensional) type. We concentrate on the continuous variable type and are investigate how to perform effective discrete quantum communication using realistic entangled photonic continuous variable states, i.e. two mode finitely-squeezed entangled states. A part of this work is in collaboration with Prof. Sam Braunstein and Dr. Kae Nemoto of the University of Wales.

## 23 Kobayashi group

Research Subjects: Ultrafast and Nonlinear Optical Processes, Quantum Optics

Member: Takayoshi Kobayashi, Masakatsu Hirasawa, Takao Fuji, Akikatsu Ueki

### 1. Development of ultrashort pulse lasers

i. Generation of the shortest 3.9 fs visible pulses by noncollinear optical parametric amplifier (NOPA): We have demonstrated the generation of a continuous, simultaneously phase-matched 250-THz parametrically amplified spectrum. The resultant visible near-IR signal-wave pulses are compressed to a 3.9-fs duration with a flexible mirror.

ii. Novel crystals for NOPA Novel crystals of  $KABO(K_2Al_2B_2O_7)$  and  $CLBO(CsLiB_6O_{10})$  were evaluated for NOPA. They are promising for ultra-broadband amplification form infrared to visible frequency.

iii. Time evolution of super-broadbanded spectrum in a filament A mechanism of super-continuum generation has been studied with both experiment and numerical calculation. The results strongly suggest that stimulated Raman scattering contribute to filament formation and spectral broadening.

iv. Generation of Ultra-broadband THz light The bandwidth of THz light is limited by the temporal width of pump light. We have utilized sub-5-fs pulse to generate ultra-broadband THz light.

v. Controlling the carrier-envelope phase of ultrashort light pulses with optical parametric amplifiers: The phase link between signal, idler, and pump waves in a parametric interaction allows the generation of an idler pulse with a phase independent of that of the input pulse.

## 2. Real-time spectroscopy for the study of molecular vibration

**i.** J-aggregates: Pseudoisocyanine (PIC) molecules in concentration solutions form J-aggregates. Although PIC has been known to have week coupling system between electron and molecular vibration, temporal oscillation of transmittance due to molecular vibrations has been clearly observed. The observed modes are assigned to out-of-plane vibrations that contribute J-aggregate formation.

ii. Polydiacetylene: PDA-3BCMU (blue phase) derived from polydiacetylene is one of the  $\pi$ -conjugated polymers, where had been dispute about the excited state. This work determined the time scale of relaxation processes and demonstrated that the excited state of PDA-3BCMU is not entirely a butatriene-type structure.

iii. Green fluorescent protein (GFP): The GFP emits green fluorescence (500 nm) involving the proton transfer. In order to investigate the molecular dynamics of vibrations related to the proton transfer we have prepared the pump-prove experiment by a 400-nm femtosecond laser.

**iv. Tin phthalocyanine**: Tin phthalocyanine (SnPc) film evaporated on a substrate has been investigated by 5-fs ultrafast laser system. The SnPc film shows strong 2nd harmonics vibration of Pc macro-cycle breathing mode, which is originated from electronic excitation state (Q-band).

## 3. Electric field modulation spectroscopy with multi-channel lock-in amplifier:

We have developed new method of electric field modulation spectroscopy, where simultaneous measurements in spectrum saves time substantially and also makes it possible to investigate extensively.

#### 4. Quantum optics and quantum information

**i.** Photon-number squeezed state in a fiber: We have demonstrated numerically that the photonnumber squeezing in a optical fiber can be achieved with practicable parameters. The experiment is in progress.

**ii.** Non-locally coupled photon-pair generation: Optical parametric oscillator has been found to show a periodic pattern in two-photon correlation, which is a quite new feature of photon correlation.

**iii. Verification of two-photon correlation in frequency domain**: We have demonstrated that self parametric down conversion generates a pair of photons with quantum correlation in frequency domain. New applications of the novel correlation are under progress.

**iv.** Theoretical study of quantum teleportation: A coherent basis method have been developed to discuss the effects of non-ideal elements of the experimental conditions, such as inefficiencies of the Bell measurement, loss, and thermal noise in the nonlinear crystal used for producing entangled pairs.

**v.** Inter-atomic entanglement enhanced by an optical cavity: In a multi-mode optical cavity electric field have been found to enhance the degree of entanglement between the two atoms, which is possibly useful for quantum computation, teleportation, and cryptograpy.

## 24 Makishima Group

# **Research Subjects:** High Energy Astrophysics using Scientific Satellites, X-Ray Probing of the Universe, Development of Cosmic X-Ray/ $\gamma$ -Ray Instruments

#### Member: Kazuo Makishima, Motohide Kokubun

We study cosmic and solar high-energy phenomena in the X-ray and  $\gamma$ -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 Hard X-ray Telescope (HXT) onboard the *Yohkoh* mission launched in August 1991, and the Gas Imaging Spectrometer (GIS) for the *ASCA* mission launched in February 1993. We also developed 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 have hence started rebuilding the HXD as HXD-II.

**Solar and stellar flares:** Using *Yohkoh*, we have found that the wide-band spectral energy distribution of solar flares, ranging from soft X-rays to MeV gamma-rays, are controlled by four independent parameters; the overall flare size, the relative dominance of thermal signals, the spectral slope in hard X-rays, and the dominance of gamma-rays compared to hard X-rays. By analyzing the spectral and spatial data of the intense limb flare which occurred on 1998 August 18, we have identified three characteristic emission components, one emitted from top of the flaring magnetic loops, while the others from the loop foot-points. We also investigate stellar X-ray emission and stellar flares.

**Physics of 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 (~ 100  $M_{\odot}$ ), accreting, black holes [2]. In particular, we have discovered clear spectral state transitions from two such objects, 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.

We have discovered that the optically-thick accretion disk in black-hole binaries can take three characteristic states. They are (in the increasing order of accretion rate); a standard accretion disk, a standard disk strongly modified by Comptonization, and an optically-thick advection-dominated disk. Our analysis of the data of some Narrow-Line type 1 Seyfert galaxies suggest that they are in the same Compton-dominated state as described above.

**Particle Acceleration in the Inter-Stellar and Inter-Galactic Space:** Diffuse, probably non-thermal, X-ray emission has been detected from several galaxy groups, as well as from the entire region of our Galactic bulge. We have successfully detected three extended thermal X-ray components from the central region of M31. Their temperatures are 0.1, 0.3 and 0.9 keV.

We study particle and field energy densities in the lobes of radio galaxies, by comparing the synchrotron radio flux and the inverse-Compton X-ray flux. We have discovered that the particle energy density generally much exceed that in the magnetic field [3].

**Physics of Cluster of Galaxies:** We have developed a novel view of the cluster core region [1]. The ingredients are; hierarchical or scale-free dark-matter distribution; two-temperature plasma structure; metal escape from galaxies to the intra-cluster space; and magnetohydrodynamic energy transfer from galaxies to the intra-cluster plasma. The concept can provide a promising alternative to the cooling flow hypothesis that is becoming unrealistic

We have discovered that an elliptical galaxy NGC 1550 resides in a large-scale dark matter distribution, exhibiting a mass-to-light ratio as high as  $\sim 300$ . Thus, the object is a promising dark-cluster candidate.

- 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, 401 (2001)
- 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. 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)

## 25 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 hot and dense plasma, must be confined for a long enough time. A magnetic configuration called the tokamak has reached the level where an international burning plasma experiment is ready to be constructed. However, improvement of the cost-effectiveness of the fusion reactor is still necessary.

The spherical tokamak (ST) offers a promising approach to increasing the efficiency by raising the plasma  $\beta$  (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, and is being carried out in our group using the TST-2 spherical tokamak. TST-2 will be temporarily relocated to Kyushu University in 2003 to perform current drive experiments using the electron Bernstein wave (EBW) at 8.2 GHz. It will be relocated again to the new Kashiwa Campus by the end of academic year 2003.

#### Study of ST plasmas

A high temperature, high  $\beta$  plasma is a typical example of nonlinear complex system that exhibits interesting collective phenomena. A typical example of self-organization seen in the ST is an MHD phenomenon called the internal reconnection event (IRE). Plasma deforms and reaches a relaxed state by magnetic reconnection. As a result, particles and electron thermal energy are lost, but a large increase in the impurity ion temperature, typically from 100 eV to 400 eV, is observed.

ST plasmas have very high dielectric constants compared to conventional tokamaks. Therefore, methods to diagnose, heat and drive current using different waves, such as EBW and high harmonic fast wave (HHFW), must be developed. To detect EBW emission outside the plasma, EBW must be mode converted to an electromagnetic wave. A new diagnostic, combining a radiometer to measure the radiation and a reflectometer to determine the mode conversion efficiency, was developed. The central electron temperature of  $T_e \simeq 300 \text{ eV}$  has been deduced, consistent with  $T_e$  measured by soft X-ray pulse height analysis. A more direct method of measuring  $T_e$  by Thomson scattering of laser light is currently being developed. HHFW heating experiments have begun, with up to 200 kW of RF power injected from the antenna. A broadening of the frequency spectrum, most likely caused by scattering of HHFW by density fluctuations in the plasma edge region, has been observed.

#### Theory of electric field structural formation

A peaked structure in the radial electric field  $(E_r)$  profile is observed in plasma biasing experiments using electrodes. The  $E_r$  profile depends sensitively on plasma non-uniformities. Because the peak of the single-peak structure appears at the outermost peak location of a multiple-peak structure, measurement of the  $E_r$  structure can be used to estimate the shear viscosity.

#### Collaborations

An advanced tokamak plasma with high confinement and very high self-driven current fraction (over 90%) was obtained by RF and NB heating and current drive, combined with induction provided by vertical field and shaping coils, on the JT-60U tokamak (Japan Atomic Energy Researcg Institute). The "fishbone" current drive antenna has been developed for stability improvement, and particle fuelling and transport are being studied using an impurity pellet injector on the LHD helical device (National Institute for Fusion Science). Collaborations on the NSTX spherical tokamak (Princeton Plasma Physics Laboratory) on HHFW heating and EBW emission were carried out in 2002. A CS-less ramp-up experiment is being planned for the academic year 2003.

## 26 Tsubono Group

**Research Subjects:** Experimental Relativity, Experimental Gravitation, Gravitational Wave Physics, Laser Interferometer

Member: Kimio TSUBONO 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 1999. The achieved sensitivity,  $h \sim 3 \times 10^{-21}/\sqrt{\text{Hz}}$  at 700Hz to 1.5kHz, is sufficient to catch possible gravitational wave events in our galaxy. We can operate the detector for over 24 hours stably and continuously. This spring we performed 2-month data taking run and collected over 1,000 hours data. We are now analyzing the obtained data searching for the gravitational waves from coalescing binaries, supernovae and pulsars.

We summarize the subjects being studied in our group.

- Laser interferometric gravitational wave detectors
  - TAMA project
  - Search for burst gravitational waves
  - Search for gravitational waves from SN1987A
  - Suspension point interferometer for vibration isolation
  - Study of the next-generation laser interferometer
  - Space laser interferometer DECIGO
- Study of thermal noise
  - Direct measurement of the thermal noise
  - Numerical calculation method for the thermal noise
  - Study of the thermal noise in some metals
- Study of the precise measurement
  - Development of the low-frequency vibration isolation system (SAS)
  - New vibration isolation system using magnetic levitation
  - Study of passive damping using permanent magnets

#### references

- [1] M Ando and the TAMA collaboration, Current status of TAMA, Class. Quantum Grav. 19 (2002) 1409.
- [2] A Takamori, M Ando, A Bertolini, G Cella, R DeSalvo, M Fukushima, Y Iida, F Jacquier, S Kawamura, S Marka, Y Nishi, K Numata, V Sannibale, K Somiya, R Takahashi, H Tariq, K Tsubono, J Ugas, N Viboud, H Yamamoto, T Yoda and C Wang, Mirror suspension system for the TAMA SAS, Class. Quantum Grav. 19 (2002) 1615.
- [3] K Numata, S Otsuka, M Ando and K Tsubono, Intrinsic losses in various kinds of fused silica, Class. Quantum Grav. 19 (2002) 1697.

## 27 Sano Group

#### **Research Subjects:** Nonlinear Dynamics and Fluid Mechanics

#### Member: Masaki Sano and Yoshihiro Murayama

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 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

#### references

- H. Wada, Y. Murayama, and M. Sano: Model of Elastic Responses of Single DNA Molecules in Collapsing Transition, Phys. Rev. E 66, 061912 (2002)
- [2] Y. Murayama, Y. Sakamaki, and M. Sano: Elastic Response of Single DNA Molecules Exhibits a Reentrant Collapsing Transition, Phys. Rev. Lett. 90, 018102 (2003)
- [3] D. Yamada, T. Hondou, and M. Sano: Coherent Dynamics of an Asymmetric Particle in a Vertically Vibrating Bed: Phys. Rev. E 67, 040301(R) (2003)

## 28 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) ( ${}^{3}P_{1} - {}^{3}P_{0}$  492 GHz;  ${}^{3}P_{2} - {}^{3}P_{1}$  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  $\rho$  Oph, giant molecular clouds like Ori A, Ori B, M17, W3, DR21, NGC2264, NGC1333, and Rosette molecular cloud, infrared dark clouds, and translucent clouds. Total observing area is more than 40 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 a survey of the CI 492 lines over the Milky Way. From the result, we can study formation and evolution of molecular clouds in the galaxy scale. In September 2002, we have accomplished the first observation of the CI 492 GHz line with this telescope at the Pampa la Bola site (alt. 4800 m) in Chile.

Furthermore, we are developing a hot electron bolometer (HEB) mixer that can be used at 1.5 THz for a survey of the NII fine structure line. With the electron beam lithography system, we fabricated a diffusion cooled type HEB mixer using Nb as a superconductor material, and confirmed that this mixer shows a good response at 800 GHz.

We are also studying rotational spectra of transient molecules in the laboratory with the 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, the vinyl radical, the cyclopropyl radical have been detected. the FTMW spectrometer, which would be useful for the upper atmosphere chemistry.

- T. Oka, S. Yamamoto, M. Iwata, H. Maezawa, M. Ikeda, et al. "Atomic Carbon and CO Isotope Emission in the Vicinity of DR15", The Astrophysical Journal 558, 176 (2001)
- [2] M. Ikeda, T. Oka, K. Tatematsu, Y. Sekimoto, and S. Yamamoto, "The Distribution of Atomic Carbon in the Orion Giant Molecular Cloud", The Astrophysical Journal Supplement 139, 467 (2002)

## 29 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) Manipulation of neutral molecules based on the interaction between the strong nonresonant laser field and the induced dipole moment of the molecules. (2) Controlling quantum processes in atoms and molecules using shaped ultrafast laser pulses. (3) High-intensity laser physics typified by high-order nonlinear processes (ex. multiphoton ionization and high-order harmonic generation) and ultrafast phenomena in atoms and molecules. (4) Attosecond pulses generated with highorder harmonics and their reliable measurement. (5) Structures and dynamics of molecules studied by the laser induced Coulomb explosion. The summary of our research activities in the academic year of 2002 is as follows:

#### (1) Three-dimensional orientation of asymmetric top molecules using electrostatic and elliptically polarized laser fields

We have demonstrated three-dimensional orientation of asymmetric top molecules with the combination of electrostatic and elliptically polarized laser fields. We use 3,4-dibromothiophene as a sample molecule. The supersonic molecular beam is intersected by the orientation pulse (Nd:YAG,  $\lambda = 1064$  nm,  $\tau = 12$ ns,  $I \sim 3 \times 10^{12}$  W/cm<sup>2</sup>) and the probe pulse (Ti:sapphire,  $\lambda \sim 800$  nm,  $\tau \sim 50$  fs,  $I \sim 1.4 \times 10^{14}$ W/cm<sup>2</sup>) between the repeller and the extractor plates of the time-of-flight (TOF) mass spectrometer. The extraction field (1000 V/cm) of the TOF spectrometer serves also as the electrostatic field for the molecular orientation. The YAG pulse is elliptically polarized in order to achieve three-dimensional orientation. The 12-ns duration of the YAG pulse ensures that the orientation proceeds in the adiabatic regime. Threedimensional orientation is evidenced by performing two experiments. The degree of three-dimensional alignment is evaluated from the ion images observed with the major axis of the elliptical polarization parallel to the detector plane. The degree of orientation is measured from the TOF spectra obtained with the major axis perpendicular to the detector plane.

## (2) Optimal control of multiphoton processes in molecules with time-dependent polarization pulses

We have developed a closed-loop pulse shaping system with a spatial light modulator, where even a time-dependent polarization pulse can be generated and controlled. A time-dependent polarization pulse is demonstrated and characterized by a homemade POLLIWOG (POLarization Labeled by Interference versus Wavelength of Only a Glint) system. We apply the developed pulse shaping system to the active control of multiphoton ionization processes in *aligned*  $I_2$  molecules. We perform two kinds of control experiments. First we show the ability to selectively produce specific multiply-charged molecular ions. Second we investigate a correlation between a femtosecond time-dependent polarization pulse and the production efficiency of evenly- or oddly-charged molecular ions. We achieve much better controllability of the correlation with a time-dependent polarization pulse than with a pulse having a fixed ellipticity. Our experiments point to some new directions in optimal control studies with molecular systems.

## (3) Polarizability anisotropies of rare gas van der Waals dimers studied by laser-induced molecular alignment

The molecular alignment technique utilizing the interaction between the intense nonresonant laser field and the induced dipole moment is applied to the homonuclear rare gas dimers Rg<sub>2</sub> (Rg = Ar, Kr, and Xe). The degree of alignment is investigated by Coulomb exploding Rg<sub>2</sub> and by measuring the angular distributions of the fragment ions. At the same peak intensity of the laser field, the degree of alignment  $\ll \cos^2 \theta \gg$  becomes larger in order of Ar<sub>2</sub>, Kr<sub>2</sub>, and Xe<sub>2</sub>, reflecting the order of magnitudes of their polarizability anisotropy  $\Delta \alpha$ . By taking I<sub>2</sub> molecules as a reference,  $\Delta \alpha$  of Ar<sub>2</sub>, Kr<sub>2</sub>, and Xe<sub>2</sub> are estimated to be 0.5, 0.7, and 1.3 Å<sup>3</sup>, respectively.

- Hirofumi Sakai, Shinichirou Minemoto, Hiroshi Nanjo, Haruka Tanji, and Takayuki Suzuki, Phys. Rev. Lett. 90, 083001-1–083001-4 (2003).
- [2] Hirofumi Sakai, Jakob Juul Larsen, Ida Wendt-Larsen, Johannes Olesen, Paul B. Corkum, and Henrik Stapelfeldt, "Nonsequential double ionization of D<sub>2</sub> molecules with intense 20-fs pulses," to appear in Phys. Rev. A 67 (2003).
- [3] Shinichirou Minemoto, Hiroshi Nanjo, Haruka Tanji, Takayuki Suzuki, and Hirofumi Sakai, J. Chem. Phys. 118, 4052–4059 (2003).

## 30 Kuwajima Group

## **Research Subjects:** Protein Folding, Molecular Chaperones, Protein Stability, Physicochemical Studies of Biological Macromolecules

#### Member: Kunihiro Kuwajima, Kaname Mogami, & Kimiko Saeki

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.

We have studied the ATP-induced allosteric structural transition of GroEL using small angle X-ray scattering and fluorescence spectroscopy, and the kinetics of the transition of GroEL induced by ATP have been observed directly by stopped-flow X-ray scattering for the first time. The ATP-induced fluorescence kinetics at various ATP concentrations (< 400  $\mu$ M) occur before ATP hydrolysis by GroEL takes place and are well explained by a kinetic allosteric model, which is a combination of the conventional transition state theory and the Monod-Wyman-Changeux model, and we have successfully evaluated the equilibrium and kinetic parameters of the allosteric transition, including the binding constant of ATP in the transition state of GroEL.

The folding mechanism of proline-free staphylococcal nuclease (SNase (pro-)) was investigated using the double-jump stopped-flow methods (interrupted refolding, and interrupted unfolding). We have found that there are at least two accessible pathways on the free energy landscape of SNase (pro-) folding, starting from a macroscopically single unfolded-state ensemble. Our results suggest that multiple parallel-pathway folding of a protein that has a unique amino acid sequence is more general than previously expected.

- T. Inobe, M. Arai, M. Nakao, K. Ito, K. Kamagata, T. Makio, Y. Amemiya, H. Kihara, and K. Kuwajima: Equilibrium and kinetics of the allosteric transition of GroEL studied by solution X-ray scattering and fluorescence spectroscopy. J. Mol. Biol. **327** (2003) 183-191.
- [2] M. Arai, T. Inobe, K. Maki, T. Ikura, H. Kihara, Y. Amemiya, and K. Kuwajima: Denaturation and reassembly of chaperonin GroEL studied by solution X-ray scattering. Protein Sci. 12 (2003) 672-680.
- [3] T. Inobe, K. Kikushima, T. Makio, M. Arai, and K. Kuwajima: The Allosteric transition of GroEL induced by metal fluoride-ADP complexes. J. Mol. Biol. **329** (2003) 121-134.
- [4] M. Nakao, M. Arai, T. Koshiba, K. Nitta, and K. Kuwajima: Folding mechanism of canine milk lysozyme studied by circular dichroism and fluorescence spectroscopy. Spectroscopy–Int. J. 17 (2003) 183-193.
- [5] K. Kamagata, and K. Kuwajima: Parallel folding pathway of proline-free staphylococcal nuclease studied by the stopped-flow double-jump method. Spectroscopy–Int. J. **17** (2003) 203-212.

## 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 adopted 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. Role of postsynaptic CaMKII on synaptogenesis

During synaptogenesis, synaptic proteins are rapidly assembled into both pre- and postsynaptic sites that are capable of high fidelity transmission. Interaction between the presynaptic neuron and its postsynaptic target cell(s) is essential for the development of synapses. To elucidate the role of postsynaptic cells in synaptogenesis, activity of calcium/calmodulin-dependent protein kinase II (CaMKII) was manipulated specifically in the postsynaptic cell using GAL4-UAS expression system and its effect on the synapse formation at developing Drosophila neuromuscular junction was examined. Together with the investigation into localization of synaptic maturation in function and morphology. We propose two significant functions of postsynaptic CaMKII during synaptogenesis - retrograde modulation of presynaptic properties and coordinated regulation of pre- and postsynaptic maturation. We are also investigating the effect of postsynaptic CaMKII modification on the synaptic response at different developmental stages.

 $\mathbf{III}$ 

# 2002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 電磁気学 I: 櫻井 博儀

- 1. 特殊相対論
- 1.1 相対性原理
- 1.2 ローレンツ変換
- **1.3** 速度の変換
- 1.4 時空間の幾何学と時空のダイアグラム
- 1.5 固有時間と時間の遅れ
- 1.6 ローレンツ収縮
- 1.7 相対論的エネルギーと運動量
- 1.8 エネルギーと運動量のローレンツ変換と保存則
- 2. 電磁気学と特殊相対論
- 2.1 4元ベクトルとテンソル
- 2.2 連続の方程式と4元電流
- 2.3 4元ポテンシャルとローレンツゲージ
- 2.4 一定速度で運動する点電荷がつくる電磁場
- 2.5 場の4次元表示
- 2.6 場のエネルギーと運動量(ポインティングの定理、 ポインティングベクトル、マクスウェルの応力テン ソル)

## 1.1.2 解析力学·量子力学I: 相原 博昭

- 1. ラグランジアン力学
- 1.1 仮想仕事とダランベ ルの原理
- 1.2 一般化速度と一般化力
- 1.3 一般化座標と一般化速度の関数としての運動エネルギー
- 1.4 ラグランジアン
- 1.5 ハミルトニアン
- 1.6 正準共役運動量
- 1.7 例題
- 1.8 等価なラグランジアン
- 1.9 ポテンシャルが速度に依存する場合
- 1.10 連続体のラグランジアン
- 2. 変分原理とラグランジアン力学
- 2.1 オイラ 方程式
- 2.2 ハミルトンの原理
- 2.3 ラグランジュの未定係数法
- 2.4 ホロノミックな束縛条件を未定係数法で解く
- 2.5 非ホロノミックな束縛条件への応用

- 電磁場内の電荷の運動
   3.1 場の中の粒子の運動方程式
   3.2 一様な静電場中の運動
   3.3 一様な静電場中の運動
   3.4 一様な静電磁場中の運動
   3.5 電磁場のラグランジアン
   3.6 エネルギーと運動量の保存則
   3.7 点電荷の自己エネルギー
   4.静電磁場の境界値問題
   4.1 ラプラス、ポアソン方程式
   4.2 グリーンの定理
   4.3 ラプラス、ポアソン方程式の解の唯一性
   4.4 グリーン関数の方法
   4.5 鏡像法
   4.6 3次元ラプラス方程式の解
- 4.7 グリーン関数の固有関数系による展開
- 4.8 多重極展開
- 4.9 磁気モーメント
- 3. ネーターの定理とハミルトニアン力学 3.1 角運動量と回転対称性 3.2 ネーターの定理 3.3 ハミルトン力学とルジャンドル変換 3.4 位相空間とリュービルの定理 4. 正準変換 4.1 正準変換 4.2 ポアソン括弧 5. ハミルトン・ヤコビ方程式 5.1 ハミルトン・ヤコビ方程式 **5.2** 作用変数と角変数 5.3 断熱不変量 5.4 量子仮説 6. 量子力学 6.1 ド・ブロイの物質波とシュレーディンガー方程式 6.2 ハミルトンの原理とシュレーディンガー方程式 6.3 シュレーディンガー方程式 6.4 確率解釈
- 6.5 規格化

- 6.6 運動量
  6.7 不確定性原理
  7.時間に依存しないシュレーディンガー方程式と1次元系
  7.1 定常状態
  7.2 井戸型ポテンシャル
  7.3 調和振動子
  7.4 自由粒子
  7.5 デルタ関数ポテンシャル
  7.6 有限な高さと幅の井戸型ポテンシャル
  7.7 散乱行列
- 1.1.3 物理数学 I: 村尾 美緒
- 1. Complex analysis
- 1.1 Complex numbers
- 1.2 Derivative and analytic functions
- 1.3 Geometry of analytic functions
- **1.4** Basic complex functions
- **1.5** Complex integration
- 1.6 Series
- 1.7 Laurant series and Residue theorem

### 1.1.4 物理実験学: 長谷川修司、桑島邦博

#### 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
- 4. 実験の基礎
- 1.2 3年生 夏学期
- 1.2.1 光学:小林孝嘉
- 光の基本的性質 波長・波数・波動ベクトル・光速・位相速度・群速 度・分散・平面波・球面波・偏光
- 2. 反射
   反射率・全反射、屈折: Snell の法則・屈折率・複
   屈折
- 3. 干涉

- 8. 量子力学の定式化
- 8.1 線形代数の復習
- 8.2 関数空間
- 8.3 量子力学の基本原理
- 8.4 時間発展演算子
- 8.5 シュレーディンガー表示とハイゼンベルグ表示
- 8.6 不確定性原理の一般形
- 9. 補足
- 9.1 電磁場中の荷電粒子のシュレーディンガー方程式

#### 2. Differential equations

- 2.1 Lipschitz condition
- **2.2** Elementary methods for differential equations (Quadrature)
- 2.3 Second order linear differential equations
- 3. Fourier analysis and Laplace transforms
- **3.1** Fourier analysis
- 3.2 Laplace transforms
- 4.1 真空
  4.2 低温・高温
  5. 誤差論
  5.1 測定と誤差の分類
  5.2 誤差関数
  5.3 特殊誤差と誤差伝播の法則
  5.4 最小二乗法
  5.5 間接測定における最小二乗法

可視度・等厚干渉・等傾干渉、種々の干渉計

- 4. 回折 回折現象、Fraunhofer 回折・Fresnel 回折
- 5. 最先端の研究 フォトニック結晶、超光速(スーパールミナル)光、 サブルミナル光

## 1.2.2 量子力学 II: 小形正男

1.3次元のシュレディンガー方程式

1.1 平面波の復習と極座標 1.2 角運動量 1.3 球面調和関数 1.4 動径方向のシュレディンガー方程式 1.5 昇降演算子 2. スピンと角運動量 2.1 スピン **2.2** 磁場中の運動 2.3 角運動量の合成 3. 摂動論 3.1 時間に依存しない摂動 3.2 縮退のある場合 3.3 時間に依存する摂動 3.4 フェルミの Golden rule 4. 準古典近似 4.1 ħ 展開

#### 1.2.3 物理数学 II : 松尾 泰

- 1. 常微分方程式の復習
   1.1 解の存在定理
   1.2 線形常微分方程式と Wronskian の方法
   2. 確定特異点型微分方程式
   2.1 正則点周りの級数解
   2.2 確定特異点周りの級数解
   2.3 超幾何関数
   2.4 合流型超幾何関数
   3.直交多項式の一般論
   3.1 直交性を用いた多項式の定義
   3.2 Rodrigues の公式
   3.3 微分方程式
   3.4 規格化
- 3.5 漸化式

1.2.4 現代実験物理学I:樽茶清悟、福山寛、能瀬聡直

- 1. 物性実験学(樽茶、福山)
- 1.1 序論
- 物質の多様性 歴史的な物性実験 1.2 物質設計と製法
- 単結晶育成、薄膜形成、表面微細加工 1.3 実験環境の実現
  - 真空、低温、強磁場、高圧
- 1.4 種々の物性測定法
  - 回折法、顕微法、電気測定、光電子分光、熱測定、 磁気測定 教育用実験設備見学(原子間力顕微鏡、透過形電子 顕微鏡、超短パルスレーザ)

- 4.2 Bohr-Sommerfeld の量子化
  4.3 調和振動子の場合
  4.4 ポテンシャル障壁
  4.5 Double Well potential
  5. 量子力学における対称性
  5.1 対称性とは
  5.2 全運動量とエネルギー保存
  5.3 無限小回転の演算子
  5.4 その他の対称性
  5.5 時間反転対称性
  6. 磁場中の運動
  6.1 ハミルトニアン
  6.2 ランダウレヴェル
- 6.3 古典論との対応
- 6.4 ゲージ対称性
- おまけ.ファインマンの経路積分による量子力学
- 3.6 母関数
  4. 球関数
  4.1 Legendre 陪関数、第2種 Legendre 関数
  4.2 球面調和関数
  4.3 回転群の表現
  5. Bessel 関数
  5.1 母関数と微分方程式
  5.2 漸近展開
  5.3 直交性
  6. 偏微分方程式論
  6.1 物理学に現れる偏微分方程式とその分類
  6.2 初期条件と Cauchy 問題
  - **6.3** Green 関数の方法
- 1.5 最先端の物性実験 メゾスコピック系、量子計算、超伝導・超流動、他
- 2. 生物物理実験学(能瀬)
- 2.1 生物物理学概論
- 2.2 細胞の解析法 種々の顕微鏡による観察法、細胞成分の分画、タン パク質分子の分離
- 2.3 遺伝子の解析法
   制限酵素、遺伝子クローニング、PCR、遺伝子工学

#### 1.2.5 電磁気学 II : 高瀬 雄一

1. Maxwell 方程式	4.2 電磁場の拡散
1.1 微視的描像と巨視的描像	4.3 表皮効果
1.2 電磁場とポテンシャル	4.4 渦電流
2. 静電場	5. 電磁場の保存則
2.1 誘電体	5.1 Poynting の定理
2.2 境界値問題の解法	5.2 インピーダンス
<b>2.3</b> Laplace 方程式の一般解	
<b>2.4</b> Green 関数	
3. 静磁場	<b>0.1 </b>
3.1 磁性体	<b>6.2</b> 分散と吸収
3.2 境界値問題の解法	6.3 プラズマ中の波動
3.3 強磁性体	6.4 群速度
4. 準静的問題	<b>6.5</b> 波束の拡散
4.1 電磁誘導	6.6 因果律

### 1.2.6 生物物理学:桑島邦博、能瀬聡直

- 1. 序
- 1.1 蛋白質·核酸の構造
- **1.2 遺伝情報の流れ**
- 1.3 エネルギーの流れ
- 1.4 酸,塩基,緩衝液
- 3. 蛋白質
   生命現象における蛋白質の役割,蛋白質のフォール ディング問題
- 3. 蛋白質の化学構造と立体構造
- 3.1 アミノ酸の特性と蛋白質の化学構造
- 3.2 蛋白質の立体構造
- 4. 蛋白質立体構造の安定化因子
- 4.1静電相互作用 , van der Waals 相互作用 , 水素結合
- 4.2 水の性質と疎水性相互作用
- 4.3 電解質溶液中での静電相互作用
- 5. 蛋白質の熱力学的安定性 蛋白質のアンフォールディング転移,二状態モデル

## 1.2.7 統計力学 I : 藤川和男

- 1. 熱力学の復習
- 1.1 熱力学の第一,第二および第三法則
- **1.2 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. 統計力学の基礎概念としてのエントロピー
- 2.1 等重率と Boltzmann のエントロピーの公式
- 2.2 Shannon の推定の理論とエントロピー
- 2.3 Gibbs のアンサンブル理論
- 2.4 正準集団と熱力学との関連,揺らぎの一般論
- 3. 理想 Bose-Einstein 気体, 理想 Fermi-Dirac 気体

6.個体発生の分子機構
6.1 細胞の多様性の生成機構
6.2 遺伝子発現の調節機構
6.3 位置情報
6.3 位置情報
6.4 形態形成
7.脳・神経系の形成機構
7.1 神経系の領域化
7.2 神経細胞の分化
7.3 神経ネットワーク形成機構
8.神経系における信号の生成と伝達機構
8.1 静止電位
8.2 活動電位
8.3 シナプス伝達

- 9. 記憶の分子機構
  - および理想 Boltzmann 気体の一般論
- 4. 理想 Boltzmann 気体 (Maxwell-Boltzmann 分布) の概要
- 4.1 理想 Boltzmann 気体
- 4.2 格子点に固定された原子の統計力学
- 5. 理想 Bose-Einstein 気体の概要
- 5.1 Planck の公式
- 5.2 Bose-Einstein 凝縮
- 6. 理想 Fermi-Dirac 気体の概要
  - 6.1 理想 Fermi-Dirac 気体

- 6.2 縮退した Fermi-Dirac 気体
- 7. 統計力学の基礎づけの試み
- 7.1 密度行列と von Neumann のエントロピー
- 7.2 時間反転不変性とエントロピー増大則
- **7.3** Master 方程式

1.3 3年生 冬学期

### 1.3.1 電気力学: 坪野 公夫

- 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

#### 1.3.2 物質科学基礎: 藤森 淳

- 原子の電子状態
   1.1 水素原子 波動関数とエネルギー固有値 スピンと Zeeman 効果
   1.2 原子軌道 結晶場分裂 混成軌道
   1.3 多電子原子 Hartree-Fock 近似 多重項分裂
  - 多重項理論
- 1.4 周期律表
- 2. 分子の電子状態

#### 1.3.3 現代実験物理学 II : 蓑輪 眞・早野龍五

実験の基礎知識
 1.1 誤差と統計処理の方法
 1.2 衝突の運動学と関連する話題
 1.3 対数グラフと物理現象
 1.4 減衰振動と強制振動の物理
 1.5 同軸ケーブルとその他の伝送線
 1.6 コンピュータのハードウェア
 1.7 物理量測定装置
 1.8 測定論

- 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
- 2.1 Heitler-London 法 水素分子 多原子分子への拡張:共鳴原子価状態似 電荷移動の効果 スピン自由度
  2.2 分子軌道法 Hartree-Fock 近似 原子軌道線型結合近似 多原子分子への拡張 配置間相互作用の効果
  3. 原子・分子から凝縮系へ
  3.1 Hubbard モデル
  3.2 絶縁体、半導体、金属
- 基本的概念
   2.1 次元と単位
   2.2 粒子運動の相対論的扱い
   2.3 断面積
   2.4 崩壊寿命とエネルギー幅
   素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. 粒子加速器
 4.1 静電加速器
 4.2 サイクロトロン
 4.3 シンクロトロン、衝突型加速器
 5. 粒子検出器

## 1.3.4 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 星型作用素
- 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、対称操作、点群、空間群、結晶群

#### 1.3.5 量子力学 III : 初田哲男

1. 散乱の量子論
 1.1 1次元の散乱問題と3次元への拡張
 1.2 波束の散乱と微分断面積
 1.3 部分波振幅と位相差解析
 1.4 剛体球と井戸型ポテンシャルによる散乱
 1.5 S行列と光学定理
 1.6 ボルン展開
 1.7 低エネルギー散乱と有効距離理論
 1.8 低エネルギー共鳴
 1.9 高エネルギー散乱とアイコナール近似

## 1.3.6 流体力学: 佐野 雅己

 流体と流体力学
 流体運動の例
 2 巨視的運動と微視的運動
 3 流体力学の広がり
 2. 流体運動の記述と運動方程式
 2.1 オイラー的記述とラグランジュ的記述
 2.2 変形体に作用する力、応力、ひずみ速度
 2.3 流体の運動に伴う変形
 2.4 保存方程式 質量保存、運動量保存、エネルギー保存
 2.5 Navier-Stokes 方程式の性質と対称性
 3.完全流体モデルと運動方程式
 3.1 ベルヌーイの諸定理、ケルビンの循環定理

- 5.1 種々の測定器とその原理
- 5.2 粒子識別、4元運動量の測定
- 5.3 歴史的に重要な実験およびその原理(含 Kamiokande)
- 2.2 群論の基本的概念 部分群、共役群、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、シュールの定理、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、基底関数の構成
   2.5 リー群
- リー群、リー代数、半単純リー代数の分類、デイン キン図形
- 1.10 回折散乱
   2. 多粒子系の量子論
   2.1 波動関数の対称性と統計
   2.2 同種粒子系と交換縮退
   2.3 第二量子化と生成・消滅演算子
   2.4 場の演算子
   2.5 多粒子系における2粒子相関
   2.6 多電子系のハートリー・フォック近似
- 2.7 多電子原子の構造
- 3.2 ポテンシャル流
   3.3 2次元ポテンシャル流
  - 複素速度ポテンシャル、Kutta-Joukowskiの定理
- 4. 渦運動
- 4.1 渦度と渦糸
- 4.2 渦糸群の運動
- 5. 粘性流体の運動
- 5.1 Reynolds の相似則
- 5.2 様々な粘性流
- 5.3 境界層
- 6. 流れの安定性
- 6.1 安定性理論、分岐
- 6.2 レーリー・ベナール対流とカオスへの遷移

1.3.7 統計力学 II : 青木 秀夫

- 1. 相転移
- 1.1 秩序パラメータと対称性の破れ
- 1.2 二次相転移とギンツブルグ・ランダウ理論

1.4.1 素粒子物理学 : 駒宮 幸男

- 2. 相互作用系の統計力学
- 2.1 多体問題 スピン系と電子系
   2.2 平均場近似

- **2.3** Bose 気体と Fermi 気体(ボーズ凝縮、フェルミ縮退、 超伝導)
- 3. 非平衡統計力学への序論
- 3.1 輸送現象(ボルツマン方程式)
- 3.2 線形応答理論

## 1.4 4年生 夏学期

1. 概要	5. 強い相互作用
1.1 自然界のスケールと自然単位	5.1 カラーの自由度
1.2 素粒子と複合粒子の種類	<b>5.2</b> QCD
1.3 相互作用の種類	6. 弱い相互作用
2. 相対論的運動学	6.1 ベータ崩壊
2.1 ローレンツ変換と重心系	6.2 WボゾンとZボゾン
2.2 粒子の衝突と崩壊の運動学	6.3 ニュートリノ
3. 素粒子実験の基礎	6.4 CP非保存
3.1 物質中での粒子の振舞	7. 統一ゲージ理論
<b>3.2</b> 粒子検出器	7.1 ゲージ対称性
4. 電磁相互作用	7.2 ヒッグスボゾン
4.1 ディラック方程式	7.3 電弱統一理論
4.2 ディラック・スピノルの性質	8. 標準理論を越えて
4.3 ファインマン・ダイアグラム	8.1 大統一と超対称性
4.4 散乱断面積	8.2 LHCとリニアコライダー

#### 1.4.2 原子核物理学: 大塚孝治・酒井 英行

- 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 ハイゼンベルグの谷とベータ崩壊
- 3. 核力と中間子

3.1 二核子系とアイソスピン3.2 湯川中間子理論3.3 ダイバリオン状態と三体力

4. 重陽子

4.1 磁気モーメントと四重極モーメント4.2 テンソル力と D 状態

5. アルファ崩壊、ベータ崩壊、ガンマ崩壊
 6. 魔法数と殻模型
 7. 原子核のハートリー・フォック理論
 8. 原子核の集団運動
 8.1 回転運動モデル
 8.2 振動モデル
 9. 核反応と巨大共鳴
 9.1 和則
 9.2 電気双極巨大共鳴と TDA
 9.3 ガモフテラー巨大共鳴とクオーク自由度
 10. 最近の話題
 10.1 不安定核現象
 10.2 天体核物理
#### 1.4.3 固体物理学I:常行 真司

結晶の対称性
 1.1 並進対称性
 1.2 単位格子
 1.3 7個の結晶系
 1.4 14個のブラベー格子
 1.5 結晶の方位と面
 周期系と波の回折
 2.1 回折の一般論
 2.2 逆格子
 2.3 周期系の散乱条件
 2.4 ブラッグの法則とラウエ条件
 2.5 ブリリュアン・ゾーン

# 1.4.4 場の量子論:江口 徹

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 伝搬関数
 2.4 スピノル場の量子化

#### 1.4.5 プラズマ物理学: 江尻 晶

1. 様々なプラズマ 1.1 実験室のプラズマ 1.2 自然界のプラズマ 1.3 Debye 遮蔽 1.4 プラズマ振動 2. 単一粒子の軌道 2.1 Larmor 運動 (Cyclotron 運動) 2.2 各種のドリフト 2.3 ミラー磁場と断熱不変量 2.4 種々の磁場配位と粒子軌道 **3.** 衝突と拡散 3.1 衝突時間 3.2 電気抵抗 3.3 拡散方程式と random walk 3.4 拡散係数と閉じ込め時間 4. 電磁流体としてのプラズマ

### 1.4.6 量子光学:酒井広文

1. 原子と放射の相互作用

- 2.6 構造因子
   3. 凝集機構による固体の分類
   3.1 5種類の結合様式
   3.2 分子結合
   3.3 イオン結合
   3.4 共有結合
   4. 固体の電子状態とバンド構造
   4.1 自由フェルミ気体
   4.2 周期系の波動関数とブロッホの定理
   4.3 強束縛近似
- 4.4 金属、半導体
- 2.5 ウィックの定理
   3. 共変的摂動論
   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
   4. ゲージ理論
- 4.1 ヤン・ミルズ理論の考え方
- 4.1 電磁流体方程式 4.2 MHD 方程式 4.3 抵抗の役割 4.4 MHD 発電, MHD 加速 5. 平衡と安定性 5.1 円柱プラズマの平衡 **5.2** 不安定性の分類 5.3 不安定性の直感的な説明 5.4 交換不安定性の成長率 6. プラズマ中の波 **6.1 波動の分類** 6.2 冷たいプラズマの分散式 6.3 波動方程式と分散式の関係 6.4 カットオフと共鳴 6.5 カットオフと共鳴の応用 6.6 R波L波, O波X波

1.1 時間に依存する Schrödinger 方程式

1.2 相互作用ハミルトニアン 1.3 遷移速度 1.4 B 係数の表式 **1.5** 光学 Bloch 方程式 1.6 Rabi 振動 1.7 放射広がり 1.8 飽和広がり **1.9** 放射減衰を伴う Rabi 振動 1.10 衝突広がり 1.11 Doppler 広がり **1.12** 合成吸収線の形状 2. 電磁場の量子化 2.1 古典電磁場のポテンシャル論 2.2 Coulomb ゲージ 2.3 自由古典場 2.4 量子力学的調和振動子 **2.5** 場の量子化 **2.6** 場の交換の性質 2.7 零点エネルギー 2.8 モード 位相演算子 2.9 単一モード 個数状態の物理的性質 2.10 コヒーレント光子状態 2.11 単一モードコヒーレント状態の物理的性質

#### 1.4.7 一般相対論: 佐藤勝彦

- 1. 特殊相対論
- 1.1 マイケルソン・モーレイの実験
- 1.2 ローレンツ変換と物理法則の共変形式
- 1.3 相対論における時間
- 2. 等価原理
- 3. リーマン幾何学
- 3.1 一般座標変換とスカラー、ベクトル、テンソル
- 3.2 共変微分
- 3.3 曲率
- 4. 物理法則の一般共変形式
- 4.1 電磁相互作用の共変形式
- 4.2 エネルギー・モーメンタムテンソル

# 1.5 4年生冬学期

#### 1.5.1 化学物理学 : 山本 智

原子の電子状態とスペクトル
 1.1 水素原子とアルカリ原子
 1.2 ヘリウム原子:多電子系への第一歩
 1.3 HF-SCF法

2.13 純粋状態に対する密度演算子 2.14 放射場の統計的混合状態 3. 量子化した場と原子との相互作用 3.1 原子の多極モーメント 3.2 多極相互作用ハミルトニアン 3.3 電気双極子近似 3.4 原子ハミルトニアンの第2量子化 3.5 光子の吸収速度と放出速度 3.6 光電効果による電子の放出速度 3.7 光子強度演算子 4. レーザーの基礎 4.1 光共振器のモード 4.2 光共振器の安定性 4.3 発振条件 4.4 波動方程式に基づくレーザー理論 4.5 定常状態におけるレーザー発振 4.6 各種のレーザー 4.6.1 3準位レーザーと4準位レーザー 4.6.2 固体レーザー 4.6.3 気体レーザー

2.12 放射密度演算子

4.6.4 色素レーザー

4.6.5 半導体レーザー

245

- 4.3 アインシュタイン方程式
  5. 相対論的宇宙論
  5.1 フリードマン宇宙モデル
  5.2 宇宙論的観測と標準ビッグバンモデル
  5.3 インフレーションと宇宙の創生論
  6. シュワルツシルドの球対称真空解
  6.1 シュワルツシルド解
  6.2 粒子の運動
  6.3 光の折れ曲がりと重力レンズ
  7. 高密度天体
- **7.1** 一般相対論的星の重力平衡 TOV 方程式
- 8. ブラックホール、ホワイトホール、ワームホール

1.4 LS 結合と jj 結合 2. 分子の対称性と群論 2.1 点群

2.2 対称操作の行列表現

**2.3** 規約表現の性質 3.5 近似的分子軌道法 2.4 分子振動の分類、電子状態の分類 3.6 化学反応への応用 3. 分子の電子状態 4. 分子分光学の初歩 3.1 水素分子 3.2 分子軌道法の考え方 4.2 振動スペクトル 3.3 二原子分子の電子状態 4.3 振動回転相互作用 3.4 非経験的分子軌道法 4.4 電子スペクトル

#### 1.5.2 物理学特別講義 II : 桑島 邦博

1. 生体高分子溶液の熱力学・統計力学 **1.1** Gibbs 自由エネルギーと化学ポテンシャル 1.2 化学平衡 1.3 分配関数 2. 生体高分子のリガンド平衡 2.1 リガンド 結合 2.2 Scatchard プロット 2.3 Hill 定数 3. 生体高分子の酸-塩基平衡と静電自由エネルギー 3.1 酸-塩基平衡 3.2 解離基間相互作用 3.3 Debye-Hückel の理論 4. 鎖状高分子の統計的性質 4.1 末端間距離と回転半径 4.2 ランダムフライト鎖 4.3 非摂動鎖と実在鎖 4.4 生体高分子 5. 蛋白質のアロステリック転移

5.1 生体高分子の協同現象

4.1 直線分子の回転スペクトル

5.2 アロステリック転移 5.3 MWC モデルと KNF モデル 4.4 アロステリック転移の実例 6. ポリペプチドと蛋白質の二次構造転移 6.1 ヘリックス - コイル転移 **6.2** *α* ヘリックスのキャッピング相互作用 **6.3** β 構造転移 7. 蛋白質のアンフォールディング転移 7.1 アンフォールディング転移 7.2 蛋白質の熱転移 8. 化学反応速度論 8.1 反応速度式 8.2 Arrhenius の式と活性化エネルギー 8.2 遷移状態説 9. 蛋白質のフォールディング 9.1 フォールディング中間体 9.2 フォールディング速度論と遷移状態

- 9.2 值解析法
- 10. 酵素反応速度論

#### 宇宙物理学: 牧島一夫 $(\S1 - \S4)$ 、須藤 靖 $(\S5 - \S8)$ 1.5.3

1. Newton 力学の復習 **1.1** Newton の重力の法則 1.2 ブラックホール 1.3 自己重力系 1.4 Hubble 定数と臨界密度 1.5 運動方程式と状態方程式 2. 電磁放射 2.1 黒体放射 2.2 黒体放射の概念の応用 2.3 光子ガスの熱力学 2.4 宇宙マイクロ波背景放射 **3.** 星の物理学 **3.1 星の熱力学** 3.2 星のパラメータスケーリング 3.3 星の内部の熱核融合 3.4 宇宙と重元素:元素合成の3つの現場

4. 星の進化と終末
4.1 大質量星の進化
4.2 重力崩壊型の超新星爆発
4.3 電子縮退した星:白色わい星
4.4 核子が縮退した星:中性子星
5. 宇宙と自然の階層
5.1 宇宙物理学とは何か
5.2 宇宙物理学研究の存在価値
5.3 五行説と惑星:物質の階層と宇宙の階層
5.4 宇宙の階層
6. 膨張宇宙と宇宙論パラメータ
6.1 一様等方宇宙モデル
6.2 アインシュタイン方程式からフリードマン方程式へ
6.3 宇宙の状態方程式
6.4 宇宙論パラメータ

6.5 アインシュタイン・ドジッター宇宙モデル
6.6 宇宙の膨張則:宇宙はやがて収縮するか?
7. 宇宙の熱史
7.1 輻射優勢期におけるフリードマン方程式
7.2 素粒子と宇宙の熱史
7.3 輻射優勢期における宇宙の温度の進化
7.4 粒子数の凍結

#### 1.5.4 固体物理学 II : 岡本 徹

- 1. 格子振動と比熱 1.1 結晶中の格子振動 1.2 格子振動の量子化 1.3 格子比熱 1.4 Debye 近似 2. 金属中の伝導電子 2.1 自由電子モデル 2.2 伝導電子の比熱 2.3 Boltzmann 方程式と電気伝導 2.4 散乱機構 2.5 熱電効果 2.6 熱伝導と Wiedemann-Franz 則 3. 半導体における電気伝導 3.1 半導体と不純物ドーピング 3.2 バンド構造と有効質量 3.3 正孔、Hall 効果 3.4 半導体デバイス ダイオード、トランジスター、レーザー 4. 低次元電子系の量子現象
- 4.1 量子ホール効果
- 4.2 メゾクコピック伝導

7.5 宇宙背景ニュートリノ

- 8. ビッグバン宇宙での軽元素合成: from  $\alpha\beta\gamma$  to XYZ
- 8.1 元素の存在量 (X, Y, Z)
- 8.2 元素合成の場所: 恒星内部 vs. 初期宇宙
- 8.3 軽元素の起源: the first three minutes  $\alpha\beta\gamma$  理論 –
- 8.4 軽元素存在量のパラメータ依存性
- 8.5 軽元素存在量の観測値と宇宙のバリオン密度

#### 4.3 Peierls 転移

- 5. 磁性
- 5.1 磁性の起源
- 5.2 局在モーメントの常磁性
- 5.3 交換相互作用
- 5.4 Heisenberg 模型
- 5.5 分子場近似、スピン波
- 5.6 伝導電子の強磁性
- 5.7 磁気異方性と磁化曲線
- 5.8 磁性デバイス
- 6. 超伝導と超流動
- **6.1** 超伝導、Meissner 効果
- 6.2 London 方程式
- 6.3 BCS理論
- **6.4 磁束の量子化**
- 6.5 臨界磁場
- 6.4 磁束の量子化
- 6.5 Josephson 効果
- 6.6 銅酸化物超伝導体など
- 6.7 液体ヘリウムの超流動

# 2 各賞受賞者紹介

#### 2.1 佐藤勝彦教授:紫綬褒章

2002 年 4 月 29 日春の褒章発令において、佐藤勝彦 物理学教室教授が紫綬褒章を受賞されました。

佐藤教授は、1975年、重力収縮直後の超新星の中心部で高エネルギーニュートリノが10秒間程度閉じ込められた状態 になることを理論的に示し、重い星の進化の最終段階である超新星爆発の物理機構解明の端緒を切り開きました。実際、 この「ニュートリノ閉じ込め」が確かに起っていることが、その12年後、本学の神岡実験グループによる超新星1987A からのニュートリノ検出によって実証されました。また、最新の素粒子物理理論を宇宙現象に応用する方法論を積極的に 提案し、「素粒子論的宇宙物理学」と呼ばれている分野を開拓しました。とりわけ、1980年に誕生直後の宇宙にはその大 きさが時間の指数関数で急速に膨張時期が存在することを、米国のグース氏(現在 MIT 教授)と独立に指摘しました。 さらに、今では「インフレーション」と呼ばれて広く知られているこの理論に基づいて、宇宙の多重発生、バリオン数の 起源、宇宙の密度ゆらぎの起源、に関する数多くの画期的なアイディアを提唱しました。インフレーション理論の予言は、 2001年に発表されたマイクロ波背景輻射の高角度分解能気球実験により観測的にも確認されており、素粒子論的宇宙論 モデル構築における最も基本的なパラダイムとして完全に定着しています。このように、佐藤教授の先駆的かつ独創的な 研究の数々は、その後の宇宙物理学の発展において極めて重要な影響を与えたものとして、国内外で高い評価を受けてい ます。

# 2.2 和田昭允名誉教授: 勲二等瑞宝章

和田昭允名誉教授(本学元理学部長、理化学研究所ゲノム科学総合研究センター所長)が、2002年11月、秋の叙勲に おいて、勲二等瑞宝章を授与された。和田教授は生物物理学において数々の先駆的研究業績をあげられた。たとえば、溶 液中で DNA が 2 重ラセン構造を形成していることを世界で初めて実験的に証明するとともに、その規則構造に微細な安 定性の差があることを実証し、この差が DNA の遺伝情報と密接に関係することを示された。また、タンパク質の α ヘ リックス構造が巨大な電気双極子を持つことを世界で初めて示すなど、タンパク質分子の構造や機能における静電ポテ ンシャルの重要性を理論的・実験的に明らかにされた。さらに、生命現象の中に隠された物理を発見するために、流動 2 色性分光器、動的光散乱法、多次元分光器、DNA 塩基配列の高速自動解析装置などの独創的な手法を開発された。特に DNA 塩基配列の高速自動解析装置の開発は、最近、全塩基配列の解読が完了したヒトゲノム計画の歴史において、ラン ドマークのひとつに挙げられる研究となった。米国に先行すること5年、世界で最初に着手され、その研究から発展した 解析装置は長大なヒトゲノムの半数以上を解読する貢献を成した。現在、ヒトゲノムの解読の成果を生かしたポストゲノ ムの研究分野において、独創性と分野を越えた知の融合をモットーに、幅広いご活躍を続けられている。

# 2.3 樽茶清悟教授:仁科記念賞

樽茶清悟教授が「人工原子-分子の実現」により 2002 年度仁科記念賞を受賞された。樽茶教授は、半導体を高精度に加 工して、0から数 10 個の電子が入れられる小さく薄い円盤(人工原子)、さらには 2 個の人工原子からなる人工分子を作 製して、その中で、フント則やパウリの排他律効果などが成り立っていることを観測し、基本則の一般性を確認した。ま た、人工原子・分子では電場や磁場を利用して、軌道状態、電子数、スピン状態を自由自在に制御することができるが、 この特徴を生かして、磁場中での強い電子相関状態、新しいタイプの近藤効果などの重要な発見がなされている。今後 も、新しいデバイス、量子コンピューターの可能性など様々な発展が期待される。

# 2.4 小柴昌俊名誉教授:2002年ノーベル物理学賞

小柴昌俊名誉教授は、岐阜県神岡鉱山の地下に Kmaiokande 検出器を建設、世界に先駆けて宇宙からのニュートリノの直接観測を始め、これにより「ニュートリノ天文学」と呼ぶべき新しい活発な分野を創出し、素粒子物理学と天文学に 重要な発見・進展をもたらした。

1987 年 2 月に起きた 400 年ぶりの銀河系付近での超新星爆発の際には、Kamiokande 検出器は人類史上初めて超新星 からのニュートリノを捕らえた。我々の銀河に隣接する大マゼラン星雲で起こった超新星 SN1987A で生じた大量のニュー トリノは約 17 万年かけて地球に達し、地球をつき抜けて Kamiokande 検出器に下方から入りそのうちの 11 個が観測さ れた。ニュートリノを使うと光では観測できない星の内部を直接探ることができ超新星爆発のメカニズムを検証した。 Kamiokande 実験は、Davis が観測した太陽ニュートリノ・フラックスの欠如を、Davis の観測ではなし得なかった ニュートリノの到来方向、エネルギー、到来時刻の同時測定を行なうことによって確認した。

これらの発見・観測は、SuperKmaiokandeにおける大気ニュートリノ振動の観測、即ち、ニュートリノに質量がある ことの発見につながるものであり、素粒子物理学、宇宙物理学、天文学に新たな展望を開くものであった。

## 2.5 小柴昌俊名誉教授: Benjamin Franklin Medal in Physics 受賞

小柴昌俊名誉教授は、米国の Bhacall、Davis とともに、2003 年の Benjamin Franklin Medal in Physics を受賞した。 このメダルの正式な受賞理由は以下の通りである。小柴氏はニュートリノの到来時刻、エネルギー、飛来方向を正確に測 定できる巨大な Kamiokande 測定器をデザインし、日本に建設した。この実験では Davis の太陽ニュートリノ欠損の測 定結果を確認し、Davis の実験では捕らえられない種類のニュートリノを測定し、又、実際にニュートリノが太陽から来 ていることを証明した。この研究は、「ニュートリノ振動」と呼ばれるニュートリノの新しい性質の発見への準備となっ た。従来はニュートリノの質量は陽子と違ってゼロであると信じられていたが、ニュートリノ振動の発見によってゼロで ない質量を持つことが示された。太陽からニュートリノが飛来する途中ある種のニュートリノは別の種類のニュートリノ に変わり、Davis の実験のような装置には見えなくなってしまう。一方、小柴氏は「ニュートリノ振動」を観測できるよ うに実験をデザインしていた。小柴氏による発見は、Bhacall や Davis の研究とあいまって素粒子の基礎物理に新しい展 望を開くことを約束する。

## 2.6 佐貫智行助手(駒宮研究室):宇宙線物理学奨励賞

佐貫智行助手が、一次宇宙線の精密なエネルギースペクトルを発表した業績により、第2回(2001年度)宇宙線物理 学奨励賞を受賞した。

宇宙から飛来する一次宇宙線の大半を占める陽子とヘリウムが持つエネルギースペクトルの形や絶対流束は、宇宙線物 理学の基礎データである。過去数十年に渡り様々な測定が行われてきたが、測定された絶対流束は不定性が大きく、最大 で 50 %程の誤差が見込まれてきた。佐貫智行助手は、BESS 測定器が観測したデータを解析し、1 GeV から 120 GeV の陽子を 5 %の精度で、1 GeV/n から 54 GeV/n のヘリウムを 10 %の精度でエネルギースペクトルを示した。これら の結果は、過去の測定結果と比較して、統計的にも系統的にも圧倒的に優れている。同時期に観測を行った AMS 実験の 結果と共に、標準的なスペクトルとして宇宙線の研究に広く用いられるようになった。特に、大気ニュートリノ計算の精 度を向上することに成功し、ニュートリノ振動の研究に大きな貢献をすることにもなった。このように、基礎データの精 密な測定は、広い分野にまたがる研究を支えるものであり、これが評価されたと考えられる。

#### 2.7 安東正樹助手 ( 坪野研究室 ): 宇宙線物理学奨励賞

安東正樹助手が、レーザー干渉計型重力波検出器開発の業績により、2002年度宇宙線物理学奨励賞を受賞した。安東 正樹氏はこれまでの研究で、大きく分けて2つの方面での成果を残している。一つは重力波検出器の基礎技術であるパ ワーリサイクリングの研究であり、他方は実証型重力波検出器 TAMA300の開発および性能の向上である。パワーリサ イクリングの研究では、新しい制御法を考案し、それまで困難とされていた制御信号の分離を可能にした。また、国立天 文台に建設された基線長 300m レーザー干渉計重力波検出器 (TAMA300)の設計・開発・運転に携わった。2000年夏に は、レーザー干渉計重力波検出器として世界最高感度を実現し、我々の銀河系内で発生した重力波イベントを捉えるのに 十分な感度と安定度を達成した。この世界初の偉業は、彼の貢献を抜きにしては考えられないものである。

## 2.8 平野哲文博士(初田研究室):核理論新人論文賞

平野哲文博士は、「Is early thermalization achieved only near midrapidity in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 130$  GeV? (Phys. Rev. C65 (2002) 011901R)」の論文に対して、核理論新人論文賞を受賞した。この論文では、平野博士が中心となって開発してきた (3+1)次元での相対論的流体模型を発展させ、高エネルギー重イオン衝突を効率的にかつ精度よく記述できる枠組が与えられている。更に、これを用いて RHIC でのハドロンー粒子分布と楕円型フローの擬ラピディティ依存性を分析し、新しいデータとの比較に基づいて、熱平衡への到達度と QGP 生成領域についての新しい 描像を提出している。

## 2.9 横山将志博士(相原研究室):第4回高エネルギー物理学若手奨励賞

横山博士の博士論文 "Observation of Large CP Violation in the Neutral B Meson System Using  $B^0 \rightarrow J/\psi K_L$  Decay" に対して与えられた。 中性 B 中間子系での CP 非対称をはじめて直接観測したのは、この反応の KL を KS で 置き換えたモードである。KL モードは、CP 固有値が KS モードと逆で、従って非対称も逆になるはずであり、本論文 でこれを実証した。これにより、小林・益川モデルの検証と同時に、非対称が偶発的な事象でないことを確立し、実験そ

のものの正しさを裏付けた。KLの同定は、他の粒子に比べきわめて困難で、さまざまな運動学的量を駆使してバックグランドを減らし、CP非対称の観測に成功したことが高く評価された。

### 2.10 樋口岳雄博士(相原研究室):第19回井上研究奨励賞

樋口博士の博士論文 "Observation of CP Violation with  $B^0$  Decaying to the  $J/\psi K_S$ State" の研究は、中性 B 中間子がスピン1のJ/ 粒子とスピン0の中性 K 中間子(Ks)に崩壊する反応の時間発展を精度よく測定し、B 中間子 と反 B 中間子の間の非対称を発見したものである。この崩壊過程は、実験的に非常にクリーンに(バックグランドがほとんどない状態で)測定できること、さらに、小林・益川理論にもとづく CP 非対称の予言が強い相互作用による不定性なしに可能なことから、ゴールデンモードとよばれ、B ファクトリーでの研究における最大の目玉と考えられていた。樋口博士は、この測定に必要な半導体検出器のデータ解析に主導的役割を果たし、2001 年7月に Belle 実験グループによってなされた、B 中間子系における CP 非対称の発見に大きな貢献をなし、その業績を高く評価された。

# 2.11 堀正樹博士(早野研究室):第19回井上研究奨励賞

堀博士の博士論文 "Cascade of metastable antiprotonic helium atoms"の研究は、反陽子がヘリウム原子に捕獲され て反陽子ヘリウム原子という「エキゾティック原子」が生成されるとき、どのような量子状態を占めるかを実験的に解明 したものである。この問題は,1947年にエンリコ・フェルミおよびエドワード・テラーが理論的考察を行って以来、多 くの理論家によって研究されて来た重要な問題であるにもかかわらず、直接的な実験データが全く存在しない状況が半世 紀以上にわたって続いていた。堀氏の研究は、エキゾティック原子の初期生成過程を、レーザー分光の手法によって直接 的な実験データによって初めて解明した画期的なものとして高く評価された。

# 2.12 関口仁子博士 (酒井 (英) 研究室): 原子核談話会新人賞

関口仁子博士は、「重陽子--陽子弾性散乱による三体力効果の検証」により原子核談話会新人賞を受賞した。重陽子と陽子の弾性散乱について、従来に無い高精度で実験を遂行し、精密な理論計算と比較することにより、明確な三体力効果を見出した。とりわけスピン依存観測量の測定が、三体力モデルの区別に有効であることを示唆した。この研究が端緒となり、実験ならびに理論の少数系研究者に新たな関心を引き起こした。この研究の一部は"Complete set of precise deuteron analysing powers at intermediate energies: comparison with modern nuclear force predictions"として Phys. Rev. C 65 (2002) 034003. に掲載されている。

# 3 人事異動

#### [物理教室に来られた方々]

内田慎一	教授	2002年10月1日	配置換(新領域)
岩崎昌子	助手	2002年4月1日	採用
赤木和人	助手	2002年5月1日	配置換(物性研)
平澤正勝	助手	2002年5月16日	採用
長滝重博	助手	2002年9月1日	採用
小嶋健児	助手	2002年12月16日	配置換(新領域)
槙 亙介	助手	2003年2月1日	採用
岩崎弘典	助手	2003年2月1日	配置換(原子核セ)
田村俱子	第3事務分室	2002年4月1日	配置換(工学部)
並木葉介	事務室主任	2002年4月1日	配置換(教養学部)
山口淳一	物理事務室	2002年4月1日	配置換(学生部)
河島淑美	物理事務室	2002年4月1日	配置換(教養学部)

[物理教室から移られた方々]

長澤信方	教授	2003年3月31日	定年退職
新井宗仁	助手	2002年4月1日	転出(産総研)
河邊径太	助手	2002年7月4日	辞職
最上 要	助手	2002年10月31日	辞職
青井 考	助手	2002年12月31日	辞職(理化学研究所)
中暢子	助手	2003 年 3 月 31 日	辞職(理化学研究所)
田村了	助手	2003 年 3 月 31 日	転出(4.1静岡大)
武田いづみ	事務室主任	2002年4月1日	配置換(理学部)
中丸典子	事務室主任	2002年4月1日	配置換(理学部)
常行晴美	第1事務分室	2002年4月1日	配置換(工学部)
小澤みどり	物理事務室	2002年4月1日	配置換(国際交流)
永井公子	物理事務室	2002年4月1日	転出(宮崎医大)
大木ふみ江	物理図書室	2003年3月31日	定年退職
熊崎丈晴	物理事務室	2003年3月31日	転出(4.1国立歴史民族博物館)

# 4 役務分担

役務	担当教官	技官・事務官・事務補佐員
専攻長・学科長	酒井(英)	久保、熊崎、並木、佐々木
幹事	江口、牧島	久保、熊崎、並木、佐々木
専攻主任	青木	佐々木、河島、小原
理系委員(専攻副主任)	大塚	
常置委員	蓑輪、初田	
教務係	大塚(理学部教務委員)	佐々木、河島、小原
	蓑輪、山本、松尾(大学院)	
学生実験	相原、能瀬、藤森	樫村
就職係	長谷川、(大学院他部局:黒田(和))	横山
奨学金	藤川、蓑輪(大学院)	井上
会計係	佐野、相原	久保、並木、熊崎
号館関係	1 号館: 坪野、山本、4 号館長: 和達	久保
	旧1号館運営委員:坪野	
部屋割	櫻井	久保
技術部門 (統括)	坪野	大塚(茂)
試作室	坪野	
研究材料・回路	酒井(広)	
低温	岡本	
電顕	長谷川	
計算機・ネットワーク	相原	加倉井
図書係	桑島(理図書委員)、長谷川、松尾	大木、森田、山田
複写係	高瀬	熊崎
談話会	藤川、初田、佐野、常行、小林	江本
年次報告	小形	横山
記録係	村尾、常行	
物品供用官	早野	久保
環境安全	駒宮	
放射線管理	櫻井	
事務分室	第1:早野、第2:須藤、第3:和達	久保
理交会	岡本	久保
教職員親睦会	福山	
建物	樽茶、山本	久保
進学指導担当	駒宮	
ホームページ	須藤、初田、蓑輪	並木
	岡本、酒井 ( 広 )、駒宮	

# 5 教室談話会

< 2002年>

- 4月26日(金) 名取晃子氏(電気通信大学) 「半導体の表面エレクトロマイグレーションと表面電気伝導」
- 5月10日(金) 近藤 滋氏(理化学研究所・発生再生科学総合研究センター) 「反応拡散系と生物のパターン」
- 5月31日(金) 早野龍五氏 「エキゾティック原子」
- 6月7日(金) 宮下保司氏(東京大学医学部生理学教室)「脳機能を調べる:細胞と行動のあいだ」
- 6月14日(金) 佐藤勝彦氏 紫綬褒章受賞記念拡大談話会 「素粒子と宇宙」 駒宮幸男氏 「高温高密度クオーク物質とその相転移」 初田哲男氏 「超流動へリウムの相転移と位相欠陥」 福山寛氏 「超新星、中性子過剰核、ニュートリノ」 佐藤勝彦氏
- 6月21日(金) 江口 徹氏 「M理論とは何か - 超弦理論の新展開 - 」
- 7月5日(金) 山本 智氏 「分子雲形成と星形成」
- 7月19日(金) 佐々木 節氏(大阪大学大学院理学研究科)「ブレーンワールド 宇宙論の新展開-」
- 10月11日(金) Johanna Stachel 氏(ハイデルベルグ大学) 「The Mini-Bang in the Laboratory : Creating Quark Matter in Collisions of Heavy Atomic Nuclei」
- 10月25日(金) 常行真司氏 「水素-境界領域の物質科学」
- 11月1日(金) Benoit. B. Mandelbrot氏(エール大学) 「Fractals in Physics: Roughness and Complexity」
- 11月15日(金) B. R. Mottelson 氏 (NORDITA) 「Cold dilute and confined atomic gases provide a new example of artificial nuclei」

- 11月22日(金) Heinrich Rohrer 氏(元 IBM チューリッヒ研究所) 「The Magic of Small and Smaller : Nano-Science and-Technology」
- 12月24日(金) 山本喜久氏 (スタンフォード大学) 「Indistinguishable Quantum Particles: Bosonic Collision vs. Fermionic Collision」

#### < 2003年>

- 1月17日(金) 青木秀夫氏 「電子相関 - 分数量子ホール効果 vs 高温超伝導」
- 2月14日(金) 森 正樹氏(東大宇宙線研究所) 「超高エネルギーガンマ線天文学と CANGAROO 実験」
- 3月7日(金) 長澤信方氏(最終講義) 「励起子系のボース・アインシュタイン凝縮」
- 3月14日(金) 小松英一郎氏(プリンストン大学宇宙科学教室) 「WMAP First Year Results:宇宙論はどこまで分かったか」